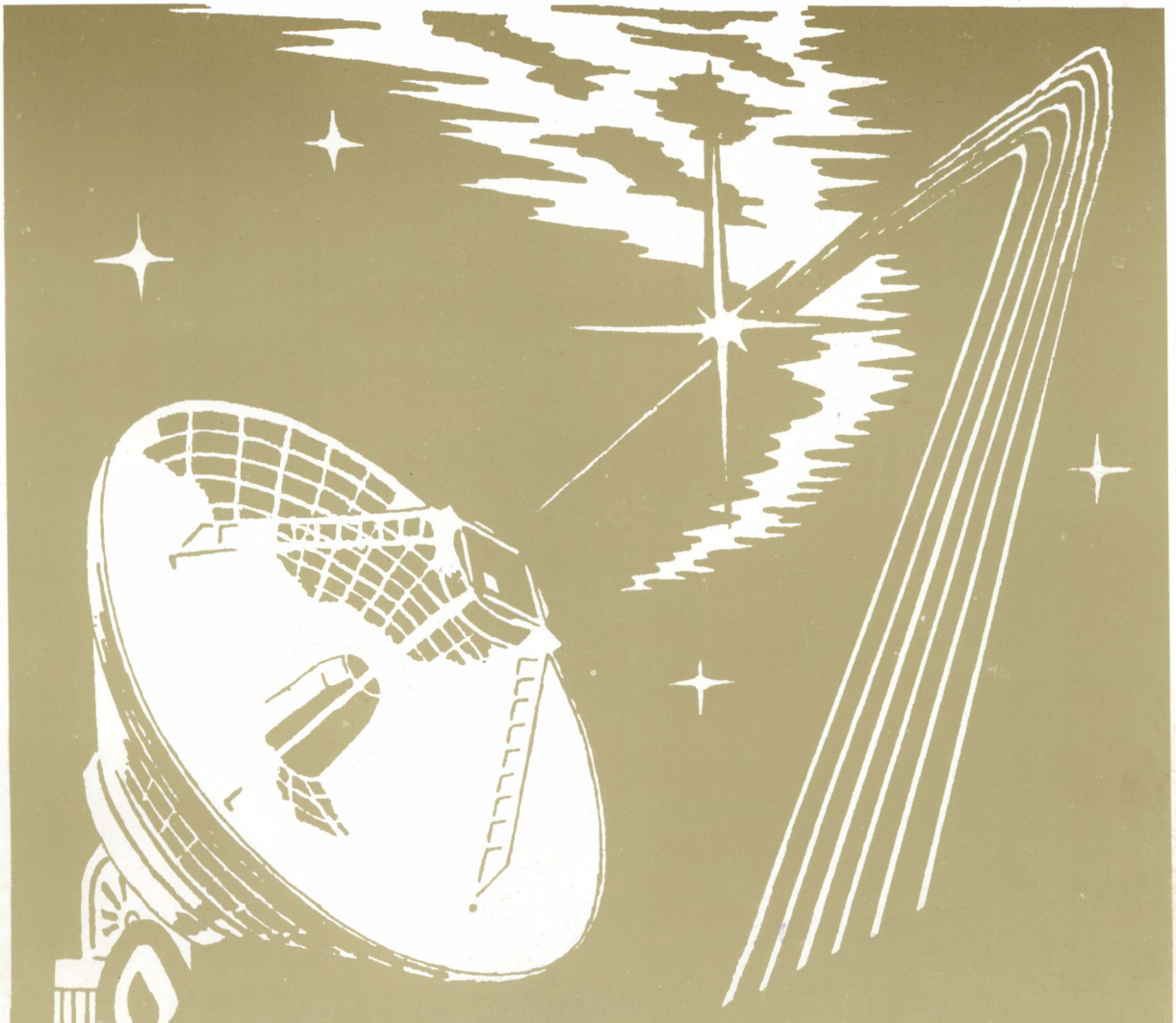


Радиотехнические тетради

№ 44

2011

50-летие полёта первого космонавта
Юрия Алексеевича Гагарина
12 апреля 1961 года

Журнал выходит с 1991 г.

УДК 621.396

«РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ТЕТРАДИ»
№ 44, 2011 г.

Учредители: Особое конструкторское бюро МЭИ,
Радиотехнический факультет МЭИ,
Редакция газеты «Энергетик»

Журнал зарегистрирован в Министерстве печати
и информации России, рег. № 669.

При перепечатке ссылка обязательна

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор Чеботарев А.С.,
Афанасьев В.П., Баскаков А.И., Брагин И.В.,
Гзовский В.М. (отв. секретарь), Грачев В.Г., Гусевский В.И.,
Замолодчиков В.Н. (зам. гл. редактора), Карташёв В.Г.,
Коган Б.Л., Кулешов В.Н., Пашков Б.А. (зам. гл. редактора),
Перов А.И., Удалов Н.Н.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В этом году мир отмечает 50-летие полёта первого космонавта планеты Юрия Алексеевича Гагарина, состоявшегося 12 апреля 1961 года. Его космический полёт открыл новую эру в развитии человечества! Этому выдающемуся событию, связанным с ним работами по подготовке и осуществлению пилотируемых полётов первых космонавтов, вкладу ОКБ МЭИ в их выполнение посвящены первые статьи данного номера журнала. Описаны этапы разработки бортовой и наземной аппаратуры, работы на заводах - изготовителях и на полигоне Байконур, приведены списки участников работ – сотрудников ОКБ МЭИ.

Три следующих статьи посвящены спутниковым радионавигационным системам, в том числе весьма актуальной системе обеспечения автомобильной радионавигации в городских условиях отсутствия видимости спутников из-за затенения строениями.

В области теории антенной техники рассмотрены вопросы построения ферменной зеркальной антенны.

Группа статей посвящена вопросам формирования, синхронизации и обработки сложных сигналов с помехозащитным кодированием.

Продолжена тематика применения радиолокационных методов в медицине – дистанционное измерение скорости кровотока.

Опубликована вторая часть работы в области студенческого изобретательства Радиотехнического факультета МЭИ, приведен перечень патентов, полученных студентами.

Остальные статьи посвящены различным направлениям теории и практики создания радиоэлектронной аппаратуры.

В возрасте 96 лет ушёл из жизни Лев Соломонович Гуткин – видный ученый в области теории радиоприёма и радиотехнических устройств, создатель кафедры Радиотехнических систем МЭИ, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники, Лауреат Государственной премии.

Коллективы ОКБ МЭИ, Радиотехнического факультета МЭИ и редколлегия журнала выражают соболезнование родным и близким Льва Соломоновича.

Журнал «Радиотехнические тетради» – федерального уровня, реферируется в ВИНИТИ, через Книжную палату поступает в основные научные библиотеки России.

К публикации в журнале принимаются статьи по всем областям радиоэлектроники, работы по теории и практике создания радиоэлектронной техники различного назначения, материалы по истории РТФ и ОКБ МЭИ, воспоминания ветеранов. Статьи проходят научное рецензирование.

Требования к оформлению материалов, представляемых в редакцию для публикации, размещены на последнем листе каждого номера журнала.

Перечень рефератов всех опубликованных статей и другую информацию о журнале можно получить в сети Интернет: http://www.okbmei.ru.

Редколлегия

СОДЕРЖАНИЕ

ВКЛАД ОКБ МЭИ В ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЕРВЫХ В МИРЕ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЁТОВ НА КОРАБЛЯХ «ВОСТОК» И «ВОСХОД) (К 50-летию полёта Ю.А. Гагарина)
Крисс П.Ж. **С. 6**

Показан вклад ОКБ МЭИ в обеспечение первых в мире космических полётов на кораблях «Восток» и «Восход». Изложены этапы создания аппаратуры телеметрии, траекторных измерений и телевидения. Приведены параметры кораблей, их предварительные пуски, подробно описан полёт Ю.А. Гагарина. Показаны этапы модернизации аппаратуры при последующих полётах первых космонавтов. Приведены списки участников этих работ. Статья подготовлена непосредственным участником работ с привлечением ряда материалов и документов, связанных с этими полётами.

ВСТРЕЧИ С СЕРГЕЕМ ПАВЛОВИЧЕМ КОРОЛЁВЫМ (Личные впечатления)
Белостоцкая К.К. **С. 19**

Приведены воспоминания сотрудника ОКБ МЭИ о личных впечатлениях от встреч с С.П. Королёвым на полигоне «Байконур» при стартах первых космонавтов на кораблях «Восток» и «Восход». Автор увидел не только сурового и жёсткого человека, который один нёс на себе груз величайшей ответственности, но и человека, который высоко ценил в людях личную ответственность, достоинство и честность в работе вне зависимости от занимаемой должности.

НА ЗЕМЛЕ КОСМОДРОМА. НАЧАЛО (Воспоминания радиоинженера)
Хомаза В.Ф. **С. 23**

Описаны история и условия проведения работ по созданию опорной геодезической сети на территории космодрома Байконур, в которых впервые в отечественной геодезической практике был успешно применен опытный светодальномер для выполнения линейных измерений с относительной точностью 1:100 000 на расстояниях до 10 км., что позволило сократить объем и сроки проведения геодезических работ в несколько раз и значительно ускорить строительство космодрома...

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ДИСКРИМИНАТОРОВ ЗАДЕРЖКИ ПРИ ПРИЕМЕ НАВИГАЦИОННОГО СИГНАЛА С МОДУЛЯЦИЕЙ BOC(1,1)
Перов А.И., Захарова Е.В. **С. 27**

Проведен синтез оптимального и квазиоптимального алгоритмов фильтрации относительных координат в аппаратуре потребителей спутниковых навигационных систем. Показано, что в оптимальной системе фильтрации достигается выигрыш по дисперсии ошибки оценки относительной дальности между объектами и дальности до навигационного спутника в 1,4 раза.

ОПТИМАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ КООРДИНАТ В АППАРАТУРЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ
Перов А.И., Стесина Л.Д. **С. 31**

Проведен сравнительный анализ характеристик двух типов временных дискриминаторов, предназначенных для приема сигнала с модуляцией BOC(1,1). Показано, что наилучшие характеристики по точности оценки задержки такого сигнала обеспечивает временной дискриминатор с запаздывающим и опережающим опорными сигналами. Дисперсия оценки задержки при использовании такого дискриминатора лишь на 33% выше нижней границы Рао-Крамера и в 3 раза меньше аналогичной дисперсии оценки задержки при использовании дискриминатора с четырьмя опорными сигналами.

СИНТЕЗ И АНАЛИЗ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ ПО СИГНАЛАМ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ И АВТОМОБИЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СЧИСЛЕНИЯ ПУТИ
Нагин И.А., Шатилов А.Ю. **С. 34**

Описана автомобильная система счисления пути. Поставлена задача и синтезирован комплексный алгоритм обработки информации от приёмника спутниковой радионавигационной системы и автомобильной системы счисления пути. Приведены результаты моделирования работы комплексного алгоритма в различных режимах и при различных параметрах входного воздействия

РАСЧЁТ РАДИОХАРАКТЕРИСТИК ФЕРМЕННОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ И СОПОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЁТОВ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ИЗМЕРЕНИЙ
Алексанян А.А., Фейзулла Н.М., **С. 39**
Описан алгоритм создания программы расчета характеристик зеркальной антенны ферменной конструкции, в которой вместо рефлектора с гладкой параболической поверхностью применяется рефлектор, аппроксимированный треугольными сегментами. Для подтверждения достоверности подученного алгоритма приведено сравнение результатов расчёта, полученных в созданной программе, с экспериментальными данными.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА С УГЛОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ В МНОГОЧАСТОТНЫМ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРЕ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ АКВАТОРИЙ
Хейн Тхура, Баскаков А.И. **С. 44**
Предложено использование зондирующего сигнала с угловой модуляцией при соответствующем выборе индекса модуляции, позволяющем получить спектр из 11 гармоник вместо многочастотного непрерывного сигнала космического радиоинтерферометра, предназначенного для анализа степени взволнованности поверхности акваторий с борта ИСЗ. Выбран оптимальный индекс модуляции. Показано, что величина квадрата модуля коэффициента взаимной корреляции гармоник обладает достаточной чувствительностью к высоте морских волн при рекомендуемых значениях разности рабочих частот, соответствующих диапазону измеряемых высот морских волн.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ РАДИОВОЛН В ГИДРОМЕТЕОРАХ И В ПЫЛЕВОМ ОБЛАКЕ ДЛЯ БОРТОВОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОЙ ПОСАДКИ ВЕРТОЛЕТА
Сейн Хту, Баскаков А.И.. **С. 50**
Проведено исследование ослабления радиоволн в гидрометеорах и в пылевом облаке для разработки бортовой РЛС посадки вертолета, работающей на частотах 35 ГГц и 94 ГГц, предназначенной для обеспечения предупреждения столкновения вертолета с препятствиями при посадке на площадках ограниченных размеров в дневных и ночных условиях, а также в сложных метеоусловиях

ДИНАМИКА СИНТЕЗАТОРА ЛЧМ СИГНАЛОВ С ИФАПЧ И СИГМА-ДЕЛЬТА МОДУЛЯТОРОМ
Черкашин А.А., Удалов Н.Н **С. 54**
Приведены соотношения для расчета времени переходного процесса по частоте и фазе при установке начальной частоты в синтезаторе ЛЧМ сигнала с сигма-дельта модулятором. В режиме формирования сигнала полученные выражения позволяют оценивать длительность переходного процесса по фазе, величину установившейся фазовой ошибки в системе и максимальную скорость ЛЧМ.

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ УСТАНОВЛЕНИЯ УЗЛОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ В ДЕКОДЕРАХ СВЁРТОЧНОГО КОДА
Рындык Т. И. **С. 60**
Предложен метод установления узловой синхронизации в декодере Витерби, позволяющий избежать непрерывного роста значений метрик и решить проблему переполнения памяти декодера. Кроме того предложенный метод позволяет оценивать качество принимаемой информации. Приведены экспериментальные результаты работы декодера свёрточного кода (133,171) для мягкого и жёсткого алгоритмов декодирования.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ С ВЫБОРКАМИ
Сафин А.Р. **С. 63**
В работе получены аналитические соотношения для спектров выходных сигналов бесфильтровой системы фазовой синхронизации с выборками в зонах деления и умножения частоты, которые позволяют количественно оценивать уровень побочных спектральных составляющих при отстройке относительно центров соответствующих зон синхронизма. Были проведены экспериментальные исследования режимов работы системы фазовой синхронизации с выборками с помощью установки National Instruments II DATEx, которые подтвердили предсказываемый из теории результат об уровне побочных спектральных составляющих в зонах умножения частоты.

ОБРАБОТКА ДОПЛЕРОВСКОГО СИГНАЛА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ КРОВОТОКА

Карташев В.Г., Сучков С.Л. **С. 67**

Рассмотрен алгоритм обработки сигнала при измерении скорости кровотока доплеровским методом. В качестве зондирующего сигнала предложено использовать сплит-сигнал, представляющий собой последовательность радиоимпульсов с различной частотой заполнения. Алгоритм обработки сигнала представляет собой согласованную фильтрацию каждого импульса с последующим суммированием обработанных импульсов с учетом задержек. В результате такой обработки обеспечивается высокая разрешающая способность как по скорости, так и по дальности. Рассмотрены корреляционные характеристики сплит-сигналов и их зависимость от порядка следования частот заполнения радиоимпульсов.

АКАДЕМИЧЕСКОЕ ИЗОБРЕТАТЕЛЬСТВО. Часть 2.

Мельников Б.С. **С. 71**

Представлены элементы методологии академического изобретательства, направленного на повышение качества творческой части квалификационных работ (курсовых, бакалаврских, дипломных, диссертационных) и пример разработки изобретения. Приведен список 50 студенческих патентов, выполненных по методике академического изобретательства

ГУТКИН ЛЕВ СОЛОМОНОВИЧ **С. 78**

К.т.н. П.Ж. Крисс

ВКЛАД ОКБ МЭИ В ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЕРВЫХ В МИРЕ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ НА КОРАБЛЯХ «ВОСТОК» И «ВОСХОД) (к 50-летию полета Ю.А. Гагарина)

Введение

12 апреля 2011 г наш народ и все человечество отмечает 50-летнюю годовщину одного из важнейших событий в истории мировой и отечественной науки и техники, в истории нашего народа и мировой истории – первого в мире полета человека – нашего гражданина Ю.А. Гагарина на космическом корабле «Восток» по орбите искусственного спутника Земли..Каждый, кто был современником этого события, не может забыть того невероятного, бурного, искреннего энтузиазма, с которым встретил это событие наш народ и народы всего мира. На какое-то время были забыты и внутренние проблемы и невзгоды, и международные осложнения, и даже личные проблемы.

Этот улыбчивый милый парень, исключительно обаятельный, стал мгновенно не только любимым сыном нашей Отчизны, но и всего человечества. Тем более не могут без волнения и радости вспоминать эти исторические дни те, кто непосредственно участвовал в организации и обеспечении этого полета, кто содействовал ему своим трудом, вложил в это великое дело частицу своей жизни. Данная статья посвящена вкладу Особого Конструкторского бюро Московского Энергетического института (ныне «ОАО «ОКБ МЭИ») в обеспечение космического полета Ю.А. Гагарина и последующих полетов космонавтов на кораблях «Восток» и «Восход».

Статья подготовлена одним из непосредственных участников работы по подготовке и пуску кораблей «Восток» с привлечением воспоминаний и материалов ряда других участников, а также ряда документов, связанных с этими пусками.

Общественно-политическая и экономическая обстановка в 60-ые годы XX века, как в нашей стране, так и в мире, была не простой, напряженной и противоречивой.

В нашей стране в эти годы во главе Политбюро КПСС, сосредоточившего в своих руках управление политикой, экономикой и всей жизнью страны, стоял Н.С. Хрущев. Он был активным и деятельным руководителем, при котором был значительный рост производства в разных отраслях промышленности. Было много сделано для укрепления оборонной мощи страны. В эти годы значительно повысился международный авторитет и влияние нашей страны в разделенном на два лагеря мире. Большие успехи, достигнутые в развитии военной, ядерной и ракетной техники, обеспечили так называемый «паритет», служивший достаточно надежной гарантией от развязывания Третьей мировой войны.

Вместе с тем, ряд мероприятий Н.С. Хрущева не смогли принести ожидаемого эффекта. Хотя по масштабу производства наша промышленность надежно заняла в мире второе место после США, но ее технологическая база, ее экономическая эффективность были низкими. Попытки коренной реорганизации управления промышленностью путем децентрализации и ликвидации отраслевых министерств оказались несостоятельными. Сельское хозяйство страны не могло обеспечивать должным образом растущие потребности населения. Не эффективными оказались ни подвиг комсомольцев по поднятию целины, ни массовое внедрение кукурузы.

Достаточно серьезным было и международное положение. Несмотря на объявленную политику мирного сосуществования двух лагерей и их военный «паритет», мир сотрясали локальные войны и конфликты, неоднократно создававшие ситуацию прямой угрозы столкновения двух лагерей.

В этом смысле такие события, как запуск первых искусственных спутников Земли, полеты на Луну и, тем более, полеты космонавтов, оказывали очень большое положительное влияние как на внутреннюю, так и на внешнюю обстановку.

Можно уверенно сказать, что решительно и эффективно поддерживая в эти годы развитие космической техники в нашей стране, руководство КПСС исходило не столько из желания реализовать заветную мечту человечества – выход в космическое пространство, но и из прагматического понимания, что даже очень значительные расходы, связанные с организацией и обеспечением космических полетов, в случае их успеха окупятся полностью. Улучшением внутриполитической обстановки, отвлечением населения от повседневных трудностей, сплочением и ростом ощущения национального единства, ростом международного авторитета страны, ослаблением напряженности и ростом в мире сознания единства всего человечества перед лицом могучих сил Природы, сознания огромных возможностей Человека.

С не меньшей уверенностью можно считать, что для С.П. Королева и сплотившейся вокруг него мощнейшей интеллектуальной творческой силы, именно желание при своей жизни, своими силами осуществить заветную мечту человечества играло значительно большую роль.

Поэтому после успешных запусков первых спутников, после завершения отработки ракеты Р7 и проведения первых полетов космических аппаратов к Луне, С.П. Королев и его соратники в качестве приоритетной цели поставили перед собой задачу запуска человека в Космос. Это направление было поддержано руководством страны и стало из мечты быстро воплощаться в реальность.

Начало

Полеты человека в Космос от мечты человечества и пищи для писателей-фантастов стали конкретным делом ученых, инженеров, конструкторов и

врачей тогда, когда по результатам запусков межконтинентальных ракет, ИСЗ, вертикальных пусков ракет с животными были получены достаточно надежные сведения по следующим вопросам:

- реально возможен запуск на орбиту ИСЗ аппарата с объемом и весом, достаточным для размещения в нем космонавта со всеми необходимыми средствами жизнеобеспечения;
- возможно обеспечить ориентацию корабля-спутника и поддержание в нем нужного теплового режима;
- космонавт выдержит перегрузки на этапах взлета и посадки и невесомость, хотя бы для начала кратковременную;
- корабль и космонавта можно надежно защитить от метеоритов и проникающих излучений космоса.

Здесь применен термин «корабль-спутник». Современный термин «космический корабль» появился впервые только при составлении информационного сообщения ТАСС о полете корабля 1КП.

Вместе с тем предшествующий опыт показал, что самыми сложными и неясными проблемами являются проблемы спуска корабля с орбиты и безопасное приземление космонавта. Именно эти проблемы были определяющими при поиске принципиальных решений конструкции будущего корабля.

Исследовательские работы в направлении создания космических кораблей начались в ОКБ-1 С.П. Королева еще в марте 1957 г в отделе, руководимом М.К. Тихонравовым. Уже в апреле М.К. Тихонравовым и К.Д. Бушуевым был разработан «План проектных исследований по созданию пилотируемых спутников». Было предложено дополнить для этого еще не летавшую ракету Р7 третьей ступенью и этим довести полезный груз, выводимый на орбиту ИСЗ, до 5 тонн. К 1958 г к этим исследованиям подключили отдел прикладной математики АН СССР, которым руководил академик М.С. Келдыш. Были проведены расчеты перегрузок при баллистическом спуске и комплексные исследования динамики полета на участке спуска. В августе 1958 г. группа К.П. Феоктистова, сформированная в отделе М.К. Тихомирова, выпустила технический отчет «Материалы предварительной проработки вопроса о создании спутника Земли с человеком на борту».

В отчёте были рассмотрены основные лётные характеристики корабля, рекомендовано его разделение на спускаемый аппарат с человеком (СА) и приборного отсека (ПО), предложены форма СА, способы его тепловой защиты, способы ориентации, система приземления, вопросы управления, измерения, связи и были сделаны следующие основные рекомендации:

- Спуск с орбиты СА должен быть проведен по баллистической схеме. При этом температура на его поверхности достигнет 30000С, а перегрузки составят 8-9 g. Эти перегрузки медики сочли допустимыми. Необходимая тепловая защита при этом потребует веса около 1,5 тонн;
- Наилучшая форма СА – сферическая;
- Необходимый импульс тормозной двигательной установки (ТДУ) 70-80 кгс;
- Угол вектора входа в атмосферу рекомендуется около 20^0;
- Приземление пилота после прохождения плазменного слоя должно обеспечиваться катапультированием на высоте 7-8 км и посадку с помощью парашюта;
- Должны быть обеспечены радиотелеметрические измерения, контроль параметров орбиты, выдача команд управления с Земли и двухсторонняя телефонная связь.

После детального обсуждения этого отчета в заинтересованных научных и конструкторских коллективах с осени 1958 г. началась разработка спутника в ОКБ-1, начала формироваться кооперация и выдаваться ТЗ на отдельные бортовые системы. С.П. Королев вышел с соответствующими предложениями в правительство.

22 мая 1959 г. вышло Постановление ЦК КПСС и СМ СССР №569-264 о разработке экспериментального варианта спутника для полета человека. В нем были утверждены основные предприятия и организации – исполнители и ответственные лица:

- ОКБ-1 (С.П. Королев) – головной исполнитель, исполнитель по конструкции корабля, системе
- ориентации, системе управления ТДУ, терморегулирования аварийного спасения, по сборке
- и испытаниям;
- ОКБ-2 (А.М. Исаев) – по ТДУ;
- ЦКБ-598 (Н.Г. Виноградов) – по приборам и датчикам ориентации;
- Завод №918 (С.М. Алексеев) – по скафандру;
- НИИ-695 (Л.И. Гусев) – по системам связи и пеленгации;
- НИИ-648 (А.С. Мнацаканян) – по командной радиолинии;
- ОКБ МЭИ (А.Ф. Богомолов) – по системам радиотелеметрии, контроля траектории и телевидению;
- ВНИИТ (Н.С. Лидоренко) – по источникам электропитания;
- ГНИИА и КМ (А.В. Покровский) – по медицинскому контролю и средствам жизнеобеспечения;
- НИИ ЯФ МГУ (С.Н. Вернов) – по дозиметрическому контролю.

Всего в кооперации, определением Постановления ЦК КПСС и СМ СССР, было 123 организации и предприятия, включая 36 заводов. В апреле 1960 г. был разработан эскизный проект «Восток». В нем были изложены результаты разработки трех модификаций кораблей-спутников:

- «Восток-1» (1К) – для отработки;
- «Восток-2» (2К) – для автоматической фотосъемки Земли и радиоразведки (необитаемый);
- «Восток-3» (3К) – для полета человека на орбите ИСЗ.

Вопросы разработки корабля-спутника «Восток-2» (2К) и его отработки и эксплуатации, в которых ОКБ МЭИ также приняло активное участие своими системами и своим персоналом, здесь не рассматриваются.

Далее по вопросам разработки кораблей «Восток» был принят еще ряд Постановлений ЦК КПСС

и СМ СССР, в которых определялись и уточнялись вопросы кооперации и сроки исполнения.

Наконец Постановлением ЦК КПСС и СМ СССР от 11 октября 1960 г. было предписано осуществить подготовку и запуск космического корабля «Восток» (3КА) с человеком на борту в декабре 1960 г. и считать это задачей особого значения. Этот срок оказался нереальным. После тщательной отработки на кораблях 1К пуск корабля 3КА с космонавтом Ю.А. Гагариным состоялся 12 апреля 1961 г.

Корабль «Восток»

Приведем краткие сведения о космическом корабле «Восток», каким он вышел в космическое пространство (конструкция корабля приведена на обложке журнала):

Корабль «Восток» состоял из двух основных отсеков: спускаемого аппарата (СА) и приборного отсека с тормозной двигательной установкой (ПО с ТДУ).

- Стартовая масса корабля (без головного обтекателя) была около 4,7 т, в том числе СА– 2,5 т, ПО –2,3 т.
- Длина корабля по корпусу 4,3 м, максимальный диаметр по корпусу 2,3 м..
- Свободный объем СА 1,6 $м^3$.
- Величина перегрузки на участке спуска 9-10 g..
- Расчетная максимальная длительность полета 10 суток..
- Системы ориентации – основная с использованием инфракрасных датчиков земной вертикали, резервная с использованием солнечных датчиков, а также ручная с использованием визуальных средств (система «Взор»), пульта управления и ручки ориентации.

Электропитание от аккумуляторов раздельно для ПО и СА.

- Системы жизнеобеспечения и терморегулирования поддерживали в СА нормальную по составу атмосферу с давлением 755-775 мм р.с., с содержанием кислорода (21-25)% и с температурой (17-26)^{0}С. Запасы пищи, воды и 1мкости для сброса отходов были рассчитаны на 10 суток.
- Для обеспечения двухсторонней радиосвязи (телефонной) в системе радиосвязи «Заря» предусмотрены две линии КВ-диапазона и одна - УКВ-диапазона..
- Для пеленга места приземления был предусмотрен передатчик-маяк, включающийся после катапультирования (система «Сигнал»). В ней также была предусмотрена передача минимально необходимой информации о состоянии космонавта.
- Командная радиолиния (КРЛ) обеспечивала прием на корабле 63 команд с Земли (с подтверждением исполнения) для управления комплексом бортовой аппаратуры.
- Циклограмма работы бортовой аппаратуры в автоматическом режиме обеспечивается программно-временным устройством (ПВУ).
- Тормозная двигательная установка (ТДУ) имела массу (с учетом массы рабочего тела) 396 кг. Представляла собой жидкостный двигатель с тягой 1600 кгс (горючее - на основе аминов, окислитель – азотная кислота). ТДУ для схода с орбиты уменьшала орбитальную скорость корабля на 100-140 м/с.
- Для приземления СА были предусмотрены вытяжной парашют площадью 1,5 $м^2$, тормозной парашют площадью 18 $м^2$, выбрасываемые по команде датчиков внешнего давления атмосферы на высоте 4 км и основной парашют площадью 574 $м^2$, выбрасываемый на высоте 2,5 км. Штатная скорость приземления 10 м/с.
- Катапультируемое кресло космонавта было снабжено тремя парашютами: тормозным (2 $м^2$), основным (84 $м^2$) и запасным (56 $м^2$). Возможен выброс запасного парашюта непосредственно после выброса основного, и спуск на двух парашютах, как это и было сделано при спуске Ю.А. Гагарина.
- Стреляющий механизм кресла производил катапультирование со скоростью 20м/с.
- Для случая аварии ракеты, находящейся на старте, на кресле были установлены пороховые ускорители, способные придать креслу с парашютом скорость до 48 м/с и выбросить его на высоту, достаточную для раскрытия парашютов.

Конструкция корабля

- СА - сфера, сваренная из алюминиевого сплава, толщиной 3 мм.
- Теплозащита - асбестовая ткань, пропитанная бакелитом.
- Толщина теплозащиты в лобовой части 110 мм, в тыльной 40 мм.
- Три люка диаметром 1 м. Один для входа и катапультирования, второй - для вытяжки парашютов, третий - технологический, для монтажа оборудования.
- Внутри СА - поролоновая обшивка.
- ПО - два соединенных основаниями, усеченных конуса из листов алюминиевого сплава толщиной 2 мм и точеных шпангоутов.

Аппаратура ОКБ МЭИ

Задачи радиотелеметрии, контроля траектории и телевизионной передачи изображения космонавта обеспечивались измерительным комплексом «Восток», разработанным в ОКБ МЭИ. Бортовая аппаратура этого комплекса входила в состав корабля и размещалась в ПО, наземная - на стартовой позиции и измерительных пунктах командно-измерительного комплекса.

- Радиоизмерительный комплекс космического корабля «Восток» имел в своем составе:
- Радиотелеметрическую систему «Трал» с бортовым устройством «Трал-П1»;
- Комплекс радиотехнических средств траекторных измерений в составе: радиолокационных станций «Бинокль-Д» (на заключительных этапах - станций «Кама»), работающих по бортовым ответчикам «Рубин-Д», прецизионных угломерных станций фазовой пеленгации «Иртыш», работающих по бортовым передатчикам-маякам «Факел-М»;
- Телевизионную систему «Трал-Т» (на дальнейших этапах - «Топаз-10» и «Топаз-25»).

Радиотелеметрическая система «Трал» обеспечивала телеметрическую информацию о состоянии физических параметров космонавта, о работе систем жизнеобеспечения, о состоянии и функционировании всех систем и агрегатов корабля, о ходе полета, ориентации, работе ТДУ и других параметрах и характеристиках систем корабля, о состоянии и работе всех систем первой, второй и третьей ступени ракеты-носителя.

На носителе были установлены бортовые устройства «Трал-П1» на одном из блоков первой ступени и на третьей ступени.

На корабле – бортовое устройство «Трал-П1» с орбитальным запоминающим устройством ЗУ-О.

Система «Трал» была разработана в 1953-1955 гг. применительно к задачам отработки ракеты Р7, была освоена в серийном производстве, успешно обеспечила отработку Р7 и ее головных частей, запуски первых трех ИСЗ, отработку ракет Р14 и Р16. Станции «Трал» были развернуты в районе старта и по трассе полета Р7, по три станции на каждом измерительном пункте. Наземные станции поставлялись кооперацией нескольких заводов (№567, №528, объединением «Светлана» и др.). Бортовая аппаратура поставлялась Львовским радиотехническим заводом.

Система «Трал» обеспечивала измерения напряжения на выходах датчиков постоянного и переменного токов и контактных датчиков по 48 каналам с частотой опроса до 500 Гц с погрешностью около 1% на дальностях до 3000 км.

Орбитальное запоминающее устройство ЗУ-О устанавливалось на кораблях «отработочной» серии 1К, имело 16 каналов с частотой опроса около 6 Гц и воспроизводилось по 12 каналам системы «Трал».

Радиолокационная станция «Бинокль-Д» обеспечивала измерение наклонной дальности и угловых координат корабля, на котором в ПО был установлен ответчик «Рубин-Д». Станция «Бинокль» и ее модернизация «Бинокль-Д» тоже была разработана для контроля траектории ракеты Р7 и успешно обеспечила все траекторные измерения при пусках Р7 и первых трех ИСЗ. Серийным изготовителем станции был Кунцевский механический завод (КМЗ). Станциями «Бинокль-Д» в количестве от двух до четырех были оснащены как район старта, так и все измерительные пункты командно-измерительного комплекса.

Станция «Бинокль-Д» при работе по приёмо-ответчику «Рубин-Д» обеспечивала измерение по дальности более 3000 км с погрешностью 15-50 м и по угловым координатам около 3 угловых минут. Для точного определения координат измеряемого объекта применяли метод «трех дальностей», для чего была предусмотрена возможность одновременной работы бортового устройства с несколькими станциями. В ходе работы с кораблями «Восток» станция «Бинокль-Д» постепенно была заменена более современной станцией «Кама», разработанной ОКБ МЭИ с участием КБ КМЗ и Казанского завода электронных вычислительных машин.

Серийным изготовителем бортового ответчика «Рубин-Д» был Казанский завод радиокомпонентов (впоследствии - объединение «Элекон»). На последних этапах работ с кораблями «Восток» и «Восход» ответчики «Рубин-Д» были заменены на более современные ответчики «РДМ-3», разработанные ОКБ МЭИ для использования на кораблях «Союз».

Фазовые пеленгаторы «Иртыш» обеспечивали с высокой точностью измерение угловых координат и угловых скоростей линии визирования объекта измерения, на котором устанавливался излучатель, работающий в непрерывном режиме излучения при небольшом уровне мощности. Станция «Иртыш» была разработана ОКБ МЭИ по заказу ОКБ-1 с целью обеспечения повышенной точности траекторных измерений при отработке Р7, использовалась при ее отработке и при запуске третьего «научного» ИСЗ.

Станциями «Иртыш» было оснащено большинство измерительных пунктов командно-измерительного комплекса. Поставщиком станций был КМЗ. Передатчик-маяк «Факел-М», устанавливаемый в ПО корабля, поставлялся Львовским радиотехническим заводом.

Станции «Иртыш» были всенаправленными в пределах от 2π по азимуту и $\pm\pi/2$ по углу места, не требовали наведения и в этих пределах измеряли на дальностях до 3000 км угловые координаты с погрешностью 10^{-4} радиан и угловые скорости в пределах 10^{-5} радиан в секунду.

Телевизионная система «Трал-Т» была разработана совместно ОКБ МЭИ и Ленинградским институтом телевидения (ЛИТ). В этой системе видеосигнал, поступающий с камер, преобразовывался во временное положение измерительного импульса относительно опорного при числе измерительных импульсов 6000 в секунду и при синхронизации пачками импульсов, подобных маркерным сигналам системы «Трал». Система обладала очень хорошей помехоустойчивостью и была по существу прообразом современного цифрового телевидения. Однако, недостаточное число импульсов (по сравнению с современными возможностями) не позволяли обеспечить телевидение в принятом тогда стандарте. В системе «Трал-Т» число строк было ограничено величиной 100, а число кадров – 10 в секунду. В кооперации ОКБ МЭИ обеспечивало преобразование видеосигнала в импульсный сигнал, его измерение, прием на Земле и обратное преобразование в видеосигнал.

ЛИТ поставлял камеры – источник видеосигнала на борту, бортовую систему освещения и на Земле – регистраторы сигнала на кинопленку.

В ходе работ по пускам корабля «Восток» в ОКБ МЭИ без участия ЛИТ были разработаны более совершенные системы «Топаз-10» и «Топаз-25». Последняя, используя частотную модуляцию и эффективную систему синхронизации, обеспечивала с тремя камерами на борту телевидение в современном стандарте (625 строк, 50 кадров в секунду) и его прямую трансляцию в телевизионную сеть страны.

Поставщиками аппаратуры телевидения были соответственно ОКБ МЭИ и ЛИТ. Станции приема телевидения были расположены в Медвежьих озерах (филиал ОКБ МЭИ под Москвой), в Красном селе под Ленинградом и в районе старта. Впоследствии к этим пунктам прибавились станции в Крыму под

Симферополем и под Уссурийском на Дальнем Востоке.

Аппаратура систем телеметрии и траекторных систем обслуживалась персоналом полигона и персоналом измерительных пунктов измерительного комплекса при техническом руководстве представителей ОКБ МЭИ. Аппаратура телевидения, напротив, обслуживалась персоналом МЭИ и ЛИТ с участием персонала полигона.

На территории СССР вдоль трассы полётов от Байконура до Камчатки были размещены пункты приема и регистрации телеметрической, телевизионной и траекторной информации, на которых были установлены приемные станции ОКБ МЭИ. Кроме этих измерительных средств в приеме телеметрической информации участвовали станции «Трал», установленные на плавучем измерительном комплексе на теплоходах «Краснодар», «Долинск» и «Ильичевск», находившиеся в дни пусков в Гвинейском заливе Атлантического океана.

ОКБ МЭИ в 50-70-е годы

Особое конструкторское бюро Московского Энергетического института (ОКБ МЭИ) к 1958 г было молодой, очень активной и быстро растущей организацией, получившей заслуженное признание специалистов по ракетно-космической технике и предприятий этой отрасли.

ОКБ МЭИ было сформировано Постановлением Правительства СССР путем реорганизации Сектора специальных работ МЭИ, в свою очередь, созданного Правительством СССР в 1947 г по инициативе небольшой патриотически-настроенной группы преподавателей и научных сотрудников радиотехнического и электрофизического факультетов МЭИ, возглавляемой профессором В.А. Котельниковым. За 6 лет руководства В.А. Котельникова и последующих 5 лет сменившего его А.Ф. Богомолова немногочисленный коллектив Сектора уже добился ряда выдающихся достижений. В период с 1947 по 1953 гг. им была разработана, освоена в серийном производстве и передана на вооружение Советской Армии система РКТ контроля траектории и определения точки падения ракет Р2 и Р5. Успех этой работы привел к тому, что Сектору было поручено обеспечение траекторных измерений ракеты Р7. Для траекторных измерений Р7 Сектором были разработаны две траекторные системы: система «Бинокль» с ответчиком «Факел-Д» – радиолокационная система на базе РКТ и система «Иртыш» с передатчиком-маяком «Факел-М» – первая в мире угломерная фазово-пеленгационная система высокой точности. На базе этих систем был создан наземный измерительный комплекс по трассе полета Р7 от стартовой площадки Тюра-Тама до Камчатки, обеспечивший отработку ракеты Р7, а потом Р9, Р14, Р16 и десятков других ракет.

Для телеметрических измерений Р7 была разработана передовая для того времени многоканальная точная радиотелеметрическая система «Трал». В честной конкурентной борьбе с другими предприятиями была одержана победа и система «Трал» была принята в качестве основной для отработки Р7 и ее головных частей, и успешно справилась с этой задачей.

В 1957 г. с помощью систем «Бинокль», «Иртыш» и «Трал» были обеспечены пуск первого и второго ИСЗ. При этом для второго ИСЗ с собакой Лайкой в фантастически короткий срок (меньше месяца) был разработан специальный вариант бортовой аппаратуры «Трал», пригодный для длительной работы в космическом вакууме.

За успешную работу по отработке Р7 и при запусках первых ИСЗ большая группа работников Сектора была награждена орденами СССР, а А.Ф. Богомолову было присвоено звание Героя Социалистического труда.

Вместе с формальным преобразованием Сектора в ОКБ МЭИ коллектив получил возможность быстрого роста и развития. Началось строительство нового лабораторного корпуса и корпуса будущего Опытного завода. Быстро росла численность за счет лучших выпускников МЭИ и других высших учебных заведений. Начал функционировать научно-исследовательский полигон ОКБ МЭИ на Медвежьих озерах.

В 1958 г в ОКБ МЭИ был разработан специальный вариант радиотелеметрической системы «Трал» для третьего «научного» ИСЗ, известного как «Объект-Д». Для траекторных измерений по третьему спутнику была проведена модернизация аппаратуры траекторных измерений. Этими средствами были успешно решены траекторные и телеметрические задачи третьего спутника. В этом же году была разработана новая радиолокационная система траекторных измерений «Кама» и начат процесс замены на нее станций «Бинокль».

Для обеспечения испытаний ракет Р7 на максимальную дальность с точкой падения в акватории Тихого океана был разработан и поставлен на корабли плавучего измерительного комплекса специальный вариант станции «Кама» – станция «Кама-М».

В 1958-1959 гг. в ОКБ МЭИ были созданы уникальные для того времени антенные сооружения с диаметром рефлектора 25 и 35 м – антенны ТНА-200 на Медвежьих озерах и ТНА-400 на измерительном пункте вблизи Симферополя. Антенна ТНА-400, оснащенная специальным вариантом станции «Кама», внесла большой вклад в обеспечение полетов первых космических аппаратов к Луне.

ОКБ МЭИ сыграло решающую роль в отработке головных частей ракет Р7, обеспечив с помощью уникального запоминающего устройства (система «Яхонт») получение информации на участке падения головных частей (ГЧ) ракет в земной атмосфере, на котором невозможна радиосвязь вследствие огромного затухания радиоволн в плазменном слое вокруг ГЧ.

Система «Трал», бортовые устройства которой были полностью переведены с радиоламп на транзисторы, была основной радиотелеметрией так называемых «малых научных спутников» разработки М.К. Янгеля, большим числом запускаемых под названием «Космос».

В 1957 г. была начата предварительная проработка радиотелескопов особо больших размеров с

диаметром зеркала 64 м, в дальнейшем известных под названием ТНА-1500.

К 1959 г. в штате ОКБ МЭИ было около 500 штатных сотрудников. Кроме того, в работе ОКБ участвовало от 100 до 200 преподавателей и сотрудников разных кафедр МЭИ. Опытный завод также имел около 500 рабочих и инженеров. Однако, главной силой ОКБ МЭИ была сложившаяся вокруг него промышленная кооперация, насчитывающая несколько десятков заводов и заводских КБ, в том числе ряда крупных радиозаводов, таких как КМЗ, Казанский завод радиокомпонент, Львовский радиозавод, Московский радиозавод, Ленинградский завод «Светлана» и другие.

Представители ОКБ МЭИ имели глубокие научно-технические, организационные и личные связи с рядом головных предприятий ракетно-космического профиля и их ведущими сотрудниками. В процессе пусков ракет и ИСЗ, в процессе эксплуатации командно-измерительных комплексов сложились такие же глубокие связи с командованием и персоналом молодых ракетных войск, с персоналом полигонов и профильных НИИ Министерства обороны.

Все изложенное показывает, что решение С.П. Королева при разработке космического корабля «Восток» поручить обеспечение траекторных и телеметрических измерений на этом корабле коллективу ОКБ МЭИ во главе с А.Ф. Богомоловым было совершенно естественным, достаточно ответственным и обоснованным. С другой стороны, эти же обстоятельства давали возможность А.Ф. Богомолову и коллективу ОКБ МЭИ принять ответственно к исполнению это почетное поручение.

По установившейся традиции ведущие сотрудники ОКБ МЭИ имели постоянные тесные и неформальные дружеские отношения и ведущими разработчиками космической техники в ОКБ-1. Поэтому подготовка к решению радиотехнических задач, связанных с созданием и пуском первых обитаемых космических аппаратов началась в ОКБ МЭИ почти одновременно с началом разработки будущего корабля «Восток». Проработка технических решений в области траекторных, телеметрических измерений и телевизионной передачи с корабля «Восток» была развернута в ОКБ МЭИ намного раньше выхода соответствующего Постановления Правительства СССР. Постановление Правительства по этому вопросу было подписано 22 мая 1959 г и дошло до ОКБ МЭИ по бюрократическим каналам только в середине июня. А еще 16 мая А.Ф. Богомолов подписал распоряжение № 40 об открытии темы «Восток» и назначил П.Ж. Крисса её руководителем. В Постановлении Правительства СССР ОКБ МЭИ было определено «головной организацией по траекторным и телеметрическим измерениям и создании радиолинии передачи изображения объекта «Восток».

В течении трех месяцев был сформирован коллектив разработчиков и был выпущен эскизный проект радиотехнического комплекса «Восток-1».

Наиболее подготовленные к решению поставленных задач были наземные станции радиотелеметрической системы «Трал» и станции траекторных измерений «Бинокль-Д» и «Иртыш». Развертывание работ по объекту «Восток» совпало с началом замены траекторных станций «Бинокль-Д» на новые более совершенные станции «Кама», созданные ОКБ МЭИ в кооперации с КМЗ. Тем не менее, на станциях «Трал» должны были быть проработаны новые режимы записи информации, воспроизводимой бортовыми записывающими орбитальными устройствами ЗУ-О.

В связи с особой ответственностью траекторных измерений на этапе выдачи команды на торможение объекта должна была быть разработана и проведена серия мер по повышению надежности и оперативности измерения и передачи данных на этом этапе работ на станциях траекторных измерений.

Бортовые устройства радиотелеметрии «Трал-П1» к этому времени уже серийно изготовлялись Львовским радиотехническим заводом и прошли «боевое крещение» на головных частях ракет Р7 в ходе их отработки. Однако должна была быть решена задача их стыковки с записывающими устройствами ЗУ-О. Бортовые устройства системы траекторных измерений «Рубин-Д» и «Факел-М» тоже уже имели серийных изготовителей. Это были соответственно Казанский завод радиокомпонент и Львовский радиотехнический завод. Первые тоже прошли «боевое крещение» на головке Р7, вторые – на ряде ракет ПВО.

Предметом новой разработки для всех бортовых устройств радиотехнического комплекса «Восток» были бортовые антенны – фидерные устройства. Здесь совместными силами антенных отделов ОКБ МЭИ и ОКБ-1 (НПО «Энергия») были разработаны применительно к сложной конфигурации объекта «Восток» антенны в трех диапазонах десятисантиметровом, дециметровом и метровом, с хорошим КПД, с изотропным излучением и высокой надежностью в условиях полета корабля. Наличие в составе комплекта пяти передатчиков поставило сложную задачу обеспечения электромагнитной совместимости с приемными устройствами систем командного управления и систем радиосвязи объекта с Землей (система «Заря»).

Сложная задача стояла также перед конструкторами ОКБ МЭИ и ОКБ-1 по компоновке большого числа приборов радиотехнического комплекса в приборном отсеке и установки излучателей бортовых антенн.

Однако, главным предметом новой разработки были системы телевидения, названные в Постановлении ЦК КПСС и СМ СССР «радиолинией передачи изображения». Идея поставить на объект телевизионную систему и организовать телевизионную передачу из космоса возникла практически одновременно с самой идеей создания «Востока». Ее одновременно подхватили в двух организациях: ОКБ МЭИ и Ленинградском институте телевидения (НИИ-380). Эти организации уже имели опыт сотрудничества при совместной разработке системы передачи изображения обратной стороны Луны. Тогда были рассмотрены два варианта: использование для передачи фотографии Луны через радиоканал разработки ОКБ МЭИ или через радиоканал разра-

ботки НИИ-885 (ныне - РНИИ КП). Был реализован второй вариант, однако, связи ОКБ МЭИ и ЛИТ, возникшие в ходе совместных разработок, сохранились.

Было принято решение о создании совместной разработки под названием «Трал-Т». При этом ЛИТ обеспечивал поставку телевизионных камер и наземных средств регистрации изображения. ОКБ МЭИ взяло на себя преобразование видеосигнала камер в код системы «Трал», его излучение с борта, прием на Земле и обратное преобразование в видеосигнал. Новую систему предстояло разработать и разместить в ряде наземных измерительных пунктов и ввода в эксплуатацию менее чем за год.

Работы по созданию и ввод в эксплуатацию радиотехнического комплекса «Восток» распределились в ОКБ МЭИ следующим образом:

- Система «Трал» – С.М. Попов, Б.М. Мальков, Ю.П. Бычков.
- Бортовая система «Трал-П1» – Э.А. Цвелев. Э.Л. Лабазов.
- Бортовая система «Рубин-Д» – М.М. Смирнов, Ю.П. Филатов.
- Ббортовое устройство «Факел-М» – В.Д. Карамоско.
- Бортовомй комплекс «Трал-Т» – Ю.И. Лебедев, Н.И. Розов, Г.П. Хабаров, Д.Н. Герасимов,
- В.А. Попов.
- Наземный комплекс «Трал-Т» – Б.М. Мальков, В.С. Денисов.
- Бортовые антеннаы комплекса – С.М. Веревкин, В.И. Гусевский, К.К. Белостоцкая
- Наземные антенны комплекса – И.Ф. Соколов, Н.М. Фейзулла.
- Заминающие бортовые устройства ЗУ-О – М.Е. Новиков, В.И. Чихачева, П.А Кожин, А.А. Гиппиус.
- Комплекс аппаратуры на корабле «Восток» – П.Ж. Крисс, Н.А Терлецкий, М.Е. Новиков,
  К.А. Победоносцев
- Наземные средства траекторных измерений – Н.В. Жерихин, А.Г. Головкин, З.М. Флексер,
  К.К. Лубны-Герцык, В.И. Галкин

Конструирование аппаратуры «Трал», «Трал-П1», «Трал-Т», «Топаз-10», «Топаз-25» и «Рубин-Д» было выполнено в конструкторском отделе ОКБ МЭИ, руководителем которого был первый заместитель Главного конструктора К.К. Морозов. В этой работе принимала участие большая группа инженеров-конструкторов – Г.Н. Попов, Г.Н. Важенцев, И.Л. Клейнзингер, С.В. Гармонщиков, Н.А. Правиков, М.Ф. Данилов, Е.И. Носова, Н.Л. Русаков, В.С. Трушанов, Р.С. Вачьян, Л.А. Гончарова, С.Л. Устинов, В.А. Чулков, А.В. Машкова (Быстрякова), З.Д. Короткова и другие.

Конструирование наземных станций «Бинокль-Д», «Кама» и «Иртыш» было выполнено в ОКБ Кунцевского механического завода по техническим заданиям ОКБ МЭИ. Руководителем работ в этом ОКБ был Ю.М. Репьев. Большую роль в успешном выполнении этой работы сыграли И.Е. Калуцков, Н.И. Адамский, Д.Б. Берхип, В.И. Фролов, М.Е. Девкин, Б.К. Особливец.

Лётная отработка кораблей

Пуску кораблей «Восток» с космонавтами, разумеется, предшествовала очень энергичная, детальная и всесторонняя лётная отработка, проведенная в исключительно короткие сроки. За 11 месяцев этой подготовки было проведено 10 пусков нескольких модификаций кораблей, специально предназначенных для целей отработки.

В ходе этой лётной отработки должны были быть проверены принятые технические решения. К ним относились:

- Проверка принятых методов отделения СА.
- Проверка достаточности тепловой и радиационной защиты СА.
- Проверка раскрытия парашютов и безопасности посадки.
- Проверка основного и резервного состава системы ориентации.
- Проверка тормозной двигательной установки.
- Уточнение факторов воздействия условий космического пространства на человека и эффективности принимаемых мер защиты.
- Проверка средств и систем жизнеобеспечения.

Корабли, предназначенные для лётной отработки, делились на три группы. В первой группе был запущен один корабль, так называемый «простейший» корабль под индексом 1КП. От штатного корабля он отличался отсутствием теплозащиты СА, отсутствием средств жизнеобеспечения и телевизионной системы. Его главной задачей были отработка системы ориентации и тормозной двигательной установки.

Работа с кораблем 1КП началась на полигоне Тюра-Там 28 апреля 1960 г. Пуск состоялся 15 мая 1960 г. В ходе этого пуска радиотелеметрией «Трал» была показана неработоспособность основной системы ориентации (инфракрасной вертикали). Однако, данные телеметрии были ошибочно проигнорированы специалистами ОКБ-1, вследствие чего С.П. Королев не решился перейти на «солнечную» систему ориентации. В итоге тормозное устройство сработало при произвольной ориентации и корабль, вместо торможения перешел на более высокую орбиту (690 км) и остался на ней на десятки лет. Тем не менее, в ходе полета 1КП был получен полезный материал по работе многих систем корабля. Системы ОКБ МЭИ в этом пуске, как и в остальных, работали надежно и без существенных замечаний.

Вторая группа кораблей под индексом 1К отличалась от штатной комплектации тем, вместо космонавта в нем выводились в космос многочисленные представители флоры и фауны, и, прежде всего, две собаки. Кроме собак, в кораблях этого типа в космос выводились мыши и крысы, мухи-дрозофилы, водоросли и даже зерна кукурузы (возможно, как дань увлечения Н.С. Хрущева). Таких кораблей было шесть, из них запущено в космос было четыре. Ап-

паратура ОКБ МЭИ на них была в самой полной комплектации.

Корабль 1К №1 с собаками Лисичкой и Чайкой, запущенный 28 июля 1960 г. погиб на 23 секунде полета в результате взрыва ракеты-носителя. Менее чем через месяц, 20 августа 1960 г. был запущен корабль 1К №2 с собаками Белкой и Стрелкой. В ходе этого пуска телеметрией снова был обнаружен отказ основных систем ориентации. Но на этот раз С.П. Королев принял верное решение. Торможение и посадка произошли нормально с использованием резервной солнечной системы ориентации. Контейнер с собаками в полной сохранности был обнаружен относительно быстро.

Следующим стартовал 1 декабря 1960 г. корабль 1К №5 с собаками Пчелкой и Мушкой. Вследствие ошибки в системе управления ориентацией корабль перед торможением был ориентирован с ошибкой в 180^0 (!) и был подорван системой аварийного подрыва.

Следующий корабль 1К №6 из-за неисправности носителя не набрал космической скорости и упал в районе Якутска, не выйдя на орбиту. К счастью, контейнер с собаками Шуткой и Кометой уцелел и собаки не пострадали.

Несмотря на то, что фактически из пяти пусков полностью удачным был только один, совокупность всех этапов всех пусков дала необходимый материал для перехода к следующему этапу отработки.

Следующим этапом отработки были запуски кораблей 3К с манекенами, достаточно точно имитирующими космонавта в скафандре. Имитация была настолько точной, что при первом взгляде можно было принять манекен за человека, сидящего в СА в скафандре. Такое сходство привело даже на первом полете к недоразумению. Каким-то образом несколько кадров «Трала-Т» проникло в СМИ и породило легенду о погибшем в полете космонавте. Вывод был сделан срочно, и далее под скафандр была положена табличка с крупными буквами «Макет». Цеховые работники сразу прозвали манекен «Иван Иванович» (И.И.). Кличка привилась. Даже появилась манера, входя на участок испытаний корабля здороваться с «Иван Ивановичем».

Было проведено два пуска корабля с «И.И.». Кроме манекена в корабле летела очередная собака. Основной целью этих пусков была отработка системы посадки, обнаружения спасения. Были установлены штатная система радиосвязи и обнаружения. Системы ОКБ МЭИ были в полном комплекте, кроме запоминающих устройств ЗУ-О.

9 марта 1961 г состоялся успешный пуск И.И. с собакой Чернушкой, а 25 марта 1961 г. такой же успешный пуск И.И. с собакой Звездочкой. Путь к запуску человека был открыт. 29 марта комиссия Президиума СМ СССР по военно-промышленным вопросам, а 3 апреля 1961 г. Президиум ЦК КПСС дали разрешение произвести запуск человека в Космос. ОКБ МЭИ может с достаточным основанием считать, что безупречная работа его радиотехнического комплекса на всех этапах лётной отработки обеспечили возможность её успешного завершения в фантастически короткие сроки. В процессе подготовки кораблей «Восток» в цехе №40 Опытного завода ОКБ-1 в Подлипках, на технической и стартовой позиции полигона Тюра-Там, работы по установке приборов и систем на корабли, по заводским автономным и комплексным испытаниям, испытаниям на ТП и предполетным испытаниям на старте проводила небольшая по численности группа разработчиков и испытателей из состава ОКБ МЭИ. Работами этой группы поочередно руководили П.Ж. Крисс, М.Е. Новиков, К.А. Победоносцев и Н.А. Терлецкий. Обычно, руководитель испытаний в цехе 40 уезжал с этим кораблем на полигон, другой заменял его в цеху на испытаниях следующего корабля, и далее по циклу. Иногда подменяли друг друга по разным причинам служебного или личного характера. Кроме этих руководителей в испытаниях участвовали по одному двум специалистам-разработчикам соответствующих систем. По «Тралу-П1» – Э.А. Цвелев, Д.Н. Герасимов, Э.А. Лабазов, В.А. Попов. По «Рубину-Д» – М.М. Смирнов, А.К. Штофф, Ю.П. Филатов. По этим системам полигонные службы имели большой опыт работы, фактически полностью их обеспечивали, и представителям ОКБ МЭИ оставались функции контроля. Другое дело – система «Трал-Т». Здесь у полигона своих специалистов не было. Поэтому аппаратуру «Трал-Т», особенно на первых кораблях , обслуживала бригада специалистов ОКБ МЭИ и ЛИТ. И те и другие в ходе этих работ овладевали не без труда навыками телевизионных операторов. У работников ОКБ МЭИ такого опыта не было, а опыт работников ЛИТ относился к студийным и нестудийным передачам, и в условиях небольшого замкнутого пространства СА не годился. Правильная установка освещения в условиях многочисленных отражений было мучительной и долгой операцией. От ЛИТ этой работой занимались И.Л. Валик и П.Ф. Браславец. От ОКБ МЭИ – Ю.И. Лебедев, Г.П. Хабаров, В.П. Виноградов, Н.В. Розов. Большую работу выполнили антеннщики. Настройка коллективных антенн для передатчиков «Трал-Т» и «Трал-П1» с учетом требований взаимной разводки и электромагнитной совместимости с КРЛ и системой связи было сложной задачей, требовавшей не только опыта и знаний, но и незаурядной технической эрудиции. С этой работой успешно справлялись С.М. Веревкин, В.Д. Стариков, В.И. Гусевский, А.С. Корчагин и, особенно, К.К. Белостоцкая, заслужившая своей самоотверженной работой признание и уважение самого С.П. Королева.

Подготовку запоминающих устройств, также малознакомых персоналу полигона, вели лично М.Е. Новиков, В.С. Баринов, А.А. Гиппиус, Б.М. Летунов, П.А. Кожин, В.А. Чихачева.

Большую школу в ходе подготовки последних кораблей отработочной серии прошли молодые испытатели Э.М. Мамыкин, Д.М. Солодов, В.В. Черноусов. Все участники работ понимали, что переход к кораблям с космонавтами на борту требует особой ответственности от каждого. Ведь от надежной работы зависит жизнь космонавта. Ошибки или отказ каналов телеметрии может привести к неверным режимам в ходе пуска. Ошибки или отказ в траектор-

ных системах могут привести к неправильной пространственной привязке запуска ТДУ и ошибке в расчетном импульсе, что также поставит жизнь космонавта под угрозу. Требования к технологической дисциплине стали особенно жесткими после трагедии с ракетой Р16 в сентябре 1960 г, унесшей жизнь маршала М.И. Неделина и большой группы ракетчиков.

Участники Гагаринского пуска от ОКБ МЭИ

А.Ф. Богомолов очень серьезно относился к подбору участников подготовки первого корабля 3КВ с космонавтом на борту. Предполагалось, что руководить работой нашей команды при испытаниях этого корабля будет Н.А. Терлецкий. Но в результате его болезни эти обязанности А.Ф. Богомолов возложил на самого молодого в группе руководителей – К.А. Победоносцева. Руководимая им команда испытателей ОКБ МЭИ имела следующий состав:

- К.А. Победоносцев – руководитель.
- В.И. Гусевский – ответственный за антенный комплекс.
- Н.В. Розов – ответственный за систему «Трал-Т».
- В.А. Попов – ответственный за систему «Трал-П1».
- Э.М. Мамыкин – ответственный за систему «Рубин-Д».

Руководство ОКБ МЭИ на пуске первого корабля 3КВ было представлено А.Ф. Богомоловым и С.М. Поповым.

На станции измерительного комплекса были направлены лучшие специалисты – Н.В. Жерихин, А.Г. Головкин, Ю.А. Дубровин, И.Ф. Шмельков, Б.М. Мальков, В.С. Денисов и другие.

Полёт Ю.А. Гагарина

8 апреля 1961 г Государственная комиссия утвердила первое в истории человечества задание космонавту: «... выполнить одновитковый полёт вокруг Земли на высоте 180...230 км продолжительностью 1 час 30 минут с посадкой в заданном районе. Цель полёта – проверить возможность пребывания человека на специально оборудованном корабле, проверить оборудование корабля в полете, проверить связь корабля с Землей, убедиться в надежности приземления корабля и космонавта».

На этом же заседании комиссии первым космонавтом был утвержден старший лейтенант Юрий Алексеевич Гагарин. 11 апреля были проведены все необходимые испытания корабля 3КВ на стартовой позиции. И 12 апреля 1961 г Мир услышал Гагаринское «Поехали!»

О полете Ю.А. Гагарина, его триумфальном возвращении и торжественном круизе по всем странам мира написано очень много.

В данной статье описана роль ОКБ МЭИ в обеспечении этого полета. Все средства ОКБ МЭИ в полете работали безупречно. Радиотелеметрическая система подтвердила нормальное функционирование всех систем ракеты-носителя и корабля, если не считать незначительной ошибки в системе управления носителя, приведшей к небольшому увеличению апогея по отношению к расчетной. Эта ошибка была успешно компенсирована работой ТДУ.

А эмоциональный настрой этого дня хорошо отразила в своем искреннем и тёплом стихотворении непосредственная участница пуска, оператор одной из станций «Трал», супруга одного из руководителей телеметрической службы полигона Тюра-Там, Х.Н. Краскина

Уходит в прошлое, в забвенье
В тенёта памяти моей
Апрельских дней тех потрясенье,
Что испытали средь степей.

Да был ли этот день весенний,
Венец бессонных озарений,
Исканий творческих и мук,
Трудов неисчислимых рук?

Дерзаньем духа вдохновенным
Ворвался в космос человек,
Носитель разума вселенной
В наш электронный быстрый век.

Да! Был и день, и было утро,
И ночь томительно текла,
И было всем предельно трудно
Дожить до девяти утра.

Никто не спал. Слились сердцами.
Ждала ракета – без «бобов»!
И степь широкими шагами
Усталый мерил Королев.

Застыли ИПы в ожидании
Во всех концах родной Земли.
И ждали старта в Океане
С Гвинеей рядом корабли.

И вот среди дневного жара
«Ключ! Зажигание! Подъем!»
Мы слышим голос циркуляра
«Восток» пошел! Гагарин в нем!

«Поехали!» – звучит с небес!
«Заря!» – «Я Кедр! Полет нормальный!
Режим в кабине оптимальный!»
Свершилось чудо из чудес!

Конец молчанию! Объятья!
Гремит над степью Левитан!
То тут, то там рукопожатья,
И не один налит стакан!

И пусть прошло немало лет
Всегда как радость с нами будет
Апрельских этих дней отсвет
Средь повседневных этих буден !:

Приведем краткое поминутное описание полета этого корабля, получившего наименование «Восток-1».

Старт корабля состоялся в 9.07 по московскому времени. Корабль весом 4125 кг был выведен на орбиту с перигеем 181 км и апогеем 327 км. Продолжительность этапа выведения на орбиту составила 11 мин 30 сек. Система ориентации включилась в

9.51. В течении полета космонавт на активном участке вел радиосвязь с Землей, передавал показания приборов, фиксировал изменение перегрузок, моменты разделения ступеней ракеты-носителя, оценивал уровень шумов. Далее вёл наблюдение в иллюминаторы, контролировал работу системы ориентации с помощью оптического прибора системы ручной ориентации «Взор», записывал наблюдения на планшет и на магнитофон. Изображение космонавта передавалось на Землю системой «Трал-Т» с помощью двух телевизионных камер, установленных в СА. Гагарин успешно отведал «космической пищи» из тюбиков.

В 10.25, когда корабль находился над Гвинейским заливом, где базировались корабли, оснащенные станциями «Трал», на 44 секунды включилась тормозная установка (в автоматическом режиме с использованием основной схемы) и корабль перешел на траекторию спуска. Космонавт закрыл гермошлем, ранее открытый после отделения корабля от ракеты-носителя. СА отделился от ПО. Радиосвязь пропала в 10.35. Возникли значительные перегрузки (более 5 g) в течение около 100 сек. На высоте 7 км произошло автоматическое катапультирование кресла с космонавтом из СА. Основной и резервный парашюты совместно обеспечили благополучное приземление космонавта в 10.55 в 6 км от берега Волги, в 1,5 км от деревни Смеловка Терновского района Саратовской области. СА приземлился на парашюте несколько раньше в двух км от космодрома.

Последующие полёты космонавтов. Выход в открытый космос

После полета Ю.А. Гагарина, продолжавшегося около 1,5 часов (один с небольшим виток вокруг Земли) были проведены в течение 1961-1963 гг. еще пять космических полетов на кораблях «Восток».

6 августа 1961 г стартовал корабль «Восток-2» с космонавтом Г.С. Титовым. Этот полет продолжался 25 часов. Корабль описал 15 витков вокруг Земли, что позволило прессе применить романтическую метафору «15 космических зорь». В ходе полета космонавт с помощью профессиональной репортажной камеры «Конвакс» в течение 10 минут производил съемку Земли через иллюминаторы СА. Эти кадры оказались на страницах газет и телеканалах всего мира.

Далее состоялся «групповой полет» космонавтов А.Г. Николаева и П.Р. Поповича на кораблях «Восток-3» и «Восток-4» соответственно. Корабль «Восток-3» стартовал 11 августа 1962 г, а корабль «Восток-4» 12 августа 1962 г. Старт двух ракет с одного стартового сооружения в течение двух суток и одновременный полет в течение 70 часов двух кораблей потребовали исключительного напряжения и слаженной работы как стартовой команды, так и всех служб космодрома и измерительного комплекса.

Полет «Восток-3» продолжался 94 часа, полет «Восток-4» – 71 час. В ходе полета космонавт Николаев вел из корабля киносъемку Земли, а Попович – линию горизонта и зоны терминатора. На кораблях, кроме телевизионной системы, были видеокамеры, регистрирующие действия космонавтов во время полета.

Особенностью следующего совместного полета двух кораблей «Восток» стало то, что одним из космонавтов была женщина. 14 июня 1963 г стартовал корабль «Восток-5» с космонавтом В.Ф. Быковским, а 16 июня 1963 г – корабль «Восток-6» с первой в истории человечества женщиной-космонавтом В.В. Терешковой. Полет «Восток-5» продолжался 120 часов, полет «Восток-6» – 72 часа. Кроме обычной уже работы по наблюдению за работой агрегатов корабля и съемки Земли, были проведены опыты по ручной ориентации корабля и достаточно профессиональные съемки Земли на специальную пленку с целью последующих оценок яркости вертикального профиля атмосферы.

Все шесть полетов прошли нормально, без серьезных проблем и замечаний, если не считать организационной неразберихи в наземных службах при поиске В.В. Терешковой, приведшей к некоторой задержке в ее обнаружении после посадки.

С точки зрения радиотехнического комплекса ОКБ МЭИ в части телеметрии и контроля траектории полеты всех этих кораблей ничем не отличались. Все средства выполнили свою задачу безупречно.

Что касается телевизионной системы, то в ходе полетов этих кораблей произошли значительные изменения в лучшую сторону. В ходе серии этих полетов телевизионная система «Трал-Т» была заменена на более современные телевизионные системы «Топаз-10» и «Топаз-25», разработанные в ОКБМЭИ уже без участия ЛИТ.

Дело было в том, что после первых удачных сеансов с системой «Трал-Т» специалисты ОКБ задумались – а нужно ли ОКБ МЭИ для создания телевизионных систем сотрудничество с ЛИТ?. Конструктивно-технологически аппаратура ЛИТ значительно уступала аппаратуре ОКБ МЭИ, конструкторы и технологи которого уже прошли суровую школу работы на военную, особенно - ракетную технику. А что касается специфики телевизионной аппаратуры, то в МЭИ, на кафедре телевидения, возглавляемой известным теоретиком и практиком отечественного телевидения профессором Г.В. Брауде, были специалисты, понимающие в этом не хуже сотрудников ЛИТ.

Для создания собственной телевизионной системы были созданы две работоспособные группы: бортовая под руководством Г.П. Хабарова и наземная под руководством В.С. Денисова. Общее руководство этих работ осуществлял С.М. Попов. Бортовые передатчики разрабатывались под руководством Н.А. Терлецкого, Н.М. Простовым, Д.И. Герасимовым, С.М. Володарской. Регистрирующие устройства разрабатывал Ю.Д. Смолянников.

К полету кораблей «Восток-3» и «Восток-4» была подготовлена новая телевизионная система «Топаз-10» (10 кадров в секунду, 400 строк прогрессивной развертки). Именно она работала на двух кораблях в совместном полете августа 1962 г. А в течение 1962 г. была разработана еще более совершенная система «Топаз-25» (25 кадров в секунду при тех же 400 строках прогрессивной развертки). И, наконец, в

1964 г. была введена в действие система «Топаз-25М2», работающая в стандартном телевизионном вещательном варианте (625 строк, 50 полукадров чересстрочной развертки). Были проведены необходимые технические мероприятия для обеспечения возможности прямого выхода в вещательную сеть СССР и приема на обычные телевизоры. Для обеспечения нужного качества сигнала был разработан новый бортовой передатчик повышенной мощности и новые приёмные антенные системы ТНА-100 и ТНА-150 на опорно-квадратных устройствах на базе лафетов защитных артиллерийских орудий. Начиная с полета В.В. Терешковой в системе «Топаз» появился дополнительно к видеосигналу и звуковой сигнал.

По планам развития полетов в Космос дальнейших пусков кораблей «Восток» не предполагалось. В ОКБ-1 уже готовился новый намного более совершенный корабль «Союз». Но в плановые сроки – к 1964 г. он не мог быть подготовлен.

А у Н.С. Хрущева появились сведения о подготовке американцами трехместного космического корабля. И Н.С. Хрущев дал указание о срочном проведении доработки корабля «Восток» с целью обеспечения полета в нём трех космонавтов. Разместить в «Востоке» трех космонавтов можно было только без скафандров и при условии обеспечения посадки корабля вместе с космонавтами, без их предварительного катапультирования. Необходимые доработки привели к увеличению веса корабля до 5,7 тонн, что привело в свою очередь к необходимости увеличения мощности третьей ступени носителя. Новому кораблю было присвоено наименование «Восход». Первоначально предполагались запуски двух «Восходов» – одного технологического, беспилотного, для проверки проведенной модернизации, а второго – с тремя космонавтами.

Но, вошедший во вкус, С.П. Королев предложил сделать две модификации «Восхода» – один – это трехместный корабль, а другой – двухместный, но с шлюзовой камерой и возможностью выхода космонавта в открытый Космос. Кораблям были присвоены названия «Восход-1» и «Восход-2».

После сложной и долгой работы по обеспечению надежности мягкой парашютной посадки трехместного СА 6 октября 1964 г. был успешно проведен пуск «технологического» «Восхода» и началась интенсивная подготовка к пуску корабля «Восход-1», для которого были отобраны: летчик В.М. Комаров, врач, специалист по космической медицине Б.Б. Егоров и один из создателей корабля «Восток» К.П. Феоктистов.

Состав измерительного комплекса ОКБ МЭИ на «технологическом» корабле и на корабле «Восход-1» не отличался от состава на последних кораблях «Восток». На борту стояли системы «Трал-П1», «Рубин-Д» и «Топаз-10». При пуске «технологического» корабля все системы работали нормально. А вот при подготовке к пуску корабля «Восход-1» имел место единственный случай отказа системы «Трал-П1» (не на корабле, а на третьей ступени носителя). Это привело к задержке старта на несколько часов. 12 октября 1964 г корабль «Восход-1» стартовал, впервые осуществив полет на одном корабле экипажа из трех космонавтов. Корабль благополучно совершил суточный полет, и его СА успешно совершил мягкую посадку на двух раскрывшихся штатно парашютах.

В ходе полета КК «Восход-1» был получен большой объём телевизионной информации системы «Топаз-10». Это дало возможность смонтировать первый короткометражный «космический» телевизионный фильм.

Известно, что после успешного завершения полета КК «Восход-1» К.П. Феоктистов подарил А.Ф. Богомолову фотографию трех космонавтов с надписью: «Спасибо за драгоценности и снасть», имея в виду системы ОКБ МЭИ «Трал», «Рубин» и «Топаз».

После успешного полета КК «Восход-1» началась интенсивная подготовка к пуску КК «Восход-2», на котором предполагался впервые в мире выход человека в открытое космическое пространство. Была разработана надувная шлюзовая камера, мягкий вариант скафандра. Камеры системы «Топаз-25» были установлены вне корабля таким образом, чтобы можно было контролировать процесс надувания шлюзовой камеры, выход космонавта и его передвижение в Космосе.

Приемные станции системы «Топаз-25» были развернуты на старте, в Медвежьих озерах, Красном селе под Ленинградом, на Симферопольском измерительном пункте и на новом пункте под Уссурийском на Дальнем Востоке. Для прямого выхода сигнала системы «Топаз-25» в кабельные линии Центрального телевидения была развернута новая радиорелейная линия (спутниковой системы «Молния – Орбита» тогда еще не существовало).

18 марта 1965 г. КК «Восход-2» стартовал с космонавтами П.И. Беляевым и А.А. Леоновым, где А.А. Леонову предстоял выход в космическое пространство через шлюзовую камеру и возвращение на корабль после нескольких минут пребывания в открытом Космосе. Вывод на орбиту прошел благополучно. Так же благополучно прошел 19 марта и выход А.А. Леонова в Космос. Этот процесс при помощи системы «Топаз-25» транслировался непосредственно в Москву. А.А. Леонов провел в открытом Космосе 12 минут 9 секунд. Однако, при возвращении на корабль возникли трудности. Для этого пришлось «сбросить» давление в скафандре и несколько «похудеть». Этот процесс также был показан «Топазом-25». Не обошлось без проблем и при возвращении на Землю. Система ориентации не сработала, ТДУ в автоматическом режиме не включилась и экипажу пришлось все операции проделать вручную. В результате посадка произошла в глухой тайге северного Урала, откуда космонавтов и СА доставили не скоро, с большими трудностями, но, к счастью, без каких-либо повреждений.

Пленки системы «Топаз-25», собранные со всех станций, позволили сделать телевизионный фильм «Восход-2». Этот фильм был смонтирован в телевизионном центре на Шаболовке бригадой ОКБ МЭИ в составе Е.В. Зубкова, А.И. Кузяева, Л.А. Краснова и Ю.Д. Смолянникова.

Впоследствии этот фильм получил первую премию – «Золотую ракету» – в номинации фильмов, посвященных Космосу на VII Международном фестивале телевизионных фильмов в Риме в июле 1965 г.

Корабль «Восток-3Д» с искусственной силой тяжести

Последней работой, выполненной в ОКБ МЭИ для космических кораблей «Восток», была разработка в 1965 г. аппаратуры для корабля 3КД, еще одного корабля типа «Восток», на котором предполагалось провести эксперимент по созданию искусственной силы тяжести в космосе. Для этой цели из корабля «Восток» должен быть выпущен на тросе противовес и осуществлена раскрутка системы «корабль–противовес» вокруг центра масс этой системы с помощью небольшого «движка», установленного на противовесе. ОКБ МЭИ взялось за создание системы управления раскруткой и контроля взаимного положения корабля и противовеса. Была создана командно-измерительная система повышенной надежности «Коралл-В» (Рук. А.Г. Васильев, разработчики А.В. Копейко, Б.А. Пашков, О.И. Бутко, М.Е. Чудаков и др.). Был подготовлен специальный комплект телевизионной системы «Топаз-25» для наблюдения за раскруткой как из корабля, так и с Земли. Аппаратура этой системы была разработана, изготовлена на Опытном заводе МЭИ и поставлена в ОКБ-1. Однако, в этот момент С.П. Королев, в целях сосредоточения всех усилий на программе «Союз» и «Н1», отложил работы по этому кораблю, готовая аппаратура была отправлена на склад, а после неожиданного ухода С.П. Королева из жизни эти работы были прекращены.

В начале данной статьи были рассмотрены важные причины, по которым руководство СССР сочло необходимым предоставить все возможные ресурсы великой страны в распоряжение ученых и конструкторов с тем, чтобы решить первыми задачу вывода человека в Космос, на орбиту ИСЗ.

Ожидания руководства сбылись полностью, и даже с избытком. Влияние непрерывных крупных достижений в освоении Космоса, нараставших с 1961 по 1965 гг., оказалось замечательным и даже превзошло ожидания руководства КПСС.

Обаятельные, умные, энергичные Ю.А. Гагарин, Г.С. Титов, особенно В.В. Терешкова стали любимцами широких масс во всем мире и, естественно, стали символом, образом Советского Союза. Это не могло не привести к разрядке и созданию более благоприятных условий для международной деятельности СССР, повышению его влияния в мире.

С другой стороны, эти же достижения, прежде всего полёт Ю.А. Гагарина, добавили к «ракетно-ядерной» гонке еще и гонку «космическую». Эту гонку открыл в 1961 г. Президент США Джон Кеннеди своим амбициозным заявлением о планах высадки американских космонавтов на Луну.

Внутри страны космические достижения тоже были встречены с большим энтузиазмом. Сильно повысился в народе авторитет и уважение к ученым, инженерам, конструкторам – творцам этих достижений, хотя еще много лет их имена по нелепым соображениям секретности не объявлялись народу, хотя были прекрасно известны во всем мире. Было забавно видеть в газете «Правда» статью С.П. Королева о полете Ю.А. Гагарина за подписью «Профессор К. Сергеев». Разумеется, спасти советскую экономику от кризиса, вызванную глубокими причинами, описание которых не входит в нашу задачу, эти выдающиеся достижения не могли. Свидетельством этому был кризис в руководстве КПСС, завершившийся снятием Н.С. Хрущева в самом апогее этих космических успехов. Но для ОКБ МЭИ успешная работа по обеспечению космических полетов имела большое положительное значение.

Достижения ОКБ МЭИ

Наши достижения были высоко оценены С.П. Королёвым, а затем Правительством СССР. Большая группа сотрудников ОКБ МЭИ и предприятий, входивших в его кооперацию, была удостоена высоких правительственных наград, орденов и медалей. А само ОКБ МЭИ было награждено указом Президиума Верховного Совета СССР от 17 июня 1961 г Орденом Трудового Красного знамени «за успешное выполнение заданий Правительства по созданию специальной техники».

Авторитет ОКБ МЭИ и его руководителей сильно вырос. Связи с другими предприятиями космической отрасли и с командованием ракетных войск укрепились.

Неуклонно росла численность коллектива и его техническая оснащенность. К концу работ с кораблями «Восток» и «Восход» численность ОКБ МЭИ составляла уже около 1500 человек при такой же численности Опытного завода. Быстро осваивались новые технологические процессы от микрополосковой техники до изготовления кварцевых резонаторов и керамических изделий.

Аппаратура ОКБ МЭИ стала применяться не только на баллистических ракетах и космических объектах, но и в авиации, в средствах ПВО и ПРО. Апогей бурного роста пришелся на 80-е годы, когда ОКБ МЭИ стало крупным предприятием в области ракетно-космической электроники и насчитывало в своих рядах вместе с Опытным заводом около 6000 человек и имело за спиной мощную производственную кооперацию из нескольких десятков крупных заводов.

Все это позволило ОКБ МЭИ добиться в 70-е и 80-е годы новых выдающихся достижений, среди которых картографирование планеты Венера с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой, обеспечение траекторных измерений нескольких десятков космических аппаратов различного назначения, в том числе кораблей «Союз» до настоящего времени, создание космического комплекса средств сбора специальной информации «Целина», системы дистанционного зондирования Земли на космической станции «Мир», ввод в строй двух уникальных радиотелескопов ТНА-1500, создание сети антенн ТНА-57 телевизионной системы «Орбита-Молния», впервые обеспечившей телевизионным вещанием территорию СССР и ряда зарубежных стран, и многих других.

После ухода по болезни с поста директора А.Ф. Богомолова коллектив ОКБ МЭИ под руководством К.А. Победоносцева сумел преодолеть трудности периода распада СССР и советской экономики, в новых условиях сумел удержать основные кадры и профиль работ, и, несмотря на значительное сокращение по численности, под новым руководством Генерального директора А.С. Чеботарева продолжает и развивает традиции ОКБ МЭИ и занимает одно из ведущих мест в ракетно-космической отрасли России.

Заключение

Полёты космических кораблей «Восток» и «Восход» положили начало бурному развитию космонавтики в нашей стране и в мире.

Космонавты разделились на две в чём-то соперничающие, но в основном сотрудничающие, линии: космонавты автономных аппаратов и космонавты обитаемых кораблей и станций. За прошедшие с полета Ю.А. Гагарина годы обе линии достигли высокой степени развития. Автоматические ИСЗ, дальние космические аппараты сделали возможным глобальное телевидение, глобальные сети связи и глобальные сети информации, в том числе Интернет, глобальные метеосистемы, системы спасения и определения местоположения, исследование ресурсов Земли.

Автоматические аппараты исследуют Луну, Марс, Венеру, проникли в самые отдаленные углы Солнечной системы.

На космических кораблях и долговременных орбитальных станциях побывало уже несколько сот космонавтов и астронавтов, Многие из них провели в орбитальных космических станциях по несколько месяцев. Проведены сотни тончайших научных экспериментов, которые под силу только человеку, а не автомату.

Космос стал подлинно интернациональным. Автоматические корабли и станции запускаются кроме России и США Евросоюзом, Индией, Ираном, Китаем, обитаемые – с кораблей запускает Китай. На станциях «Салют», «Мир», на американских «Шаттлах», на МКС побывали космонавты и астронавты разных стран мира.

Хочется надеяться, что скоро наступит время, когда люди приступят к хозяйственному освоению Луны, когда человек ступит на поверхность Марса, Юпитера, Сатурна … И при каждом новом свершении люди будут вспоминать Ю.А. Гагарина.

И хочется надеяться, что в этих свершениях будущего ОКБ МЭИ сумеет сыграть достойную роль, такую же, как оно сыграло 50 лет тому назад при первом в мире космическом полете Ю.А. Гагарина.

Литература

1. **Белостоцкая К.К**. Бортовые антенные устройства для первых систем космического телевидения. //Радиотехнические тетради №18, 1999
2. **Бобков В.Н**. Космический корабль «Восток» //Крылья Родины. 1991. №4, №6
3. **Зуйков Е.В**. Становление космического телевидения в ОКБ МЭИ //Радиотехнические тетради №18, 1999.
4. **Ивановский О.Г** Ракеты и космос в СССР - М.: Молодая гвардия. 2005
5. **История ОКБ МЭИ** /Крисс П.Ж., Новиков М.Е., Победоносцев К.А. и др. //Радиотехнические тетради. № 11, 1997
6. **Крисс П.Ж.,** Победоносцев К.А., Чеснов В.М. ОКБ МЭИ и его роль в обеспечении полетов первых космических кораблей. Доклад на XXI общественно-научных чтениях памяти Ю.А. Гагарина 9-12 марта 2004
7. **Крисс П.Ж.** Вклад ОКБ МЭИ в выполнение полетов корабля «Восток»с животными на борту. // Радиотехнические тетради. № 41, 2010
8. **Мещеряков И.В.** В мире космонавтики«. - Н. Новгород: 1996
9. **Покровский Б.А.** Космос начинается на Земле -М.: Патриот. 1996
10. **Попов С.М** Рождение космического телевидения //Радиотехнические тетради. №18, 1999
11. **Черток Б.Е.** Ракеты и люди – М.: Машиностроение. 1999
12. **ОКБ МЭИ – 60 лет.. 1947-2007**. - М.: Гласность. 2007

К.т.н. Белостоцкая К.К.

ВСТРЕЧИ С СЕРГЕЕМ ПАВЛОВИЧЕМ КОРОЛЁВЫМ
(Личные впечатления)

Летом 1960 г. я активно включилась в работы по коррекции документации на антенные системы изделия 1К, а осенью я уже ездила в Подлипки на настройку антенн телеметрической аппаратуры «Трал» космического корабля 3КА. Он в дальнейшем получил название «Восток». Для нас, разработчиков, индекс «3К» означал порядковый номер модификации аппарата, а вот буква «А» означала требования обеспечения повышенной надёжности всех систем и оборудования первого пилотируемого космического корабля [1, 2].

Перед запуском «Востока» с Юрием Алексеевичем Гагариным готовился запуск беспилотных кораблей, в этих кораблях должны были лететь манекены. Запусков с манекенами и собачками было два - 9 марта манекен с собачкой Чернушкой и 25 марта манекен с собачкой Звёздочкой.

Сроки были очень жёсткие, бригада настройщиков завода работала в три смены, и мне приходилось каждый день без суббот и воскресений работать с ними по две смены.

Мы тогда в рабочих разговорах произносили слова: ««беспилотный корабль» и «пилотируемый корабль», но как-то у меня не сливались воедино пилотируемый корабль и человек, живой человек в этом небольшом замкнутом объёме в форме шара.

Надо сказать, что мы, простые разработчики – техники и инженеры, не представляли эпохальности готовившегося события и того мирового резонанса, который получил полёт Юрия Гагарина. Я не жалела, что не полетела на космодром на запуск Гагарина потому, что считала важнее остаться работать на заводе и в том же трёхсменном темпе настраивать антенную систему следующего корабля, на котором уже в августе месяце того же года полетел Герман Титов.

В одну из своих многодневных поездок в 44-ом цеху завода в Подлипках я впервые увидела Сергея Павловича Королёва.

Королёв, или СП, как его называли на заводе, стремительно, чуть наклонив голову вперёд, как бы набычившись, шёл по цеху со свитой в несколько человек. На нём распахнутый белый халат поверх серого пиджака и тёмного свитера. Лицо неулыбчивое и даже суровое, взгляд исподлобья. Он остановился у подставки, на которой стоял «шарик» (так мы ласково называли спускаемый аппарат корабля 3КА), отдал короткие распоряжения людям, сопровождавшим его. Затем поздоровался за руку с человеком, который возился внутри шарика, и так же быстро ушёл из цеха.

В Подлипках в контрольно-испытательных стендах (КИС) рядом с нашим антенным стендом, где бригадой настройщиков готовила телеметрическую антенную систему, стоял стол, на котором в кресле – ложементе помещался манекен во всей амуниции космонавта. Манекен «Иван Иванович» – так окрестили его испытатели, был очень хорошо сделанной куклой. Волосы, торчащие из-под шлемофона, брови, усики (для телевидения усики специально чёрного цвета), глаза, немного косящие к носу, создавали ему немного сердитый, точнее очень сосредоточенный вид. Руки и ноги ему, вероятно, заказывали в протезной мастерской. На руке с настоящими ногтями видна была каждая морщинка. Издали он походил на живого человека. Одежда на нём была выполнена по полной программе: костюм космонавта с системой жизнеобеспечения, шлем со светофильтром, очень лёгонькие ботинки, а на вид - большие и громоздкие. Чтобы не вводить в заблуждение людей, которые подбегали к ложементу с манекеном в момент его приземления, под шлем второго манекена был положен трафарет с надписью «макет». Может быть, именно первый полёт манекена породил слухи о том, что до полёта Гагарина были неудачные запуски космонавтов (в чём я не раз разубеждала незнакомых людей). На столе весь манекен с головой был закрыт куском парашютного шёлка. Этот кусок всё время сползал с его лица, потому что никто из людей, работавших в цеху, не мог пройти мимо, не приоткрыв ему лицо, и не сказав что-нибудь в таком духе: «Ну, как, Иван Иванович, полетите скоро». И косил нам глазом Иван Иванович со своего стола все три смены.

Нередко во время настройки около нашего стенда останавливалась группа молодых военных (почти все невысокие), они почтительно наблюдали за нашей работой. Потом я их увидела на полигоне - это были первые будущие космонавты.

Рис. 1. Сергей Павлович Королёв выступает на 15-летнем юбилее ОКБ МЭИ

Крутой нрав СП был известен, в гневе он был невоздержан. Помню, уже много позже в 1962 г.на банкете в честь 15-ти летнего юбилея ОКБ МЭИ, Королёв сам посетовал на это, вспомнив свои разносы Богомолову и сказав: «но ведь это жизнь, это ситуации».

Ходили слухи о том, что особенно он строг к женщинам, и потому из-за какой-то детской робости моё знакомство с ним было несколько забавным. Это было уже на «двойке» - 2-й площадке Байконура. Королёв шел навстречу по дороге к монтажно-испытательному комплексу (МИКу,) остановился и сказал мне: «А ну пойди сюда, которая под мальчишку ходит» (я в брюках и лётной куртке, на голове мужская шапка-ушанка). А я стою в нерешительности и не двигаюсь. «Тогда я сам подойду» - говорит он и легко перепрыгивает через канавку, разделяющую бетонку и тротуар. Протягивает руку – «Королёв». Называю себя, говорю, что работаю у Богомолова. «Я давно за Вами наблюдаю, и думал, что Вы наша, всегда Вы с нашими - военными.... А я вот грущу, сегодня мне сообщили, что на Севере при испытаниях двигателя погиб мой инженер, молодой, семья у него». Зябко поводит плечами. Снег, а он в демисезонном пальто и в своём неизменном свитере. «Холодно Вам, Сергей Павлович» - «Да вот никак не пришлют зимнее пальто из Москвы». Прощаемся, я иду в гостиницу и думаю: и совсем не страшный СП, он просто, наверное, очень одинок из-за своей огромной ответственности, всё-таки решение и последнее слово за ним, а это очень тяжело.

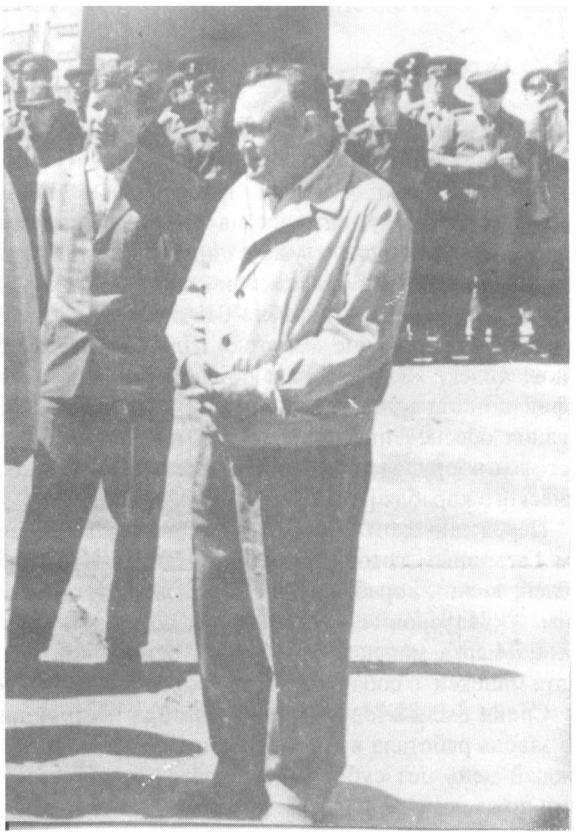


Рис. 2. Сергей Павлович на 10-й площадке космодрома Байконур

Были и трагические для меня ситуации при встречах с Королёвым: Случилось это на полигоне при проведении комплексных испытаний. Комплексные испытания или «комплекс», как мы их называли, проводятся после завершения автономных проверок всех систем. На «комплексе» точно по программе полёта поочерёдно на несколько минут включается каждая бортовая система объекта и ракеты. Работа у меня на комплексных испытаниях несложная: надо измерить напряжение на входе антенн с помощью вольтметра и неонкой проверить наличие излучения от них. Выполнять эти измерения надо на антеннах телеметрической системы, установленной на приборном отсеке объекта, а затем на антеннах, установленных на блоках ракеты.

Однажды во время проведения этой операции на объекте в ту часть зала, где стоял объект, отгороженный занавесками, вошёл Сергей Павлович. Увидел меня около «шарика» и спрашивает дежурившего у входа в зал военного: «Что это она там делает?» Дежурный, не подумав, отвечает: «она там что-то закорачивает», и Королёв чуть - ли не бегом направился ко мне. В результате состоялся такой разговор.

«Чем Вы занимаетесь?» Объясняю, что веду проверку работы нашей аппаратуры при включении питания (включение даётся всего на несколько минут).

- «Какие у Вас дальше дела?» Говорю, что сейчас пойду и то же самое проделаю на блоке носителя.

- «Но для этого Вам нужно залезть на ракету». - Утвердительно киваю.

- «Не надо, не смейте туда лазить, пусть это сделают военные из расчёта, а Вы только проконтролируете». - Сказал и ушёл.

Наступает момент проверки систем носителя, СП в зале нет. Объявляют о включении нашей системы. На меня набрасывается наш ведущий по объекту Е.А.Фролов со словами: «Что ты спишь, иди скорее, включение будет всего на несколько минут!».

- «Я не могу, Женя, мне Сергей Павлович не разрешил самой залезать на ракету». Ведущий как будто и не слышит, что я ему говорю.

- «Кто отвечает за проверку системы? Ты! Вот иди и делай своё дело, а военные пусть помогают». - Оглянулась ещё раз, СП в зале нет, и полезла на хребет блока. Во время испытаний блок лежит горизонтально на рельсовых подставках. По лестнице забираюсь на блок и сажусь на него как на коня. Все измерения сделала и только ногу с блока спустила, как в зал вошёл СП. Увидел меня верхом на блоке, подошёл к лестнице, стоит и ждёт. Я не спускаюсь, А он не уходит и ждёт. Что мне делать, деваться некуда. Посидела, вздохнула и спустилась вниз, так как СП явно не собирался уходить.

- «Я что тебе сказал?!» - Он был разгневан.

- «Сергей Павлович! Это моя работа, моя обязанность и я сама за неё должна отвечать». – Говорю, а сама чуть не плачу. Вдруг он берётся за кончики моей косынки, которая была повязана на шее и говорит: «А ты испугалась меня?»

- «Да, испугалась – честно сознаюсь я, - но всё равно я бы полезла».

- «Эх ты, зайчишка, зайчишка».

И вдруг без всякого перехода, отойдя немного в сторону, – «Надоело уже, домой, наверное, хочется? Мне самому хочется, а надо будет после пуска ещё в Евпаторию».

В этот момент появилась туча газетчиков, и они набросились на Королёва. Но Сергей Павлович сделал ход конём: «Вот познакомьтесь – мой инженер» – улыбнулся и быстро пошёл к выходу из зала. Пожала всем протянутые руки, но это была только дань вежливости с их стороны, я их абсолютно не интересовала, и они бросились догонять Королёва.

Так благополучно сошло для меня моё непослушание. (И надолго за мною сохранилось прозвище - зайчишка).

Присутствие Королёва на площадке не волновало работавших, а как-то дисциплинировало. Но кто-то придумал в момент появления его на площадке объявлять команду «Скорпион-3». Дело в том, что команды «Скорпион-1» и «Скорпион-2» давались на выключение аппаратуры, на время, когда над нами пролетали американские спутники – шпионы.

Однажды при подготовке к запуску космонавтов Комарова, Феоктистова и Егорова на комплексных испытаниях что-то всё время не ладилось, всё время были замечания. Ну, а раз есть замечания, то нужно всё начинать сначала. Ведущий, проводивший ежедневные оперативки в мрачном коридоре на первом этаже МИКа, был сильно расстроен. И вот появился утром Королёв и попросил не заходить в здание, а пройти на оперативку в беседку, которая находилась перед зданием МИКа. Он сел на скамейку, а мы все расположились кругом. СП усталым тоном спросил: «В чём же дело? Почему никак не пройдёт комплекс без замечаний? Говорите, может быть, мы уже распустили себя или с военными расчётами не в порядке, выкладывайте, в чём дело?» Состоялся короткий деловой разговор. Мы все, как говорится, сосредоточились и подтянулись, и следующий комплекс прошел без замечаний.

Однажды, проверяя своё хозяйство на блоках ракеты, которая должна была унести в космос Валентину Терешкову, я обнаружила, что на одном из блоков стоят не те антенны. Доложила своему начальству. Срочно с завода из Подлипок мне прислали новые антенны, а с измерительной линией прилетел техник из бригады настройщиков. Ночью мы начали проводить проверку присланных антенн. Появилось начальство во главе с Королёвым. Пока мы не проверили всё своё антенное хозяйство, Сергей Павлович не уходил из зала. Но он не торопил нас, а просто ходил по залу и ждал. Мы закончили и доложили, что у нас всё в порядке.

Было ещё одно волнительное событие, которое я запомнила на всю жизнь. Когда ракета уже стояла на старте, и шёл первый стартовый день подготовки к запуску Павла Беляева и Алексея Леонова, случилось ЧП. Во время подсоединения к ракете кабель-мачты для подключения наземного питания, она ударила по антенне нашей системы. С земли было не видно, то ли антенна сломалась, то ли была только смята. Мне нужно было подняться на ракету и дать заключение, нужна ли срочная замена антенны. Было велено взять с собою военного и ехать на старт. Ехать на старт женщине, когда на старте уже стоит ракета, да ещё подниматься на ракету – это было против всяких правил, установленных Королёвым. Мы хорошо знали эту примету. Я, конечно, испугалась, но не того, что нужно подняться на высоту более 30 метров, а того, что меня на старте увидит СП. Меня пытался успокоить офицер. Он сказал, что мы подъедем в газике прямо к ракете, и мне не надо будет ходить по стартовой площадке. Шофёр, который нас повёз на старт, сказал, что Королёв где-то здесь, кажется в бункере. Меня это совсем не обрадовало. Подкатили к лифту, дежурный офицер надел на нас монтажные пояса, и мы сели в лифт. Приятно было думать, что в этом же лифте завтра будут подниматься космонавты. Лифт остановился, а мы ещё поднялись немного по уголкам фермы. Офицер страховал меня, перецепляя цепь монтажного пояса. Добрались до антенны. Полая трубка была сплюснута, но не сломана. Для пущей уверенности берусь за антенну и подгибаю ноги. Итак, всё в порядке, скорее вниз и со старта. Спускаемся по ферме до лифта, газик ждёт, и через несколько минут мы уже за стартовой проходной. Докладываю своему начальству,

что всё в порядке, по нашей части задержки в запуске не будет. Скрыть от Королёва любое ЧП было категорически недопустимо, и он, конечно, знал о моей работе на старте в первый стартовый день. На этом история не закончилась. Когда космонавты вернулись из полёта, они приехали снова на опустевшую стартовую площадку, куда пришли и мы, чтобы поздравить их. В руках у космонавтов были цветы, которые они подарили Королёву и начальнику отряда космонавтов Каманину. Вдруг Сергей Павлович поворачивается в нашу сторону и протягивает свой букет мне!

Мягкая посадка, как мы все её ждём! Обычно все, у кого есть в этот день пропуск на территорию МИКа, собираются в коридоре около дверей опергруппы и слушают передачу по громкой связи. Незаметно наблюдаю за ребятами, которые отвечают за систему приземления. Ведущий по системе приземления В.С.Градусов сегодня в белой рубашке, он застыл и весь обратился в слух. Перестали работать пеленги (передающая система с антеннами на шарике), нам всем ясно, что шарик входит в плотные слои атмосферы на высоте примерно 70...80 км, и что через несколько минут космонавт будет на Земле. В коридоре полно народу, но тихо так, что, кажется, будто люди перестали даже дышать. И вдруг вижу, что Валентин вынул из кармана платок и вытирает вспотевшие мокрые ладони. Когда, спустя некоторое время, я напомнила ему об этом эпизоде, он улыбнулся и сказал: «Вытирал руки, может быть, не помню».

Рис. 3. Сергей Павлович встречает космонавтов Беляева и Леонова на стартовой позиции космодрома.

Ура! Приземление прошло, всё нормально. И вот уже все задвигались, заговорили, узнают подробности у тех, кто сидел в опергруппе на связи. Кто-то угощает меня шоколадом. Иду по коридору и у окна в торце встречаю Сергея Павловича. Он смотрит на мои оттопыренные карманы курточки:

- «Что это у тебя?»

- «Шоколад, угощайтесь, Сергей Павлович».

- «Нет, спасибо, мне бы сейчас чего-нибудь солёненького, воблы бы. - Лицо довольное, глаза улыбаются - Не устала? Скоро будем в Москве!».

После посадки космонавтов разработчики (на полигоне нас называли «промышленниками») и военные приходят на старт, чтобы встретить и поздравить космонавтов. Так уж принято было, что после полёта люди, которые готовили корабль, встречаются с космонавтами. Космонавты благодарят нас и руководство за работу, мы же желаем им успеха, удачи и всегда благополучного возвращения на Землю. Сергей Павлович обычно очень сдержан на этой церемонии. Он говорит несколько слов, целует и поздравляет их. Герои космонавты обходят каре под наши аплодисменты.

На этой процедуре Королёв держится настолько скромно, что непосвящённому человеку и в голову не придёт, что главный-то герой среди героев - это он.

Заключение

Судьба подарила мне несколько очень коротких встреч с Главным конструктором Сергеем Павловичем Королёвым (фото - из моего личного архива). И на всех этих встречах я была рядом с добрым, понимающим и усталым человеком. Он не был в эти минуты начальником, не был руководителем огромной армии людей, от которых он добивался неукоснительного выполнения поставленных им задач и строжайшей дисциплины, без чего было бы невозможно совершить первый шаг человека в Космос.

Литература

1.ОКБ МЭИ - 60 лет. (1947-2007). – М.: Гласность-АС. 2007. С. 18-21.

2. Белостоцкая К.К. Подготовка первых пилотируемых полётов на Байконуре (Воспоминания разработчика) //Радиотехнические тетради. - № 43, - 2010. .- С. 13-16

К.т.н. Хомаза В.Ф.

НА ЗЕМЛЕ КОСМОДРОМА. НАЧАЛО
(Воспоминания радиоинженера)

Я был студеном РТФ МЭИ с 1950 по 1955 гг. После работал в НИИ Военно-топографической службы Генерального штаба. Был участником сезонного состава 14-й Советской Антарктической Экспедиции на станциях Новолозаревская и Молодежная летом 1969 г. По возвращении из Антарктиды и по настоящее время работаю в Российском НИИ космического приборостроения.

Так совпало, что моё распределение по окончанию РТФ на работу в НИИ Военно-топографической службы Генерального штаба состоялось в самом начале 1955 г. одновременно с выходом Постановления ЦК КПСС и СМ СССР о строительстве космодрома в степях Казахстана. В те годы это был небольшой, можно сказать, архаичный по составу, тематике и оборудованию научно-исследовательский институт, которого практически не коснулись достижения научно-технической революции. Там занимались в основном разработкой методик проведения геодезических и картографических работ, обработкой их результатов на базе техники, не слишком далеко ушедшей от петровских времен. Пределом мечтаний тогдашнего начальника института генерала Авдеева был бесшумный электронный арифмометр. И его можно понять, т.к. все вычисления, объём которых был весьма велик, выполнялись с помощью механических калькуляторов - «железных Феликсов», а в лучшем случае – с использованием электромеханических арифмометров, и в помещениях стоял жуткий треск.

Но всё это я узнал позже, а тогда я пришел в НИИ на преддипломную практику и встретил своего единственного коллегу - радиста Володю Васильева, закончившего наш Радиотехнический факультет МЭИ год назад и создавшего за этот год макет светодальномера, способного измерять расстояния до 10 км с относительной погрешностью до 1:100 000 (т.е. до 10 см при длине линии 10 км), что в то время было недостижимой точностью для радиотехнических средств.

Здесь придётся сделать техническое отступление, чтобы объяснить революционную для геодезии суть этого изобретения и принцип действия прибора для пояснения проблем, связанных с его эксплуатацией. Дело в том,. что главной задачей геодезии было создание опорных координатных сетей на поверхности Земли, на основе которых затем ведётся освоение местности: проектируются и строятся дороги, здания, инженерные сооружения, оборудуются огневые позиции и т.д., то есть создаётся основа для того, чтобы можно было определить своё местоположение на Земле, а также относительное местоположение целей. Вероятно, каждый видел одиноко стоящую где-нибудь в поле или возвышающуюся над лесом ажурную трёх- или четырёхгранную пирамиду - вышку с небольшой площадкой наверху, увенчанную чернёным цилиндром. Это так называемый «геодезический сигнал». Но не каждый знает, что под этим сигналом зарыты массивные трёхэтажные бетонные блоки с заделанными в них металлическими марками с точкой в середине, именуемые геодезистами "центром", предназначенные для хранения координат этой точки. Такие пирамиды можно увидеть и в городе на крышах некоторых домов. На некотором расстоянии от этого места (от единиц до 30...40 км в зависимости от назначения и класса точности сети), взобравшись на верхнюю площадку сигнала, можно найти аналогичное сооружение, если, конечно, знаешь, где его искать. На топографических картах их местоположение обозначается маленьким треугольником с точкой в центре.

Понятно, что для передачи координат от одной точки к другой необходимо измерить дирекционный угол и расстояние между ними, при этом точность измерений должна удовлетворять всем требованиям, предъявляемым потребителями координат опорных сетей. А эти требования бывают очень высокими. Например, при сбойке тоннелей метро ошибка не должна превышать 10 см. В связи с этим в наиболее точных государственных сетях 1-го класса относительная погрешность взаимного положения двух соседних точек, расположенных на удалении до 30..40 км друг от друга, не должна превышать 1:300000. Технику точного измерения углов с помощью оптических приборов человечество освоило давно, а вот с линейными измерениями дело обстояло намного хуже. Единственным средством высокоточных линейных измерений на местности был набор инваровых проволок 24-метровой длины, которые последовательно укладывались вдоль измеряемой трассы на специальных штативах с соблюдением жестких требований по усилию натяжения, учета температурных условий и уклонов, с необходимым компарированием на эталонах до и после полевых работ. Технология измерений была так сложна и ответственна, что, говорят, до революции руководить этими работами доверялось генералам. Зато при тщательном соблюдении технологии относительная погрешность длины не превышала 1:1000 000. Естественно, передавать координаты на расстояния в десятки и сотни километров таким способом слишком накладно, да и не всегда возможно по условиям рельефа.

По этой причине основным методом построения опорных сетей стал метод «триангуляции», когда в исходном пункте сети создавалась базисная сторона длиной, как правило, не более 10 км, задававшая линейный масштаб, а затем на её основе строилась сеть последовательных треугольников, углы в которых измерялись оптическими теодолитами. Это приводило к увеличению количества промежуточных пунктов и объёма геодезических работ, а, соответственно, сроков и стоимости в несколько раз, но выбора не было.

И вот при таких исходных условиях мой коллега Володя Васильев создаёт макет светодальномера (тогда такого слова ещё не было, и среди специалистов шли оживлённые дискуссии, как «это» называть:

светодальномер, электрооптический дальномер и т.п.) с невиданной до тех пор точностью. По принципу действия он был аналогичен известному из школьного курса физики прибору Физо с вращающимся зубчатым колесом (обтюратором) для измерения скорости света. Но вместо зубчатого колеса синхронно прерывавшего луч от источника света, направленный на установленное на противоположном конце измеряемой дистанции зеркало - световозвращатель, для обработки принятого отраженного луча использовались два электрооптических модулятора аналогичных тем, что используются в кино при записи звука на киноплёнку. В качестве источника света использовалась обыкновенной лампочки накаливания мощностью 7 Вт, (термин «лазер» появился только через 6 лет), Модуляторы управлялись одним и тем же напряжением, т.е. синхронно изменяли интенсивность передаваемого и принимаемого лучей с частотой около 10 МГц, чего, конечно, с механическим обтюратором достичь было невозможно. Принятый световой сигнал регистрировался глазом. Как известно, изменяя скорость колеса (в нашем случае частоту модуляции) можно видеть, что интенсивность наблюдаемого сигнала периодически изменяется. Она достигает максимума, когда за время распространения света по дистанции проходит целое число периодов модуляции, и минимальна, когда за это время проходит нечётное число полупериодов. Таким образом, задача оператора состоит в том, чтобы, наблюдая за интенсивностью принятого сигнала, изменять частоту модуляции до тех пор, пока не будет зарегистрирован максимум. Измерив соответствующую этой ситуации частоту модуляции, можно вычислить расстояние по нехитрой формуле $D = n \cdot c/2f$, где c - скорость света, f - измеренная частота, n - целое число, для вычисления которого применяется специальная процедура с измерениями на других максимумах [1]. На практике для того, чтобы достичь требуемой точности, эту операцию надо было повторить около 150 раз, на что уходило даже при хороших погодных условиях примерно 2 часа.

Проведение геодезических работ на территории будущего космодрома было поручено Военно-топографическому управлению, а поставленную партией и правительством задачу надо было решать в кратчайшие сроки. Тогда мой будущий начальник лаборатории 40-летний майор Виктор Александрович Величко, поддержанный руководством института, выступил с инициативой использовать на практике созданный макет. Это позволяло проложить полигонометрический ход, т.е. вытянутую в одну строку последовательность сторон. Экономия времени и средств была столь заманчивой, что этот, прямо скажем, рискованный план был принят.

В марте 1955 г. я явился в НИИ ВТС для прохождения преддипломной практики и получил приглашение принять участие в командировке в Казахстан с оплатой 7 руб. суточных (тогдашних, дореформенных). После бурного неодобрения такой оплаты моими родителями, транслированного мной начальству, ввиду явного дефицита кадров консенсус был достигнут: суточные установили не как стажеру, а как нормальному сотруднику, командируемому в сельскую местность – 13 руб. 50 коп. И вот 5 мая мы втроём: Величко, Васильев и я отправились поездом в Казахстан. Четвёртое место в купе занимал громадный ящик с инструментом. Должен признаться, что тогда ни я, ни, думаю, и Володя ничего не знали об истории проекта, его цели, важности и ответственности предстоящей работы. До отъезда я успел только в достаточно общих чертах познакомиться с устройством прибора и обсудить тему моего дипломного проекта. Мне предстояло разработать фотоэлектрический приёмник к светодальномеру, предназначенный для замены визуального наблюдения глазом оператора.

Как и положено молодости, не избалованной путешествиями, мы с Володей большую часть дороги простояли у окна. Знакомые зелёные просторы с обилием больших (Волга!) и малых рек сменились бескрайними, но ещё не выжженными степями с массой сусликов, стоявших столбиками вдоль дороги, с незнакомыми птицами на проводах. Насмешили невысокие пологие возвышенности, гордо именовавшиеся на карте Мугоджарским хребтом. Удивило, что железная дорога проходит по плоской, как стол, степи не прямо, а непрерывными зигзагами.

Высадились на станции Челкар. Станционный посёлок произвел гнусное впечатление. Глинобитные домики, пыль и грязь, вся зелень - четыре дерева возле станции. Нас встретили и отвезли в расположение воинской части (называемой в топографических войсках отрядом.), к которой мы были прикомандированы. Часть стояла палаточным лагерем в нескольких километрах от станции в песчаной полупустыне. Рядом было небольшое, поросшее по берегам камышом, озеро с подсоленной водой, В части располагался штаб. Отсюда рабочие группы разъезжались по своим маршрутам. Нас прикомандировали к группе, состоявшей из капитана и четырех солдат, выдали солдатское обмундирование, 2 шатровые палатки и выделили транспортное средство - грузовик ГАЗ-51. В его кузове мы и поехали на маршрут длиной в сотни километров.

Надо сказать несколько слов о наших соратниках. Офицер оказался очень симпатичным, воспитанным, грамотным специалистом, как большинство полевых геодезистов - работягой, всегда старавшимся помочь нам, чем только мог. Что касается солдат, то надо сказать, что в те годы топографические отряды комплектовали кадрами с самым низким образовательным цензом. Обязательным было только начальное образование, поэтому у наших солдат больше четырех классов ни у кого не было. В их задачи входили строительные работы, обслуживание машины и нашего быта. Были они в меру ленивы, в меру конфликтовали между собой, но без всяких намёков на дедовщину, командира слушались. Запомнился романтический настрой солдата по фамилии Железнов, отличавшегося довольно крупными габаритами и привлекательной внешностью, который любил петь душещипательные романсы. Очень часто и проникновенно он исполнял: «Помнишь, мама моя, как девчонку чужую я привёл к тебе в дом, у тебя не спросив…».

Итак, мы отправились прокладывать ход. Распределение обязанностей было таким: капитан с солдатами строил пункт, то есть рыли яму глубиной порядка 2 м, закладывали в неё бетонные центры, строили пирамиды и всё, что при этом положено, и

выполняли угловые измерения. Мы с Володей должны были обеспечивать работоспособность оптического дальномера, а Величко производил наблюдения. Техобслуживание макета, изготовленного начинающим инженером по существу любительским способом, было не самой простой задачей. Очень колоритное описание подобных ситуаций есть у Даниила Гранина, по-моему, в его книге «Искатели». Там ребята создают макет, включают – всё замечательно работает. На следующий день приходят в радужном настроении, включают – не работает. Сколько ни стараются, ничего не выходит. Наконец, кто-то вспоминает, что вчера было пасмурно, а сегодня светит солнце. Стыдясь друг друга, лезут закрывать шторы. Не помогает. Через неделю, наконец, выясняется, как все утверждают, невероятная причина: провисла нить накала лампы. В нашей жизни, осложнявшейся к тому же достаточно жесткими условиями эксплуатации, вариантов было предостаточно. Да и надо признаться, что мы сами не всегда правильно понимали, как функционирует прибор и что с ним надо делать, а в результате наших манипуляций могла выскочить солидная ошибка в половину фазового цикла - 7,5 м. Но мы старались, иногда по недомыслию, самоотверженно. Например, надо было заменить электролит в аккумуляторах, от которых питался наш прибор, не имея для этого никаких приспособлений. Недолго думая, свернули воронку из газетной бумаги и, удерживая её голыми руками, залили щёлочь. После этой операции ногти на пальцах расплавились, но кожа целиком не слезла.

Весна уже кончилась, началось лето. Всё зелёное в полупустыне пожухло. Солнце шпарит весь день, на небе ни облачка. Песок разогревается до 60°С. Из тени – только тень от солдатской панамы на голове. Переезды в кузове грузовика не вызывали приятных ощущений, т.к. ветер не остужал, а обжигал. И – комары. Они жары не боялись. Для меня это было неожиданным. Откуда в пустыне комары? Оказалось, в пустыне воды много. В низинах встречаются озёра с берегами, заросшими камышом, но вода в них подсолена. Очевидно, это Арал подпирал подпочвенные воды. Спасало то, что наш многоопытный начальник захватил 3-литровую банку только что синтезированного диковинного отпугивающего комаров средства диметилфталат, которым мы с удовольствием умывались. И сейчас я не только на Север или в тайгу, но и в лес на даче без подобных жидкостей не хожу. Рассказывали, что этот секрет узнали случайно, сбив на Дальнем востоке американский самолёт-нарушитель (тогда это случалось частенько), а у катапультировавшихся лётчиков нашли чудо-жидкость и воспроизвели её для армейских нужд.

В принципе наш прибор позволял работать в дневное время, но из-за снижения контраста между светящейся точкой изображения зеркала-световозвращателя и ярко освещённым фоном, а также из-за колоссальной турбулентности перегретой атмосферы и больших градиентов рефракции, постоянно создававших миражи с призраками водных просторов, изображения в трубе плыли и делали наблюдения невозможными. Приходилось весь день скитаться под солнцем, т.к. в палатке больше получаса после восхода из-за дикой жары находиться было невозможно. Для отправления потребностей в относительном уединении приходилось уходить за горизонт. Дождавшись захода – а это были всё-таки самые длинные дни и короткие ночи - начинали готовить аппаратуру к работе. Но возмущённая атмосфера успокаивалась ещё часа два, пока не наступало относительное равновесие и можно было разглядеть световой сигнал. К этому времени в сухом воздухе дневная жара сменялась ощущением сильного холода, приходилось натягивать тёплую одежду. Если сеанс проходил нормально, ещё через два часа можно было отправляться спать. А там уже и до восхода недалеко. На следующий день – переезд на новую точку с тем же расписанием работ.

К температурным испытаниям добавлялись проблемы с водой. Запас пресной воды возили с собой, а пополняли его чаще всего в заброшенных колодцах. Это всегда была не слишком чистая, солоноватая жидкость, которая к тому же хорошо прогревалась в бочке за день. Скрашивали вкус воды разные сиропы, которые мы – опять же по инициативе начальника – закупили в Москве в больших количествах, расфасованными по маленьким бутылочкам.

Отдельная песня – это кормёжка. Пищу готовил солдат из продуктов, которые были выданы по армейским нормам. В те годы ещё ощущался послевоенный дефицит, снабжение армии было очень экономным и малокалорийным. (К слову, когда через два года я попал на аналогичную работу в Архангельской области на Плесецком полигоне, это были уже совсем другие времена). Надо добавить, что варил солдат на костре, в жару, мягко говоря, без любви. Короче, макаронный суп на гидрожире я буду помнить столько, сколько живу. Правда, был однажды праздник. Наш капитан застрелил сайгака, хотя это было запрещено. Эти животные со странным психическим поведением: отличались большой осторожностью, но, завидев машину, мчались не прочь от неё, а обязательно должны были пересечь перед ней дорогу. У них всегда кто-то был на стрёме, поэтому приблизиться к ним очень непросто. Но один раз капитану удалось подстрелить сайгака и у нас был пир.

А ещё был почти смешной случай с кабанами. Остановились лагерем на очередной точке у низины, местами заросшей камышом. Солдат-шофёр полез под машину делать ей профилактику, и вдруг кто-то увидел в двух-трех километрах тёмное пятно. В бинокль разглядели – семейство кабанов. В азарте вскочили в кузов грузовика, Величко схватил свою мелкокалиберную винтовку, завелись, поехали. Когда до кабанов оставалось метров пятьдесят, машина резко встала. От неожиданности мы несколько растерялись, а когда опомнились, кабаны разбежались. Оказалось, в спешке шофёр забыл завинтить пробку картера, масло вытекло, подшипники поплавились. Один солдат вскочил в машину босиком, ему пришлось возвращаться пешком по стерне, и в зарослях камыша он столкнулся нос к носу со здоровым секачом. Немая сцена, к счастью, закончилась миром.

Недели четыре всё шло заведённым порядком, пока вдруг, не выдержав испытаний, заболел наш начальник. Всё-таки в его возрасте организму было трудно справляться с такими нагрузками в сочетании с

тухлой водой. Пришлось отправлять его в больницу, а перед нами встал вопрос: кто будет наблюдателем? Капитан не годится из-за незнания предмета, у близорукого Володи – очки. Оставался я, не имевший никакого опыта и до того момента фактически не глядевший в ту зрительную трубу. Сначала с перепугу я вообще не мог навестись на отражатель и увидеть эту светящуюся мерцающую крохотную точку. Потом, наконец, что-то увидел, осознал, и дело пошло. Вылечившегося начальника мы увидели через три недели, когда полевые работы уже заканчивались и начиналась камеральная обработка результатов.

Иногда наш устоявшийся распорядок нарушался стихийными бедствиями.18-го июня, в разгар лета, когда казахи уже остригли овец, разразилась жуткая буря с ливнем и сильным ветром. Температура упала почти до нуля. Бедные голые овцы простудились и в одночасье подохли. Возле селений и кочевий валялись сотни трупов.

Другое бедствие организовали мы сами. Однажды устроились на обед, уселись втроём – командный состав – за низенький имитатор стола. В метре за моей спиной солдат развёл небольшой костёр и, как положено, сделал вокруг него окопчик. Съели свой макаронный суп на гидрожире и, ожидая второе, ведём беседу. Солдат что-то замешкался, я оглянулся, смотрю – пламя перемахнуло через окопчик и подожгло сухостой на его краю, но солдат видит, взял тряпку и сбивает огонь. Думаю, раз гасит, значит, всё в порядке. Секунд через тридцать снова оборачиваюсь – очаг стал больше. Тут уже все вскочили и стали гасить, но было поздно. Через 15 минут огонь ушёл за горизонт. Он элементарно перескакивал через колеи дорог, на которых не было ничего сухого, через любые голые песчаные пространства. Вид у сгоревшей чёрной пустыни был жутким. Впечатление усугублялось зрелищем нахохлившихся осиротевших орлов, водившихся в больших количествах. На тушение пожара отовсюду, даже из Актюбинска, привозили уйму народа, но справиться с огнем смогли не раньше, чем через неделю. А среди местного населения пошёл слух, что по степи ездят шпионы, переодетые в военную форму, и устраивают пожары.

А уже в конце экспедиции, когда полевые работы закончились, и в большой штабной палатке проходила камеральная обработка, случилась пыльная буря. Шквал налетел внезапно, работавший в палатке батарейный приёмник жутко затрещал из-за электрических наводок на выброшенной наружу антенне, а выдернуть её или выключить приёмник не получалось: из-за сильных разрядов статического электричества до приёмника было невозможно дотронуться. Всё стихло через полчаса. Из любопытства измерили напряжение на металлической окантовке кузова грузовика относительно земли. Оказалось – 3 киловольта!.

К другим «приятностям» тех мест следует отнести массу всякой ползающей ядовитой живности: фаланги, скорпионы, каракурты, тарантулы, змеи. Особенно противны были мохнатые фаланги и змеи. Фаланги отвратительны ещё тем, что здорово прыгают и свободно могут запрыгнуть на шею.

Работы закончили в середине июля возле райцентра Иргиз. Здесь протекала маленькая речка под одноимённым названием, по берегам которой росла зелёная травка, и это было замечательно. На карте речка начинается и кончается в песках. Сам городок был таким же убогим, как и всё остальное в пустыне: глинобитные дома, грязь, пыль, ничего зелёного. Была больница, обслуживавшая, вероятно, весь район. Все её пациенты, имевшие очень жалкий вид, весь день сидели снаружи вокруг здания, т.к. внутри, видимо, было ещё хуже. В местном медпункте работали две молоденькие фельдшерицы, попавшие туда по распределению, которых мы, конечно, посетили. Они просветили нас в части медицинской статистики: у десятков процентов местного населения трахома, бруцеллез, сифилис. И вообще казахи, которых мы встречали по пути, не производили впечатление строителей коммунизма. Забитый, малограмотный, необщительный народ. Встречались иногда и голодные целинники, которых во время освоения целины завезли в степь и бросили на произвол судьбы.

Вернувшись после всего увиденного и пережитого в Челкар, мы теперь восприняли его как филиал рая на земле, а его четыре дерева у станции – как райские кущи.

Сейчас мне кажется, что попади я в подобные условия лет двадцать – тридцать лет спустя, вряд ли протянул бы больше недели. А тогда по молодости всё было как с гуся вода.

Заключение

Мы были первыми в освоении территории будущего космодрома Байконур и нами был проведён первый опыт практического применения светодальномеров для геодезической съёмки в СССР. За нами пришли строители, потом ракетчики... Всего через два года - 4 октября 1957 г. с этого космодрома запустили первый в мире искусственный спутник Земли. А 50 лет назад, 12 апреля 1961 г. совершил свой космический полёт первый космонавт планеты Юрий Алексеевич Гагарин.

Наш вклад в освоение территории космодрома не забыли. По случаю запуска первого спутника на почтовый адрес нашего НИИ, до востребования нам прислали премию - по 800 руб. (дореформенных) каждому. На почте, выдавая деньги, девушка поинтересовалась, за что получена премия, но мы строго хранили государственную тайну.

Я горжусь тем, что одним из кураторов строительства от управления Министерства обороны, руководившего стройкой космодрома, был мой отец Хомаза Федор Афанасьевич.

Литература

1. Радиогеодезические и оптические измерения. В.Д. Большаков, А.Н. Голубев, В.П. Васильев, Ф.Деймлих - М.: Недра, 1987.

Д.т.н., проф. Перов А.И., магистр Захарова Е.В.

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ДИСКРИМИНАТОРОВ ЗАДЕРЖКИ ПРИ ПРИЕМЕ НАВИГАЦИОННОГО СИГНАЛА С МОДУЛЯЦИЕЙ BOC(1,1)

Введение

Спутниковые навигационные системы ГЛОНАСС, GPS (а в перспективе и Galileo, Compass) широко используются для координатно-временного обеспечения различных технических систем и жизнедеятельности человека. Первоначально в системах ГЛОНАСС, GPS использовались сигналы с цифровой фазовой модуляцией (в иностранной литературе — *binary phase shift keying (BPSK)*). При модернизации систем ГЛОНАСС, GPS, проводимой в настоящее время, а также в системах Galileo, Compass вводятся новые навигационные сигналы с цифровой модуляцией на поднесущих частотах. В англоязычной литературе данный тип модуляции называется binary offset carrier (*BOC*) [1]. Под модуляцией $BOC\left(f_{sub}, f_{chip}\right)$ понимается бинарная модуляция на поднесущих частотах, при которой f_{sub} — частота отстройки поднесущих, f_{chip} — частота следования символов (чипов) кода. Обычно, частоты f_{sub}, f_{chip} выбираются кратными некоторой «базовой» частоте f_c (например, в GPS f_c=1,023 МГц), т.е. $f_{sub} = mf_c$, $f_{chip} = nf_c$. Тогда для обозначения модуляции на поднесущих частотах используется сокращенная запись *BOC*(*m*,*n*). Отметим, что аналогичное обозначение используется для фазовой манипуляции *BPSK*(*n*), что соответствует скорости следования символов кода $f_{chip} = nf_c$. Для формирования поднесущих используется функция $\mathrm{sign}\left(\sin\left(2\pi f_{sub}t\right)\right)$, т.е. колебание меандрового типа. Здесь $\mathrm{sign}(x)$ — знаковая функция, принимающая значения ± 1 в зависимости от знака аргумента x.

Использование сигналов с BOC модуляцией открывает новые возможности по построению временных дискриминаторов следящих систем за задержкой сигнала, что предопределило появление ряда статей, например [2, 3], в которых предлагаются новые принципы построения временных дискриминаторов. Однако в известной литературе отсутствует сравнительный анализ характеристик различных типов временных дискриминаторов и достигаемой при их использовании точности оценки задержки сигнала, что является основным критерием при принятии решения об использовании того или иного типа дискриминатора в следящей системе. В настоящей статье проводится сравнительный анализ характеристик двух типов временных дискриминаторов, предназначенных для приема сигнала с модуляцией BOC(1,1).

Навигационный сигнал с модуляцией BOC(1,1) описывается выражением

$$s(t,\tau) = Ah_{\ddot{a}\hat{e}}(t-\tau)h_{i\,\tilde{n}}(t-\tau)\cos\left(\omega t+\varphi(t)\right).$$

где $h_{\ddot{a}\hat{e}}(t)$ — функция модуляции дальномерным кодом, которая на длительности одного периода T описывается соотношением

$$h_{\ddot{a}\hat{e}}(t) = \sum_{k=1}^{L} a_k g_0\left(t-(k-1)\tau_c\right)\mathrm{sign}\left(2\pi f_c t\right), \quad (1)$$

где $g_0(t)$ — импульс с единичной амплитудой и длительностью $\tau_c = 1/f_c$, f_c=1,023 МГц, $a_k = \pm 1$.

Нормированная корреляционная функция дальномерного кода $h_{\ddot{a}\hat{e}}(t-\tau)$ (1) при $|\tau|/\tau_c \le 1$ имеет вид, приведенный на рис. 1, где по оси абсцисс отложена нормированная задержка $\tau/\tau_c \le 1$.

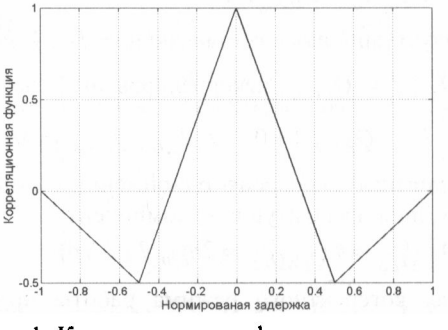


Рис. 1. Корреляционная функция дальномерного кода сигнала BOC(1,1)

Даня корреляционная функция описывается выражением

$$\rho(\tau) = \begin{cases} 1-3|\tau|/\tau_c, & \text{ï ðè } |\tau| \le \tau_c/2, \\ 1-|\tau|/\tau_c, & \text{ï ðè } \tau_c/2 \le |\tau| \le \tau_c. \end{cases}$$

Оптимальный дискриминатор задержки сигнала

В навигационном приемнике оптимальный дискриминатор задержки формируется на базе «опережающего» и «запаздывающего» квадратурных корреляторов [1]

$$I_{E(L),k} =$$

$$= \frac{2A}{N_0}\int_{t_{k-1}}^{t_k} y(t)\, h_{\ddot{a}\hat{e}}\left(t-(\tilde{\tau}_{k-1} \mp \Delta\tau/2)\right)\cos\left(\omega t+\tilde{\varphi}(t)\right)dt,$$

$$Q_{E(L),k} =$$

$$= \frac{2A}{N_0}\int_{t_{k-1}}^{t_k} y(t)\, h_{\ddot{a}\hat{e}}\left(t-(\tilde{\tau}_{k-1} \mp \Delta\tau/2)\right)\sin\left(\omega t+\tilde{\varphi}(t)\right)dt, \quad (2)$$

где $\Delta\tau$ — сдвиг по задержке между опорными сигналами «опережающего» и «запаздывающего» корреляторов, N_0 — односторонняя спектральная плотность внутреннего шума приемника.

Математические ожидания процессов на выходах «опережающего» и «запаздывающего» квадратурных корреляторов (2) при нулевых ошибках слежения за фазой и частотой сигнала описываются выражениями [1]

$$\bar{I}_{E(L),k} = 2q_{c/n_0} Th_{\text{i ñ},k-1}\rho\left(\varepsilon_\tau \mp \Delta\tau/2\right),$$
$$\bar{Q}_{E(L),k} = -2q_{c/n_0} Th_{\text{i ñ},k-1}\rho\left(\varepsilon_\tau \mp \Delta\tau/2\right), \qquad (3)$$

где $q_{c/n_0} = P_c/N_0$ — отношение мощности сигнала P_c к односторонней спектральной плотности N_0 внутреннего шума приемника (именуемое далее отношение с/ш).

Дисперсии флуктуационных составляющих на выходах «опережающего» и «запаздывающего» квадратурных корреляторов равны [1]

$$D_{I_{E\hat{o}}} = D_{I_{L\hat{o}}} = D_{Q_{E\hat{o}}} = D_{Q_{L\hat{o}}} =$$
$$= A^2T/N_0 = 2q_{c/n_o}T\,. \qquad (4)$$

Флуктуационные составляющие $I_{E\hat{o},k}$ и $Q_{E\hat{o},k}$, как и $I_{L\hat{o},k}$ и $Q_{L\hat{o},k}$, некоррелированы между собой, т.е. $M\left[I_{E\hat{o},k}Q_{E\hat{o},k}\right] = 0$, $M\left[I_{L\hat{o},k}Q_{L\hat{o},k}\right] = 0$.

Взаимная дисперсия одноименных (либо синфазных, либо квадратурных) компонент

$$D_{I_{E\hat{o}}I_{L\hat{o}}} = D_{Q_{E\hat{o}}Q_{L\hat{o}}} = 2q_{c/n_o}T\rho\left(\Delta\tau\right). \qquad (5)$$

Для когерентного режима работы приемника при большом отношении с/ш оптимальный дискриминатор задержки (ДЗ) описывается выражением [1]

$$u_{\ddot{a}\,\tau,k} = \left(I_{E,k} - I_{L,k}\right)\text{sign}\left(I_k\right). \qquad (6)$$

Принимая во внимание (2) и (3), запишем выражение для дискриминационной характеристики

$$U\left(\varepsilon_\tau\right) = \bar{I}_E - \bar{I}_L =$$
$$= 2q_{c/n_0}T\left(\rho\left(\varepsilon_\tau - \Delta\tau/2\right) - \rho\left(\varepsilon_\tau + \Delta\tau/2\right)\right). \qquad (7)$$

Нормированная дискриминационная характеристика (ДХ) $U\left(\varepsilon_\tau\right)/\left(2q_{c/n_0}T\right)$ при $\Delta\tau = \tau_c/3$ (т.е. равной половине ширины главного лепестка корреляционной функции $\rho(\tau)$) приведена на рис. 2.

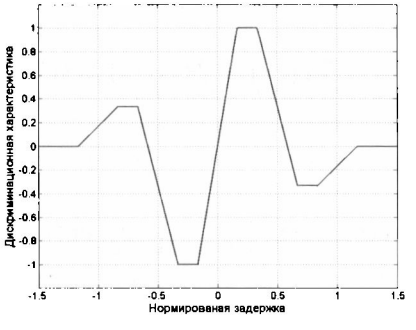


Рис. 2. Нормированная дискриминационная характеристика

Апертура ДХ (по первым нулям) равна $\Delta_\tau = \pm 1{,}75\tau_c/3 = \pm 1{,}75/\left(3f_c\right)$.

Крутизна ДХ равна

$$S_{\ddot{a}} = \left.\frac{\partial U\left(\varepsilon_\tau\right)}{\partial\varepsilon_\tau}\right|_{\varepsilon_\tau = 0} =$$
$$= 2q_{c/n_0}T\left(\rho'\left(-\Delta\tau/2\right) - \rho'\left(\Delta\tau/2\right)\right) = \frac{12q_{c/n_0}T}{\tau_c}.$$

Флуктуационная характеристика ДЗ определяется соотношением

$$D_{\eta_\tau} = M\left[\left(I_{E\hat{o}} - I_{L\hat{o}}\right)^2\right] = D_{I_{E\hat{o}}} + D_{I_{L\hat{o}}} - 2D_{I_{E\hat{o}}I_{L\hat{o}}} =$$
$$= 4q_{c/n_o}T\left(1 - \rho\left(\Delta\tau\right)\right) = 4q_{c/n_o}T\,.$$

Рассчитаем дисперсию шума, приведенного к измеряемому параметру (задержке)

$$D_{\tilde{n}_\tau} = \frac{D_{\eta_\tau}}{S_{\ddot{a}}^2} = \frac{\tau_{\tilde{n}}^2}{36q_{c/n_0}T} = \frac{1}{q_{c/n_0}T\left(6f_c\right)^2}. \qquad (8)$$

Сравним дисперсию (8) с нижней границей Рао Крамера для дисперсии эффективной оценки задержки, которая определяется выражением [1]

$$D_{\acute{y}\hat{o}\,\tau} = 1/\left(2q_{c/n_0}T\tilde{\beta}^2\right), \qquad (9)$$

где

$$\tilde{\beta}^2 = \int_{-\Delta f/2}^{\Delta f/2}\left(2\pi f\right)^2\tilde{N}\left(f\right)df\,, \qquad (10)$$

Δf — полоса частот, занимаемая сигналом, $\tilde{N}\left(f\right)$ — спектральная плотность мощности нормированной корреляционной функции дальномерного кода.

Для сигнала с BOC(1,1) модуляцией имеем

$$\tilde{N}\left(f\right) = \frac{1}{f_{\tilde{n}}}\text{sinc}^2\left(\pi\frac{f}{f_{\tilde{n}}}\right)\text{tg}^2\left(\frac{\pi}{2}\frac{f}{f_{\tilde{n}}}\right), \quad \Delta f = 4f_c\,. \qquad (11)$$

Подставляя (11) в (10) и выполнив интегрирование, получаем

$$\tilde{\beta}^2 = 1{,}5\left(4f_c\right)^2. \qquad (12)$$

С учетом (12) формула (9) принимает вид

$$D_{\acute{y}\hat{o}\,\tau} = \frac{1}{q_{c/n_0}T\cdot 3\left(4f_c\right)^2} \approx \frac{1}{q_{c/n_0}T\left(6{,}93f_c\right)^2}. \qquad (13)$$

Из сравнения (13) с (8) следует, что для дискриминатора задержки (6) дисперсия шума, приведенного к измеряемому параметру, лишь на 33% больше дисперсии эффективной оценки задержки $D_{\acute{y}\hat{o}\,\tau}$.

Сравним дисперсию шума, приведенного к измеряемому параметру, (8) при приеме сигнала BOC(1,1) с аналогичной дисперсией, рассчитанной для случая приема сигнала BPSK(2), занимающего такую же полосу частот, и расстройкой между каналами корреляторов $\tilde{\Delta}\tau = \tau_c/2$. Из формул, приведенных в [1], получаем

$$D_{\eta_\tau} = 4q_{c/n_o}T\ ,\ S_{\ddot{a}} = \frac{8q_{c/n_0}T}{\tau_c},$$

и, следовательно,

$$D_{\tilde{\eta}_\tau} = \frac{\tau_{\tilde{n}}^2}{16q_{c/n_0}T} = \frac{1}{q_{c/n_0}T\left(4f_c\right)^2}. \qquad (14)$$

Сравнивая (14) с (8), видим, что дисперсия шума, приведенного к измеряемому параметру, при приеме сигнала BPSK(2) в 2,25 раза больше, чем при приеме сигнала BOC(1,1).

Отметим, что апертура ДХ сигнала с BOC(1,1) модуляцией в 1,29 раза меньше, чем апертура дискриминационной характеристики при приеме сигнала с BPSK(2).

Дискриминатор задержки сигнала на базе «опережающего» — «запаздывающего» и «очень опережающего» и «очень запаздывающего» квадратурных корреляторов

Недостатком рассмотренного выше оптимального дискриминатора задержки сигнала BOC(1,1) является его относительно узкая ширина ДХ в окрестности основной устойчивой точки равновесия и наличие близко расположенных (относительно основной устойчивой точки равновесия) неустойчивых точек равновесия. Для устранения (снижения влияния) факторов в литературе предложен ряд методов построения дискриминаторов задержки при приеме сигнала BOC(1,1). Одни из этих методов основан на введении, кроме «опережающего» и «запаздывающего» квадратурных корреляторов, «очень опережающего» и «очень запаздывающего» квадратурных корреляторов [2]. Проанализируем данный тип корреляторa более подробно.

Определим «очень опережающий» и «очень запаздывающий» квадратурные корреляторы соотношениями (2), в которых вместо $I_{E(L),k}$, $Q_{E(L),k}$, $\Delta\tau = \tau_c/3$ будем понимать соответственно $I_{vE(vL),k}$, $Q_{vE(vL),k}$, $\Delta\tau_v = \tau_c + \tau_c/3 = 4\tau_c/3$.

Математические ожидания компонент $I_{vE(vL),k}$, $Q_{vE(vL),k}$ описываются, по-прежнему, выражениями (3) с заменой $\Delta\tau$ на $\Delta\tau_v$, а дисперсии флуктуационных составляющих — формулами (4), (5).

Составляющую дискриминатора задержки, сформированную по «очень опережающим» и «очень запаздывающим» квадратурным корреляторам, определим соотношением, аналогичным (6),

$$u_{\ddot{a}\,v\tau,k} = \left(I_{vE,k} - I_{vL,k}\right)\mathrm{sign}\left(I_k\right).$$

Дискриминационная характеристика такого дискриминатора описывается формулой (7) с заменой $\Delta\tau$ на $\Delta\tau_v$, а вместо $U\left(\varepsilon_\tau\right)$ будем использовать запись $U_v\left(\varepsilon_\tau\right)$.

Нормированная ДХ $U_v\left(\varepsilon_\tau\right)\Big/\left(2q_{c/n_0}T\right)$ приведена на рис. 3 сплошной линией, а пунктирной линией на том же рисунке приведена нормированная ДХ $U\left(\varepsilon_\tau\right)\Big/\left(2q_{c/n_0}T\right)$.

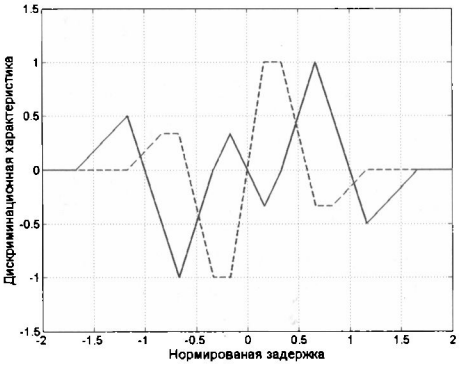


Рис. 3. Нормированные дискриминационные характеристики

Определим комбинированный дискриминатор задержки соотношением

$$u_{\ddot{a}\,\Sigma\tau,k} = u_{\ddot{a}\,v\tau,k} + u_{\ddot{a}\,v\tau,k} =$$
$$= \left(\left(I_{E,k} + I_{vE,k}\right) - \left(I_{L,k} + I_{vL,k}\right)\right)\mathrm{sign}\left(I_k\right).$$

Для такого дискриминатора результирующая дискриминационная характеристика описывается формулой

$$U_\Sigma\left(\varepsilon_\tau\right) = 2q_{c/n_0}T\Big[\left(\rho\left(\varepsilon_\tau - \Delta\tau/2\right) + \rho\left(\varepsilon_\tau - \Delta\tau_v/2\right)\right) -$$
$$-\left(\rho\left(\varepsilon_\tau + \Delta\tau/2\right) + \rho\left(\varepsilon_\tau + \Delta\tau_v/2\right)\right)\Big].$$

Нормированная ДХ $U_\Sigma\left(\varepsilon_\tau\right)\Big/\left(2q_{c/n_0}T\right)$ приведена на рис. 4

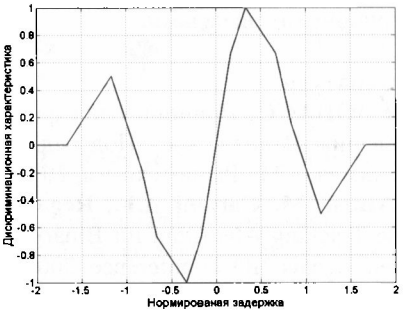


Рис. 4. Нормированная результирующая дискриминационная характеристика

Апертура ДХ равна $\Delta_\tau = \pm 0{,}9167\tau_c$, что в 1,57 раза больше, чем у дискриминатора (6) и в 1,22 раза больше, чем апертура дискриминационной характеристики при приеме сигнала с BPSK(2).

Крутизна ДХ равна

$$S_{\ddot{a}\,\Sigma} = \left.\frac{\partial U_\Sigma\left(\varepsilon_\tau\right)}{\partial\varepsilon_\tau}\right|_{\varepsilon_\tau = 0} =$$
$$= 2q_{c/n_0}T\ 2\left(\rho'\left(-\tau_c/6\right) + \rho'\left(-2\tau_c/3\right)\right) = \frac{8q_{c/n_0}T}{\tau_c}.$$

Флуктуационная характеристика ДЗ определяется соотношением

$$D_{\Sigma\eta_\tau} = M\left[\left(I_{E\hat{o}} + I_{\nu E,k} - I_{\nu L,k} - I_{L\hat{o}}\right)^2\right] =$$
$$= 4D_{I_{E\hat{o}}} - 2D_{I_{E\hat{o}}I_{L\hat{o}}} + 2D_{I_{E\hat{o}}I_{\nu E\hat{o}}} - 2D_{I_{E\hat{o}}I_{\nu L\hat{o}}} -$$
$$-2D_{I_{L\hat{o}}I_{\nu E\hat{o}}} + 2D_{I_{L\hat{o}}I_{\nu L\hat{o}}} - 2D_{I_{\nu E\hat{o}}I_{\nu L\hat{o}}} =$$
$$= 4q_{c/n_o}T\left[2 - \rho(\tau_c/3) + 2\rho(\tau_c/2) -\right.$$
$$\left.-2\rho(5\tau_c/6) - \rho(4\tau_c/3)\right] = \frac{16q_{c/n_o}T}{3}.$$

Рассчитаем дисперсию шума, приведенного к измеряемому параметру (задержке)

$$D_{\Sigma\tilde{\eta}_\tau} = \frac{D_{\Sigma\eta_\tau}}{S^2_{\ddot{a}\,\Sigma}} = \frac{\tau^2_{\tilde{n}}}{12q_{c/n_0}T} = \frac{1}{q_{c/n_0}T\left(2\sqrt{3}f_c\right)^2}. \quad (15)$$

Из сравнения (15) с (8) и (14) следует, что дисперсия приведенного шума при использовании дискриминатора с четырьмя опорными сигналами в 3 раза больше, чем аналогичная дисперсия приведенного шума при использовании оптимального дискриминатора, и в 1,33 раза больше, чем аналогичная дисперсия приведенного шума при использовании сигнала BPSK(2).

Заключение

Из проведенного анализа следует, что наилучшие характеристики по точности оценки задержки сигнала с модуляцией BOC(1,1) обеспечивает временной дискриминатор с запаздывающим и опережающим опорными сигналами. Дисперсия оценки задержки при использовании такого дискриминатора лишь на 33% выше нижней границы Рао-Крамера и в 3 раза меньше аналогичной дисперсии оценки задержки при использовании дискриминатора с четырьмя опорными сигналами.

Литература

1. **ГЛОНАСС**. Принципы построения и функционирования. Издание 4-е./ Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. – М.: Радиотехника, 2010, 800 с.

2. **Musso M, Cattoni A.F., Regazzoni C.S.** A New Fine Tracking Algorithm for Binary Offset Carrier Modulated Signals// ION conference, 2006, pp. 834-840.

3. **De Castro D., Diez J., Fernandez A., Sleewaegen J-M**. A New Unambiguous Low-Complexity BOC Tracking Technique// // ION conference, 2006, pp. 1830-1835.

Д.т.н., проф. Перов А.И., магистр Стесина Л.Д.

ОПТИМАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ КООРДИНАТ В АППАРАТУРЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Введение

В ряде прикладных задач радионавигации и радиоуправления необходимо измерить дальность между двумя объектами по сигналам спутниковым навигационным систем (СНС), принятым на каждом из объектов. На рис. 1 приведена геометрическая схема измерений при приеме навигационного сигнала от одного спутника в двух навигационных приемниках НАП1 и НАП2, находящихся на расстоянии δR друг от друга.

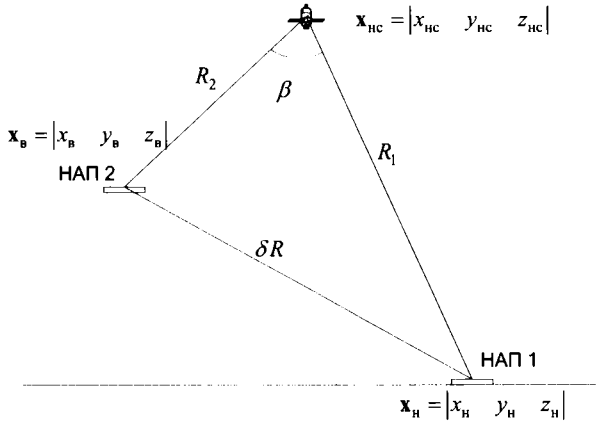


Рис.1. Геометрическая схема измерений

Положим, что в НАП1 и НАП2 по сигналам НС проведены измерения дальностей R_1 и R_2 соответственно, т.е.

$$y_1(t) = R_1(t) + n_1(t), \tag{1}$$

$$y_2(t) = R_2(t) + n_2(t), \tag{2}$$

где $n_1(t)$, $n_2(t)$ — независимые белые гауссовские шумы (БГШ) с нулевыми математическими ожиданиями и с равными спектральными плотностями $N_0/2$.

Поставим задачу оценки дальности $\delta R(t)$ между НАП1 и НАП2 по измерениям (1) и (2).

Положим для определенности $R_1 > R_2$. При $\beta << 1$ справедливо приближенное равенство $R_1 \approx R_2 + \delta R$ и (1) можно записать в виде

$$y_1(t) = R_2(t) + \delta R(t) + n_2(t). \tag{3}$$

Из (1) и (3) можно предложить следующий подход к оценке дальности $\delta R(t)$. Сформируем разностное измерение

$$\tilde{y}(t) = y_1(t) - y_2(t) = \delta R(t) + n_1(t) - n_2(t) = \\ = \delta R(t) + n(t), \tag{4}$$

где $n(t)$ — БГШ с нулевым математическим ожиданием и спектральной плотностью N_0.

Зададим модель изменения взаимной дальности уравнением

$$\frac{d\delta R}{dt} = \xi_{\delta R}(t), \tag{5}$$

где $\xi_{\delta R}(t)$ — БГШ с нулевым математическим ожиданием и спектральной плотностью $S_{\xi_{\delta R}}/2$.

Рассмотрим задачу оптимальной фильтрации $\delta R(t)$, описываемой (5) при наблюдении (4).

Используя общие уравнения оптимальной фильтрации [1], запишем

$$\frac{d\delta\hat{R}}{dt} = \tilde{K}\left(\tilde{y}(t) - \delta\hat{R}\right), \quad \tilde{K} = \frac{\tilde{D}_{\delta R}}{N_0}, \tag{6}$$

$$\frac{d\tilde{D}_{\delta R}}{dt} = \frac{S_{\xi_{\delta R}}}{2} - \frac{\tilde{D}_{\delta R}^2}{N_0}. \tag{7}$$

Схема устройства, реализующего алгоритм фильтрации (6), приведена на рис. 2.

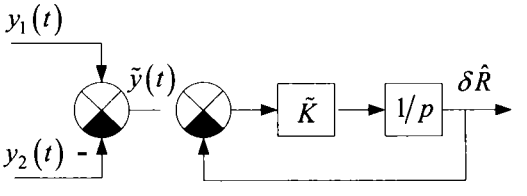


Рис. 2. Схема устройства обработки

Данная схема реализует принцип относительных измерений, в котором формируется разность измерений $\tilde{y}(t) = y_1(t) - y_2(t)$, в которой скомпенсирован параметр R_2, не представляющий интерес для потребителя информации о параметре δR.

Из (7) для установившегося режима находим

$$\tilde{D}_{\delta R} = \sqrt{\frac{S_{\xi_{\delta R}} N_0}{2}}. \tag{8}$$

Рассмотренный выше подход дает решение поставленной задачи, но не вытекает их теории оптимальной фильтрации [1], а, следовательно, нельзя говорить о том, дисперсия ошибки фильтрации (8) минимально возможная.

Рассмотрим задачу синтеза оптимальной системы фильтрации имеющихся наблюдений (2), (3). Для

этого введем векторы, $\mathbf{x} = |R_2 \quad \delta R|^{\dot{O}}$, $\mathbf{y} = |y_1 \quad y_2|^{\dot{O}}$ и $\mathbf{n} = |n_1 \quad n_2|^{\dot{O}}$. Тогда наблюдения (2)-(3) можно записать в векторном виде

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{H}\mathbf{x}(t) + \mathbf{n}(t), \tag{9}$$

где $\mathbf{H} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}$, $M\left[\mathbf{n}(t)\mathbf{n}^{\dot{O}}(t+\tau)\right] = \mathbf{N} = N_0/2 \cdot \mathbf{I}$, где $\mathbf{I}$ — единичная матрица.

В рассматриваемой задаче имеем два фильтруемых процесс $\delta R(t)$ и $R_2(t)$, первый из которых описывается уравнением (5), а для второго процесса примем аналогичную модель

$$\frac{dR_2}{dt} = \xi_{R_2}(t), \tag{10}$$

где $\xi_{R_2}(t)$ — БГШ с нулевым математическим ожиданием и спектральной плотностью $S_{\xi_{R2}}/2$.

Запишем уравнения (5), (10) в векторном виде

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \boldsymbol{\xi}(t), \tag{11}$$

где $\boldsymbol{\xi}(t) = |\xi_{R_2}(t) \quad \xi_{\delta R}(t)|^{\dot{O}}$,

$$M\left[\boldsymbol{\xi}(t)\boldsymbol{\xi}^{\dot{O}}(t+\tau)\right] = \mathbf{S}_\xi = \begin{vmatrix} S_{\xi_{R2}}/2 & 0 \\ 0 & S_{\xi_{\delta R}}/2 \end{vmatrix}.$$

Уравнения оптимальной фильтрации вектора $\mathbf{x}(t)$, описываемого уравнением (11), при наблюдениях (9) имеют вид [1]

$$\frac{d\hat{\mathbf{x}}}{dt} = \mathbf{K}(t)\left(\mathbf{y}(t) - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}\right), \quad \mathbf{K}(t) = \frac{2}{N_0}\mathbf{D}(t)\mathbf{H}^{\dot{O}}, \tag{12}$$

$$\frac{d\mathbf{D}}{dt} = \mathbf{S}_\xi - \frac{2}{N_0}\mathbf{D}\mathbf{H}\mathbf{H}^{\dot{O}}\mathbf{D}, \tag{13}$$

где $\mathbf{D}$ — матрица дисперсий ошибок фильтрации вектора $\mathbf{x}$.

Схема оптимальной системы фильтрации, реализующая алгоритм (12), приведена на рис.3.

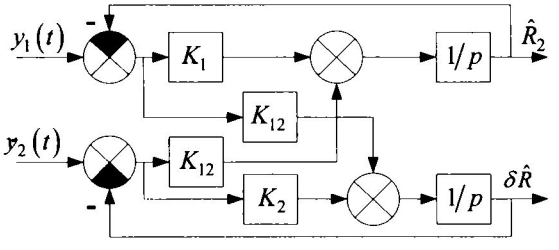


Рис. 3. Схема оптимального устройства обработки

Решение системы уравнений (13) в установившемся режиме имеет вид

$$D_{11} = \frac{A(1+A)\sqrt{q_2}}{\sqrt{A^2+(1+A)^2}} = \frac{(1+A)\sqrt{q_1}}{\sqrt{A^2+(1+A)^2}}, \tag{14}$$

$$D_{12} = \frac{-A\sqrt{q_2}}{\sqrt{A^2+(1+A)^2}}, \tag{15}$$

$$D_{22} = \frac{(1+2A)\ q_2}{A^2+(1+A)^2}, \tag{16}$$

где $q_1 = S_{\xi_{R2}}N_0/4$, $q_2 = S_{\xi_{\delta R}}N_0/4$, $A = \sqrt{q_1/q_2}$.

Из сравнения (16) и (8) запишем

$$D_{22} = \frac{\left(\sqrt{S_{\xi_{\delta R}}} + 2\sqrt{S_{\xi_{R2}}}\right)\tilde{D}}{\sqrt{2}\sqrt{S_{\xi_{R2}} + \left(\sqrt{S_{\xi_{\delta R}}} + \sqrt{S_{\xi_{R2}}}\right)^2}} = f(x)\tilde{D},$$

где $x = \sqrt{S_{\xi_{R2}}/S_{\xi_{\delta R}}}$, $f(x) = \dfrac{(1+2x)}{2\ x^2+(1+x)^2}$.

График функции $f(x)$ приведен на рис. 4.

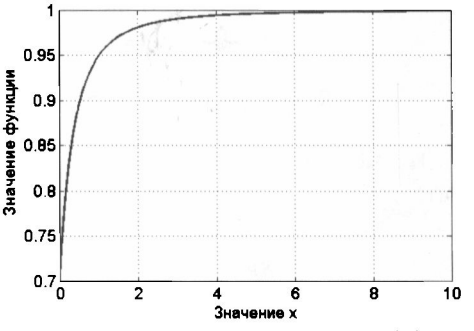


Рис. 4. График функции $f(x)$

Из рис. 4 следует, что $f(x) \le 1$, т.е. дисперсии ошибки оценки δR в оптимальной системе рис. 3 меньше, чем в системе, приведенной на рис. 2. Однако это различие не очень большое.

Отметим, что в оптимальной системе фильтрации (рис. 3) отсутствует «в чистом виде» формирование разностного измерения $\tilde{y}(t) = y_1(t) - y_2(t)$, являющегося атрибутом принципа относительной навигации.

В оптимальной системе фильтрации формируется две оценки $\delta\hat{R}$ и $\hat{R}_2$, а в неоптимальной системе (рис. 2) формируется только одна оценка $\delta\hat{R}$. Если в НАП2 необходимо сформировать и оценку $\hat{R}_2$, то наилучшую (квазиоптимальную) оценку можно получить, обрабатывая совместно измерения (2), (3) и полагая при этом, что оценку $\delta\hat{R}$ уже сформирована схемой рис. 1, а, следовательно в процессе синтеза алгоритма фильтрации $R_2(t)$ может считаться известной функцией времени. При таком подходе наблюдения описываются уравнением (9), в котором следует полагать где $\mathbf{H} = \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \end{vmatrix}$. Оцениваемая переменная $R_2(t)$ по-прежнему описывается уравнением (10). Уравнения оптимальной фильтрации для данной задачи имеют вид

$$\frac{d\hat{R}_2}{dt} = \mathbf{K}(t)\left(\mathbf{y}(t) - \mathbf{H}\hat{R}_2 - \begin{vmatrix}0\\1\end{vmatrix}\delta\hat{R}\right),$$

$$\mathbf{K}(t) = \frac{2}{N_0} D_{R_2}(t)\mathbf{H}^{\text{т}}, \qquad (17)$$

$$\frac{dD_{R_2}}{dt} = \frac{S_{\xi R2}}{2} - \frac{2}{N_0} 2D_{R_2}^2. \qquad (18)$$

Из (17) в установившемся режиме находим $D_{R_2} = \sqrt{S_{\xi R2} N_0 / 8}$. Следовательно для вектора коэффициентов усиления в установившемся режиме имеем $\mathbf{K} = \tilde{K}_y \begin{vmatrix}1\\1\end{vmatrix}$, где $\tilde{K}_y = \sqrt{\frac{S_{\xi_R}}{2N_0}}$.

На рис. 5 приведена общая квазиоптимальной фильтрации процессов $R_2(t)$ и $\delta R(t)$ (с учетом рис. 1 и (17)).

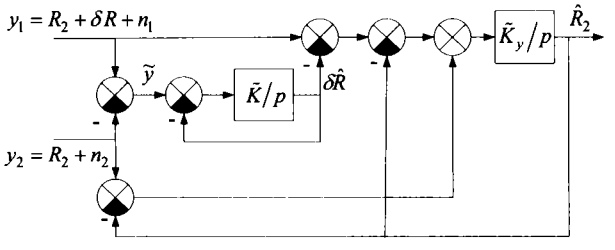


Рис. 5. Схема квазиоптимального устройства обработки

Рассчитаем дисперсию ошибки фильтрации $R_2(t)$ в данной схеме. Для этого запишем коэффициенты передачи

$$K_{y_1,\hat{R}_2}(p) = \frac{\tilde{K}_y p}{\left(p + 2\tilde{K}_y\right)\left(p + \tilde{K}\right)},$$

$$K_{y_2,\hat{R}_2}(p) = \frac{\tilde{K}_y\left(p + 2\tilde{K}\right)}{\left(p + 2\tilde{K}_y\right)\left(p + \tilde{K}\right)}.$$

Дисперсия флуктуационной ошибки в оценке $\hat{R}_2$, обусловленная шумом n_1, равна

$$\sigma_{\delta 1}^2 = \frac{\sqrt{S_{\xi_R} N_0}}{4\sqrt{2}} \frac{1}{2 + 1/A}.$$

Дисперсия флуктуационной ошибки в оценке $\hat{R}_2$, обусловленная шумом n_2, равна

$$\sigma_{\delta 2}^2 = \frac{\sqrt{S_{\xi_R} N_0}}{4\sqrt{2}} \frac{1 + 2/A}{2 + 1/A}.$$

Следовательно, суммарная флуктуационная ошибка определяется выражением

$$D_{\delta} = \sigma_{\delta 1}^2 + \sigma_{\delta 2}^2 = \frac{\sqrt{S_{\xi_R} N_0}}{4\sqrt{2}} \frac{2 + 2/A}{2 + 1/A}.$$

Динамические ошибки по воздействиям δR и R_2 равны соответственно

$$\sigma_{\delta R}^2 = \frac{\sqrt{S_{\xi \delta R} N_0}}{4\sqrt{2}} \frac{1}{2 + 1/A}, \quad \sigma_R^2 = \frac{\sqrt{S_{\xi_R} N_0}}{4\sqrt{2}}.$$

Суммарная дисперсия ошибки оценки R_2 определяется выражением

$$D_{\text{îø},R_2} = \frac{\sqrt{S_{\xi_R} N_0}}{4\sqrt{2}} \frac{2 + 2/A}{2 + 1/A} + \frac{\sqrt{S_{\xi R2} N_0}}{4\sqrt{2}} +$$

$$+ \frac{\sqrt{S_{\xi \delta R} N_0}}{4\sqrt{2}} \frac{1}{2 + 1/A} = \frac{\sqrt{S_{\xi R2} N_0}}{2} \frac{\sqrt{2}(1 + A)}{2A + 1}. \qquad (19)$$

Отметим, что в (19) $A \equiv x$.

Определим проигрыш по дисперсии ошибки оценки R_2 в квазиоптимальной системе (рис. 4) относительно аналогичной дисперсии ошибки в оптимальной системе (рис. 3)

$$\text{Ï} = \frac{D_{\text{îø},R_2}}{D_{11}} = \frac{\sqrt{2}\sqrt{A^2 + (1 + A)^2}}{2A + 1}. \qquad (20)$$

График зависимости $1/\text{Ï}\ (A)$ приведен на рис. 6.

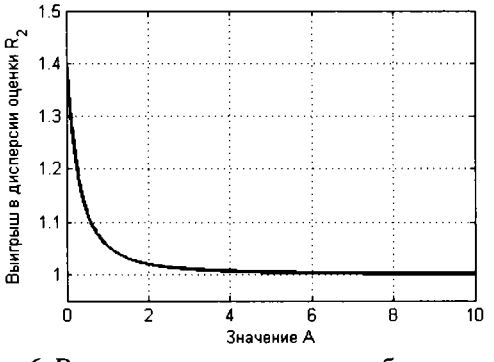


Рис. 6. Выигрыш по дисперсии ошибки оценки R_2

Из рис. 4 и 6 следует, что в оптимальной системе фильтрации достигается выигрыш по дисперсии ошибки оценки R_2 и δR до 1,4 раза.

Заключение

Проведен синтез оптимального и квазиоптимального алгоритмов фильтрации относительных координат в аппаратуре потребителей спутниковых навигационных систем. Показано, что в оптимальной системе фильтрации достигается выигрыш по дисперсии ошибки оценки относительной дальности между объектами и дальности до навигационного спутника в 1,4 раза.

Литература

1. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. – М.: Радиотехника, 2003. – 400 с.

Студ. Алексанян А.А., с.н.с. Фейзулла Н.М.

РАСЧЁТ РАДИОХАРАКТЕРИСТИК ФЕРМЕННОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ И СОПОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЁТОВ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ИЗМЕРЕНИЙ

Введение

Предметом исследования является складная зеркальная антенна космического базирования, отражающая поверхность которой аппроксимирована треугольными сегментами – *фасетами.* Складывание и разворачивание такой антенны происходит за счёт конструкции из ферм, от чего имеет место название *ферменная зеркальная антенна (ФЗА)* (рис.1).

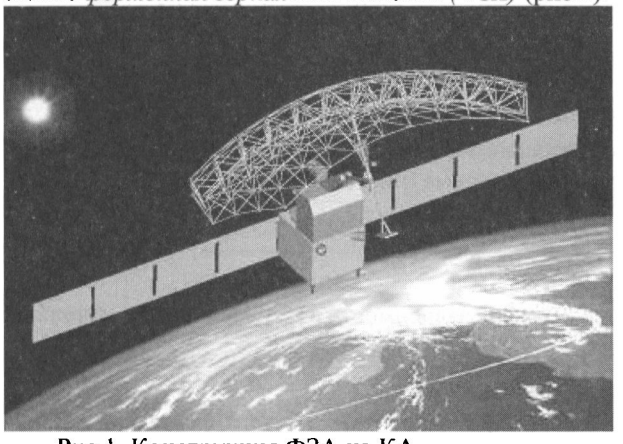


Рис.1. Конструкция ФЗА на КА

Цель работы – разработка алгоритма и, далее, реализация *самостоятельной* программы для расчёта ФЗА с экспериментальным подтверждением правильности работы программы.

Существуют универсальные программные комплексы для расчёта антенн, в том числе и зеркальных, однако, такие комплексы не всегда доступны ввиду немалой стоимости. К тому же, универсальные программы не отличаются высокой производительностью, что является платой за универсальность. Последняя и самая важная причина создания специализированных программ – это удобство ввода исходных данных для расчета, поскольку планируемый алгоритм работы программы должен учитывать конструктивные особенности рассматриваемой антенны и требовать от оператора только минимальное количество необходимых входных данных. Например, для ФЗА – это размеры и фокус зеркала, длина стороны треугольных фасет, длина волны и вид облучателя.

Конечно, многие универсальные программы позволяют использовать программы-макросы для подзадач (в данном случае, для формирования сложной поверхности зеркала), однако, написание полной программы для расчёта зеркальной антенны (при знании широко известных методов геометрической или физической оптики в применении к зеркальным антеннам) потребует, возможно, не сильно больше усилий, чем написание программы-макроса и интегрирование его в необходимую среду.

Авторы в своей задаче используют созданный ранее Чадовым С.Е. в ОАО «ОКБ МЭИ» программный комплекс «Mirror» как основу для доработки. Программа в исходном состоянии позволяла рассчитывать простые зеркальные антенны методом физической оптики, с различными облучателями

Алгоритм расчета

Расчёт ведётся токовым метод (или метод физической оптики). Для нахождения токов на зеркале используется широко известное уравнение:

$$J^{Э}_{пов} = 2 \cdot [i_n \times H_{пад}] \quad (1)$$

$H_{пад}$ - падающее на зеркало магнитное поле, формируемое облучателем и известное для каждого из облучателей, доступных в программе «Mirror».

С достаточной точностью можем считать, что фасеты плоские, поэтому i_n - нормаль к поверхности зеркала – одинакова для любой точки на одной и той же фасете.

Для начала, необходимо рассчитать геометрические параметры зеркала. В первую очередь – это расположение вершин треугольников, как на рис.2.

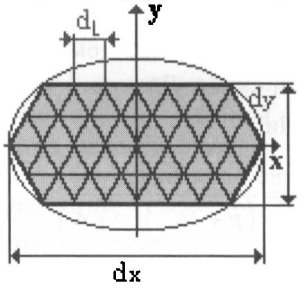


Рис.2. Проекция антенны на плоскость XOY

Расстояние между двумя вершинами одного треугольника (рис.2.) определяется выражением:

$$\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} = dl \quad (2)$$

Для частного случая, когда одна из вершин треугольника находится в нуле, можем сразу найти соседнюю вершину (учтем ещё то, что $y=0$):

$$\sqrt{(x_2)^2 + (z_2)^2} = \sqrt{(x_2)^2 + (x_2/(4 \cdot F))^2} = dl .$$

Решая уравнение, получаем x_2 и затем z_2. Зная координату вершины данного треугольника, можно найти вершину соседнего треугольника, однако в этом случае уравнение (2) решатся численными методами. Получив координаты всех точек в первой «строке (пролёте)», таким же образом получим координаты всех остальных вершин (можно использовать симметрию зеркала).

Имея таблицу значений всех координат, необходимо создать таблицу с треугольниками, распределив все вершины по отдельным пронумерованным

треугольникам. На алгоритмическом языке это легко сделать.

Итак, обобщая выше написанное и дополняя, приведём этапы алгоритмизации геометрических расчётов:

1 этап: расчет вершин треугольников.

2 этап: упорядочивание вершин.

Эмпирически найдена закономерность, по которой из массивов всех вершин получены массивы вершин для каждого треугольника (вершины каждого треугольника пронумерованы через 1,2,3) по отдельным декартовым составляющим.

3 этап: создание сетки точек для численного интегрирования.

В численной модели найти ток на поверхности зеркала в виде непрерывной функции невозможно, поэтому необходимо всю поверхность зеркала разбить на ортогональную сетку точек. Шаг разбиения, равный половине длины волны, является оптимальным с точки зрения увеличения точности расчёта и минимизации общего количества точек.

Каждый из треугольников «обхватывается» матрицей X_i и Y_i – матрица значений координаты по оси X и Y, соответственно (напомним, плоскость XOY параллельна плоскости апертуры антенны). Если точки попадают в данный треугольник, то данная точка записывается в матрицу (X_i и Y_i), иначе, присваивается некоторое маловероятное (и всегда одно и то же, например 0.123) число вместо реальной координаты. При дальнейшем переборе точек, когда будут рассчитываться токи, поставим условие:

Если (Xi < > 0,123)

то ищем ток в точке (Xi , Yi) .

Иначе - точку пропускаем.

Т.о., «некорректные» точки выпадают из расчёта.

5 этап: Расчет нормалей и координаты Z_i

Для каждого треугольника существует единственная нормаль и для каждой точки, входящей в данный треугольник, будут одни и те же нормали (здесь P1, P2, P3 – текущие координаты вершин перебираемого треугольника):

$$nx' = (P2_y - P1_y)\cdot(P3_z - P1_z) - (P2_z - P1_z)\cdot(P3_y - P1_y)$$

$$ny' = (P2_z - P1_z)\cdot(P3_x - P1_x) - (P2_x - P1_x)\cdot(P3_z - P1_z)$$

$$nz' = (P2_x - P1_x)\cdot(P3_y - P1_y) - (P2_y - P1_y)\cdot(P3_x - P1_x)$$

$$nxyz = \sqrt{(nx')^2 + (ny')^2 + (nz')^2}$$

$$nx = -nx'/nxyz$$

$$ny = -ny'/nxyz$$

$$nz = -nz'/nxyz$$

Чтобы рассчитать значение поля на поверхности зеркала, нужно, по крайней мере, знать расстояние от облучателя до рассматриваемой точки. Для расчета расстояния нужны координаты облучателя (они известны) и координаты текущей точки. Текущая точка характеризуется координатами X_i и Y_i, а также Z_i (принадлежащая фасете), которую необходимо найти. Чтобы найти Z_i, нужно написать уравнение плоскости для текущего треугольника и из уравнения выразить Z_i. Уравнение запишем через нормали:

$$Z_i = -\frac{1}{nz}\cdot\left[nx\cdot(X_i - P1_x) + ny\cdot(Y_i - P1_y)\right] + P1_z$$

Т.о., есть всё, что необходимо для расчёта токов на зеркале. После расчета токов, нужно посчитать непосредственно поле.

Выражение для векторного потенциала:

$$\vec{A}^e = \frac{1}{4\pi}\int_S \vec{J}^e(\vec{r}')\frac{e^{-ikR}}{R}ds'$$

Выражение для поля излучения:

$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{W}{ik}\left(k^2\vec{A}^e + grad\, div\vec{A}^e\right)$, где: k - волновое число, W - волновое сопротивление свободного пространства. Расстояние $R = |\vec{r} - \vec{r}'|$, где $\vec{r}$ - точка наблюдения, $\vec{r}'$ - точка интегрирования на поверхности.

Поле в дальней зоне определяется выражением:

$$\vec{E}_{ДЗ} = \lim_{r\to\infty}\left[\vec{E}(\vec{r})\cdot r\cdot e^{ikr}\right], \quad r = |\vec{r}|$$

Переход к сферическим координатам:

$$E_\theta = E_x\cos\theta\cos\varphi + E_y\cos\theta\sin\varphi - E_z\sin\theta$$

$$E_\varphi = -E_x\sin\varphi + E_y\cos\varphi$$

В программе интегрирование заменено на суммирование по двухмерной криволинейной поверхности.

Описание модели облучающего устройства

Исследуемая антенна предназначена для установки на радиолокатор с синтезированной апертурой. В связи с этим, на антенную систему накладываются определенные условия, в особенности, на облучатель. Необходимо, чтобы облучатель попеременно формировал несколько близкорасположенных лучей, для зондирования Земли в режиме СКАНСАР (режим широкоугольного просмотра). В рассматриваемой антенне используется рупорная решетка (рис.3) из 12 элементов, состоящая из 5 кластеров по 4 элемента в каждом. Для формирования одного из лучей возбуждают один из кластеров, т.е. 4 рупорных элемента. Лучи в одной плоскости (в данном случае, азимутальной) должны быть очень узкими для высокой разрешающей способности радиолокатора, поэтому зеркало в этой плоскости имеет большие размеры. В другой плоскости лучи не должны быть узкими (основное требование здесь - многолучевость, для широкого угла обзора). Поэтому в данной плоскости зеркало имеет меньшие размеры.

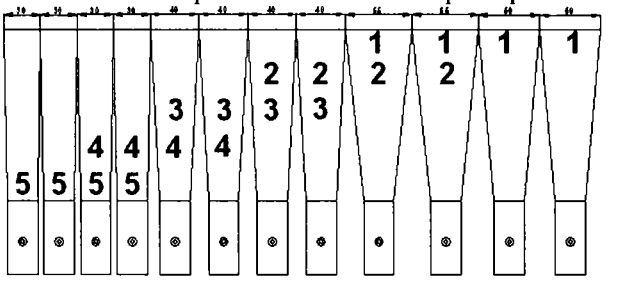


Рис.3. Общий вид облучателя

Описание экспериментов

Для проверки достоверности расчётов автором были использованы результаты двух испытаний конкретной антенны – на полигоне ОАО «ОКБ МЭИ» и в безэховой камере в Китае.

В первом случае, снимались диаграммы направленности антенны в дальней зоне методом вращающейся антенны (рис.4.).

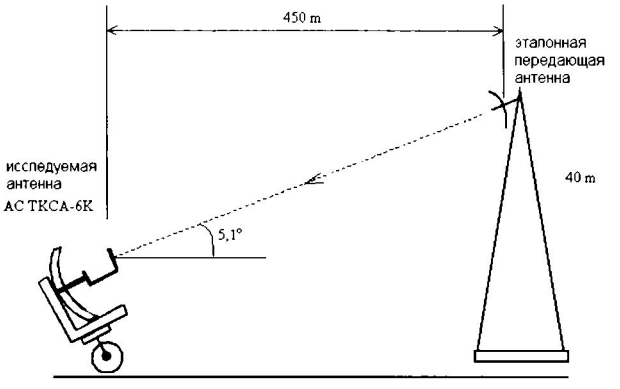


Рис.4. Схема измерений в ОАО «ОКБ МЭИ»

Во втором случае, измерения проводились в ближней зоне в безэховой камере (Рис.5.), после чего, расчётным методом восстанавливалось поле в дальней зоне.

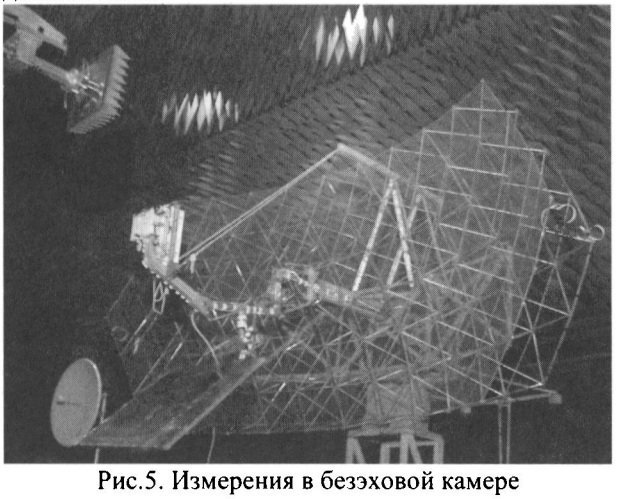
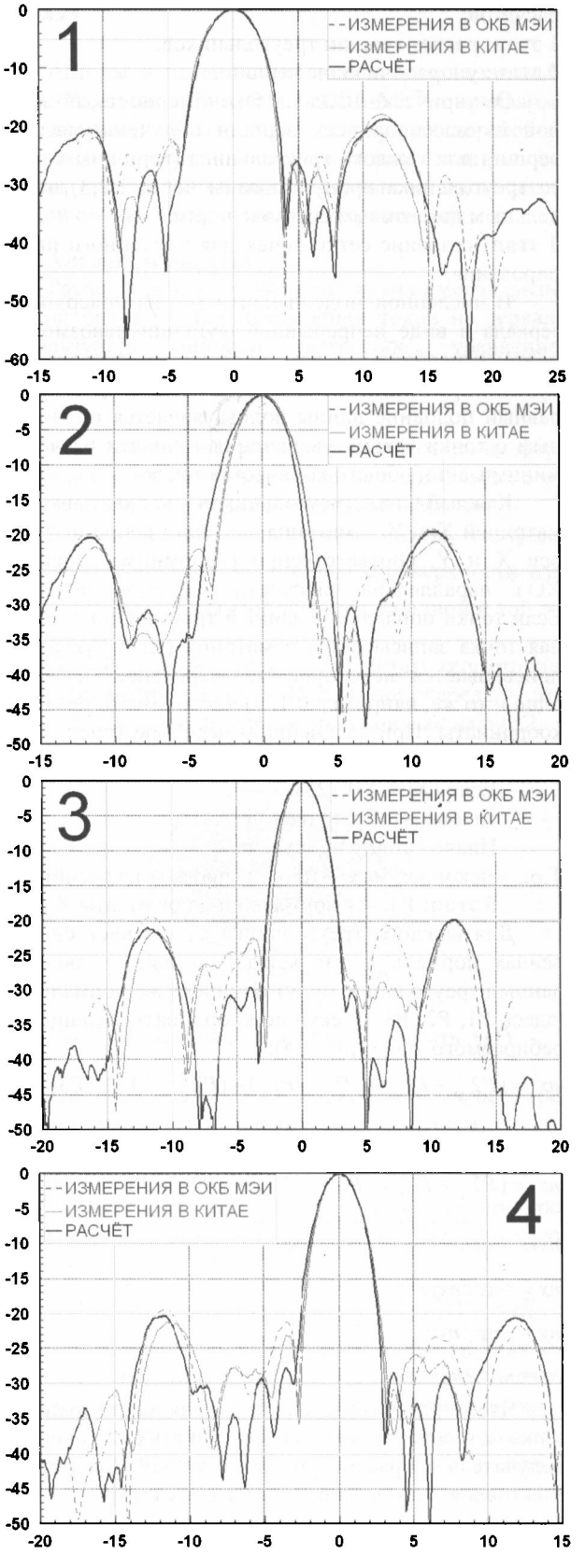


Рис.5. Измерения в безэховой камере

Параметры антенны:
Размеры: 6 х 2.8м
Фокусное расстояние: 2.172м
Длина ребра фасеты: 54см
Облучатель: рупорная 12-и элементная решетка (формируется всего 5 лучей посредством возбуждения одновременно 4 рупоров)
Длина волны: 9,38см (3,2ГГц)

Сравнение

Приведем нормированные диаграммы направленности для каждого луча в двух плоскостях:



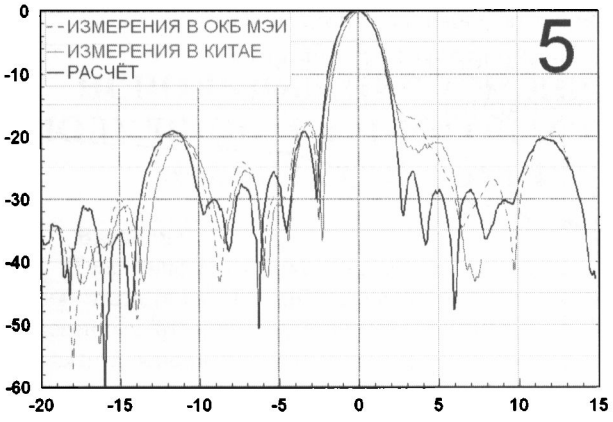


Рис.6. ДН в угломестной плоскости

Рис.7. Положение лучей в угломестной плоскости

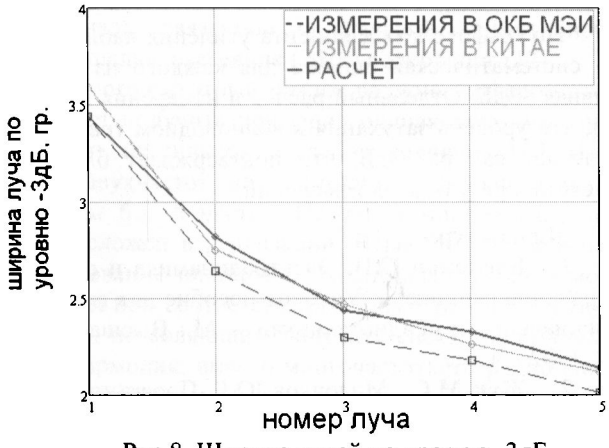


Рис.8. Ширина лучей по уровню -3дБ
(по углу места)

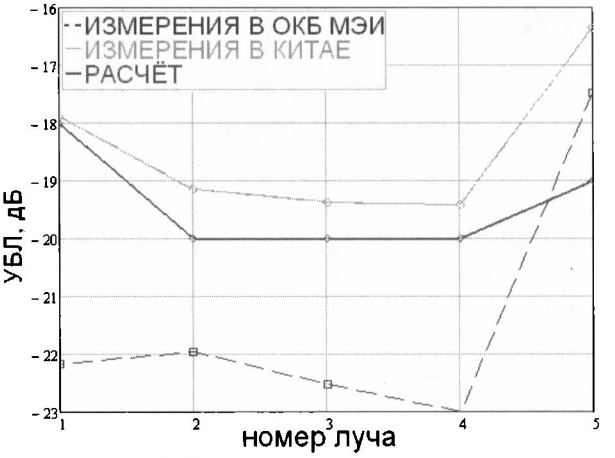
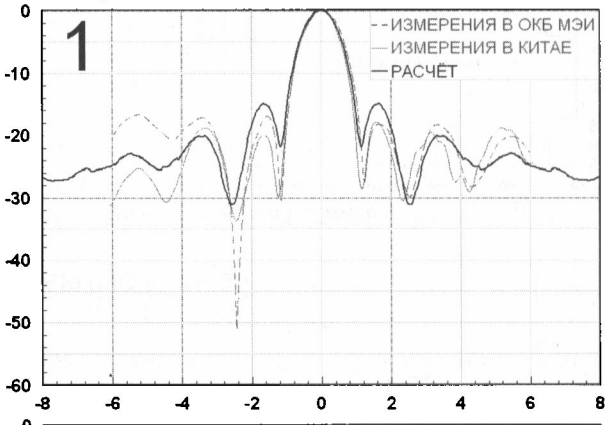
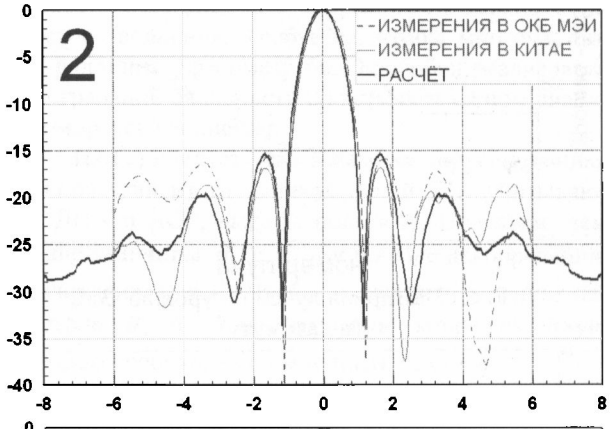
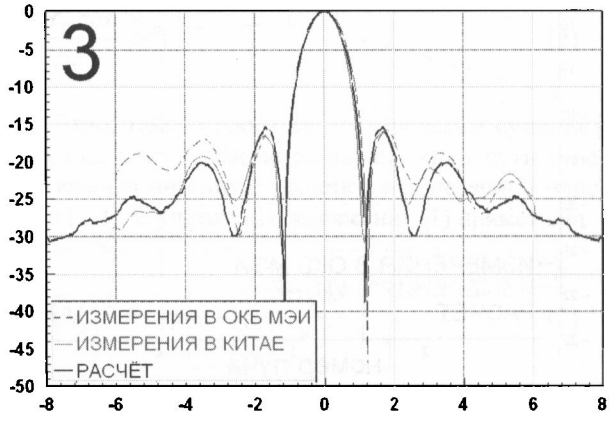


Рис.9. Уровень боковых лепестков
(по углу места)

Теперь приведём диаграммы направленности для азимутальной плоскости:







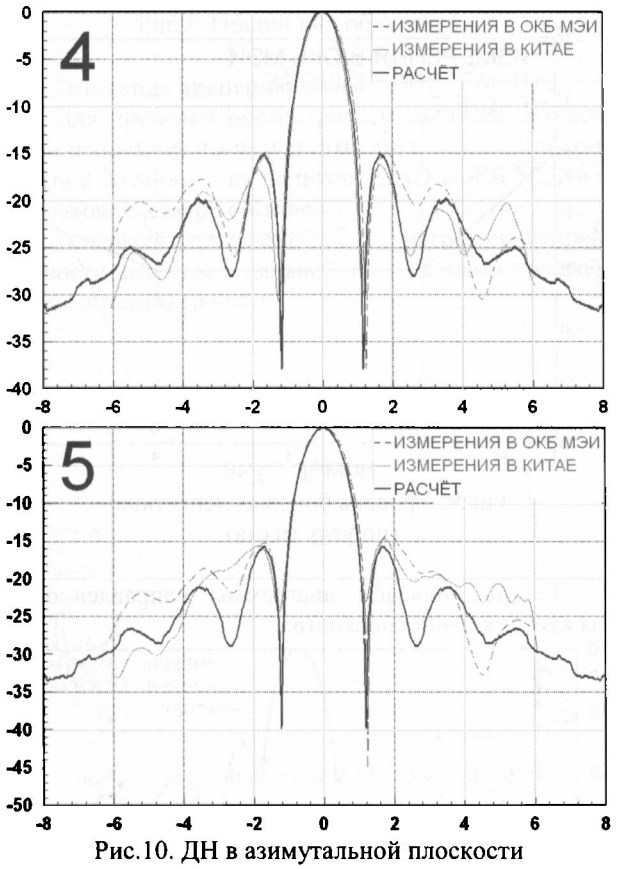


Рис.10. ДН в азимутальной плоскости

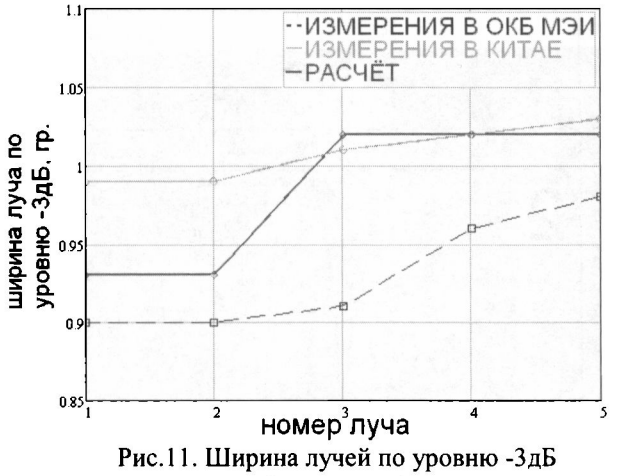


Рис.11. Ширина лучей по уровню -3дБ (по азимуту)

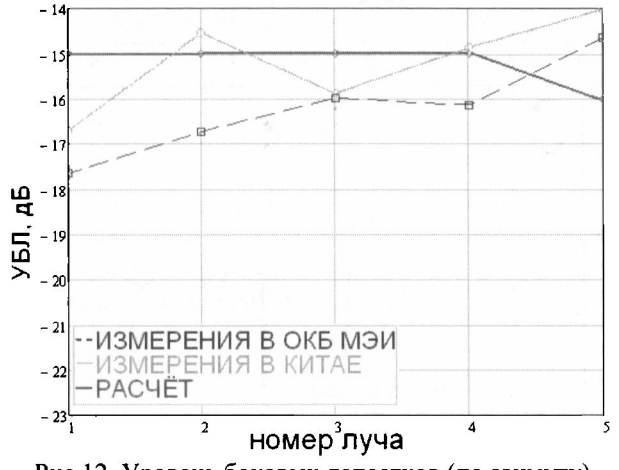


Рис.12. Уровень боковых лепестков (по азимуту)

Отдельно приведем график зависимости коэффициента усиления от номера луча:

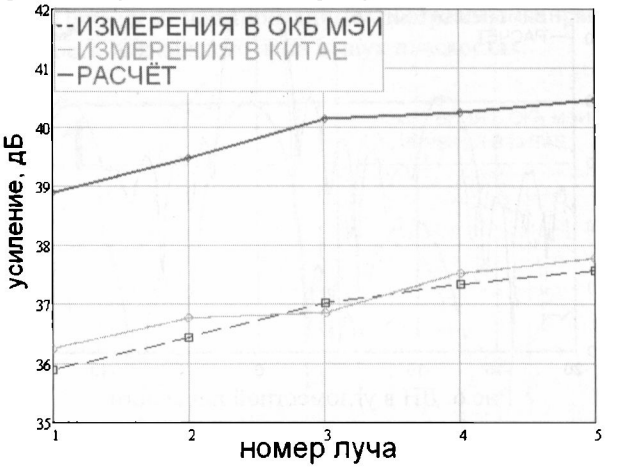


Рис.13. Коэффициент усиления

Выводы

Можно отметить, что совпадение графиков ДН по главному лепестку, а также по дифракционному (это особенность фасетных рефлекторов), достаточно хорошее. Что касается первых боковых лепестков, где метод физической оптики должен давать точные результаты, можно сказать, что результат измерений сильно зависит от затенения и некоторых других факторов. Хотя в расчётах затенение учитывалось, но достаточно точно учесть его, всё же, не позволяет программа. К тому же, первые боковые лепестки отличаются в двух экспериментах, и расчётный уровень боковых лепестков лежит в пределах различий между двумя измерениями.

В азимутальной плоскости совпадение лучше, что может быть связано с меньшим затенением в этой плоскости.

На графике коэффициента усиления наблюдается систематическая ошибка для каждого из лучей, равная ~3дБ. Отдельный расчёт и измерения показали, что уровень затухания в волноводном тракте составляет как раз 3дБ, что подтверждает близость расчёта и результатов измерений.

Литература

1. **Баскаков С.И.** Электродинамика и распространение радиоволн. Учебное пособие для вузов по специальности «Радиотехника». – М.: Высшая школа, 1992 – 416с.

2. **Жук М.С.**, Молочков Ю.Б. Проектирование антенно-фидерных устройств. –М.:Энергия, 1966. – 448 с

3. **Корн Г.** Справочник по математике. – М.: Наука, 1973 – 832с.

4. **Борисенко А.И.**, Тарапов И.Е. Векторный анализ и начала тензорного исчисления. - М.: Высшая школа, 1966 – 248с.

Асп. Хейн Тхура Аунг., д.т.н., проф. Баскаков А.И.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА С УГЛОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ В МНОГОЧАСТОТНОМ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРЕ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ АКВАТОРИЙ

Введение

Теоретические и экспериментальные исследования статистических характеристик радиосигналов, отраженных от морской поверхности (МП), анализ их связи с основными параметрами морского волнения - высотой, наклонами, направлением распространения волн, скоростью и направлением ветра над поверхностью моря открывают возможности для создания радиотехнических средств измерения этих параметров с ИСЗ. Один из наиболее информативных бортовых приборов для исследования характеристик взволнованности МП является двухчастотный радиоинтерферометр, позволяющий оперативно получать информацию с больших акваторий. Относительная простота и технологичность конструкции радиоинтерферометра позволяет разместить его на малом космическом аппарате. Известны работы посвященные разработке надирного двухчастотного радиоинтерферометра, позволяющего получить информацию о характеристиках морского волнения, связанных со скоростью поверхностного ветра:

- высоты морских волн путем вычисления взаимной корреляционной функции двухчастотного сигнала, отраженного от МП [1];
- крутизны морских волн путем оценки ширины доплеровского спектра и мощности отраженного сигнала, связанной с удельной эффективной площадью рассеяния (ЭПР) поверхности [2].

Многочастотный режим радиоинтерферометра позволяет получить примерно одинаковую чувствительность на сильном и слабом волнения МП. Поэтому двухчастот недостаточно, необходимо, как минимум 6… 8 частот. Но такой многочастотный сигнал сложен в реализации. В работе предложено использование зондирующего сигнала с угловой модуляцией при соответствующем выборе индекса модуляции, позволяющим получить спектр из одиннадцати гармоник, вместо многочастотного радио сигнала. Новым результатом данной работы является вид предлагаемого зондирующего сигнала с угловой модуляцией с оптимальным образом выбранным индексом модуляции.

Оптимальный выбор рабочих частот, соответствующих диапазону измеряемых ординат морских волн

Из литературы известны результаты расчета взаимной корреляции отраженных от МП сигналов СВЧ диапазона, разнесенных по частоте. При этом можно определить среднеквадратичную ординату возвышений морских волн по взаимной корреляционной функции (в океанографии закон распределения ординат морских волн принят гауссовым). Выражение для квадрата модуля нормированной взаимной корреляционной функции [1]:

$$|\dot{\rho}(\Delta f)|^2 = \frac{\exp\left\{-4\cdot\left(\frac{2\pi\sigma_h\Delta f}{c}\right)^2\right\}}{\sqrt{1+\left(\frac{\theta_э^2 H 2\pi\Delta f}{5{,}5c}\right)^2}}, \qquad (1)$$

где $\theta_э{}^2 = \frac{a_ш{}^2\theta_A{}^2}{5{,}5a_ш{}^2+\theta_A{}^2}$ – ширина диаграммы направленности антенны (ДНА) θ_A, $a_ш{}^2$ – коэффициент шероховатости МП, влияющий на ширину диаграммы обратного рассеяния МП (ДОР), σ_h – среднеквадратичные ординаты морских волн (в океанографии высоты морских волн оценивают величиной трехпроцентной обеспеченности $H_{3\%} = 5{,}2\sigma_h$, Δf – разнос излучаемых частот, выбираемый в зондирующим сигнале исходя из максимальной чувствительности коэффициента корреляции к высоте волн морского волнения. Требуется, чтобы многочастотный радиоинтерферометр был способен реализовать 4 – 5 градаций балльности во всём возможном диапазоне морского волнения.

Из (1) следует, что взаимная корреляционная функция зависит от эквивалентной ДН, учитывающая ДНА и ДОР, высоты полета H. При этом, чем больше величины $\theta_э$ и H, тем больше декорреляция, обусловленная ими. Чтобы исключить влияние параметров $\theta_э$ и H на взаимную корреляционную функцию, необходимо выполнить условие

$$\frac{\theta_э^2 H 2\pi\Delta f}{5{,}5c} << 1. \qquad (2)$$

Этого можно добиться доплеровском сужением ДНА радиоинтерферометра вдоль линии пути и использования антенную решетку в поперечной плоскости [1,4]. С учетом (2), выражение (1) примет вид

$$|\dot{\rho}(\Delta f)|^2 = \exp\left\{-4\cdot\left(\frac{2\pi\sigma_h\Delta f}{c}\right)^2\right\}. \qquad (3)$$

Из рис.1 следует, что наибольшая чувствительность характерна для центральной части графика. В начале и конце графика чувствительность (т.е. на сильные и слабые волнения) недостаточная. Используя формулу (3), можно оптимально выбрать разность измеряемых частот Δf при заданной максимальной измеряемой высоте морских волн $H_{3\%}$ [3].

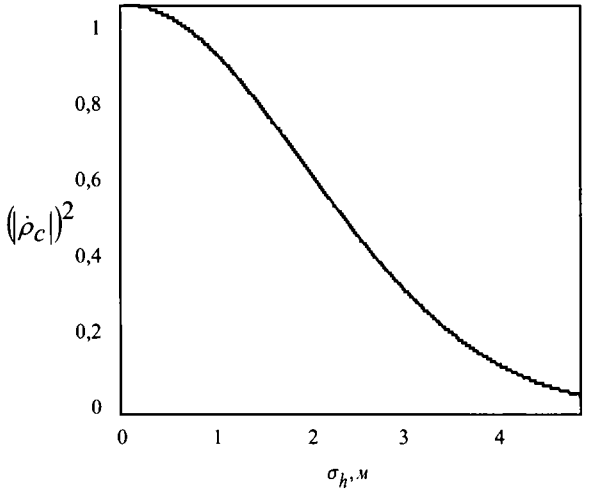


Рис. 1. Зависимость квадрата модуля коэффициента взаимной частотной корреляции от σ_h при $\Delta f = 12МГц$, $\lambda = 0{,}86см$, $H = 400км$

Разнос частот в зондирующим сигнале выбираем исходя из максимальной чувствительности коэффициента корреляции к высоте морских волн во всем возможном диапазоне морского волнения. Из графиков рис.2 и рис.3 видно, что рекомендуемые значения разностей рабочих частот $\Delta f = 60;24;12;6$ МГц соответствуют заданному диапазону измеряемых высот морских волн от штиля до шторма.

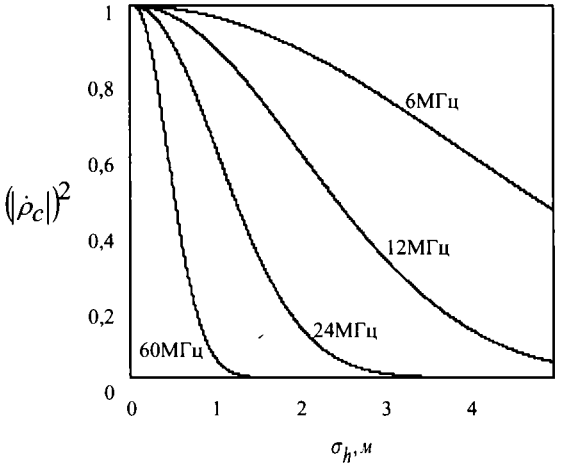


Рис. 2. Зависимость квадрата модуля коэффициента частотной корреляции от σ_h при $\lambda = 8мм$, d_α = 70 см, $H = 400км$

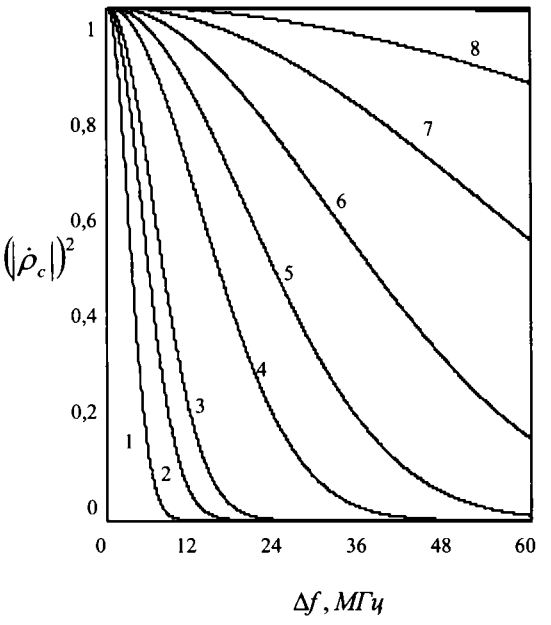


Рис. 3. Зависимость квадрата модуля коэффициента взаимной частотной корреляции от Δf при $\lambda = 8мм$, $d_\alpha = 70см$, $H = 400км$, $\sigma_h = 4{,}7м(1)$; $\sigma_h = 3{,}5м(2)$; $\sigma_h = 2{,}59м(3)$; $\sigma_h = 1.29м(4)$; $\sigma_h = 0{,}86м(5)$; $\sigma_h = 0{,}54м(6)$; $\sigma_h = 0{,}31м(7)$; $\sigma_h = 0{,}15м(8)$

Для рассмотрения оптимальной разности частоты, возьмётся производную из (3)

$$\frac{d}{d\Delta f}(|\dot{\rho}_c|)^2 = -\frac{16\pi^2 \Delta f \sigma_h{}^2 \exp\left(\frac{-8\pi^2 \Delta f^2 \sigma_h{}^2}{c^2}\right)}{c^2}. \quad (4)$$

На рис.4 изображена зависимость первой производной квадрата модуля коэффициента взаимной частотной корреляции от разностей частот во всем возможности диапазоне морского волнения.

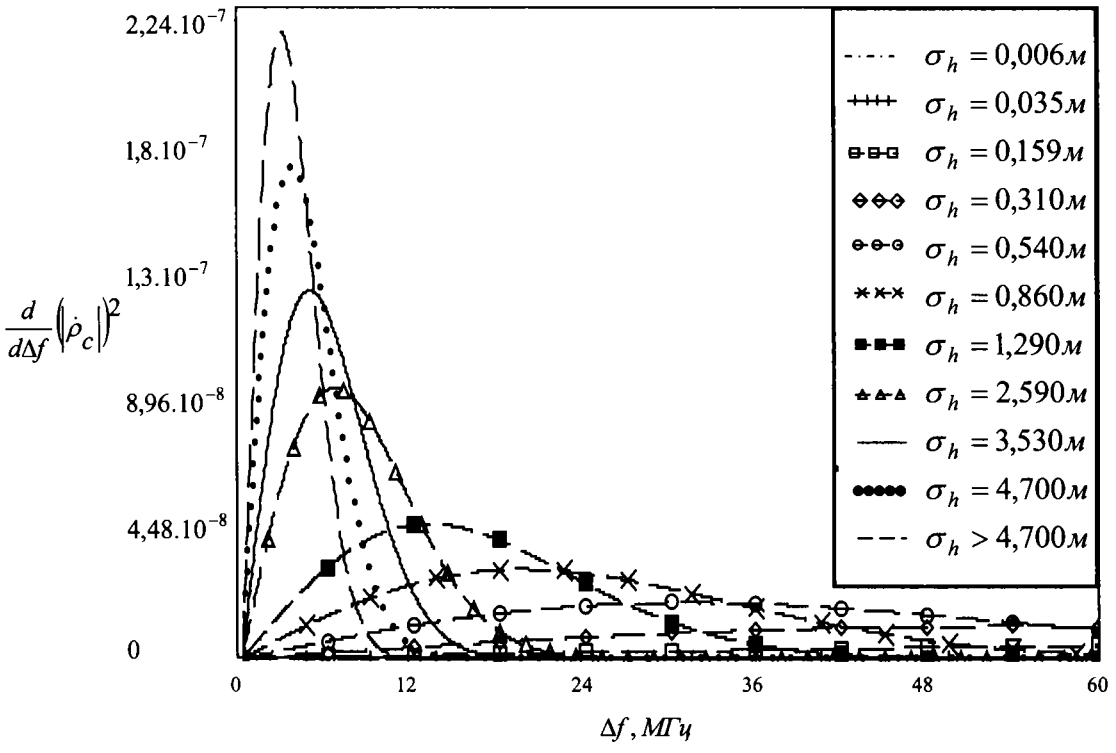


Рис. 4. Производная зависимости квадрата модуля коэффициента взаимной частотной корреляции от Δf при $\lambda = 8мм$

Из рис. 4 видно что, максимум производной значения квадрата модуля коэффициента взаимной частотной корреляции соответствует максимальной чувствительности. Разности рабочих частот Δf, соответствующие максимуму производной, обеспечивают максимальную чувствительность для соответствующих значениях σ_h

$$-\ln\left(\frac{d}{d\Delta f}\left(|\dot{\rho}_c|\right)^2\right) = \ln\left(\frac{16\pi^2{\sigma_h}^2}{c^2}\right) + \ln(\Delta f) + \frac{-8\pi^2\Delta f^2{\sigma_h}^2}{c^2}. \quad (5)$$

Возьмём вторую производную правой и левой части из (5), тогда получим (6) и (7)

$$\frac{d}{d\Delta f}\left(\ln\left(\frac{16\pi^2{\sigma_h}^2}{c^2}\right) + \ln(\Delta f) + \frac{-8\pi^2\Delta f^2{\sigma_h}^2}{c^2}\right) = \frac{1}{\Delta f} - \frac{16\pi^2\Delta f{\sigma_h}^2}{c^2}. \quad (6)$$

$$\frac{d}{d\Delta f}\left[-\ln\left\{\frac{d}{d\Delta f}\left(|\dot{\rho}_c|\right)^2\right\}\right] = -\left\{\frac{\frac{d^2}{d\Delta f^2}\left(|\dot{\rho}_c|\right)^2}{\frac{d}{d\Delta f}\left(|\dot{\rho}_c|\right)^2}\right\}. \quad (7)$$

$$-\left\{\frac{\frac{d^2}{d\Delta f^2}\left(|\dot{\rho}_c|\right)^2}{\frac{d}{d\Delta f}\left(|\dot{\rho}_c|\right)^2}\right\} = \frac{1}{\Delta f} - \frac{16\pi^2\Delta f{\sigma_h}^2}{c^2}. \quad (8)$$

Из (8) находим:

$$\frac{d^2}{d\Delta f^2}\left(|\dot{\rho}_c|\right)^2 = \left(\frac{1}{\Delta f} - \frac{16\pi^2\Delta f{\sigma_h}^2}{c^2}\right)\left(-\frac{d}{d\Delta f}\left(|\dot{\rho}_c|\right)^2\right). \quad (9)$$

Приравнивая к нулю (9) находим оптимальные значение частот для любой заданной степени морского волнения

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{c^2}{16\pi^2 \Delta f^2}} \quad . \qquad (10)$$

На рис. 5 показаны среднеквадратичные ординаты морских волн, для которых реализуется максимальная чувствительность радиоинтерферометра при выбранных значениях разностей излучаемых частот Δf .

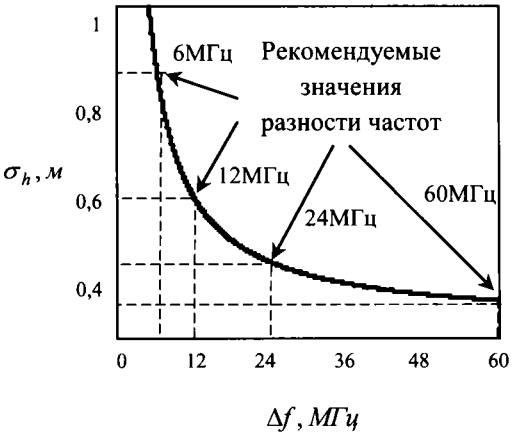


Рис. 5. Зависимость значении среднеквадратичных ординат морских волн σ_h от оптимального разноса частот Δf

Рекомендуемые значения разности частот - *60;24;12;6 МГц* - соответствуют заданному диапазону измеряемых высот морских волн от штиля до шторма. Многочастотный режем позволит получить примерно одинаковые чувствительности на сильном и слабом волнении для МП. В связи с трудностью реализации многочастотного зондирующего сигнала в работе предложен зондирующий сигнал с угловой модуляцией при соответствующем выборе индекса модуляции, позволяющим получить наиболее равномерный спектр из одиннадцати гармоник.

Формирование зондирующего сигнала с угловой модуляцией и выбор индекса модуляции

Как правило, при расчетах основных параметров системы исходят их заданных тактических характеристик: высоты полета, полосы обзора, некоторых параметров ориентации ДНА на орбите. Используемый сигнал с угловой модуляцией выражается следующими соотношениями.

$$v(t) = A_0 \cos[\omega_0(t) + m.\sin(\Omega(t))]. \qquad (11)$$

где ω_0 – несущая частота (36 ГГц) , Ω – модулирующая частота , m – индекс модуляции. С помощью разложения по функциям Бесселя уравнение (11) можно привести к виду

$$\begin{aligned} v(t) &= A_0 \cos[\omega_0(t) + m.\sin(\Omega(t))] = \\ &= A_0[J_0(m)\cos\omega_0(t) + \\ &+ J_1(m)[\cos(\omega_0 + \Omega)t - \cos(\omega_0 - \Omega)t] + \\ &+ J_2(m)[\cos(\omega_0 + 2\Omega)t + \cos(\omega_0 - 2\Omega)t] + \\ &+ J_3(m)[\cos(\omega_0 + 3\Omega)t - \cos(\omega_0 - 3\Omega)t]...] \end{aligned} \qquad (12)$$

Таким образом, при частотной и фазовой модуляциях спектр колебания состоит из бесконечного числа боковых частот, расположенных попарно симметрично относительно несущей частоты ω_0 и отличающихся от последней на $n\Omega$, где n – любое целое число. Амплитуда n-й боковой составляющей $A_n = J_n(m)A_0$, где A_0 – амплитуда немодулированного колебания, Jn(m) – функция Бесселя первого рода n – го порядка от аргумента m. Отсюда следует, что вклад различных боковых частот в суммарную мощность модулированного колебания определяется величиной m [5].

Для реализации выбранного максимального разноса частот равного 60 МГц при требуемом минимальном разносе частот в 6 МГц потребуется обеспечить обработку 11 гармонических составляющих в сигнале с угловой модуляцией. Остальные гармоники в спектре сигнала (12) не используются и их будем считать помехой, которая должна быть отфильтрована в приемнике. В табл. 1 показаны амплитуды гармоник спектров при выбранных индексах модуляции и отношение полезных гармоник сигнала к помеховым частотным составляющим. Используем только одиннадцать гармоник. А0 – А5 является амплитудами выбранных гармоник. В работе подробно проанализированы спектры сигнала для разных индексов модуляции от $m = 1{,}7$ до $m = 5$, рис. 8. В табл. 1 представлен фрагмент расчета от $m = 4{,}3$ до $m = 4{,}7$.

Для значения индекса модуляции m = 4,5 спектр наиболее равномерный. На рис.8 видно что, у него минимальный разброс амплитуд гармоник по отношению другим. Поэтому предлагается использовать зондирующий сигнал с угловой модуляцией при значении индекса модуляции 4,5, позволяющий получить спектр из одиннадцати гармоник при достаточном отношении сигнал / помеха. На рис.9 изображёна спектральная диаграмма выбранного сигнала с угловой модуляцией при значении индекса модуляции 4,5.

Таблица 1

Амплитуды гармоник спектров при выбранных индексах модуляции и отношение полезных гармоник сигнала к помеховым частотным составляющим

m	Обрабатывая полезные компоненты сигнала						Помеховые составляющие				Отношение сигнал / помехи
	A0	**A1**	**A2**	**A3**	**A4**	**A5**	**A6**	**A7**	**A8**	**A9**	
4,3	0,361	0,172	0,281	0,433	0,324	0,169	0,069	2,30E-02	6,68E-03	1,69E-03	1,55E+01
4,4	0,342	0,203	0,25	0,43	0,336	0,182	7,60E-02	2,60E-02	7,83E-03	2,03E-03	1,41E+01
4,5	0,321	0,231	0,218	0,425	0,348	0,195	8,40E-02	3,00E-02	9,13E-03	2,43E-03	1,26E+01
4,6	0,296	0,257	0,185	4,17E-01	3,59E-01	2,08E-01	9,30E-02	0,034	0,011	2,89E-03	1,12E+01
4,7	0,269	0,279	0,151	4,07E-01	3,69E-01	2,21E-01	1,02E-01	0,038	0,012	3,42E-03	1,00E+01

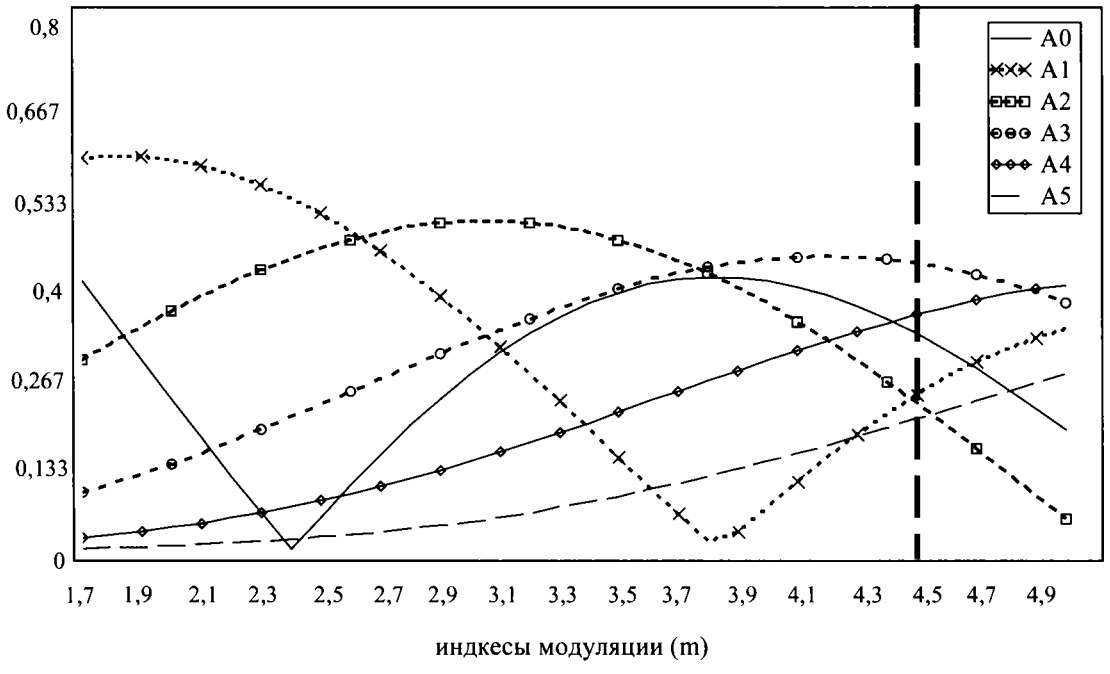


Рис. 6. Амплитуды гармоник спектра сигнала при выбранных индексах модуляции

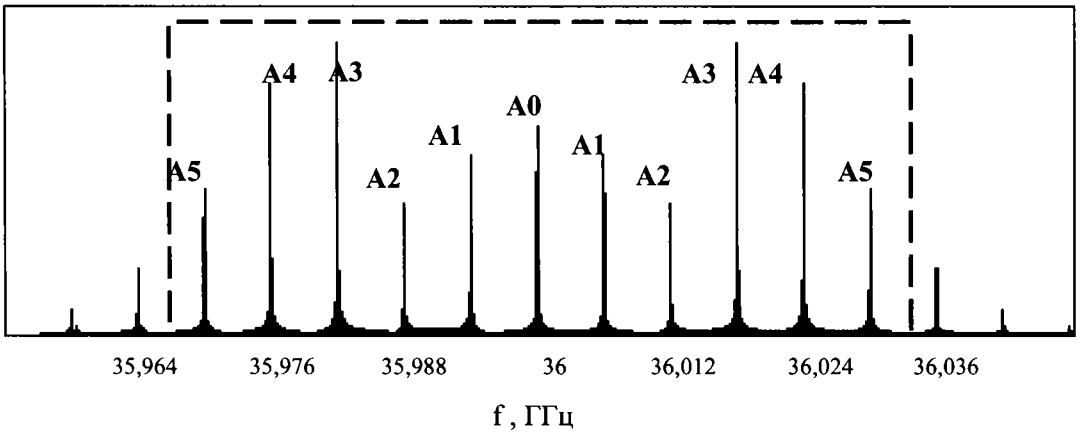


Рис. 7. Спектральную диаграмму при значении индекса модуляции m = 4,5

Избыточность спектра сигнала из одиннадцати гармоник может быть использована для;

Формирования комбинаций рекомендуемых разностей рабочих частот 60; 24; 12; 6 МГц, соответствующей максимальной чувствительности коэффициента корреляции к высоте морских волн во всем возможном диапазоне морского волнения.

Для расширения функциональных возможностей данного прибора. На его базе можно реализовать высокоточный радиовысотомер, использующий фазовый метод измерения высоты полета космического аппарата над средним уровнем МП.

Выводы

Показано, что величина квадрата модуля коэффициента взаимной корреляции обладает достаточной чувствительностью к высоте морских волн Н3% при значении разностей рабочих частот - 60; 24; 12; 6 МГц .

Предложено использование зондирующего сигнала с угловой модуляцией с соответствующим образом выбранным индексом модуляции $m = 4{,}5$, позволяющим получить спектр из одиннадцати гармоник, вместо многочастотного сигнала.

Избыточность спектра зондирующего сигнала может быть использована для одновременной реализации на базе космического многочастотного радиоинтерферометра высокоточного фазового радиовысотомера. Часть гармоник спектра сигнала с угловой модуляцией при этом пойдёт на раскрытие неоднозначности высокоточных измерений высоты на средним уровнем МП.

Литература

1. **Баскаков А.И.,** Ка Мин-Хо., Терехов В.А. Оценка ординат морских волн по взаимной двухчастотной корреляционной функции отраженных сигналов при надирном синтезировании апертуры антенны: //Радиотехника, 2006, №12, С. 37-41.
2. **Баскаков А.И.,** Ка Мин-Хо., Терехов В.А. Оценка среднеквадратичного наклона морских волн по статистическим характеристикам отраженных радиолокационных сигналов при облучении морской поверхности с борта самолета или космического аппарата. //Радиотехнические тетради, №26, 2003, С. 23-28.
3. **Гаранакерьян А.А.,** Сосунов А.С. Радиолокация морской поверхности. – Ростов: Изд. Ростовского университета, 1978. – 144с.
4. **Баскаков А.И.,** Гришечкин Б.Ю., Терехов В.А., Потенциальная точность оптимального дискриминатора для измерения степени взволнованности морской поверхности с борта космического аппарата. //Радиотехнические тетради. №37, 2008, С. 65-69.
5. **Гоноровский И. С.,** Демин М.П. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1994. – 480с.

Асп; Сейн Хт у, д.т .н., проф. Баскаков А.И.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ РАДИОВОЛН В ГИДРОМЕТЕОРАХ И В ПЫЛЕВОМ ОБЛАКЕ ДЛЯ БОРТОВОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОЙ ПОСАДКИ ВЕРТОЛЕТА

Введение

Надежность безопасной посадки вертолета в сложных метеоусловиях и в запыленной среде может быть достигнута тогда, когда будет использована бортовая радиолокационная система, которая обеспечивает получение изображения посадочной площадки и расположенны на ней объектов, которые могут представлять опасность в качестве препятствий при заходе на посадку. Для обеспечения надежного функционирования бортовой РЛС необходимо учитывать статистику ослабления радиоволн в гидрометеорах и в пылевом облаке, образующемся из-за винта вертолета. Оценки ослабления радиоволн в дождях большой интенсивности сделаны для территории государства Союз Мьянма.

Цель работы - исследование ослабления радиоволн в гидрометеорах и в пылевом облаке в миллиметровых диапазонах, на 35 ГГц и 94 ГГц, для разработки системы безопасной посадки вертолета.

Ослабление радиоволн в дожде

Дождь является одним из самых важных факторов, приводящих к возникновению потери радиолокационных сигналов. Для уяснения особенностей распространения в дождях были выполнены теоретические и экспериментальные исследования при применении радиодиапазона миллиметровых волн (ММВ) [1,2,3,4,5].

В [1] анализировались результаты расчетов удельного ослабления радиоволн в дожде в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах частот при температуре 20° С, и сделан вывод, что удельное ослабление в однородном дожде с интенсивностью 1...100 мм/ч на волнах 2...3 мм не превышает 1... 23,5 дБ/ км.

В работе [2] оценивалось ослабление радиоволн в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах частот (λ = 0,5...5 мм) с интенсивностью до ждя (0,5...150 мм/ч). Было показано, что при мороси с интенсивностью (I=0,25 мм/ч) ослабление радиоволн (γ = 0,2...0,5 дБ/км), в случае ливневых дождей (I=50...150 мм/ч) на волнах (λ = 0,5...3 мм) достигает значений 20...50 дБ/км.

В [3] были выполнены теоретические исследования ослабления ММВ в различных видах гидрометеоров при частоте 94 ГГц. При этом ослабление в однородном дожде с его интенсивностью, равной 25 мм/ч, составляет 12 дБ/км.

Для оценки ослабления радиоволн в дожде для частот 100 ГГц удобно использовать следующее выражение

$$\gamma_\partial = kR^\alpha \qquad (1)$$

где R – интенсивность дождя (мм/ч), k и α – параметры, зависящие от частоты. Зависимости удельного ослабления γ_∂ от частоты волны при различных значениях интенсивности дождя представлены на рис 1 [4].

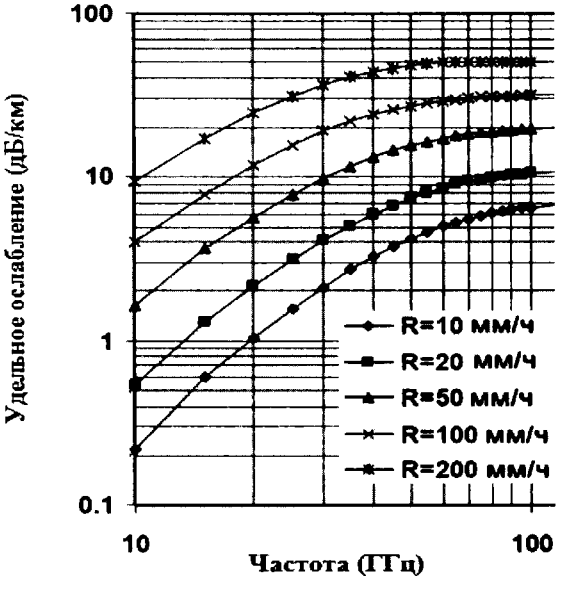


Рис. 1. Зависимость ослабления радиоволн от частоты при различных интенсивностях дождя R (мм/ч).

Из рис 1. видно, что в ММВ диапазоне частот ослабление радиоволн слегка увеличивается с ростом частот до 100 ГГц, и не превышает 50 дБ/км даже при грозовых дождях (I = 200 мм/ч).

Для того, чтобы определить максимальное ослабление в дождях для территории Союза Мьянма, необходимо узнать вероятность выпадения дождей. В [5] представлено, что вероятность выпадения дождей в Мьянме с интенсивностью 1...130 мм/ч находится в интервале от 1...0,01%. 2 мая 2008, когда обрушился циклон «Наргис» на Мьянму, наблюдалось, что максимальная интенсивность дождя составляла 102 мм/ч. Анализируя результаты вышеуказанных работ можно сделать вывод, что максимальное ослабление радиоволн в территории Мьянмы во всем ММВ диапазоне не более 35 дБ/км.

Ослабление радиоволн в тумане

Туман тоже является одним из доминирующих факторов в определении надежности миллиметровых радиосистем, особенно в прибрежных районах, где часто бывают густые туманы с высокой водностью. Задача определения ослабления ММВ в туманах решалась во многих работах [1, 6, 7, 8].

В работе [1] были выполнены теоретические и экспериментальные исследования ослабления миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн в туманах. Там анализ результатов расчета показывает, что ослабление в туманах на ММВ по сравнению с дождями невелико и не превышает 3...5 дБ/км.

В [6] проведен модельный расчет вероятностных распределений величин ослабления радиоволн в туманах в диапазоне "окон прозрачности" атмосферы на частотах 10, 35 и 94 ГГц, где наблюдается минимальное затухание по сравнению с соседними участками СМВ и ММВ. Наблюдалось, что на частоте 10 ГГц ослабление радиоволн, как в прибрежных туманах, так и внутриматериковых пренебрежимо мало. На частоте 35 ГГц ослабление в обоих случаях с видимости 30 м меньше 2 дБ/км. На 94 ГГц ослабление радиоволн при видимости 30 м в прибрежных туманах составляет около 10 дБ/км и в случае внутриматериковых туманов 3 дБ/км (см. рис. 2).

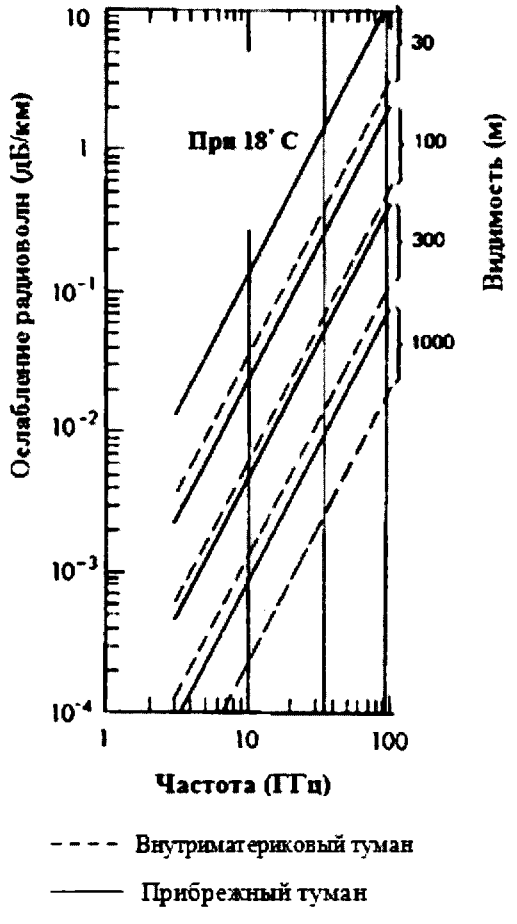


Рис. 2. Зависимость ослабления радиоволн от частоты в туманах.

В [7] также были проведены оценки ослабления в туманах в диапазоне частот 5...200 ГГц при -8°, 0, 10° и 20° С, и результаты приведены на рис. 3, где показана зависимость удельного коэффициента ослабления радиоволн от частоты.

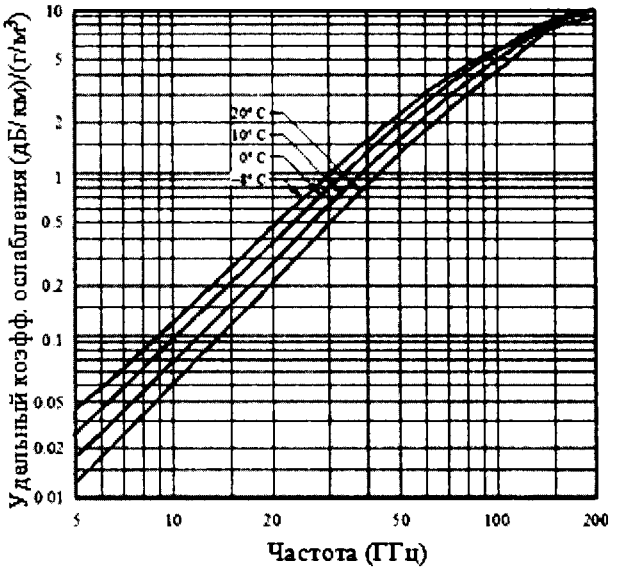


Рис. 3. Зависимость удельного коэффициента затухания радиоволн от частоты в туманах.

Ослабление радиоволн в туманах определяется на основе водности образования. В случае средних туманах (видимость порядка 300 м) Водность, как правило, составляет около 0,05 г/м^3, а в густых туманах (видимость порядка 50 м) 0,5 г/м^3 [8]. Произведение коэффициента затухания K_l и водности M [г/м^3] выражают конкретные ослабления в туманах γ, которая может быть рассчитана как

$$\gamma = K_l M, \text{ дБ/км.} \qquad (2)$$

Оказалось, что в случае средних туманов (видимость порядка 300 м) ослабление радиоволн при t=10° С на частотах 35 и 94 ГГц составляет 0,04 дБ/км и 0,225 дБ/км соответственно, а в густых туманах достигает до 0,4 дБ/км и 2,25 дБ/км соответственно.

Итак, подводя итоги, для РЛС безопасной посадки вертолета при максимальной дальности действия 200 м для территории государства Союза Мьянма потери радиоволн в дожде со средней интенсивностью 50 мм/ч на частоте 35 ГГц не более 2,4 дБ, а на 94 ГГц не превышают 4 дБ. Потери радиоволн даже в случае густых туманах с видимостью 30 м на частоте 35 ГГц не превышают 0,3 дБ, а на 95 ГГц не более 2 дБ.

Ослабление радиоволн в пылевом облаке

Для успешного функционирования РЛС ММВ кроме учета возможных потерь радиоволн в различных гидрометеорах, необходимо учитывать данные об ослаблении в пылевом облаке, дело в том, что массивное пылевое облако, образующееся возду-

хом от винтов вертолета, существенно затемняет посадочную площадку.

В [9] выполнено исследование распределения частиц по размерам для пылевого облака, образующегося воздухом от винтов вертолета, а также проведен расчет ослабления радиоволн в пылевом облаке (см. рис. 4).

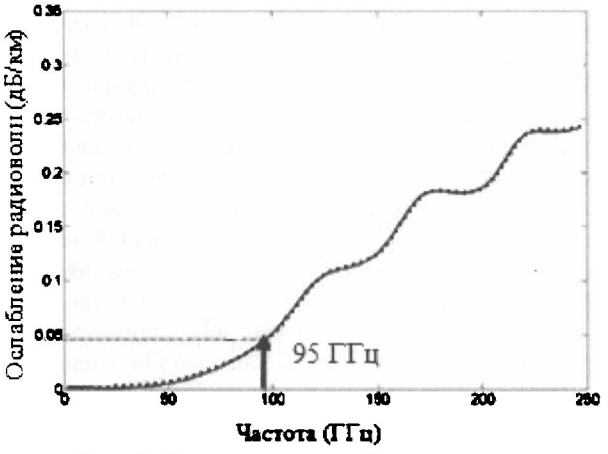


Рис. 4. Зависимость ослабления радиоволн от частоты в пылевом облаке.

Результаты расчета показывают, что ослабление радиоволн в пылевом облаке ниже 0,1 дБ / км на 95 ГГц. Так как радиус частиц находится в диапазоне 1-10 мкм, много меньше длины волны, пыль является почти прозрачной в миллиметровом диапазоне.

На ММВ оценки ослабления радиоволн в пылевом облаке могут быть так же представлены в виде формулы [10]:

$$\gamma_{dust} = 81.86 \times 10^{-3} \frac{\mathrm{Im}(-K) M_d}{\lambda \rho}, \text{ дБ/км} \quad (3)$$

где $M_d = 37.3V^{-1.07}$ - плотность пылевой частицы в г/м^3 V - видимость, λ - длина волны излучения, $\rho = 1{,}8$ г/см^3 - эффективная концентрация частиц с 8 % водностью и $K = \frac{\dot{\varepsilon}_r - 1}{\dot{\varepsilon}_r + 2}$, $\mathrm{Im}(-K)$ - мнимая часть K. Согласно результатам экспериментальных исследований Научно-исследовательского Мичиганского университета, диэлектрическая проницаемость пылевой частицы в пылевом облаке, образующемся воздухом из-за винтов вертолета, составляет $\dot{\varepsilon}_r = 3 - j0{,}1$ [9].

Результаты выполненных расчетов ослабления радиоволн в пылевом облаке по (3) приведены на рис. 5, где показана зависимость ослабления радиоволн от видимости.

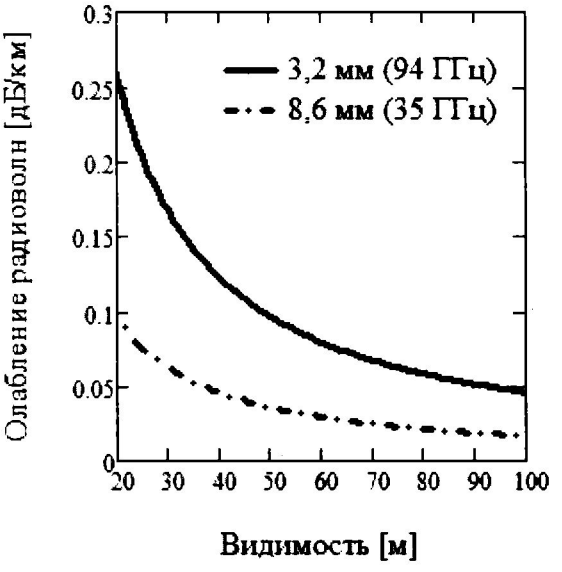


Рис. 5. Зависимость ослабления радиоволн от видимости в пылевом облаке, образующемся воздухом от винтов вертолета.

Анализируя результаты расчетов нетрудно сделать заключение, что потери распространения радиоволн в пылевом облаке даже при видимости 20 м на 35 ГГц не превышают 0,1 дБ/км, а на частоте 94 ГГц не более 0,25 дБ/км.

Выводы

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

Для территории государства Союза Мьянма потери радиоволн в дожде со средней интенсивностью 50 мм/ч при максимальной дальности действия 200 м (где начинается обнаружение мешающих посадке вертолета наземных объектов) на частоте 35 ГГц не превышают 2,4 дБ, а на частоте 95 ГГц не более 4 дБ.

Потери радиоволн при дальности 200 м на частоте 35 ГГц даже в случае густых туманов с видимостью 30 м не превышают 0,3 дБ, а на частоте 94 ГГц не более 2 дБ.

В пылевом облаке, образующемся воздухом из-за винтов вертолета потери радиоволн при дальности 200 м даже при видимости 20 м на 35 ГГц не более 0,02 дБ, а на 95 ГГц 0,05 дБ, и практически ими можно пренебречь.

Литература

1. **Быстров Р. П.,** Соколов А. В., Чеканов Р. Н. Дальность действия миллиметровых РЛС в дождях. //Радиотехника, 2005, № 1, С. 19-23.

2. **Наумов А. П.,** Станкевич В. С. Ослабление миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн в дождях. //Радиофизика, т. 12, № 2, 1969, С. 145-147.

3. **David Wikner.** A prediction of 94-GHz radiometer performance in various environmental conditions for army applications. Army research laboratory report, September, 1996.

4. **Vaclav Kvicera, Martin Grabner.** Rain attenuation on terrestrial wirless links in the mm Frequency Bands. Advanced Microwave and Millimeter Wave Technologies Semiconductor Devices Circuits and Systems, Czech Metrology Institute, pp. 642, March, 2010.

5. http://www.fao.org/nr/myanmar/

6. http://handle.dtic.mil/100.2/ADA011642

7. **ITU-R Rec. P.840-3:** "Attenuation due to clouds and fog", ITU, 1999.

8. **H. Sizun.** Signals and telecommunication technology. Radio wave propagation for telecommunication applications. pp. 414, Paris, 2003.

9. **Mustafa Zohet Rangwala.** Analysis, design and fabrication of a millimeter-wave radar for helicopter assisted landing system. A dissertation for a degree of Master of science (Electrical Engineering), pp. 72 // University of Michigan, 2007.

10. **Graham Brooker, Mark Bishop, Ross Hennessy.** Evolution of a suite of smart millimeter wave radar systems for situational awareness and automation in mines. 2008 Austrilian Mining Technology conference "Smart Technologies for Sustaining the minerals Boom" // University of Sydney, Australia, 16-18 September, 2008.

Асп.Нагин И.А., к.т.н. Шатилов А.Ю.

СИНТЕЗ И АНАЛИЗ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ ПО СИГНАЛАМ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ И АВТОМОБИЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СЧИСЛЕНИЯ ПУТИ

Введение

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) используются массовым потребителем уже многие годы, и накопленный опыт показал, что одной из сложнейших сред для работы данных систем являются города. В городах чаще всего происходит пропадание сигнала вследствие отсутствия прямой видимости спутника. Эта проблема особенно актуальна для автомобиля, оснащенного спутниковой системой навигации. Такие пропадания приобретают постоянный характер при движении по узким улицам с высотными домами вдоль дороги. Этот эффект в англоязычной литературе получил название «Urban Canyon» - «Городской каньон (ущелье)». Очевидна необходимость повышения эффективности СРНС в городских условиях. Одним из многообещающих подходов является комплексирование приемника с различными датчиками. В первую очередь нас интересует возможность их массового применения на автомобилях. Датчики АБС (анти блокировочной системы) присутствуют практически на каждом новом автомобиле и могут предоставить информацию о скорости вращения колес. Представляется возможным использовать эти данные в качестве дополнения к измерениям навигационной системы [1]. Скорость вращения колес автомобиля может дать как информацию о перемещении автомобиля в продольном направлении, так и информацию об угле поворота. Это позволит получать информацию о перемещении потребителя - автомобиля даже в том случае, когда полностью недоступны сигналы навигационной системы. Метод ведения навигации при помощи использования пройденной траектории после отключения основной системы навигации в англоязычной литературе получил название «Dead reckoning» - «Счисление пути».

Для решения задачи повышения точности и надежности автомобильной навигационной системы возможно использование комплексного алгоритма обработки информации от приемника СРНС и автомобильной системы счисления пути (АССП), предоставляющей данные о продольной скорости перемещения автомобиля и скорости изменения угла его ориентации. АССП включает в себя датчики АБС, кольца ФАП, следящие за фазой оборота колеса, и вычислительное устройство (ВУ) (рис. 1).

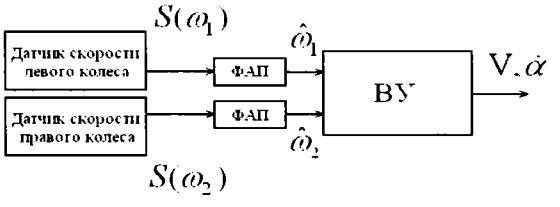


Рис. 1. Функциональная схема АССП

На выходе ВУ АССП, формируются оценки продольной скорости V и скорости приращения угла $\dot{\alpha}$.

Задача комплексирования СРНС и АССП решена по схеме (рис. 2). Сигналы с выхода систем подаются на вход комплексного фильтра, на выходе которого получаются оценки компонент вектора состояния фильтра. В фильтре оцениваются погрешности АССП для компенсации их влияния на характеристики системы, что особенно актуально при отсутствии сигналов СРНС.

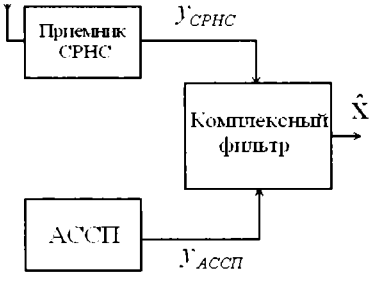


Рис. 2. Функциональная схема системы СРНС/АССП.

Считается, что автомобиль движется по плоской местности, т.е. задача решается без учета высотной составляющей. Предполагается, что информация о координатах и скоростях потребителя с выхода приемника СРНС, а также продольная скорость и скорость приращения угла с выхода АССП приходят с частотой 10 Гц. Такова будет и частота дискретизации фильтра (период T=0,1 с).

Автомобильная система счисления пути

Для оценки частоты сигнала, поступающего с датчика АБС, предполагается использовать систему фазовой автоподстройки (ФАП). На выходе системы ФАП формируется оценка угловой частоты вращения колеса $\hat{\omega}$. В дальнейшем будем полагать, что ошибка оценивания ω в системе ФАП мала, а оценка угловой частоты определяется выражением $\hat{\omega} = \omega + n_\omega$, где n_ω – белый гауссовский шум (БГШ).

Скорость движения автомобиля в системе АССП определяется следующим образом:

$$V = (r_{эф1}\omega_1 + r_{эф2}\omega_2)/2, \qquad (1)$$

где ω_1 – частота вращения левого заднего колеса, ω_2 – частота вращения правого заднего колеса, $r_{эф1} = r + \delta r_1$ – эффективный (текущий) радиус левого заднего колеса, r - номинальный радиус колеса, δr_1 - погрешность радиуса левого заднего колеса,

возникающая вследствие неточного измерения радиуса, а также из-за изменения давления в покрышке (к примеру, давление может изменяться вследствие изменения температуры); $r_{эф2} = r + \delta r_2$ – эффективный радиус правого заднего колеса, δr_2 - погрешность радиуса правого заднего колеса.

Для получения информации о повороте автомобиля вокруг вертикальной оси необходимо иметь данные о скорости вращения двух колес одной оси. Скорость вращения вокруг вертикальной оси будет зависеть от величины колеи К – расстояния между колесами (рис. 3). Скорость вращения вокруг вертикальной оси определяется выражением:

$$\dot{\alpha}' = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{2\pi}{K}\left(r_{эф1}\omega_1 - r_{эф2}\omega_2\right), \qquad (2)$$

где $d\alpha$ – угол между вектором скорости автомобиля $\vec{\mathbf{V}}$ в текущий и предыдущий моменты времени.

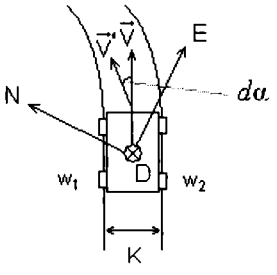


Рис. 3 Движение автомобиля

Автомобиль поворачивает направо, если $\omega_1 > \omega_2$, и налево, если наоборот. Угол между вектором скорости $\vec{\mathbf{V}}$ в момент времени t+T и осью oN в системе координат NED («North East Down» – «Север Восток Низ», англ):

$$\alpha = \int_{t}^{t+T} \dot{\alpha} dt + \alpha_0, \qquad (3)$$

где α_0 - угол поворота автомобиля в момент времени t.

Таким образом, скорость автомобиля в системе координат NED определяется выражениями:

$$\begin{aligned} V_N &= V \sin\alpha \\ V_E &= V \cos\alpha, \\ V_D &= 0 \end{aligned} \qquad (4)$$

Используя лишь информацию о скорости вращения колес, нет возможности определить угол наклона автомобиля, и, как следствие, изменение его высоты. Поэтому будем решать задачу приближенно, полагая, что автомобиль движется по ровной, без наклона, поверхности.

Постановка задачи комплексной фильтрации

Будем искать оценку вектора состояния **x**, который зададим как:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} V \\ a \\ \delta r_1 \\ \delta r_2 \\ \alpha \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix}, \qquad (5)$$

где V - продольная скорость, a - продольное ускорение, δr_1 - ошибка измерения радиуса левого колеса, δr_2 - ошибка измерения радиуса правого колеса, α - угол между продольной осью автомобиля и осью oN системы координат NED, $\dot{\alpha}$ - скорость приращения этого угла.

Целью синтеза является получение алгоритма оценивания координат и скоростей автомобиля (4), которые связаны с компонентами вектора состояния соотношениями:

$$\begin{aligned} V_N &= V \sin\alpha, \\ V_E &= V \cos\alpha, \\ y(t) &= \int V_N(t) dt, \\ x(t) &= \int V_E(t) dt. \end{aligned} \qquad (6)$$

Задачу решаем в дискретном времени. Поэтому запишем уравнение, описывающее эволюцию вектора состояния в дискретном времени, в виде:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{\Phi}(\mathbf{x}_{k-1}) + \mathbf{G}_{k-1}, \qquad (7)$$

Векторная функция Ф, описывающая связь вектора состояния $\mathbf{x}_k$ на k-ом шаге, с вектором состояния $\mathbf{x}_{k-1}$ на k-1 шаге, определяется как:

$$\mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} V_{k-1} + a_{k-1} \cdot T \\ a_{k-1} \\ \delta r_{1_{k-1}} \\ \delta r_{2_{k-1}} \\ \alpha_{k-1} + \dot{\alpha}_{k-1} \cdot T \\ \dot{\alpha}_{k-1} \end{bmatrix}, \qquad (8)$$

где Т-период дискретизации.

Матрица шумов G, описывающая случайную составляющую модели изменения вектора состояния, определим следующим образом:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ n_a \\ n_{\delta r_1} \\ n_{\delta r_2} \\ 0 \\ n_{\dot{\alpha}} \end{bmatrix}. \qquad (9)$$

Вектор наблюдений **y** фильтра описывается как:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} V_N + n_{V_N} \\ V_E + n_{V_E} \\ V + \delta V + n_V \\ \dot{\alpha} + \delta\dot{\alpha} + n_{\dot{\alpha}} \end{bmatrix}, \qquad (10)$$

где V_N - измеренная приемником СРНС северная составляющая скорости, V_E - измеренная приемником СРНС восточная составляющая скорости, $V+\delta V+n_V$ - продольная скорость, измеренная АССП, $\dot{\alpha}+\delta\dot{\alpha}+n_{\dot{\alpha}}$ - скорость приращения угла α, измеренная АССП.

Наблюдение (10) можно представить в виде:

$$\mathbf{y}_k=\mathbf{S}(\mathbf{x}_k)+\mathbf{n}_{\mathbf{y}_k}. \qquad (11)$$

Векторная функция **S**, описывающая связь вектора наблюдений с вектором состояний, имеет вид:

$$\mathbf{S}=\begin{bmatrix} V\cos(\alpha) \\ V\sin(\alpha) \\ V+(\delta r_1\omega_1+\delta r_2\omega_2)/2 \\ \dot{\alpha}+\dfrac{2\pi}{K}(\delta r_1\omega_1-\delta r_2\omega_2) \end{bmatrix}, \qquad (12)$$

где ω_1 и ω_2 - частоты вращения левого и правого колеса, соответственно, K – величина колеи (расстояние между колесами).

Вектор n_y, описывающий модель ошибок наблюдений, имеет следующие компоненты

$$\mathbf{n}_\mathbf{y}=\begin{bmatrix} n_{V_N} \\ n_{V_E} \\ n_V \\ n_{\dot{\alpha}} \end{bmatrix}, \qquad (13)$$

где n_{V_N} и n_{V_E} - БГШ, описывающий шумовые составляющие погрешностей измерения приемником СРНС северной и восточной составляющих скорости, n_V - БГШ, описывающий шумовую составляющую погрешности измерения продольной скорости системой АССП, $n_{\dot{\alpha}}$ - БГШ, описывающий шумовую составляющую погрешности измерения скорости приращения угла α системой АССП.

Синтез комплексного фильтра обработки информации приемника СРНС и АССП

Для получения оценок вектора состояния **x** используем уравнения дискретной нелинейной фильтрации, оптимальной в гауссовском приближении по критерию минимума дисперсии ошибки фильтрации (также известные как расширенный фильтр Калмана (РФК)). В принятой постановке задачи фильтруемый процесс описывается уравнением:

$$\mathbf{x}_k \mathbf{\Phi}(\mathbf{x}_{k-1}) \mathbf{G}_{k-1},$$

наблюдаемый процесс —

$$\mathbf{y}_k=\mathbf{S}(\mathbf{x}_k)+\mathbf{n}_{\mathbf{y}_k}.$$

Уравнения фильтрации имеют вид [2]:

$$\hat{\mathbf{x}}_k=\tilde{\mathbf{x}}_k+\mathbf{D}_{\mathbf{x},k}\left(\frac{\partial\mathbf{S}(\tilde{\mathbf{x}}_k)}{\partial\mathbf{x}}\right)^T\mathbf{D}^{-1}_{\mathbf{n}}(\mathbf{y}_k-\mathbf{S}(\tilde{\mathbf{x}}_k)),$$

$$\tilde{\mathbf{x}}_k \mathbf{\Phi}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}),$$

$$\tilde{\mathbf{D}}_{\mathbf{x},k}=\frac{\partial\mathbf{\Phi}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})}{\partial\mathbf{x}}\mathbf{D}_{\mathbf{x},k-1}\left(\frac{\partial\mathbf{\Phi}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})}{\partial\mathbf{x}}\right)^T+\mathbf{G}_{k-1}\mathbf{G}^T_{k-1},$$

$$\mathbf{D}^{-1}_{\mathbf{x},k}=\tilde{\mathbf{D}}^{-1}_{\mathbf{x},k}+\left(\frac{\partial\mathbf{S}(\tilde{\mathbf{x}}_k)}{\partial\mathbf{x}}\right)^T\mathbf{D}^{-1}_{\mathbf{n}}\left(\frac{\partial\mathbf{S}(\tilde{\mathbf{x}}_k)}{\partial\mathbf{x}}\right),$$

где $\hat{\mathbf{x}}_k$ - оценка фильтруемого процесса, $\tilde{\mathbf{x}}_k$ - экстраполированная оценка процесса, $\mathbf{D}_{\mathbf{x},k}$ - матрица дисперсий ошибок фильтрации, $\tilde{\mathbf{D}}_{\mathbf{x},k}$ - матрица дисперсий ошибок экстраполяции.

Для дальнейшего определения структуры фильтра и моделирования его работы вычислим матрицы частных производных $\frac{\partial\mathbf{\Phi}(\mathbf{x})}{\partial\mathbf{x}}$ и $\frac{\partial\mathbf{S}(\mathbf{x})}{\partial\mathbf{x}}$:

$$\frac{\partial\mathbf{\Phi}(\mathbf{x})}{\partial\mathbf{x}}=\begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad (14)$$

$$\frac{\partial\mathbf{S}(\mathbf{x})}{\partial\mathbf{x}}=\begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & 0 & 0 & -V\cdot\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & 0 & 0 & 0 & V\cdot\cos(\alpha) & 0 \\ 1 & 0 & \dfrac{\omega_1}{2} & \dfrac{\omega_2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{2\pi\omega_1}{K} & -\dfrac{2\pi\omega_2}{K} & 0 & 1 \end{bmatrix}. \qquad (15)$$

В случае, когда система СРНС прекращает выдачу измерений, вектор наблюдений (10) принимает вид:

$$\mathbf{y}=\begin{bmatrix} V+\delta V+n_V \\ \dot{\alpha}+\delta\dot{\alpha}+n_{\dot{\alpha}} \end{bmatrix}, \qquad (16)$$

матрица **S** (12) принимает вид:

$$\mathbf{S}=\begin{bmatrix} V+(\delta r_1\omega_1+\delta r_2\omega_2)/2 \\ \dot{\alpha}+\dfrac{2\pi}{K}(\delta r_1\omega_1-\delta r_2\omega_2) \end{bmatrix}, \qquad (17)$$

а матрица частных производных $\frac{\partial\mathbf{S}(\mathbf{x})}{\partial\mathbf{x}}$ (15) принимает вид:

$$\frac{\partial\mathbf{S}(\mathbf{x})}{\partial\mathbf{x}}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dfrac{w_1}{2} & \dfrac{w_2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{2pw_1}{K} & -\dfrac{2pw_2}{K} & 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad (18)$$

Для получения оценок скоростей и координат автомобиля используются соотношения (6), которые для дискретного времени можно записать в виде:

$$\begin{aligned} V_{Nk}&=V_k\cdot\sin\alpha_k \\ V_{Ek}&=V_k\cdot\cos\alpha_k \end{aligned}, \qquad (19)$$

$$\begin{aligned} y_k&=y_{k-1}+V_{Nk}\cdot T \\ x_k&=x_{k-1}+V_{Ek}\cdot T \end{aligned}, \qquad (20)$$

При работе фильтра после момента, когда приемник СРНС перестал выдавать оценки скоростей, начинают накапливаться ошибки определения координат, которые тем больше, чем дольше приемник

недоступен. В момент включения приемника, накопленные ошибки необходимо сбросить, заменив на шаге $k_{вкл}$ координаты, вычисленные в фильтре, на координаты, полученные приемником СРНС:

$$\begin{matrix} y_{k_{вкл}} = y_{СРНС,k_{вкл}} \\ x_{k_{вкл}} = x_{СРНС,k_{вкл}} \end{matrix}, \quad (21)$$

Результаты моделирования работы комплексного алгоритма

На вход фильтра подаются сформированные входные воздействия. В качестве основы для модели воздействий была взята типичная городская зигзагообразная траектория движения автомобиля – потребителя. Траектория разбивается на несколько участков:

1) Ускорение. На этом участке автомобиль разгоняется с постоянным ускорением $a_{разгона}$, в течении $T_{разгона}$. В конце разгона автомобиль приобретает скорость $V_{прям}$.

2) Прямолинейное движение. Автомобиль движется прямолинейно, со скоростью $V_{прям}$, в течении $T_{прям}$.

3) Торможение. Автомобиль тормозит со скорости $V_{прям}$ до скорости $V_{пов}$ за время $T_{торм}$, с постоянным ускорением $a_{торм}$.

4) Поворот. Автомобиль совершает поворот на 90 градусов по дуге окружности R≈13 м, с постоянной скоростью $V_{пов}$ за время $T_{пов}$. Поворот может быть как правый, так и левый.

Из этих участков собирается траектория нужной протяженности. Параметры движения подобраны так, чтобы траектория соответствовала обычным городским темпам движения:

$$V_{прям} = 25\frac{м}{с} = 90\frac{км}{ч},$$

$$V_{пов} = 7\frac{м}{с} = 25.2\frac{км}{ч},$$

$$T_{разгона} = 7 \text{ с},$$

$$a_{разгона} = \frac{25 - 7 м}{7} = 2.57\frac{}{с^2},$$

$$T_{торм} = 4 \text{ с},$$

$$a_{торм} = -\frac{25 - 7 м}{4} = -4.5\frac{}{с^2},$$

$$T_{пов} = 3 \text{ с},$$

$$T_{прям} = 20 \text{ с}.$$

Одна из возможных оцененных комплексным алгоритмом траекторий при выключенном на интервале приемнике и наличии шумов изображена, на рис. 4. Также изображена истинная траектория.

Из приведенного ниже рис. 4 видно, что чем дольше алгоритм отсчитывает координаты на основе измерений АССП, тем большая накапливается ошибка. Вместе с тем, форма траектории повторяет форму истинной траектории. В момент получения от приемника СРНС нового навигационного решения, рассчитанные алгоритмом координаты, заменяются на новые, более точные координаты, измеренные приемником СРНС.

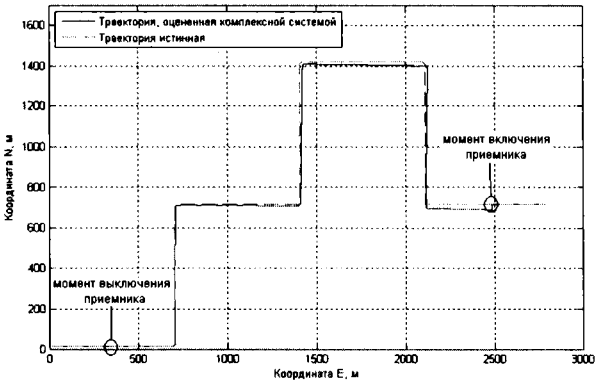


Рис. 4. Траектории истинная и оцененная комплексной системой

Реализации ошибок по координатам N и E в пути между траекторией, оцененной комплексной системой с выключенным на интервале приемником СРНС, и истинной траекторией, в зависимости от времени изображены на рис. 5. Из рисунка видно, что ошибки начинают нарастать после первого поворота автомобиля.

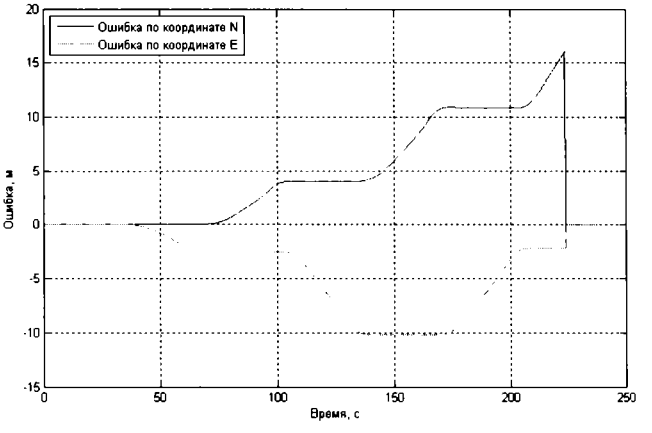


Рис. 5. Реализации ошибок по координатам N и E

Во время работы приемника происходит оценивание погрешностей радиусов колес. В то время, когда приемник не работает, оценивание прекращается, и оценки погрешностей радиусов колес остаются практически неизменными. На рис. 6 приведены временные зависимости ошибок оценивания погрешностей радиусов колес автомобиля. Из рисунка видно, что погрешности радиусов оценены со значительной точностью уже после нескольких секунд движения.

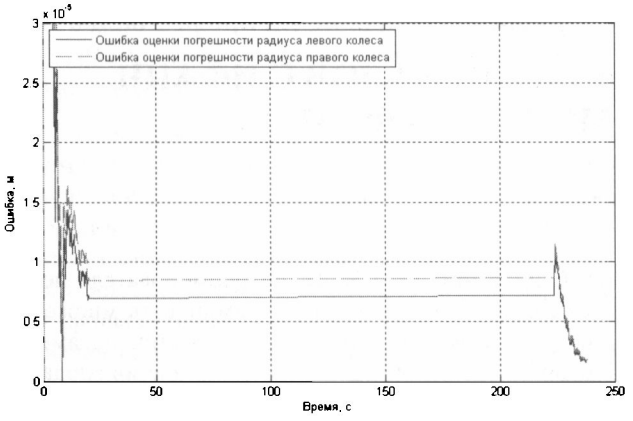


Рис. 6. Ошибки оценивания погрешностей радиусов колес

Для оценки общего качества работы комплексной системы представляют интерес конечные ошибки (ошибки, накопленные комплексной системой к концу интервала времени, когда приемник был отключен). Зависимости статистических характеристик конечных ошибок от продолжительности интервала времени, в течение которого приемник не выдает измерений, приведены на рис. 7.

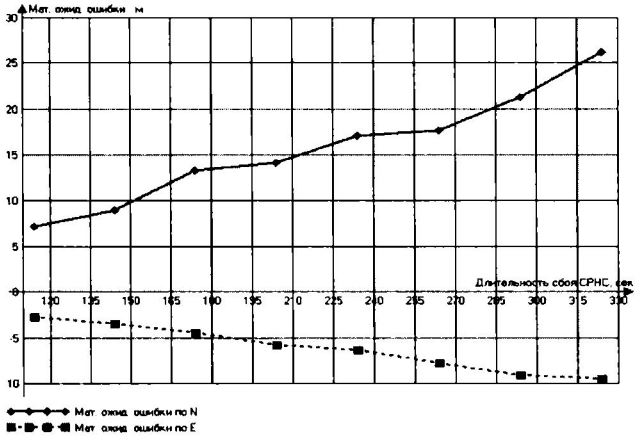


Рис. 7. Математические ожидания ошибок по координатам N и E

Из приведенного графика видно, что величина математических ожиданий конечных ошибок по координатам N и E зависят линейно от времени интервала, в течение которого приемник не выдает измерений. Увеличение этого интервала ведет к росту времени накопления ошибок, и росту конечных ошибок. На рис. 8 изображены зависимости СКО ошибок по координатам N и E от продолжительности интервала времени, в течение которого приемник не выдает измерений.

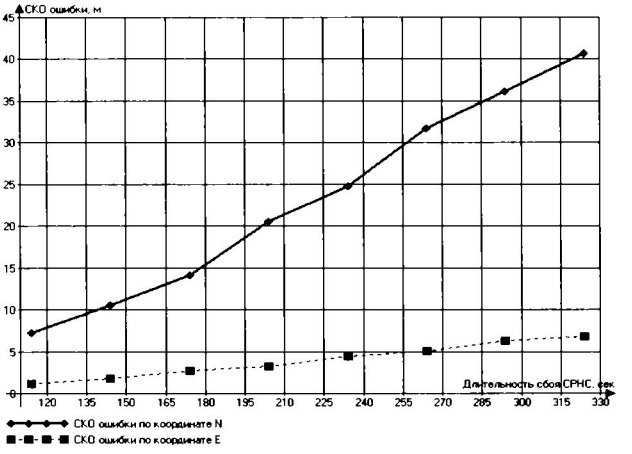


Рис. 8. СКО ошибок по координатам N и E

Из приведенного графика видно, что СКО конечных ошибок по координатам N и E зависят линейно от времени интервала, в течение которого приемник не выдает измерений. Увеличение этого интервала ведет к росту времени накопления ошибок, и росту конечных ошибок.

Заключение

В статье приведено математическое описание автомобильной системы счисления пути и составлена модель ее функционирования. Проведен синтез комплексного алгоритма обработки данных, получаемых от приемника СРНС и автомобильной системы счисления пути. В результате имитационного моделирования комплексной системы обработки показано, что наиболее эффективное использование комплексной системы обработки имеет место в условиях, когда сигналы СРНС могут пропадать на длительное время. В этому случае в комплексной системе проводится коррекция автомобильной системы счисления пути до пропадания спутниковых сигналов, что обеспечивает снижение накапливаемых в автомобильной системы счисления пути ошибок измерений после пропадания спутниковых сигналов.

Литература

1. **Global Positioning Systems**, Inertial Navigation, And Intergration/ Mohinder S. Grewal, Lawrence R. Weill, Angus P. Andrews. – A John Wiley & Sons, Inc. Publication. N.Y., 2001.

2. **Перов А.И.** Статистическая теория радиотехнических систем. – М: Радиотехника, 2003.

Черкашин А.А., д. т. н., проф. Удалов Н.Н.

ДИНАМИКА СИНТЕЗАТОРА ЛЧМ СИГНАЛОВ С ИФАПЧ И СИГМА-ДЕЛЬТА МОДУЛЯТОРОМ

Введение

К настоящему времени с помощью ЛЧМ сигналов решается широкий круг задач, связанных с военной, промышленной и коммерческой техникой. К таким задачам можно отнести: обнаружение и оценку параметров движения объектов, распознавание космических тел, физические измерения. ЛЧМ сигналы применяются также в измерительной технике, в системах передачи информации.

Все основные способы формирования частот и сигналов можно разделить на две основные группы: пассивные и активные. При пассивном формировании ЛЧМ сигналов требуемый сигнал получают возбуждением коротким видео- или радиоимпульсом дисперсионной линии задержки со встречно-штыревыми преобразователями или отражательными решётками. Этому способу формирования присущи существенные недостатки: малое отношение сигнал-шум на выходе, невозможность оперативной регулировки параметров формируемых сигналов и текущей коррекции фазовых отклонений, возникающих в последующих усилительно – преобразовательных трактах [1].

В свою очередь, активные формирователи частот и сигналов могут быть подразделены на системы прямого и косвенного синтеза, а также их комбинацию.

Системы прямого синтеза основаны на преобразовании частоты опорного генератора в выходную частоту без использования обратной связи в тракте формирования. Из всего многообразия систем прямого синтеза на сегодняшний день в основном используются цифровые вычислительные синтезаторы многоуровневых сигналов (ЦВС). Возможности ЦВС напрямую определяются быстродействием цифровых устройств. На сегодняшний день на широкодоступных ЦВС затруднительно получить ЛЧМ сигнал полосой более 600 МГц.

Косвенные синтезаторы подразумевают формирование выходного сигнала при помощи управляемого по частоте генератора в сочетании с системами автоподстройки. Известны три разновидности подобных систем: с измерителем на линии задержки; с измерителем, осуществляющим стробирование ЧМ сигналов короткими видео- или радиоимпульсами; с цифровым преобразователем ЧМ сигналов [1]. Общий недостаток подобных устройств состоит в малом числе точек измерения сигнала ошибки и, как следствие, значительных результирующих отклонениях частоты и фазы относительно требуемых законов их изменения.

Для формирования сигналов с ЧМ используются также комбинированные вычислительные синтезаторы (КВС), в которых используются элементы ЦВС и система ФАПЧ. Такие формирователи позволяют с высокой точностью формировать множество сигналов с весьма широкими полосами, параметры которых определяются кодовыми словами, подаваемыми от устройства управления [2]. В последние годы распространение получают КВС синтезаторы ЧМ сигналов на основе системы ИФАПЧ с дробно-переменным коэффициентом деления (ДДПКД) и сигма-дельта модулятором (СДМ) [3, 4]. Как известно, СДМ используется для перераспределения и рандомизации паразитных составляющих, возникающих при работе ДДПКД. В статье описывается динамика такого синтезатора в цикле формирования ЛЧМ сигналов.

Структурная схема синтезатора ЛЧМ сигналов

Схема формирователя ЛЧМ сигналов (рис.1) сходна со структурой синтезатора дискретного множества частот на основе ИФАПЧ с СДМ [5,6]. Основное отличие заключается в том, что во время формирования ЛЧМ сигнала на СДМ подается линейно-нарастающий код со счетчика Сч. С устройства управления (УУ) на синтезатор подается код начальной частоты K_f и код скорости K_v. Цикл формирования ЛЧМ сигнала ($T_ц$) состоит из времени подготовки к модуляции (паузы) $T_п$ и времени действия модуляции ($T_{ЛЧМ}$). Во время паузы или после включения питания должна установиться начальная частота ЛЧМ сигнала для следующего периода $T_{ЛЧМ}$, т.е. должны пройти переходные процессы по частоте и фазе. Эти процессы определяют минимальное время подготовки к модуляции. Таким образом, во время паузы схема работает как синтезатор частот с ДДПКД. При формировании сигнала возникают противоречия при выборе параметров петлевого ФНЧ в кольце ИФАПЧ. С одной стороны нужно обеспечить достаточное подавление шумов и паразитных составляющих спектра, обусловленных в т.ч. работой СДМ, а с другой – обеспечить оптимальную установившуюся фазовую ошибку и максимальную заданную скорость формирования сигнала.

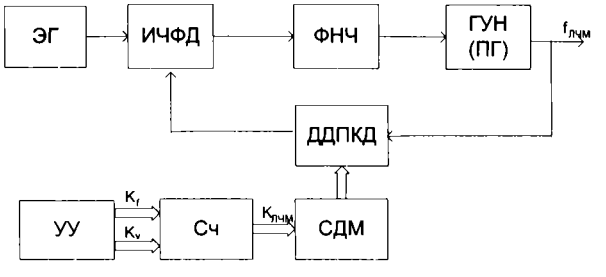


Рис.1. Структурная схема синтезатора ЛЧМ сигналов с СДМ

Схема импульсного частотно-фазового детектором (ИЧФД) с тремя состояниями, наиболее широко используемая в синтезаторах с ИФАПЧ, а также ФНЧ второго порядка, представлена на рис. 2. Статическая характеристика такого ИЧФД представляет собой многолистовую поверхность [7]. В переходном процессе по частоте мгновенная разность частот сигналов на входах ИЧФД рф □□ не меняет знак, и характеристику среднего тока заряда ИЧФД можно считать периодической функцией полигонального типа с периодом 2□□ Особенностью такой характеристики является наличие в ней постоянной составляющей, меняющей знак при изменении знака расстройки входных сигналов ИЧФД. За счет интегрирования этой постоянной составляющей тока на ёмкости C_1 фильтра формируется поисковое напряжение, приводящее кольцо автоподстройки в синхронный режим. Положение сигнала $\varphi_{одпкд}=\varphi_{гун}/N$ в синхронном режиме либо фиксировано относительно фазы эталонного сигнала $\varphi_{эг}$ при равенстве частот сравниваемых сигналов, либо происходит его перемещение, если имеет место разность частот сравниваемых сигналов.

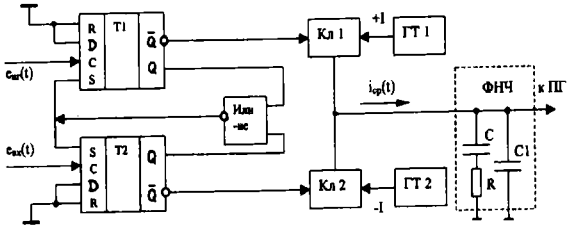


Рис.2. Схема ИЧФД с фильтром второго порядка

В синтезаторах частот и сигналов частоту дискретизации системы (частоту опорного генератора) обычно выбирают как минимум на порядок больше полосы кольца ИФАПЧ, а в случае применения СДМ, для обеспечения необходимого подавления шумов квантования эта отношение может превышать два порядка. Исходя из этого, при анализе возможна замена дискретной модели синтезатора на непрерывную. Кроме, того, будем полагать модуляционную характеристику ГУН идеальной, т.е. линейной. Рассмотрим вначале динамику системы во время подготовки к модуляции, т.е. в режиме стабилизации начальной частоты. Определим длительность переходных процессов по частоте и фазе.

Переходный процесс по частоте

Для нахождения длительности переходного процесса по частоте t_f запишем операторное уравнение системы ФАПЧ:

$$p_0\Phi + K(p_0)F(\Phi) = \Upsilon_н, \qquad (1)$$

где: $\Phi = \varphi_{гун}/N - \varphi_{эг}$, $t_0 = \Omega_c t$, оператор $p_0 = \dfrac{d}{dt_0}$;

$$\Omega_c = \sqrt{\frac{SI}{NC_1}}, \qquad (2)$$

где S – крутизна модуляционной характеристики ГУН, I – максимальное значение тока на выходе ИЧФД, N – коэффициент деления частоты ГУН; *F(Ф)* – характеристика среднего тока заряда ИЧФД; $\Upsilon_н = \dfrac{\omega_{гун0}/N - \omega_{эг}}{\Omega_c}$ - нормированная начальная расстройка системы.

При больших начальных расстройках □н время установления частоты t_f много больше времени установления фазы t_{Φ}, и для оценки динамических свойств системы сначала найдем первое из них. Для этого достаточно учесть только постоянную составляющую характеристики среднего тока ФД, поскольку, во-первых, ее влияние на динамику будет определяющим для больших начальных расстроек, а во-вторых, учет сигнала ошибки частоты биений требуется лишь тогда, когда частота биений попадает в полосу пропускания ФНЧ. При этом ее влияние лишь уменьшит время переходного процесса. Поэтому сделанные ниже расчеты можно считать оценкой сверху.

Для случая рФ>0 учтем в функции *F(Ф)* только постоянную составляющую $F_{ср} = \pi$. Тогда уравнение (1) перепишется в виде:

$$\Upsilon + K(p_0)F_{ср} = \Upsilon_н, \qquad (3)$$

где $\Upsilon = p_0\Phi = \dfrac{\omega_{гун}/N - \omega_{эг}}{\Omega_c}$ – нормированная текущая расстройка по частоте входных сигналов ИЧФД.

Рассмотрим случай использования в кольце ИФАПЧ фильтра 2-го порядка, изображенного на рис. 2. Операторная передаточная функция фильтра имеет вид:

$$K(p) = \frac{1 + pRC}{p(C + C_1)(1 + \dfrac{C_1RC}{C + C_1}p)}.$$

Переходя к безразмерному времени, получим:

$$K(p_0) = \frac{1 + p_0T_0}{gp_0(1 + p_0T_0/g)}, \qquad (4)$$

где $T_0 = RC\Omega_c$, $g = \dfrac{C + C_1}{C_1}$.

Подставляя (4) в (3), получаем [7]:

$$P_0\Phi + \frac{1 + p_0T_0}{gp_0(1 + p_0T_0/g)}\pi = \Upsilon_н. \qquad (5)$$

Решение этого уравнения можно представить в виде:

$$t_f = \begin{cases} \dfrac{\gamma_н}{\pi}, & \gamma_н \le \dfrac{\pi T_0}{g} \\ \dfrac{g\gamma_н}{\pi} - \dfrac{T_0}{g}(g-1), & \gamma_н \ge \dfrac{\pi T_0}{g}\left(1+\dfrac{2}{g}\right) \end{cases}. \quad (6)$$

Переходный процесс по фазе

Переходный процесс по фазе в режиме стабилизации начальной частоты ЛЧМ описывается линейным дифференциальным уравнением третьего порядка [8]:

$$T p_0^3 \Phi + g p_0^2 \Phi + T p_0 \Phi + \Phi = 0, \quad (7)$$

справедливым на интервале изменения разности фаз $|\Phi| \le 2$ □. В зависимости от вида решений уравнения (7) эти точки могут быть либо устойчивыми узлами (УУ), либо устойчивыми фокусами (УФ). На рис. 3 показано разбиение плоскости параметров (g, T) на области в соответствии с характером стационарных точек. Границами таких областей являются кривая нулевого дискриминанта характеристического уравнения, соответствующего (7)

$$T p^3 + g p^2 + T p + 1 = 0, \quad (8)$$

определяемая условием:

$$\frac{1}{T_0} = \frac{1}{27}\left(9\chi - 2\chi^3 \pm 2\sqrt{(\chi^2-3)^3}\right),$$

где $\chi = g/T$, а знаки "плюс" и "минус" соответствуют разным ветвям этой зависимости; прямая g = 1 является границей устойчивости системы. Условие устойчивости на практике выполняется всегда, поскольку $g = (C+C_1)/C_1 = 1+C/C_1 > 1$.

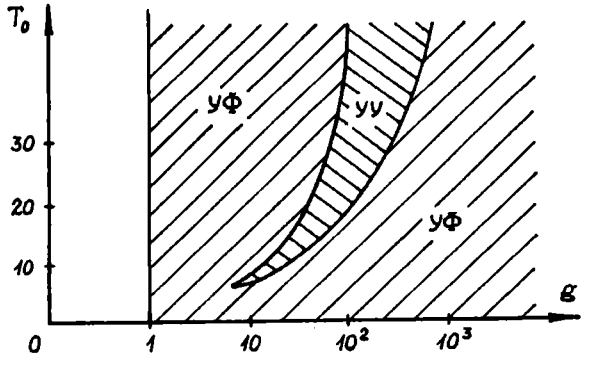


Рис.3. Характер стационарных точек в области параметров g и T_0

Скорость установления стационарного режима в переходном процессе по фазе определяется абсолютными величинами действительных частей корней p_1, p_2, p_3 уравнения (8), или, более точно - минимальной по модулю из этих величин. Общее решение однородного дифференциального уравнения третьего порядка (в случае некратных и действительных корней, что подразумевает апериодический процесс установления фазы), имеет вид

$$\Phi(t) = A_1 \exp(p_1 t) + A_2 \exp(p_2 t) + A_3 \exp(p_3 t). \quad (9)$$

Корню с минимальной по модулю действительной частью соответствует наиболее слабо затухающее решение. Напомним, что для устойчивой системы действительные части всех корней характеристического уравнения должны быть отрицательными.

Коэффициенты A_1, A_2 и A_3 решения (9) определяются из начальных условий. В момент времени t=0 значение начальной фазы Φ_0 случайно и находится в пределах от 0 до 2. Значения $p\Phi(t=0)$ и $p^2\Phi(t=0)$ определяются из уравнения (1) при условии $\Phi = \Phi_0$, $\Upsilon_н = 0$ и $p = \infty$:

$$p\Phi(t=0) = -K(p)\Big|_{p=\infty} F(\Phi_0) = 0;$$
$$p^2\Phi(t=0) = p(-K(p))\Big|_{p=\infty} F(\Phi_0)) = -pK(p)\Big|_{p=\infty} F(\Phi_0) = \Phi_0 \quad (10)$$

Дифференцируя (10) по времени, при условии t = 0, получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} A_1 + A_2 + A_3 = \Phi_0 \\ p_1 A_1 + p_2 A_2 + p_3 A_3 = 0 \\ p^2{}_1 A_1 + p^2{}_2 A_2 + p^2{}_3 A_3 = \Phi_0 \end{cases} \quad (11)$$

Будем считать $|p_1| > |p_2| > |p_3|$. При больших значениях t экспонента, соответствующая наибольшему из корней p_1, будет давать наименьший вклад, так что при условии $A_2/A_3 \sim 1$ значение фазы будет определяться экспонентой с минимальным показателем $\exp(p_3 t)$. Время переходного процесса в этом случае приближённо равно:

$$t_\Phi \approx \frac{1}{|p_3|_{ост}} ln\left(\frac{A_3}{\Phi}\right),$$

где $\Phi_{ост}$ - уровень, по которому определяется окончание переходного процесса.

В работе [9] утверждается, что наилучшее быстродействие в переходном процессе по фазе в системе будет иметь место в случае равенства корней

$$p_1 = p_2 = p_3 = -1/\sqrt{3}. \quad (12)$$

В этом случае, корни характеристического уравнения равны и максимальны по модулю. При этом общее решение однородного дифференциального уравнения имеет вид:

$$\Phi(t) = A_1 \exp(p_1 t) + A_2 t \exp(p_1 t) + A_3 t^2 \exp(p_1 t), \quad (13)$$

коэффициенты которого A_1, A_2, A_3 определяются из полученных выше начальных условий (10). При равных корнях характеристического уравнения несложно рассчитать значения коэффициентов:

$$A_1 = \Phi_0;\ A_2 = -p_1\Phi_0;\ A_3 = \Phi_0/2.$$

Учитывая, что $\Phi(t_\Phi) = \Phi_{ост}$, где $\Phi_{ост}$ – сколь угодно малая фиксированная величина, можно записать в неявной форме зависимость $t_\Phi(\Phi_0)$:

$$\Phi_0 = \frac{\Phi_{ост}}{\left(1 + \frac{t_\Phi}{\sqrt{3}} + \frac{t_\Phi^2}{2}\right)} exp\left(\frac{t_\Phi}{\sqrt{3}}\right) \qquad (14)$$

Кривая, построенная по (14) при $\Phi_{ост}$ = 0,15, приведена на рис. 4. Условию (12) соответствуют значения параметров *g = 9 T0 = 5.2.*

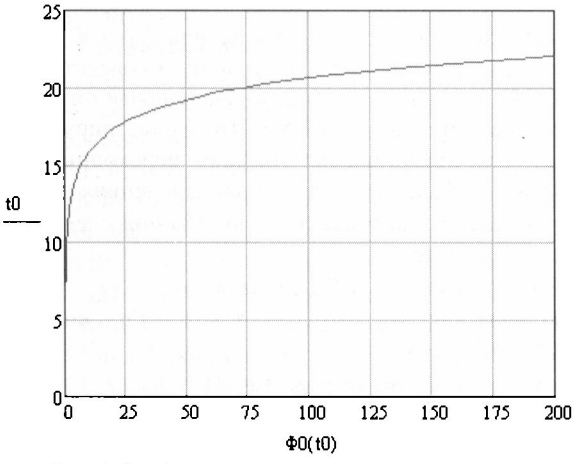


Рис.4. Зависимость нормированного времени установки фазы (t_0) при действительных равных корнях характеристического уравнения от начальной разности фаз Φ_0

Рассмотрим теперь область на рис. 3 вне границ нулевого дискриминанта. В этом случае корни характеристического уравнения будут комплексно-сопряжёнными, а переходный процесс - колебательным. Определим время переходного процесса в этом случае, для этого решим уравнение (7) для случая пары комплексно-сопряженных корней $p_1 = \alpha - j\beta$, $p_2 = \alpha + j\beta$ и одного действительного корня p_3. При этом решение этого уравнения записывается в виде

$$\Phi(t) = A_1 e^{\alpha t}\cos(\beta t) + A_2 e^{\alpha t}\sin(\beta t) + A_3 \exp(p_3 t). \quad (15)$$

Аналогично случаю действительных корней составим систему уравнений для нахождения постоянных коэффициентов при условии t = 0.

$$\begin{cases} A_1 \Phi & + & A_3 & = & 0 \\ \alpha A_1 & + & \beta A_2 + & p_3 A_3 & = 0 \\ (\alpha^2 - \beta^2)\Phi A_1 & + & 2\alpha\beta A_2 + & p^2{}_3 A_3 & = 0 \end{cases}$$

Из этой системы получаем:

$$A_1 = \Phi_0 - A_3;$$

$$A_2 = \frac{\Phi_0(\alpha^2 p_3 - \beta^2 p_3 - \alpha p_3^2 - p_3 + \alpha)}{\beta(\alpha^2 + \beta^2 + p_3^2 - 2\alpha p_3)};$$

$$A_3 = \frac{\Phi_0(\alpha^2 + \beta^2 + 1)}{\beta(\alpha^2 + \beta^2 + p_3^2 - 2\alpha p_3)}.$$

Подставим эти значения в выражение (15) и получим окончательное решение

$$\Phi_{ост} = \frac{\Phi_o}{\beta(\alpha^2 + \beta^2 + p_3^2 - 2\alpha p_3)}[\beta[(p_3^2 - 2\alpha p_3 - 1)e^{\alpha t_\Phi}\cos(\beta t_\Phi) +$$
$$+(\alpha^2 p_3 - \beta^2 p_3 - \alpha p_3^2 - p_3 + \alpha)e^{\alpha t_\Phi}\sin(\beta t_\Phi) + (\alpha^2 + \beta^2 + 1)e^{p_3 t_\Phi})]$$

Из этого решения найдем в неявной форме зависимость $t_\Phi(\Phi_0)$:

$$\Phi_0 = \frac{\Phi_{ост}\beta(\alpha^2 + \beta^2 + p_3^2 - 2\alpha p_3)}{\beta(p_3^2 - 2\alpha p_3 - 1)e^{\alpha t_\Phi}\cos(\beta t_\Phi) +}$$

$$+(p_3(\alpha^2 - \beta^2 - \alpha p_3 - 1) + \alpha)e^{\alpha t_\Phi}\sin(\beta t_\Phi) + \beta(\alpha^2 + \beta^2 + 1)e^{p_3 t_\Phi}.$$

График этой функции при α = -0,61, β = 0,5, p_3 = -0,31 и Φ = 0,15, представлен на рис. 5. Из этого графика видно, что переходный процесс при равных начальных разностях фаз имеет большую длительность по сравнению с приведенным на рис.4.

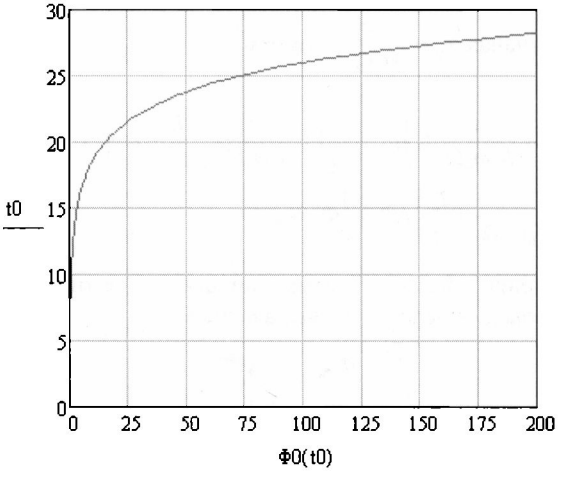


Рис.5. Зависимость нормированного времени установки фазы при двух комплексно-сопряженных и одном действительном корнях характеристического уравнения от начальной разности фаз Φ_0

Режим модуляции

Перейдем теперь непосредственно к режиму формирования ЛЧМ сигнала. Найдем время переходного процесса по фазе, величину установившейся фазовой ошибки в системе в цикле формирования ЛЧМ и максимальную скорость ЛЧМ при заданных параметрах системы.

На основании (1) запишем дифференциальное уравнение системы в случае, когда коэффициент деления *N(t)* меняется во времени по линейному закону

$$p\left(\frac{\varphi_{гун}}{N(t)} - \varphi_{эг}\right) + \frac{SI}{N(t)}\frac{1 + pRC}{p(C + C_1)(1 + \frac{C_1 CR}{C_1 + C}p)} \times \qquad (16)$$
$$\times\left(\frac{\varphi_{гун}}{N(t)} - \varphi_{эг}\right) = \frac{\omega_{гун0}}{N(t)} - \omega_{эг}$$

где $\omega_{гун0}$ – начальная частота ЛЧМ сигнала, $N(t)=N_0+N(t)$, N_0 -начальное значение коэффициента

деления к моменту старта ЛЧМ, $N(t)$ – текущий коэффициент деления в момент времени t; $\Phi = \frac{\varphi_{гун}}{N(t)} - \varphi_{эт}$.

Обозначим $N(t) = N_0 + \Delta Nt$ и введем значение скорости изменения частоты ЛЧМ

$$v = \Delta N \omega_{эт} \tag{17}$$

тогда (16) примет вид

$$N_0 p\Phi + \Delta N t p\Phi + \frac{SI(1+pT)}{p(C+C_1)(1+\frac{C_1}{C_1+C}pT)}\Phi = \omega_{гун0} - N_0\omega_{эт} - vt$$

Проведя преобразования и вычисляя производные, получим:

$$\frac{T}{g}(1+\frac{\Delta N}{N_0}t)p^3\Phi + \left[1+\frac{\Delta N}{N_0}\left(\frac{2T}{g}t+\right)\right]p^2\Phi +$$
$$+\left(\frac{\Delta N}{N_0}+\frac{SIT}{N_0C_1g}\right)p\Phi + \frac{SI}{N_0C_1g}\Phi = \frac{\Delta N}{N_0}\omega_{эт}$$

Обозначая $v_0 = \frac{v}{N_0\Omega_c^2}$, имеем:

$$\frac{T_0}{g}\left(1+\frac{v}{N_0\omega_{эт}\Omega_c}t_0\right)p^3\Phi + \left[1+\frac{v}{N_0\omega_{эт}\Omega_c}\left(\frac{2T_0}{g}t+\right)\right]p^2\Phi +$$
$$+\left(\frac{v}{N_0\omega_{эт}\Omega_c}+\frac{T_0}{g}\right)p\Phi + \frac{1}{g}\Phi = v_0 \tag{18}$$

Значение фазы в установившемся режиме при $\Phi = const$, определяется выражением:

$$\frac{\Phi_{ст}}{g} = \frac{v}{N_0\Omega_c^2},$$

откуда:

$$\Phi_{ст} = \frac{gv}{N_0\Omega_c^2}.$$

Учитывая (2) и (4), получим значение разности фаз в установившемся режиме:

$$\Phi_{ст} = \frac{v(C+C_1)}{SI}. \tag{19}$$

Определим максимальную скорость ЛЧМ сигнала, допустимую для данных параметров ФНЧ. Границей срыва синхронизации будем считать максимум линейного участка характеристики ИЧФД $F(\Phi) = \Phi_{ст\max} = 2\pi$. Тогда из (19) получим:

$$v_{\max} = \frac{\Phi_{ст\max}SI}{C+C_1}. \tag{20}$$

Значение суммарной емкости ФНЧ для обеспечения заданной разности фаз в установившемся режиме при заданных параметрах системы также найдем из (19):

$$C+C_1 = \frac{\Phi_{ст}SI}{v}. \tag{21}$$

Максимально допустимое значение суммарной емкости фильтра при заданной скорости ЛЧМ определяется из условия $\Phi_{ст} = \Phi_{ст\max} = 2\pi$. Можно показать, что максимальное значение, реализуемое на практике $\Omega_{c\max} \approx 10^8$. С ростом скорости v_0 растет установившаяся фазовая ошибка. Увеличение ее значения $\Phi_{ст} \geq 2\pi$, приведет к потере слежения и срыву процесса формирования ЛЧМ сигнала. При реальных скоростях ЛЧМ сигнала и параметрах системы процессы установления фазы практически не отличаются от процессов при установке начальной частоты. Поэтому для обеспечения минимального времени установления фазы в режиме ЛЧМ, можно пользоваться, как и в случае установления фазы в режиме синтеза начальной частоты, условием равенства корней (12) и соответствующими значениями оптимальных параметров $g=9$ $T0=5.2$. Это иллюстрируется на рис.6, где представлены графики переходных процессов по фазе при различных значениях полосы удержания Ω_c, рассчитанные по (18) при следующих исходных значениях:

- параметры ЛЧМ сигнала:

начальная частота: $f_{нач} = 1{,}8\cdot10^9$ Гц, скорость: $v=6{,}28\cdot10^{11}$ рад/с^2;

- параметры кольца ИФАПЧ:

$f_{эт} = 2\cdot10^7$ Гц; $S_{ГУН} = 3\cdot10^7$ Гц/В; $I = 2{,}5\cdot10^{-3}$ А, $N_0 = 90$.

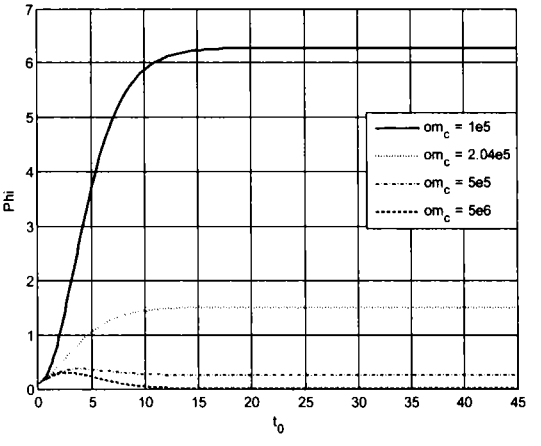


Рис.6. Графики переходного процесса по фазе в режиме формирования ЛЧМ сигнала при различных значениях Ω_c

Следует отметить, что все реальные ГУН имеют нелинейную зависимость крутизны от входного напряжения, что может оказывать существенное влияние на динамические и качественные характеристики формируемого ЛЧМ сигнала. Теоретический анализ динамики синтезатора с нелинейностью модуляционной характеристики ГУН затруднителен, поэтому для исследования работы синтезатора в этом случае следует использовать моделирование синтезатора ЛЧМ сигнала с СДМ. Моделирование показывает, что СДМ практически не оказывает влияния на динамику системы, и приведенные формулы, основанные на непрерывной модели, дают значения, которые хорошо совпадают с результатами моделирования.

Выводы

Представленные выражения позволяют определять время переходного процесса по частоте и фазе при установке начальной частоты ЛЧМ сигнала, а также время переходного процесса по фазе, величину установившейся фазовой ошибки в системе при формировании сигнала и максимальную скорость ЛЧМ.

Литература

1. **Кочемасов В. Н.,** Белов Л.А., Оконешников В.С. Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией. – М.: Радио и связь, 1983. - 192 с.
2. **Кочемасов В. Н.** Компенсация шумов дробности в синтезаторах ЧМ сигналов с дробным делителем с переменным коэффициентом деления // Электросвязь.- 1984.- №3.- С.54-56.
3. **T. Musch,** B.Schiek. A Fractional Ramp Generator with Improved Linearity and Phase-Noise Performance for the Use in Heterodyne Measurement. Advances in Radio Science. Copernicus GmbH. 2005.
4. **HMC702LP6CE.** Fractional-N Frequency Synthesizer with Built-in Linear Sweeper Function. Data Sheet. Hittite Corporation. 2010.
5. **T.A. Riley,** M.A. Copeland, and T.A. Kwasniewski. Delta-Sigma Modulation in Fractional-N Frequency Synthesis. *JSSC*, 28(5):553–559, May 1993.
6. **J. Rogers,** C.Plett, F.Dai. Integrated Circuit Design for High Speed Frequency Synthesis. Artech House. 2005.
7. **Макаров А.К.,** Удалов Н.Н. Динамика синтезатора частоты с частотно-фазовым детектором. // В сб. "Стабилизация частоты и формирование сигналов радио- и оптического диапазонов. Сборник лекций, обзорные доклады, тезисы докладов 7-го научного совещания".- Минск: 1992.- С. 84-90.
8. **Ларионова М.В.** Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук «Синхронизация в системах связи с многопозиционной фазовой манипуляцией».- М.: - 1999.
9. **Гордонов А.Н.,** Резвая И.В. Астатическая система ИФАПЧ, оптимизированная по длительности подстройки. //Радиотехника. - 1992.- № 4.- С. 48-52.

Н.с. Рындык Т.И.

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ УСТАНОВЛЕНИЯ УЗЛОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ В ДЕКОДЕРАХ СВЁРТОЧНОГО КОДА

Введение

С момента создания в 1948 г. Клодом Шенноном теории передачи цифровой информации, разработано большое число помехоустойчивых кодов, и до настоящего времени исследования в этой области продолжаются. Применение помехоустойчивых кодов регламентировано большинством стандартов линий связи, как эффективное средство повышения качества передачи информации.

В данной статье рассматривается один из методов установления узловой синхронизации в декодере Витерби, а также обсуждается возможность использования этого метода для оценки качества принимаемой информации (отношения энергии, приходящейся на один бит информации E_b, к спектральной плотности мощности N_0 аддитивного белого гауссова шума (АБГШ) $n(t)$ в канале связи).

Для правильной работы декодера необходима надежная синхронизация по узлам кодового дерева (узловая синхронизация), то есть синхронизация по группам символов, соответствующих одному циклу опроса коммутатора кодера. Такая синхронизация необходима при использовании любого вида кодирования.

Алгоритм работы декодера

Рассмотрим алгоритм работы декодера на примере свёрточного кода (5,7). Структурная схема кодера (5,7) представлена на рис.1.

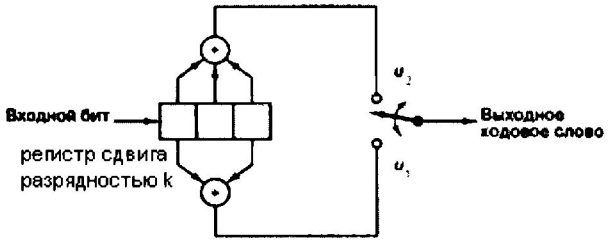


Рис.1. Кодер свёрточного кода (5,7)

В общем случае число узлов в решетке состояний кодера равно $l = 2^{k-1}$ и определяется разрядностью регистра сдвига k [1]. Для приведенного кодера $k = 3$ и, соответственно, $l = 4$.

Процесс декодирования включает в себя несколько этапов:

- Расчет текущих значений метрик всех ветвей $d_{в1}$, $d_{в2}$, ..., d_{2l}, входящих в каждый из l узлов (рис.2).
- Расчет суммарных метрик по каждому из $2l$ путей $d_{n(n)i}$, входящие в l узлов, по формуле:

$$d_{n(n)i} = d_{y(n-1)} + d_{вi} \qquad (1)$$

где $d_{n(n)i}$ – значение метрики одного из l путей в n – м такте работы;

$d_{y(n-1)}$ – значение метрики i - го узла в (n-1) – м такте работы;

$d_{вi}$ – значение метрики одной из двух ветвей, входящих в i - й узел, в n – м такте работы.

- Определение метрики i - го узла $d_{y(n)}$ в n – м такте работы как наименьшее из значений метрик путей, входящих в узел.

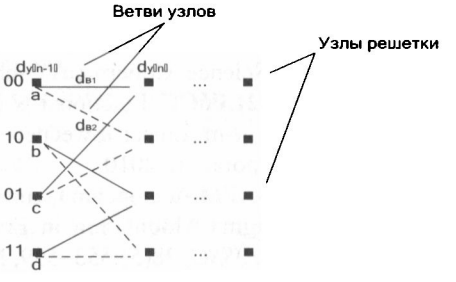


Рис.2. Решётка состояний кодера (5,7) (пунктирная линия соответствует передачи 0, сплошная - 1)

В результате «движения» декодера по решетке, остается только один оптимальный путь с минимальной метрикой, рассчитанной за все время работы декодера. Для верного подсчета метрик ветвей, а, следовательно, определения оптимального пути, необходимо правильное определение границ переданного кодового слова. Разбиение входного потока бит на кодовые слова осуществляется с помощью системы узловой синхронизации.

Узловая синхронизация

При решении задачи установления узловой синхронизации в декодере важно отметить следующее:

- Все пути в решетке можно разделить на два вида: оптимальный (один) и неоптимальные (все остальные).
- Значения метрик ветвей $d_{вi}$ неоптимальных путей больше, и, следовательно, метрики узлов решетки растут быстрее, чем в оптимальном (1).
- Неоптимальные пути характеризуются большими значениями метрик $d_{n(n)i}$, по сравнению с оптимальным. В случае отсутствия ошибок в канале связи, разница между ними максимальна, поскольку $d_{n(n)_{опт}}$ равна нулю.
- При неправильной работе системы узловой синхронизации оптимальный путь отсутствует, и

скорость роста метрик $d_{n(n)i}$ всех путей примерно одинакова.

Последнее утверждение позволяет сделать вывод: *Скорость роста метрик путей $d_{n(n)i}$ на решётке является критерием правильной работы системы узловой синхронизации.*

Предлагаемый метод построения узловой синхронизации сводиться к слежению за скоростью роста $d_{n(n)i}$ всех путей, что аналогично подсчёту частоты f превышения $d_{n(n)i}$ некоторого выбранного порога h. Структурная схема метода изображена на рис. 3. При превышении значений метрик всех путей порога h происходит вычитание из всех метрик значения порога (рис. 4). Такое построение узловой синхронизации и выбор оптимального значения порога $h_{опт}$ позволяет избежать непрерывного роста значений метрик путей и тем самым решает проблему переполнения памяти. Под оптимальностью понимается такое значение h, при котором сохраняется достаточная разница $d_{n(n)i}$ в оптимальном и остальных путях на решётке состояния кодера, позволяющая не выходить за пределы выделенной памяти.

Рис.3. Метод установления узловой синхронизации

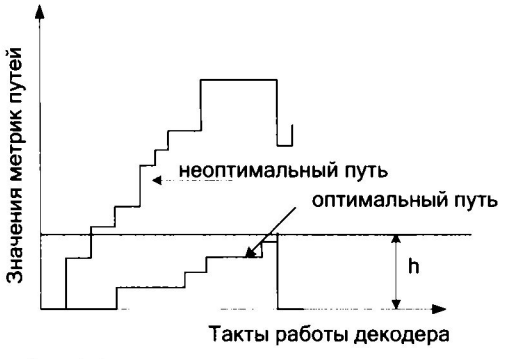


Рис.4. Рост метрик в одном из неправильных и оптимальном путях

Таким образом, задавшись граничным значением частоты $f_{гр}$ превышения всех метрик путей порога $h_{опт}$, можно следить за работой системы узловой синхронизации. Если параметр, за которым осуществляется слежение, не превышает $f_{гр}$, то считается, что узловая синхронизация установлена и декодированная последовательность соответствует переданной информационной.

Частота превышения $d_{n(n)i}$ некоторого выбранного порога h определяется:

- Величиной порога h. Чем выше значение порога, тем меньше f.
- Количеством ошибок в канале связи. В отсутствие ошибок и при жёстком декодировании метрика оптимального пути $d_{n(n)_{опт}}$ равна нулю и не изменяется при работе декодера.
- Статистикой информационной последовательности (количеством переходов).

Поскольку величина f напрямую связана с вероятностью ошибок в канале, то может являться индикатором отношения E_b / N_0. На рис. 4 изображена экспериментально снятая зависимость относительной (относительно скорости передачи данных) нормированной (относительно максимального значения $f_{макс}$) частоты $f_{отн,норм}(f \cdot \tau_b / f_{макс})$ от отношения E_b / N_0 для рекомендуемого CCSDS (Consultative Committee for Space Data System) свёрточного кода (133,171) и жёсткой схемы декодирования и аппроксимирующая кривая (2). Максимальное значение частоты $f_{макс}$ соответствует случаю отсутствия синхронизации.

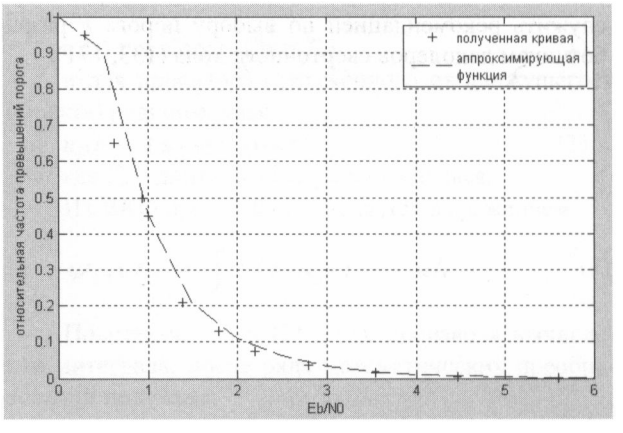


Рис.5. Зависимость относительной нормированной частоты $f_{отн,норм}$ от E_b / N_0 при $h = 10$ (жёсткое декодирование) и аппроксимирующая функция (2)

$$y(t) = \frac{1}{10.5 \cdot (3 + \frac{3}{t^2})^{(t-2.5)} + 0.095} \qquad (2)$$

При использовании мягкой схемы декодирования свёрточных кодов даже в случае отсутствия ошибок в канале связи может наблюдаться рост метрик оптимального пути, что обусловлено ошибками квантования.

На рис. 5 представлена кривая зависимости относительной нормированной частоты $f_{отн,норм}$ от отношения E_b / N_0 для мягкого декодирования кода (133,171), а также соответствующая ей аппроксимирующая кривая (4).

$$y(t) = \frac{1}{10 \cdot (1.5 + \frac{1}{t^2})^{(t-4.8)} + 0.1} \qquad (3)$$

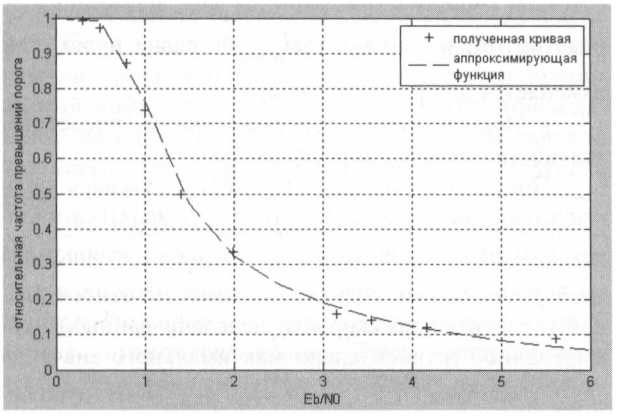


Рис.6 Зависимость относительной нормированной частоты $f_{отн,норм}$ от E_b / N_0 при $h = 10$ (мягкое декодирование) и аппроксимирующая функция (3)

Представленные результаты (рис.5, рис.6) были получены при использовании в качестве информационной последовательности ПСП, которые могут служить рекомендацией по выбору порога h разработчикам декодеров сверточного кода (133, 171).

Заключение

Предложенный метод узловой синхронизации позволяет определить границы кодового слова задавшись порогом $h_{опт}$, решить проблему переполнения метрик путей и определить качество принимаемой информации, не усложняя построение декодера.

Представленные результаты (рис.5,.6) были получены при использовании в качестве информационной последовательности ПСП, которые могут служить рекомендацией по выбору порога h разработчикам декодеров свёрточного кода (133, 171).

Литература

1. **Никитин Г.И.** Свёрточные коды - С. – Пб:: Советское радио, 2001

Д.т.н., проф. Карташев В.Г., асп. Сучков С.Л.

ОБРАБОТКА ДОПЛЕРОВСКОГО СИГНАЛА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ КРОВОТОКА

Постановка задачи

Одним из приоритетных направлений применения радиотехнических методов в медицине является измерение скорости кровотока. Ультразвуковые (УЗ) медицинские диагностические приборы, в том числе и приборы, измеряющие скорость кровотока, уже давно используются в клинической практике [1], однако проблему измерения скорости кровотока до сих пор нельзя считать до конца решенной. Особые трудности возникают в тех случаях, когда в качестве излучателя и приемника используются одни и те же ультразвуковые преобразователи. Расстояние от излучателя до исследуемого кровеносного сосуда обычно невелико и составляет от нескольких миллиметров до десятков миллиметров, из-за этого нельзя использовать длинные зондирующие сигналы. Максимально возможная длительность зондирующих импульсов должна быть меньше времени прохождения УЗ сигнала до кровеносного сосуда и обратно. Для сосудов, лежащих близко к поверхности тела путь сигнала не превышает 10 мм, что при скорости ультразвука в биологических тканях соответствует приблизительно 7 мкс. При обычно для УЗ медицинских приборов рабочей частоте 5 МГц на длине такого импульса укладывается лишь несколько десятков периодов высокочастотного заполнения. Естественно, что при таких длительностях импульсов измерение доплеровского смещения частоты, составляющего 10^{-4} – 10^{-3}, практически невозможно. Для преодоления этой проблемы в качестве зондирующего сигнала используют когерентные пачки радиоимпульсов. С помощью таких сигналов можно с приемлемой точностью измерять скорость объектов, однако невозможно измерение дальности с высокой точностью.

В работе [2] предложено для измерения скорости кровотока использовать сплит-сигналы, представляющие собой последовательность радиоимпульсов с различной частотой заполнения. Автокорреляционная функция (АКФ) сплит-сигнала имеет узкий главный лепесток, что позволяет при использовании согласованной фильтрации измерять дальность с высокой точностью. В работе [2] предложен алгоритм обработки сплит-сигналов, позволяющий с высокой точностью измерять и дальность, и скорость объектов. Настоящая статья посвящена подробному анализу этого алгоритма.

Анализ возможностей алгоритма обработки сплит-сигнала

Предложенный в [2] алгоритм предполагает следующую последовательность обработки сигналов. После излучения очередного импульса сплит-сигнала производится согласованная фильтрация принятого (отраженного от движущегося объекта) сигнала и результаты обработки заносятся в память компьютера. При этом импульсная характеристика согласованного фильтра должна иметь вид радиоимпульса, частота заполнения которого должна быть равна ожидаемой частоте сигнала, отраженного от объекта, с учетом доплеровского смещения. После обработки всех импульсов сплит-сигнала производится их суммирование с учетом предполагаемых временных задержек. Эта процедура повторяется несколько раз для нескольких значений предполагаемой скорости объекта. В качестве измеренного значения скорости принимается то, которому соответствует максимальное значение просуммированного сигнала.

Оценим эффективность такого алгоритма и его потенциальные возможности. Для этого сначала найдем взаимно корреляционную функцию (ВКФ) излученного радиоимпульса с прямоугольной огибающей с таким же импульсом, несущая частота которого немного изменилась при отражении от движущегося объекта.

Запишем выражение для излученного радиоимпульса:

$$u_1(t) = A\sin\omega_1 t \quad (0<t<T_и) \qquad (1)$$

и для принятого (отраженного от движущегося объекта) радиоимпульса:

$$u_2(t) = A\sin\omega_2 t \quad (0<t<T_и), \qquad (2)$$

где $T_и$ – длительность радиоимпульса.

Их ВКФ при $\tau > 0$ определяется выражением

$$\psi_{12}(\tau) = \int_{\tau}^{T_и} u_1(t)u_2(t-\tau)dt. \qquad (3)$$

Подставляя (1) и (2) в (3), производя вычисление интеграла, после ряда математических преобразований получаем:

$$\psi_{12}(\tau) = \frac{A^2(T_и-\tau)}{2}\left[\frac{\sin\Delta\omega(T_и-\tau)}{\Delta\omega(T_и-\tau)}\cos(\omega_0\tau+\Delta\omega T_и) - \frac{\sin\omega_0(T_и-\tau)}{\omega_0(T_и-\tau)}\cos(\Delta\omega\tau+\omega_0 T_и)\right], \qquad (4)$$

$$\psi_{12}(\tau) = \frac{A^2(T_и+\tau)}{2}\left[\frac{\sin\Delta\omega(T_и+\tau)}{\Delta\omega(T_и+\tau)}\cos(\omega_0\tau+\Delta\omega T_и) - \frac{\sin\omega_0(T_и+\tau)}{\omega_0(T_и+\tau)}\cos(\Delta\omega\tau+\omega_0 T_и)\right], \qquad (5)$$

$$\psi_{12}(\tau) = \frac{A^2(T_и-|\tau|)}{2}\left[\frac{\sin\Delta\omega(T_и-|\tau|)}{\Delta\omega(T_и-|\tau|)}\cos(\omega_0\tau+\Delta\omega T_и) - \frac{\sin\omega_0(T_и-|\tau|)}{\omega_0(T_и-|\tau|)}\cos(\Delta\omega\tau+\omega_0 T_и)\right]. \qquad (6)$$

где $\omega_0 = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}, \Delta\omega = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2}$.

Аналогичным путем найдем выражение для ВКФ при $\tau > 0$:Объединяя (4) и (5), запишем универсальное выражение, справедливое как при положительных, так и при отрицательных значениях τ :

Поскольку скорость кровотока составляет менее 10^{-3} скорости ультразвука в биологических тканях, частота ω_2 отличается от ω_1 менее, чем на 10^{-3} . При этом, как показывают расчеты, громоздкое выражение (6) может быть сильно упрощено:

$$\psi_{12}(\tau) = \frac{A^2}{2}\left(T_u - |\tau|\right)\cos\left(\omega_0\tau + \Delta\omega T_u\right) \quad (7)$$

График ВКФ (7) для длительности радиоимпульса $T_и$ = 12,5 мкс, частоты заполнения 5 МГц и скорости кровотока 1 м/с представлен на рис. 1. Как видно, ВКФ представляет собой радиоимпульс с треугольной огибающей, высокочастотное (ВЧ) заполнение которого немного смещено влево, так что максимум ВКФ наблюдается не при $\tau = 0$, а при $\tau = -\frac{\Delta\omega T_u}{\omega_0}$.

Следует заметить, однако, что при сравнительно больших значениях $\Delta\omega$, а именно при $\Delta\omega > 10^{-2}\omega_0$, форма огибающей ВКФ отличается от треугольной и приближенная формула (7) оказывается несправедливой.

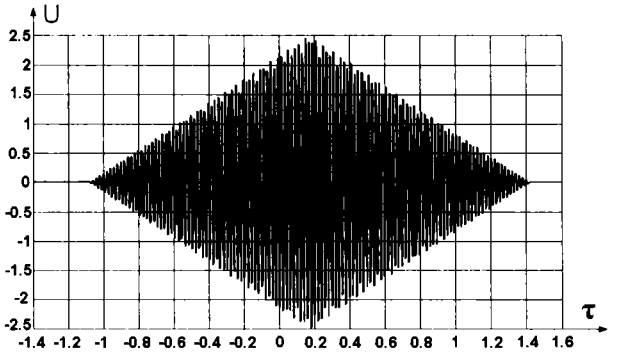


Рис. 1. ВКФ радиоимпульса $T_и$ = 12,5 мкс, f_0=5 МГц, скорость кровотока 1 м/с.

Дальнейшая обработка сигнала сводится к суммированию результатов согласованной фильтрации отдельных импульсов с учетом задержек, вызванных эффектом Доплера. Нетрудно подсчитать, что время запаздывания i-го импульса (по отношению к «нулевому», для которого $i = 0$) будет равно

$$\Delta T_i = iT_{повт}\frac{2v_{кр}}{v_0}\cos\theta, \quad (8)$$

где $T_{повт}$ – период повторения импульсов,

$v_{кр}$ - скорость кровотока,

v_0 – скорость ультразвука в биологических тканях,

θ - угол между направлением падения ультразвуковой волны и направлением кровотока.

При средней скорости кровотока $v_{кр}$ = 0,2 м/с и $\theta = 45^0$ запаздывание каждого следующего импульса по отношению к предыдущему составит $\Delta T \approx 2\cdot10^{-4}$ $T_{повт}$. При обычных значениях $T_{повт}$ = 100 мкс и частоте сигнала 5 МГц ΔT = 0,02 мкс, что соответствует 0,1 периода повторения ВЧ заполнения импульса. Для 100-го импульса задержка составит 10 периодов высокочастотного заполнения. Складываясь с разными фазами, сигналы почти полностью компенсируют друг друга, что позволяет достигнуть хорошего разрешения по скорости.

Для иллюстрации этого эффекта на рис. 2 приведена АКФ сплит-сигнала, состоящего из 100 импульсов с частотой заполнения от 4 до 8 МГц, а на рис. 3 - ВКФ того же сигнала в таком же масштабе для скорости кровотока 0,2 м/с.

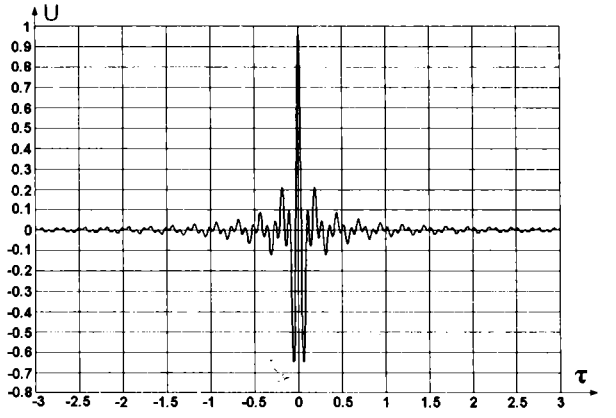


Рис. 2. АКФ сплит-сигнала, состоящего из 100 импульсов с частотой заполнения от 4 до 8 МГц.

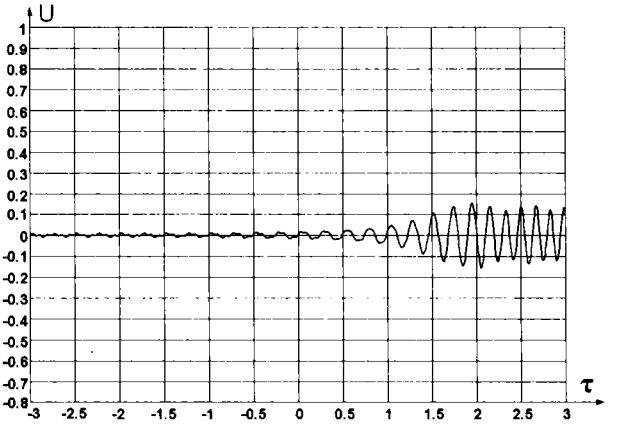


Рис. 3. ВКФ сплит-сигнала, состоящего из 100 импульсов с частотой заполнения от 4 до 8 МГц для скорости кровотока 0,2 м/с.

Как из этого видно, в области значений τ, близких к нулю, значения ВКФ не превышают 4% от максимального значения АКФ. Однако при больших значениях τ наблюдается существенное увеличение уровня ВКФ, которое может привести к появлению ложных сигналов, для устранения которых может потребоваться временное стробирование сигнала.

Это явление особенно сильно проявляется при меньших значениях скорости кровотока.

На рис. 4 представлен вид ВКФ для скорости кровотока 0,02 м/с. Здесь максимум ВКФ находится очень близко к $\tau = 0$, и хорошей разрешающей способности не удастся получить даже при использовании временного стробирования.

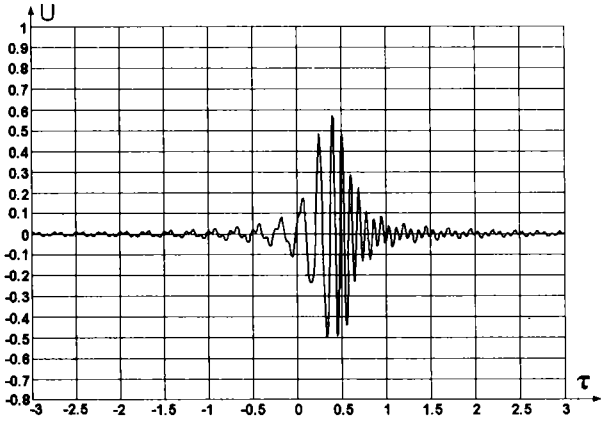


Рис. 4. ВКФ сплит-сигнала, состоящего из 100 импульсов с частотой заполнения от 4 до 8 МГц для скорости кровотока 0,02 м/с.

Для улучшения вида ВКФ был изменен порядок следования импульсов, так, чтобы импульсы с близкими частотами заполнения были разнесены по времени. Этот прием позволил существенно улучшить вид ВКФ для малых значений скорости 0,02 - 0,05 м/с (см., например, рис. 5, где приведена ВКФ для $v_{кр}$ = 0,02 м/с). Однако при скорости 0,2 м/с (рис. 6) уровень ВКФ получился выше, чем при линейном характере изменения частоты заполнения импульсов.

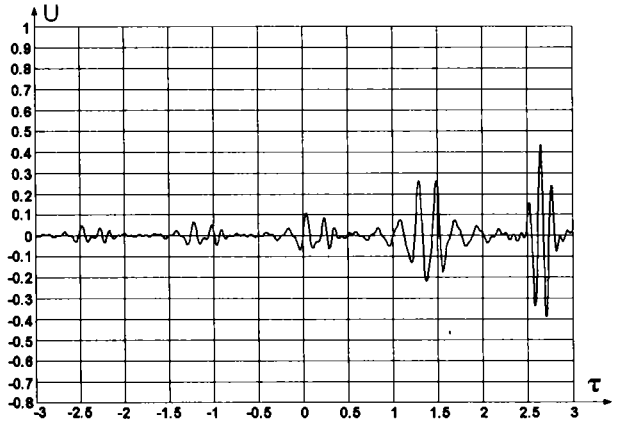


Рис. 4. ВКФ сплит-сигнала с измененным порядком следования импульсов для скорости кровотока 0,02 м/с.

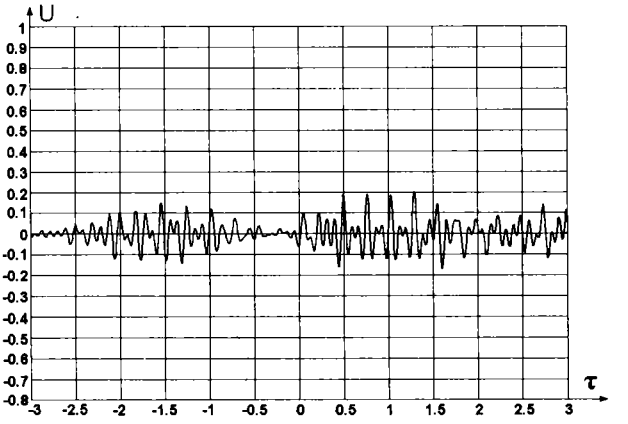


Рис. 5. ВКФ сплит-сигнала с измененным порядком следования импульсов для скорости кровотока 0,2 м/с.

Результаты проведенного исследования показывают, что ВКФ зависит от порядка следования частот заполнения импульсов. Следовательно, есть возможность, варьируя порядок следования частот, добиться некоторого оптимума в уровне ВКФ для различных значений скорости кровотока.

Вопросы практической реализации алгоритма

Как упоминалось в нашей предыдущей статье [2], полный алгоритм обработки сигналов сводится к следующему.

Сначала проводится зондирование объекта сплит-сигналом и принятый сигнал записывается в памяти компьютера. Затем делается предположение, что скорость объекта равна, например, v_1. Принятый сигнал проходит через согласованный фильтр, характеристика которого соответствует сигналу, отраженному от объекта, движущемуся со скоростью v_1. Положение максимума отклика обработанного таким образом сигнала несет информацию о расстоянии до объекта, движущегося с этой скоростью.

После этого тот же принятый сигнал пропускается через согласованный фильтр, соответствующий скорости объекта v_2 и определяется расстояние до объекта, движущегося со скоростью v_2. Этот процесс обработки повторяется несколько раз для разных значений скорости объекта, пока не будет получена достаточно полная картина распределения скоростей.

Однако такой процесс обработки получается громоздким из-за необходимости многократно проводить согласованную фильтрацию сигналов для разных значений предполагаемой скорости кровотока. Учитывая, что доплеровское смещение частоты не превышает 10^{-3}, алгоритм обработки сигнала может быть существенно упрощен. Анализ корреляционных свойств сплит-сигнала показывает, что при малых, менее 10^{-3}, смещениях частоты, ВКФ радиоимпульса, входящего в состав сплит-сигнала, почти не отличается от его АКФ. Небольшое отличие состоит в том, что ВЧ заполнение ВКФ немного смещено влево, причем это смещение не превышает не-

скольких процентов от периода ВЧ заполнения. Частота ВЧ заполнения ВКФ равна $\omega_0 = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$, т.е. незначительно отличается от частоты заполнения соответствующего радиоимпульса.

Учитывая малость отличия частоты и фазы ВЧ заполнения ВКФ радиоимпульса от соответствующих характеристик ВЧ заполнения АКФ, можно сделать вывод о том, что эти факторы не играют заметной роли при формировании ВКФ сплит-сигнала в целом и на основании этого упростить алгоритм обработки сигнала. Поскольку частота заполнения ВКФ радиоимпульса почти не отличается от частоты заполнения импульса, согласованную фильтрацию каждого радиоимпульса можно проводить один раз, а не повторять ее многократно для каждого значения предполагаемой скорости кровотока. Это позволит выполнять согласованную фильтрацию каждого радиоимпульса за время паузы между соседними импульсами, т.е. практически в реальном масштабе времени, что существенно ускорит процесс обработки сигнала.

Согласованную фильтрацию каждого радиоимпульса желательно проводить не с помощью БПФ, а с помощью рекурсивного фильтра, алгоритм работы которого приведен в [3]. Такой фильтр содержит колебательное звено, работающее по алгоритму

$$y_n = a_1 x_{n-1} + b_1 y_{n-1} - y_{n-2}. \qquad (9)$$

Коэффициенты a_1 и b_1 рассчитываются по формулам

$$a_1 = -\sin(\omega_t \Delta); \qquad b_1 = 2\cos(\omega_t \Delta), \qquad (10)$$

где Δ – интервал дискретизации, ω_t – частота заполнения радиоимпульса, с которым согласован фильтр.

Далее, нужно из сигнала, поступающего с выхода колебательного звена, вычесть такой же сигнал, задержанный на время, равное длительности импульса. Структурная схема алгоритма приведена на рис. 7 . Как показывают расчеты, такой алгоритм согласованной фильтрации требует в несколько раз меньше арифметических операций, чем при использовании быстрого преобразования Фурье.

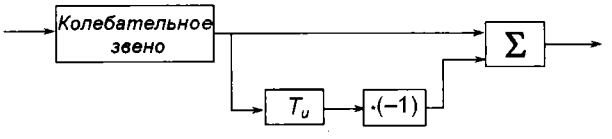


Рис. 7. Структурная схема согласованного фильтра для прямоугольного радиоимпульса

Каждый сигнал, получающийся после согласованной фильтрации (назовем его парциальным), содержит информацию о фрагментах кровотока, движущихся с разными скоростями.

Дальнейшая обработка сводится к суммированию парциальных сигналов с учетом задержек. Это суммирование производится несколько раз, причем каждый раз устанавливаются задержки, соответствующие какому-либо определенному значению скорости кровотока. По положению максимума просуммированного сигнала можно определить расстояние до объекта, движущегося с заданной скоростью. Таким образом, можно получить информацию о пространственном распределении скоростей потока.

Заключение

Рассмотренный в данной работе алгоритм обработки сигналов позволяет оценивать скорости кровотока с разрешением около 0,02 м/с. Преимуществом алгоритма является его простота и нетребовательность к быстродействию вычислительного устройства. Наиболее трудоемкая часть обработки – согласованная фильтрация проводится в реальном времени в процессе приема сигнала за время паузы между излучением соседних импульсов. После приема и обработки последнего импульса остается несколько раз просуммировать парциальные сигналы, что не требует больших затрат времени.

Некоторое неудобство предложенного метода измерения скорости кровотока обусловлено следующим обстоятельством. ВКФ излученного сплит-сигнала с отраженным имеют низкий уровень при $\tau \approx 0$, но имеют смещенный относительно $\tau = 0$ максимум, который может интерпретироваться как ложный сигнал. Для подавления этого максимума приходится применять временное стробирование, что приводит к некоторому усложнению алгоритма. Чтобы устранить этот недостаток, нужно продолжить работу по подбору сигнала с более подходящей взаимно корреляционной функцией.

Литература

1. **Применение** ультразвука в медицине. Физические основы. /Под ред. К.Хилла. Пер. с англ. - М.: Мир, 1989.

2. **Карташев В.Г.**, Сучков С.Л. Применение сплит-сигнала для селекции движущихся объектов. // Радиотехнические тетради. № 43, 2010, С. 36-38.

3. **Качанов В.**К., Карташев В.Г., Соколов И.В. Ультразвуковая помехоустойчивая дефектоскопия. - М.: Изд. дом МЭИ. 2008, 280 с.

Студ. Сафин А.Р.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ С ВЫБОРКАМИ

Введение

Системы фазовой синхронизации (СФС) широко используются в современных спутниковых и мобильных средствах связи и навигации, системах точного времени и информационно-измерительных комплексах. Круг проблем, решаемых ими, обширен [1-8]: синтез сетки высокостабильных частот, оптимальный прием сигналов на фоне помех, слежение за несущими частотами принимаемых сигналов, синтез сложных радиосигналов.

С совершенствованием элементной базы современных микроэлектронных устройств в последние годы большое внимание исследователей уделяется системам фазовой синхронизации с элементами дискретизации [1]: импульсным, цифровым и комбинированным импульсно-цифровым СФС. С помощью правильного выбора структур блоков, входящих в состав таких систем, появилась возможность создавать устройства, обладающие необходимыми характеристиками по точности и надежности работы, помехоустойчивости, быстродействию.

В обычных СФС измерение фазового рассогласования двух сравниваемых колебаний происходит непрерывно во времени, в отличие от СФС с элементами дискретизации, в которых информация о фазовой ошибке обрабатывается в дискретные моменты времени. Причем в простейших случаях возможны варианты, когда момент следующего наблюдения (измерения) зависит от момента прошедших наблюдений, а также зависит от параметров самой системы, и когда момент наблюдения (измерения) задается внешним задающим устройством. В последнем случае внешнее устройство может задавать как равномерную последовательность наблюдений, так и существенно неравномерную, вплоть до случайной. Например, измерение фазовой ошибки может проходить в два раза чаще, или в два раза реже, чем в непрерывных СФС. Как следует отсюда, СФС с элементами дискретизации гораздо богаче по возможным режимам, зависящим от изменений моментов наблюдений. Поэтому важным является рассмотрение механизмов синхронизации двух и более объектов путем изменения наблюдения фазового рассогласования двух исследуемых колебаний.

Простейшей СФС с неравномерной расстановкой моментов наблюдений является СФС с выборками [9-15]. Подробные теоретические исследования этой системы представлены в [9-11]. В этих работах было найдено, что при неточной настройке частоты свободных колебаний подстраиваемого генератора (ПГ) на частоту входного сигнала появляется существенная неравномерность в выборке входного сигнала и, соответственно, происходит загрязнение спектра выходных колебаний ПГ.

Данная работа посвящена получению математических соотношений, позволяющих оценивать уровень как основной спектральной составляющей в спектре выходного сигнала СФС с выборками, так и уровень побочных. Также в работе представлены экспериментальные спектральные характеристики, полученные с помощью установки компании National Instruments ELVIS II DATEx.

Принцип работы СФС с выборками. Математические модели. Зоны синхронизма.

Структурная схема СФС с выборками представлена на рис.1. Здесь входной периодический сигнал $u_C(t)$ с частотой ω_C подается на один из входов импульсно-фазового детектора (ИФД), выполненного по схеме «выборка-запоминание». На второй его вход в дискретные моменты времени t_k подаются управляющие импульсы от блока формирования импульсов (ФИ). Таким образом, в моменты времени, соответствующие приходу текущего импульса, происходит выборка входного сигнала $u_k = u_C(t_k)$ и запоминание до момента t_{k+1} прихода следующего импульса на вход ИФД. На выходе ИФД формируется сигнал ошибки $e_k = u_k$, который, проходя через цепь управления (ЦУ), управляет приходом следующего импульса на вход ИФД путем изменения частоты (или периода) колебаний подстраиваемого генератора (ПГ).

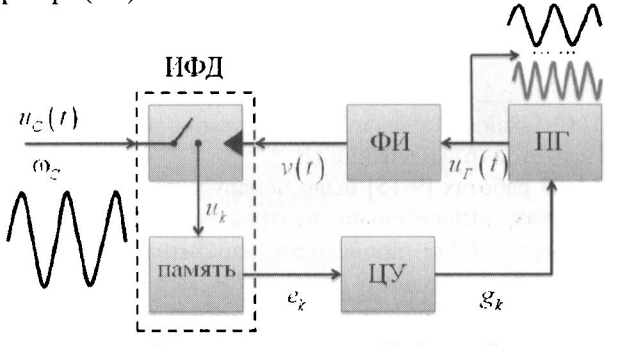


Рис.1. Структурная схема СФС с выборками.

Математической моделью рассматриваемой СФС является разностное уравнение (дискретное отображение). В зависимости от метода управления ПГ математическая модель для нормированной текущей выборки фазы входного сигнала $x_k = \varphi_k / 2\pi$ имеет в отсутствие фильтра в ЦУ следующий вид:

а) $x_{k+1} = x_k + B - (K_T/2\pi)\cdot\sin[2\pi\cdot x_k]$ - при управлении периодом ПГ; (1)

б) $x_{k+1} = x_k + \dfrac{B}{1 - K_\omega \sin[2\pi\cdot x_k]}$ - при управлении частотой ПГ. (2)

Здесь $B = \omega_C/\omega$ - исходное рассогласование частот сигнала и свободных колебаний ПГ, $K_T = S_T U_C \omega$, $K_\omega = S_\omega U_C/\omega$ - коэффициенты уси-

ления в кольце фазовой автоподстройки, зависящие от амплитуды входного сигнала и крутизны регулировочной характеристики ПГ.

Исследуя разностные уравнения (1),(2), методом диаграмм Ламерея-Кенигса [9-15] можно разбить плоскость параметров (K_T, B) или (K_ω, B) на зоны синхронных режимов дробной кратности частоты k/m («языки» Арнольда), которые для управления периодом и частотой ПГ представлены на рис.2а,б.

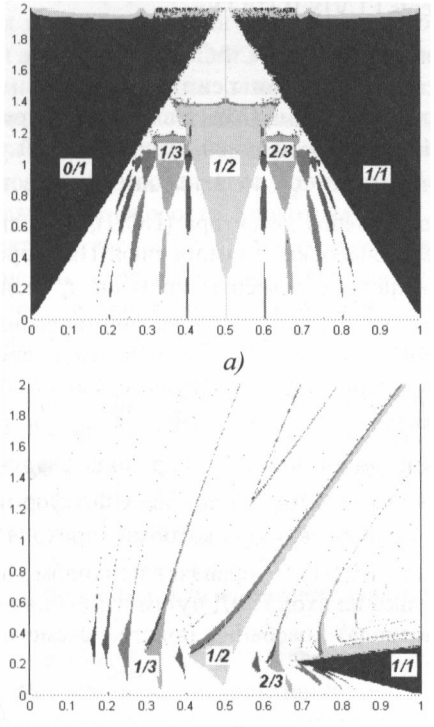


Рис.2. Карты зон синхронизма бесфильтровой СФС с выборками в случае управления периодом (а) и частотой (б) колебаний ПГ.

В работах [9-15] было обнаружено, что при отстройках относительно центров зон синхронизма кратности k/m происходит паразитная частотная модуляция выходного сигнала. Пример такой модуляции представлен на рис.3. Займемся поиском аналитических выражений для спектров выходных сигналов СФС с выборками в зоне синхронизма произвольной кратности частоты.

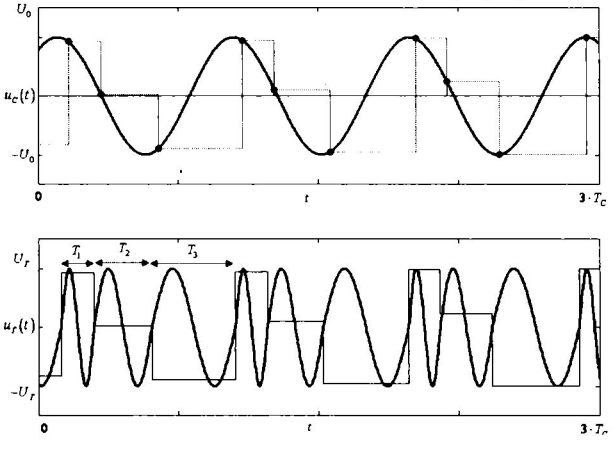


Рис. 3. Входной сигнал и выходные колебания СФС с выборками в случае подхода к границе зоны синхронизма 1/3 при $B = 0{,}34$.

Спектры выходных сигналов внутри зон синхронизма произвольной кратности.

Получим выражение для спектра колебания ПГ, работающего в зоне синхронизма k/m. В этом случае напряжение $u_\Gamma(t)$ является m-тактным. То есть, на k периодов входного сигнала приходятся m периодов выходного. На рис.3 на 1 период входного сигнала приходятся 3 выборки и укладывается 3 синусоиды периодами T_{1-3}. При выводе выражений для спектра будем считать процесс установившемся и наблюдать K-периодов выходного колебания.

Сигнал $u_\Gamma(t)$ запишем в следующем виде:

$$u_\Gamma(t) = \sum_{j=1}^{K} u_z^{(j)}(t). \qquad (3)$$

Далее функцию $u_z^{(j)}(t)$ представим в виде $u_z^{(j)}(t) = \sin\left[\omega_j\left(t - T_{j-1}\right)\right] \cdot \tilde{\Omega}_j(t)$, где

$\tilde{\Omega}_j(t) = \sum_{l=0}^{m-1} rect_{T_j}\left(t - T_{j-1} - l \cdot T\right)$ и

$rect_\alpha(t) = 1(t) - 1(t-\alpha)$.

Спектр сигнала (3) в общем случае запишем так

$$S_{u\Gamma}(\omega) = \Im[u_\Gamma](\omega) = \int_R u_\Gamma(t) e^{-i\omega t} dt. \qquad (4)$$

Подставляя (3) в (4) получим

$$S_{uz}(\omega) = \int_R \sum_{j=1}^{K} u^{(j)}(t) \cdot e^{-i\omega t} dt =$$

$$= \sum_{j=1}^{K} \sum_{l=0}^{m-1} \int_R \sin\left[\omega_j\left(t - T_{j-1}\right)\right] \cdot rect_{T_j}\left(t - T_{j-1} - l \cdot T\right) \cdot e^{-i\omega t} dt =$$

$$= \sum_{j=1}^{K} \sum_{l=0}^{m-1} \tilde{S}_{j,l}(\omega), \qquad (5)$$

где

$$\tilde{S}_{j,l}(\omega) = \int_R \sin\left[\omega_j\left(t - T_{j-1}\right)\right] \cdot rect_{T_j}\left(t - T_{j-1} - l \cdot T\right) \cdot e^{-i\omega t} dt.$$

Преобразуем последний интеграл

$$\tilde{S}_{j,l}(\omega) = \int_{T_{j-1}+lT}^{T_{j-1}+lT+T} \sin\left[\omega_j\left(t - T_{j-1}\right)\right] \cdot e^{-i\omega t} dt =$$

$$= \int_{A_{j,l}}^{A_{j,l}+T_j} \frac{e^{i\omega_j\left(t - T_{j-1}\right)} - e^{-i\omega_j\left(t - T_{j-1}\right)}}{2i} \cdot e^{-i\omega t} dt, \qquad (6)$$

где $A_{j,l} = T_{j-1} + lT$.

Пропуская промежуточные выкладки, запишем итоговую формулу для спектра $\tilde{S}_{j,l}(\omega)$ так

$$\tilde{S}_{j,l}(\omega) = \frac{e^{-i\omega_j T_{j-1}}}{2(\omega - \omega_j)} e^{-i(\omega-\omega_j)A_{j,l}} \left(e^{-i(\omega-\omega_j)T_j} - 1\right) -$$

$$- \frac{e^{-i\omega_j T_{j-1}}}{2(\omega + \omega_j)} e^{-i(\omega+\omega_j)A_{j,l}} \left(e^{-i(\omega+\omega_j)T_j} - 1\right).$$

Перепишем последнее выражение в более простом виде

$$\tilde{S}_{j,l}(\omega) = S_{j,l}(\omega-\omega_j) - S_{j,l}(\omega+\omega_j), \qquad (7)$$

где $S_{j,l}(\omega) = \frac{T_j}{2} F_{j,l}(\omega)\cdot \mathrm{sinc}\left(\frac{\omega T_j}{2}\right)$,

$$F_{j,l}(\omega) = i\cdot e^{-i\omega_j T_{j-1}} e^{-i\omega T_j} e^{-i\omega A_{l,j}},$$

$$A_{l,J} = T_{j-1} + l\cdot T_j,\ T = \sum_{j=0}^{m-1} T. \qquad (8)$$

Рассмотрим АЧХ выходного сигнала СФС с выборками. Для этого возьмем от (5) с учетом (7), (8) модуль и рассмотрим спектр в области положительных частот, т.е. примем в (7) $S_{j,l}(\omega+\omega_j)\equiv 0$. Из (5) имеем

$$|S_u(\omega)| = \left|\sum_{j=1}^{K}\sum_{l=0}^{m-1}\tilde{S}_{j,l}(\omega)\right| = \left|\sum_{j=1}^{K}\sum_{l=0}^{m-1} S_{j,l}(\omega-\omega_j)\right| =$$

$$= \left|\sum_{j=1}^{K}\frac{T_j}{2}\mathrm{sinc}\left(\frac{(\omega-\omega_j)T_j}{2}\right)\sum_{l=0}^{m-1}F_{j,l}(\omega-\omega_j)\right| =$$

$$= \left|\sum_{j=1}^{K} S_j(\omega-\omega_j)\mathrm{sinc}\left(\frac{(\omega-\omega_j)T_j}{2}\right)\right|. \qquad (9)$$

Здесь выражение для $S_j(\omega)$ имеет следующий вид:

$$S_j(\omega) = \frac{T_j}{2}\sum_{l=0}^{m-1}F_{j,l}(\omega) = \frac{T_j i}{2}e^{-i\omega_j T_{j-1}}e^{-i\omega T_j}\sum_{l=0}^{m-1}e^{-i\omega A_{l,j}} =$$

$$= \frac{T_j i}{2}e^{-i\omega_j T_{j-1}}e^{-i\omega(T_j+T_{j-1})}\sum_{l=0}^{m-1}e^{-i\omega T_j l} =$$

$$= \frac{T_j i}{2}e^{-i\omega_j T_{j-1}}e^{-i\omega(T_j+T_{j-1})}\frac{1-e^{-iT_j\omega\cdot m}}{1-e^{-i\omega T_j}}. \qquad (10)$$

По выражению (10) можно вычислить уровни как основной, так и побочной спектральных составляющих. Выражение $\frac{1-e^{-iT_j\cdot\omega\cdot m}}{1-e^{-i\omega T_j}}$ представляет собой амплитудный множитель, а $e^{-i\omega_j T_{j-1}}e^{-i\omega(T_j+T_{j-1})}$ - фазовый. АЧХ выходного сигнала (формула (9)) представляет собой суммы функций типа $\sin x/x$. Рассмотрим частные случаи.

а) $m=1$ - однотактный режим.

В данном случае $S_j(\omega) = \frac{T_j i}{2}e^{-i\omega 2T_j}$ так, как $T_j = T_{j-1}$. Если устремить K к бесконечности в выражении для АЧХ, то в пределе функция $\mathrm{sinc}(\omega)$ переходит в $\delta(\omega)$ и интеграл Фурье в ряд Фурье и, соответственно, непрерывный спектр в дискретный. То есть в этом случае спектр выходного сигнала является δ-функцией на частоте $\omega_j = 2\pi/T_j$.

б) $m=2$ - двухтактный режим.

В этом случае период выходного сигнала T образован из суммы T_0 и T_1, которые находятся непосредственно из отображений (1), (2). Спектр же выходного сигнала состоит из суммы функций типа $\mathrm{sinc}(\omega)$ с определенными весами. Непосредственные графики для спектров выходных сигналов в этом случае представлены ниже при экспериментальном исследовании СФС с выборками.

Таким образом, получены аналитические выражения для спектров выходных сигналов, которые позволяют количественно оценивать как уровень основной спектральной составляющей, так и уровень побочных. Перейдем к конкретным практическим и экспериментальным исследованиям.

Экспериментальное исследование СФС с выборками с помощью NI ELVIS II DATEx.

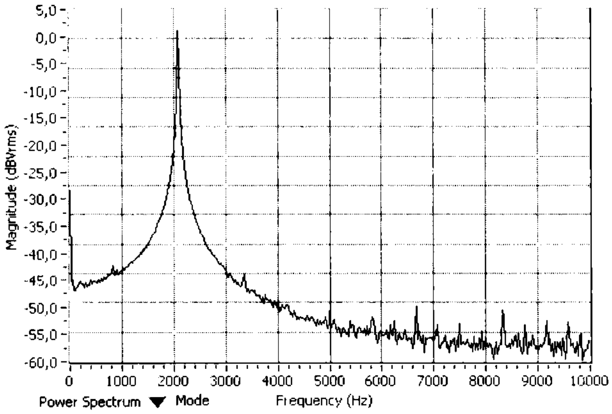
Модуль расширения Emona DATEx используется для выполнения экспериментов по основам телекоммуникаций на лабораторной станции NI ELVIS II. Для реализации СФС с выборками использовались следующие модули (функциональные блоки): генератор синусоидального напряжения частоты 2 кГц (Master Signals), система «выборки и запоминания» (Dual Analog Switch), функциональный генератор переменного сигнала с плавной зависимостью частоты выходных колебаний от приложенного напряжения (Function Generator), компаратор (на рис.1 блок ФИ, Utilities - Comparator). Общий вид и схема соединения функциональных модулей Emona DATEx представлена на рис.4.

Рис.4. Практическая реализация СФС с выборками на NI ELVIS II DATEx.

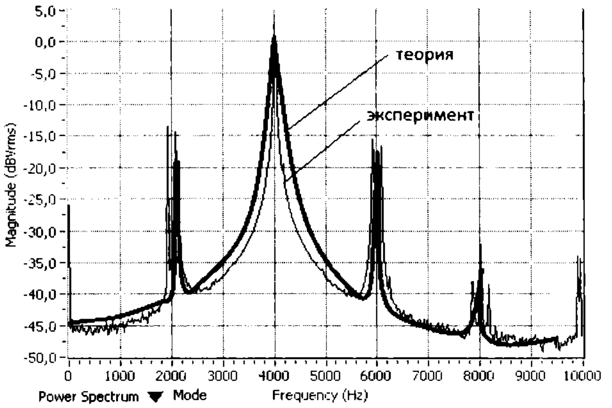
Исходные данные для экспериментов следующие: частота входного сигнала $f_{вх}=2$, граница зоны синхронизма кратности 1/1 наблюдается при $f_{гр}=2{,}8549$, в режиме синхронизма 1/2 $f_{гр}=4{,}004$, в режиме деления частоты на 2 $f_{гр}=1{,}001$. Поскольку в NI ELVIS II DATEx использовался ПГ в виде ГУН, то **управление происходило по частоте** (а не по периоду) выходных колебаний и математическая модель в данном случае соответствует разностному уравнению (2).

В ходе проведенных исследований была найдена граница полосы синхронизма СФС с выборками в режиме синхронизма 1/1 - $\Delta f_{гр}=0{,}8549$, при этом при расстройке относительно центра зоны синхронизма спектр выходного сигнала не приобретает паразитных спектральных составляющих (рис.5а), что согласуется с теорией (см. [5-9]). В зоне удвоения частоты спектр выходных колебаний приобретает паразитные спектральные составляющие на комбинационных частотах (рис.5б), что объясняется

[1,2] существенной неравномерностью в выборке входного сигнала и совпадает с теоретически предсказываемой из выражений (5)-(7).



а)



б)

Рис.5. Спектры выходного сигнала СФС с выборками при $f_в/Г$ = 2,8549 (а) на границе полосы синхронизма, $f_в/Г$ = 4,004 (б) в режиме близком к синхронизму 1/2.

Заключение

В работе получены аналитические выражения для спектров выходных сигналов бесфильтровой СФС с выборками в зонах деления и умножения частоты, которые позволяют количественно оценить уровень побочных спектральных составляющих при отстройке относительно центров соответствующих зон синхронизма. Были проведены экспериментальные исследования режимов работы СФС с выборками с помощью установки NI ELVIS II DATEx, которые подтвердили предсказываемый из теории результат об уровне побочных спектральных составляющих в зонах умножения частоты.

Автор выражает благодарность за постановку задачи и обсуждение результатов научному руководителю, профессору Капранову Михаилу Владимировичу и профессору Удалову Николаю Николаевичу за обсуждение результатов и ценные замечания.

Литература

1. **Системы** фазовой синхронизации с элементами дискретизации /Под ред. В.В. Шахгильдяна. – М.: Радио и связь, 1989.

2. **Капранов М.В.** Элементы теории систем фазовой синхронизации. – М.: МЭИ, 2006.

3. **Капранов М.В.,** Томашевский А.И. Регулярная и хаотическая динамика нелинейных систем с дискретным временем. – М.: МЭИ, 2009.

4. **Казаков Л.Н.** Нелинейная динамика дискретных систем фазовой синхронизации. Дисс. д.т.н., 2000.

5. **Шахтарин Б.И.** Статистическая динамика систем синхронизации. - М.: Радио и связь, 1998.

6. **Мишагин К.Г.,** Шалфеев В.Д. Пономаренко В.П. Нелинейная динамика систем фазирования в антенных решетках. Учебное пособие. -Н. Новгород: Изд. Нижегородского госуниверситета, 2007.

7. **Кулешов В.Н.,** Морозов А.А. Исследование импульсной системы фазовой автоподстройки частоты //Радиотехника и электроника. 1963. Т.8. №8. С.1334-1343.

8. **Кулешов В.Н.,** Левченко Г.М. Исследование периодических движений второго рода в системах ИФАП //Радиотехника и электроника. 1980. Т.25. №2. С.320-328

9. **Капранов М.В.,** Сафин А.Р. Спектры колебаний в дискретной системе фазовой синхронизации с неравномерной выборкой //Успехи современной радиоэлектроники, 2009, №9, С.18-41.

10. **Сафин А.Р.** Системы фазовой синхронизации с выборками. Особенности работы и методы исследования //Радиотехнические тетради, №42, 2010. С.57-66.

11. **Кравченко В.Ф.,** Кравченко О.В., Сафин А.Р. Атомарные функции и системы фазовой синхронизации с выборками //Электромагнитные волны и электронные системы, 2010. №7. Т.15. С.41-55.

12. **Сафин А.Р.** Спектральный анализ периодических режимов 2 рода в ИСФС //Материалы 9-й Международной школы «Хаотические колебания и образование структур», -Саратов: 2010. С.155-156.

13. **Сафин А.Р.** Спектральный метод исследования колебаний системы фазовой синхронизации с выборками в режиме удвоения частоты // Тезисы докладов всероссийского научно-технического семинара «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов для связи и вещания» 27-29 июня 2010. Н.Новгород. С. 121-123.

14. **Капранов М.В., Сафин А.Р.** Спектры колебаний дискретной системы фазовой синхронизации с неравномерной выборкой // руды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. Серия «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации». Выпуск III. 3-я Международная конференция, 22-24 сентября. 2009. Суздаль. С.233-236.

15. **Капранов М.В.,** Сафин А.Р. Спектры колебаний в зонах дробной кратности в ЦСФС с неоднородной выборкой //Рдиоэлектроника, электротехника и энергетика. 15-я Международная конференция студентов и аспирантов. Тезисы докладов в 3-х томах. 2009. Изд МЭИ. – М.: Т.1. С.48-49.

Действ. чл. РАИ Мельников Б.С.

АКАДЕМИЧЕСКОЕ ИЗОБРЕТАТЕЛЬСТВО. Часть 2*

Введение

Рассмотрим основные процедуры МЭИ на сквозном примере конкретного изобретения "Центральная станция системы радиосвязи с доступом по запросу" [11, 91, 92] (*Нумерация литературы частей 1 и 2 сквозная). Метод экспресс-изобретательства применяется в 3-х вариантах: 1) если не определена предметная область творчества, 2) если не определен объект творчества, 3) если не определен предмет творчества. Рассмотрим основные поисковые действия изобретателя, ориентируясь на [65, 71].

Поиск предметной области

Этот этап изобретательства, возможно, самый ответственный, так как ошибка, допущенная на начальном этапе, в дальнейшем трудно поправима. Рассмотрим варианты поиска и определения предметной области с помощью как простых, так и наукоемких методических средств [86].

а) Советы экспертов, входящих в референтную группу субъекта изобретательства. В качестве экспертов могут выбираться преподаватели, сторонние специалисты, родственники, друзья и т.п. Полученные советы должны быть проверены на соответствие п. "д".

Основной критерий выбора предметной области – возможность прагматического использования в учебном процессе и выгодной коммерческой реализации будущего патента.

б) Осознание неудовлетворенности состоянием какого-либо раздела изучаемой дисциплины.

В процессе изучения технических дисциплин преподаватели обращают внимание студентов на объективную неравномерность развития отдельных разделов науки, недостаточную разработанность соответствующих технических средств, невозможность на данном уровне развития техники преодоления известных технических противоречий. Для студентов-изобретателей это может оказаться поводом для выбора соответствующей предметной области для творческой деятельности.

в) Знакомство с направлениями научно-исследовательских работ кафедр и подразделений университета, знакомство с изобретениями сотрудников и студентов МЭИ (ТУ).

г) Знакомство с различными видами научно-технической информации (НТИ): фондами основных библиотек (Научно-техническая библиотека МЭИ, Государственная публичная научно-техническая библиотека (ГПНТБ), Российская государственная библиотека (РГБ) и др.), системами классификаций НТИ (Универсальная десятичная классификация (УДК), Библиотечная библиографическая классификация (ББК) и др.), базами данных, в том числе на CD ROM, сайтами указанных библиотек, известных фирм, университетов в сети Интернет.

д) В соответствии с методом экспресс-изобретательства – поиск в процессе знакомства с Международной патентной классификацией (МПК), патентными указателями и оригиналами описаний российских и иностранных изобретений во Всероссийской патентно-технической библиотеке (ВПТБ), сайтами патентных ведомств (ФИПС РФ, США, Великобритании и др.). Итак, по результатам поиска предметной области определяются индексы и названия рубрик МПК. Рассматриваемый сквозной пример по п. "д", как оказалось, охватывает в основном предметную область H04B7, но с отсылками и в другие области (возможно, что эти отсылки также необходимо будет иметь ввиду).

Анализ рубрик классификационной группы H04B7 показывает, что наиболее подходящей для академического изобретательства в условиях конкретного сквозного примера является предметная область, соответствующая рубрике H04B7/26, название которой с учетом выше по тексту расположенных рубрик формулируется так: "Системы радиосвязи, т.е. системы с использованием излучения, для связи между двумя или более станциями, из которых по меньшей мере одна передвижная".

Выбор объекта изобретательства

а) Для поиска и определения объекта изобретательства в пределах выявленной предметной области рассматриваются оригиналы описаний российских и иностранных изобретений, отбираются наиболее представительные аналоги и по ним составляется обобщающая информационно-структурная схема, в первом приближении выявляющая объект изобретательства. Изучение аналогов показывает, что наиболее простой по структуре является конструкция [88], представляющая собой только наземную часть системы радиосвязи. Однако по уровню сложности и составу существенных признаков (элементов и связей) наземные станции вполне соответствуют требованиям квалификационных работ и могут быть приняты в качестве возможных объектов изобретательства. Обобщенная информационно-структурная схема наземной станции подвижной радиосвязи представлена на рис. 1.

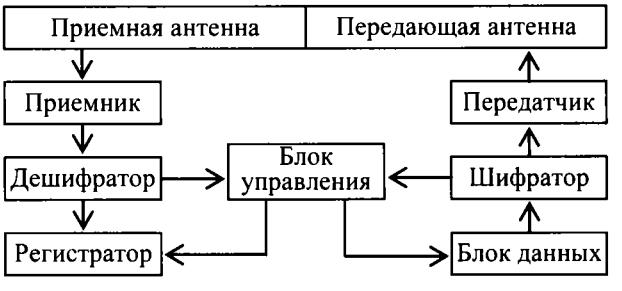


Рис. 1. Обобщенная информационно-структурная схема наземной станции подвижной радиосвязи

б) Окончательный выбор производится при изучении патентного фонда непосредственно в ВПТБ или по патентным фондам Интернет, в про-

цессе которого формируются личные интересы в предметной области и осознаются ограничения, связанные с уровнем современных объективных потребностей и субъективных возможностей. Выбирается социально-значимый объект на уровне устройства или системы, являющийся одним из последних изобретений в хронологическом списке изобретений своего класса. Выбор проверяется по указателям реализации патентов и лицензий с целью выяснить, хорошо ли реализуются в последнее время патенты на объекты выбранного класса.

Отобранные изобретения составляют личный патентный фонд, который, по существу, и определяет выбор объекта творческой деятельности. Описания отобранных изобретений копируются и служат материалом для дальнейших информационных исследований.

В рассматриваемом сквозном примере в качестве объекта творческой деятельности определена "Центральная станция системы радиосвязи с доступом по запросу" по классу МПК7 H04B7/26, а патентный фонд составили аналоги [88–90].

Информационные исследования

В процессе информационных исследований проводятся поиск, обобщение и сжатие информации путем структурно-функционального анализа (восхождение от конкретного к абстрактному). Оказалось, что основной объем прототипной информации, соответствующей теме работы, содержится в патентной документации. Выделенные объекты-представители характеризуются следующими основными показателями качества.

В изобретении SU1142896 (1985г.) путем сокращения перерывов достигнуто уменьшение времени простоев без понижения пропускной способности. При этом сообщения переменной длины реализуются за счет фиксации конца текста. Это по классификации поисковых средств соответствует эвристическому приему "адаптация".

В изобретении SU1411985 (1988г.) путем использования общей полосы частот достигнуто ускорение доставки без понижения точности. При этом запросы идентифицируются по форме сигнала. Это также соответствует эвристическому приему "адаптация".

В изобретении RU2050695 (1995г.) путем ограничения уровня загрузки достигнуто повышение эффективности без снижения надежности. Это реализуется исключением низкоприоритетных сообщений. Поисковое средство соответствует эвристическому приему "адаптация".

Эти изобретения составляют цепочку аналогов от А-2 до А-0, по которым проводятся необходимые исследования ЦСРС. Результаты по каждому аналогу сводятся в информационные таблицы, например, для последнего аналога А-0 получены таблицы 1 – 3 [71].

В информационных таблицах отражены результаты библиографического анализа, анализа творческого процесса автора изобретения (с точки зрения исследователя) и функционального анализа.

Таблица 1. Библиографический анализ изобретения

НАЗВАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ (54) АВТОРЫ (72), ОРГАНИЗАЦИЯ (71)	КЛАСС МПК (51)	УДК (53)	СТРАНА (19)	№ (11)	ПРИОРИТЕТ (22/46)	ПРОТОТИП (56)
Центральная станция системы радиосвязи с подвижными объектами. Вдовиченко Н.С., Криницин В.В. и др., МИИГА	*H04B 7/26*	–	*RU*	*2050 695*	*91/95 гг.*	*А.с. 1411985, 1986 г.*

Таблица 2. Анализ творческого процесса автора изобретения

ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ОБЪЕКТА $ПК_i$, i=1,...,3	Указанные явно	Не указанные явно		
	ПК1 *Эффективность*	ПК2 *Функциональная надежность*	ПК3 *Сложность*	ПК4 –
ЦЕЛЬ (автора изобретения, социальная)	*Улучшить ПК1*			
ПРОТИВОРЕЧИЕ (преодоленное автором, социально-техническое)	*Улучшил ПК1 без ухудшения ПК2*			
ПУТЬ (общетехнический, использованный автором для преодоления противоречия)	*Учел уровень загрузки и приоритет обслуживания*			
ЭВРИСТИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ (которыми автор нашел общетехнический путь)	*Адаптация (к воздушной обстановке)*			

Таблица 3. Функциональный анализ изобретения

Функции F функциональных элементов		Описание функций F, их особенности	Конструктивные блоки S
Системные	$F_Н$ -назначения	*Управление радиосвязью с ЦС*	*Все блоки*
	$F_И$ -инфра	*Отсутствует*	–
Технические	$F_Ц$ -целевая	*Исключение низкоприоритетных сообщений*	*ВВЭ*
	F_1 -подготовительная	*Прием данных с учетом загрузки и приоритета*	*Цепи с бл.1,16,18*
	F_2 -основная	*Формирование выходных данных с [$F_Ц$]*	*Цепи с бл. 20*
	F_3 -выходная	*Передача данных*	*Цепи с бл. 21*
	F_4 -управления	*Коммутация цепей с [$F_Ц$]*	*Цепи с бл. 33*

Формирование обликового решения

При формировании обликового решения реализуются три процедуры: построение композиционной прогностической таблицы, прогнозирование обликового набора признаков и композирование нового обликового решения с применением эвристических средств и учетом общих закономерностей развития технических систем..

Вид композиционной прогностической таблицы [71] приведен ниже (табл. 4). Содержание её составляют значения композиционных признаков, полученные по каждому аналогу из информационных таблиц. В правом столбце таблицы помещаются значения, полученные прогнозированием

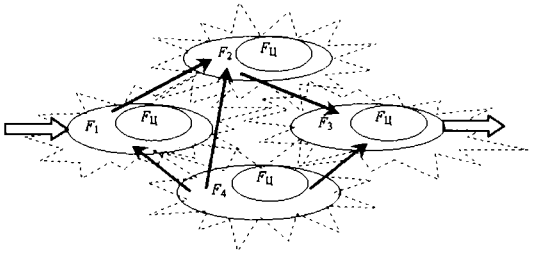


Рис. 2. Мысленная модель обликового решения

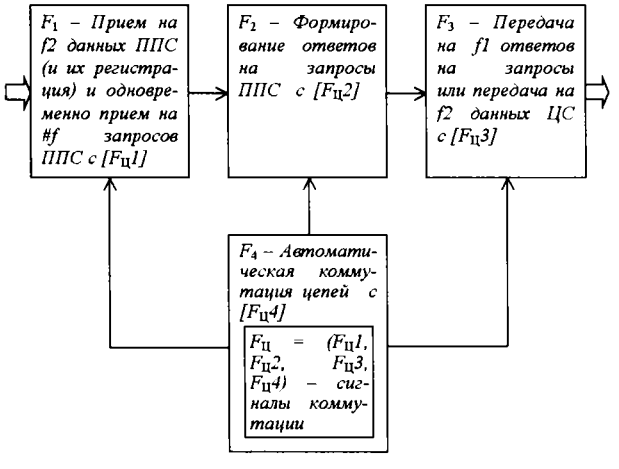


Рис. 3. Функциональная схема

по каждой строке с учетом морфологии признаков, например, представленной в табл. 5, или/и с применением известных эвристических средств, напри
мер, Л.С. Гуткина [2], Р.П. Повилейко [4], представленных в табл. 6 в сопоставимом виде.

Прогнозирование обликового набора признаков проводится по каждому композиционному признаку K_i отдельно, но с постоянно действующей установкой на конечный результат – социально-значимый объект в целом, максимально приближенный к идеальной технической системе. Прогнозирование значения каждого признака проводится посредством выполнения трех действий: 1) исторический анализ изменения (развития) рассматриваемого признака (по возможности, с учетом влияния других признаков, соотносящихся с ним); 2) учет общих закономерностей развития социально-значимых технических систем; 3) применение эвристических средств. После нескольких итераций оставляется и заносится в таблицу значение признака, по субъективным представлениям в наибольшей степени определяющее социальную значимость будущего нового объекта. Неиспользованные значения признака не отбрасываются, а сохраняются, например, в специальном банке данных, чтобы к ним можно было вернуться, если окажется, что по полученному обликовому набору не удается представить удовлетворительное обликовое решение.

Теперь в правом столбце табл. 4 оказывается набор признаков, определяющий новое обликовое решение.

По обликовому набору признаков формируется мысленная модель обликового решения рис. 2.

Сформированная модель обликового решения позволяет составить функциональную схему [71], элементами которой являются функции F_1, ..., F_4 с обликовыми значениями соответствующих композиционных признаков KF_1, ..., KF_4, а связи между ними и с элементами "вход" и "выход" образуются на основе предшествующего опыта информационных исследований в соответствии с очевидным из обликовой модели принципом функционирования технической системы (рис. 3).

Таблица 4. Композиционная прогностическая таблица

Композ. призн. / $t \rightarrow$	Аналог А-2 *SU 1142896 1983/85гг.*	Аналог А-1 *SU 1411985 1986/88гг.*	Аналог А-0 *RU 2050695 1991/95гг.*	Обликовый набор признаков (прогноз)
$K_{НАЗ}(t)$ (назначение)	*Радиосвязь с доступом по запросу с ЦС*	*Радиосвязь с доступом по запросу с ППС*	*Управление радиосвязью с ЦС*	*А-1 + возможность передачи сообщений с ЦС*
$K_{ЦЕЛ}(t)$ (цель социальная)	*Сокращение простоев*	*Ускорение доставки*	*Повышение эффективности*	*Расширение функциональных возможностей*
$K_{ПРО}(t)$ (противор. соц.-технич.)	*Время простоя \\ пропускная способность*	*Время доставки \\ точность*	*Эффективность \\ функциональная надежность*	*Функциональные возможности \\ сложность*
$K_{ЭВР}(t)$ (эврис - тики)	*Адаптация (к длине сообщения)*	*Адаптация (к занимаемой полосе частот)*	*Адаптация (к воздушной обстановке)*	*Интеграция*
$K_{ПУТ}(t)$ (путь общетехнич.)	*Сокращение перерывов (между сообщениями)*	*Дополнительное использование ресурса (#f)*	*Учет объема загрузки и уровня приоритета*	*Введение дополнительного информационного канала*
$KF_Ц(t)$ (функ - ция новых эл.)	*Формирование на ППС сообщений переменной длины*	*Формирование запросов в общей полосе #f при разделении по форме сигнала*	*Исключение низкоприоритетных сообщений*	*Передача данных ЦС по линии "вверх" на f2*
$KF_1(t)$ (подготовительная)	*Прием на f2 данных*	*Прием на f2 данных и на #f запросов с [$KF_Ц$]*	*Прием данных с учетом объема загрузки и уровня приоритета*	*А-1 с [$KF_Ц$]*
$KF_2(t)$ (основная)	*Формирование запросов для ППС*	*Формирование ответов на запросы ППС*	*Формирование выходных данных с [$KF_Ц$]*	*А-1 с [$KF_Ц$]*
$KF_3(t)$ (выходная)	*Передача на f1 запросов*	*Передача на f1 ответов*	*Передача данных*	*А-1 или передача на f2 данных с [$KF_Ц$]*
$KF_4(t)$ (управления)	*Фиксация конца текста с [$KF_Ц$]*	*Автоматическая коммутация цепей*	*Коммутация цепей с [$KF_Ц$]*	*А-1 с [$KF_Ц$]*

Таблица 5. Морфологическая таблица признаков

ПРИЗНАКИ		№ / №	1	2	3	4
СРЕДСТВО	по РОДУ	1	Техническое	Химическое	Биологическое	Социальное
	по ВИДУ	2	Реальное	Экспериментальное	Теоретическое	Эвристическое
	по ОБЪЕМУ	3	Целостное	Функциональная часть	Функциональный блок	Элемент
	по ИЗВЕСТНОСТИ	4	Из того же класса МПК	Из предметной области	Из другой области	Неизвестное (новое)
	по РЕСУРСНОСТИ	5	Генератор / потребитель энергии	Источник / получатель информации	Производитель/потребитель вещества	Экономия / затраты элементной базы
СВОЙСТВО	по ПРОЯВЛЕНИЮ	6	Явное	Вероятностное	Проявляющееся	Скрытое
	по ХАРАКТЕРУ	7	Качественное	Количественное	Функциональное	Неопределенное
	по ВАЛЕНТНОСТИ	8	Образующее связь	Исключающее связь	Индифферентное к образованию связи	Образующее обратную связь
	по НАЛИЧЕСТВОВАНИЮ	9	В физическом пространстве	В физическом времени	В пространстве - времени	В теоретическом пространстве
	по ВАРИАТИ-	10	Не изменяющееся	Изменяющееся плавно	Изменяющееся прерывисто	Адаптирующееся

	ВНОСТИ					

Таблица 6. Эвристики в сопоставимом виде

№ п/п	Эвристики по Р.П. Повилейко	Эвристики по табл. 5	Эвристики по Л.С. Гуткину
1	Неология	(1-1), (2-1), (4-3)	Применение физических явлений
2	Адаптация	(1-1), (2-1), (10-4)	Применение адаптации
3	Мультипликация	(1-1), (2-1), (7-2)	Изменение частоты
4	Дифференциация	(1-1), (2-1), (3-2), (8-1)	Дробление
5	Интеграция	(1-1), (2-1), (3-1), (8-1)	Объединение
6	Инверсия	(1-1), (2-1), (8-4)	"Обращение вреда в пользу" Введение обратной связи Переход в другое измерение (замена временной обработки пространственно-временной, непрерывных [процессов] цифровыми, аналоговой обработки цифровой и т.д.)
7	Импульсация	(1-1), (2-1), (10-3)	Замена непрерывного действия импульсным (или наоборот)
8	Динамизация	(1-1), (2-1), (10-2), (9-2)	Динамическое согласование
9	Аналогия	(1-3), (2-4), (3-3), (9-4)	Функциональное согласование
10	Идеализация	(1-1), (2-1), (5-4)	Применение линеаризации

Разработка технического решения

По разработанной функциональной схеме составляется структурная схема нового технического решения, элементы которого выбираются из элементов соответствующего функционального назначения, известных в рассматриваемой предметной области (фильтр, ключ, переключатель и т.п.), в частности, из элементов, входящих в структурные схемы рассмотренных аналогов. Связи между элементами образуются в соответствии с принципами функционирования аналогичных элементов и устройств.

Описание функционирования ЦСРС очевидно из материалов заявки на патентование изобретения и приведено в [91].

Материалы заявки на патентование изобретения

Заявка на изобретение содержат заявление на бланке ФИПС (в новой редакции – см. на сайте ФИПС www.fips.ru), описание изобретения, формулу изобретения, графическую часть и реферат. Материалы приведены в описании патента [11].

Приведем для сведения текст реферета изобретения:

Центральная станция системы радиосвязи с доступом по запросу

Изобретение относится к радиотехнике и связи и может использоваться при передаче информации между приемопередающими станциями (ППС) и центральной станцией (ЦС) на разнесенных частотах. Задачей изобретения является расширение функциональных возможностей путем обеспечения передачи информации с ЦС на произвольную ППС без существенного усложнения конструкции. Центральная станция системы радиосвязи с доступом по запросу содержит приемную антенну, ключ, приемник, демодулятор, блок регистрации данных, блок разделения N каналов, коммутатор, блок ввода/вывода сигналов запроса, блок формирования ответа, переключатель, модулятор, передатчик, передающую антенну, блок выдачи данных, счетчик, блок формирования запроса, блок формирования информационного пакета, элемент И, заградительный фильтр и линию задержки. Технический результат состоит в образовании дополнительного N+1-го информационного канала ЦС-ППС с возможностью переключения передатчика с первой на вторую из разнесенных частот при одновременном блокировании входа приемника по второй частоте.

Сравнительное моделирование изобретения

Продолжительность Государственной экспертизы заявок на изобретения в настоящее время составляет более года, а иногда и значительно больше. Первые месяцы этого периода удобно использовать для доработки и моделирования изобретения с целью конструктивного взаимодействия с экспертизой, особенно в случае получения запроса экспертизы с выражением сомнений в промышленной применимости изобретния. Доказательство экспертизе ФИПС соответствия изобретения условию патентоспособности "промышленная применимость" проводится посредством компьютерного моделирования по методике сравнительного моделирования (МСМ) [69] в среде LabVIEW [70]. Использование МСМ определяется возможностью упрощения структуры модели, а выбор среды моделирования связан с возможностью быстрой разработки (а при необходимости и быстрой модификации) такой панели управления, которая более подходит для пояснения конкретному эксперту принципа функционирования и работоспособности изобретения.

По регламенту МСМ в процессе разработки модели последовательно выполняются ряд процедур. Однако регламент не является жестким, и для технического решения, подобного описанному в материалах заявки, с учетом использования среды LabVIEW оказывается достаточным разработать техни-

ческое задание на моделирование, выполнить моделирование только вновь введенных элементов (ВВЭ) и разработку имитаторов сигналов для них, разработать панели функциональную и управления, а затем провести эксперименты на полученной модели, доказывающие соответствие изобретения условию патентоспособности "промышленная применимость".

На рис. 4 приведен вид функциональной модели рассматриваемого изобретения в среде LabVIEW, а на рис. 5 вид панели управления собранной модели [92].

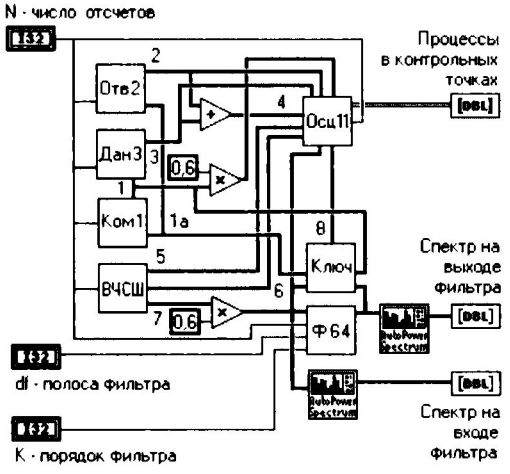


Рис. 4. Функциональная панель модели

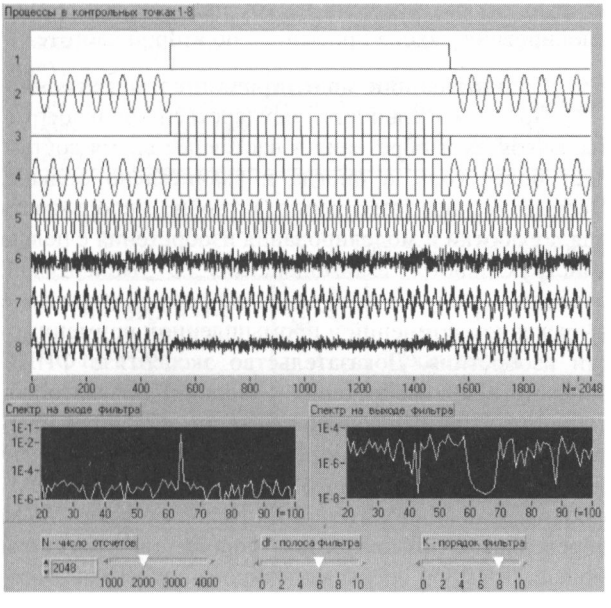


Рис. 5. Панель управления модели

Эксперименты на модели показывают, что все процессы синхронизованы и имеют вид и характеристики, соответствующие техническому заданию. Так, например, по спектральным диаграммам видно, что при среднем условном уровне сигнала запроса $\sim 10^{-5}$ сигнал ЦС на частоте f2 = 64 цикла на входе заграждающего фильтра превышает уровень $\sim 10^{-2}$ (т.е. на 3 порядка), на выходе фильтра сигнал ЦС отсутствует, а на его месте (на частоте 64 цикла) наблюдается снижение уровня сигнала запроса в полосе режекции до $\sim 10^{-7}$ и ниже (т.е. ослабление до пяти порядков). Имеется также возможность эти числовые значения изменять в ту или другую сторону путем изменения порядка фильтра и/или полосы пропускаемых частот.

Экспериментальные исследования на модели позволяют убедиться в работоспособности созданного технического объекта, получить уникальные патентоспособные результаты, которые можно использовать для включения в научные отчеты и квалификационные работы студентов, для научных публикаций, выступлений на различных конференциях, например, представленных в [92 – 100].

Таким образом экспериментально показывается, что на разработанной модели для экспертизы может быть проведена демонстрация :

1) возможности компоновки из известных (или адекватных известным) элементов новой (заявленной для патентования) технической системы;

2) изображений (графиков и диаграмм) соответствующих сигналов и их характеристик во временной и спектральной областях;

3) работоспособности и соответствия назначению и полученному техническому результату, указанным в заявке на патентование изобретения.

Поэтому может быть сделан общий вывод по результатам моделирования – рассматриваемое техническое решение соответствует условию патентоспособности "промышленная применимость".

Заключение

Многолетний опыт автора преподавания в технических вузах убеждает, что именно разработка и патентование технических решений в соответствии с изложенной здесь в кратком виде методологией АИ повышают уровень общетехнической культуры и самоактуализации студентов, престиж и романтику научно-технического творчества, положительно отражаются на качестве квалификационных работ, особенно их творческой части, являются одним из решающих факторов готовности к практической деятельности и профессиональной мобильности, консолидируют усилия преподавателей, инженеров и студентов в развитии отечественного научного и технического творчества, обладающего огромным потенциалом для подъема российской экономики, культуры и повышения качества жизни в целом.

Литература (нумерация Части 1 продолжена)

75. **Мельников Б.С.** Академическое изобретательство //Науч.-практ. конф. "Инновации РАН-2008". Тез. докл. – Н.Новгород: ИПФ РАН, 2008. С. 30.

76. **Мельников Б.С.** Академическое изобретательство: философская концепция //Новые технологии в образовании. – 2009, № 4, с. 100-101.

77. **Мельников Б.С.** Академическое изобретательство в модернизации образования //Модернизация системы профессионального образо-

вания на основе регулируемого эволюционирования :Материалы VIII ВНПК : в 4 ч. Ч. 4. – М.; Челябинск :Изд. "Образование", 2009. – 354 с. – С. 211-215.

78. **Мельников Б.С.** Академическое изобретательство в инновационном образовании //Международное сотрудничество и стратегические партнерства университетов в становлении инновационного образования России. – Ростов н/Д :Изд. ЮФУ, 2009. – 166 с. – С. 80-83.

79. **Мельников Б.С.** Академическое интернет-изобретательство //Материалы XX Междунар. конф. "Применение новых технологий в образовании".– Троицк: Центр новых педагогических технологий, 2009. 570 с. – С. 245-247.

80. **Мельников Б.С.** Квалификационное изобретательство //INTERMATIC–2009 : Материалы Международной НТК "Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения". – М. :Энергоатомиздат, 2009, часть 3. – С. 235-237.

81. **Мельников Б.С.** Академическое изобретательство //Эффективные механизмы инновационно-технологического развития современного общества : Материалы III Всероссийской НПК. – Сочи : СИЭИТ; "Стерх", 2009. – 310 с. – С. 248-252.

82. **Мельников Б.С.** Академическое изобретательство в экологии //Общественные системы в условиях мирового финансового кризиса: тенденции, проблемы и перспективы стратегического и технологического развития, экологической безопасности :Всерос. науч.-практ. конф. (2009; Волгоград) : Материалы. – Волгоград-М. : ООО "Глобус", 2010. – 272 с. – С. 211-212.

83. **Мельников Б.С.** Инновационное интернет-изобретательство //Доклады Международной НПЗК "Интернет в образовании" /01.04.2010. – Москва :Современная гуманитарная академия; Московская финансово-промышленная академия [электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.conf.muh.ru/091012/thesis_Melnikov.htm .

84. **Мельников Б.С.** 50 патентов, полученных по АИ-методологии //Инновации РАН-2010 : Материалы ежегодной научно-практической конференции. Казань, 1 – 4 июня 2010 г. – Казань "Слово", 2010. – 520 с. – С. 487-490.

85. **Мельников Б.С.** Академическое открытие: парадигма, определение, демонстрация //Научно-практический семинар "Проблемы и перспективы регистрации научных открытий в области общественных наук". – М.:РАЕН и др., 2002. – С. 20-29.

86. **Мельников Б.С.** Опыт изобретательской подготовки в техническом университете. Тез.докл. Вторых Академических чтений МАН ВШ "Высшее образование: проблемы и перспективы развития". – Киев: МАН ВШ, 1995. С.195-197.

87. **Филиппов Л.И.** Проведение научных исследований и педагогический процесс. Уч. пос. / Под ред. Б.В. Данилова. – М.: Моск. энерг. ин-т, 1987. 84с.

88. **А.с. 1142896**. H04B7/26. Система радиосвязи с подвижными объектами /Лебедев П.И. и др. // БИ. 1985. № 8.

89. **А.с. 1411985**. H04B7/26, H04B7/24. Система радиосвязи с доступом по запросу /Мартынов А.И. // БИ. 1988. № 27.

90. **Патент 2050695**. H04B7/26. Центральная станция системы радиосвязи с подвижными объектами /Вдовиченко Н.С., Криницин В.В. и др. //БИ. 1995. № 35.

91. **Семенов А.В.**, Мельников Б.С. Изобретение центральной станции системы подвижной радиосвязи с доступом по запросу //Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Пятая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тез. докл. В 2-х томах. Т.1. – М.: Изд. МЭИ, 1999. С.169.

92. **Семенов А.В.,** Мельников Б.С. Сравнительное моделирование центральной станции подвижной радиосвязи //Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Седьмая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3-х томах. Т.1. – М.: Изд. МЭИ, 2000. С.148-149.

93. **Семенов А.В.,** Мельников Б.С. Сравнительное моделирование декодера сверточного кода // Десятая межд. научно-технич. конф. студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика" : Тез. докл. в 3-х т. – М. :Изд. МЭИ, 2004. Т.1., 488 с. – С.154 –155.

94. **Босый Д.М.,** Мельников Б.С. Сравнительное моделирование системы эхолокации //Девятая межд. научно-технич. конф. студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика".– М.: Изд. МЭИ, 2003. – С. 134-135.

95. **Шитова Е.Ю.,** Мельников Б.С. Сравнительное моделирование наземной мобильной станции многоспутниковой связи //Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Седьмая межд. научно-технич. конф. студентов и аспирантов. Тез. докл. Т.1.– М.: Изд. МЭИ, 2001. – С. 152-153.

96. **Коляда М.А.,** Мельников Б.С. Сравнительное моделирование наземной подвижной станции спутниковой связи //Там же, с. 143-144.

97. **Грязнов П.П.,** Мельников Б.С. Сравнительное моделирование системы передачи сигналов по трехфазной ЛЭП //Там же, с. 141-142.

98. **Хватынец С.А.,** Мельников Б.С. Сравнительное моделирование устройства для передачи и приема сигналов по трехфазной ЛЭП //Там же, с. 151-152.

99. **Грязнов М.С.,** Мельников Б.С. Сравнительное моделирование системы передачи сигналов в трехфазной электрической сети //Восьмая межд. науч.-тех. конф. студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика". – М.:Издво МЭИ, 2002. – С.139-140.

100. **Семенов А.В.** Исследование и развитие сравнительного моделирования РЭУС. Магистерская диссертация /Научн. руководитель. Мельников Б.С. – М.: Каф. РТС МЭИ (ТУ), 2003. – 164 с.

ГУТКИН ЛЕВ СОЛОМОНОВИЧ

22.11.1914 **09.02.2011**

В возрасте 96 лет ушёл из жизни Лев Соломонович Гуткин – видный ученый в области теории радиоприема и радиотехнических устройств, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники, лауреат Государственной премии.

Л.С. Гуткин внёс большой вклад в развитие теории оптимальных методов радиоприема при флуктуационных помехах, теории оптимизации систем и устройств по совокупности показателей качества, общей теории проектирования радиоэлектронных систем на основе системного подхода к проектированию, математических методов анализа и синтеза радиоуправления беспилотными летательными аппаратами.
Он внёс большой вклад в подготовку специалистов для ракетно-космической отрасли.
Был одним из основателей научно-педагогических школ по радиотехническим системам управления ракетами и космическими аппаратами и по оптимизации сложных радиоэлектронных систем.

Свою трудовую деятельность Л.С. Гуткин начал в 1931 г. после окончания Московского телефонного техникума. В 1937 г. он с отличием окончил электрофизический факультет Московского энергетического института по специальности «Радиотехника». Его дипломный проект был выдвинут на премию имени академика Петрова. Государственная комиссия рекомендовала Гуткина Л.С. в аспирантуру по кафедре радиоприемных устройств. В 1940 г. Л.С. Гуткин защищает кандидатскую диссертацию, посвященную вопросам сверхрегенеративного радиоприема.

В предвоенные годы Л.С. Гуткин работал в радиопромышленности, участвовал в разработке первых отечественных радиокомпасов.

В июле 1941 г. доцент Л.С. Гуткин добровольно ушел на фронт, участвовал в боях на Юго-западном, а позднее – на Калининском фронтах. Награжден медалью «За отвагу».

В 1943 г. Государственным комитетом обороны в числе молодых ученых и специалистов Л.С. Гуткин был отозван из армии для подготовки научно-технических кадров. Вскоре Гуткин Л.С. становится руководителем комплексной научно-исследовательской работы, посвященной анализу и разработке сложных радиотехнических систем. Эта работа сыграла большую роль в развитии новых областей приложения радиотехники. В 1952 г. в возрасте 39 лет Лев Соломонович защищает докторскую диссертацию, изданную в 1953 г. в качестве монографии «Преобразование сверхвысоких частот и детектирование». В 1956 г. Л.С. Гуткину присваивается ученое звание профессора.

Л.С. Гуткин является автором научных работ, получивших широкое признание специалистов, среди которых монографии «Принципы радиоуправления беспилотными объектами», «Теория оптимальных методов радиоприема при флуктуационных помехах», в которой наряду с критическим анализом многочисленных отечественных иностранных работ приводится ряд оригинальных результатов, полученных автором в области теоретической радиотехники, «Радиоуправление реактивными снарядами и космическими аппаратами» под ред. Л.С. Гуткина. Его книга «Оптимизация радиоэлектронных устройств», изданная в 1975 г., впервые на русском языке разъяснила инженерам идеи помехоустойчивого радиоприема.

В 1961 г. вышла первая часть учебного пособия «Радиоприемные устройства», написанная Л.С. Гуткиным совместно с В.И. Сифоровым и В.Л. Лебедевым, а в 1963 г. издана вторая часть этого пособия. Эти две книги являются до сих пор одним из наиболее полных курсов по теории радиоприемных устройств. Л.С. Гуткин является автором нескольких книг в серии «Библиотека радиоинженера», инициатором выпуска которой он является.

В 1961 г. на радиотехническом факультете МЭИ была создана кафедра радиотехнических систем во главе с профессором Л.С. Гуткиным, которую он возглавлял по 1984 г. Научная работа коллектива кафедры внесла значительный вклад в развитии е радиотехники. Профессор Гуткин Л.С. в 60-х -80-х гг. принимал активное участие в организации Всесоюзных научно-методических семинаров по проблемам проектирования радиосистем.

Ученики Л.С. Гуткина стали докторами и кандидатами наук, видными инженерами и крупными руководителями в промышленности. Многие радиоспециалисты в нашей стране и за рубежом ощущают себя учениками Л.С. Гуткина. Одни имели счастье слушать его прекрасные лекции, другие учились по его книгам.

Л.С. Гуткина всегда отличали высокий профессионализм, требовательность к себе и ответственность за порученное дело, принципиальность и объективность, сочетающиеся с внимательным и уважительным отношением к людям. Эти качества он сделал стилем работы кафедры РТС, а также привил своим ученикам. Они постараются достойно продолжать дело своего учителя.

Мы сохраним добрую память о Льве Соломоновиче Гуткине на долгие годы

Коллективы Радиотехнического факультета ИРЭ МЭИ
и Особого конструкторского бюро МЭИ.
Редколлегия журнала «Радиотехнические тетради»

«РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ТЕТРАДИ»
№ 44, 2011 г.

АДРЕС РЕДАКЦИИ
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, ОКБ МЭИ
Редакция журнала «Радиотехнические тетради»

Интернет: http://www.okbmei.ru
Телефоны: 8-495-362-56-52 (ОКБ МЭИ).
8-495-362-71-04 (ИРЭ МЭИ).
Факс: 8-495-362-55-76 (ОКБ МЭИ).
Электронная почта: **gzowski@okbmei.ru** **zaikoys@mpei.ru**

Редактор Б.А. Пашков
Компьютерная верстка В.М. Гзовский

Отпечатано в Полиграфическом центре МЭИ
111250, Москва, Красноказарменная ул., 13
Формат бумаги 60х 90/16. Объем 11,0 п.л.
Тираж 200 экз. Заказ № **72**

ТРЕБОВАНИЯ К ПОДГОТОВКЕ СТАТЕЙ ДЛЯ ЖУРНАЛА «РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ТЕТРАДИ»

1. Текст статьи готовится в редакторе Winword версии не ниже 2000. Текст набирается шрифтом Times New Roman Cir размером 10 пунктов в 2 колонки, ширина колонки 8,1 см. пробел между колонками 0,8 см. Размеры листа 21x29,7см. Все латинские буквы (кроме названий функций, имен векторов и матриц, химических формул и списка литературы) набираются курсивом шрифтом размером 10 пунктов. Все поля – 2 см. Параметры абзаца: межстрочный интервал одинарный, 1-я строка абзаца с отступом 0,75 см, выравнивание, автоматический перенос слов. В заголовке - ученая степень, ученое звание, фамилия и инициалы авторов - шрифт 12 курсив, жирный. Ниже - название статьи – шрифт 14 жирный.

2. Текст статьи представляется в виде файла с именем - фамилия первого автора.doc – например, Иванов.doc. Файл, направляемый по электронной почте, можно заархивировать (желательно использовать архиватор zip). Не следует использовать самораскрывающиеся архивы, поскольку антивирусные системы на почтовом сервере блокируют исполняемые файлы (*.exe, *.com). Принимаются также исходные (неархивированные) файлы с расширениями doc.

3. В текст вставляются рисунки (фото) и таблицы в форматах bmp, jpg только в чернобелом виде. Подрисуночные подписи не включаются в поле рисунка, а включаются в текст статьи. Рисунки должны быть сгруппированы. В рисунках не использовать тонкие линии, которые при типографской печати не пропечатываются. Номера и названия таблиц – над таблицей. Фотографии – только цифровые и должны иметь высокое разрешение, поскольку при типографской печати качество фотографий ухудшается, что авторы должны учитывать.

4. Математические формулы набирать в EQUATION или MATHTYPE. Не пользоваться старыми версиями этих программ. Номера формул и ссылок на них в тексте – в круглых скобках (1), (2)….

5. При подготовке рисунков, таблиц и формул учитывайте, что ширина поля печати в каждой колонке равна 8,1 см, а общая ширина печатного поля 17 см. Большие рисунки и таблицы с подписями допускается форматировать в одну колонку шириной 17 см.

6. Желательно разбить текст на разделы с подзаголовками (разделы не нумеровать!), шрифт 10 строчный жирный в конце статьи - **Выводы** или **Заключение**.

7. Ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках последовательно, по возрастающему порядку номеров в списке литературы [1], [2]…,. Раздел **Литература** размещается в конце текста и должен полностью соответствовать ГОСТ, инициалы авторов – после фамилии. Перед названием серийных изданий (журналов) ставится знак //. и указываются год издания, № (выпуск) и номера страниц. Образцы см. ниже.

8. На всех листах должен быть нижний колонтитул (см. образец ниже).

9. К статье прилагается реферат в 2-4 фразы в прошедшем законченном времени – (показано, получено…) с заголовком статьи и ф.и.о. авторов, в конце указывается число иллюстраций, таблиц, ссылок на литературу, например – Илл. 5., Табл. 2. Библ. 6.

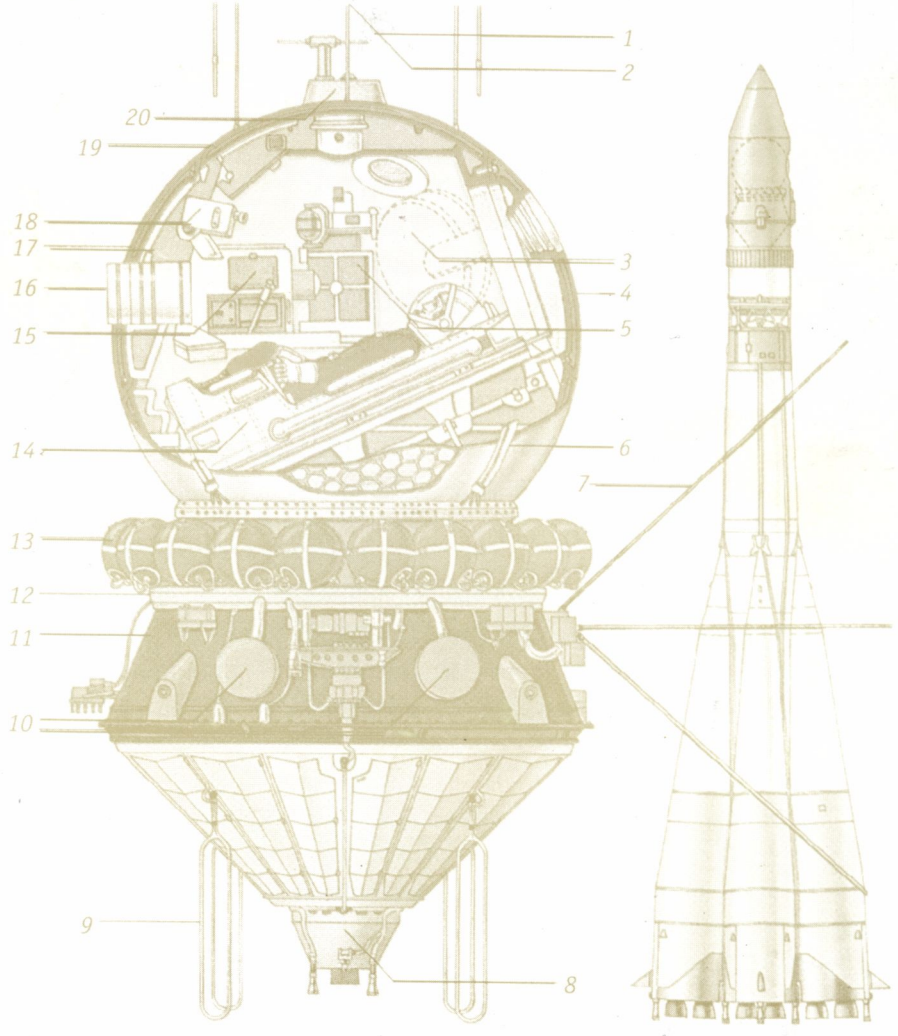
Литература

1. **Справочник** по проектированию систем передачи информации в энергетике / Агафонов С.С., Жучков Б.А., Ишкин В.Х.,. Цитвер И.И. /Под ред. В.Х. Ишкина. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

2. **Кутепов В.П.,** Фальк В.Н. Функциональные системы //Кибернетика. 1979, № 1. С. 17–22.

50-летие полёта первого космонавта Юрия Алексеевича Гагарина 12 апреля 1961 года

Космический корабль «Восток»



Первый в мире космический пилотируемый корабль «Восток», ракета-носитель «Восток»
1 – антенна системы командной радиолинии, 2 – антенна радиосвязи, 3 – кожух электроразъемов, 4 – входной люк, 5 – контейнер с пищей, 6 – стяжные ленты, 7 – ленточные антенны, 8 – тормозной двигатель, 9 – антенны связи, 10 – служебные люки, 11 – приборный отсек, 12 – проводка зажигания, 13 – газовые баллоны системы жизнеобеспечения (16 шт.), 14 – катапультируемое кресло, 15 – радиоантенна, 16 – иллюминатор, 17 – технологический люк, 18 – телевизионная камера, 19 – теплозащита, 20 – блок электронной аппаратуры