

Г. В. Абраменко, А. Ю. Краснощеков,
Е. Б. Казанцева, М. Г. Фабричный

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ТЕХНИЧЕСКИЙ ОБЛИК СРЕДСТВ ТОЧНОЙ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ



Москва 1995

Г.В. Абраменко, А.Ю. Краснощеков,
Е.Б. Казанцева, М.Г. Фабричный

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ТЕХНИЧЕСКИЙ ОБЛИК СРЕДСТВ ТОЧНОЙ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ

*Под редакцией члена-корреспондента РАН
Ю.И. КРАСНОЩЕКОВА*

Москва 1995

Главы 1, 2, 3 и § 4.7, 5.4, 5.5 написаны совместно Г.В. Абраменко и А.Ю. Краснощековым, § 4.1 – 4.6 – Е.Б. Казанцевой, § 5.1 – 5.3 – М.Г. Фабричным.

Абраменко Г.В., Краснощеков А.Ю., Казанцева Е.Б., Фабричный М.Г.

Системный анализ и технический облик средств точной доставки грузов. – М.: ЦНИИНТИКПК, 1995. – 150 с.: ил.

В книге рассматривается применение системного анализа к проектированию сложных технических систем на примере самонаводящейся парашютной системы по доставке грузов в труднодоступные районы. Приводятся математические модели, номограммы, графики для расчета параметров как технического облика всей системы, так и составляющих ее подсистем, система критериев, примеры расчета параметров подсистем и полунатурное моделирование системы.

Основным отличием задач, решаемых в книге, от задач, освещаемых в аналогичных изданиях, является построение процедуры выбора параметров технического облика системы исходя из ее заданной конечной эффективности.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современного мирового сообщества людей, использование ими все более сложных и «умных» аппаратов и машин наряду с существенным улучшением условий жизни нередко приводит к катастрофическим результатам. Несмотря на принимаемые меры по обеспечению надежности применяемых человеком техники и технологий, в последние годы участились аварии, ущерб от которых иногда принимает глобальный характер. Это – аварии на атомных электростанциях, кораблекрушения, авиационные и железнодорожные катастрофы и т.д. В большинстве случаев человек, сталкиваясь с такими авариями, подчас не в силах обеспечить спасение даже уцелевших людей.

Применение традиционных средств (самолетов, вертолетов) для доставки грузов, медикаментов, шлюпок и т.п. не всегда оказывается эффективным из-за отсутствия управления грузами на конечном участке, т.е. в районе бедствия. Неблагоприятные погодные условия затрудняют решение перечисленных задач. К тому же применение традиционных средств имеет ряд ограничений: необходимость наличия больших площадей в районе сброса грузов, благоприятных погодных условий, возможности выброса пробного груза или человека-оператора для корректировки сброса и др.

Опыт создания высокоточных систем в нашей стране и за рубежом (например, в области военной техники, гражданской авиации и вертолетов) показывает, что доставка грузов как в перечисленных выше ситуациях, так и в труднодоступные районы (например, полярникам в районы зимовок, геологам в тайге) может осуществляться автономно, днем и ночью, в любую погоду.

Разработка высокоточных самонаводящихся систем доставки грузов представляет собой решение нетрадиционной задачи и требует специального методического аппарата, основанного на использовании системного подхода к проектированию сложных технических объектов.

В отличие от большинства традиционных постановок задач, предусматривающих разработку отдельных подсистем комплекса (сложной технической системы – СТС) эвристическими методами с последующим расчетом эффективности СТС, предлагается разработку технического облика решения задачи в целом проводить от заданного значения эффективности выполнения задачи к вычислению технических характеристик отдельных подсистем рассматриваемого комплекса.

Учет системных связей не всегда приводит к однозначному решению, однако в любом случае ряд полученных решений должен быть дискретным по техническим характеристикам, а число членов ряда – конечным. Следовательно, результатом исследований должен быть конечный и дискретный ряд множеств требований к техническим характеристикам подсистем комплекса, при выполнении которых заданная эффективность СТС будет обеспечена. Решение задачи в такой постановке возможно при разработке частных и обобщенных критериев оценки СТС и оптимизации параметров отдельных подсистем комплекса с доказательством непротиворечивости каждого используемого критерия общему критерию эффективности.

Новизна описываемого подхода заключается в том, что предлагается количественный метод выбора характеристик технического облика СТС и интегральных характеристик отдельных ее подсистем, заключающийся в определении оптимальных, с точки зрения технического уровня, параметров подсистем СТС таким образом, чтобы выполнялся наперед заданный общий критерий эффективности.

Такой подход должен включать в себя:

- метод анализа сложной технической системы для выявления функциональных и структурных связей подсистем в целях дальнейшей оптимизации параметров, обуславливающих данные связи;

- методики оценки параметров технического облика СТС и их выбора, позволяющие сравнивать различные варианты комплекса по обобщенным показателям без расчета эффективности применения СТС;

- математические модели оптимизации интегральных характеристик подсистем СТС;

- математические модели оценки эффективности СТС;

- математическую модель сведения Парето-неоптимизируемых систем к одному показателю (комплексному показателю технического облика системы), определяемому множеством характеристик системы.

Анализ литературы, посвященной вопросам, связанным с изложенным выше подходом к проектированию СТС, выявил наличие большого числа трудов по анализу систем, системотехнике и теории прогнозирования [1–5]. Специфика данных научных направлений заключается в том, что их положения носят общеметодологический характер и предусматривают проведение отдельных исследований в каждом конкретном случае. В работах [5, 6] приводятся общие рекомендации по выбору технического облика сложных систем. Положения, приводимые в работах [7, 8], необходимы в основном для выбора частных и обобщенных показателей технического облика системы в части внешней компоновки изделий (например, пассажирских самолетов и других средств).

На рис. В.1 представлена методология определения перспектив развития СТС, на рис. В.2 – технология исследований. Из рисунков видно, что методы теории эффективности используются для выделения из пространства параметров системы областей равной эффективности и определения диапазонов оптимизации характеристик СТС. С помощью методов системного анализа из полученных областей выделяется конеч-

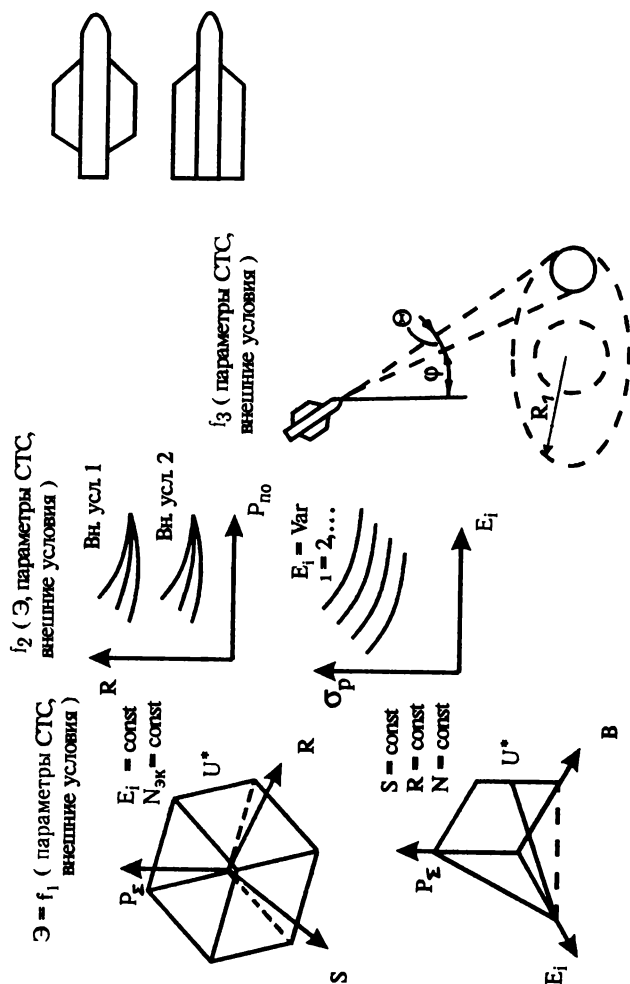
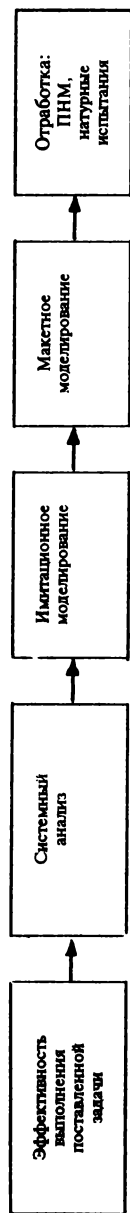


Рис. В.1. Методология определения перспектив развития СТС:

(P_{Σ} – суммарная вероятность СТС; S – стоимость; E_i , B – точностные параметры; N – число грузов; U^* – эффективность выполнения поставленной задачи; R – радиус зоны обзора информационного блока; φ – угол обзора)

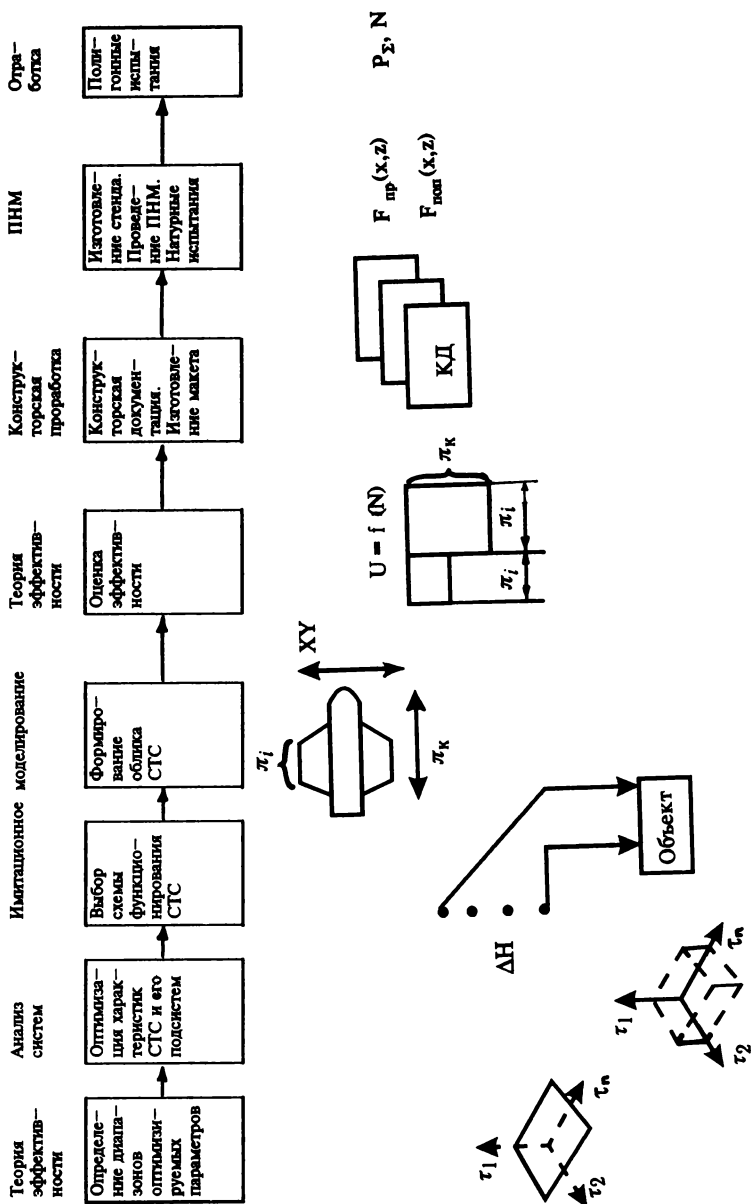


Рис. В. 2. Технология исследований

($\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ – тактические параметры СТС; π_i – проектные параметры СТС; $U = f(N)$ – функциональная зависимость степени выполнения задачи от числа СТС; $F_{пр}(x, z)$ – закон распределения точек наведения СТС; $F_{пол}(x, z)$ – закон распределения точек попадания СТС; P_{Σ} – вероятность попадания в мак при условии его нахождения в зоне обзора ИБ СТС; N – число СТС, необходимых для выполнения поставленной задачи; ΔH – высота начала функционирования СТС)

ное множество оптимальных точек, и тем самым определяются характеристики СТС и их подсистем. В методологии гармонично связаны аналитические методы, полунатурное и математическое моделирование, а также натурные испытания.

Применение системного подхода позволяет решить задачу оптимизации параметров подсистем комплекса с точки зрения выполнения заданной целевой задачи с учетом свойства целостности комплекса как многоуровневой сложной системы. Под целостностью понимается то, что свойства системы не всегда следуют из свойств ее отдельных подсистем, так как изменение параметров одной из подсистем может привести к изменению соотношений между остальными подсистемами.

Из всего многообразия СТС ниже в качестве основной системы описывается самонаводящаяся парашютная система (СПС) для доставки грузов в труднодоступные районы. В связи с этим в тексте будет использоваться обозначение СТС – в случаях, когда методология может применяться в общем случае, для любого класса систем, а СПС – в случаях, когда описывается специфический для данной системы вопрос [9, 10].

Рассмотрим подробнее принципы построения СПС. СПС представляет собой совокупность подсистем: информационный блок обнаружения, бортовую вычислительную систему, систему управления (СУ) и блок воздействия на маяк.

Схема способа доставки описывается следующим образом: носитель (самолет и т.п.) доставляет СПС в район расположения маяков и на высоте H сбрасывает платформы. С помощью информационного блока (ИБ) производится обнаружение маяков, расположенных в районе посадки (приземления) груза. В СПС используются различные виды ИБ, работающих в инфракрасном, миллиметровом или видимом диапазонах длин волн.

Метод управления СУ (пропорционального наведения, параллельного сближения, погони и т.д.) может быть реализован различными способами, например, подтягиванием строп парашюта.

При выборе характеристик подсистем на этапе предэскизного проектирования можно оценить взаимозависимость характеристик подсистем и их влияние на выполнение целевой задачи. Оптимизация в этом случае проводится по критерию

$$\begin{aligned} |W - W(a_{ij})| &\rightarrow \min, & i = \overline{1, n}, \\ \{a_{ij}\} &\in A, & j = \overline{1, m}, \end{aligned}$$

где A – область допустимых значений a_{ij} , определенная на этапе конструирования подсистем; $W(a_{ij})$ – эффективность функционирования СТС; W – эталонная эффективность, определенная на высшем уровне иерархии СТС, исходя из заданной эффективности выполнения задачи.

На рис. В.3–В.6 показаны схема доставки грузов, возможные районы применения, возможные виды маяков и схемы функционирования СПС и возможные схемы обнаружения маяков. Самонаводящаяся парашютная система для точной и оперативной доставки грузов в заданные

точки труднодоступных районов и районы чрезвычайных ситуаций является сложной технической системой, включающей средства:

- доставки (самолеты, вертолеты);
- десантирования и стабилизации в пространстве;
- поиска и обнаружения маяков;
- наведения на выбранный маяк.

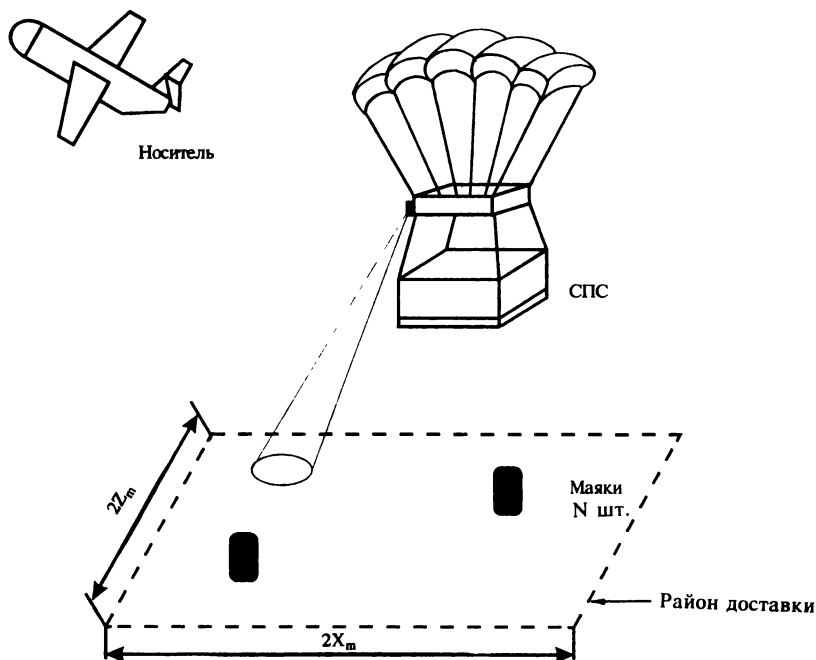


Рис. В.3. Схема способов доставки грузов
($N_{шт}$ – число маяков в районе посадки СПС; $2X_m \times 2Z_m$ – размеры района посадки)

Объединение различных средств, являющихся, в свою очередь, СТС в соответствующей области науки и техники (авиации, электроники, систем управления, парашютирования, аэродинамики и т.д.), требует применения качественно новых принципов проектирования.

Методология проектирования СТС, описанная в данной книге на примере СПС, может быть распространена на любые виды сложных систем с учетом специфики их функционирования.

Основными отправными предпосылками для построения такой методологии явились исследования профессоров А.В. Ильичева, В.И. Грущанского и других ученых, подробно изложенные в работах [7, 8, 11].

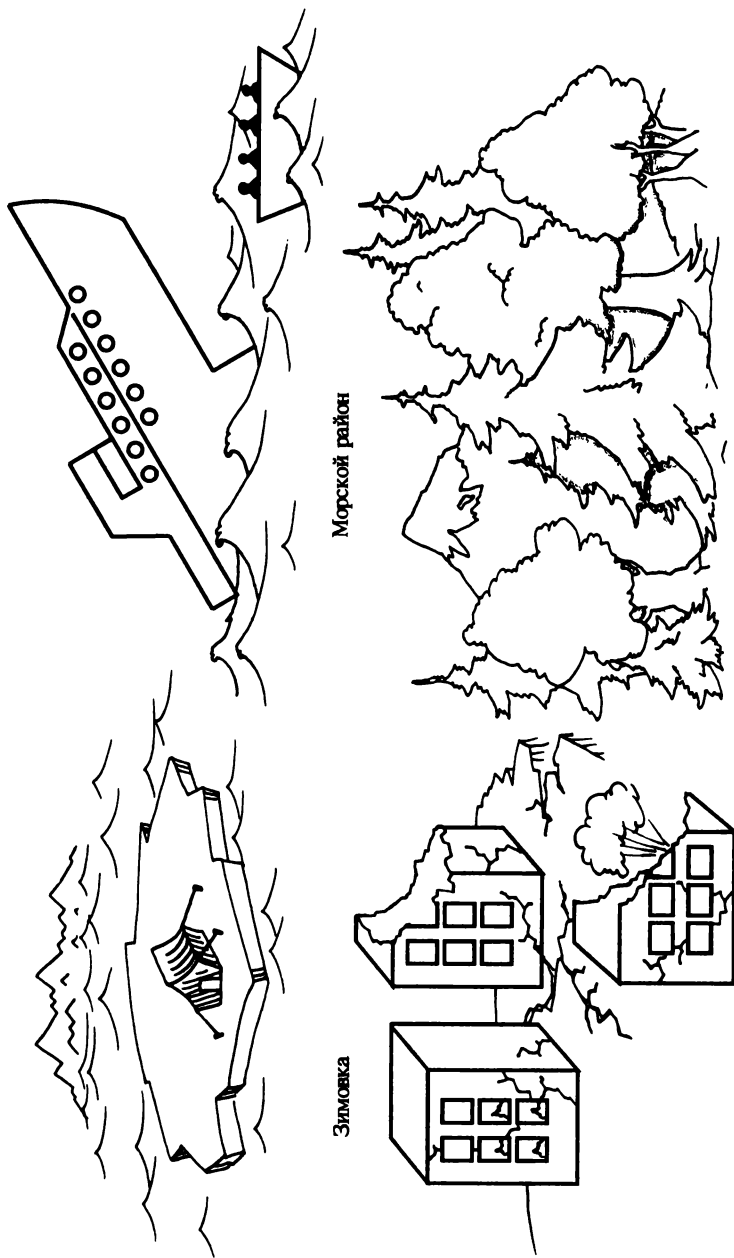
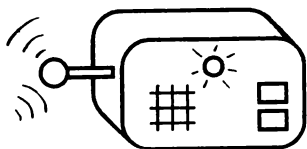


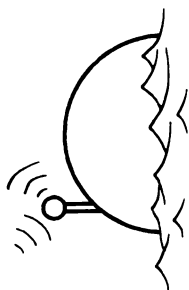
Рис. В. 4. Возможные районы применения СРП



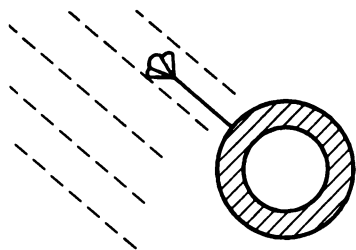
Костер, бочка



Штатный радиомаяк



Буй



Радиомаяк обрасываемый

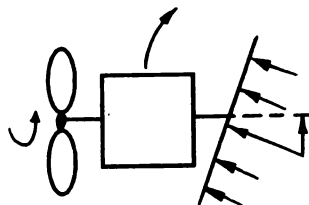
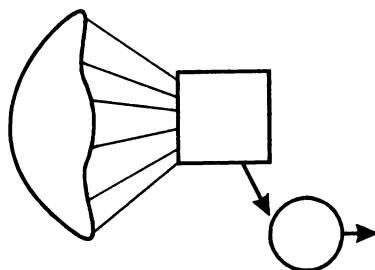
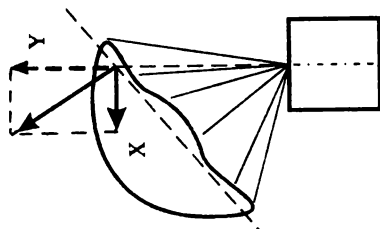


Рис. В. 5. Виды маяков и методы управления СПС

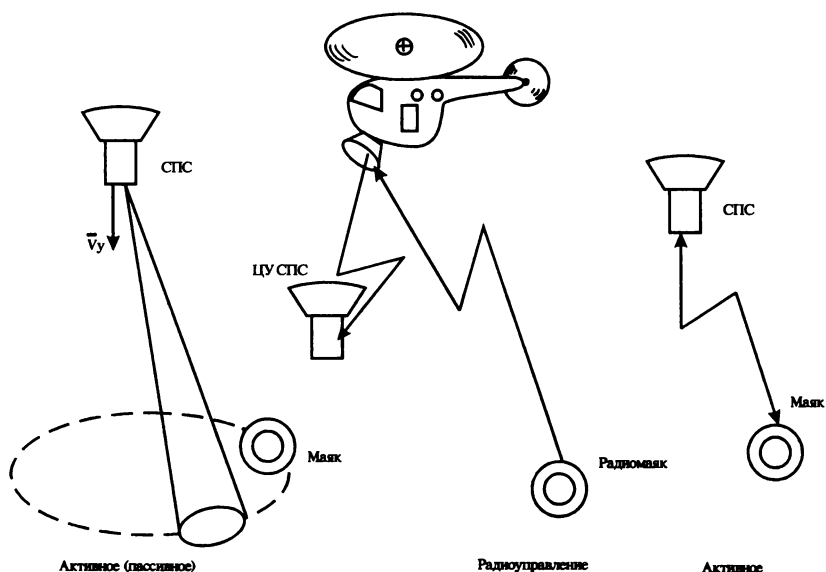


Рис. В.6. Возможные схемы обнаружения маяков
(V_y – скорость спуска; ЦУ – целеуказание)

Развитие данной методологии проводилось на более низкой ступени иерархии теории проектирования, но с более углубленной детализацией отдельных вопросов.

* * *

Авторы признательны инженеру-программисту Л.Г. Красиковой и лаборанту Н.Н. Сиренко за помощь в оформлении книги.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АВМ - аналоговая вычислительная машина
АМУС - агрегатированные металлические ультрадисперсные структуры
АОД - акустооптический дефлектор
АСОТО - автоматизированная система оценки технического облика
АСОПР - автоматизированная система обlikового проектирования
АШП - аналого-цифровой преобразователь
АШПУ - алфавитно-цифровое печатающее устройство
БВС - бортовая вычислительная система
БД - база данных
БК - блок кассет
ГСН - головка самонаведения
ДИЗ - директивы задач
ДИУ - директивы управления
ЖК - жидкий кристалл
ЗО - зона обзора
ИБ - информационный блок
ИФО - имитатор фоновой обстановки
КПНМ - комплекс полунатурного моделирования
КПТО - комплексный показатель технического облика
МГХ - массо-габаритные характеристики
МО - математическое ожидание
МОП - математическое ожидание потерь
ОЭС - оптико-электронные системы
ПВМИ - пространственно-временной модулятор излучения
ПГМ - полунатурное моделирование
ПГМ - пакет программ моделирования
ППП - пакет прикладных программ
ПЭВМ - персональная электронно-вычислительная машина
РЛС - радиолокационная станция
РФ - район функционирования
СКО - среднеквадратическое отклонение
СПС - самонаводящаяся парашютная система
СТС - сложная техническая система
СУ - система управления
ТеР - техническое решение
ТО - технический облик
УСО - устройство сопряжения с объектом
ЦАП - цифроаналоговый преобразователь
ФО - фоновая обстановка
ЭВМ - электронно-вычислительная машина
ЭЛТ - электронно-лучевая трубка

Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

1.1. Технический облик СТС. Параметры и их оценка. Пути развития СТС

Необходимость разработки и актуальность задачи определения путей развития СТС обусловлены следующими причинами:

возрастанием сложности и расширением перечня задач, стоящих перед современными СТС;

все большим удорожанием технологии создания СТС;

повышением уровня технических характеристик и расширением области применения СТС;

значительным увеличением количества технических решений СТС, предлагаемых для проектирования и полученных экспертным путем, и др.

В связи с этим для полноты и однозначности оценки надежности и эффективности СТС и определения путей их развития необходимо СТС представлять в виде некоторого множества функциональных и структурных связей с целевым назначением, определяемым поставленными перед СТС задачами. Такая постановка, в отличие от принятых способов проектирования, требует использования нетрадиционных методов и введения следующей дополнительной терминологии.

Этап задачи – условно выделяемая часть всей задачи, выполняемая одной из подсистем СТС и направленная на решение промежуточной задачи, обусловленной целевым назначением данной подсистемы [8].

Иерархический уровень СТС – комплекс элементов i -й подсистемы, объединенных либо функциональными, либо функциональными и структурными связями для выполнения i -го этапа задачи.

Реакция – выходная характеристика одного или нескольких иерархических уровней, не рассматриваемых при проектировании i -й подсистемы, но оказывающих влияние на ее функционирование.

Проектные параметры $\{\pi_i\}$ – совокупность технических характеристик, исчерпывающе и однозначно описывающих проектируемую i -ю подсистему СТС.

Тактические параметры $\{\tau_i\}$ – совокупность характеристик, непосредственно определяющих эффективность i -й подсистемы и отражаемых в математической модели всей задачи.

Технический облик СТС – совокупность ее рациональных количественных характеристик, определяемых типом и составом входящих подсистем [12]. Возможность построения альтернативных обликов, определяющих эффективность, надежность и пути развития СТС, обеспечивается заданием множества подсистем, которые могут (или должны) реализовать различные функции СТС.

Техническое решение СТС – конкретная реализация системы (для заданных ограничений, условий применения и целевого назначения), обладающей совокупностью проектных и тактических параметров, однозначно определяющих эффективность СТС и ее ТО.

Общий показатель эффективности – степень выполнения задачи в целом.

Частный показатель эффективности – степень выполнения задач отдельных этапов.

Обобщенный показатель эффективности – отдельные стороны выполнения всей задачи или эффективность нескольких ее этапов.

Оценка технического решения – определение множества частных и обобщенных показателей эффективности сложной системы (при известном общем показателе), достаточного для выдачи рекомендации о необходимости дальнейшего усовершенствования изделия в целом и доработки отдельных его подсистем.

Под рациональными решениями будем понимать результаты решения оптимизационных задач, в общем случае многокритериальных, полученные с некоторой неопределенной ошибкой или неточностью, обусловленной:

компромиссным по существу подходом к решению многокритериальных задач любым методом, когда практически невозможно исключить влияние субъективных факторов (например, при формировании системы ограничений);

локальным по отношению к системам более высокого уровня иерархии характером принятого в данной оптимизационной задаче характеристического критерия;

неполным соответствием используемой оптимизационной модели реальному процессу;

неполным знанием характеристик (свойств) всех взаимодействующих подсистем и их взаимного влияния на уровнях, выходящих за границы исследуемой системы;

наличием ряда возмущающих факторов с неопределенными законами распределения вероятностей;

конфликтностью ситуации, сложностью адекватного моделирования существенных факторов, связанных с «тактикой» действия противника, включая «поведение» объекта.

Рациональными характеристиками будем называть такие, которые получены или обоснованы в результате решения соответствующих оптимизационных задач.

Рациональный вариант системы – это наилучший в смысле выбранного критерия вариант среди конечного набора рассматриваемых альтернатив, отвечающий всем условиям, описанным с помощью системы ограничений.

Решение задач оценки надежности, эффективности и определения рациональных характеристик СТС на предварительных этапах проектирования обладает спецификой, обусловленной неопределенностью параметров проектируемой системы, направленностью исследований на поиск рациональных вариантов, неоднозначностью возможных решений задачи и т.п. В связи с этим в последние годы в стране и за рубежом наблюдается тенденция к проектированию и определению путей развития сложных систем методами решения так называемых «обратных» задач.

При этом предполагается, что исходными данными являются эффективность системы, условия ее применения и задача, стоящая перед системой. При данном подходе одним из методов решения указанной задачи является многократный расчет эффективности СТС по полной статистической модели в целях получения табличных или графических зависимостей между тактическими параметрами системы, при которых общий показатель ее эффективности удовлетворяет исходным требованиям. При высокой точности расчетов и привлечении высокоэффективных вычислительных средств к недостаткам данного метода можно отнести отсутствие оптимизации тактических параметров системы, невозможность учета структурных связей между ее подсистемами и, как следствие, бесконечное множество решений задачи и трудности в обосновании путей развития систем данного класса.

Ниже рассматривается приближенный метод решения «обратной» задачи, основанный на оптимизации проектных и тактических параметров СТС. Достоинством такого подхода является получение конечного и дискретного ряда вариантов СТС, каждый из которых имеет оптимальные (по выбранным критериям) проектные и тактические параметры и удовлетворяет исходным требованиям по эффективности. Введение обоснованного дискретного ряда альтернатив дает возможность их ранжировать по обобщенным показателям (так как общие показатели эффективности у всех вариантов примерно равны) в целях определения вариантов для дальнейшей реализации.

На рис. 1.1 приведена обобщенная схема подхода.

Таким образом, для оценки надежности, эффективности функционирования и определения технических характеристик сложной системы в общем случае согласно работам [7, 12] должны быть сформированы:

- целевое назначение, т.е. основная задача, стоящая перед системой;
- критерий выполнения целевого назначения, сформированный на основе показателей, зависящих от параметров системы;
- перечень существующих или разрабатываемых систем, которые принципиально могут выполнить поставленную задачу.

Целевым назначением СПС является их доставка в заданный район функционирования и воздействие на сосредоточенные там объекты. В данном случае общим показателем функционирования системы является математическое ожидание числа объектов, на которые осуществляется воздействие, в зависимости от исходного множества средств доставки, характеристик СПС и параметров района функционирования (равнина, водная поверхность, горы, город и т. п.).

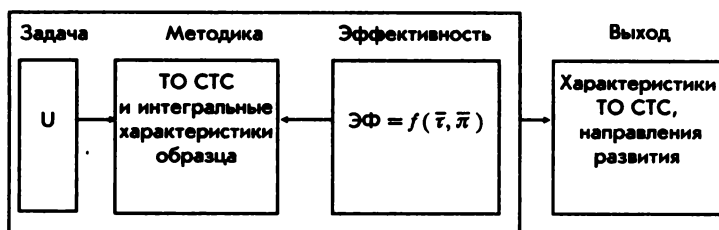


Рис. 1.1. Обобщенная схема подхода
($\bar{\tau}$ – тактические параметры СТС; $\bar{\pi}$ – проектные параметры СТС)

Исходя из основной задачи необходимо решить следующие вопросы:

1. Для заданных точности систем доставки и диапазона неопределенности характеристик района функционирования определить:

а) рациональные проектные и тактические параметры СПС как сложной системы. Такими параметрами являются вектор скорости образца и характеристики закона рассеивания образцов в пространстве на момент начала поиска района функционирования, компоновка средств доставки образцами, габаритные размеры системы вскрытия;

б) проектные тактические параметры и характеристики образца как моносистемы: масса, габаритные размеры, размеры зоны обзора местности (при наличии соответствующих датчиков), суммарная вероятность попадания и т.д.

2. Для заданных диапазонов характеристик различных классов образцов и характеристик района функционирования, а также для известной точности доставки определить оптимальный закон рассеивания образцов.

3. Провести оптимизацию параметров подсистем СПС в соответствии с общим критерием.

Первым шагом для решения поставленных задач является анализ СПС как сложной системы с детальной квантификацией подсистем, вариация параметров которых является наименее проблематичной с точки зрения технической реализации. При таком представлении собственно средства доставки представляются в виде только одной реакции (т.е. точности доставки), оказывающей непосредственное влияние на выполнение целевого назначения СПС. Это означает, что параметры средств доставки считаются неизменными.

Для использования методов анализа систем необходимо формирование частных и обобщенных показателей степени выполнения подсистемами их целевого назначения. Таким показателем является, например, значимость [2, 8] множества проектных и тактических параметров подсистемы для выполнения задачи в целом. В целях формирования таких показателей ниже вводится понятие вклада подсистемы в конечный результат функционирования СПС.

Для определения ТО СТС в соответствии с общими принципами теории прогнозирования [12] необходимо сформировать:

перечень задач $\{Z_i\}$, решаемых подсистемами СТС;

перечень функций $\{F_i\}$, обеспечивающих выполнение задач; в данном случае F_i есть зависимость показателя эффективности i -й подсистемы от ее параметров;

перечень подсистем $\{S_i\}$, реализующих данные функции: $i = \overline{1, n}$, где n – число подсистем сложной системы, полученное в результате анализа.

Каждый из указанных перечней имеет иерархическую структуру, причем одинаковые уровни иерархии всех трех перечней соответствуют друг другу.

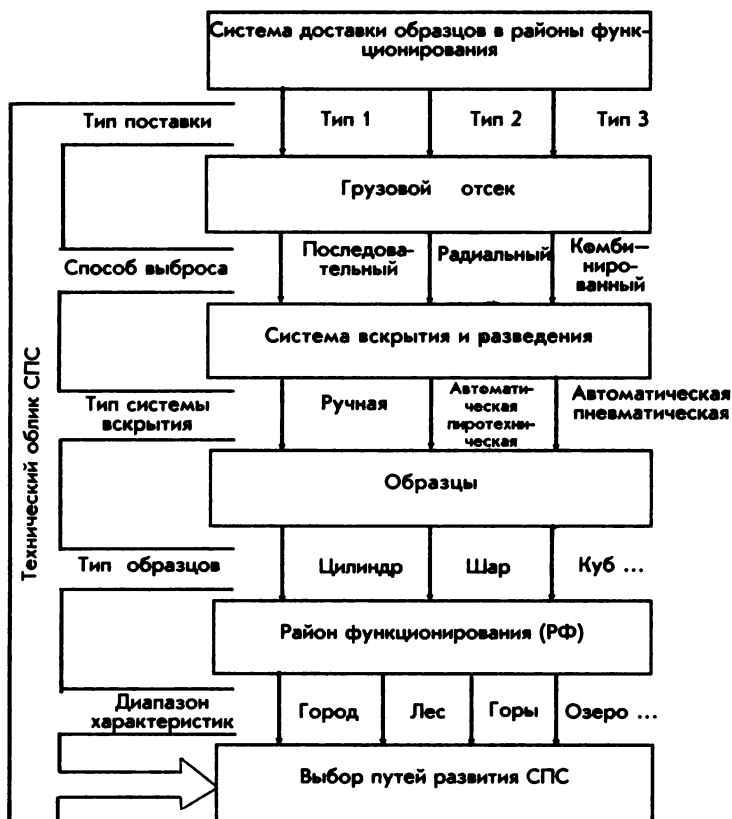


Рис. 1.2. Схема выбора путей развития СПС

На рис. 1.2 приведена возможная схема путей развития СПС. Под РФ понимается множество характеристик района, причем значения характеристик в общем случае неизвестны, а определен лишь возможный их диапазон:

размеры площади РФ – $X_m < X < X_m$, – $Z_m < Z < Z_m$;

число отдельных маяков $m_0 < m < m_m$;

распределение отдельных маяков – по равномерному закону на площади $2X_m \times 2Z_m$ или детерминированно;

относительная скорость «образец – маяк»;

размеры отдельного объекта X_1, Z_1 .

Оси целевой системы координат $O_m X_m Z_m$ параллельны осям системы доставки грузов. В силу того что $X_1 \ll X_m, Z_1 \ll Z_m$, единичные маяки можно считать точечными.

В табл. 1.1 представлена иерархическая структура задач, функций и обеспечивающих подсистем (существующих или предполагаемых к разработке) в соответствии с принятой разбивкой. Представим процесс выполнения задачи в виде последовательности этапов, на каждом из которых подсистема или совокупность подсистем СПС решает промежуточную задачу в целях реализации основной функции системы.

Последовательное изображение множества $\{3_i\}$ в $\{\Phi_i\}$ и $\{S_i\}$ представляет собой выбор ТО. Исходными данными для выбора ТО являются множество $\{3_i\}$, характеристики РФ и перечень проектных и тактических параметров $\{\pi_{ij}\}$ и $\{\tau_{ij}\}$, характеризующих каждый из элементов множества $\{S_i\}$; $i = 1, 5$ (табл. 1.1), $j = 1, q$, где q – число параметров, характеризующих i -ю подсистему.

В работах [1, 2, 7, 8] показано, что решение задачи выбора ТО методом непосредственного расчета общего показателя эффективности множества вариантов системы не всегда представляется возможным. Наиболее предпочтительным методом решения подобных задач является оптимизация параметров системы по частным и обобщенным критериям. В качестве показателей эффективности выполнения отдельных этапов задачи данные критерии обычно используют значимость или «вклад» i -й подсистемы СТС в общий результат выполнения задачи – $U_i \{\tau_{ij}\}$.

Для формирования частных и обобщенных показателей необходимо проведение анализа множества $\{\Phi_i \{\tau_{ij}\}\}$. В результате такого анализа формируется однозначное соответствие $\Phi_i \{\tau_{ij}\} - U_i \{\tau_{ij}\}$ для всех этапов выполнения задачи ($i = 1, n$). Кроме того, необходимо обоснование правомочности сравнения систем по выбранным показателям для заданного диапазона неопределенности характеристик РФ. Минимальные значения обобщенных показателей эффективности функционирования подсистем в общем результате решения задачи определяются путем оптимизации тактических параметров подсистем $\{\tau_{ij}\}$.

Использование предлагаемого подхода может существенно облегчить процессы поиска и обоснования путей развития СПС, оценки эффективности и надежности разрабатываемых технических решений касетных элементов.

Для максимального сокращения времени исследования, возможности дополнения множества $\{S_i\}$ вновь созданными подсистемами, учета нетрадиционных элементов в множествах $\{S_i\}$ и $\{\Phi_i\}$ и т. п. процесс выбора путей развития системы должен быть максимально автоматизирован.

Иерархическая структура задач

Номер этапа	Этап задачи {З ₁ }	Реализуемая функция Ф ₁ , тактические параметры τ _{1j}	Подсистема S ₁ , проектные параметры π _{1j}
1	Получение информации об объекте {З ₁ }	Ф₁: τ₁₁ = σ_{мх} = σ_{мz} = σ_м – точность носителя; ошибки доставки распределены по нормальному закону τ₁₂ = U_м – скорость маяка τ₁₃ = φ_м – угол направления движения маяка τ₁₄ = l_м – число точек прицеливания τ₁₅ = t_м – время установления информации	Средства доставки (учитываются в реакции средств доставки): S ₁
2	Доставка кассет к району {З ₂ }	Ф₂: τ₂₁ = E_к, E_з – групповые ошибки τ₂₂ = B_к, B_з – кучность	Носители (самолет, вертолет) учитываются в виде реакции средств: S ₂
3	Коррекция кассеты перед вскрытием {З ₃ }	Ф ₃ : τ ₃₁ = Δ – выбираемый промах кассеты относительно точки прицеливания	Система коррекции: S ₃ π ₃₁ = Δ L – длина свободного объема кассеты, отводимая под блок коррекции
4	Вскрытие кассеты и разведение грузов {З ₄ }	Ф₄: τ₄₁ = F_з(x, z) – закон рассеивания грузов на момент начала поиска маяка τ₄₂ = V₀ (V_к, V_к, V_к) – вектор скорости отстрела грузов и ее составляющие по осям естественного трехгранника, связанного с осью кассеты	Система вскрытия и разведения (СВ и Р): S ₄ π ₄₁ = d – диаметр СВ и Р π ₄₂ = l – длина СВ и Р π ₄₃ = N _к π ₄₄ = m – масса СВ и Р
5	Попадание груза в зону действия маяка при условии его нахождения в зоне обзора ИБ груза {З ₅ }	Ф₅: τ₅₁ = R_к – размер зоны обзора по оси ОХ τ₅₂ = R_к – размер зоны обзора по оси ОZ τ₅₃ = P_к – вероятность попадания в маяк попавшего в зону обзора ИБ СПС	Груз: S ₅ π ₅₁ = d – размер по фронту π ₅₂ = l – размер по длине π ₅₃ = m – масса

1.2. Система критериев для оценки и выбора параметров ТО

1.2.1. Общее представление системы критериев

Вопросы определения и выбора критериев эффективности СТС рассматриваются практически в каждой работе, посвященной исследованию и проектированию конкретных изделий (систем, комплексов).

Под критерием эффективности понимается признак, по которому производится сравнительная оценка альтернатив и выбор наилучшей. Характеристика, количественно выражающая степень выполнения системой поставленной задачи и позволяющая судить об эффективности процесса, называется показателем эффективности.

Наиболее подробно критерии эффективности рассмотрены в работе [8], причем, что особенно важно, при сравнении вариантов СТС (или их элементов) предлагается учитывать показатели эффективности W , затраты C и сроки создания системы T .

Исходя из основных принципов выбора критериев эффективности [7, 8], можно построить систему критериев оценки и выбора параметров ТО, которая бы при простоте и наглядности удовлетворяла принципу непротиворечивости частных показателей эффективности общему.

Система критериев (частных, обобщенных, общего) может включать различные критерии: аддитивные, мультипликативные, минимаксные.

Важно, чтобы эта система была увязана со схемой функционирования СТС от постановки задачи до ее выполнения, а также с видом задачи, решаемой на этапе проектирования, – прямой или обратной.

Основная (прямая) задача направлена на выбор параметров проектируемого изделия и выдачу рекомендаций по его использованию. Обратная задача направлена на выбор потребных характеристик (параметров) подсистем СТС и уточнение облика системы.

Задачи и критерии СТС доставки грузов представлены в табл. 1.2, из которой видно триединство задач, критериев и роли исследуемой системы.

На первом уровне СТС выступает как подсистема другой СТС (носитель), на втором уровне СТС рассматривается как самостоятельная, автономная система, на третьем уровне СТС является надсистемой [13] по отношению к соответствующим подсистемам.

Соответственно можно записать $U = f(P_{\Sigma}, R, F, H, \dots)$, причем $P_{\Sigma} = P_0 * P_n * P_{\Pi}$, а $P_0 = f_1(\dots)$ и $P_n = f_2(\dots)$, где P_{Π} – вероятность поиска маяка.

Таким образом, уровень II является конечным результатом – ТО СТС, учитывает параметры ограничений и связи носителя (I-й уровень) и своих подсистем (III уровень).

Из табл. 1.2 можно переписать общий критерий в виде $K_a = -\Delta N_k^I / \Delta N_k^I \approx 1 + \epsilon_v$, где ΔN_k^I – число СПС, приходящихся на конечный этап функционирования (этап посадки), расчетное и требуемое соответственно: ϵ_v – допустимый уровень потерь.

Т а б л и ц а 1.2

Задачи и критерии СТС

Система и уровень	Задачи	Требуемые модели, методики	Критерий эффективности	Количественные показатели	Примечания
Комплекс I	Доставка n СПС на площадь с m маяками	Технический облик кассеты и требования к интегральным характеристикам СПС	U – допустимый уровень потерь СПС; N – число доставленных в район посадки СПС	P_{Σ} – суммарная вероятность R – радиус зоны обзора ИБ, МГХ (d, i, m), $F_{распр}(x, z)$	Уровень СПС – подсистема носителя
СПС II	Посадка i -й СПС на j -й маяк	СПС и требования к подсистемам	Закон распределения	Законы распределения $F_n, F_{обн}$ и массогабаритные размеры (m, l)	СПС как автономная система
СУ III	Выбор промаха с заданной точностью при известных D, R, V, d, l, m	Бортовой контур управления	Вероятность попадания – P_n и закон распределения точек попадания – F_n	$n, T, \dots, V$	СУ как подсистема СПС
ИБ III	Обнаружение и выбор маяка при заданных погодных условиях	Информационный блок	Вероятности обнаружения $P_{обн}$, ложных тревог $P_{лт}$ и закон распределения точек сбрасывания ИБ по маяку F_n	Диапазон длин волн, МГХ	ИБ как подсистема СПС

Правомочность критерия, согласно работе [8], вытекает из следующего: если для произвольной функции вида $N = N(\{\tau_j\}_i, \{\pi_j\}_i, \{C_e\}) = f[\varphi_j(\{\tau_j\}_i, \{\pi_j\}_i, \{C_e\}), \psi(K_i(\{\tau_j\}_i, \{\pi_j\}_i))]$ выполняется условие $\partial N_i / \partial \psi_i > 0 \cap \frac{\partial \psi_i}{\partial K_i} < 0$, критерий $K_i(\{\tau_j\}_i, \{\pi_j\}_i) = \max$.

Как показывает опыт проектирования СТС различного вида, помимо указанной системы критериев обычно требуются различные частные критерии оценки как конкретных технических решений, так и отдельных подэтапов функционирования СТС.

Для полноты картины рассмотрим также отдельные частные критерии качества и эффективности функционирования СТС.

1.2.2. Критерии качества функционирования системы *

В зависимости от постановки задачи и описания математической модели СТС критерии качества разделяются на детерминированные, вероятностные, минимаксные.

Детерминированные критерии соответствуют детерминированной модели, вероятностные – стохастическому описанию, минимаксные – описанию системы с учетом априорной неопределенности о ее характеристиках и условиях применения.

Общий показатель эффективности СТС K_0 должен характеризовать выполнение системой поставленной задачи.

В детерминированной постановке K_0 принимает два значения: $K_0 = 1$, если задача выполнена, и $K_0 = 0$, если задача не выполнена. В вероятностной постановке $K_0 = P_0$ – вероятность выполнения поставленной задачи, в минимаксной $K_0 = \min P_0$ – минимальное по характеристикам априорной неопределенности значение вероятности выполнения поставленной задачи.

В дальнейшем минимаксные критерии отдельно не рассматриваем. Они могут быть получены аналогичным образом из вероятностных или детерминированных.

Критерии, характеризующие отдельные подсистемы, могут рассматриваться как частные в общей системе критериев и общие для отдельных подсистем. К таким относятся критерии, характеризующие эффективность целеуказания и носителя, доставляющего СПС в заданный район.

К общим критериям эффективности СПС можно отнести вероятность выполнения поставленной задачи одним СПС, а также математическое ожидание m , СКО, закон распределения $f(x)$ – необходимого числа СПС для выполнения поставленной задачи.

Для одной СПС к общим критериям можно отнести вероятность попадания в объект, условную вероятность выполнения задачи при попадании в объект. К частным критериям следует отнести вероятности выполнения частных задач на различных этапах функционирования СПС: неуправляемое и управляемое движение, поиск, обнаружение и слежение за маяком.

* Подраздел написан по материалам профессора д.т.н. А.С. Шалыгина.

При решении частных задач маяк следует рассматривать как точечный, так и как протяженный объект, расположенный на фоне естественных помех. В общей постановке в качестве объекта следует рассматривать многокомпонентную систему при действии естественных помех.

Основными траекторными критериями характеризующими движение СТС в динамике, являются значения перегрузок n (n_y, n_z), зоны достижимости ($\Delta X = X_{\max} - X_{\min}$; $\Delta Z = Z_{\max} - Z_{\min}$), показатели точности: промах и его законы распределения, вероятность попадания в заданную область, коэффициенты чувствительности (частные производные) этих показателей к варьируемым параметрам системы.

К критериям информационного блока относятся: вероятность попадания $R_{пз}$ в поле зрения маяка, вероятность ложного срабатывания по фону $R_{лс}$, вероятность правильного обнаружения $R_{по}$, вероятность ложной тревоги $R_{лт}$, вероятность устойчивого слежения R_y и вероятность срыва слежения R_c на заданном расстоянии до маяка.

Решающий критерий характеризуется вероятностью правильного решения $R_{пр}$ и вероятностями ошибок первого и второго рода $L1$ и $L2$.

Критерии эффективности можно представить в виде функциональных зависимостей от параметров СТС, параметров, характеризующих условия функционирования системы $\{I\}$, параметров метеоусловий и внешней обстановки $\{b\}$.

Численные значения критериев эффективности СТС определяются с использованием имитационных моделей различной сложности.

Такие СТС, как система целеуказания, носитель, характеризуются сложным набором конструктивных параметров. При исследовании СТС следует выделить обобщенные характеристики, взаимосвязывающие все эти подсистемы. На динамику и эффективность СТС существенное влияние оказывают условия старта, зоны достижимости носителя, показатели точности выведения носителя с СТС в заданную область. Кроме того, на эффективность СТС оказывают влияние ее конструктивные и аэродинамические характеристики, показатели системы управления, характеристики информационного блока.

В число характеристик информационного блока включаются: параметры передаточных функций оптической системы, формирователя потока излучения, формирователя зондирующего излучения, анализатора изображения, усилительно-преобразующего тракта, системы сканирования, привода; закон сканирования; добротность привода; параметры датчика информации и решающего правила, такие, как относительная спектральная чувствительность $S(\lambda)$, интегральная чувствительность приемника излучения S_n , пороговая чувствительность Φ_n , поле обзора ΔH , полное поле зрения Ω , поле зрения элемента разрешения $\Delta \Omega$, площадь входной апертуры $A_{вх}$, коэффициент передачи по потоку K_n , коэффициент спектрального пропускания $T(\lambda)$, коэффициент передачи по сигналу $K_{эт}$, пороги принятия решения q , измеряемые параметры сигнала $\bar{a}$, характеристики точности их измерения σ_a , диапазон обрабатываемых угловых рассогласований $\Delta \varphi$ и характеристики ошибки отработки рассогласования $\sigma_{\Delta \varphi}$.

Для решения задачи оценки эффективности СТС, обликотого проектирования требуются разработка имитационных моделей различного уровня сложности, исследование методов управления системой, разработка алгоритмов распознавания объектов и выделения заданной области объекта как при отсутствии так и, что особенно важно, при действии помех.

Общие и частные критерии эффективности СТС приведены ниже.

Общие критерии эффективности, характеризующие выполнение поставленной задачи:

1. Детерминированный $K_0 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$; стохастический $K_0 = P_0$; минимаксный $K_0 = \min P_0$.

2. Показатели стоимости.

3. Массогабаритные характеристики.

Частные критерии, характеризующие подсистемы:

1. Целеуказание. Точность определения области расположения объектов; точность определения координат объектов; характеристики информации об объектах.

2. Носитель. Зоны достижимости, характеристики точности попадания в заданные области, предельный разброс параметров движения, их математические ожидания, СКО, ковариационные матрицы, законы распределения.

3. СПС. Показатели, характеризующие динамику движения, показатели точности, характеристики информационного блока, критерии помехозащищенности.

Параметры и критерии, характеризующие динамику движения СПС:

1. Начальные условия: $X_0, Y_0, Z_0, D_0, V_0, Q_0, \varphi_0, \alpha_0, \beta_0$ (соответственно относительные координаты и дальность, скорость, углы траектории, углы атаки), их минимальные и максимальные значения, математические ожидания, СКО, законы распределения.

2. Показатели динамики объекта: максимальная скорость, максимальные перегрузки.

3. Характеристики возмущений, действующих на СПС: показатели турбулентности атмосферы, разброс аэродинамических и динамических параметров СПС.

4. Критерии динамики движения:

располагаемые перегрузки n_y, n_z и связанные с ними зоны достижимости по координатам $\Delta X, \Delta Z$, углам траектории $\Delta \theta_d, \Delta \psi_d$, углам тангажа и рыскания $\Delta \vartheta_d, \Delta \varphi_d$;

промах Δr и его координаты $\Delta X_n, \Delta Y_n, \Delta Z_n$ относительно заданной точки объекта, их максимальные значения, МО, СКО, законы распределения; плотность распределения промаха $f(x, z), f(x, y), f(x, y, z)$; коэффициенты чувствительности $\partial \Delta X_n / \partial \alpha_i, \partial \Delta Z_n / \partial \alpha_i, \partial \Delta Y_n / \partial \alpha_i$ промаха к параметрам α СПС, объекта, возмущениям, прерыванию информации;

вероятность попадания СПС в заданную область объекта

$P_{\Pi} = \iint_D f(x, z) dx dz$, $P_{\Pi} = \iint_D f(x, y) dx dy$, или $P_{\Pi} = \iiint_D f(x, y, z) \times dx dy dz$ (при исследовании движения в продольной, боковой плоскостях, пространственного движения).

Параметры и критерии эффективности информационного блока:

1. Протяженная модель маяка (геометрическая, яркостная, в виде случайного поля).

2. Модель фона и атмосферы для многоспектральных датчиков информационного блока, детерминированная, заданная предельными значениями, вероятностная в виде векторного многокомпонентного случайного поля с заданными характеристиками.

3. Модель многокомпонентного объекта и характеристики помех.

4. Критерии системы обзора и поиска: показатели системы сканирования, вероятность попадания заданного маяка в поле зрения $P_{\Pi 31}$, вероятность попадания любого объекта в поле зрения $P_{\Pi 32}$, помехозащищенность.

5. Критерии системы обнаружения и селекции: вероятность правильного обнаружения заданного объекта $P_{\Pi 1}$, вероятность обнаружения одного любого объекта из заданной совокупности $P_{\Pi 2}$, вероятности ошибок первого и второго рода α_1, α_2 при работе решающего правила, вероятность ложного срабатывания по фону $P_{\text{лф}}$, вероятность правильной классификации объектов и выделения объекта $P_{\text{кл}}$.

1.2.3. Обобщенные критерии оценки технического облика СТС

В качестве обобщенных критериев предлагаются следующие:

для оценки точности выведения носителей в район доставки грузов – математическое ожидание потерь грузов, обусловленных рассеиванием относительно точки прицеливания ($\text{МОП}_{\text{кас}}$);

для оценки точности выведения груза в район доставки после вскрытия блока СПС – МО потерь грузов, обусловленных рассеиванием грузов блока ($\text{МОП}_{\text{гр}}$);

для оценки степени выполнения задачи накрытия всего района доставки зонами обзора ИБ – МО пропуска площади района ($\text{МОП}_{\text{пр}}$);

для оценки возможности посадки груза на маяк, попавший в зону обзора одного (или нескольких) грузов – МО перекрытия зоны обзора ИБ над одним маяком ($\text{МОП}_{\text{зо}}$).

Для расчета обобщенных критериев приняты следующие допущения:

блок считается «потерянным», если ни один из грузов, входящих в него, не накрывает площадь маяка зоны обзора, т. е. $\{C\} \bigcap_j \{Z_j\} = 0$, где

$\{C\}$ – множество точек площади района доставки; $\{Z_j\}$ – множество точек, принадлежащих зонам обзора грузов; j – число грузов в кассете;

груз считается «потерянным», если он принадлежит непотерянному блоку, но его зона обзора не попадает на район доставки, т. е. $\{C\} \bigcap_j Z_j = 0$;

район доставки считается «пропущенным», если он не покрыт ни одной из зон обзора всех грузов:

$$\sum_{j=1}^N [\{C\} \cap \{Z_j\}] = 0.$$

Введенные критерии для качественного сравнения альтернативных вариантов систем правомочны вследствие их непротиворечивости общему критерию «эффективность – стоимость»: однозначное изменение обобщенного показателя ведет к однозначному изменению общего.

Выражение для обобщенных критериев. Согласно определению «потерянный» блок $МОП_{\text{кас}} = M [N_{\text{кас}} / N_{\text{кас}}]$, где $N_{\text{кас}}$ – число блоков; N – число «потерянных» блоков. С учетом, например, того, что рассеивание кассет подчиняется нормальному закону, получим:

$$МОП_{\text{кас}} = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_z} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_0 \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{z-\bar{z}}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} dx dz, \quad (1.1)$$

где S_0 – доля площади рассеивания кассет, накрываемая зонами обзора потерянных блоков; σ_x, σ_z – СКО блоков по осям OX и OZ соответственно; $\bar{x}, \bar{z}$ – МО центра рассеивания блоков.

Начало системы координат совпадает с точкой прицеливания.

Если площадь района доставки превышает площадь рассеивания блоков, то $S_0 = 0$, и, следовательно, $МОП_{\text{кас}} = 0$. Если маяк точечный и находится в точке прицеливания, то $S_0 = 1$ и, следовательно, $МОП_{\text{гр}} = 1$. Согласно определению потерянного груза

$$МОП_{\text{гр}} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_1 \varphi(x, z) dx dz, \quad (1.2)$$

где S_1 – доля площади рассеивания блоков, накрываемая зонами обзора потерянных грузов, входящих в состав непотерянных блоков; $\varphi(x, z)$ – закон распределения грузов блоков на высоте начала работы ИБ.

Математическое ожидание потерь грузов с учетом потерь блоков

$$МОП_{\Sigma} = 1 - (1 - МОП_{\text{кас}}) (1 - МОП_{\text{гр}}), \quad (1.3)$$

где $МОП_{\text{кас}}$ и $МОП_{\text{гр}}$ – относительные величины (≤ 1).

Аналогично запишем выражения для $МОП_{\text{пр}}$ и $МОП_{30}$, считая, что маяки распределены в районе доставки случайно по закону $\varphi_M(x, z)$:

$$МОП_{\text{пр}} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_3 \varphi_M(x, z) dx dz; \quad (1.4)$$

$$МОП_{30} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_4 \varphi(x, z) dx dz, \quad (1.5)$$

где S_3 – площадь маяков, не накрытая зонами обзора грузов; S_4 – площадь пересечения зон обзора непотерянных грузов: $S_4 = \bigcap_{j=1}^n S_j$;

$S_j = \frac{1}{2} \int_{30_j} \left(x_j \frac{dz_j}{dt} - z_j \frac{dx_j}{dt} \right) dt$ – параметрическое задание огибающей зоны обзора ИБ груза.

Расчет показателей (1.1) – (1.5) проводится на ЭВМ методом статистического моделирования [14]. Описание модели и пример расчета приведены в пункте 2.3.3.

Приведенные частные и обобщенные критерии оценки функционирования СПС и ее подсистем могут быть дополнены в каждом конкретном случае необходимыми показателями. Важно при введении нового критерия соблюдать требования непротиворечивости принятому основному критерию.

1.3. Принципы построения автоматизированной системы обlikового проектирования СТС

Создание сложной технической системы без использования современной вычислительной техники практически невозможно. В ряде работ [15–17] подробно рассмотрены принципы построения и описаны конкретные системы автоматизированного проектирования (САПР). Создание САПР возможно в специализированных организациях при наличии специалистов достаточно высокого уровня.

Рассмотрим промежуточную ступень между САПР и программистом-пользователем – автоматизированную систему оценки технического облика (АСОТО).

В соответствии с рис. 1.3 АСОТО может быть разработана для определенного уровня и затем объединена в единую систему обlikового проектирования (АСОПР). На рис. 1.4 показана взаимосвязь данных систем в общем случае.

Показанные на рис. 1.4 автоматизированные системы оценки технического облика предназначены для решения следующих задач:

АСОТО-1 – для оптимизационных исследований, связанных с рассеиванием блока СПС и выбором рациональных размеров зоны обзора ИБ (обуславливающих схему функционирования СПС);

АСОТО-2 – для оценки или синтеза ТО блока, реализующего оптимальное рассеивание СПС, размещаемых в заданных носителях;

АСОТО-3 – для оценки ТО комплекса в целом (при условии оптимальности параметров его отдельных подсистем) и выбора путей развития СПС.

В состав каждой АСОТО входят:

база данных (БД), включающая множество параметров системы, неизменных в течение длительного времени;

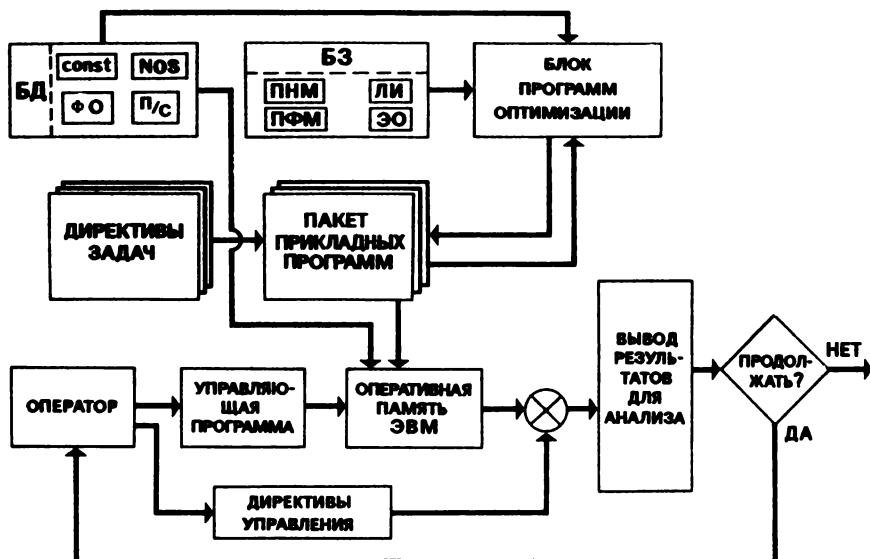


Рис. 1.3. Автоматизированная система оценки технического облика СТС (БД – база данных; БЗ – база знаний; ФО – фоновая обстановка; п/с – подсистема; ПНМ – полунатурное моделирование; ПФМ – полуфизическое моделирование; ЛИ – летные испытания; ЭО – экспериментальная отработка)

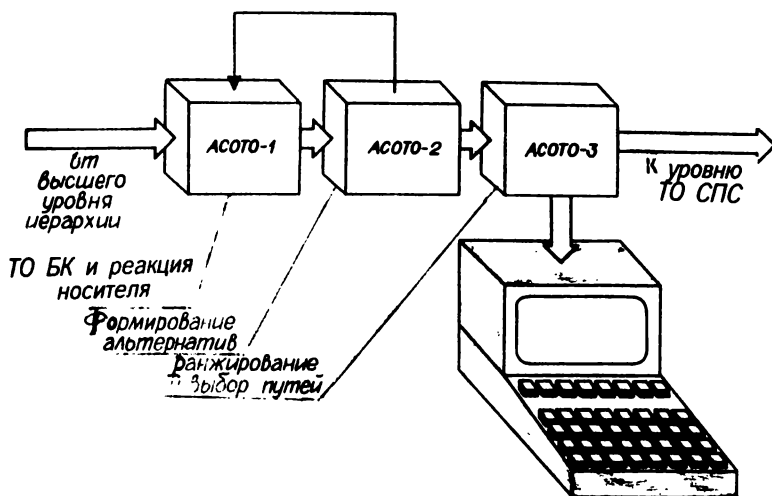


Рис. 1.4. Взаимосвязь различных систем (ТО – технический облик; БК – блок кассет; АСОТО – автоматизированная система оценки технического облика; СПС – самонаводящаяся парашютная система)

директивы задач (ДИЗ), состоящие из одной или нескольких программ, реализующих маршруты исследования (каждая директива имеет сервисное обеспечение;

директивы управления (ДИУ), т.е. программно оформленные модули, позволяющие осуществлять управление процессом вычислений; пакет прикладных модулей (ППМ), т.е. методики в виде программ. Целями создания АСОТО являются :

управление процессом сборки отдельных программ для решения конкретной задачи (из перечня ДИЗ);

создание наращиваемого БД по всем задачам;

выведение результатов в требуемом виде (табличном, графическом, на экран дисплея);

управление перечнем выходных характеристик.

В соответствии с общими принципами построения САПР к АСОТО предъявляются следующие требования:

работа в режиме диалога «ПЭВМ – непрограммирующий пользователь»;

блочность структуры;

наращиваемость БД и ППМ;

возможность замены блоков на более совершенные.

Техническое обеспечение АСОТО должно включать: ПЭВМ IBM 386, IBM 486, дисплей (терминал), принтеры, дискеты. Блоки, входящие в АСОТО, должны использоваться как в составе комплекса, так и автономно.

Применяя АСОТО, можно построить комплекс математического моделирования СТС.

На рис. 1.5 показана схема основных операций, выполняемых с пульта управления комплексом математического моделирования. Под комплексом математического моделирования понимается ПЭВМ с пакетом прикладных программ и функциональными устройствами печати, графопостроителя и линий связи с комплексом полунатурного моделирования.

На схеме показаны три режима моделирования задачи:

автономный, т.е. проведение расчетов по любой из моделей, заложенных в АСОТО, без связи с другими моделями;

сквозной, т.е. моделирование всего цикла этапов функционирования СПС;

комбинированный, т.е. сочетание режимов математического и полунатурного моделирования.

Результаты расчетов могут быть оперативно отражены на экране дисплея, а также записаны в банк данных, выведены на печать.

Исходные данные для моделирования процесса могут задаваться различными способами:

детерминированно или статистически;

численно, таблично, графически;

единичным числом, диапазоном с шагом дискретизации.

Выходные характеристики можно получить в одном из режимов:

расчет точностных характеристик;

расчет вероятностных характеристик;

расчет вкладов подсистем.

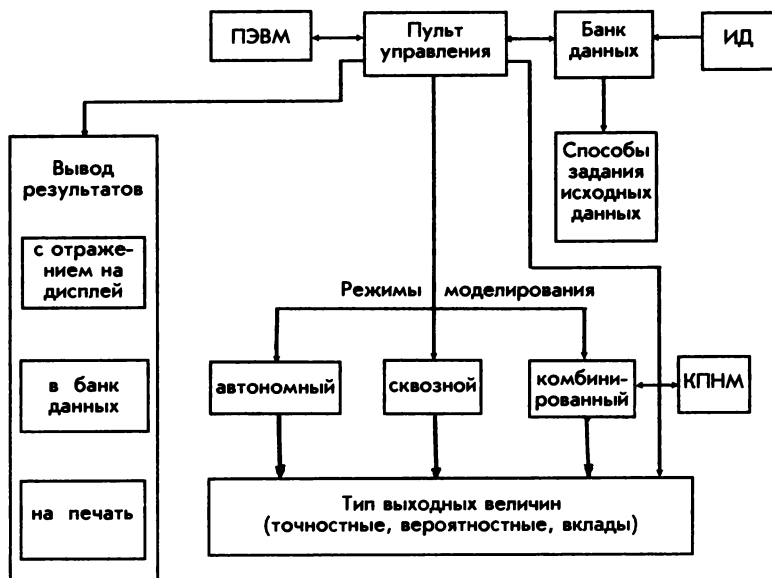


Рис. 1.5. Комплекс математического моделирования СТС
(КПНМ – комплекс полунатурного моделирования; ИД – исходные данные)

Банк данных составляется из входных, выходных величин и констант всех математических моделей. Трудность использования такого подхода состоит в том, что быстроедействие ПЭВМ IBM 386, IBM 486 уже недостаточно для решения таких задач.

Использование ПЭВМ IBM 486 совместно с транспьютерами (250 ... 750 млн оп./с) позволяет решить данную задачу.

Г л а в а 2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТО СТС, ИСХОДЯ ИЗ ЕЕ ЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Из целевого назначения СТС определяются три группы параметров системы, необходимых для ее описания: тактические, проектные и функциональные. К тактическим параметрам относятся ошибки доставки грузов в требуемый район и описание закона распределения маяков на поверхности земли.

К проектным параметрам относятся характеристики компоновки СТС. В общем случае для перспективных систем знание этих параметров необходимо для расчета систем выброса грузов из самолетов по оптимальному закону.

В настоящее время выброс грузов реализован самым простым способом, не обеспечивающим требуемого с точки зрения эффективности выполнения целевой задачи оптимального закона рассеивания грузов в пространстве.

К функциональным параметрам относятся характеристики закона рассеивания грузов, параметры зоны обзора датчика маяка, комплексный показатель технического облика СТС.

Приведенные ниже математические модели расчета данных параметров ввиду их общности могут быть использованы при решении ряда задач, не связанных с доставкой грузов на самолетах. Это может быть, например, определение параметров зон обзора специальных средств тушения в тайге и на нефтяных промыслах и т.п.

2.1. Тактические параметры. Распределение групп ошибок СТС

Доставка грузов различными носителями (самолетами, вертолетами и т. п.), естественно, подчиняется законам, полученным для таких объектов [8, 18].

В данном параграфе рассмотрим новый подход к формулировке и решению оптимизационной задачи распределения ошибок доставки грузов.

В общем случае ошибки доставки грузов в виде блок-схемы показаны на рис. 2.1.

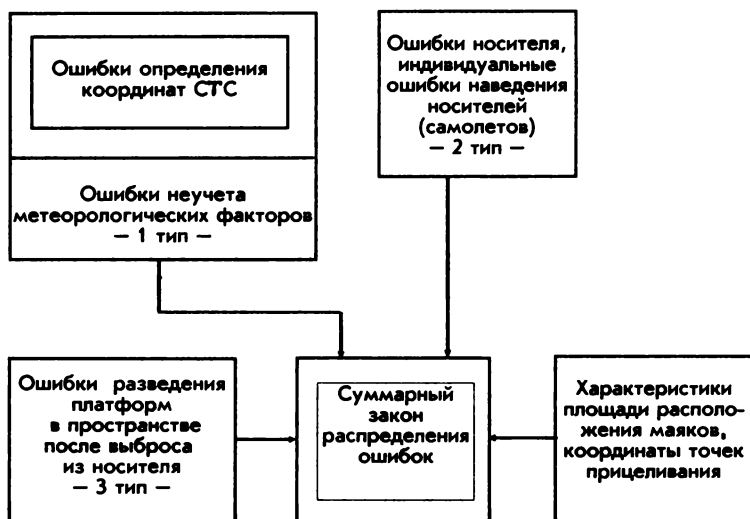


Рис. 2.1. Схема учета различных групп ошибок СТС

Блок-схема выражает закон распределения выходной величины для трех групп (типов) ошибок и произвольного распределения маяков. Для простоты расчетов будем считать, что имеется одна точка прицеливания, например центр группы маяков. Ошибки 1-го и 2-го типов, как показывает многочисленный опыт эксплуатации носителей, подчиняются нормальному закону и не коррелированы по осям, причем суммарный закон распределения ошибок доставки платформы в общем виде можно записать по оси OX [19, 20]:

$$F^{(3)}(x_3) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F_3(x_3 - x_c - x_6) f_c(x_c - x_6) f_6(x_6) dx_c dx_6, \quad (2.1)$$

где $F(\cdot)$ – интегральный закон рассеивания СПС, полученный с учетом ошибок доставки носителем; $F_3(\cdot)$ – интегральный закон рассеивания одной элементарной СПС; $f_6(\cdot)$ – дифференциальный закон рассеивания блока кассет на момент вскрытия; $f_c(\cdot)$ – дифференциальный закон рассеивания СПС.

Пусть $F_3(x_3 - x_c - x_6) = F(z_1)$, где $z_1 = \frac{x_3 - x_c - x_6}{\sigma_x}$; $\tilde{x} = x_3 - x_c - x_6$, тогда

$$\left. \begin{aligned} f_c(x_c - x_6) &= \frac{1}{\sigma_c \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(x_c - x_6)^2}{2\sigma_c^2} \right); \\ f_6(x_6) &= \frac{1}{\sigma_6 \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{x_6^2}{2\sigma_6^2} \right), \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

где σ_c – СКО доставки СПС в район приземления; σ_6 – СКО рассеивания блока кассет.

Выражение $F_3(z)$ можно записать, используя ряд Эджворта или А-ряд Шарлье [21]:

$$F(z) = \frac{1}{2} + \Phi(z) + \varphi(z) (b_0 + b_1 z + b_2 z^2 + b_3 z^3 + \dots), \quad (2.3)$$

где $\varphi(z) = \exp(-z^2/2)/\sqrt{2\pi}$; $\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-t^2/2} dt$; $z = \frac{x - M[x]}{\sigma}$;

$b_0 = \tilde{\mu}_3/6\sigma^3$; $b_1 = \frac{1}{8}(\tilde{\mu}_4/\sigma^4 - 3)$; $b_2 = -b_0$; $b_3 = -b_1/3$; $\tilde{\mu}_3$, $\tilde{\mu}_4$ – оценки третьего и четвертого центральных моментов соответственно; σ – СКО.

Функцию $\Phi(z)$, используя формулу Лагранжа, можно записать [22]:

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} f(\xi) (b - a) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} z e^{-\xi^2/2} \Big|_{\xi=\alpha_0 z} = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} z e^{-\frac{z^2 \alpha_0^2}{2}}, \quad (2.4)$$

$$\text{где } \alpha_0 = \sqrt{-\frac{2 \ln\left(\frac{\Phi(z)}{z} \cdot 1,2533141\right)}{z^2}}.$$

Для практических расчетов на ЭВМ целесообразно выбрать $\alpha_0 \approx 0,48$, при этом погрешность вычислений не будет превышать $\varepsilon = 6,6\%$; в более узком интервале $z \in [0,5; 2]$ $\alpha_0 \approx 0,52$, при этом $\varepsilon = 2,6\%$.

Подставляя выражения (2.2) – (2.4) в уравнение (2.1) и проводя преобразования, можно показать, что

$$F^{(3)}(x_3) = \frac{1}{2} + \frac{x_3 \sigma_x^2}{D_\Sigma^2 \sqrt{2\pi}} e^{-x_3 \alpha_0^2 / (2D_\Sigma)} + \frac{\sigma_x}{\sqrt{2\pi} \tilde{D}_\Sigma} e^{-x_3 / (2\tilde{D}_\Sigma)} \times \\ \times [B_1 + B_2 \tilde{m}_{2x} + B_3 (2\tilde{\sigma}_{2x}^2 + \tilde{m}_{2x}^2) + B_4 (6\tilde{\sigma}_{2x}^2 + \tilde{m}_{2x}^2) \tilde{m}_{2x} + \dots], \quad (2.5)$$

где $D_\Sigma = \sigma_c^2 \alpha_0^2 + \sigma_x^2 + 4\alpha_0^2 \sigma_6^2$; $\tilde{D}_\Sigma = D_\Sigma |_{\alpha_0=1} = \sigma_c^2 + \sigma_x^2 + 4\sigma_6^2$;
 $\tilde{m}_{2x} = \frac{x_3 (\sigma_c^2 + 2\sigma_6^2)}{\sigma_c^2 + \sigma_x^2 + 4\sigma_6^2}$; $\tilde{\sigma}_{2x}^2 = \frac{\sigma_c^2 \sigma_x^2 + (\sigma_c^2 + \sigma_x^2) \sigma_6^2}{\sigma_c^2 + \sigma_x^2 + 4\sigma_6^2}$; $B_1, B_2, B_3, B_4, \dots$ – коэффициенты, являющиеся функциями $b_0, b_1, \dots$; $\sigma_c^2, \sigma_6^2, \dots$

Таким образом, выражение (2.5) представляет собой суммарный закон распределения для трех групп ошибок и одной точки прицеливания. Это выражение удобно использовать для решения задачи оптимизации распределения ошибок по их типам. В свою очередь, это позволит рассчитать оптимальный вклад каждой подсистемы доставки грузов (см. гл. 3).

Т а б л и ц а 2.1

Расчет параметров закона распределения

Число групп оши- бок	Вид закона $F_s(x_s - x_c)$	Число точек прицели- вания	Решение интеграла	Примечание
2	Нормальный $\frac{1}{2} \Phi(\tilde{x}^*) + \frac{1}{2}$	—	$\frac{1}{2} + \frac{x_s \sigma_x^2}{(\sigma_c^2 \alpha_0^2 + \alpha_x^2)^{3/2} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} C_A\right)$	$\tilde{x} = x_s - x_c$; $\tilde{x}^* = (x_s - x_c)/\sigma_x$; $C_A = \frac{x_s^2 \alpha_0^2}{\sigma_c^2 \alpha_0^2 + \sigma_x^2}$
2	Равномерный $\frac{x_s - x_c - \alpha}{\beta - \alpha}$ при $\alpha < x_s - x_c < \beta$	—	$\frac{x_s - \alpha}{\beta - \alpha}$ при $\alpha < x_s - x_c < \beta$	—
3	Нормальный $\frac{1}{2} \Phi\left(\frac{x_s - x_c - x_0}{\sigma_x}\right) + \frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2} + \frac{x_s \sigma_x^2}{D_x^2 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x_s^2 \alpha_0^2}{D_x^2}\right)$	$D_x^2 = \sigma_c^2 \alpha_0^2 + \sigma_x^2 + 4\alpha_0^2 \sigma_0^2$
3	Равномерный $\frac{x_s - x_c - x_0 - \alpha}{\beta - \alpha}$ при $\alpha < x_s - x_c - x_0 < \beta$	1	$\frac{x_s - \alpha}{\beta - \alpha}$	—
3	Нормальный $\frac{1}{2} \Phi\left(\frac{x_s - x_c - x_0 - a_i}{\sigma_x}\right) + \frac{1}{2}$	n	$\frac{1}{2} + \frac{(x_s - 4a_0) \sigma_x^2 \exp(-C_{2n}/2)}{\sqrt{2\pi} D_x^2}$	$a_i - i = \overline{1, n}$ — координаты точки прицеливания

$$F_s = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \Phi(z) + \varphi(z) [b_0 + b_1 z + b_2 z^2 + b_3 z^3 + \dots]; \quad \varphi(z) = \Phi'(z);$$

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-t^2/2} dt;$$

$$z = \frac{x - M[x]}{\sigma}, \quad \text{где } b_0, b_1, b_2, b_3 - \text{коэффициенты [21]}$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} + \frac{x_s \sigma^2}{D_x^2 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x_s^2 \sigma_0^2}{2 D_x^2}\right) + \frac{\sigma_s}{\sqrt{2\pi} D_x} \times \\ & \times \exp\left(-\frac{x_s^2}{2 D_x^2}\right) [B_1 + B_2 \tilde{m}_{2x} + B_3 (2\tilde{\sigma}_{2x}^2 + \tilde{m}_{2x}^2) + \\ & + B_4 (6\tilde{\sigma}_{2x}^2 + \tilde{m}_{2x}^2) \tilde{m}_{2x}] \end{aligned}$$

$$\tilde{D}_2 = D_2 \mid_{\alpha_0 = 1};$$

B_1, B_2, B_3, B_4 – функция от $b_0, b_1, b_2, b_3, \dots$
 $\tilde{\sigma}_2^2, \sigma_c^2, \sigma_6^2, \dots$

В табл. 2.1 приведены выражения для расчета параметров закона распределения для различного числа групп ошибок, числа точек прицеливания, вида закона распределения.

2.2. Проектные параметры. Компоновка СТС

Под компоновкой СТС понимается размещение грузов в ограниченном замкнутом объеме пространства. Объем пространства может быть условным, определяемым ограничениями от строп парашюта, и т.п.

Задача состоит в размещении n форм груза (кубов, цилиндров, параллелепипедов) в типовом объеме: кубе, цилиндре и т.п. В практическом плане ошибки замены реального груза условным объемом несущественны.

Вопросы компоновки отсеков самолетов, летательных аппаратов отражены в ряде работ [23, 24].

Рассмотрим компоновку цилиндров, как наиболее интересный случай с точки зрения размещения и оптимизации размеров грузов. Такая форма грузов наиболее целесообразна, так как при встрече с землей кинетическую энергию удара можно перевести во вращательное движение груза (например, при сбросе бочек с грузом). В настоящее время из-за отсутствия в стране единого центра по доставке грузов требования к форме грузов и их оптимальным размерам для различных потребителей не выработаны. Учитывая, что имеются семейства измерительных приборов цилиндрической формы, удобно оснащать грузовую платформу набором таких приборов. На примере компоновки цилиндра цилиндрами будет показана методология решения данной задачи, которую можно применять с соответствующими изменениями в каждом конкретном случае. При массовых доставках грузов для облегчения эксплуатации СПС и уменьшения затрат габаритные размеры, виды контейнеров и тары для грузов должны быть унифицированы.

Решение задачи определения рациональных схем укладки грузов и характеристик их разведения состоит из следующих этапов:

- определения координат носителя грузов (например, самолета) на момент вскрытия кассеты на основе решения системы дифференциальных уравнений;

- моделирования сброса обтекателя (если он есть);

- расчета координат центра масс грузов от момента вскрытия кассеты до начала стабилизированного полета;

- формирования вектора состояния каждого груза на момент начала стабилизированного полета;

- определения с учетом особенностей движения грузов координат каждого груза на заданной высоте;

- расчета параметров закона распределения грузов в пространстве;

- оценки эффективности применения грузов.

В предположении, что грузы имеют форму цилиндров, наиболее предпочтительной следует признать схему размещения грузов, при которой они располагаются параллельно оси носителя. При этом грузы

могут укладываться в несколько рядов по длине кассеты. В каждом ряду грузы могут располагаться в несколько слоев, причем под слоем понимается множество грузов, оси которых лежат на поверхности цилиндра одного радиуса. При такой компоновке грузов возможны различные способы вскрытия кассеты: радиальный (с использованием центральной системы выброса), радиальный по касательной, последовательный (схематично приведены на рис.2.2) и некоторые другие.

Для оценки возможности укладки грузов в кассете получены аналитические выражения взаимосвязи числа элементов по слоям и рядам со значениями диаметров носителя и кассеты:

$$N = \sum_{i=1}^k N_i = E \left\{ \sum_{i=1}^k \frac{\pi}{\arcsin \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{|2id - D|}{2id - D} \right) \frac{d}{D - (2i - 1)d} \right]} \right\}, \quad (2.6)$$

где N – общее число грузов в кассете; i – порядковый номер слоя, начиная с внешнего; N_i – число грузов в i -м слое; D – диаметр кассеты; d – диаметр груза; $E(x)$ – целая часть значения x ; k – число слоев в ряду:

$$k = E(D/(2d)) + \{ [D - 2dE(D/(2d))] / d \}. \quad (2.7)$$

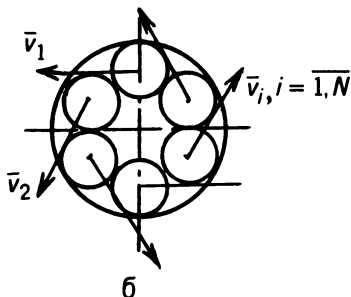
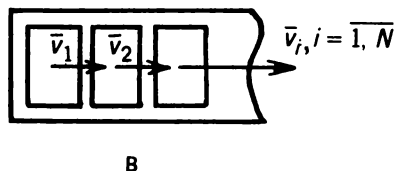
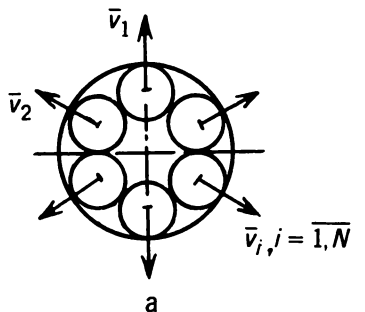


Рис. 2.2. Способы вскрытия кассет:
 а – радиальный; б – радиальный по касательной; в – последовательный (V_i – вектор скорости выброса i -го цилиндра; n – число цилиндров)

При $2id - D = 0$ принимать $\frac{|2id - D|}{2id - D} = 1$ и соответственно в знаменателе выражения (2.6) $\arcsin(\cdot) = \pi$.

Полезная загрузка объема кассеты грузами определяется из выражения

$$K_{пз} = N (d/D)^2. \quad (2.8)$$

Для оценки возможности размещения аппаратуры системы выброса грузов из кассеты рассчитывается минимальное расстояние Δ_i между грузами в каждом слое:

$$\Delta_i = d_i \sin \left(\frac{\pi}{N_i} - \arctg \frac{d}{D-d} \right), \quad (2.9)$$

где d_i – диаметр по осевой линии i -го слоя грузов:

$$d_i = D - (2i - 1)d, \quad i = \overline{1, k}. \quad (2.10)$$

Соотношение для допустимого диаметра цилиндра, который можно использовать для размещения центрального разрывного заряда, будет иметь вид:

$$D_n = d_k - d = D - 2dk. \quad (2.11)$$

В соответствии с зависимостями (2.6) – (2.11) построена номограмма укладки грузов в кассетах (рис.2.3), позволяющая производить оперативные оценки компоновки грузов с учетом размещения аппаратуры системы разведения грузов в пространстве. При определении характеристик компоновки кассеты необходимо учитывать ряд ограничений, в первую очередь, по допустимой массе грузов и бортовой аппаратуры.

По известным значениям диаметров D и d на номограмме находится соответствующая им точка. Результат определяется на пересечении прямой, проходящей через начало координат и указанную точку (пунктирная линия), с линиями K и N , характеризующими соответственно число слоев в ряду и грузов в слое. Для решения обратной задачи по заданному числу грузов в кассете необходимо найти точку пересечения соответствующей наклонной прямой с осью D/d , по которой определяется соотношение между диаметром кассеты и грузом.

Оценка возможности практического использования номограммы проводилась по материалам конструкторских проработок кассет с грузами. Так, для варианта $D = 300$ см, $d = 57$ см получено абсолютное совпадение результатов – общее число грузов в одном ряду в обоих случаях составило 14.

Обратная задача компоновки (расчет l , d , m и других проектных параметров $\{\pi\}$ груза при заданных D , L , m и N кассеты) является фактически задачей оптимизации, так как при этом необходимо указать максимально возможные параметры l , d при $N_k = \text{const}$. Задавая значением N_p , получим $l = (L - l_3)/N_p$, и задача формулируется сле-

дующим образом: необходимо при $N_p = N_p^*$, $d = d^*$ определить d^{opt} так, чтобы $K_{пп} = \max$ (см. рис. 2.4,е).

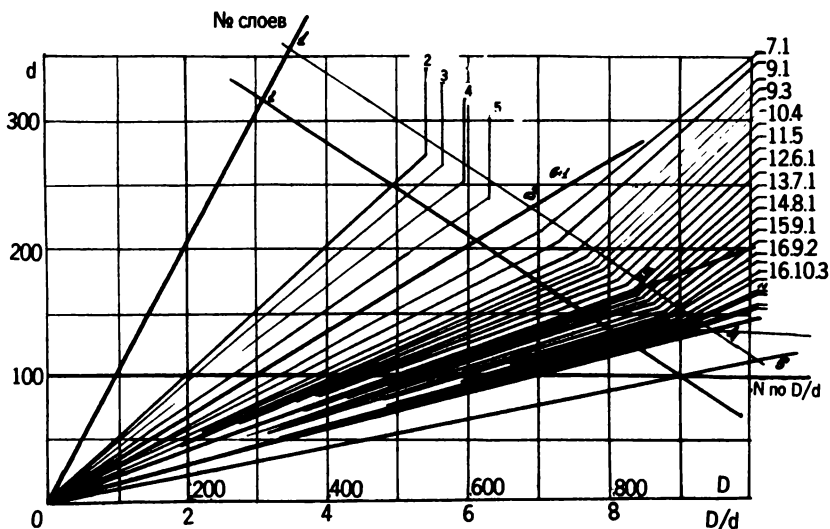


Рис. 2.3. Номограмма укладки грузов
(D – диаметр блока цилиндров; d – диаметр одного цилиндра)

Задача может быть решена итерационным способом, причем должно выполняться условие:

$$(N_i = N_p^*) \wedge (|d_i - d_{i-1}| < \varepsilon), \quad i = 1, 2, \dots,$$

где ε – требуемая точность вычисления d .

Если можно подобрать такое k , что будет выполняться строгое равенство: $N_p^* = 1 + \sum_{\lambda=0}^k \lambda$, где $k = 0, 1, 2, \dots$, то алгоритм решения задачи имеет вид:

$$d^{opt} = \frac{D}{(2k + 1)},$$

в противном случае, задаваясь начальным приближением $d_0 = D$, имеем:

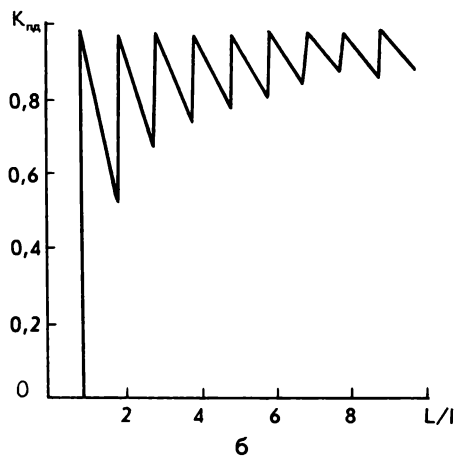
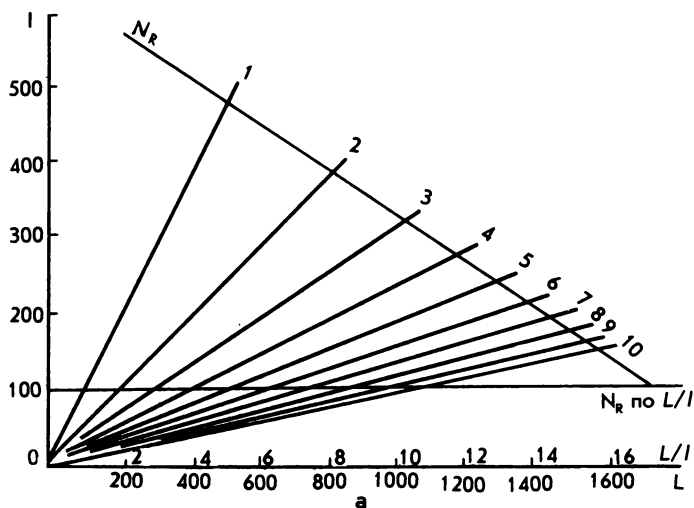
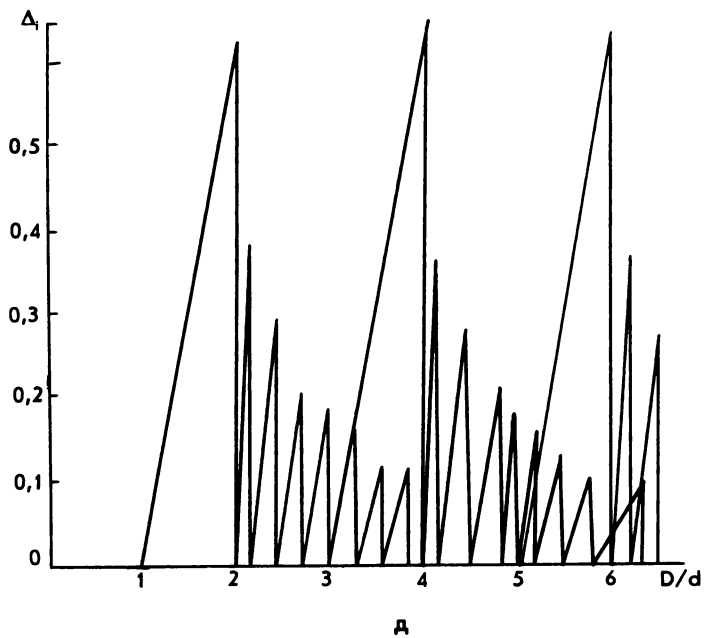
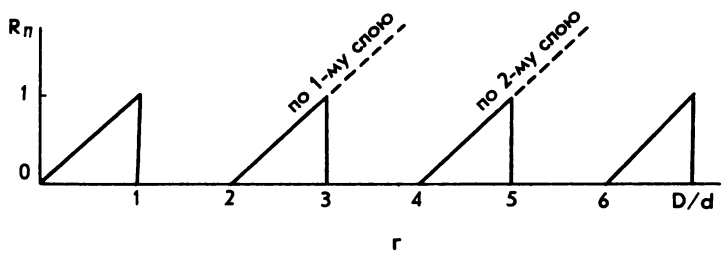
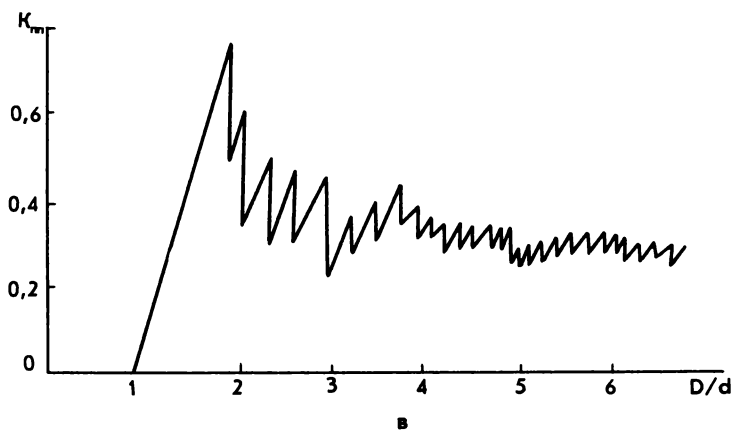


Рис. 2.4. Графические зависимости для определения:
 a – числа рядов N_R ; b – коэффициента заполнения кассеты по длине $K_{нд}$; c – коэффициента заполнения в диаметральной плоскости $K_{пп}$; d – радиуса свободной области в центре кассеты R_n ; e – расстояния между цилиндрами в рядах компоновки Δ_l (L – длина блока цилиндров; l – длина одного цилиндра)



$$d_i = \begin{cases} \frac{1}{2} d_{i-1}, & \text{если } (N_p^* > N_p) \wedge (d_{i-1} = D); \\ d_{i-1} - \frac{d_{i-2} - d_{i-1}}{2}, & \text{если } (N_p^* > N_p^{(i-1)}) \wedge (d_{i-2} > d_{i-1}); \\ d_{i-1} - \frac{d_{i-1} - d_{i-2}}{2}, & \text{если } (N_p^* > N_p^{(i-1)}) \wedge (d_{i-1} > d_{i-2}); \\ d_{i-1} + \frac{d_{i-2} - d_{i-1}}{2}, & \text{если } (N_p^* < N_p^{(i-1)}) \wedge (d_{i-2} > d_{i-1}); \\ d_{i-1} + \frac{d_{i-1} - d_{i-2}}{2}, & \text{если } (N_p^* < N_p^{(i-1)}) \wedge (d_{i-1} > d_{i-2}); \end{cases}$$

$$d^{\text{opt}} = d_i, \text{ если } (|d_i - d_{i-1}| < \varepsilon) \wedge (N_p^{(i)} = N_p^*).$$

Табличное представление. Для оперативных точных расчетов проектных параметров кассет были разработаны универсальные таблицы, позволяющие решать задачу компоновки с точностью $\varepsilon = (D/d)_{\text{табл}} - (D/d)_{\text{ист}} = 0,01$, где $(D/d)_{\text{табл}}$, $(D/d)_{\text{ист}}$ – табличное и истинное значения D/d . Формулы (2.6) – (2.11) были записаны в относительных единицах и с помощью ЭВМ результаты расчетов сведены в таблицы.

Графическое представление. Для оперативных приближенных расчетов проектных параметров кассет помимо номограммы (см. рис.2. 3) разработаны графики. На рис.2.4 приведены графики зависимостей:

- а) $f_{11} (L, L/l, N_R) = 0$;
- б) $K_{\text{пд}} = f_{12} (L/l)$;
- в) $K_{\text{пп}} = f_2 (D/d, N)$;
- г) $R_{\text{п}} = f_3 (D/d, N)$;
- д) $\Delta_i = f_4 (D/d, N, N_C)$.

Точность расчетов по графикам определяется их масштабом.

В качестве примера была рассчитана компоновка кассет по следующим исходным данным: $D = 300$ см; $d = 90$ см; $L = 1500$ см; $l = 580$ см. Результаты расчетов показали: $N_k = 16$; $N_p = 8$; $N_{\text{пп}} = 0,72$; $K_{\text{пд}} = 0,77$; $K_{\text{по}} = 0,56$; $D_0 = 0$; $\tilde{\Delta}_1 = 0,02$; $\tilde{\Delta}_2 = 0$; $\tilde{\Delta}_k = 0,29$, т.е. 44 % объема кассет может быть использовано для размещения других подсистем.

В табл. 2.2 приведены значения оптимальных по критерию $K_{\text{пп}} = \max D/d$ для различных значений N_p , в табл. 2.3, 2.4 – оптимальные значения d для $D = 285$ см (тип 1), $D = 110$ см (тип 2) соответственно.

Т а б л и ц а 2.2

Связь числа рядов и отношения D/d

N_p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
D/d	1	2	2,15	2,42	2,71	3,00	3,00	3,31	3,62	3,93	4,00

Продолжение табл. 2.2

N_p	12	13	14	15	16	17	18	19	20
D/d	4,16	4,24	4,42	4,55	4,71	4,87	5,00	5,00	5,18

Т а б л и ц а 2.3

Оптимальные размеры грузов (тип 1)

N_p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d , см	285	142	132	117	105	95	95	86	78	72	71

Продолжение табл. 2.3

N_p	12	13	14	15	16	17	18	19	20
d , см	68	67	64	62	60	58	57	57	55

Т а б л и ц а 2.4
Оптимальные размеры
грузов (тип 2)

N_p	1	2	3
d , см	110	55	51

2.3. Функциональные параметры

2.3.1. Выбор параметров рассеивания грузов в пространстве

В общем случае доставка грузов может осуществляться n носителями, в каждом из которых имеется m платформ с грузом.

Случаи $n = 1$ и $m = 1$ или $n = 1$ и $m = 2 \dots 10$ являются частными, которые на практике могут рассматриваться самостоятельно. Действительно, один самолет или вертолет с одной платформой требует для своего функционирования лишь части исходных данных для успешной доставки грузов (высота сброса, скорость ветра, характеристики района посадки, вид маяка и т.п.).

При сбросе грузов с помощью 10 самолетов, в каждом из которых может быть до 50 платформ, на район бедствия или в условиях военных действий (например, в Югославии, Африке и т.п.), когда важен фактор времени, при наличии множества зажженных костров требуются специальные математические модели.

Эффективное применение точных СПС в этих условиях во многом определяется их рассеиванием в пространстве на момент начала поиска маяка. Характеристики рассеивания СПС в общем случае определяются тактическими параметрами $\{ \tau \}$ и схемой применения носителя. В свою очередь, при определении требований к тактическим параметрам носителя необходимо учитывать закон рассеивания СПС, оптимальные характеристики которого определяются обстановкой в районе прицеливания (распределением костров и т.п.). На рис. 2.5 показана схема постановки задачи по определению характеристик рассеивания СПС, а на рис. 2.6 – комплексная модель ее решения.

Для реализации этой схемы необходимо иметь следующие математические модели: определения вектора состояния СПС на момент выброса из носителя, расчета координат СПС на момент начала поиска маяка, определения статистических характеристик закона распределения СПС, проверки полученного закона по критериям Пирсона или



Рис. 2.5. Схема постановки задачи для определения характеристик рассеивания СПС ($\bar{v}_0, \bar{x}_0, \bar{v}_{от}$ – начальные векторы положения, скорости, отстрела СПС; m – математическое ожидание; σ – СКО; E_s, A_s – эксцесс и асимметрия)

Колмогорова на соответствие известным законам, аппроксимации полученного распределения теоретическим законом с помощью А-ряда Шарлье, расчета по известному рассеиванию тактических параметров блока.

Рассмотрим кратко каждую из моделей.

Модель определения вектора состояния СПС на момент выброса из носителя разработана при допущении, что СПС отделяются от кассет с некоторым интервалом времени.

Введем следующие системы координат:

$AX_0Y_0Z_0$ – земная система координат (ЗСК);

$OX_1Y_1Z_1$ – стартовая с началом в центре масс кассеты (ССК);

$OXYZ$ – связанная с кассетой (СвСК);

$OX_aY_aZ_a$ – скоростная (СкСК).

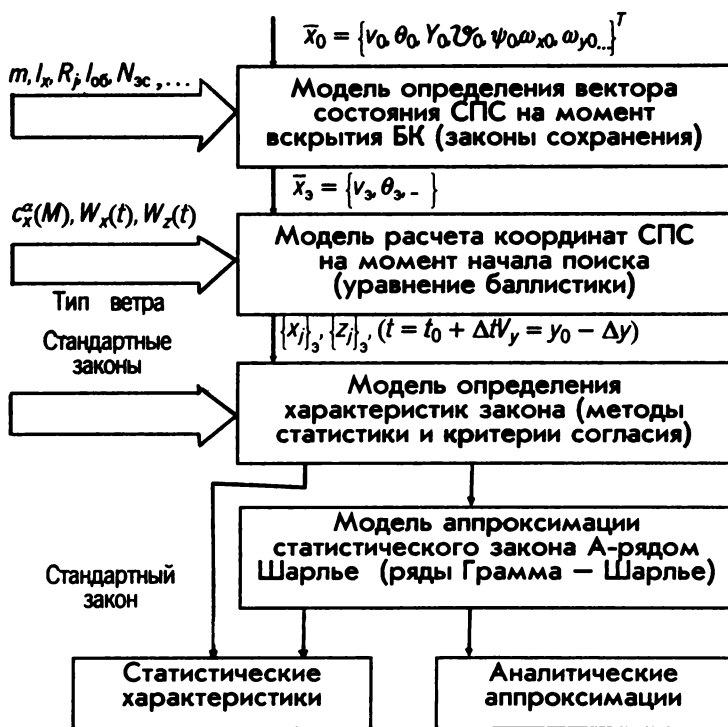


Рис. 2.6. Комплексная модель решения задачи определения характеристик рассеивания СПС

($\bar{x}_0$ – начальный вектор состояния элементарной СПС; t, t_0 – текущее и начальное время; Δt – интервал времени; y, y_0 – текущая и начальная высота; Δy – интервал высот; $C_x^a(M)$ – аэродинамические характеристики СПС в функции числа Маха; $W_x(\cdot)$ – функции, характеризующие ветровые возмущения; $l_x, R_j, l_{об}, N_{эс}, \dots$ – характеристики подсистем СПС)

После вскрытия кассеты вектор состояния СПС имеет следующие составляющие: X_3, Y_3, Z_3 – координаты СПС в ЗСК; V_3 – модуль вектора скорости; θ_3, Ψ_3 – углы наклона и поворота траектории; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – угловые скорости по осям СвСК.

Входными параметрами модели являются тактические параметры блока СПС на момент вскрытия $\{t\}_4$: модуль вектора скорости V_0 , угол наклона траектории θ_0 , угол поворота траектории Ψ_0 , угол тангажа ϑ_0 , угол рыскания ψ_0 , угловые скорости $\omega_{x0}, \omega_{y0}, \omega_{z0}$ и координаты X_0, Y_0, Z_0 ; проектные параметры кассеты: масса кассет m_0 , масса обтекателя $m_{об}$, момент инерции кассет по осям СвСК – J_x, J_y, J_z , расстояние от центра масс (ЦМ) кассет до ЦМ СПС по оси ОХ СвСК l_x , радиус отстреливаемого слоя СПС R_j , расстояние от ЦМ кассет до ЦМ обтекателя $l_{об}$, число

СПС в рассматриваемом j -м слое N_x , масса СПС m_3 . Тогда вектор состояния СПС $\bar{x}_3 = \{V_3, \theta_3, \Psi_3, \vartheta_3, \psi_3, \gamma_3, \omega_x, \omega_y, \omega_z, \alpha, \beta, \gamma_c, x, y, z\}^T$ может быть вычислен следующим образом [25]: $x_3 = x_0$; $y_3 = y_0$; $z_3 = z_0$; $\vartheta_3 = \vartheta_0$; $\psi_3 = \psi_0$; $\gamma_3 = \gamma_0$; $\omega_x = \omega_{x0}$; $\omega_y = \omega_{y0}$; $\omega_z = \omega_{z0}$; $V_3 = P_{\Sigma 0}/m_3$; $\theta_3 = \arcsin(P_{\Sigma y0}/P_{\Sigma})$; $\Psi = \arctg(-P_{\Sigma z0}/P_{\Sigma x0})$.

Углы α, β, γ_c рассчитывались как в работе [25].

Здесь $\bar{P}_{\Sigma 0} = \bar{P}_0^{(r)} + \bar{P}_0^{(e)}$; $P_{\Sigma 0} = |\bar{P}_{\Sigma 0}|$; $\bar{P}_0^{(r)}, \bar{P}_0^{(e)}$ – векторы количества относительного и переносного движения изделия в ЗСК соответственно; $\bar{P}_0^{(r)} = A_1 \bar{P}^{(r)}$; A_1 – матрица перехода от СвСК к ЗСК [25]; $\bar{P}^{(r)}$ – вектор количества относительного движения СПС в СвСК; $P_x^{(r)} = m_3 V_n$; $P_y^{(r)} = m_3 (V_{r3} \cos \varphi \mp V_{t3} \sin \varphi)$; $P_z^{(r)} = m_3 \times (V_{r3} \sin \varphi \pm V_{t3} \cos \varphi)$; $\bar{V}_3 = \{V_{n3}, V_{r3}, V_{t3}\}^T$ – проекции вектора скорости выброса изделия по нормали, радиусу и касательной к радиальному сечению изделия; $\varphi = \frac{2\pi k}{N_{cj}}$; k – порядковый номер изделия в j -м слое при нумерации против часовой стрелки от оси ОУ СвСК; $\mp$ – верхний знак следует использовать при выбросе изделия по часовой стрелке, нижний – при выбросе его против часовой стрелки.

Для переносного движения имеем:

$$\begin{aligned}\bar{P}_0^{(l)} &= A_1 \bar{P}^{(l)}; \\ \bar{P}^{(l)} &= m_3 \bar{V}_0 + \bar{P}^{(h)}.\end{aligned}$$

Проекция $P^{(h)}$ (количества переносного вращательного движения изделия) на оси СвСК имеют вид:

$$\begin{aligned}P_x^{(h)} &= 0; \\ P_y^{(h)} &= m_3 (\omega_z l_x - \omega_x R_j \sin \varphi); \\ P_z^{(h)} &= m_3 (-\omega_y l_x + \omega_x R_j \cos \varphi).\end{aligned}$$

Система дифференциальных уравнений, описывающих динамику СПС, здесь не приводится ввиду их громоздкости и наличия достаточного количества литературы.

В результате моделирования полета СПС для различных случайных ошибок вывода в район маяков, рассеивания из кассеты набирается массив расчетных данных в виде координат СПС в пространстве $\{x, y, z\}$. В соответствии с работой [26] рассчитываются характеристики закона распределения координат СПС по дальности и направлению (взаимной корреляцией по осям можно пренебречь), математическое ожидание, среднеквадратические отклонения, размах варьирования, центральные моменты 2-го, 3-го и 4-го порядка, показатели асимметрии и эксцесса.

Полученный закон проверяется на соответствие одному из перечисленных ниже законов: равномерному, нормальному, Релея, экспоненциальному, логарифмически-нормальному по критериям согласия Пирсона и Колмогорова [27].

Модель аппроксимации А-рядом Шарлье. В тех случаях, когда закон не согласуется ни с одним из стандартных законов, на основе полученных статистических характеристик проводится теоретическая аппроксимация закона распределения СПС, представленного в виде множества характеристик. Предполагая, что оценки 2-го, 3-го и 4-го порядка центральных моментов совпадают со значениями самих моментов, статистическое распределение может быть аппроксимировано А-рядом Шарлье [38]:

$$f(z_j) = 0,5 + 0,5\Phi(z_j) - \frac{A_j}{6}\varphi_2(z_j) + \frac{E_j}{24}\varphi_3(z_j) + \dots, \quad (2.12)$$

где $\varphi_2(z_j)$, $\varphi_3(z_j)$ – производные 2-го и 3-го порядка от нормальной плотности вероятности $\varphi(z)$;

$$z_j = \frac{j - M[j]}{\sigma_j}, \quad j = x \vee z.$$

Оценка точности выражения (2.12) проводится по первому отбрасываемому члену А-ряда Шарлье. Для рассматриваемой задачи рассеивания СПС после отстрела из кассеты оказывается достаточным первых трех членов разложения.

Нахождение закона распределения координат СПС в пространстве после выброса из кассеты есть разрешение прямой задачи (см. рис. 2.5).

На рис. 2.7 приведен пример гистограммы и дифференциального закона $f(z)$.

Решение обратной задачи рассеивания СПС представляет собой определение характеристик оптимального закона рассеивания СПС на момент начала поиска маяка по критерию минимума рассогласования между совместным законом рассеивания СПС всех кассет и эталонным законом, полученным на основе выводов и соотношений теории эффективности [28].

Математически задача представляет собой минимизацию выражения

$$D(F_3(x_3, z_3)) = \min_{\sigma_p} \left\{ \max_{x,z} | F(f_c(x_c, z_c), F_3(x_3, z_3)) - F^{\text{ЭТ}}(x, z) | \right\}, \quad (2.13)$$

где D – показатель критерия согласия Колмогорова; $F^{\text{ЭТ}}(x, z)$ – эталонный оптимальный закон рассеивания СПС; $F(f_c, F_3)$ – закон рассеивания СПС, полученный с учетом ошибок доставки носителем; $F_3(x_3, z_3)$ – искомый закон рассеивания СПС одной кассетой; $f_c(x_c, z_c)$ – закон рассеивания кассет на момент вскрытия.

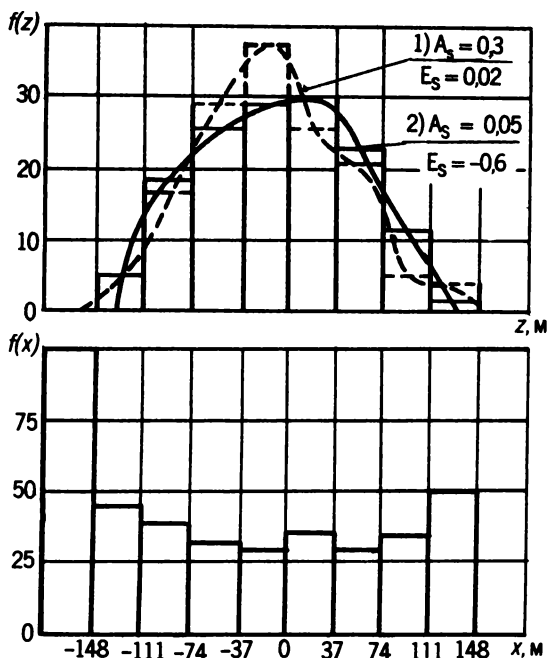


Рис. 2.7. Результаты расчета закона рассеивания СПС

($f(x)$, $f(z)$ – дифференциальные законы рассеивания СПС в пространстве по осям X , Z ; A_s – асимметрия; E_s – эксцесс)

В первом приближении эталонный закон при заданных радиусе зоны обзора R_ξ , расстоянии между маяками $\Delta \xi$, координатах наиболее удаленного маяка от центра системы координат ξ_m :

1. При $R_\xi \leq \frac{\Delta \xi}{2}$ $F^{\text{ЭП}}(\xi)$ совпадает с равномерным законом

$$f(\xi) = \begin{cases} \frac{1}{2\xi_m + 2R_\xi}, & -\xi_m - R_\xi \leq \xi \leq \xi_m + R_\xi, \quad \xi = x \vee z; \\ 0, & \xi < -\xi_m - R_\xi; \quad \xi > \xi_m + R_\xi. \end{cases}$$

2. При $R_\xi \leq 2\xi_m$ $F^{\text{ЭП}}(\xi)$ с вероятностью не менее 0,95 может быть аппроксимирован нормальным законом с математическим ожиданием $M(\xi) = 0$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma_\xi = \frac{1}{3}(\xi_m + R_\xi)$, где $\xi -$

координата крайнего единичного маяка при детерминированном распределении или координата середины интервала, в котором распределен крайний маяк.

3. При $R_{\xi} \rightarrow \infty$ закон $F^{\pi}(\xi)$ может быть аппроксимирован равномерным законом с вероятностью, близкой к 1.

Закон $F[f_c(x_c, z_c), F_3(x_3, z_3)]$ записывается в виде составляющих гистограмм [29] либо исходя из физических принципов процесса.

Функции, построенные этими двумя методами, имеют один и тот же вид. В связи с громоздкостью метода перемножения гистограмм приведем здесь второй вывод $F(\xi)$. Пусть дифференциальный закон распределения кассет на момент вскрытия есть $f_c(\xi_c)$, тогда интегральный закон распределения СПС из одной кассеты при условии попадания кассеты в интервал $(\xi_{ci}; \xi_{ci} + \Delta \xi_c)$ есть $F_3(\xi - \xi_c)$. Вероятность попадания кассеты в интервал $(\xi_{ci}; \xi_{ci} + \Delta \xi_c)$ есть $f_c(\xi_{ci}) \Delta \xi_c$. Тогда по формуле полной вероятности для закона распределения всех доставляемых СПС получим:

$$F(\xi_i) = \sum_{\Delta \xi_i} F_i(\xi - \xi_c) f_c(\xi_c) \Delta \xi_i.$$

Переходя к пределу при $\Delta \xi_i \rightarrow \infty$, получим:

$$F(\xi) = \lim_{\Delta \xi \rightarrow 0} F(\xi_i) = \int_{-\infty}^{\infty} F_3(\xi - \xi_c) f_c(\xi_c) d\xi_c. \quad (2.14)$$

Ввиду того что $f_c(\xi_c)$ есть нормальный закон, пределы интегрирования интеграла (2.14) можно заменить на $\pm 3\sigma_c$, где σ_c – СКО закона «доставки» кассет.

Далее, применяя подход, изложенный в § 2.1, приводим этот интеграл к виду, удобному для подстановки в формулу (2.13) для проведения дальнейшей ее оптимизации.

В частном случае при отсутствии корреляции по осям $F_3^{\text{opt}}(x, z) = F_3^{\text{opt}}(x) F_3^{\text{opt}}(z)$ можно применить однопараметрическую оптимизацию методом Фибоначчи [30]. Оптимизация проводится при задании интервалов:

$$0 \leq \sigma_p \leq \sigma_{\text{гр}}; -\xi_m - R_{\xi} < \xi < \xi_m + R_{\xi},$$

где ξ – случайная величина из датчика случайных чисел; $\sigma_{\text{гр}}$ – предельное значение величины σ_p .

Проверка правомочности выражения проводится следующим образом:

при $\xi \rightarrow -\infty$ $F_3(\xi - \xi_c) = 0$, следовательно, $F(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} 0 \cdot f(\xi_c) \times d\xi_c = 0$;

при $\xi \rightarrow \infty$ $F_3(\xi - \xi_c) = 1$, следовательно, $F(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} 1 \cdot f(\xi_c) \times$
 $\times d\xi_c = 1$;

при $\xi = \xi_c$ $F(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} F_3(0) f(\xi_c) d\xi_c = 0,5$.

Отсюда очевиден вывод, что функция $F(\xi)$ действительно является интегральным законом распределения с математическим ожиданием $M[\xi] = M[\xi_c]$. Подтверждение возможности поиска $F(\xi)$ в виде нормального закона можно получать при вычислении коэффициента корреляции законов $f(\xi_c)$ и $f(\xi)$:

$$f(\xi) = \frac{\partial}{\partial \xi} F(\xi) = \int_{-\infty}^{\xi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial}{\partial \xi} F(\xi - \xi_c) f(\xi_c) d\xi d\xi_c =$$

$$= \frac{1}{2\pi \sigma_c \sigma_p} \int_{-\infty}^{\xi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_p^2} (\xi - \xi_c)^2 \right] \exp \left[-\frac{\xi_c^2}{2\sigma_c^2} \right] d\xi d\xi_c.$$

После преобразований этого выражения и замены переменной $\xi^* = \xi_c \sqrt{\frac{\sigma_p^2}{\sigma_c^2 + \sigma_p^2}}$, не влияющей на значение коэффициента корреляции, получим [29, 31]:

$$f(\xi) = \frac{1}{2\pi \sigma_c \sigma_p \sqrt{1-r^2}} \int_{-\infty}^{\xi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[-\frac{1}{2\sqrt{1-r^2}} \left(\frac{\xi_c^2}{\sigma_c^2} - \frac{2r\xi_c\xi^*}{\sigma_c\sigma_p} + \frac{\xi^{*2}}{\sigma_p^2} \right) \right] d\xi_c d\xi^*.$$

где $r = \sigma_c / \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_p^2}$.

На основании расчетов на ЭВМ строятся таблицы для определения СКО рассеивания σ_p^{opt} и D_{max} в зависимости от радиуса зоны обзора ИБ, точностей доставки σ_c , размеров группы маяков x_m .

На рис.2.8 в качестве примера показаны результаты расчетов σ_p^{opt} при различных R , σ_c , x_m .

Результаты проверки модели расчета закона рассеивания СПС показаны на рис. 2.9, а (данные эксперимента, полученные на полигоне), а на рис. 2.9, б – вид законов $f(x)$ и $f(z)$, рассчитанных с помощью

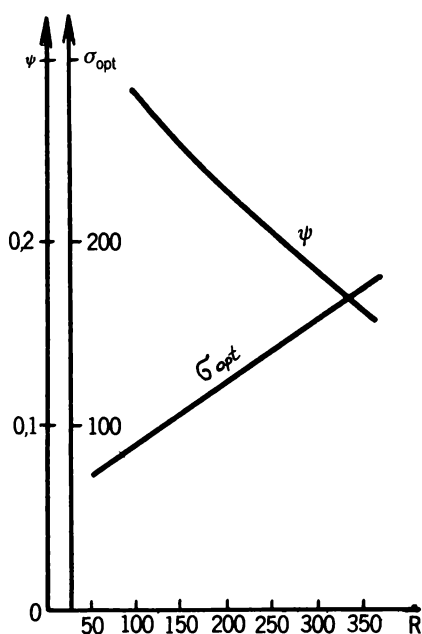
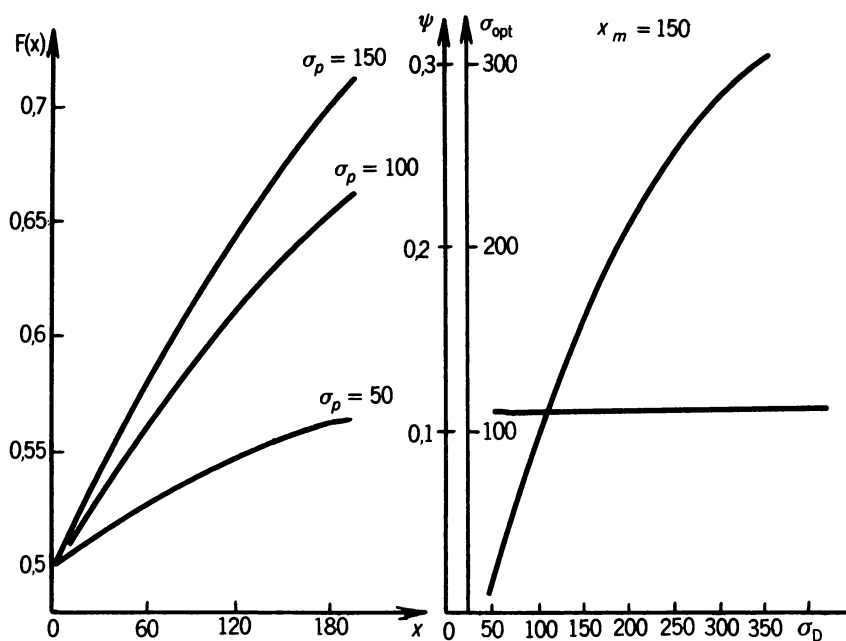


Рис. 2.8. Результаты оптимизации
 (Ψ – критерий оптимизации; σ_{opt} – оптимальное СКО закона рассеивания СПС в пространстве; $F(x)$ – интегральный закон рассеивания СПС по оси OX ; σ_c – СКО доставки СПС носителем; R – радиус зоны обзора ИБ СПС)

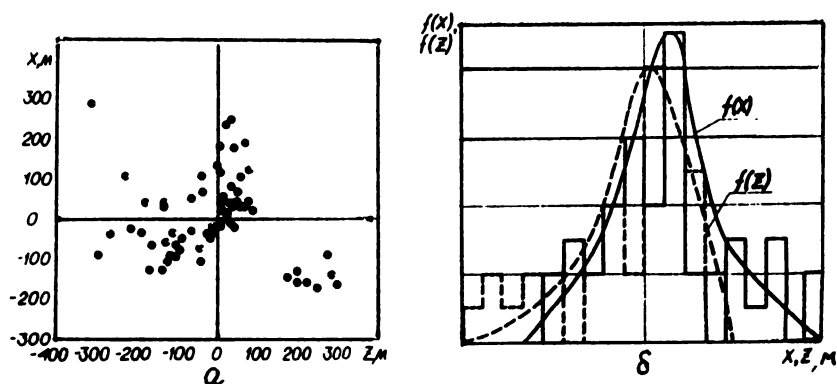


Рис. 2.9. Экспериментальное подтверждение достоверности модели:
 а – результаты испытаний; б – гистограмма и законы распределения $f(x)$, $f(z)$ –
 дифференциальные законы распределения по осям OX , OZ

модели. Отклонение теоретических и экспериментальных зависимостей составило менее 4 %.

2.3.2. Функция числа маяков в зоне обзора информационного блока

По названию функция числа маяков не является функциональным параметром СПС, однако ее важность для проведения расчетов по оценке функционирования СПС настолько очевидна, что авторы выделили описание математической модели расчета функции числа маяков в отдельный параграф.

После рассеивания СПС из носителя и стабилизации их полета начинается этап обнаружения маяков, находящихся в зоне обзора информационного блока (ЗО ИБ). На вероятность наведения на i -й маяк j -й СПС существенное влияние оказывают не только параметры СПС, но и число маяков (в том числе и ложных), находящихся в его ЗО. До настоящего времени учет этого влияния проводился методами статистического моделирования взаимного расположения СПС и маяков со случайным выбором маяка из нескольких в ЗО.

Особенностью данной математической модели является разбиение площади района посадки на участки, в пределах которых зависимость числа маяков в ЗО СПС от ее координат может быть записана аналитически. Эту зависимость назовем функцией числа маяков в ЗО СПС.

При выводе зависимости было принято допущение о возможности замены ЗО ИБ СПС прямоугольником со сторонами R_x , R_z , параллельными осям земной системы координат.

Целевая обстановка в общем случае может быть задана двумя способами:

координаты маяков детерминированы;

единичные маяки равномерно распределены внутри площади группы маяков.

Рассмотрим случай детерминированного задания координат маяков. Пусть в целевой системе координат (ЦСК) $C_M X_M Z_M$ расположено $m_x \times m_z$ единичных маяков, причем расстояния между маяками по осям $O_M X_M$ и $O_M Z_M$ одинаковы и равны Δx и Δz соответственно (рис.2.10). Тогда без ограничения общности рассуждений можно считать, что группа маяков симметрична относительно осей $O_M X_M$ и $O_M Z_M$.

Легко показать, что функция числа маяков в ЗО СПС ($N_M(x, z)$) может быть записана в виде

$$N_M(x, z) = N_M(x) \times N_M(z), \quad (2.15)$$

где

$$N_M(\xi) = \frac{1}{2} \sum E \left(\frac{2R_\xi}{\Delta \xi} \right) N_i(\xi) + \frac{1}{2} \sum_{m-E} \left(\frac{2R_\xi}{\Delta \xi} \right) N_j(\xi); \quad \xi = x \vee z;$$

$$N_i(\xi) = \frac{|\xi + \xi_m + R_\xi - \Delta \xi (i-1)|}{\xi + \xi_m + R_\xi - \Delta \xi (i-1)} - \frac{|\xi - \xi_m - R_\xi + \Delta \xi (i-1)|}{\xi - \xi_m - R_\xi + \Delta \xi (i-1)};$$

$$N_j(\xi) = \frac{|\xi + \xi_m + R_\xi - \Delta \xi \left(E \left(\frac{2R_\xi}{\Delta \xi} \right) + j - 1 \right)|}{\xi + \xi_m + R_\xi - \Delta \xi \left(E \left(\frac{2R_\xi}{\Delta \xi} \right) + j - 1 \right)} - \frac{|\xi + \xi_m - R_\xi - \Delta \xi (j-1)|}{\xi + \xi_m - R_\xi - \Delta \xi (j-1)};$$

ξ_m – координата крайнего (m -го) маяка по оси $O \xi$; R_ξ – полуразмер ЗО по оси $O \xi$; $\Delta \xi$ – расстояние между единичными маяками по оси $O \xi$.

В общем случае, когда группы маяков не являются симметричными относительно осей X_M и Z_M :

несимметричная группа маяков условно дополняется маяками до симметричной относительно осей $O_M X_M$ и $O_M Z_M$;

проводится расчет $N_M(x, z)$ по формуле (2.15);

$N_M(x, z)$ рассчитывается по формуле

$$N_M^*(x, z) = \sum_{\lambda=1}^{N_{\text{усл}}} N_{\text{ум}}(x_\lambda, z_\lambda),$$

где

$$N_{\text{ум}}(x_\lambda, z_\lambda) = \frac{1}{4} \left[\frac{|x - (x_\lambda - R_x)|}{x - (x_\lambda - R_x)} - \frac{|x - (x_\lambda + R_x)|}{x - (x_\lambda + R_x)} \right] \times$$

$$\times \left[\frac{|z - (z_\lambda - R_z)|}{z - (z_\lambda - R_z)} - \frac{|z - (z_\lambda + R_z)|}{z - (z_\lambda + R_z)} \right]; \quad (2.16)$$

$N_{\text{усл}}$ – число введенных условных маяков.

В формуле $N_M(\xi)$ первое слагаемое представляет собой $N_M(x, z)$ для случая, когда $R_\xi = K * \Delta \xi / 2$, где K – целое число; второе слагаемое определяет добавок к $N(x, z)$ при $\delta_\xi = R_\xi - K \frac{\Delta \xi}{2} \neq 0$, $\xi = x \vee z$.

Рассмотрим случай равномерного распределения маяков на площади $2x_m \times 2z_m$. Возможны следующие три случая:

$$\begin{aligned} \text{а) при } R_\xi < |\xi_m| \quad N(\xi) = & \frac{-\xi_m + R_\xi}{-\xi_m - R_\xi} \frac{I}{2\xi_m} \frac{m_\xi}{\xi} (\xi + \xi_m + R_\xi) + \frac{\xi_m - R_\xi}{-\xi_m + R_\xi} \frac{I}{2\xi_m} \frac{m_\xi R_\xi}{\xi} + \\ & + \frac{\xi_m + R_\xi}{\xi_m - R_\xi} \frac{I}{2\xi_m} \frac{m_\xi}{\xi} (-\xi + \xi_m + R_\xi); \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \text{б) при } R_\xi = |\xi_m| \quad N(\xi) = & \frac{0}{-\xi_m - R_\xi} \frac{I}{2\xi_m} \frac{m_\xi}{\xi + R_\xi} (\xi + \xi_m + R_\xi) + \frac{\xi_m + R_\xi}{0} \times \\ & \times \frac{m_\xi}{\xi_m + R_\xi} (-\xi + \xi_m + R_\xi); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{в) при } R_\xi > |\xi_m| \quad N(\xi) = & \frac{|\xi_m| - R_\xi}{-\xi_m - R_\xi} \frac{I}{2\xi_m} \frac{m_\xi}{\xi} (\xi + \xi_m + R_\xi) + \frac{-|\xi_m| + R_\xi}{|\xi_m| - R_\xi} \times \\ & \times m_\xi + \frac{\xi_m + R_\xi}{-|\xi_m| + R_\xi} \frac{I}{2\xi_m} \frac{m_\xi}{\xi} (-\xi + \xi_m + R_\xi), \end{aligned}$$

$$\text{где } I(\xi) = \frac{1}{2} \left(\frac{|\xi - a|}{\xi - a} - \frac{|\xi - b|}{\xi - b} \right) - \text{двусторонний прерыватель [32].}$$

Анализ формул (2.15), (2.16), (2.17) проведем на примере группы маяков: $x_m = 150$, $z_m = 150$, $N_M = 13$, $\Delta x = \Delta z = 100$, $R_x = R_z = 125$ м (рис. 2.10). Так как группа маяков несимметрична ($N_M = 13$), дополняем ее до симметричной, тогда $m_x = m_z = 4$, последние три маяка – псевдомаяки. Результаты расчетов показаны на рис. 2.11, где цифры в квадратах означают число маяков в зоне обзора ИБ СПС в данной точке на местности. $N_{\text{сред}}(x, z)$, рассчитанное для равномерно распределенной и детерминированной (с равными интервалами между единичными маяками) группы маяков в функции R ($R_x = R_z$), приведено на рис. 2.12, из которого видно, что кривые практически совпадают.

Таким образом, при использовании $N_M(x, z)$ расчет может быть проведен без потери точности по любой из формул (2.15) или (2.17), но при этом необходимо выбирать наиболее приемлемую для решения каждой конкретной задачи. (Например, при расчете интегралов вероятности приемлема непрерывная функция $N_M(x, z)$ вида (2.17), при расчете эффективности упрощенным способом – дискретная функция $N_M(x, z)$ вида (2.15)).

Введение функции $N_M(x, z)$ позволяет решить ряд задач гораздо более простым, нежели традиционными, способом. Так, разбиение площади группы маяков на участки с $N_M(x, z) = \text{const}$, как показано на рис. 2.11, позволяет избежать статистического моделирования при оценке эффективности СПС. Кроме того, решаются задачи определения

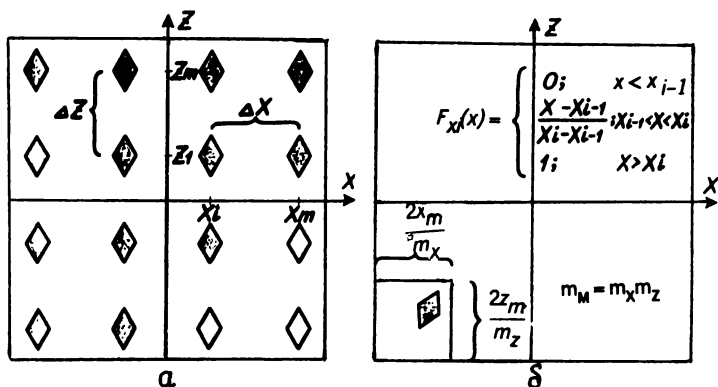


Рис. 2.10. Распределение маяков в районе доставки грузов:
 а – детерминированное; б – случайное (Δx , Δz – расстояния между маяками по соответствующим осям, $F_{X_i}(x)$ – закон распределения маяков по оси Ox , m_x , m_z – число маяков по соответствующим осям, x_m , z_m – максимальная координата маяков в группе)

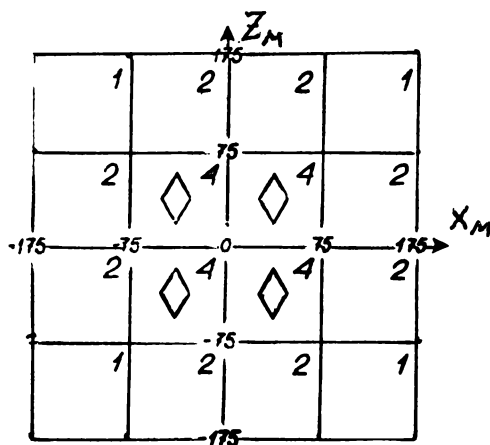


Рис. 2.11. Функция числа маяков при $R_x = R_z = 125$ м
 (x_M , z_M – оси целевой системы координат с началом в центре группы маяков, $\diamond$ – маяк)

вероятности выбора маяка при находящихся в 30 СПС, задача учета ложных маяков и т.п.

Следует иметь в виду, что при замене круга на квадрат погрешность расчетов составляет не более 10 %, что вполне допустимо на предварительных этапах исследования.

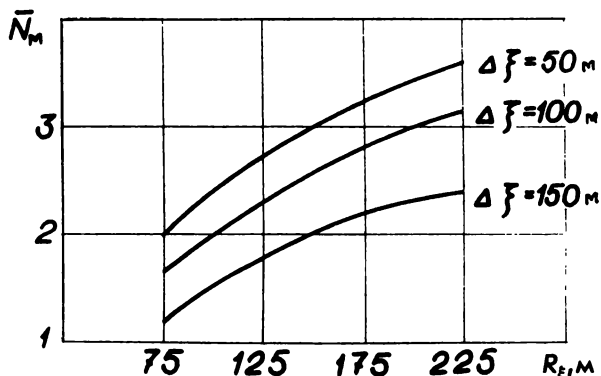


Рис. 2.12. Зависимость среднего числа маяков $\bar{N}_m$ от радиуса зоны обзора R_z ($\Delta \xi$ – расстояние между маяками в метрах)

В общем случае при использовании ЭВМ можно построить функцию $N_m(x, z)$ для любой конфигурации 30 СПС, используя понятие односторонних и двусторонних прерывателей [32].

2.3.3. Выбор параметров зоны обзора ИБ

Обобщенно схему функционирования СПС можно разбить на два этапа: доставка СПС к маяку и автономное функционирование платформы с грузом.

Пусть задача состоит в накрытии зоной обзора ИБ группы маяков, размещенных равномерно на площади; центр системы координат $O_m X_m Z_m$ совпадает с геометрическим центром группы маяков; ось $O_m X_m$ совпадает с направлением полета самолета; число единичных маяков равно N ; маяки распределены равномерно по площади группы.

Для оценки точности доставки СПС в район расположения используются вероятности попадания зоны обзора СПС на площадь группы маяков P_n .

Запишем соотношение между точностью доставки СПС к маяку и вероятностью правильного обнаружения истинного маяка на фоне помех путем оптимизации размеров зоны обзора СПС в условиях неопределенности ее схемы функционирования. Под неопределенностью схемы функционирования СПС понимается возможность реализации одной и той же зоны обзора при различных дальности обнаружения маяка датчиком (D), угле обзора датчика (φ), схеме организации процесса осмотра.

Пусть распределение СПС на высоте начала поиска маяка не коррелировано по осям $O_M X_M$ и $O_M Z_M$ и задано в общем случае интегральным законом $F(x, z) = F_X(x) F_Z(z)$, где $F_X(x)$, $F_Z(z)$ – интегральные законы по осям $O_M X_M$, $O_M Z_M$.

Тогда вероятность попадания зоны обзора ИБ СПС на площадь группы маяков

$$P_{\Pi} = [F_X(x_M + R_X) - F_X(-x_M + R_X)] [F_Z(z_M + R_Z) - F_Z(-z_M + R_Z)], \quad (2.18)$$

где R_X , R_Z – размеры зоны обзора ИБ.

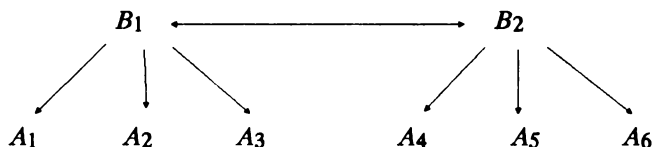
Проведем анализ выражения (2.18):

в общем случае вероятность P_{Π} является многопараметрической функцией, число параметров которой определяется точностью аналитического представления функций F_X , F_Z (например, рядами Эджворта, Шарлье, функциями Чебышева, Лежандра и т.п.); в общем случае законы F_X , F_Z определяются тремя группами ошибок доставки (см. рис.2.1);

уравнение (2.18) является монотонной функцией параметров X_M , Z_M , R_X , R_Z и моментов распределений F_X , F_Z первого и второго порядков.

Следовательно, оптимизация выражения (2.18) не может быть проведена ни по одному из перечисленных параметров.

Рассмотрим процесс поиска маяка. Полная группа событий, возможных в процессе обнаружения маяка при осмотре СПС элементом разложения его зоны обзора, имеет вид:



Здесь B_1, B_2 – срабатывание или несрабатывание ИБ в произвольный момент времени осмотра зоны обзора ИБ; A_1, A_2, A_3 – срабатывание ИБ по истинному маяку, фону, ложному маяку; A_4, A_5, A_6 – несрабатывание ИБ по истинному маяку, фону, ложному маяку.

Элемент разложения представляет собой квадрат со стороной R [34].

В соответствии с формулой Байеса вероятность события A_1 при условии осуществления гипотезы B_1

$$P(A_1/B_1) = \frac{P(A_1) P(B_1/A_1)}{P(A_1) P(B_1/A_1) + P(A_2) P(B_1/A_2) + P(A_3) P(B_1/A_3)}, \quad (2.19)$$

где $P(A_1)$, $P(A_2)$, $P(A_3)$ – вероятность того, что в произвольный момент времени в поле зрения датчика находятся соответственно истинный маяк, фон, ложный маяк [33]; $P(B_1/A_1) = P_{\Pi 0}$; $P(B_1/A_2) = P_{\Pi 1}$;

$P(B_1/A_3) = P_{\text{лм}}$ – вероятности срабатывания датчика маяка при попадании его в поле зрения соответственно истинного маяка, фона и ложного маяка.

По определению вероятности

$$P(A_1) = N_{\text{и}}/N_{\Sigma}; \quad P(A_2) = (N_{\Sigma} - N_{\text{и}} - N_{\text{л}})/N_{\Sigma},$$

$$P(A_3) = N_{\text{л}}/N_{\Sigma},$$

где $N_{\text{и}}, N_{\text{л}}$ – число истинных и ложных маяков в зоне обзора; $N_{\Sigma} = S_{\text{зо}}/S_{\text{пз}}$ – число полей зрения в зоне обзора ИБ; $S_{\text{зо}}, S_{\text{пз}}$ – площади зоны обзора и поля зрения датчика маяка.

Тогда выражение (2.19) примет вид:

$$P(A_1/B_1) = \frac{1}{1 + \left(\frac{N_{\Sigma} - N_{\text{л}}}{N_{\text{и}}} - 1 \right) \frac{P_{\text{лт}}}{P_{\text{по}}} + \frac{N_{\text{л}}}{N_{\text{и}}} P_{\text{лм}}}. \quad (2.20)$$

Из пункта 2.3.2 известно, что среднее число маяков в зоне обзора

$$\bar{N}_{\text{м}} = m \frac{R_x R_z}{(x_{\text{м}} + R_x)(z_{\text{м}} + R_z)},$$

тогда получим, что

$$N_{\text{и}} = \begin{cases} \bar{N}_{\text{м}} & \text{при } \bar{N} \geq 1; \\ 1 & \text{при } \bar{N} < 1. \end{cases}$$

При вероятности гипотезы B_1 в соответствии с приведенными в работе [34] данными имеем:

$$P(M) = 1 - (1 - P_{\text{по}})^{N_{\text{и}}} (1 - P_{\text{лт}})^{N_{\Sigma} - N_{\text{и}} - N_{\text{л}}} (1 - P_{\text{лм}})^{N_{\text{л}}}. \quad (2.21)$$

С учетом выражений (2.18), (2.20), (2.21) и допущения по эквивалентности маяков (единичные маяки имеют одинаковые признаки и обнаружение каждого равновероятно) введем функцию $\psi(R_x, R_z) = P_{\text{п}}^* P_{\text{по}} / N_{\text{и}}$ – вероятность попадания в зону обзора ИБ СПС заданного истинного маяка с последующим его обнаружением, причем

$$P_{\text{п}}^* = P_{\text{п}} P_{\text{п1}} \gamma; \quad P_{\text{по}} = P(M) P(A_1/B_1),$$

где

$$\gamma = \begin{cases} 1 & \text{при } \bar{N}_{\text{и}} \geq 1; \\ \bar{N}_{\text{и}} & \text{при } \bar{N}_{\text{и}} < 1; \end{cases}$$

$P_{\text{п1}}$ – вероятность попадания зоны обзора на площадь расположения заданного единичного маяка при условии попадания и на площадь группы;

$$P_{п1} = \frac{1}{m} \frac{(x_m + R_x m_x) (z_m + R_z m_z)}{(x_m + R_x) (z_m + R_z)}.$$

Введенный обобщенный показатель $\psi (R_x, R_z)$ является функцией, максимальное значение которой соответствует максимуму эффективности выполнения целевой задачи и может служить в качестве критерия для оценки доставки группы СПС. Это следует из непротиворечивости этого показателя общему согласию работе [8].

Таким образом, обобщенный показатель $\psi (R_x, R_z)$ характеризует именно эффективность СПС, наводимую на группу маяков (а не эффективность только информационного блока).

Этот показатель может быть оптимизирован по параметрам зоны обзора ИБ СПС – R_x, R_z , так как $P_{п}^* (R_x, R_z)$ с увеличением размеров зоны обзора монотонно возрастает, а $P_{по} (R_x, R_z)$ – монотонно убывает.

Для случаев, когда $F_x(x)$ и $F_z(z)$ можно считать нормальными с математическим ожиданием $M_x = M_z = 0$ и дисперсиями $\sigma_{\Sigma x}^2, \sigma_{\Sigma z}^2$, определяемыми точностью средств целеуказания, ошибками доставки и рассеивания СПС из кассет, функция примет вид:

$$\begin{aligned} \psi (R_x, R_z) = \frac{1}{N_n} \left[2\Phi \left(\frac{x_m + R_x}{\sigma_{\Sigma x}} \right) - 1 \right] \left[2\Phi \left(\frac{z_m + R_z}{\sigma_{\Sigma z}} \right) - 1 \right] \gamma \times \\ \times P(M) P(A_1 / B_1) P_{п1}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Поиск оптимальных значений R_x, R_z по критерию $\psi (R_x, R_z) = \max$ в общем случае аналитически невозможен. Поэтому проводится оптимизация выражения (2.22) с привлечением численных методов [30].

Возможны два случая:

при круговых зонах обзора ИБ ($R_x = R_z = R$) имеет место однопараметрическая оптимизация;

при зонах обзора, аппроксимируемых прямоугольником со сторонами $2R_x, 2R_z$, – двухпараметрическая оптимизация.

Однопараметрическая оптимизация может проводиться по методу Фибоначчи, двухпараметрическая – по методу Хука-Дживса [30].

Из рис.2.13, а видно, что зависимости вероятностей $P_{п1}, P_{п}^*$ являются монотонно возрастающими, а $P_{по} (R), P(M), P(A_1/B_1)$ – монотонно убывающими функциями. На рис.2.13, б приведены графики функции $\psi (R_x = R_z = R)$, из которых видно, что в общем случае функция ψ может иметь до трех локальных максимумов либо существует диапазон изменения R , при котором $\psi \approx \text{const}$. Во втором случае при оптимизации в качестве оптимальной выбирается левая точка данного интервала изменения R .

Методы Фибоначчи и Хука-Дживса позволяют отыскивать только один максимум функции, поэтому целесообразно использовать модифицированный метод, суть которого состоит в следующем:

отыскиваются интервалы вероятностного нахождения локальных максимумов;

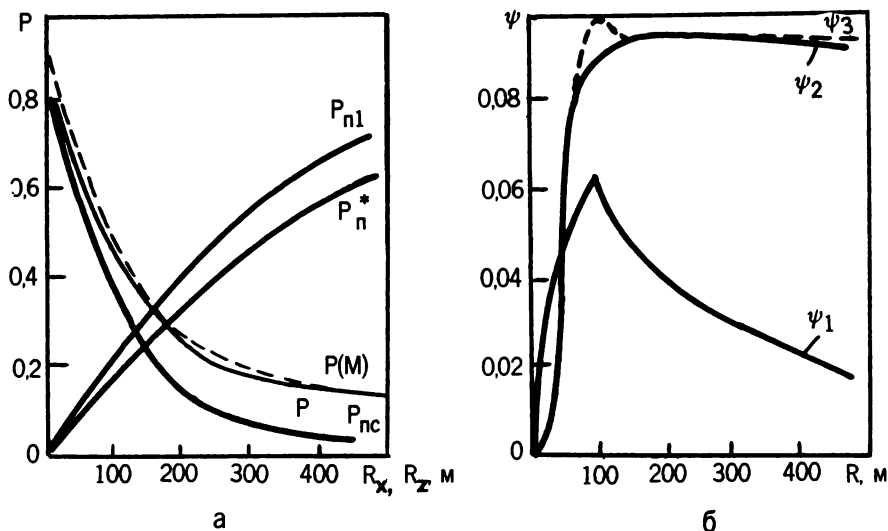


Рис. 2.13. Зависимости функции $\psi(R_x, R_z)$

(ψ – функционал эффективности для оптимизации радиуса зоны обзора ИБ; R, R_x, R_z – размеры зоны обзора ИБ; $P_{n1}, P_n^*, P(M), P_{пс}$ – составляющие критерия оптимизации – P ; ψ_1, ψ_2, ψ_3 – виды различных функционалов ψ)

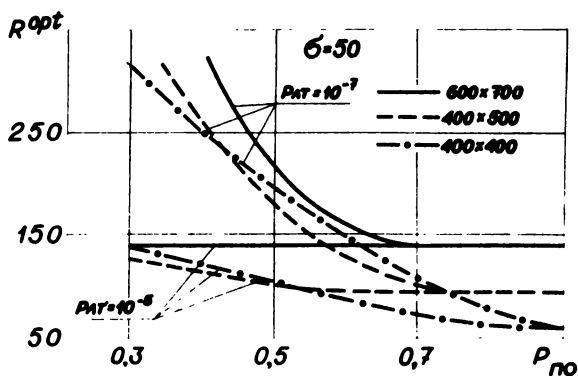


Рис. 2.14. Зависимости оптимального радиуса зоны обзора R_{opt}

(σ – СКО доставки СПС в район сброса грузов, $P_{по}$ – вероятность правильного обнаружения маяка, $P_{лт}$ – вероятность ложных тревог)

проводится оптимизация функции ψ в полученных интервалах; глобальный максимум выбирается путем сравнения локальных.

На рис. 2.14 приведены графики зависимостей оптимального радиуса R^{opt} от различных параметров: размеров группы маяков, точности доставки и др.

2.4. Вероятность выполнения целевой задачи. Статистическая модель оценки результатов исследований

2.4.1. Идеология статистической модели

Задачей статистической модели является определение следующих величин:

$МОП_{кас}$ – математического ожидания числа «потерянных» блоков касет, т. е. БК, ни одна из 30 СПС которых не накрывает маяк;

$МОП_{гр}$ – математического ожидания числа «потерянных» СПС, 30 которых не накрывают маяк, при условии, что БК, несущий эту СПС, не входит в число «потерянных»;

$МОП_{пр}$ – математического ожидания числа всех СПС, не накрывающих маяк 30;

$МОП_{30}$ – математического ожидания среднестатистического числа маяков, находящихся в 30 СПС, накрывающих зоной хотя бы один маяк, по определению $МОП_{30} \geq 1$;

$N_{ср}$ – среднестатистического числа 30, накрывающих один маяк.

Маяки, на которые наводится СПС, могут выбираться блоком управления в соответствии с заданной логикой (или на ближайшую, или удаленную от центра 30 и т. п.).

В модели реализовано шесть типов 30: окружность, эллипс, прямоугольник, одноциклическое ротирование, многоциклическое ротирование, произвольная. Модель разработана при следующих допущениях:

маяк представлен в виде точки (задание маяка в виде площадного объекта требует лишь большего машинного времени);

оси рассеивания СПС параллельны осям целевой системы координат.

Введем следующие множества:

$C = \{C_i\}$ – множество маяков, $\dim C = N_c$;

$S = \{S_i\}$ – множество блоков СПС, $\dim S = N_s$;

$E_c = \{e_i\}$ – множество СПС, $\dim E_c = N_e$;

$E_s = \{e_{si}\}$ – множество СПС в одном БК, $\dim E_s = N_{es}$.

Пусть начало системы координат $O_1 X'_M Z'_M$ находится в такой точке плоскости, что при любой ориентации группы маяков относительно $O_1 X'_M Z'_M$ координаты единичных маяков положительные и площадь расположения маяков имеет хотя бы одну общую точку с каждой из осей OX_M и OZ_M .

Представим площадь группы маяков в виде сетки параллельных прямых, причем множество координат центров прямоугольников сетки имеет вид, показанный на рис 2.15:

$$X_c : \left\{ x_i = \delta_{ox} + \delta_x \left(i - \frac{1}{2} \right), i = \overline{1, n_x} \right\};$$

$$Z_c : \left\{ z_j = \delta_{oz} + \delta_z \left(j - \frac{1}{2} \right), j = \overline{1, n_z} \right\};$$

где δ_x, δ_z – интервалы разбиения по осям OX_M, OZ_M соответственно; δ_{ox}, δ_{oz} – координаты нижнего левого угла прямоугольника группы маяков в системе координат $OX_M Z_M$ (в случае произвольной конфигурации маяк – это некоторая условная точка, координаты которой равны δ_{ox}, δ_{oz}).

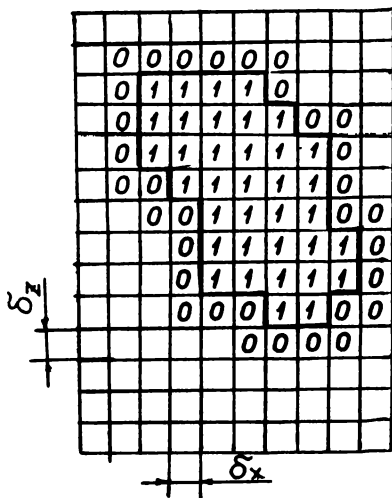


Рис. 2.15. Сетка разбиения площади маяков:
(δ_x, δ_z – интервалы дискретности по осям OX, OZ)

Соответствие множества номеров ЗО $\{M_{30}\}$ множеству номеров единичных маяков в составе группы проверяется следующим образом. Поставим в соответствие множеству два целочисленных множества $\{N_{cx}\}, \{N_{cz}\}$, $\dim N_{cx} = \dim N_{cz} = N_c$, причем $N_j = E \setminus \{\xi_j\} / \delta_\xi$, $i = \overline{1, N_x}, j = \overline{1, N_z}, \xi = x \vee z$.

Пусть S_{30k} – площадь зоны обзора K -й СПС, $K = \overline{1, N_l}$. Запишем выражение для определения l -й СПС множества $\{M_{30}\}$:

$$\{x_i, z_j\} \in S_{30, k} \wedge \{N_{cxl}, N_{czl}\} \equiv \{i, j\} \Rightarrow \{M_{30, l} = K\}; \quad (2.23)$$

$$\dim \{M_{30, l} n = \dim \{M_{30, l} n-1 + 1, \quad (2.24)$$

где $l = \overline{1, N_c}; \quad i = \overline{1, N_x}; \quad j = \overline{1, N_z}; \quad K = \overline{1, N_e};$
 $n_1 = \overline{1, (N_c N_x N_z, N_e)}; n \in n_1;$

$$\dim \{M_{30}, l\} = \dim \{K_{30}, l\}; \quad (2.25)$$

M_{30}, l – l -е подмножество множества M_{30} ; n_1 – номер итерации; K_{30}, l – число ЗО СПС, приходящихся на l -й маяк.

Из выражения (2.23) следует, что l -я СПС множества $\{M_{30}\}$ равна номеру K -й СПС, если координаты ЦМ (i, j)-го прямоугольника (i -я координата – по оси OX , j -я – по оси OZ) лежат внутри области и при этом одновременно номера прямоугольника в сетке, где расположен l -й маяк, совпадают с i и j .

Выражение (2.24) показывает, что размерность множества $\{M_{30}\}$ при n итерациях увеличивается каждый раз на единицу, если выполняется условие (2.23).

Из выражения (2.25) следует, что размерность множества $\{M_{30}, l\}$ – это число ЗО СПС, приходящихся на l -й маяк.

Множество маяков в ЗО i -й СПС рассчитывается следующим образом: для любого K , $K = \overline{1, N_e}$

$$\{C_{30}, k\} = K \cap \{M_{30}, l\}, \quad l = \overline{1, N_c}. \quad (2.26)$$

Из выражения (2.26) видно, что пересечение множества номеров маяков с номерами маяков, приходящихся на l -ю СПС, есть искомое число маяков в ЗО этой СПС.

Суммарные потери СПС находятся из выражения:

$$K_{\text{пот } \Sigma} = 1 - \dim U / N_l, \quad l = \overline{1, N_c}, \quad (2.27)$$

где $\{U\} = \bigcup_l \{M_{30}, l\}$ – объединение множества номеров СПС, соответствующих множеству номеров маяков. Относительное число маяков, которые накрываются зонами обзора СПС,

$$K_{\text{пм}} = n / N_c, \quad (2.28)$$

где

$$n = N_c - \dim \{ \dim \{M_{30}, l\} \} \equiv \{M_{30}, n = \emptyset\}; \quad (2.29)$$

$$\dim \{M_{30}, l\} = a_i : i \in \overline{1, N_c}, \dim \{M_{30}, i\} \neq 0, n = \overline{1, N_c}, l = \overline{1, N_c}.$$

Другими словами, n – это отношение числа маяков, попавших в ЗО хотя бы одного из СПС, к общему числу маяков в составе группы. Выражение (2.29) в первом приближении можно использовать для расчета доли маяков, не накрытых ЗО СПС.

В модели рассчитывается множество $\{NAKR\}$, распределение ЗО всех СПС по сети прямоугольников с координатами (x, z) . Если $\{x_i, z_j\} \in S_{30}, k$

при $i = \overline{1, N_x}, j = \overline{1, N_z}, k = \overline{1, N_e}$, то $\{NAKR_{ij}\}_{n1} = \{NAKR\}_{n1-1} + 1$, где $n1$ – номер итерации.

Значение $\{NAKR_{ij}\}$ означает число ЗО СПС, накрывших ij -й прямоугольник сетки. Реализуя множество $\{NAKR\}$ в графическом виде (например, на АЦПУ ЭВМ), можно получить наглядное представление о распределении ЗО СПС при заданных ошибках носителя и разведении СПС.

Расчет значения $K_{пот}$ гр осуществляется на основе анализа множества $\{C_{30}\}$.

Если

$$n: \left\{ \bigcup_j C_{30j} = \emptyset \right\} \Rightarrow K_{n1} = K_{n1-1} + 1; K_0 = \emptyset;$$

$$j = \overline{1, N_{es}}; n = \overline{1, N_e}, \quad (2.30)$$

то $K_{потг} = K_{n1} / N_s$.

Коэффициент, учитывающий потери собственно СПС, рассчитывается по формуле

$$K_{потгр} = 1 - \frac{1 - K_{потг}}{1 - K_{потг}}. \quad (2.31)$$

Расчет по формулам (2.23) – (2.31) при достаточном числе реализаций позволяет найти вероятностные характеристики, приведенные в

пункте 1.2.3. Например, $МОП_{кас} = \sum_{i=1}^{N_p} K_{потг_i} / N_p$, $МОП_{гр} = \sum_{i=1}^{N_p} K_{потгр_i} / N_p$ и т. д., где N_p – число реализаций.

2.4.2. Функция накрытия

При составлении комплекса программ закону распределения грузов была поставлена в соответствие функция накрытия H . Это дискретная функция, принимающая значения 0, 1, ..., n и характеризующая число ЗО, накрывающих единицу площади поверхности Земли.

Необходимость введения функции накрытия определяется, с одной стороны, невозможностью в общем случае решения аналитическими методами интегралов (1.1)–(1.5), с другой – большими затратами машинного времени при расчете этих интегралов численными методами.

В общем виде функция накрытия

$$H(i T_x, j T_z) = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} C_n^m [P(i T_x, j T_z)]^m [1 - P(i T_x, j T_z)]^{n-m} \times$$

$$\times f(i T_x, j T_z),$$

где $P(i T_x, j T_z)$ – вероятность попадания ЗО одного груза на единичную площадь с координатами $i T_x, j T_z$; f – плотность распределения ЗО; T_x ,

T_z – соответственно интервалы дискретности по осям OX_M, OZ_M ; i, j – соответственно порядковые номера интервалов разбиения поверхности Земли по осям OX_M, OZ_M .

При расчете всех приведенных выше величин следует иметь в виду, что площадь 30

$$S_j = f [h_0, L_j (x, z)],$$

где $L_j (x, z)$ – функция огибающей 30 i -го груза; h_0 – высота начала обзора ИБ.

На рис. 2.16 представлен частный случай накрытия маяков 30 четырех грузов. Для данного детерминированного случая МО заменяются соответствующими коэффициентами: $K_{пм} = 0,5$; $K_{пот} = 0,5$; $K_{пзо} = (2\alpha - \sin 2\alpha)/2$, где $\alpha = \arccos (a/2R)$; a – расстояние между центрами 30 грузов; R – радиус 30 одного груза.

Функция накрытия в этом случае имеет вид:

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

где число строк матрицы – это число разбиений по оси OZ_M ; число столбцов матрицы – число разбиений по оси OX_M .

Из матрицы видно распределение 30 грузов по заданной площади районов доставки.

На рис. 2.17 приведены зависимости обобщенных критериев от радиуса обзора ИБ (R), рассчитанные для частного случая.

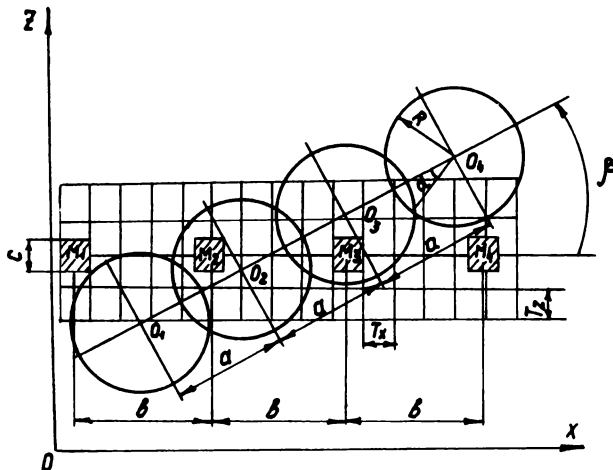


Рис. 2.16. Пример взаимного расположения маяков и зон обзора грузов

(β – угол наклона полета носителя к направлению на маяки, b – расстояние между маяками)

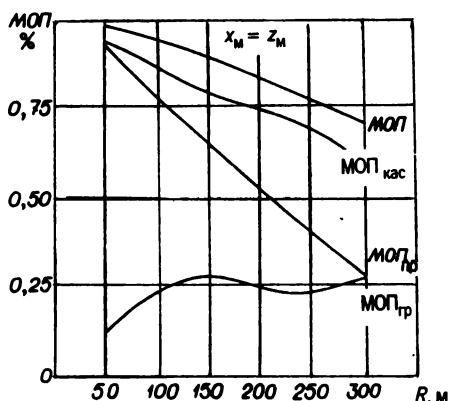


Рис. 2.17. Зависимости обобщенных критериев от радиуса зоны обзора ИБ СПС (МОП — математическое ожидание потерь; $x_M = z_M$ — полуразмеры группы маяков; МОП_{кас} — МОП грузов, обусловленных рассеиванием относительно точки прицеливания; МОП_{гр} — МОП грузов, обусловленных рассеиванием грузов блока кассеты)

Видно, что функция МОП (R) является монотонно убывающей, причем увеличение R на 100 м приводит к снижению МОП (R) на 12 %. При этом МОП_{гр} (R) снижается на 22 %, т. е. увеличение R приводит к снижению числа ЗО, приходящихся на единицу площади района доставки.

Функции МОП_{гр} (R) и МОП_{кас} (R) более чувствительны к значению R , чем МОП_Σ. При $R = 200$ м ($R = X_M = Z_M$) имеется перегиб функции МОП_{гр} (R) и МОП_{кас} (R), который означает, что при 150 м $< R < 200$ м более предпочтителен вариант меньшего числа кассет с большим числом элементов в кассете, чем наоборот. При 200 м $< R < 300$ м выигрывает вариант большего числа кассет с меньшим числом элементов в одной кассете (при неизменном числе грузов).

Сравнение альтернативных вариантов кассет, оснащенных грузами с ИБ, проводится следующим образом:

1. Для заданных альтернативных вариантов кассет рассчитываются обобщенные показатели МОП_{кас}, МОП_{гр}, МОП_{пр}, МОП_{зо}.

2. Проводится ранжирование вариантов по условию $МОП_{Σj} < < МОП_{Σ, j+1}$.

3. Для j -го варианта проводится проверка $МОП_{пр} > U_{зад}$, где $U_{зад}$ — заданный уровень доставки грузов. При невыполнении этого условия берется $(j+1)$ -й вариант.

4. При выполнении п.3 проводится проверка условия $МОП_{зо} \geq \ln(1 - U_{зад}) / \ln(1 - P_{гр})$.

5. Невыполнение п. 4 означает, что ни один из рассматриваемых вариантов не обеспечивает выполнения условий заказчика.

2.4.3. Оценка достоверности моделирования*

Достоверность имитационного моделирования динамики СПС определяется достоверностью воспроизведения входных сигналов и моделирования динамики управляемого полета.

Достоверность моделирования входных сигналов ИБ (изображения фоновой обстановки в заданном спектральном диапазоне) определяется точностью оценивания статистики характеристик полей яркости по результатам натурных измерений и адекватностью их воспроизведения в модели.

Для оценки достоверности моделирования динамики управляемого движения СПС необходимо ввести дополнительные критерии. По виду процессов в динамической системе критерии могут быть детерминированные, стохастические и минимаксные.

По объему использованной информации критерии можно разделить на локальные, позволяющие принять решение по мере сходства сигналов в системе и модели в фиксированные моменты времени, и распределенные, в которых используется мера близости процессов в системе и модели за все время функционирования. Важными локальными критериями являются терминальные, характеризующие точность воспроизведения сигналов в конечный момент времени.

Пусть процессы, описывающие движение СПС, характеризуются некоторым фазовым вектором $\bar{X}(t)$, $t \in [0, T]$, где T – время функционирования системы. В состав вектора $\bar{X}(t) = \{X_i(t), i = \overline{1, n}\}$ должны входить существенные для достижения цели моделирования процессы. Имеется модель, позволяющая воспроизводить реализации процессов $\bar{X}_m(t)$, соответствующих вектору функции $\bar{X}(t)$. Для исследования достоверности моделирования необходимо ввести меру близости процессов $\bar{X}(t)$, $\bar{X}_m(t)$ и записать решающее правило.

Рассмотрим математические критерии оценки достоверности моделирования.

1. Детерминированные критерии.

Локальный критерий имеет следующий вид:

$$\left| 1 - \frac{\|\bar{X}_m(t)\|}{\|\bar{X}(t)\|} \right| \leq \varepsilon, \quad t \in [0, T],$$

где ε – заданная точность. При $t = T$ критерий является терминальным.

Распределенные критерии основаны на мере близости двух функций и могут быть определены в виде

$$\max_{t \in [0, T]} \{\psi(t) |\bar{X}_m(t) - \bar{X}(t)|\} \leq \varepsilon; \quad (2.32)$$

* Пункт написан по материалам проф. А.С. Шалыгина.

$$\int_0^T \psi(t) [|\bar{X}_m(t) - \bar{X}(t)|]^T [|\bar{X}_m(t) - \bar{X}(t)|] dt \leq \varepsilon, \quad (2.33)$$

где $\psi(t)$ – весовая функция, имеющая вид $\psi(t) = \max_{t \in [0, T]} |\bar{X}(t)|$ для

$$(2.32) \text{ и } \psi(t) = 1 / \left(\int_0^T \bar{X}^T(t) \bar{X}(t) dt \right) \text{ или } \psi(t) = 1/T \text{ для (2.33).}$$

2. Стохастические критерии.

Локальный стохастический критерий может быть введен на основе проверки гипотезы о равенстве вероятностных характеристик случайных величин:

$$\chi_j = X(t_j) \text{ и } \chi_{\mu j} = X_m(t_j), \quad (2.34)$$

$$f_k(\chi_j) = f_k(\chi_{\mu j}), \quad k = \overline{1, K},$$

где k – индекс характеристики.

В качестве характеристик рассматриваются математическое ожидание, дисперсия, закон распределения вероятности. При статистической оценке характеристик решающее правило для проверки гипотезы (2.34) строится с учетом точности оценивания.

При $t_j = T$ и допущении о нормальности закона распределения конечного промаха СПС критерий (2.34) принимает следующий вид:

$$k = 2; \quad f_1(z) = M[z]; \quad f_2(z) = M[z^2];$$

$$M[\Delta] = M[\Delta_m]; \quad M[\Delta^T \Delta] = M[\Delta_m^T \Delta_m],$$

где Δ – случайная величина, характеризующая конечный промах; Δ_m – то же в модели.

Для распределенного стохастического критерия проверяются гипотезы о равенстве вероятностных характеристик случайных процессов в системе и в модели:

$$f_k[\bar{X}(t)] = f_k[\bar{X}_m(t)].$$

Правильный подход к выбору критериев оценки адекватности используемых моделей реальным условиям функционирования СПС является одним из решающих факторов при разработке оптимальных параметров технического облика подсистем платформы и СПС в целом.

2.5. Ранжирование оптимальных вариантов СТС

Существующие методы оценки вариантов СТС (метод Парето и др.) не всегда пригодны из-за необходимости принятия решения в условиях неопределенности, а также из-за того, что в большинстве случаев рассматриваются Парето-неоптимизируемые системы.

Предлагается методика оценки альтернативных вариантов СТС, основанная на использовании спектрального метода сравнения Парето-неоптимизируемых систем [35]. На основе данного подхода сделана попытка разработать методику комплексной оценки СТС по иерархической схеме с применением спектрального метода.

Применение предлагаемой методики возможно только при выполнении следующих условий:

альтернативные варианты СТС представляют собой набор характеристик СТС и их подсистем, полученных в результате либо решения задачи оптимизации (например, по критерию $R_{\Sigma} = \max$), либо экспертной оценки, либо летных испытаний, либо полунатурного моделирования СТС;

рассчитывается относительный показатель технического облика СТС, т.е. альтернативные варианты фактически ранжируются относительно друг друга (проводится качественная оценка альтернатив).

Предполагается, что выбор тактико-технических характеристик (ТТХ) СТС осуществляется из целевой задачи U .

Каждый альтернативный вариант можно характеризовать множеством частных и обобщенных показателей функционирования носителя с рассматриваемой СТС и множеством проектных $\{t_j\}$ и тактических $\{t_k\}$ параметров системы и ее подсистем. Выбор элементов данных множеств осуществляется так, чтобы изменение каждого из них в реальных диапазонах приводило к необходимости изменения остальных, причем новый вариант СТС при этом должен принадлежать выбранному множеству альтернатив. Такие характеристики в дальнейшем (в соответствии с терминологией [35]) будем называть существенными признаками системы.

При наличии набора существенных признаков системы спектральный метод сравнения позволяет получить ее относительную характеристику в виде комплексного показателя технического облика (КПТО).

Суть подхода заключается в следующем. Пусть каждый альтернативный вариант СТС представлен в виде матрицы-строки, элементами которой являются признаки системы. Основным условием при данном представлении является включение в матрицу-строку всех существенных признаков. Включение в матрицу признаков, вариации которых незначительно влияют на общий показатель эффективности системы (т.е. – «несущественных»), не изменяет конечный результат, а алгоритм предусматривает указание таких признаков по окончании решения задачи. Составляется двумерная матрица, строками которой являются указанные матрицы-строки признаков альтернатив, а столбцами – качественно одинаковые признаки различных альтернатив. Символом Π_i ($i = 1, m, k = 1, n$) обозначено значение признака для i -го альтернативного варианта A :

	$\Pi_1 \dots$	$\Pi_k \dots$	Π_n
A_1	$\Pi_{11} \dots$	$\Pi_{1k} \dots$	Π_{1n}
$\vdots$		$\dots$	
A_l	$\Pi_{l1} \dots$	$\Pi_{lk} \dots$	Π_{ln}
$\vdots$		$\dots$	
A_m	$\Pi_{m1} \dots$	$\Pi_{mk} \dots$	Π_{mn}

Разобьем условно множество $\{\Pi_{lk}\}$ на две группы признаков: в первую отнесем признаки, увеличение значений которых ведет к монотонному увеличению общего показателя эффективности U , во вторую – признаки, увеличение которых ведет к монотонному убыванию U . Признаки, значения которых оптимизированы на предварительных этапах исследований, также включаются в матрицу.

Проведем нормирование величин Π следующим образом:

для признаков первой группы

$$\Pi_{lk} = \frac{\Pi_{lk}}{\max_{l=1,m} \{\Pi_{lk}\}}, \quad k = \overline{1,n};$$

для признаков второй группы

$$\Pi_{lk} = \frac{\min_{l=1,m} \{\Pi_{lk}\}}{\Pi_{lk}}.$$

Сведя таким образом множество признаков к одинаковому качеству (0 – наихудший, 1 – наилучший, при возрастании Π_{lk} от 0 до 1 общий показатель эффективности системы возрастает), составим матрицу признаков.

Исходя из матрицы Π введем векторы $\bar{\omega} = (\omega_1, \dots, \omega_m)^T$ и $\bar{a} = (a_1, \dots, a_n)^T$, а весовые коэффициенты по строкам и столбцам в соответствии с работой [35] определим с помощью Т-преобразования:

$$\omega^* = T(\bar{a}); \quad \bar{a}^* = \tilde{T}(\bar{\omega}),$$

где

$$\left. \begin{aligned} T(\bar{a}) &= \Pi_{l1} a_1 + \dots + \Pi_{ln} a_n; \\ \tilde{T}(\bar{\omega}) &= \Pi_{lk} \omega_1 + \dots + \Pi_{mk} \omega_m; \\ a_l &= \sum_{k=1}^n \Pi_{lk}; \quad l = \overline{1, m}; \\ \omega_k &= \sum_{l=1}^m \Pi_{lk}; \quad k = \overline{1, n}. \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

Проведем нормирование векторов $\bar{\omega}$ и $\bar{a}$:

$$\bar{\omega}^* = \alpha \bar{\omega}; \quad \bar{a}^* = \beta \bar{a},$$

причем

$$\alpha = \frac{1}{\max_{l=1, m} \{\omega_l\}}; \quad \beta = \frac{1}{\max_{k=1, n} \{a_k\}}.$$

В соответствии с теоремой [27] пределами последовательности векторов

$$\begin{aligned} \bar{\omega}_1^*, \bar{\omega}_2^*, \dots, \bar{\omega}_\lambda^*, \dots, \\ \bar{a}_1^*, \bar{a}_2^*, \dots, \bar{a}_\lambda^*, \dots, \end{aligned}$$

где λ – номер итерации, являются:

$$\begin{aligned} \bar{\omega}_\lambda^* &= \bar{\omega}_{\lambda-1}^* = \{1, 1, \dots, 1\}^T; \\ \bar{a}_\lambda^* &= \bar{a}_{\lambda-1}^* = \{1, 1, \dots, 1\}^T. \end{aligned}$$

Отсюда следует критерий определения КПТО:
по строкам

$$R_{\text{стр}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |a_k^{(\lambda)} - a_k^{(\lambda-1)}|^2 < \varepsilon;$$

по столбцам

$$R_{\text{стб}} = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m |\omega_l^{(\lambda)} - \omega_l^{(\lambda-1)}|^2 < \varepsilon,$$

где ε – заданная точность сходимости итерационного процесса.

В соответствии с данным методом алгоритм расчета КПТО Парето-неоптимизируемых систем состоит в следующем:

1. Для множества альтернативных вариантов A_l ($l = \overline{1, m}$) и выбранного перечня существенных признаков P_k ($k = \overline{1, n}$) составляется матрица Π абсолютных величин признаков Π_{lk} .

2. Согласно правилу нормирования матрица Π сводится к матрице Π^1 .

3. Задается точность сходимости итерационного процесса.

4. По формулам (2.35) рассчитываются значения $\bar{\omega}$ и $\bar{a}$, причем результаты выводятся на ЭВМ в виде таблиц по вариантам и признакам.

Расчет КПТО проводится по числу характеристик $i = 2, 3, \dots, m$, где m – выбранное число признаков.

5. Проводятся анализ полученных результатов и ранжирование альтернативных вариантов по предпочтительности, а признаков – по «существенности», т. е. по степени влияния на конечный результат выполнения задачи.

6. Первые n_b вариантов выбираются в качестве приоритетных для конструкторской проработки, причем n_b определяется исходя из неформализуемых в настоящее время критериев, определяемых схемой функционирования носителя, наличием научно-технического задела, производственных мощностей и т.д.

7. В случае попадания в n_b традиционных СТС даются рекомендации о дальнейших путях развития данных систем.

Для определения места традиционных СТС во множестве альтернативных вариантов формируется таблица основных характеристик элементов и их подсистем с учетом прогноза по улучшению как характеристик СТС, так и их параметров.

Результаты работ по апробированию методики ранжирования альтернативных вариантов СТС показали, что в качестве критериев технического облика целесообразно принять следующие признаки: массу СТС, радиус зоны обзора ИБ R , вероятность ложных тревог $P_{лт}$, суммарную вероятность попадания на маяк одним элементом при условии нахождения маяка в зоне обзора P_{Σ} , критерий эффективности системы разведения F , относительную стоимость СТС (по сравнению с аналогом) $C_{СТС}$, степень технической реализуемости указанных характеристик по годам K_T .

Возможно ранжирование вариантов двух типов: 1-й – определение наиболее простой СТС по срокам ее технической реализуемости; 2-й – определение наиболее перспективного варианта, исходя из закладываемых в расчет прогнозных значений параметров и характеристик подсистем СТС.

В табл. 2.5 приведены критерии нормирования признаков матрицы Π для этих двух типов.

Разработанная на языке ФОРТРАН-IV программа для БЭСМ-6 и ПЭВМ позволяет выводить на печать матрицы результатов ранжирования признаков матрицы Π для определения качественного вклада i -й характеристики в общую эффективность СТС, а также результатов расчетов КПТО в зависимости от числа признаков матрицы (от 2 до n).

Т а б л и ц а 2.5

Критерий нормирования признаков матрицы П

Признак	Ранжирование признаков по критерию	
	технической реализуемости	перспективности варианта
Диаметр СТС	max	min
R	min	max
$P_{\text{лт}}$	max	min
P_{Σ}	min	max
ΔF	min	max
l	max	min
$C_{\text{стс}}$	min	min
K_T	max	max

Ниже приведена нормированная матрица признаков П (10×5).

$$\Pi = \begin{bmatrix} 0.1590 & 0.3060 & 0.3330 & 0.3850 & 0.1750 \\ 0.1690 & 0.2780 & 0.3330 & 0.3850 & 0.1750 \\ 0.1230 & 0.3350 & 0.3210 & 0.1830 & 0.2000 \\ 0.1800 & 0.3170 & 0.3210 & 0.6150 & 0.3750 \\ 1.0000 & 0.6060 & 1.0000 & 0.3850 & 0.1750 \\ 0.1980 & 0.3250 & 0.4500 & 0.3850 & 0.3750 \\ 0.2250 & 0.5700 & 0.1150 & 1.0000 & 0.7500 \\ 0.7700 & 1.0000 & 0.1550 & 0.1540 & 0.7500 \\ 0.1800 & 0.5430 & 0.0818 & 0.7230 & 1.0000 \\ 0.2390 & 0.5700 & 0.1100 & 0.3850 & 0.4500 \end{bmatrix}$$

В табл. 2.6 представлены результаты ранжирования (нагрузки по строкам), а в табл. 2.7 – вклады признаков в суммарную эффективность СТС (нагрузки по столбцам).

Т а б л и ц а 2.6

Результаты ранжирования (нагрузки по строкам)
(Число систем 10, максимальное число характеристик 5)

Число характеристик	Номер системы									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	0.268	0.256	0.268	0.285	0.869	0.299	0.465	1.000	0.426	0.471
3	0.314	0.305	0.309	0.323	1.000	0.376	0.390	0.815	0.349	0.394
4	0.416	0.407	0.338	0.509	1.000	0.469	0.714	0.766	0.576	0.489
5	0.456	0.447	0.390	0.623	0.980	0.578	0.970	1.000	0.931	0.635

Т а б л и ц а 2.7

Вклады признаков в суммарную эффективность СТС (нагрузки по столбцам)

Число характеристик	Номер характеристики				
	1	2	3	4	5
2	0.794	1.000			
3	0.835	1.000	0.710		
4	0.768	1.000	0.678	0.887	
5	0.714	1.000	0.601	0.908	0.936

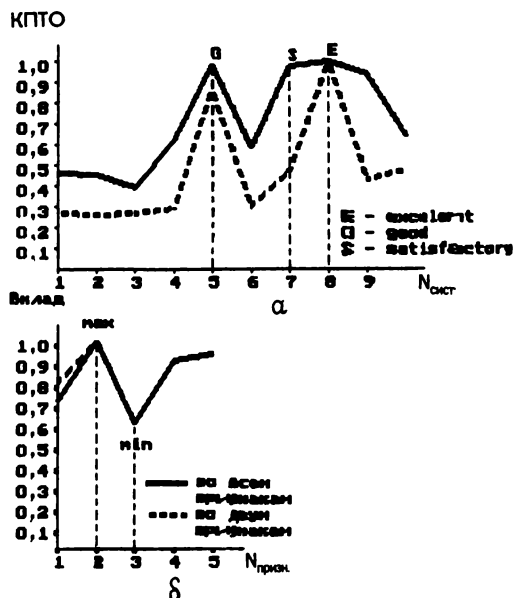


Рис. 2.18. Пример расчета КПТО

На рис. 2.18 представлены эти же результаты, но в графической форме. Из приведенных выше данных видно, что наилучшими системами являются СТС № 8 (КПТО = 1,0), № 5 (КПТО = 0,980) и № 7 (КПТО = 0,970).

Из рис. 2.18, б и табл. 2.7 следует, что наибольший вклад (1,0) вносит признак (характеристика) № 2, наименьший (0,601) – признак № 3. Результаты в табл. 2.6 и 2.7 приведены при числе признаков, меняющемся от 2 до 5 ($m = 5$).

Данный алгоритм может быть применен для решения различных задач, даже таких, как маркетинговые исследования [36].

2.6. Выбор путей развития СТС

Расчет параметров технического облика СТС можно формализовать в предположении, что рассматривается некий обобщенный класс СТС, имеющий одинаковые этапы функционирования (доставка носителем, разброс в пространстве, выбор маяка, наведение в заданную область пространства).

Используя приведенные в гл. 1 и 2 математические модели, можно рассчитать параметры отдельных подсистем СТС. В данном параграфе приводится перечень основных параметров (характеристик) на примере

СПС, которые можно считать интегральными характеристиками ТО СТС.

Системный подход к решению задачи выбора параметров СТС состоит в следующем:

рассчитываются требуемые характеристики СПС: n – число СПС в блоке (одновременно определяются число рядов и слоев компоновки, плотность упаковки, размеры системы вскрытия и разведения СПС), $F(x, z)$ – закон распределения СПС в пространстве после их разведения из блока, P_{Σ} – вероятность попадания в маяк при условии его нахождения в зоне обзора, R_{30} – радиус зоны обзора ИБ.

На втором уровне рассчитываются характеристики отдельных подсистем:

$P_{\text{по}}$ – вероятность правильного обнаружения;

$P_{\text{лт}}$ – вероятность ложных срабатываний ИБ;

$P_{\text{нав}}$ – вероятность наведения на маяк.

На последующих этапах рассчитываются характеристики каждой подсистемы СПС. Для СУ – это $F_{\text{поп}}(x, z)$ – закон распределения точек попадания в район маяка; $\sigma_{\text{поп}}$ – среднеквадратическая ошибка попадания (наведения); потребные и располагаемые перегрузки, тип и метод управления; типы исполнительных органов; состав измерений с ИБ и др.

На каждом этапе производится ранжирование альтернативных вариантов по методике, приведенной в § 2.5. На рис.2.19 и 2.20 приведены схемы выработки требований к СПС и подсистеме СПС (системе управления).

Из рис. 2.19 можно установить такую последовательность определения параметров ТО СТС.

1. Заполняется банк исходных данных по носителю, СПС, группе маяков, единичному маяку, ограничениям, условиям функционирования системы (метеорологическим и т.п.). Проверяется наличие в банке информации табличных данных, рассчитанных с помощью моделей (§ 2.1 и 2.3).

2. Рассчитываются точностные характеристики доставки СТС в район функционирования.

3. С помощью соотношения

$$\sigma_{\text{ЭТ}} = \sqrt{\sigma_{\text{ЭТ} \ x} \sigma_{\text{ЭТ} \ z}}$$

рассчитывается эталонная среднеквадратическая ошибка доставки, где $\sigma_{\text{ЭТ} \ i} = \frac{R_i + i_m (1 - 1/m_i)}{3}$, причем $i = x \vee z$, R_i – размер ЗО ИБ СПС по осям, i_m – максимальная координата m -го маяка в группе по оси i ($i = x \vee z$), m – число маяков по оси i .

4. С помощью номограмм или таблиц пункта 2.3.3 определяется оптимальное значение радиуса ЗО датчика маяка СПС – $R_{\text{опт}}$.

5. С помощью номограмм или таблиц пункта 2.3.1 рассчитывается оптимальное значение СКО рассеивания СПС в пространстве – $\sigma_{\text{опт}}$.

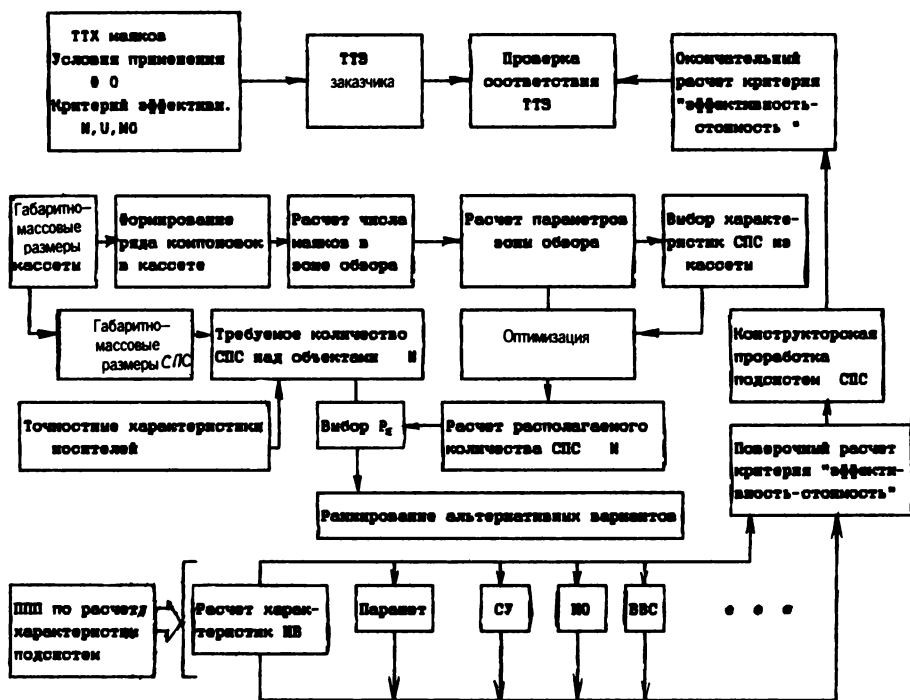


Рис. 2.19. Схема выбора параметров СПС

6. С помощью формул гл. 3 рассчитываются вклады. В случае нормального закона рассеивания СПС упрощенные формулы расчета вкладов имеют вид:

а) при расположении датчика маяка на СПС

$$P_i = \left[2\Phi \left(\frac{i_m + R_i + \sigma_{pi} K(N_k)}{\sigma_i} \right) - 1 \right]^2;$$

б) при расположении дополнительного датчика маяка на блоке кассет

$$P_{1i} = \left[2\Phi \left(\frac{i_m + R_{кас} + \sigma_{pi} K(N_k)}{\sigma_i} \right) - 1 \right]^2;$$

в) при наличии устройств коррекции БК по радиокомандам

$$P_i = \left[2\Phi \left(\frac{i_m + R_i + \sigma_{pki} K(N_k)}{\sigma_{pki}} \right) - 1 \right]^2,$$

где $K(N_k) = \arcsin \Phi(1 - 1/N_k)$; i_m – координата m -го маяка по оси i ($i = x \vee z$); R_i – размер ЗО датчика маяка по оси i ; σ_{pi} – СКО СПС по

оси i ; σ_i , σ_{pki} – суммарная среднеквадратическая ошибка доставки СПС в район функционирования или радиокоррекции; $\arg \Phi$ – функция, обратная интегралу вероятностей Φ .

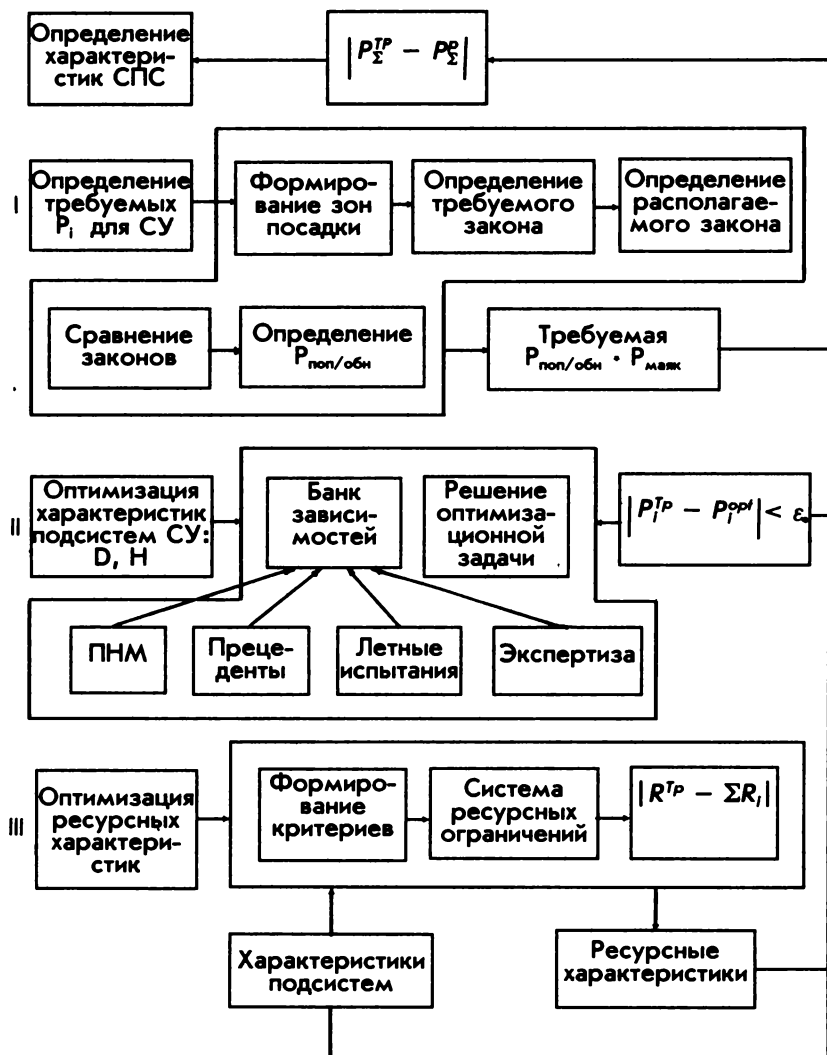


Рис. 2.20. Схема выбора параметров системы управления СПС

7. Рассчитывается расчетная величина СПС:

$$\Delta N_3^p = N_{\text{кас}} P_t P_{li}.$$

8. Рассчитывается потребное число СПС:

$$\Delta N_5^T = \Delta N_5^P (1 + \eta),$$

где η – заданный уровень потерь.

9. С использованием номограммы $\Delta N_5^T = f(P_\Sigma, R)$ (см. гл. 3) рассчитывается значение суммарной вероятности СПС (P_Σ).

10. На основе расчетов для различных значений числа СПС, числа маяков составляется таблица вариантов технических решений, которая ранжируется по способу, изложенному в § 2.5. По результатам ранжирования выбираются наиболее рациональные технические решения СПС, которые могут быть рекомендованы для последующих этапов реализации, проектирования, испытаний и т.п.

Для определения путей развития СТС необходимо построить матрицу возможных вариантов построений системы (штатных, нетрадиционных) и определить с помощью приведенной процедуры характеристики варианта.

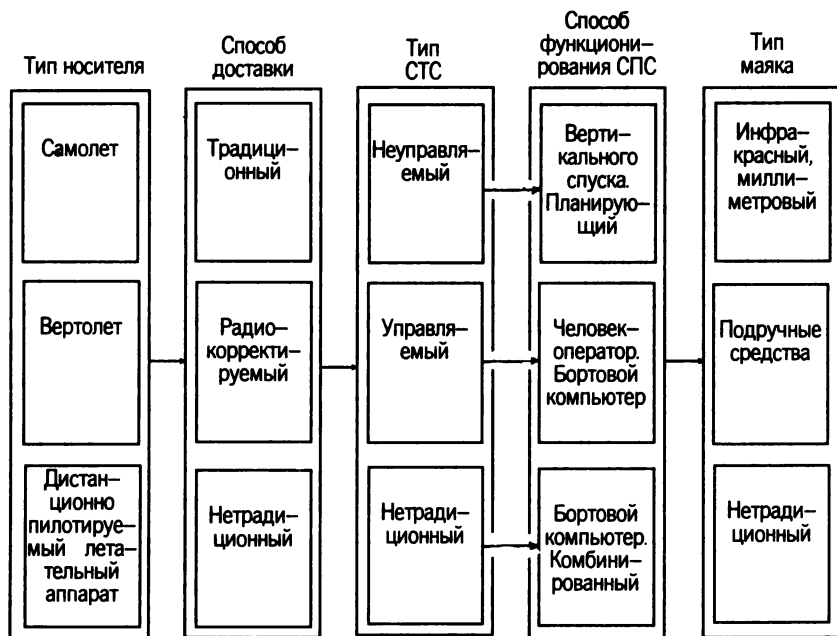


Рис. 2.21. Возможная схема построения альтернативных вариантов СТС

На рис. 2.21 показана возможная схема построения альтернативных вариантов СТС.

Составив матрицу параметров технических обликов альтернативных вариантов СТС и рассчитав с помощью ранжирования величины КПО

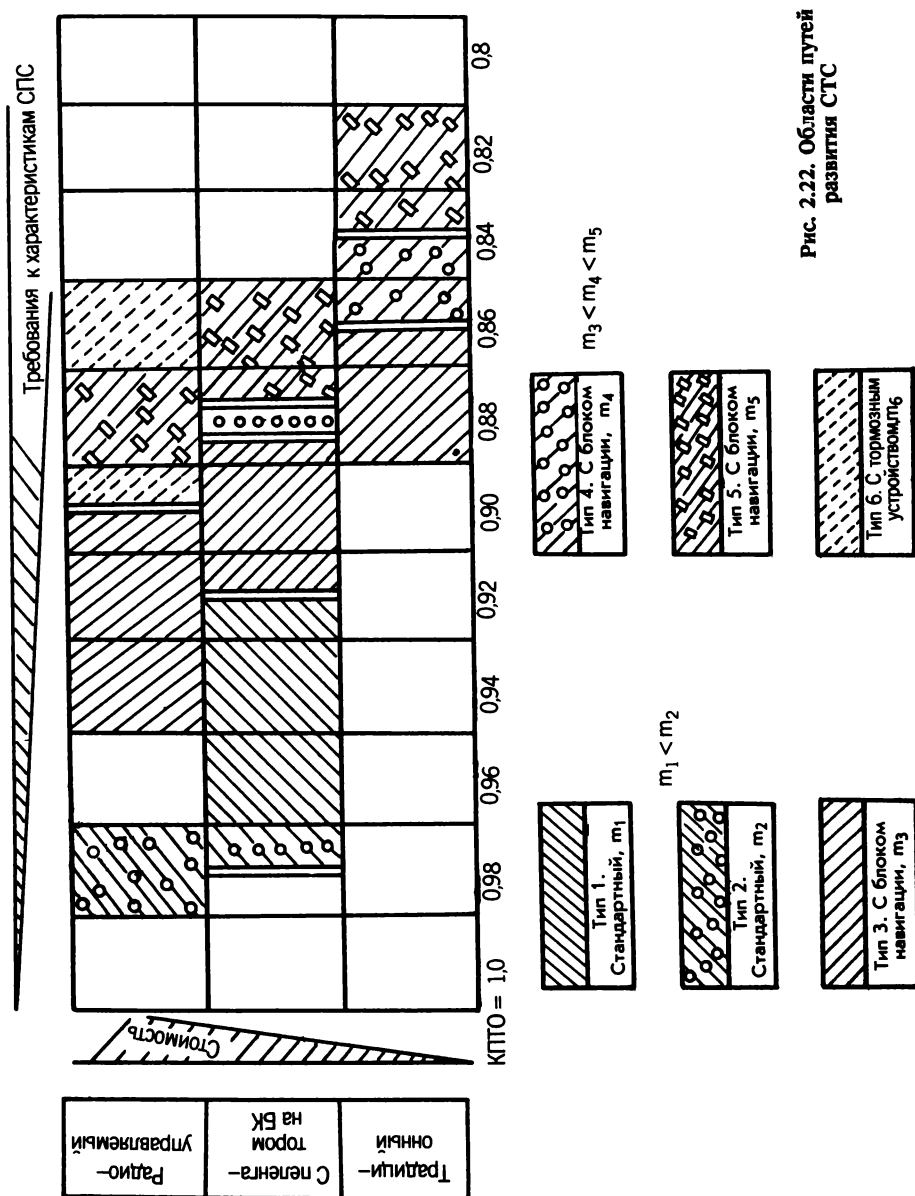


Рис. 2.22. Области путей развития СПС

(см. § 2.5), можно определить наиболее приоритетные направления развития СТС (на примере СПС).

На рис. 2.22 иллюстрируется пример построения путей развития СТС при ранжировании по шести параметрам: диаметру, длине, радиусу зоны обзора, суммарной вероятности, стоимости, числу СПС. Очевидно, наиболее перспективным является путь построения СПС с комбинированным датчиком маяка и средними габаритными размерами.

Анализируя такие графические представления путей развития СТС, можно выбирать наиболее приемлемые для реализации при наличии соответствующих технологий и элементной базы.

По вертикали графиков отмечены типы доставки грузов: традиционный, с дополнительным пеленгатором на блоке кассет, с радиоуправлением блока кассет.

Стрелками в виде клиньев указан рост требований к характеристикам СТС и ее стоимости.

Очевидно, что перспективные технологии при определенных стоимостях будут иметь преимущества перед традиционными способами реализации СТС.

В дальнейшем основной задачей перед потребителем будет разумное распределение имеющихся финансовых затрат и интегральных характеристик СТС.

Г л а в а 3. ПОНЯТИЕ ВКЛАДОВ СТС В ОБЩУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ ЦЕЛЕВОЙ ЗАДАЧИ

3.1. Понятие вкладов. Оценка СТС на основе вкладов

Влияние характеристик подсистем СТС на результат выполнения задачи оценивается на основании системного анализа, причем для количественной оценки этого влияния предлагается использовать понятие вкладов подсистем в общее число средств, используемых для выполнения целевой задачи. Вкладом i -й подсистемы СТС будем называть долю общего числа СПС, необходимого для выполнения данной задачи. При этом вклад является дополнением к общему критерию «эффективность – стоимость» и характеризует ту часть числа средств, которая теряется вследствие ошибок данной подсистемы.

На рис. 3.1 показана схема выполнения данной задачи, включающая в себя в качестве средств наведения СТС. Цифрами I–IV обозначены этапы данной задачи, цифрами 1–7 – подсистемы комплекса наведения. Этапом данной задачи называется условно выделяемая ее часть, выполняемая одной из подсистем СТС. Результатом выполнения этапа является решение промежуточной задачи [37, 38].

В случае наведения существующими носителями СТС задача разбивается на четыре этапа: пуск, доставка, вскрытие и разведение, наведение на маяк. Выполнение этих этапов обеспечивают подсистемы СТС: носитель, блок платформ, платформа с парашютом.

Определим вклады подсистем СТС, предназначенных для наведения на группу маяков с заданным МО. Исходными данными для наведения СТС будет являться информация (о месте расположения и типе маяков, погодных условиях), выдаваемая на командный пункт аэродрома с внешних устройств.

Так как средства целеуказания (ЦУ) не являются подсистемой СТС, то вклад, вызванный ошибками ЦУ ($\sigma_{цух}$, $\sigma_{цуз}$), примем за вклад нулевого этапа. Распределение ошибок, обусловленных характеристиками подсистем, будем считать нормальным законом, тогда условный

σ_{iz} подставляются значения σ_{nx} , σ_{nz} – СКО точности наведения, а для расчета вклада второго этапа аналогично подставляются значения СКО кучности наведения по осям ССК.

Для случая нормального закона распределения платформ в пространстве вклад третьего этапа также определяется по формуле (3.1) при $\sigma_{ix} = \sigma_{\text{разв } x}$, $\sigma_{iz} = \sigma_{\text{разв } z}$ – СКО платформ после их разведения.

Из композиции нормальных законов распределения следует, что совместный вклад нулевого, первого, второго и третьего этапов ΔN_{Σ} можно рассчитать по формуле (3.1) при

$$\sigma_{ix} = \sigma_{\Sigma x} = \sqrt{\sum_{j=0}^3 \sigma_{jx}^2}; \quad \sigma_{iz} = \sigma_{\Sigma z} = \sqrt{\sum_{j=0}^3 \sigma_{jz}^2}.$$

В связи с тем что условные вклады неаддитивны, их нормируют следующим образом:

$$\Delta N_i^H = \Delta N_i / \sum_{i=0}^3 \Delta N_i.$$

Тогда относительный вклад i -й подсистемы равен $\Delta \bar{N}_{0i} = \Delta N_i^H / \Delta N_{0\Sigma}$, а абсолютный вклад – $\Delta N_i = \Delta \bar{N}_{0i} N$.

Вклад четвертого этапа вычисляется по формуле

$$\Delta N_4 = N - \sum_{i=0}^3 \Delta N_i.$$

Если ошибки j -й подсистемы распределены по равномерному закону на интервале $(-l_j, +l_j)$ по каждой оси, $i = x \vee z$, то дифференциальный закон распределения платформы к началу следующего этапа имеет вид

$$f(x, z) = \frac{1}{16 l_x l_z} \left[\Phi \left(\frac{x+l_x}{\sigma_{\Sigma x}} \right) - \Phi \left(\frac{x-l_x}{\sigma_{\Sigma x}} \right) \right] \left[\Phi \left(\frac{z+l_z}{\sigma_{\Sigma z}} \right) - \Phi \left(\frac{z-l_z}{\sigma_{\Sigma z}} \right) \right]. \quad (3.2)$$

Выражение (3.2) получено при условии $m_x = m_z = 0$, что, однако, не приводит к потере общности результата.

При выполнении условия $l_i < 2\sigma_{\Sigma i}$, $i = x \vee z$ выражение (3.2) можно с относительной погрешностью не более 10 % заменить нормальным законом распределения [21]:

$$f(x, z) = \frac{1}{2\pi \tilde{\sigma}_{\Sigma x} \tilde{\sigma}_{\Sigma z}} \exp \left(-\frac{x^2}{2\tilde{\sigma}_{\Sigma x}^2} \right) \exp \left(-\frac{z^2}{2\tilde{\sigma}_{\Sigma z}^2} \right), \quad (3.3)$$

где $\tilde{\sigma}_{\Sigma i}^2 = \sigma_{\Sigma i}^2 + l_i^2/3$; $i = x \vee z$.

Подставляя найденные значения $\sigma_{\Sigma x}$, $\tilde{\sigma}_{\Sigma z}$ в формулу (3.1), находим вклад j -й подсистемы.

Порядок действий для определения влияния характеристик подсистем СТС на результат выполнения задачи заключается в следующем:

1) в соответствии с задачей и требованиями разработчика системы вводятся этапы функционирования системы;

2) рассчитываются условные вклады подсистем, обеспечивающих выполнение каждого этапа;

3) проводится нормирование условных вкладов и рассчитываются относительные и абсолютные вклады;

4) проводится анализ полученных вкладов на предмет выполнения данной задачи;

5) рассчитывается требуемое суммарное СКО $\sigma_{i \text{ треб}}$, позволяющее выполнить данную задачу с заданным числом СТС;

6) по результатам сравнения значения $\sigma_{i \text{ треб}}$ со значением σ_i подсистем ($i = \overline{0,3}$) дается заключение об изменении характеристик рассматриваемых подсистем;

7) при невозможности улучшения характеристик подсистем вводятся дополнительные этапы (радиокоррекция, самонаведение, автономная коррекция платформ и т.п.);

8) проводится поверочный расчет характеристик подсистем, реализующих введенную схему функционирования платформ с учетом дополнительных этапов (пп. 1–6).

Пример.

Пусть требуется доставить на площадь размером $(3000 \times 3000) \text{ м}^2$ с одним выбросом 12 блоков платформ по 10 платформ в каждом блоке (без управления). Пусть $\sigma_{цх} = \sigma_{цз} = 150 \text{ м}$; точка прицеливания – центр маяков; $\sigma_{нх} = 178 \text{ м}$; $\sigma_{нз} = 133 \text{ м}$; $\sigma_{кх} = 285 \text{ м}$; $\sigma_{кз} = 248 \text{ м}$; $\sigma_{разх} = \sigma_{разз} = 100 \text{ м}$. В этом случае в соответствии с формулой (3.1) получим значения вкладов подсистем СТС в общее число средств (табл. 3.1). Из таблицы видно, что из-за ошибок целеуказания, точности и кучности доставки теряется 72,2 % всех платформ. Наибольший вклад в суммарные потери приходится на второй этап (25 %). Следовательно, наибольший выигрыш от уменьшения значения СКО дает улучшение кучности попадания. Вклад четвертого этапа равен 5,6 %, а это означает, что 94,4 % неуправляемых платформ не попадают на данную площадь. Исходя из требуемого уровня попадания платформ определяются требования к платформе.

Т а б л и ц а 3.1
Величины вкладов подсистем СТС

Этап	Вклады этапов		
	условные ΔN_{α}	нормированные ΔN_{α}	абсолютные (ΔN_i) при числе неуправляемых платформ $N = 120$
0	0,881	0,238	28,56
1	0,865	0,234	28,08
2	0,926	0,250	30,00
3	0,822	0,222	26,64
4	0,207	0,056	6,72

Отметим, что данные выводы относятся лишь к конкретному примеру: попадание на заданную площадь блока неуправляемых платформ.

Таким образом,

$$\sum_{i=0}^4 \Delta \bar{N}_{oi} = 1 ; \quad \sum_{j=0}^4 \Delta N_j = N = 120.$$

Распространяя понятие вкладов (§ 3.1) на общий случай, можно записать выражение вклада i -й подсистемы B_i ($i = \overline{1, n}$ – номер подсистемы СТС) в виде

$$B_i = \left\{ 1 - \left[2 \int_{-\infty}^{x_m/\sigma_{ix}} f_{xi}(z_1) dx - 1 \right] \left[2 \int_{-\infty}^{z_m/\sigma_{iz}} f_{zi}(z_2) dz - 1 \right] \right\} \times \\ \times \frac{\left\{ 1 - \left[2 \int_{-\infty}^{x_m/\sigma_{\Sigma x}} f_{x\Sigma}(z_1) dx - 1 \right] \left[2 \int_{-\infty}^{z_m/\sigma_{\Sigma z}} f_{z\Sigma}(z_2) dz - 1 \right] \right\}}{\sum_{j=1}^n \left\{ 1 - \left[2 \int_{-\infty}^{x_m/\sigma_{jx}} f_{xj}(z_1) dx - 1 \right] \left[2 \int_{-\infty}^{z_m/\sigma_{jz}} f_{zj}(z_2) dz - 1 \right] \right\}}, \quad (3.4)$$

где x_m, z_m – полуразмеры зоны попадания на объект; σ_i – СКО i -й подсистемы; σ_{Σ} – суммарная СКО системы; $f_i(\cdot)$ – дифференциальный закон распределения случайных ошибок.

Выражение (3.4) получено в предположении, что объект симметричный. В случае несимметричности выражение будет иметь более сложный вид.

На практике обычно ограничиваются рассмотрением случаев, когда f_i представляет собой нормальный закон распределения, причем наиболее простой случай, когда $\sigma_{ix} = \sigma_{iz} = \sigma_i$ и справедлив принцип композиции. Такие допущения позволяют построить таблицы для расчета вкладов и номограммы.

3.2. Чувствительность вкладов к параметрам СТС

Оценка точности вкладов подсистем СТС проводится с помощью теории чувствительности, изложенной в работе [17]. Как известно, частные производные $\partial \psi_i(t, \bar{\alpha}) / \partial \bar{\alpha}$ называются функциями чувствительности первого порядка величины ψ_i по соответствующим параметрам, при этом предполагается, что производные существуют.

Оценка СТС невозможна без определения чувствительности вкладов подсистем к изменению их характеристик. Задача состоит в том, чтобы определить чувствительность первой функции вкладов подсистем СТС

к изменению характеристик i -й подсистемы в точке, определяемой конкретным набором характеристик подсистем СТС.

Для решения данной задачи необходимо в общем случае построить матрицу чувствительности

$$M_B = \begin{bmatrix} \frac{\partial B_1}{\partial x_1} & \frac{\partial B_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial B_1}{\partial x_n} \\ \cdot & & & \\ \cdot & & & \\ \cdot & & & \\ \frac{\partial B_n}{\partial x_1} & \frac{\partial B_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial B_n}{\partial x_n} \end{bmatrix},$$

тогда чувствительность i -го вклада к изменению характеристик подсистем СТС может быть определена как произведение матриц:

$$M_x = M_B \bar{X}, \quad \bar{X} = \{x_1, \dots, x_n\}^T,$$

а для конкретных характеристик СТС

$$M_x^0 = M_B \bar{X}^0, \quad \bar{X}^0 = \{x_1^0, \dots, x_n^0\}^T.$$

Рассмотрим расчет матрицы M_B для простого случая. На основании изложенного в § 3.1 и 3.2 запишем выражение для расчета вкладов подсистем в виде

$$B_\Sigma = 1 - \left[A \left(x / \sigma_\Sigma x \right) \right]^2;$$

$$P_i = 1 - \left[A \left(x / \sigma_i \right) \right]^2,$$

где $A(\cdot)$ – вероятность прихода СПС на площадь $(x + R)$ $(x + R)$. Такое представление справедливо для симметричной группы маяков при круговых ошибках доставки. Тогда можно показать, что

$$\frac{B_i}{\sum_{j=1,4}^4 P_j} = \frac{P_i}{B_\Sigma},$$

причем считаем

$$B_{30} = B_{4-1} - B_\Sigma;$$

$$B_{4-1} = 1 - \left[A \left(\frac{x_m + R_{30}}{\sigma_\Sigma x} \right) \right]^2,$$

где B_{30} – вклад от зоны обзора информационного блока СПС; R_{30} – радиус ЗО ИБ; $A \left(\frac{x_m + R_{30}}{\sigma_{\Sigma x}} \right) = 2\Phi \left(\frac{x_m + R_{30}}{\sigma_{\Sigma x}} \right) - 1$ – для симметричной группы маяков.

Введем функцию вклада

$$F_B = 4 \left[\Phi \left(\frac{x_m}{\sigma_x} \right) - 1 \right] \frac{x_m}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{x_m^2}{2\sigma_x^2} \right),$$

а также обозначим

$$\chi_j = \frac{1}{\sigma_j} \frac{B_j}{B_{\Sigma}} \left[\frac{\sigma_j^2}{\sigma_{\Sigma}^2} F_B \left(\frac{x_m}{\sigma_j} \right) - \frac{B_j}{P_j} F_B \left(\frac{x_m}{\sigma_j} \right) \right], \quad j = 1, 2, 3.$$

Для диагональных элементов матрицы M_B после дифференцирования получим:

$$M_{i,i} = \frac{1}{\sigma_i} \frac{B_i}{P_i} F_B \left(\frac{x_m}{\sigma_i} \right) + \chi_i, \quad i = 1, 2, 3;$$

$$M_{4,4} = -\frac{F_B \left(\frac{x_m + R_{30}}{\sigma_{\Sigma}} \right)}{x_m + R_{30}}; \quad M_{5,5} = -A \left(\frac{x_m + R_{30}}{\sigma_{\Sigma}} \right),$$

где F_B – функция вкладов (рис. 3.2); $\tilde{x} = x/\sigma$ – нормированная величина x .

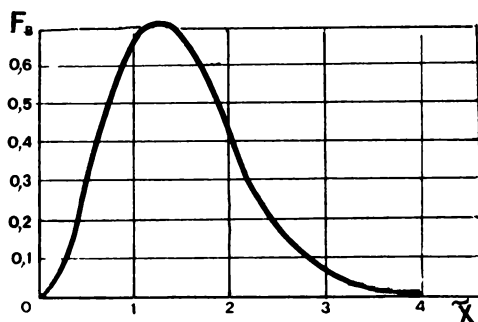


Рис. 3.2. Функция вкладов F_B ($\tilde{x}$ – относительная переменная)

Для оставшихся элементов матрицы M_B аналогично получим:

$$M_{i,j} = \frac{\partial B_i}{\partial \sigma_j} = \frac{P_i}{P_j} \chi_j, \quad i, j = 1, 2, 3;$$

$$M_{i,j} = - (1 - P_{\Sigma}) \frac{\sigma_j}{\sigma_{\Sigma}^2} F_B \left(\frac{x_m + R_{\Sigma 0}}{\sigma_{\Sigma}} \right), \quad i = 5, j = 1, 2, 3;$$

$$M_{i,j} = \frac{\sigma_j}{\sigma_{\Sigma}^2} \left[F_B \left(\frac{x_m + R_{\Sigma 0}}{\sigma_{\Sigma}} \right) - F_B \left(\frac{x_m}{\sigma_{\Sigma}} \right) \right], \quad i = 4, j = 1, 2, 3;$$

$$M_{i,j} = 0, \quad i = 4, 5, j = 1, 2, 3.$$

Функция вкладов позволяет рассчитывать коэффициенты матрицы чувствительности оперативно и точно. Для этого необходимо рассчитать входной относительный параметр и посмотреть результаты либо на графике рис. 3.2, либо в соответствующей таблице.

3.3. Последовательность действий по использованию вкладов

Введение понятия вкладов в процесс исследования СТС позволяет решить следующие задачи:

оценить степень влияния функционирования i -й подсистемы СТС на степень выполнения конечной задачи; расчетом вкладов всех подсистем СТС формируются возможные пути коррекции схемы функционирования СТС за счет изменения параметров наиболее «слабых» подсистем;

оценить чувствительность СТС к изменению тех параметров, которые являются основными с точки зрения характеристики функционирования i -й подсистемы;

провести аналитическую оценку технического решения конкретной СТС на предмет выполнения требований по эффективности.

Первые две задачи рассмотрены в предыдущих параграфах этой главы. Для решения третьей задачи необходимо ввести понятие ΔN_5 – число СТС, приходящихся на последний заключительный этап (см. рис. 3.1), которое фактически и определяет степень выполнения поставленной задачи.

С одной стороны, из § 3.2 и 3.3 следует, что выражение для ΔN_5 можно записать в виде: $\Delta N_5 = N (1 - B_k)$, где B_k – вклад последнего этапа. Будем называть $\Delta N_5 = \Delta N_5^p$ располагаемым числом СПС. С другой стороны, ΔN_5 есть функция параметров информационного блока, системы управления, заданной эффективности, схемы расположения маяков:

$$\Delta N_5^T = f(P_{\Sigma}, \{C_l\}, U^*) \quad \text{при } R^{\text{opt}}, \sigma^{\text{opt}},$$

где P_{Σ} – суммарная вероятность попадания СПС в район расположения маяка; $\{C_l\}$ – множество характеристик маяков; U^* – заданная эффективность выполнения задачи; $R^{\text{opt}}, \sigma^{\text{opt}}$ – оптимальный радиус зоны обзора ИБ и оптимальное значение СКО рассеивания СПС из блока платформ.

Назовем ΔN_5^T потребным числом СПС, т.е. обеспечивающим выполнение заданной эффективности.

Очевидно, что отношение $\Delta N_5^P / \Delta N_5^T > 1$; только в этом случае обеспечивается гарантированное выполнение задачи. Значение гарантии может задаваться потребителем СПС:

$$\Delta N_5^P = \Delta N_5^T (1 + \eta),$$

где η – величина гарантии.

На рис. 3.3 показаны зависимости ΔN_5^P от числа доставляемых СПС (N_k), числа носителей (N_n), относительной ошибки доставки $(\xi_m + R_\xi) / \sigma_\xi$, где ξ_m – полуразмер площади расположения маяков; R_ξ – радиус зоны обзора ИБ; σ_ξ – СКО доставки; $\xi = x \vee z$.

На рис. 3.4. представлены изономы $\Delta N_5^T (P_\Sigma, R) = \text{const}$ при $2 \xi_m = 400$ м; $\xi = x \vee z$.

Таким образом, последовательность расчета оптимального значения ΔN_5^P имеет вид

$$\Delta N_5^P \rightarrow \eta \rightarrow \Delta N_5^T \rightarrow P_\Sigma.$$

По заданным значениям N_k , N_n , ξ , R_ξ , σ_ξ ($\xi = x \vee z$) рассчитываются $\frac{\xi + R_\xi}{\sigma_\xi}$, ΔN_5^P . Согласно методике, описанной в пункте 2.3.3, рассчитывается R^{opt} , а в соответствии с методикой, описанной в пункте 2.3.1, – σ^{opt} , затем из рис. 3.4 рассчитывается значение P_Σ .

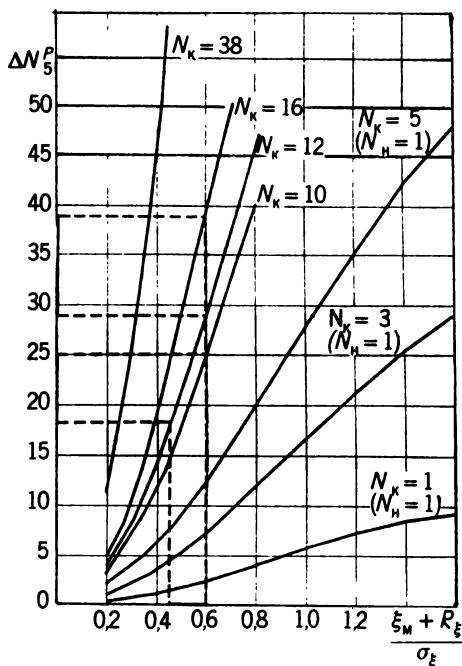
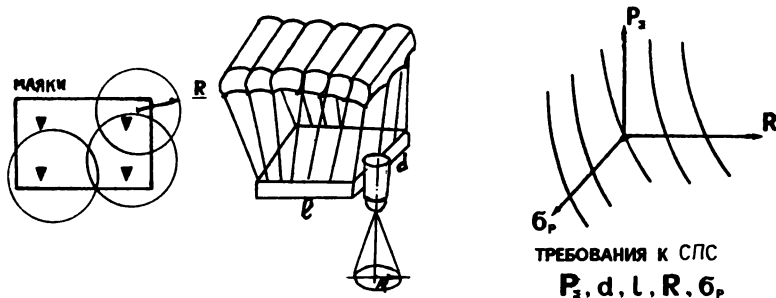
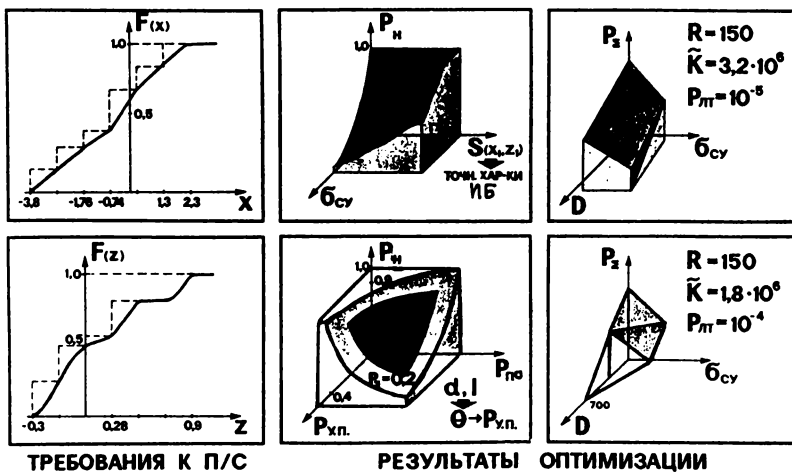


Рис. 3.3. Зависимости числа располагаемых СПС ΔN_5^P от относительной ошибки доставки (N_n – число носителей; ξ_m – координата маяка; R_ξ – радиус зоны обзора; σ_ξ – точность доставки СПС)

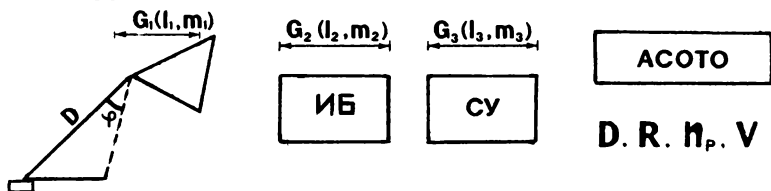
АНАЛИЗ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ



ПРОЕКТНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СПС



ДИАПАЗОНЫ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ



Пример.

1. Задано: $\frac{\xi + R_k}{\sigma_k} = 0,66$; $N_k = 5$; $N_H = 1$.

2. Из рис. 3.3 получаем $\Delta N_5^p = 15$.

3. Задано $\sigma = 300$ м; $P_{по} \approx 0,7$; $P_{лт} = 10^{-5}$; $2\xi_m = 400$ м.

4. Согласно пункту 2.3.3 получаем $R^{opt} = 150$ м.

5. Из рис. 2.7 (пункт 2.3.1) имеем $\sigma_p^{opt} = 130$ м.

6. Из рис. 3.4 (гл. 3) при величине гарантии $\eta = 0$ получаем $P_\Sigma = 0,65$.

7. Изменяя число носителей с $N_H = 1$ на $N_H = 2$, имеем $P_\Sigma = 0,36$.

Таким образом, для доставки пяти СПС одним самолетом в район маяков, расположенных равномерно на площади 400×400 м, необходимо обеспечить радиус зоны обзора ИБ не менее 150 м, рассеивание СПС в пространстве по закону, близкому к нормальному, с $\sigma_x = \sigma_z = 130$ м и при этом суммарная вероятность должна быть $P_\Sigma = P_o P_n P_H \geq 0,65$.

На этом формирование технического облика СПС заканчивается и начинается этап конструкторской проработки системы и всех ее подсистем. На конечном этапе проектирования СПС проводится проверочный расчет с использованием всех методик, описанных в данной книге.

Помимо рассмотренного применения вкладов для формирования параметров технического облика СТС можно проводить аналитический качественный анализ системы с целью определения возможности выполнения поставленной задачи.

В заключение сформулируем три уровня проектирования СТС, в основе которых лежат модели и методики, рассмотренные в гл. 1–3:

I. Анализ схем функционирования сложной технической системы. В результате анализа вырабатываются требования к СТС, например: габаритно-массовые характеристики, P_Σ , R , σ_p (рис. 3.5,а).

II. Формируются диапазоны изменения параметров СТС, которые заводятся в АСОТО. Проводится окончательный проверочный расчет эффективности (рис. 3.5,б).

III. Проводится оценка проектной эффективности СТС. На этом уровне осуществляется оптимизация параметров и вырабатываются требования к отдельным подсистемам СТС (рис. 3.5,в).

Г л а в а 4. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПОДСИСТЕМ СТС

Для выбора варианта ТО подсистемы СТС, обеспечивающей заданную эффективность комплекса, и оценки эффективности различных вариантов технических решений необходимы критерии, учитывающие взаимосвязь параметров подсистемы, самой СТС и носителя, обеспечивающего выброс СТС в заданном районе. Кроме того, критерии эффективности должны отражать все этапы выполняемой операции, учитывать условия применения, техническую реализуемость подсистемы и заданную эффективность СТС. Принципы разработки критериев эффективности подсистемы СТС и их применения для решения задач выбора и оценки ТО подсистемы изложены в настоящей главе на примере информационного блока (ИБ), выполняющего операции поиска и обнаружения группы маяков, и системы управления (СУ), служащей для наведения СПС в район расположения маяков с заданной точностью.

На основе описанных методик проводится вероятностно-статистический анализ ИБ и СУ, используемый наряду с результатами исследования других подсистем для решения задачи оценки надежности СТС.

4.1. Формирование критериев эффективности ИБ и СУ СТС

Эффективность ИБ, выраженная показателем $\mathcal{E}_{\text{ИБ}}$, определяется параметрами подсистем $\{\tau\}$, условиями применения $\{U\}$ и противодействием $\{b\}$. Под противодействием понимаются сложные метеоусловия, труднодоступность районов, сложный ландшафт местности.

Тогда задача оценки эффективности сводится к определению $\mathcal{E}_{\text{ИБ}}$ при заданных $\{\tau\}$, $\{U\}$, $\{b\}$, а задача выбора параметров – к определению области A допустимых значений параметров и отысканию $\{\tau\}^* \in A$ при заданных $\mathcal{E}^*$, $\{U\}$, $\{b\}$.

Для решения этих взаимосвязанных задач необходимо сформировать зависимость

$$\mathcal{E}_{\text{ИБ}} = F(\{\tau\}, \{U\}, \{b\}).$$

В качестве общего показателя эффективности ИБ на уровне исследования СПС выделена вероятность попадания $P_{\Pi} = P_0 P_n$, где P_0 – вероятность обнаружения; P_n – вероятность наведения.

Вероятность попадания P_{Π} наряду с показателями эффективности других систем, входящих в СПС, характеризует эффективность функционирования СПС в составе комплекса, количественно определяемую вероятностью воздействия на объект при условии его наличия в зоне обзора P_{Σ} [13]. В свою очередь, P_{Σ} определяет показатель эффективности комплекса – потребное число СПС N [39]:

$$\begin{aligned} N &= f(P_{\Sigma}); \\ P_{\Sigma} &= f(P_{\Pi}, f); \\ P_{\Pi} &= f(\{t\}, \{U\}, \{b\}). \end{aligned}$$

Поскольку число параметров ИБ $\{t\}$, влияющих на вероятность попадания P_{Π} , велико, необходимо ввести не противоречащие общему показателю $\mathcal{E}_{\text{ИБ}} = P_{\Pi}$ частные показатели $\mathcal{E}_i$, характеризующие эффективность функционирования ИБ на каждом i -м этапе операции, и обобщенные показатели, характеризующие эффективность нескольких этапов. Введение обобщенных и частных показателей необходимо и по другим причинам. К ним относятся громоздкость зависимости $P_{\Pi}(\{t\})$, сложность выделения всех параметров, существенно влияющих на P_{Π} , а также необходимость сравнения альтернативных вариантов по многим показателям в случае равных значений общих показателей эффективности. Показатели $\mathcal{E}_i$ также необходимы для решения частных задач определения параметров $\{t\}_i$, характеризующих один из этапов, при прочих заданных $\{t\}_k$, $k \neq i$.

В случае отсутствия в схеме функционирования ИБ одного из этапов или одной из фаз операции [8] также удобнее оценивать эффективность с использованием системы обобщенных и частных показателей, не противоречащих общему показателю эффективности.

Частные показатели выделяются в соответствии с этапами операции, выполняемыми ИБ в составе СПС (табл. 4.1), и условиями применения (типом объекта).

Т а б л и ц а 4.1

Частные показатели эффективности ИБ

Условия применения	Этапы операции		
	Поиск	Обнаружение	Слежение
Точечный объект	$P_{\text{пз}}$	$P_{\text{по}}$	$P_{\text{с}}$
Протяженный объект	$P_{\text{пз}}$	$P_{\text{по}}(x, z)$	$f_{\text{и}}(x, z)$
Фон	$P_{\text{лс}}$	$P_{\text{лт}}$	$P_{\text{с}}$

В табл. 4.1 обозначены показатели, определяющие эффективность функционирования ИБ:

1) на этапе поиска:

вероятность попадания объекта в поле зрения $P_{пз}$;

вероятность ложного срабатывания (хотя бы одного) ИБ по фону за время поиска $P_{лс}$;

2) на этапе обнаружения:

вероятность правильного обнаружения $P_{по}$;

распределение $P_{по}$ по поверхности объекта $P_{по}(x, z)$;

вероятность ложной тревоги (ложного срабатывания) в произвольный момент времени $P_{лт}$;

3) на этапе слежения:

вероятность срыва слежения P_c ;

плотность распределения точек индикации $f_n(x, z)$.

Выделенные показатели определяют общие показатели эффективности ИБ:

$$P_{п} = f [P_o, F_{п}(x, z)] ;$$

$$P_o = f (P_{пз}, P_{лс}, P_{по}, P_{лт}, P_c)$$

и показатель эффективности совместного функционирования ИБ и СПС – закон распределения точек попадания:

$$F_{п}(x, z) = f_n(x, z) \cdot F_n(x, z),$$

где $F_n(x, z)$ – закон распределения точек наведения.

Рассмотрим каждый из выделенных показателей. Вероятность попадания маяка в поле зрения зависит от размеров зон обзора $R_{зо}$, площади маяка S_m , числа маяков N_m и их распределения в зоне обзора $F_m(x_m, z_m)$, траектории движения поля зрения $x_{пз}(t)$, $z_{пз}(t)$ (траекторных параметров СПС и закона сканирования), размеров поля зрения Ω :

$$P_{пз} = f [R_{зо}, S_m, N_m, F_m(x_m, z_m), x_{пз}, z_{пз}, \Omega] .$$

Вероятность ложного срабатывания зависит от времени поиска маяка $T_{п}$, порогового отношения сигнал – шум q , спектров сигнала и шума $U_c(j\omega)$, $S_{п}(j\omega)$:

$$P_{лс} = f [T_{п}, q, U_c(j\omega), S_{п}(j\omega)] .$$

Вероятность правильного обнаружения определяется пороговым отношением сигнал – шум, спектрами сигнала и шума. Для точечного объекта, считая тракт обработки квазиоптимальным фильтром, можно записать

$$P_{по} = f [q, A_{вх}, W(j\omega), \Phi_{п}, \Delta \Omega, \Delta B_m, \Delta S_m, \sigma_{вф}, \beta, \alpha, D] ,$$

где $A_{вх}$ – площадь входного зрачка; $\Phi_{п}$ – пороговый поток; $\Delta \Omega$ – угловой размер элементарного поля зрения; ΔB_m – контраст яркости маяка; ΔS_m – эффективная площадь маяка; $\sigma_{вф}$ – среднеквадратическое отклонение яркости фона; β – коэффициент ослабления излучения в атмосфере; α – угол визирования; D – дальность до маяка.

Распределение вероятности правильного обнаружения по поверхности протяженного маяка

$$P_{по}(x, z) = f [q, A_{вх}, W(j\omega), \Phi_{п}, \Delta \Omega, B_m(x, z), B_{ф}(x, z), \beta, \alpha] ,$$

где $B_m(x, z)$, $B_f(x, z)$ – поле яркости маяка и фона соответственно.

Вероятность ложной тревоги:

$$P_{лт} = f[q, A_{вх}, W(j\omega), \Phi_n, \Delta\Omega, \sigma_{B_f}\beta, \alpha].$$

Вероятность срыва слежения зависит от точности измерения параметров сигнала σ_a и отработки рассогласования $\sigma_{\Delta\varphi}$, добротности привода Q , пеленгационной характеристики $a(\Delta\varphi)$, закона управления $\theta(\Delta\varphi)$, добротности контура управления Q_y :

$$P_c = f[\sigma_a, \sigma_{\Delta\varphi}, Q, a(\Delta\varphi), \theta(\Delta\varphi), Q_y].$$

Закон распределения точек индикации определяется распределением вероятности правильного обнаружения по поверхности маяка $P_{по}(x, z)$, точностью и временем измерения рассогласования σ_a , t_k , отработки $\sigma_{\Delta\varphi}$, t_n и управления σ_{cy} , характеристиками привода:

$$f_{и}(x, z) =$$

$$= f[P_{по}(x, z), \sigma_a, t_k, \sigma_{\Delta\varphi}, t_n, \sigma_{cy}, t_y, Q, a(\Delta\varphi), \theta(\Delta\varphi)].$$

Таким образом, имея зависимость обобщенных показателей (определяющих общий – P_n) от параметров ИБ $\{\tau\}$ и условий применения $\{U\}$, формируем критерий эффективности ИБ в виде:

$$J_1 = \min_{\tau \in A} |P_n\{P_o(\{\tau\}, \{U\}, F_n(x, z))\} - P_n^*|;$$

$$J_2 = \min_{\tau \in A} \left\{ \max_{x, z} |F_n[f_{и}(x, z), F_n(x, z)] - F_n^*(x, z)| \right\},$$

где J_1 – минимум разностей между общим показателем эффективности ИБ P_n и требуемым значением P_n^* ; J_2 – показатель критерия Колмогорова; $F_n^*(x, z)$ – требуемый закон распределения точек попадания, определяемый типом маяка.

4.2. Определение требуемых значений показателей эффективности

Требуемые значения показателей эффективности определяются по следующей схеме.

1. В соответствии с § 2.6 формируется альтернативный ряд характеристик СПС и проводится ранжирование вариантов ТеР спектральным методом. В результате имеем требуемые значения P_Σ^* и габаритно-массовые характеристики СПС d^* , l^* , m^* .

2. Формируется зависимость

$$P_\Sigma = P_o(A_{вх}(d^*), f_{и}(x, z) \dots) P_n(f_{и}(x, z), P_c \dots) P_{над} P_{уп},$$

где $P_{над}$ – надежность СПС; $P_{уп}$ – вероятность попадания при условии протяженного маяка.

3. При заданной схеме функционирования СПС на основе анализа схемы маяка определяется требуемый вид закона распределения точек попадания $F_{\Pi}(x, z)$, (если он, конечно, нужен).

Таким образом, значение $R_{\text{уп}}$ можно считать заданным и вероятность попадания $R_{\Pi} = R_{\Sigma} / R_{\text{уп}}$ – определенной.

4. Экспертно или по прецедентам оценивается диапазон изменения СКО СУ $[\sigma_{\text{су}}^{\min}, \sigma_{\text{су}}^{\max}]$ и для идеального управления определяется

требуемый диапазон $[P_{\Pi}^{\min}, P_{\Pi}^{\max}]$. Следовательно, с учетом выбранных при ранжировании вариантов значения R_{Σ}^* задается диапазон $[P_o^{\min}, P_o^{\max}]$.

5. Определяется множество разбиений поверхности объекта на площадке с одинаковым критерием, на основе анализа площади протяженного маяка формируется требуемый закон распределения точек с использованием ряда Эджворта [27]:

$$f_{\Pi}^*(x) = \frac{1}{\sigma_{\Pi}} \left[\Phi' \left(\frac{x - m_{\Pi}}{\sigma_{\Pi}} \right) - \frac{\gamma_{\Pi 1}}{3!} \Phi^{(4)} \left(\frac{x - m_{\Pi}}{\sigma_{\Pi}} \right) + \frac{\gamma_{\Pi 2}}{4!} \Phi^{(5)} \left(\frac{x - m_{\Pi}}{\sigma_{\Pi}} \right) + \frac{10 \gamma_{\Pi 1}^2}{6!} \Phi^{(6)} \left(\frac{x - m_{\Pi}}{\sigma_{\Pi}} \right) \right]. \quad (4.1)$$

Если $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp(-t^2/2) dt$ – интеграл вероятностей [27], то

$$\Phi'(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-z^2/2); \quad z = \frac{x - m_{\Pi}}{\sigma_{\Pi}}; \quad \Phi^{(4)}(z) = (z^3 - 3z) \Phi'(z); \\ \Phi^{(5)}(z) = (z^4 - 6z^2 + 3) \Phi'(z); \quad \Phi^{(6)}(z) = (z^5 - 10z^3 + 15z) \Phi'(z).$$

6. Реальный вид закона распределения точек попадания определяется композицией законов распределения точек индикации и точек наведения $f_{\Pi} = f_{\text{и}} \cdot f_{\text{н}}$.

Закон распределения точек наведения принят нормальным [18]:

$$f_{\text{н}}(x, z) = \frac{1}{2\pi \sigma_{\text{су}x} \sigma_{\text{су}z}} \exp \left[-\frac{(x - M_x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(z - M_z)^2}{2\sigma_z^2} \right]. \quad (4.2)$$

Для нормального закона распределения точек индикации

$$f_{\text{и}}(x, z) = \frac{1}{2\pi \sigma_x \sigma_z} \exp \left[-\frac{(x - M_x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(z - M_z)^2}{2\sigma_z^2} \right].$$

и в случае попадания в центр площадки f_{Π} имеет вид:

$$f_{\Pi}(\eta, \xi) = \frac{1}{2\pi \sigma_{\eta} \sigma_{\xi}} \exp \left[-\frac{(\eta - M_{\eta})^2}{2\sigma_{\eta}^2} - \frac{(\xi - M_{\xi})^2}{2\sigma_{\xi}^2} \right], \quad (4.3)$$

где $M_{\eta} = M_{cyx} + M_x$; $M_{\xi} = M_{cyz} + M_z$; $\sigma_{\eta}^2 = \sigma_{cyx}^2 + \sigma_x^2$;
 $\sigma_{\xi}^2 = \sigma_{cyz}^2 + \sigma_z^2$.

При равномерном законе распределения точек индикации по площади $[M_x - l_x; M_x + l_x; M_z - l_z; M_z + l_z]$ и $M_{cy} = M$ выражение для плотности вероятности $f_{\Pi}(\eta, \xi)$ с учетом выражения (4.2) имеет вид

$$f_{\Pi}(\eta, \xi) = \frac{1}{16 l_x l_z} \left[\hat{\Phi} \left(\frac{\eta - 2M_x + l_x}{\sigma_{cyx}} \right) - \hat{\Phi} \left(\frac{\eta - 2M_x - l_x}{\sigma_{cyx}} \right) \right] \times \\ \times \left[\hat{\Phi} \left(\frac{\xi - 2M_z + l_z}{\sigma_{cyz}} \right) - \hat{\Phi} \left(\frac{\xi - 2M_z - l_z}{\sigma_{cyz}} \right) \right], \quad (4.4)$$

где $\hat{\Phi}(y) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^y \exp(-t^2/2) dt$, и может быть заменено нормальным

законом [21], причем $M_{\eta} = 2M_x$; $M_{\xi} = 2M_z$; $\sigma_{\eta}^2 = \sigma_{cyx}^2 + \frac{1}{3} l_x^2$;
 $\sigma_{\xi}^2 = \sigma_{cyz}^2 + \frac{1}{3} l_z^2$.

Для произвольного закона распределения точек индикации $f_{\Pi}^M(x, z)$, полученного при моделировании, $f_{\Pi}^M(\eta, \xi)$ определяется композицией $f_{\Pi}(x, z)$ (4.2) и $f_{\Pi}^M(x, z)$:

$$f_{\Pi}^M = f_{\Pi}^M f_{\Pi}. \quad (4.5)$$

Сравнивая полученный вид закона $f_{\Pi}(\eta, \xi)$ – (4.3), (4.4) или (4.5) – с требуемым (4.1), можно определить значения M , σ , M_{cy} , σ_{cy} . Полученные значения проверяются имитационным моделированием функционирования СПС, включая работу СУ и ИБ.

4.3. Методика оценки эффективности и выбора характеристик ИБ

Выбор параметров ИБ, т. е. решение обратной задачи, представляет собой последовательность действий (рис. 4.1).

1. Определяются показатели эффективности ИБ на каждом этапе операции (на этапе поиска – $\mathcal{E}_{\Pi} = \{P_{\Pi z}, P_{\Pi c}\}$, обнаружения $\mathcal{E}_0 = \{P_{\Pi o} \times (P_{\Pi t}), P_{\Pi o}(x, z)\}$, слежения $\mathcal{E}_c = \{P_c, f_{\Pi}(x, z)\}$), не противоречащие общему показателю $\mathcal{E}_{\Pi b} = P_{\Pi} = P_o P_{\Pi}$, значение которого получено на высшем иерархическом уровне исследования.

2. Формируются функциональные зависимости частных и обобщенных показателей $\mathcal{E}_{\Pi}$, $\mathcal{E}_0$, $\mathcal{E}_c$ от соответствующих тактических параметров ИБ и условий применения.

3. Рассчитываются основные соотношения, связывающие тактические параметры между собой $\{t\}_{ij} = f(t)$ и с проектными параметрами подсистем ИБ $\{t\} = f\{\pi\}$.

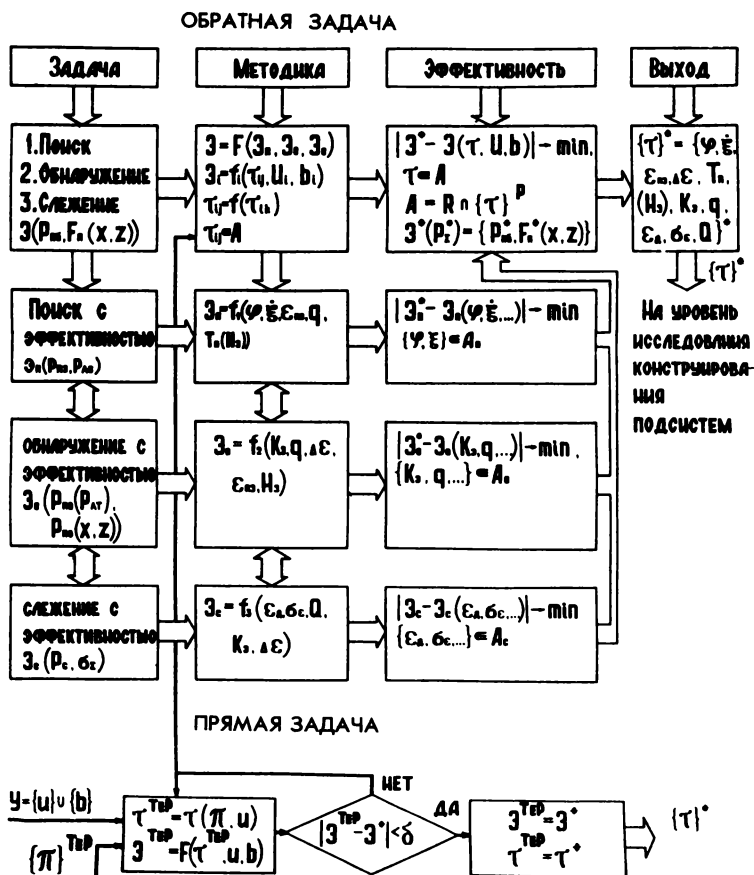


Рис. 4.1. Схема комплексной модели функционирования ИБ

4. Формируется область допустимых значений параметров A на пересечении множества ограничений с высшего уровня R и множества реализуемых значений $\{\tau\}^P$.

5. Определяются рациональные параметры (на области их допустимых значений), в сочетании обеспечивающие заданную эффективность во всем диапазоне условий применения:

$$\{\tau\} = \arg \min_{\tau \in A} \left| \mathcal{E}_{иб} \left[\mathcal{E}_i \left(\{\tau\}_i, \{U\}_i, \{b\}_i \right) \right] - \mathcal{E}_{иб}^* \right|, \quad i = \overline{1, N},$$

где N – число этапов, выполняемых при участии ИБ.

При отсутствии в схеме функционирования ИБ каких-либо этапов (например, для отдельных ИБ СПС отсутствует этап слежения; для ИБ

СПС, доставляемого точным авиационным носителем, может отсутствовать этап поиска, осуществляемый бортовыми средствами и летчиком-оператором) рациональные параметры могут определяться по обобщенным критериям типа

$$|\mathcal{E}_1(\{\tau_{ij}\}) - \mathcal{E}_1^*| \rightarrow \min.$$

Для решения прямой задачи – оценки эффективности конкретного технического решения ИБ, определяемого совокупностью проектных параметров каждой j -й подсистемы $\{\pi\}_j$, необходимо:

определить значения тактических параметров $\{\tau\}_{ij} = f(\{\pi\}_j, \{U\}_i, \{b\}_i)$;

найти значения обобщенных показателей эффективности $\mathcal{E}_i = f(\{\tau\}_{ij})$;

определить значение общего показателя $\mathcal{E}_{иб} = F(\mathcal{E}_i)$, характеризующего эффективность функционирования ИБ в составе СПС.

В соответствии с постановкой задачи и схемой ее решения разработан пакет прикладных программ:

оценки эффективности заданного технического решения ИБ с параметрами $\{\pi\}_{TeP}$;

определения тактических параметров ИБ по заданной эффективности $\mathcal{E}_{иб}$.

4.4. Имитационная математическая модель функционирования информационного блока в составе СПС

Математическая модель функционирования ИБ необходима для решения трех задач:

оценки эффективности и надежности предлагаемых технических решений;

разработки математического обеспечения комплексов полунатурного моделирования для отработки существующих образцов;

определения технического облика перспективных ИБ.

В настоящее время разработан ряд моделей для автономного исследования ИБ и имитации функционирования СПС. Однако существующие модели ИБ не всегда позволяют учесть влияние изменения траекторных параметров СПС, а в моделях СПС информационный блок обычно рассматривается в качестве типового звена контура управления без учета процесса формирования пеленгационной характеристики.

Преимуществом описываемой в данном параграфе комплексной математической модели, в отличие от существующих, является определение вероятностных характеристик ИБ с учетом параметров движения СПС и характеристик подсистем ИБ, определяющих ее пеленгационные свойства.

Задача моделирования ИБ формируется в следующем виде. Заданы параметры подсистем и условия применения ИБ :

параметры движения платформы и сканирующей оси ИБ;

характеристики приемного блока, блока обработки сигнала, решающего устройства и привода;

характеристики фоновой обстановки.

Необходимо определить показатели эффективности функционирования ИБ на всех этапах операции:

вероятности ложного срабатывания и попадания маяка в поле зрения ИБ в режиме поиска;

вероятности правильного обнаружения и ложных тревог в режиме обнаружения;

закон распределения точек индикации по поверхности маяка (если это нужно);

вероятность срыва слежения.

Алгоритм решения поставленной задачи и соответствующая ему структура комплексной модели показаны на рис. 4.2.

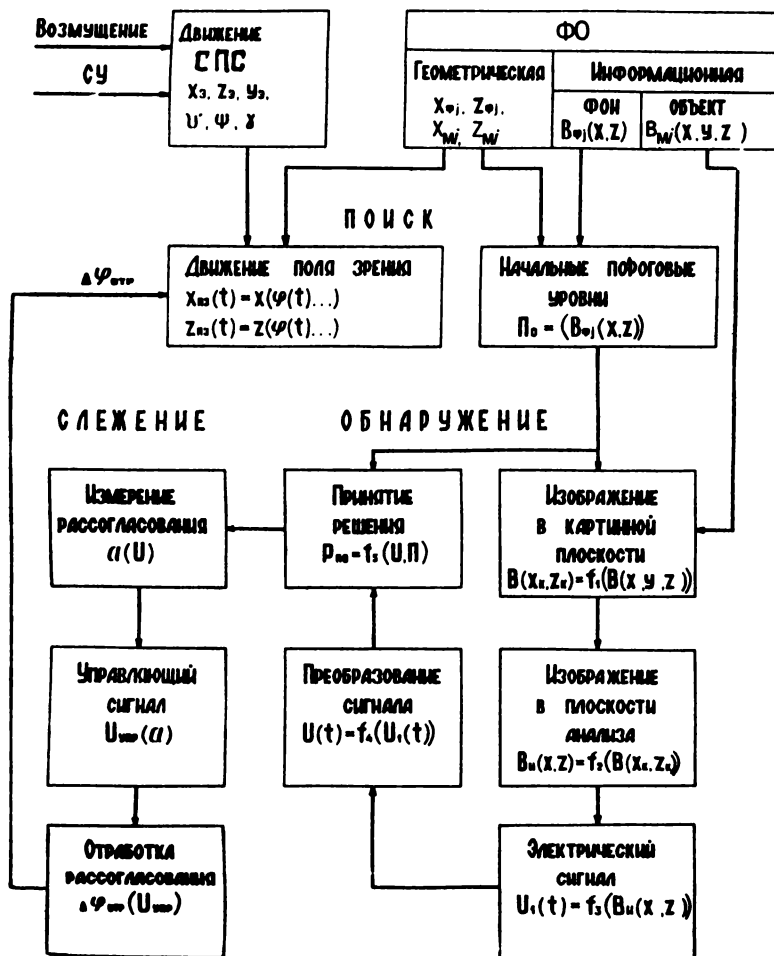


Рис. 4.2. Структура моделей

Из рисунка видно, что решение общей задачи исследования достигается последовательным моделированием отдельных этапов функционирования ИБ: поиска, обнаружения и слежения.

Рассмотрим каждую из моделей.

Модель поиска представляет собой:

описание движения поля зрения ИБ при изменении вектора состояния средства доставки и пространственного положения оси сканирования ИБ:

$$x_{пз}(t) = f(x_э, y_э, \nu, \psi, \xi, \varphi, t);$$

$$z_{пз}(t) = f(z_э, y_э, \nu, \psi, \xi, \varphi, t),$$

где $x_{пз}(t)$, $z_{пз}(t)$ – координаты пересечения оси сканирования с горизонтальной плоскостью земной системы координат XOZ в зависимости от времени; $x_э, y_э, z_э, \nu, \psi$ – координаты, углы тангажа и рыскания СПС соответственно, определяемые из системы дифференциальных уравнений, описывающих неуправляемый полет СПС; ξ, φ – фаза и угол сканирования соответственно;

определение начальных пороговых уровней в соответствии с алгоритмом формирования порогов:

$$\Pi_0 = f\left(\sigma_{\Phi}^2\right),$$

где σ_{Φ}^2 – текущая оценка дисперсии потока излучения, регистрируемого приемником в процессе сканирования подстилающей поверхности.

Выходом модели являются траектория движения поля зрения и его координаты в момент совмещения с контуром маяка, а также вероятности попадания объекта и j -й компоненты фона в поле зрения ГСН (рис. 4.3)

Модель обнаружения представляет собой:

преобразование трехмерной модели объекта в двумерное изображение в картинной плоскости:

$$B(x_k, z_k) = B(x_g, y_g, z_g) \odot E,$$

где $B(x_k, z_k)$ – распределение яркости маяка в картинной плоскости; $B(x_g, y_g, z_g)$ – распределение яркости объекта в земной системе координат; E – оператор перехода в новую систему координат (из $x_g y_g z_g$ в $x_k y_k z_k$) и проектирования на плоскость $O_k X_k Z_k$;

формирование двумерного изображения в плоскости анализа:

$$B_{и}(x, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(x', z') g(x, z, x', z') dx' dz',$$

где $x' = M \odot x_k$, $z' = M \odot z_k$ – координаты точки изображения с учетом масштабного преобразования; $M = F'/D$ – масштабный коэффициент; $D = \sqrt{(x_э - x_m)^2 + (y_э - y_m)^2 + (z_э - z_m)^2}$ – дальность до маяка; F' – фокусное расстояние ОС; x_m, y_m, z_m – координаты геометрического центра маяка; $g(x, z, x', z')$ – импульсная характеристика оптической системы (ОС);

$$P_{\text{лт}} = P(\gamma_1, I_{\text{ш}}) = P[\Delta(\gamma, I), I = I_{\text{ш}}];$$

$$P_{\text{пр}} = P(\gamma_2, I_{\text{с}}) = 1 - P_{\text{по}},$$

где $P[\Delta(\gamma, I)]$ – вероятность выполнения решающего правила (γ, I) ; γ_1, γ_2 – принятие решений о наличии и отсутствии полезного сигнала соответственно; $I_{\text{с}}, I_{\text{ш}}$ – функции сигнала и шума соответственно.

Например, при

$$\gamma = \begin{cases} \gamma_1 & \text{при } a_i(I_{\text{с}}) > \Pi_i, \quad i = \overline{1, N_a}; \\ \gamma_2 & \text{при } a_i(I_{\text{с}}) < \Pi_i \end{cases}$$

$$P_{\text{по}} = P[A_{ij}(I_{\text{с}}) > \Pi_{ij}],$$

где $A_{ij}(I_{\text{с}})$, Π_{ij} – i -й параметр сигнала и его пороговое значение в j -й момент времени; N_a – число анализируемых параметров (выставляемых порогов).

Выходом модели являются вероятность правильного обнаружения и координаты точки захвата на поверхности маяка в момент обнаружения (рис. 4.4).

При объединении (комплексировании) с моделью поиска алгоритм обнаружения маяка может использоваться для формирования сигналов от подстилающей поверхности, тогда на выходе модели можно получить вероятности ложного срабатывания и обнаружения объекта.

Модель слежения предназначена:

для измерения сигнального параметра рассогласования, пропорционального угловому рассогласованию на входе: $a(I) = f(\Delta\varphi, \Delta\xi)$;

для определения управляющего воздействия, требуемого для отработки рассогласования $I_{\text{упр}} = f(a)$;

для описания отработки управляющего воздействия $\Delta\varphi_{\text{отр}} = f(I_{\text{упр}})$.

Выходом модели является передаточная функция ИБ как звена контура управления, а при включении в модель управляемого полета средства доставки – траектория движения точки захвата и ее координаты в момент воздействия на объект, а также вероятность срыва слежения. На рис. 4.5 показано распределение точек попадания груза на маяк.

Комплексная модель включает также модели фоновой обстановки, которые описывают условия применения ИБ и представляются в виде геометрической модели для этапа поиска и в виде информационной – для этапов обнаружения и слежения.

Геометрическое представление ФО предназначено для исследования динамических характеристик в режиме поиска.

Параметрами геометрической модели являются:

размеры зоны обзора – x_{30}, z_{30} ;

число маяков в ЗО – $N_{\text{м}}$;

координаты и ориентация маяков $x_{\text{м}}, z_{\text{м}}, \gamma_{\text{м}}$;

геометрические характеристики макроструктуры фона (совокупности $N_{\text{ф}}$ однородных компонент, соответствующих различным природным образованиям): размеры областей случайной формы, занимаемых каждой компонентой l_{xj}, l_{zj} ; балльность – часть площади ЗО, занимаемой каждой компонентой $B_j = S_j / S_{30}$;

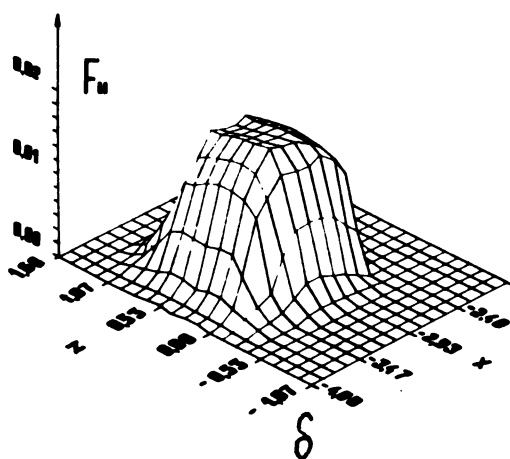
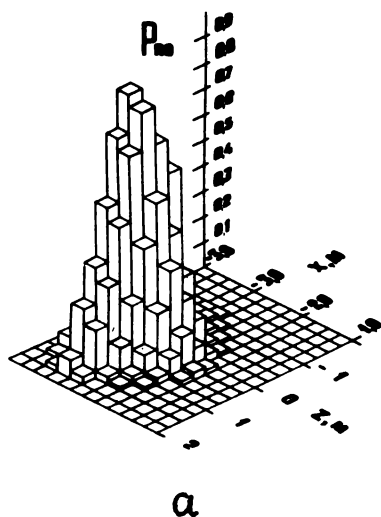


Рис. 4.4. Пример вероятности правильного обнаружения $P_{по}$ и закона распределения точек захвата: α – зависимость вероятности правильного обнаружения от координат x, z ; δ – закон распределения точек захвата маяка F_n от координат x, z

статистические характеристики макроструктуры фона: вероятность попадания в ЗО j -й компоненты фона P_j ; вероятность попадания в ЗО границы перехода с i -й на j -ю компоненту P_{ij} .

Информационная модель ФО предназначена для оценки вероятности правильного обнаружения и формирования пороговых уровней принятия решения. Параметрами модели являются:

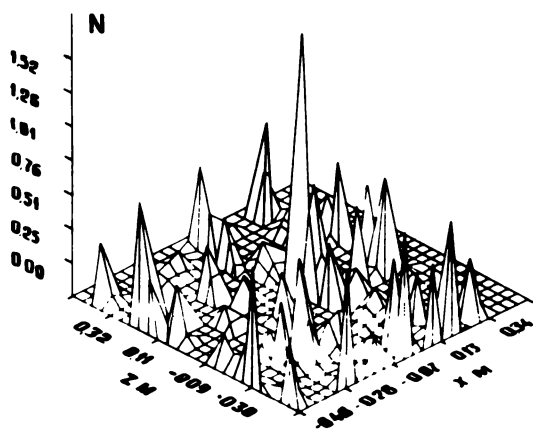
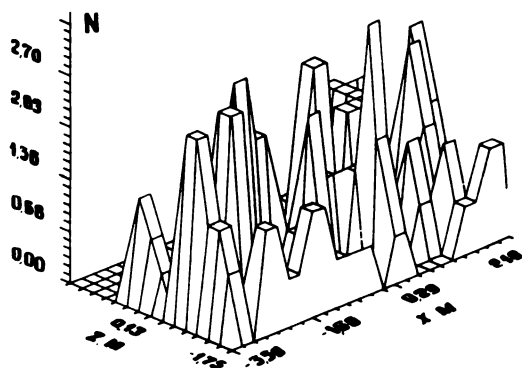


Рис. 4.5. Распределение точек попадания при различных условиях

статистические характеристики микроструктуры фона: одномерная плотность распределения $f_B(r)$, математическое ожидание B , средне-квадратическое отклонение σ_B^2 и корреляционная функция K_Φ яркости излучения каждой компоненты фона;

распределение яркости излучения по поверхности маяка $B_M(x, z)$. Комбинированная модель ФО определяется соотношением

$$B(x, z) = B_\Phi(x, z) \prod_{i=1}^{N_M} (1 - \eta_i(x, z)) + \sum_{i=1}^N B_{M_i}(x, z) \eta_i(x, z),$$

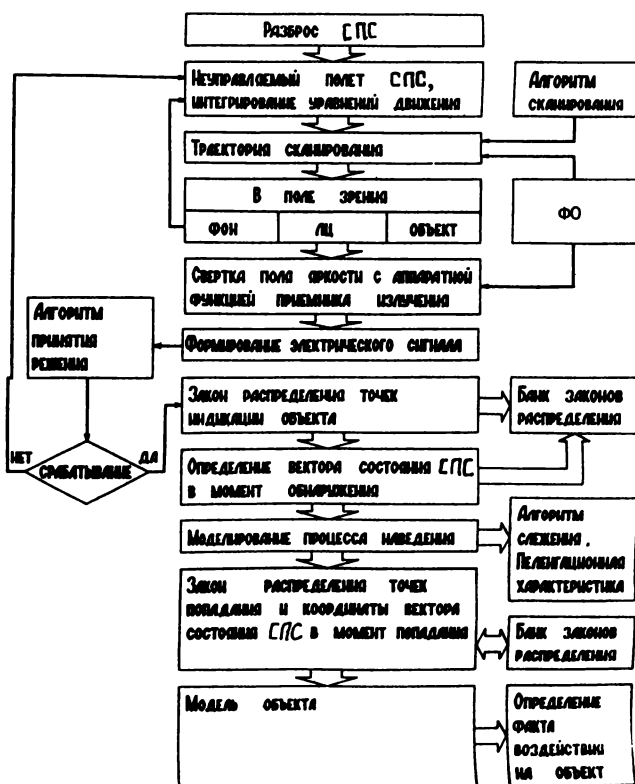


Рис. 4.6. Сквозная модель СПС

где $V_{\Phi}(x, z)$, $V_{mi}(x, z)$ – поля яркости излучения фона и i -го маяка;

$$\eta_i(x, z) = \begin{cases} 1 & \text{при } (x, z) \in S_{mi}; \\ 0 & \text{при } (x, z) \notin S_{mi}; \end{cases}$$

S_m – область изображения маяка;

$$V_{\Phi}(x, z) = \sum_{j=1}^{N_{\Phi}} V_{\Phi j}(x, z) \eta_j(x, z);$$

$V_{\Phi j}(x, z)$ – поле яркости j -й компоненты фона (микроструктура);
 $\eta_j(x, z)$ – поле геометрии j -й компоненты (макроструктура);

$$\eta_i(x, z) = \begin{cases} 1 & \text{при } (x, z) \in S_j; \\ 0 & \text{при } (x, z) \notin S_j; \end{cases}$$

$$S_{30} = \bigcup_{j=1}^{N_\Phi} S_j, \quad S_j \cap S_k = 0, \quad j \neq k.$$

При моделировании различных этапов функционирования ИБ обращаются к соответствующим моделям ФО.

Таким образом, комплексная модель позволяет при известных параметрах движения средства доставки и характеристиках ИБ и ФО получать:

траекторию движения поля зрения;

координаты точки захвата и траекторию ее движения в процессе слежения;

вероятностные характеристики ИБ на всех этапах функционирования.

Комплексная модель ИБ является составной частью сквозной модели СТС (рис. 4.6).

4.5. Аналитическая модель функционирования ИБ

В общем случае показатель эффективности функционирования ИБ в составе СПС P_n определяется зависимостью [24]

$$P_n = P_{пз} (1 - P_{лс}) P_{по} (1 - P_c) P_n = \left[1 - \left(1 - \frac{N_m}{S_{рс}} \Delta S_{пз} \right)^{S_{пр}/\Delta S_{пз}} \right] \times \\ \times \left[\Phi \left(\exp(-\beta H_3 / \cos \alpha) \Delta B_y \cos \alpha K_3 \Omega - q \right) \right] \times \\ \times \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{\tilde{\omega}}{2\pi} \exp \left(-\frac{q^2}{2} \right) \right] T_n \right\} \left[1 - \Phi \left(\frac{\epsilon_n^2}{\sigma_i^2} - \frac{\epsilon_n^2}{\sigma_e^2} \right) \right] P_n, \quad (4.6)$$

где N_m – число маяков в районе сосредоточения; $S_{рс}$ – площадь района посадки грузов; $S_{пр}$, $S_{пз}$ – соответственно просматриваемая за время поиска площадь и площадь проекции поля зрения ИБ на подстилающую поверхность; β – коэффициент пропускания атмосферы; H_3 – высота захвата маяка; T_n – время поиска маяка;

$$P_n = \iint_{S_m} F_n(x, z) f(x, z) dx dz = \\ = \iint_{S_m} \left[\frac{1}{2\pi \sigma_{cyx} \sigma_{cysz}} \exp \left(-\frac{(x - M_{cux})^2}{2\sigma_{cux}^2} - \frac{(z - M_{cuz})^2}{2\sigma_{cuz}^2} \right) f_n(x, z) \right] dx dz.$$

После определения закона распределения точек индикации f_n выражение для P_n можно записать в виде

$$P_H = \int_{-3\sigma_x}^{3\sigma_x} \Phi \left(\frac{\xi - x}{\sigma_{cy x}} \right) f_H(x) dx \int_{-3\sigma_z}^{3\sigma_z} \Phi \left(\frac{\eta - z}{\sigma_{cy z}} \right) f_H(z) dz ,$$

или, получив имитационным моделированием размеры области индикации Δx_H , Δz_H ,

$$P_H = \left[2\Phi \left(\frac{\Delta x_H}{\sigma_{cy x}} \right) - 1 \right] \left[2\Phi \left(\frac{\Delta z_H}{\sigma_{cy z}} \right) - 1 \right] . \quad (4.7)$$

Входящая в уравнение (4.6) среднеквадратическая круговая частота пересечения помехой нулевого уровня для оптимального фильтра (ЭТ с частотной передаточной функцией вида $W_\Phi(j\omega) = \frac{u_0 u^*(j\omega) e^{-j\omega t_0}}{S_n(\omega)}$) определяется выражением

$$\tilde{W}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} W^2 \frac{|H(j\omega)|^2}{S_n(\omega)} d\omega \quad / \quad \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|H(j\omega)|^2}{S_n(\omega)} d\omega .$$

Для полосовых фильтров с $W_\Phi(j\omega) = \text{const}$ в диапазоне частот

$$\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2} < \omega < \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}$$

$\tilde{\omega}$ определяется выражением

$$\tilde{\omega}^2 = \omega_0^2 \left[1 + \frac{1}{12} \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2 \right] . \quad (4.8)$$

Тогда для вертикального спуска СПС, поиска без повторений и ИБ с ИК – приемником излучения и полосовым фильтром с полосой частот выполняется условие

$$\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2} < \omega < \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2} .$$

С учетом зависимостей (4.7), (4.8) выражение (4.6) можно записать в виде

$$P_H = \left[1 - \left(1 - \frac{N_H}{S_{pc}} \Delta S_{пз} \right)^{S_{np}/\Delta S_{пз}} \right] \times \\ \times \left\{ \Phi \left[\exp(-\beta H_3 / \cos \alpha) \Delta B_m \cos \alpha K_3 \Omega \right] - q \right\} \times \\ \times \left[1 - \exp \left(-\frac{\omega_0}{2\pi} \sqrt{1 + \frac{1}{12} \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2} \exp(-q^2/2) T_H \right) \right] \times$$

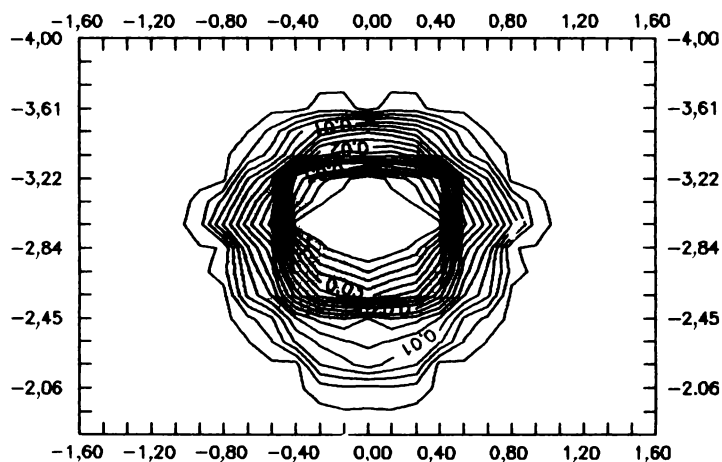


Рис. 4.7. Уровни закона распределения точек обнаружения

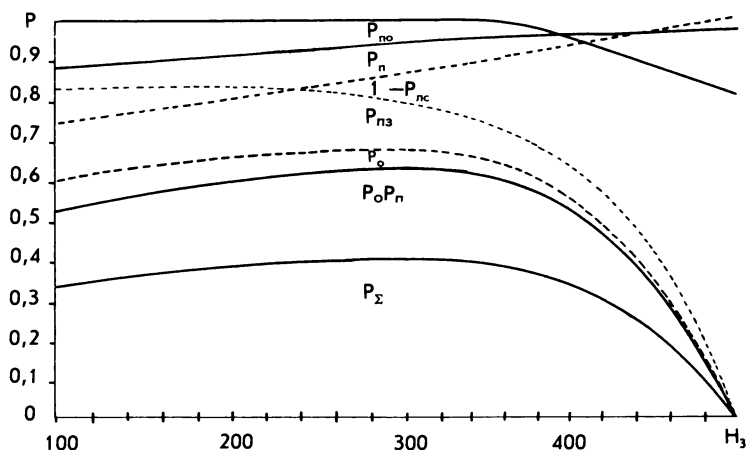


Рис. 4.8. Вероятности обнаружения и попадания

($P_{по}$ – вероятность правильного обнаружения; P_n – вероятность попадания; $P_{лс}$ – вероятность ложных срабатываний; P_{Σ} – суммарная вероятность; H_3 – высота захвата маяка)

$$\times \left[1 - \Phi \left(\frac{\frac{2}{\sigma_{\epsilon}^2} - \frac{2}{\sigma_{\epsilon}^2}}{\frac{2}{\sigma_{\epsilon}^2}} \right) \right] \left[2\Phi \left(\frac{\Delta x_{\text{и}}}{\sigma_{\text{cy } x}} \right) - 1 \right] \left[2\Phi \left(\frac{\Delta z_{\text{и}}}{\sigma_{\text{cy } z}} \right) - 1 \right]. \quad (4.9)$$

Полученная зависимость (4.9) позволяет определять показатель эффективности ИБ при заданных параметрах его подсистем и проводить оптимизацию параметров, определяя их рациональные значения, обес-

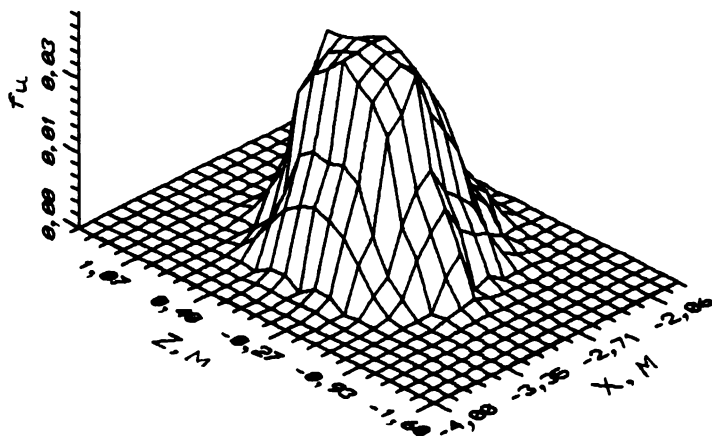


Рис. 4.9. Закон распределения точек попадания

печаивающие требуемую эффективность.

Входящие в зависимость (4.6) частные показатели, выделенные квадратными и фигурными скобками, дают возможность исследовать отдельные этапы функционирования ИБ и СПС: поиск, обнаружение и наведение (рис.4.7 – 4.9 соответственно этапам).

4.6. Моделирование условий применения ИБ

Условия применения ИБ СПС, определяющие его входные воздействия, в общем случае включают:

- пространственное положение ИБ;
- фоновую обстановку;
- состояние атмосферы.

Способ формирования входных воздействий ИБ СПС является одним из наиболее важных вопросов моделирования функционирования ИБ.

В настоящее время не существует единой общепринятой модели входных воздействий.

Реализации входных сигналов ИБ получают следующими способами:
по результатам натурного испытания;
с использованием «синтезированного кадра»;
по вероятностной модели ФО.

Первый способ обеспечивает высокую достоверность воспроизведения входных сигналов, но требует больших затрат и не позволяет получить представительную выборку для статистической оценки показателей ИБ.

Второй способ требует обоснования возможности оценки показателей по одной реализации.

Третий способ связан с анализом вероятностного описания ФО, моделированием и комплексированием в единый сюжет случайных полей, статистические характеристики которых оцениваются по экспериментальным данным. Таким образом, этот способ включает элементы первых двух и представляется наиболее полным и подходящим для решения задач данного исследования.

Рассмотрим модель ФО. В общем случае адекватное описание ФО может обеспечить только полная совокупность – тезаурус моделей.

Задачей пользователя является использование комбинированного описания ФО, состоящего из разработанных в настоящее время моделей и учитывающего наибольшее число существенно влияющих факторов [40].

Для ИБ СПС характерно воздействие сложных фонов, образуемых комбинацией излучений многих естественных (лес, луг, кустарник, водоем и т.п.) и антропогенных (дорога, дом, пашня и т.п.) объектов.

Наиболее полно изображение фона описывается комбинацией N_{Φ} компонент фона (естественных и антропогенных объектов) [40]:

$$B_{\Phi}(x, z) = \sum_{j=1}^{N_{\Phi}} B_j(x, z) \eta_j(x, z).$$

Поля яркости излучения и геометрия компонент фона $B_j(x, z)$ и $\eta_j(x, z)$ для естественных объектов моделируются как случайные поля (СП) с заданными статистическими характеристиками:

для поля яркости $B_j(x, z)$ – одномерной плотностью распределения, математическим ожиданием, дисперсией и корреляционной функцией (КФ);

для поля геометрии $\eta_j(x, z)$ – средней длиной областей, занимаемых каждой компонентой, балльностью (частью площади ЗО, занимаемой каждой компонентой) и вероятностями попадания в ЗО каждой компоненты.

Синтезирование поля яркости приводит к значительным вычислительным затратам и требует большой памяти ЦВМ, если необходимо получить поле больших размеров. В этом случае используется алгоритм, в основу которого положена каузальная модель двумерного марковского поля, позволяющая получать последовательно каждую строку поля, не храня в памяти весь массив [40].

Поля геометрии природных объектов моделируются с помощью нелинейного безынерционного преобразования

$$\eta(x, z) = \psi(\xi(x, z)), \quad \psi(\xi) = \begin{cases} 0, & \xi(x, z) \leq a, \\ 1, & \xi(x, z) > a, \end{cases}$$

гауссовского СП $\xi(x, z)$ с нулевым МО, единичной дисперсией и корреляционной функцией, параметры которой зависят от заданных характеристик поля: средних длин l_{xj} , l_{zj} и балльности p_j областей случайной формы, занимаемых каждой компонентой фона.

Рассмотрим модель атмосферного канала. Коэффициент пропускания атмосферы зависит от ослабления излучения атмосферой и длины атмосферного канала:

$$K_{\text{атм}} = \exp(-\beta D),$$

где D – дальность до объекта, т. е. длина трассы распространения излучения в атмосферном канале.

Неоднородность атмосферы для ИБ можно учесть кусочной аппроксимацией функции $\beta(D)$:

$$K_{\text{атм}} = \exp\left(-\sum_{i=1}^{N_a} \beta_i \Delta D_i\right),$$

где N_a – число слоев атмосферы с постоянным коэффициентом ослабления.

Для оценки ослабления излучения атмосферой использовался метод эмпирических коэффициентов, полученных на основе экспериментальных данных.

Например, для ослабления оптического излучения диапазона длин волн (ДВ) $\lambda < 10$ мкм

$$\beta(\lambda) = \beta(0,55) \left[n_0 + n_1 \lambda^{-n_2} \right],$$

$$\beta(0,55) = 3,91 / \text{МДВ},$$

где $\beta(0,55)$ – коэффициент ослабления на длине волны $\lambda = 0,55$ мкм; МДВ – метеорологическая дальность видимости; n_0 , n_1 , n_2 – эмпирические коэффициенты для различных условий оптической видимости (табл. 4.2)

Т а б л и ц а 4.2

Эмпирические коэффициенты для различных условий оптической видимости

Период	Погода	n_0	n_1	n_2
Летний	Дымка (после дождя)	0	0,4	1,88
	Устойчивая дымка	0,06	0,36	1,88
Весенне-осенний	Дымка	0,1	0,45	1,3
	Туманная дымка	0,01	0,8	0,5
	Дымка с моросью	0,3	0,5	0,6
Зимний	Ледяная дымка	0,25	0,45	1,23
	Дымка со снегом	0,77	0,15	1,24

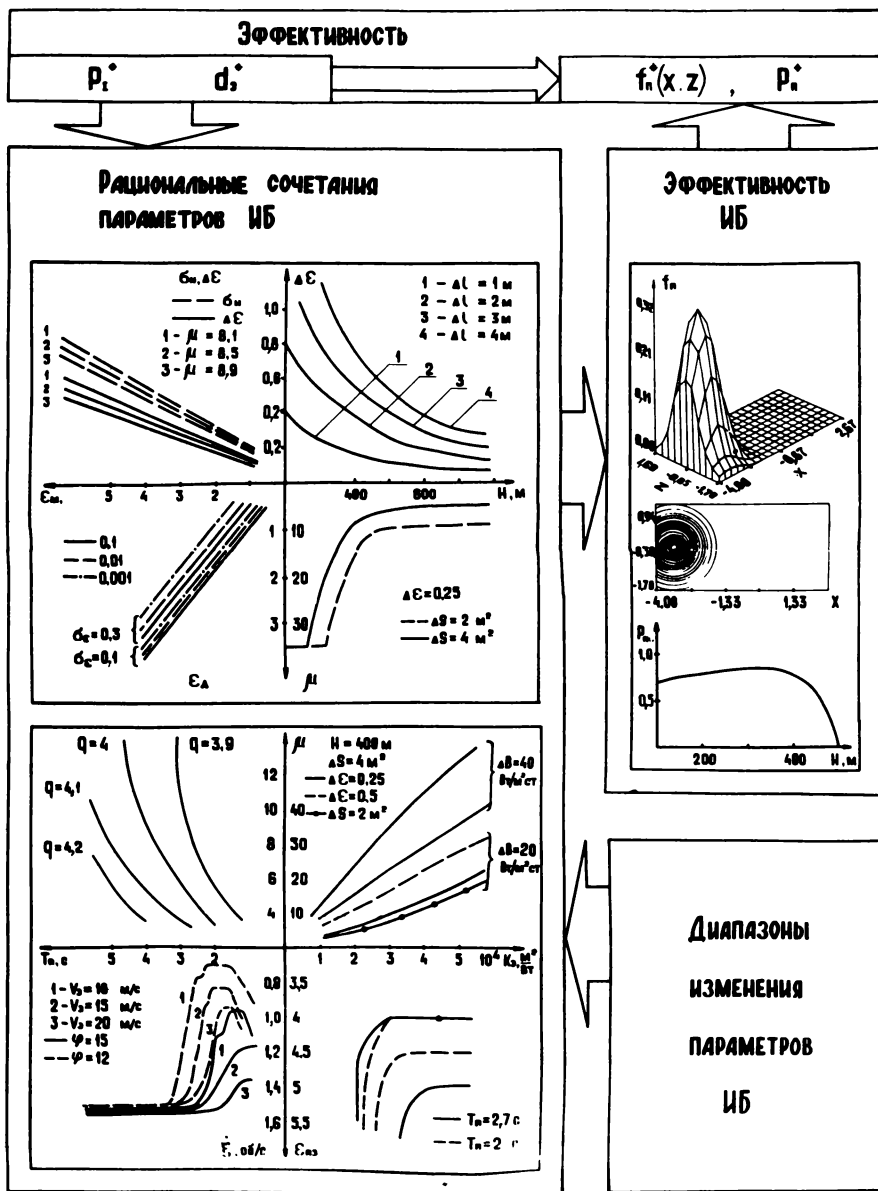


Рис. 4.10. Результаты решения обратной задачи ИБ

(P_{Σ}^* – оптимальная суммарная вероятность; d_{Σ}^* – оптимальный размер СПС; $f_n^*(x, z)$, P_n^* – оптимальные законы распределения точек попадания СПС в маяк и вероятность попадания; $\Delta \varepsilon$ – угловой размер элемента поля зрения; H – высота обнаружения маяка; ε_m – апертура дискриминатора ИБ; σ_c – СКО углового рассеивания; q – пороговое отношение сигнал/шум; μ – отношение сигнал/шум; K_s – энергетический коэффициент; T_n – время поиска; ξ – частота сканирования; V_s – скорость спуска СПС; ΔB – яркость маяка; $\varepsilon_{\text{пз}}$ – угловой размер поля зрения (...); Δl – размер маяка; ΔS – площадь маяка)

Так как ослабление излучения в атмосфере происходит за счет поглощения газовыми компонентами $\beta_{\text{п}}$ (пар, вода, углекислый газ, азот), молекулярного $\beta_{\text{мр}}$ и аэрозольного $\beta_{\text{ар}}$ рассеяния, β можно считать в виде суммы отдельных компонент.

При этом коэффициенты $\beta_{\text{п}}$, $\beta_{\text{мр}}$, $\beta_{\text{ар}}$ рассчитываются по программе LOWTRAN, разработанной Геофизической лабораторией ВВС США.

Использование моделей, описанных в § 4.2 – 4.6 в функционалах § 4.1 – J_1 , J_2 – позволяет решить обратную задачу. Результаты такого исследования в виде графических зависимостей (рис. 4.10), т.е. решение обратной задачи для ИБ, должны завершаться наглядным представлением возможностей системного подхода к проектированию отдельных подсистем СТС.

4.7. Оптимизация параметров блока управления

Приведенные выше математические модели описания функционирования ИБ и СУ представляют собой методику расчета параметров закона распределения точек индикации маяка и точек попадания в маяк.

Исследование собственно контура управления может проводиться любыми традиционными методами [40, 41].

Рассмотрим подробнее оптимизацию параметров блока управления. На рис. 4.11 показана схема блока оптимизации, входящего в виде программных модулей в АСОТО, из которой видно, что три уровня оптимизации позволяют провести:

I. Оптимизацию параметров конкретной СПС для определения наиболее целесообразных режимов функционирования системы.

II. Двухэтапную оптимизацию подсистем СТС (в соответствии со схемой, показанной на рис. 4.12).

III. Оптимизацию ресурсных характеристик. Алгоритмы этого уровня приведены в работе [8] и поэтому здесь не рассматриваются.

Оптимизация I уровня представляет собой оптимизацию параметров подсистем СТС исходя из критерия технической реализуемости. Предполагается, что подсистемы СТС проработаны и имеются функциональные зависимости выходных величин от параметров подсистем. Такие зависимости могут быть получены по результатам математического и полунатурного моделирования, летных испытаний, по прецедентам. Задача состоит в выборе (или подтверждении правильности уже выбранных) параметров подсистем, обеспечивающих максимальную вероятность доставки груза одной платформой при условии нахождения маяка в зоне обзора информационного блока СПС.

Для простоты выкладок рассмотрим оптимизацию при следующих предположениях:

коэффициент корреляции ошибок доставки грузов по осям OX , OZ $r < 0,15$, тогда в соответствии с работой [31] можно применять свертку законов распределения случайных величин;

вероятность попадания $P(x_{\text{п}}, z_{\text{п}})$ для одного носителя в блоке платформ не меняется;

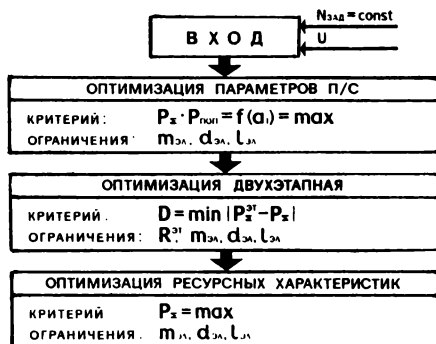


Рис. 4.11. Схема блока оптимизации
(P_z^2 , P_z – эталонная и текущая суммарная вероятности СПС; $P_{пол}$ – вероятность попадания группы СПС в район приземления; $m_{эл.}, d_{эл.}, l_{эл.}$ – габаритно-массовые характеристики элементарной СПС; R^2 – радиус зоны обзора ИБ)

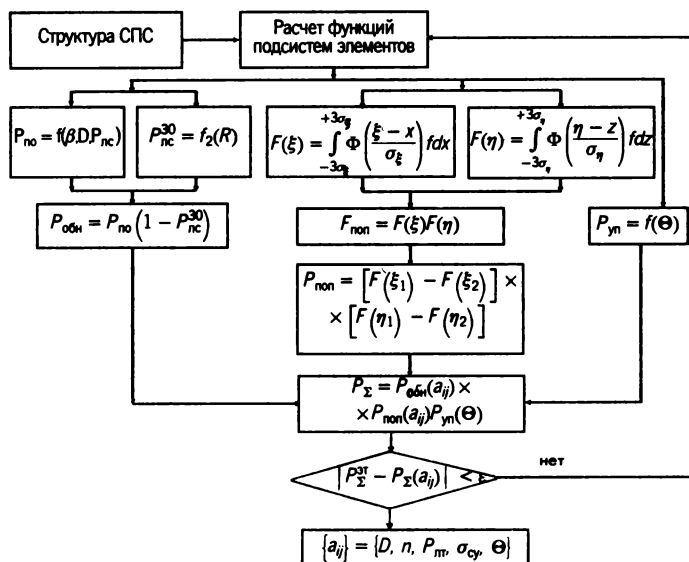


Рис. 4.12. Схема 2-этапной оптимизации
($P_{по}$, $P_{лс}$, $P_{пол}$, $P_{уп}$ – вероятности правильного обнаружения, ложных срабатываний, обнаружения, условного попадания соответственно; Θ – угол подхода к маяку; $F(\cdot)$ – интегральный закон распределения случайных величин; P_z – суммарная вероятность; ϵ – точность итерационного процесса; D – дальность обнаружения маяка; σ_{cy} – СКО системы управления)

оси рассеивания эллипсов и координатные оси группы маяков параллельны.

В качестве критерия выберем выражение

$$P = P_{\text{поп}} P_{\Sigma} = P_{\Sigma} \left[2\Phi \left(\frac{x+R}{\sigma_x} \right) - 1 \right] \left[2\Phi \left(\frac{z+R}{\sigma_z} \right) - 1 \right], \quad (4.10)$$

где P_{Σ} – вероятность попадания в маяк при условии его нахождения в зоне обзора СПС; $P_{\text{поп}}$ – вероятность попадания зоны обзора ИБ на площадь группы маяков (при нормальном законе распределения ошибок) и симметрии группы маяков; Φ – интеграл вероятности; σ_x, σ_z – СКО по осям OX, OZ ; R – радиус ЗО ИБ.

В качестве ограничений выступают пределы изменения параметров подсистем СПС, определяемые из условия технической реализуемости.

Правомочность выбора такого критерия определяется следующим.

Пусть функция

$$\psi [K(\alpha)] = \Phi_y K(\bar{\alpha}) = P_{\Sigma} P_{\text{поп}},$$

где $\bar{\alpha}$ – вектор параметров подсистем СПС, тогда согласно теории исследования операций [28] из формулы

$$N = \sum_{i=1}^{m_m} \left[1 - \prod_{j=1}^n (1 - \psi_i) \right]$$

имеем, что

$$\frac{\partial N}{\partial \psi} > 0 \text{ и } \frac{\partial \psi}{\partial K} = 1 > 0.$$

При заданном числе СПС (обратная задача) для сравнения альтернативных вариантов следует использовать обобщенный показатель $K(\bar{\alpha}) = P_{\Sigma} P_{\text{поп}}$ [11], причем для наилучшего варианта $K(\bar{\alpha})$ должно быть максимальным.

Рассмотрим оптимизацию выражения (4.10) с учетом того, что $P = K(\alpha) = \max$.

Пусть $P = F(a_1, a_2, \dots, a_m)$ – функция параметров $a_i, i = \overline{1, m}$, входящих в выражения для вероятностей обнаружения P_o , попадания P_n , надежности P_n (причем $a_1 \equiv R$).

Тогда задача состоит в том, чтобы найти $P = F(a_1, a_2, \dots, a_m) = \max$.

Для безусловного экстремума функции P необходимым условием оптимума является равенство нулю градиента функции

$$\nabla P(a_1, a_2, \dots, a_m) = \left(\frac{\partial P}{\partial a_1}, \dots, \frac{\partial P}{\partial a_m} \right) = 0. \quad (4.11)$$

Достаточным условием минимума функции является $\Delta \bar{a}^T H(\bar{a}) \times \Delta \bar{a} \geq 0$ при любых $\Delta \bar{a} \neq 0$, где $\bar{a} = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}^T$ - вектор параметров СПС; $H = \left[\frac{\partial^2 P(a_1, a_2, \dots, a_m)}{\partial a_i \partial a_j} \right]$, $i, j = \overline{1, m}$; H - Гессиан функции $P(\bar{a})$.

Записав систему (4.10) с учетом выражения (4.11), получим для линейного случая:

$$\left. \begin{aligned} \left[2\Phi \left(\frac{x_m + R}{\sigma_{\Sigma x}} \right) - 1 \right] \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial R} + 2P_{\Sigma} \frac{\partial \Phi \left(\frac{x_m + R}{\sigma_{\Sigma x}} \right)}{\partial R} &= 0; \\ \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial a_i} &= 0, \quad i = \overline{2, m}. \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

С учетом

$$\frac{\partial \Phi}{\partial R} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\Sigma i}} \exp \left[-\frac{(i_m + R)^2}{2 \sigma_{\Sigma i}^2} \right] = f_{i+R}, \quad i = x \vee z,$$

и обозначив

$$\mu_{x+R, z+R} = \frac{f_{x+R}}{2\Phi_x - 1} + \frac{f_{z+R}}{2\Phi_z - 1} = \mu_{xz},$$

получим, что система (4.12) примет вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial R} + 2P_{\Sigma} \mu_{xz} &= 0; \\ \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial a_i} &= 0, \quad i = \overline{2, m}. \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

Из второго уравнения системы (4.13) следует, что если $P_{\Sigma} = P_0 P_n P_n$, то справедливо тождество

$$\frac{P'_0}{P_0} + \frac{P'_n}{P_n} + \frac{P'_n}{P_n} = -\mu_{xz}.$$

В случае $P_n = \text{const}$ получим

$$\frac{P'_0}{P_0} = -\frac{P'_n}{P_n},$$

т.е. относительные градиенты функций P_0 и P_n противоположны.

В общем случае система (4.13) аналитически не решается.

Пусть каждую функцию из составляющих P_{Σ} можно аппроксимировать на интервале (R_1, R_2) квадратным трехчленом вида $(dR^2 + bR + c)$. В общем случае $P_i = \sum_{k=1}^3 b_i a_i^k$, k - любое.

Пусть $P_k = \prod_{i=1}^3 (d_i R^2 + b_i R + c_i)$, причем функция P_k может быть записана по любому из аргументов a_i , $i = \overline{1, m}$.

Для примера рассмотрим случай, когда $P = f(a_1 \equiv R)$, тогда

$$P'_k = 2d_k R + b_k;$$

$$P'_\Sigma = \sum_{i=1}^3 (2d_i R + b_i) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^3 (d_j R^2 + b_j R + c_j)$$

или

$$P'_\Sigma = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=0}^5 B_{ji} R^j,$$

где B_{ij} — коэффициенты, выражаемые через величины d_i , b_i , c_i .

Гессиан H вычисляется как матрица вторых частных производных:

$$H = \{g_{ij}\}, \quad i, j = \overline{1, m},$$

где

$$g_{11} = 2 \frac{P_\Sigma}{\partial R} \mu_{xz} + 2 P_\Sigma \frac{\partial \mu_{xz}}{\partial R} + \frac{\partial^2 P_\Sigma}{\partial R^2};$$

$$g_{1j} = 2 \frac{\partial P_\Sigma}{\partial a_j} \mu_{xz} + \frac{\partial^2 P_\Sigma}{\partial R \partial a_j}, \quad j = \overline{2, m};$$

$$g_{ij} = \frac{\partial^2 P_\Sigma}{\partial a_i \partial a_j}, \quad i = \overline{2, m}, \quad j = \overline{1, m}.$$

В случае $P_\Sigma = \text{const}$ имеем

$$H = 2 P_\Sigma \frac{\partial \mu_{xz}}{\partial R},$$

но

$$(\mu_{xz})'_R = \mu'_x + \mu'_z,$$

где

$$\mu'_i = -\mu_i^2 \left(1 + \frac{i_m + R}{\sigma_{\Sigma i}^2 f_{i+R}} \right), \quad i = x \vee z.$$

При любых значениях R величина $\mu'_{xz} < 0$, т. е. $F_2 < 0$, таким образом, экстремум, найденный в результате решения системы (4.13), является максимумом.

При $P_\Sigma = A R + B$ максимум P достигается при

$$P_{\text{opt}} = (A + 2B \mu_{xz}) / A,$$

причем

$$F_2 = 2 A \mu_{xz} + \frac{A}{2 \mu_{xz}} \left[\mu_x^2 \left(1 + \frac{x_m + R}{\sigma_{\Sigma x}^2 f_{x+R}} \right) + \mu_z^2 \left(1 + \frac{z_m + R}{\sigma_{\Sigma z}^2 f_{z+R}} \right) \right],$$

где $\text{sign}(F_2) = \text{sign}(A)$.

$$\left. \begin{array}{l} \text{При } A > 0 \wedge F_2 < 0 \Rightarrow P_{\Sigma} = \min \\ \text{при } A < 0 \wedge F_2 < 0 \Rightarrow P_{\Sigma} = \max \end{array} \right\} \text{ при } R_{\text{opt}}.$$

Окончательно решение поставленной задачи осуществляется следующим образом.

1. Записывается выражение $P_{\Sigma} = \prod_{i=1}^l P_i$ и формируется критерий P .

2. Записываются коэффициенты системы (4.13).

3. Из анализа функционирования СТС определяются граничные значения величин $\{a_i\}$, $i = \overline{1, m}$, на основании которых определяются начальные приближения $\{a_i^0\}$, $i = \overline{1, m}$.

4. С помощью итерационного метода (см. ниже) определяется решение системы (4.13).

5. По найденному вектору $\{a_i^{\text{opt}}\}$, $i = \overline{1, m}$ рассчитываются величины P_i , $i = \overline{1, l}$ и P_{Σ} .

Расчет аппроксимирующих функций. Для решения системы (4.13) необходимо записать составляющие как функции параметров a_i , $i = \overline{1, m}$.

Пусть в результате полунатурного моделирования СТС, летных испытаний и т.п. получены графические (или табличные) зависимости от параметров a_i , $i = \overline{1, m}$.

На каждой кривой выбираются три точки (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , (x_2, y_2) и определяется зависимость

$$P_i = \frac{(x - x_1)(x - x_2)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)} y_0 + \frac{(x - x_0)(x - x_2)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2)} y_1 + \frac{(x - x_0)(x - x_1)}{(x_2 - x_0)(x_2 - x_1)} y_2,$$

где x — параметр, являющийся аргументом зависимости $P_i = f(x)$, $i = \overline{1, m}$; y_0, y_1, y_2 — значения P_i в точках x_0, x_1, x_2 , причем точки могут быть взяты произвольным образом (частный случай при $n = 2$ в интерполяционной формуле Лагранжа).

Более высокую степень ($n > 2$) брать нецелесообразно ввиду усложнения расчетов. В случае невозможности аппроксимировать график одной функцией целесообразно использовать двусторонний прерыватель [32]. Тогда

$$P_i = \sum_{j=1}^n \frac{R_{j+1}}{R_j} I(x) (d_j R^2 + b_j R + c_j),$$

где

$$\frac{R_{j+1}}{R_j} I(x) = \frac{1}{2} \left[\frac{|x - R_j|}{x - R_j} - \frac{|x - R_{j+1}|}{x - R_{j+1}} \right];$$

n — число сопрягаемых участков кривой.

Решение оптимизационной системы. Существует много способов решения системы (4.13), отличающихся как точностью, так и временем расчетов на ЭВМ.

Рассмотрим следующий метод решения системы, которую перепишем в виде:

$$\Phi_i(x_1, x_2, \dots, x_m) = 0, \quad i = \overline{1, m},$$

или

$$x_i + \lambda_i \Phi_i(x_i) = x_i, \quad i = \overline{1, m},$$

где λ_i – множитель [43]. Обозначим левую часть через функцию $\varphi_i(x_i)$, тогда, если

$$\left| \partial \varphi_i / \partial x_i \right| < 1, \quad \text{т. е.} \quad \left| 1 + \lambda_i \frac{\partial \Phi_i}{\partial x_i} \right| < 1,$$

сходимость итерационного процесса гарантирована [42].

Запишем систему уравнений в виде:

$$\left. \begin{aligned} x_{1, k} &= x_{1, k-1} + \left[2 P_{\Sigma}(\bar{x}_{k-1}) \mu_{xz}(R) + (P_{\Sigma})'_R \right] \lambda_1; \\ x_{2, k} &= x_{2, k-1} + \left[\partial P_{\Sigma}(\bar{x}_{k-1}) / \partial x_2 \right] \lambda_2; \\ &\vdots \\ x_{m, k} &= x_{m, k-1} + \left[\partial P_{\Sigma}(\bar{x}_{k-1}) / \partial x_m \right] \lambda_m, \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

где $x_i \equiv a_i$, $i = \overline{1, m}$; k – номер итерации.

Расчет системы (4.14) ведется до выполнения условия $|x_{i, k} - x_{i, k-1}| < \varepsilon_i$, $i = \overline{1, m}$, где ε_i – заданная точность вычислений i -й переменной.

В качестве начального приближения выбираются $\{a_i\} = \{a^0\}$, равные левому значению диапазона граничных величин, определенных из технической реализуемости подсистем СПС.

Расчет величины λ_i , $i = \overline{1, m}$ проводится следующим образом [43].

Для найденных величин $\bar{a}_0 = \{a^0\}^T$, $i = \overline{1, m}$ рассчитываются возможные функции:

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= 2 \left(\frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial R} \right) \Big|_{\bar{a}_0} \mu_{xz}(\bar{a}_0) + 2 P_{\Sigma}(\bar{a}_0) \left(\frac{\partial \mu_{xz}}{\partial R} \right) \Big|_{\bar{a}_0} + \left(\frac{\partial^2 P_{\Sigma}}{\partial R^2} \right) \Big|_{\bar{a}_0}; \\ \Psi_i &= \left(\partial^2 P_{\Sigma} / \partial a_i^2 \right) \Big|_{\bar{a}_0}, \quad i = \overline{2, m}. \end{aligned}$$

Если

$\Psi_i < 0$ и $|\Psi_i| < 1$, то $\lambda_i = 1$;

$\Psi_i > 0$ и $|\Psi_i| < 1$, то $\lambda_i = -1$;

$\Psi_i < 0$ и $|\Psi_i| > 1$, то $\lambda_i = 1 / |\Psi_i|$;

$\Psi_i > 0$ и $|\Psi_i| > 1$, то $\lambda_i = -1 / |\Psi_i|$.

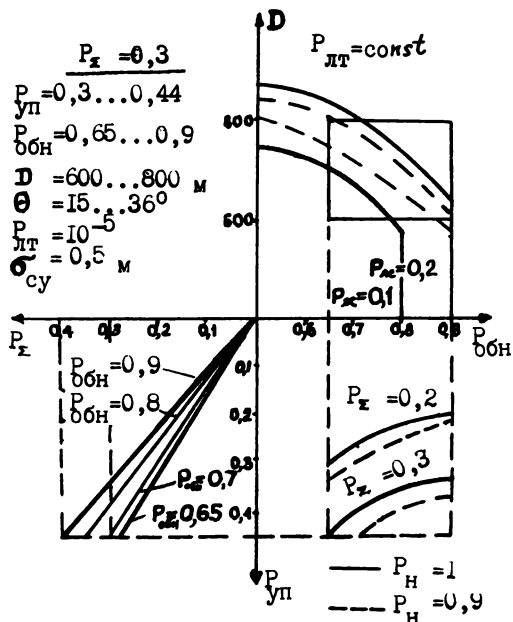


Рис. 4.13. Результаты решения обратной задачи СПС

(P_{Σ} — суммарная вероятность СПС; $P_{уп}$ — вероятность попадания в маяк; D — дальность обнаружения маяка; $P_{лт}$ — вероятность ложных тревог; $\sigma_{су}$ — СКО системы управления; Θ — угол подхода к маяку; $P_{лж}$ — вероятность ложных срабатываний; P_H — надежность СПС; $P_{обн}$ — вероятность обнаружения маяка)

Следует отметить, что данный подход позволяет, имея наборы зависимостей для подсистем СТС, например, для различных типов ИБ, СУ, ИО и т. п., оперативно получать наиболее рациональные параметры подсистем, обеспечивающие оптимальные режимы ее функционирования.

Оптимизация II уровня. 2-этапная оптимизация подразумевает, что на I уровне (см. рис. 4.11) рассчитываются параметры, которые становятся эталонными для II уровня. Тогда критерий оптимизации будет следующим:

$$D = \min \left| P_{\Sigma}^{\text{эт}} - P_{\Sigma} (R, D_n, n, \dots) \right| ,$$

где $P_{\Sigma}^{\text{эт}}$ – значение P_{Σ} , найденное на I уровне; $P_{\Sigma} (R, D_n, n, \dots)$ – функциональная зависимость P_{Σ} от параметров R , дальности действия ИБ D_n , располагаемой перегрузки n и других величин.

Используя тот же прием, записываем $P_{\Sigma} = \prod_{i=1}^3 P_i = P_o P_n P_n$ – требу-

емую функциональную зависимость – на основе соотношений, описывающих ИБ, СУ, и т.п.

Проверку по критерию эффективности проводить не требуется, так как значение $P_{\Sigma}^{\text{эт}}$ выбрано исходя из выполнения этого критерия.

Пример и результаты оптимизации.

На рис.4.13 приведены диаграммы по результатам расчетов для случая, когда в качестве ИБ используется инфракрасная головка наведения, в СУ реализован метод пропорциональной навигации. Ввиду громоздкости выражения для P_i , $i = 1, 3$ здесь не приводятся.

Диаграмма, представленная на рис.4.13, позволяет проектировщику судить о наличии взаимосвязи всех параметров подсистем СТС, удовлетворяющих общему критерию эффективности.

Глава 5. ПОЛУНАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТС

5.1. Принципы построения комплекса полунатурного моделирования

Опыт отработки изделий показал, что применение полунатурного моделирования СТС позволяет не только сократить число их натурных испытаний, но и на этапе создания систем проводить отработку подсистем изделия в условиях динамических воздействий, близких к реальным.

В настоящее время ПНМ становится неотъемлемым этапом при проектировании СТС. Этот процесс является сложным и дорогостоящим из-за отсутствия сформировавшихся подходов к созданию КПНМ.

Создание дорогостоящего КПНМ необходимо для подтверждения характеристик изделия, в том числе и надежности, с учетом многообразия внешних факторов. Стоимость такого подтверждения с помощью натурных испытаний недоступно велика и требует также длительного периода проведения испытаний, увеличивая сроки разработки. Кроме того, натурные испытания не могут охватить всего многообразия внешних условий функционирования изделия и обеспечить проверку всех режимов работы программных и аппаратных средств, подтвердить установленные допуски на параметры и характеристики отдельных подсистем и системы в целом.

Оптимальным вариантом является сочетание проектных разработок, математического и полунатурного моделирования и ограниченного объема натурных испытаний.

В настоящем параграфе изложена методология построения КПНМ для отработки, оценки эффективности и надежности СТС. Сложность создания такой методологии определяется различными типами ИБ, которые в настоящее время прорабатываются и создаются. Это ИБ с чувствительными элементами, работающими в оптическом диапазоне (видимом, инфракрасном или в их комбинации), радиодиапазоне (в том числе миллиметровом), многоспектральные и комбинированные ИБ. С учетом этого КПНМ должен состоять из постоянной части, не изменяемой в зависимости от типа ИБ, и переменной, определяемой диапазоном работ чувствительного элемента ИБ. Кроме того, должна быть еще нарастающая часть для учета влияния сложных метеорологических условий и т.п.

В табл. 5.1 приведены этапы ПНМ, режимы отработки СТС и измеряемые величины.

Задачами 1-го и 2-го этапов являются отработка подсистем СТС в статическом или динамическом режимах с оценкой выходных параметров, определение предельных режимов работы подсистем СТС и формирование банка данных по каждой подсистеме. Цель 3-го этапа состоит в исследовании всего контура наведения СТС, при этом в динамике фиксируются те же выходные параметры подсистем, составляющих контур наведения, которые сравниваются с полученным банком данных. Таким образом можно оценить возникающие неисправности или несовершенства подсистемы с локализацией их причин.

Опыт отработки конкретных СТС показал, что 1-й и 2-й этапы являются наиболее информативными для разработчиков отдельных узлов и подсистем СТС. Так, отработка гироскопической системы ИБ позволила улучшить его характеристики за счет установки дополнительных фильтров. Другими словами, 1-й и 2-й этапы органично вошли в процесс разработки упомянутых подсистем.

Т а б л и ц а 5.1

Этапы и режимы отработки СТС

Этапы	Режим	Измеряемые величины
1.Автономные исследования ИБ	Статический	Максимальная дальность обнаружения, спектральная и энергетическая чувствительность, характеристики обнаружения, ложные тревоги и правильное обнаружение
2.Исследования системы управления	Динамический	Устойчивость, быстродействие, срывы слежения, погрешность гироскопической системы и т.п.
(I уровень) блока управления СПС	»	Параметры выдаваемых сигналов. Характеристики захвата и срыва слежения за объектом в динамическом режиме, предельные динамические характеристики
(II уровень) формирователя сигналов управления	»	
(III уровень) ИБ	»	
3.Моделирование контура наведения СПС	Динамический (и сквозное моделирование)	Вероятности попадания, обнаружения, захвата, ложных тревог, математическое ожидание промаха, законы распределения точек индикации и попадания

Можно выделить четыре главных составных части комплекса ПНМ (рис.5.1):

имитатор динамики и кинематики движения управляемого объекта, в качестве которого обычно используется динамический стенд, соединенный в комплекс с математической моделью движения, реализованной в виде алгоритмов и программ;

имитатор фоновой обстановки, создающий изменяющееся во времени и пространстве распределение лучистостей фонов и объектов;

управляющая ЭВМ или комплекс вычислительных средств, объединенных в единую сеть с программным обеспечением;

объект исследования с устройствами сопряжения его с комплексом ПНМ.

Вычислительные средства комплекса ПНМ связаны с динамическим стендом, ИФО и испытуемой СТС с помощью устройств сопряжения с объектом (УСО). Это могут быть: входные и выходные регистры, ЦАП и АЦП, ключи, устройства прерывания и т.п. Общие задачи инициализации, управления и сбора информации решаются центральной ЭВМ. Отдельные ЭВМ (или микропроцессоры), соединенные в единую сеть с центральной, управляют своими подсистемами.

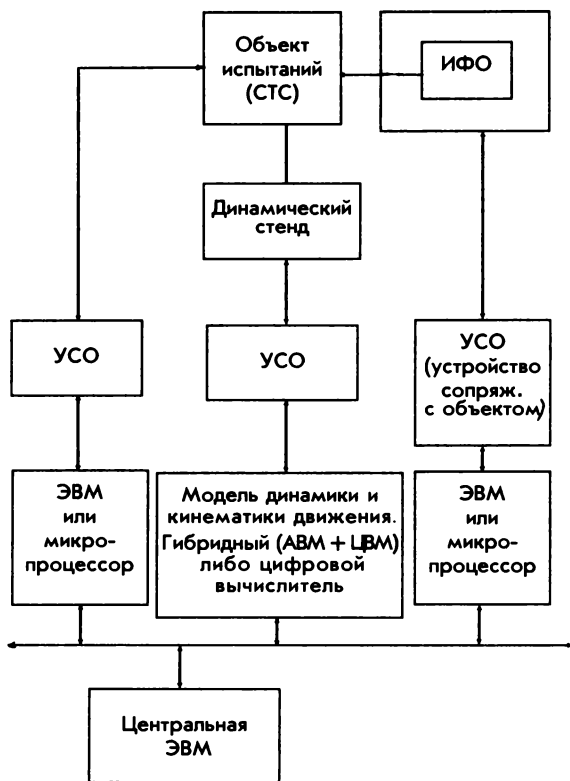


Рис. 5.1. Схема комплекса полунатурного моделирования СТС

Моделирование динамики и кинематики движения может производиться на гибридном аналого-цифровом вычислителе, в состав которого включается аналоговая вычислительная машина (АВМ) и цифровая вычислительная машина.

Задачей ИФО является имитация полей излучения заданных объектов и окружающего пространства в требуемом диапазоне длин волн. ИФО является наиболее трудоемким блоком комплекса, причем направления создания имитаторов в настоящее время полностью не сформировались.

Возможны два пути создания ИФО:

универсальный имитатор (с управлением от персональной ЭВМ);
простой, но точный (например, по угловому разрешению) имитатор,
работающий в конкретном диапазоне длин волн (ИК, ММ, ИК + ММ,
ИК + ИК).

Требования к имитаторам формируются, исходя из характеристик конкретного исследуемого изделия и решаемых задач.

Программное обеспечение КПНМ состоит из следующих программ и модулей:

диалогового монитора, обеспечивающего выбор режима работы моделируемого комплекса, имитирующего вызов других модулей;

модулей инициирования работы КПНМ, подготовки его к проведению очередного эксперимента, выдачи управляющих сигналов на оборудование комплекса;

модуля решения в реальном масштабе времени уравнений динамики полета СТС в соответствии с математической моделью реального времени;

модуля управления работой динамического стенда и ИФО, приема сигналов с изделия, их обработки и принятия решения о наличии срабатывания ИБ, фиксации времени срабатывания;

модуля данных о траектории полета СТС;

модуля расчета управляемого полета СТС, определения точек попадания, расчета промаха СТС;

модуля визуализации результатов ПНМ;

модуля печати исходных данных и параметров моделирования;

библиотеки сервисных программ, позволяющих выполнять операции чтения, записи данных в архив и т.п.;

модуля тестовой проверки работоспособности программного обеспечения комплекса.

Процесс создания моделей реального времени предполагает, что нереализуемая в реальном масштабе времени эталонная модель заменяется другой. Это приводит, как правило, к тому, что выходные переменные полученной модели отличаются от эталонных. Цель идентификации состоит в минимизации этого отличия.

Одним из первых шагов приведения модели к виду, реализуемому в реальном масштабе времени, является линеаризация дифференциальных уравнений движения, представленных в эталонной модели.

Поставленная задача сводится к аппроксимации исходной нелинейной векторной функции линейной:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) + DW(t); Y(t) = CX(t),$$

где $X(t)$ – n -мерный вектор состояния СТС; A – матрица постоянных коэффициентов размерности $(n \times m)$; $U(t)$ – l -мерный вектор управления; D – матрица возмущения $(n \times l)$; $W(t)$ – l -мерный вектор возмущения; $Y(t)$ – вектор наблюдений размерности p ; C – матрица наблюдений $(p \times n)$; B – матрица управления размерности $(n \times m)$.

Предложенная идеология построения КПНМ СТС позволяет решать различные задачи как исследовательского, так и проектного характера. В настоящее время созданы и отрабатываются комплексы ПНМ для

СТС с чувствительными элементами ИБ, работающими в радиотепловом (миллиметровом), оптическом (в том числе двухспектральные ИК) диапазонах длин волн.

5.2. Моделирование динамики и кинематики движения с помощью динамических стендов

В настоящее время хорошо отработаны структурные схемы построения динамических стендов, однако процесс их совершенствования продолжается: повышается точность отработки управляющих воздействий за счет введения цифровых датчиков обратных связей; коррекцией нелинейностей и прямым решением соответствующих дифференциальных уравнений в реальном масштабе времени повышаются устойчивость и быстродействие систем. Скачок вперед по пути совершенствования динамических стендов был сделан за счет введения микропроцессорных систем в аппаратуру управления стендами.

За рубежом наиболее известной фирмой, производящей динамические стенды, является Carco Electronics (USA) [44]

Из отечественных фирм – производителей динамических стендов – следует отметить ГОСНИИАС (г. Москва).

Ниже описывается одна из классических схем построения динамического пятистепенного стенда DC-5-450, разработанного фирмой DYNATEST [ФРГ] [44]. В состав стенда входят: трехступенной динамический стенд, совмещенный с двухступенным узлом имитатора маяка, комплекс ЭВМ,



Рис. 5.2. Динамический стенд DC-5-450

маслонасосная станция для обеспечения работы гидроприводов стенда. Внешний вид динамического стенда DC-5-450 показан на рис. 5.2.

Трехступенной стенд имеет тангажную и курсовую рамки с горизонтальными осями вращения и креновую рамку с вертикальной осью вращения. Рамки угла места и азимута имитатора маяка собраны по схеме с горизонтальной осью вращения.

Стенд позволяет испытывать изделия массой до 120 кг, диаметром до 45 см и длиной до 150 см.

Основные характеристики трехступенного стенда приведены в табл. 5.2.

Т а б л и ц а 5.2

Основные характеристики трехступенного стенда для воспроизведения угловых колебаний изделия

Характеристики	Ось вращения		
	по тангажу	по курсу	по крену
Угол поворота, ... °	± 50	± 50	± 70
Погрешность отработки угла, ... °	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$
Угловая скорость, рад/с:			
максимальная	3,5	3,5	12
минимальная	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$
Угловое ускорение максимальное, рад/с ²	220	250	600
Частота отработки синусоидального сигнала (амплитуда 1° при сдвиге фаз 90°), Гц	17	18	26

Параметры комплекса ЭВМ стенда:

Тип ПЭВМ	HP-9320
Операционная система	BASIC, UNIX
UNIX ОЗУ	(4+1) Мбайт
Тактовая частота	32 МГц
Гибкие диски	3,5 дюйма
Число каналов линии связи	40

Характеристики двухступенного имитатора маяка:

Блок имитатора:

масса	60 кг
диаметр	50 см
длина	50 см
Углы поворота по азимуту и углу места	$\pm 50^\circ$
Погрешность отработки угла	$\pm 0,1^\circ$

Угловая скорость:

максимальная	1,5 рад/с
минимальная	$1,2 \cdot 10^{-5}$ рад/с

Угловое ускорение максимальное 20 рад/с²

Частота отработки синусоидального сигнала
(амплитуда 1° при сдвиге фаз 90°) 5 Гц

5.3. Вопросы полунатурного моделирования систем управления со следящими ОЭС

5.3.1. Обоснование структурной схемы имитатора

Совершенствование алгоритмов управления и обработки информации с применением принципов обработки изображений в нескольких спектральных диапазонах приводит к существенному усложнению испытательных комплексов ПНМ и имитационной аппаратуры. Проблема создания имитатора осложняется еще и тем, что генераторы полей лучистости должны формировать динамически изменяющееся изображение в соответствии с законом движения управляемого объекта.

Существуют технические ограничения, обусловленные возможностями элементной базы, не позволяющие строить КППМ, выполняющий задачу исследования следящей ОЭС в полном объеме электронного пуска. Приведем только некоторые наиболее существенные из них.

В схеме имитатора с моделированием дальней зоны с помощью коллиматора диаметр объектива должен быть таким, чтобы не затенять входной зрачок ОЭС:

$$D_k/2 > L \sin \varphi + D_o \cos \varphi/2 + \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} + \varphi \right) \left[L \cos \varphi - \frac{D_o}{2} \sin \varphi \right],$$

где D_k , D_o – диаметры входного зрачка коллиматора и ОЭС соответственно; L – расстояние от выходного зрачка объектива коллиматора до ОЭС; φ – угол наклона линии визирования; α – угол обзора ОЭС.

Реализация широкоугольных, с большим диаметром входного зрачка, объективов вызывает серьезные трудности. Для схемы моделирования дальней зоны с помощью проекции изображения на экран, размещенный в предметной плоскости, ограничения обусловлены значительным ростом мощности источника-проектора при установке экрана на большом удалении от входного зрачка ОЭС.

Одно из ограничений связано с недостаточной производительностью управляющих ЭВМ, работающих в реальном масштабе времени. Например, двумерный массив яркостей, выдаваемый на имитатор, должен содержать N^2 слов:

$$N^2 \geq (2R \operatorname{tg} \alpha / \Delta r)^2,$$

где R – наклонная дальность; Δr – погрешность наведения.

При применении сверхбыстродействующих ЦАП выдача массива 1000×1000 слов ($R = 1000$ м, $\alpha = 10^\circ$, $\Delta r = 0,5$ м) обеспечивается с тактом 20...50 мс. Такой такт выдачи информации способен удовлетворить требованиям, налагаемым динамическими характеристиками системы наведения. Однако преобразование массивов яркости с требуемым быстродействием способны выполнить только параллельно работающие вычислители типа транспьютеров.

Одной структурной схеме имитатора могут отвечать многочисленные варианты построения аппаратуры. В общем случае оптимизация

должна проводиться путем декомпозиции сложной системы на ряд подсистем (иерархических уровней), одной из которых является имитатор входного оптического сигнала. Выбор оптимального имитатора или класса имитаторов из множества альтернатив возможен, например, целенаправленным перебором субоптимальных претендентов на основе векторного показателя качества.

Вопрос упрощения имитатора без снижения информативности получаемых результатов является важной задачей.

В настоящее время в теории моделирования сложились определенные принципы построения модели, которые можно перенести и на процесс испытаний, имеющий по сути модельную природу и направленный на согласование гипотетической модели, описывающей ожидаемые проектировщиками свойства системы, с результатами наблюдений.

Важная черта процесса испытаний – искусственное происхождение – позволяет как и при математическом моделировании упорядочить множество допустимых структур системы и свести испытания к проверке типовых заведомо отработанных компонентов.

Реализуя более простые испытания и экстраполируя их результаты на более сложные условия, можно упростить и ускорить испытания.

Ю.Г. Полляк в своей работе [45] предлагает упростить и ускорить испытания на основе перенесенных из теории моделирования подходов:

- специализации – упрощения или разделения процесса испытаний соответствующим выбором контролируемых характеристик;

- пространственного разделения – автономного изучения компонентов системы с имитацией их окружения и последующего объединения результатов с помощью соответствующей модели;

- упрощения, ограничения разнообразия условий, при которых проводятся испытания, а значит, упрощения испытываемых систем;

Данные принципы можно применить и для упрощения испытаний и испытательной аппаратуры КПНМ.

Процессу собственно наведения в следящей системе предшествует поиск маяка. Необходимость поиска определяется тем, что в момент включения системы ошибка слежения может находиться вне пределов дискриминационной характеристики. Следящая система при этом разомкнута. В процессе поиска ошибку слежения уменьшают настолько, чтобы ее значение оказалось в пределах характеристики дискриминатора и стал возможен захват сигнала.

Этапы поиска и захвата с точки зрения имитации сигнала наиболее сложные, так как необходимо воспроизводить большие поля фонов, соответствующие большим полям обзора. Однако при этом следящая система разомкнута и присутствует только регулярное поисковое движение привода. Большие дальности нивелируют подробности сюжета. Иногда можно считать, что эффекта улучшения разрешающей способности, связанного с приближением изображения, нет.

После захвата маяка головкой наведения следящий привод замыкается.

Таким образом, на точность слежения начинают существенно влиять механические воздействия на элементы привода, например трения в осях гироскопа, уходы ротора. Следящая система должна быть установлена обязательно на динамическом стенде и должны быть воспроизведены траекторные возмущения.

На этом этапе происходит быстрое изменение подробностей сюжета, которыми нельзя пренебрегать. Однако сюжет уменьшается до размеров поля зрения ОЭС в отличие от размеров сюжета на первом этапе.

Рассмотренные выше особенности работы следящей системы на первом и втором этапах позволяют разделить комплекс моделирования со следующими составными элементами в соответствии с решаемыми задачами:

имитатор с большими возможностями по размерности моделируемого массива яркостей, не перестраиваемый по параметрам в реальном масштабе времени и размещаемый неподвижно вне динамического стенда;

имитатор малой размерности массива, перестраиваемый в реальном масштабе времени и размещаемый на одной из степеней (подвижной рамке) динамического стенда.

В последнем случае комплекс моделирования можно еще упростить, исходя из задач, возникающих при штатных испытаниях следящих систем. Обычно требуется проверить работоспособность собственно привода с гиropлатформой и чувствительное звено в сложных ситуациях. Работу привода можно оценить, используя в качестве тестового сигнала точечный источник излучения, имитировать который не составляет проблем. Если известны параметры привода, то оценки характеристик чувствительного элемента можно произвести при неподвижном имитаторе, размещенном вне динамического стенда.

Таким образом процесс испытаний следящей ОЭС можно значительно упростить и ускорить, разделив его на несколько этапов в соответствии с логикой ее работы.

Важно отметить, что для всесторонней оценки работоспособности системы в процесс испытаний следует включать и результаты математического имитационного моделирования. После проведения экспериментов на имитационной модели отдельные блоки ее можно частично заменять реальными образцами. Например, входной сигнал, сформированный на математической модели с помощью соответствующих устройств сопряжения, достаточно просто в виде уровней напряжения подать непосредственно на дискриминатор, минуя оптико-электронный тракт. Характеристики оптико-электронного тракта могут быть сняты автономно и учтены в соответствующей модели.

На последнем, заключительном этапе моделирования при необходимости может быть проведен так называемый электронный пуск по схеме полного сквозного моделирования. Однако вряд ли он является обязательным звеном испытаний, так как основные ключевые моменты отработаны на первых этапах.

5.3.2. Метод оценки параметров имитатора фона, адекватного реальной обстановке

Качество функционирования КПНМ определяется правильным выбором структуры и передаточных характеристик имитатора входного сигнала.

Существуют два основных способа имитации входного оптического сигнала:

- физическое моделирование;
- функциональное моделирование.

Имитаторы первого типа, построенные на основе миниатюрных копий реальной ФО – макетов местности – интенсивно вытесняются имитаторами функционального моделирования, которыми ФО синтезируется с помощью математических моделей на ЭВМ, и сформированный массив лучистости входного оптического сигнала моделирует физический генератор поля лучистостей. Гибкость структуры, легкость развития и наращивания, оперативность смены вида ФО – неотъемлемые качества и преимущества функционального моделирования перед физическим [46].

При идеальной работе имитатора синтезированная на ЭВМ ФО без искажения реализуется в виде двумерного распределения поля лучистостей, динамически изменяющегося в реальном масштабе времени.

При преобразовании по цепочке «синтезатор ФО – генератор поля лучистостей» идеальным имитатором без искажения воспроизводятся спектральные характеристики поля лучистостей в каждой его точке. В процессе моделирования геометрические размеры элементов поля лучистостей должны быть согласованы с угловым полем обзора и мгновенным углом зрения ОЭС. Очевидно, что имитатор входного оптического сигнала является сложным техническим устройством, удовлетворяющим определенным требованиям по структурным, точностным и временным характеристикам.

Достоверность результатов анализа систем управления, получаемая с помощью полунатурного моделирования, может быть обеспечена, если гарантируется высокая степень адекватности входного сигнала, воспроизводимого имитатором, реальным условиям.

В общем случае в качестве критерия подобия используется отклонение n -мерного распределения вероятностей выходной величины математической модели, описывающей реальную ситуацию, от n -мерного распределения той же величины в имитаторе. Прямое сравнение натуральных экспериментальных данных с выходными данными с имитатора вряд ли целесообразно, так как в настоящее время накоплен достаточно обширный статистический материал по фонам местности и существуют подробные математические модели фонов.

На практике вместо n -мерного распределения используют в основном моменты распределения вероятностей не выше второго порядка. Оценка подобия при этом определяется СКО моделирования входного сигнала, выраженного в единицах облученности фотоприемника испытуемой системы:

$$(\hat{E}(\bar{a}) - E)^2, \quad (5.1)$$

где $\hat{E}(\bar{a})$ – оценка параметра облученности в имитаторе; E – тот же параметр в математической модели; $\bar{a}$ – вектор параметров имитатора.

Для получения облученности фотоприемника СТС с имитатора, адекватной облученности в реальной ситуации, заданной математической моделью, параметры вектора $\bar{a}$ имитатора должны быть выбраны так, чтобы они минимизировали функцию (5.1), что эквивалентно минимизации случайной ошибки

$$\sigma[\hat{E}(\bar{a})] = \sqrt{\hat{E}^2(\bar{a}) - (\hat{E}(\bar{a}))^2}$$

и ошибки смещения

$$b[\hat{E}(\bar{a})] = \hat{E}(\bar{a}) - E.$$

Минимум случайной ошибки определяется погрешностью воспроизведения модели в аппаратуре имитатора, вызванной внутренними шумами, неидеальностью преобразующих элементов, погрешностью эталонирования (калибровки), а также ограничениями, зависящими от стоимости элементной базы.

При решении задачи минимизации необходимо назначить минимальное значение среднего квадрата ошибки моделирования облученности. Реальная ОЭС не различает флуктуаций облученности, меньших по значению пороговой чувствительности. Последняя зависит от характеристик входного оптико-электронного тракта и определяется способностью приемника излучения, угловым разрешением, полосой пропускания тракта усиления. Кроме того, пороговая чувствительность выбирается из требуемых соотношения сигнал/внутренний шум и максимальной дальности, необходимой для самонаведения. Все эти характеристики обычно известны к моменту испытаний системы управления методом ПНМ.

Пороговый поток Φ_0 определяется по формуле

$$\Phi_0 = m A^{1/2} \Delta f^{1/2} / D^*,$$

где m – отношение сигнал/шум; A – площадь чувствительного элемента; Δf – эквивалентная шумовая полоса; D^* – удельная обнаружительная способность.

Пороговая облученность $E_{\text{пор}}$ определяется отношением порогового потока к эквивалентной площади пятна рассеяния.

Итак, можно считать, что имитатор входного сигнала адекватен реальной ситуации, если вектор параметров $\bar{a}$ удовлетворяет системе уравнений:

$$\begin{cases} [\hat{E}(\bar{a}) - E]^2 = E_{\text{пор}}^2; \\ f(\bar{a}) = 0. \end{cases} \quad (5.2)$$

Первое уравнение в системе (5.2) означает ограничение случайной составляющей ошибки оценки облученности в имитаторе, второе урав-

нение определяет связи между параметрами имитатора, создающие условия реализации устройств.

Рассмотрим, как преобразуются уравнения оценки параметров имитатора применительно к системам управления с пассивными ГСН.

Поля лучистостей, на фоне которых информационная ОЭС пассивного типа производит обнаружение маяка, можно характеризовать случайным двумерным процессом с энергетическим спектром $S(\bar{\omega})$, где $\bar{\omega} = (\omega_x, \omega_y)$ – пространственная частота двумерного спектра.



Рис. 5.3. Структурная схема алгоритма

Аналогичный сигнал, воспроизводимый в имитаторе, – $S_{\text{им}}(\bar{\omega}, \bar{a})$.

Погрешность имитации, определяющая меру адекватности моделирования, записывается в виде интеграла:

$$\iint_{-\infty}^{\infty} [S(\bar{\omega}) - S_{\text{им}}(\bar{\omega}, \bar{a})] d\omega_x d\omega_y = \rho^2(\bar{a}).$$

Уравнение задает вектор параметров имитатора из условия ограничения случайной ошибки. Для устранения ошибки смещения уравнение дополняется равенством

$$b [\hat{E}(\bar{a})] = 0.$$

Введенный выше критерий адекватности входных сигналов на выходе имитатора реальным условиям позволяет представить обобщенный алгоритм определения параметров имитатора в виде структурной схемы [47] (рис. 5.3).

Предполагается, что структурная схема имитатора (или множество структурных схем) выбрана на основе анализа зарубежных и отечественных разработок и элементной базы.

Необходимо путем решения уравнения, задающего адекватность сигнала на выходе имитатора реальным условиям, определить вектор параметров $\bar{a}$. Согласно структурной схеме для этого:

разрабатывается или выбирается математическая модель входного сигнала, которая приводится к виду, удобному для применения в реальном масштабе времени, при этом модель возможно упрощается, исходя из особенностей ОЭС, системы управления и СТС;

разрабатывается математическая модель преобразований поля лучистостей, производимых в имитаторе;

выходные сигналы, полученные на основе математического моделирования имитатора и ФО, сравниваются между собой по заданному критерию. Если необходимо, уточняется структура имитатора.

Математическому моделированию ФО посвящен ряд фундаментальных и прикладных работ. Для математического моделирования имитатора можно использовать как подробное имитационное моделирование, так и упрощенное – с использованием системных характеристик. Последний метод наиболее нагляден и позволяет получить аналитические зависимости в замкнутом виде, удобные для анализа.

5.3.3. Схемы построения имитаторов фоновой обстановки

Формирователи полей яркости в оптическом диапазоне, соответствующем диапазонам работы следящих оптико-электронных систем в окнах прозрачности атмосферы (0,8...1,2; 3...5; 7...14 мкм), могут быть построены на различных физических принципах.

Следует выделить формирователи с последовательной выдачей информации о яркости каждой пиксели (растровые) и параллельной выдачей информации о яркости всех точек (формирователи с памятью, например, на основе макетов местности, фотографических транспарантов или иных пространственно-временных модуляторов излучения, например, жидкокристаллических).

Рассмотрим одну из перспективных схем растрового лазерного формирования изображения с использованием акустооптического дефлектора, которая не требует механических прецизионных приводов.

Принцип действия акустооптической ячейки основан на взаимодействии световой и акустической волн. Физическая картина дифракции света на упругой волне может быть описана следующим образом. Распространение акустических волн в упругооптической среде сопровождается появлением в этой среде бегущего в периодической последовательности изменений показателя преломления. На периодической решетке показателей преломления происходит дифракция света. Изменяя параметры радиочастотного сигнала, управляющего акустической волной, а именно мощность и частоту, можно управлять соответственно интенсивностью и углом отклонения лазерного луча.

Блок-схема растрового формирователя поля лучистостей для имитатора входного оптического сигнала представлена на рис. 5.4. Выделим здесь основные модули: *I* – физический генератор поля с блоком развертки, *II* – вычислительная часть, *III* – блоки интерфейсов и согласующих устройств.

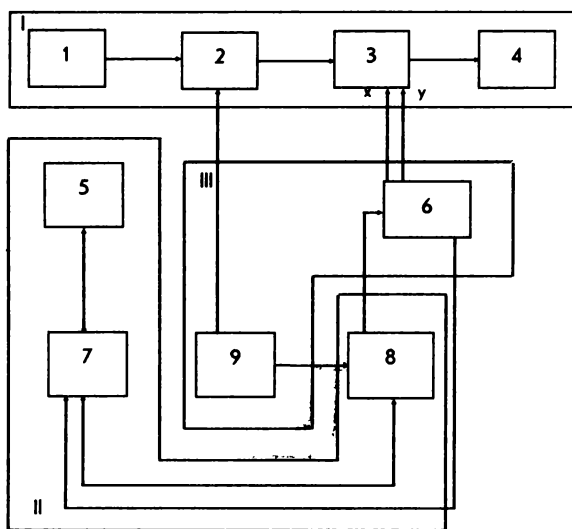


Рис. 5.4. Блок-схема растрового формирователя поля лучистостей для имитатора входного сигнала

Поле яркостей, получаемое в синтезаторе 5 в виде двумерного массива с помощью управляющего устройства 7, преобразуется в последовательность строк и передается в блок памяти на кадр 8. Генератор развертки 6, запускаемый управляющим устройством, через ЦАП 9

последовательно строка за строкой в темпе развертки снимает записанную информацию с блока памяти и напряжение, пропорциональное интенсивности поля в пикселе, изменяет прозрачность модулятора лучистости.

Растр, сформированный блоками 2 и 3, передается во входной зрачок испытуемого изделия. Масштабное согласование поля раstra и требуемого поля на фотоприемнике осуществляется устройством согласования 4. Оно же обеспечивает соблюдение условия дальней зоны.

На рис. 5.5 показана схема основного звена имитатора – генератора поля лучистостей, основанная на использовании акустооптической развертки.

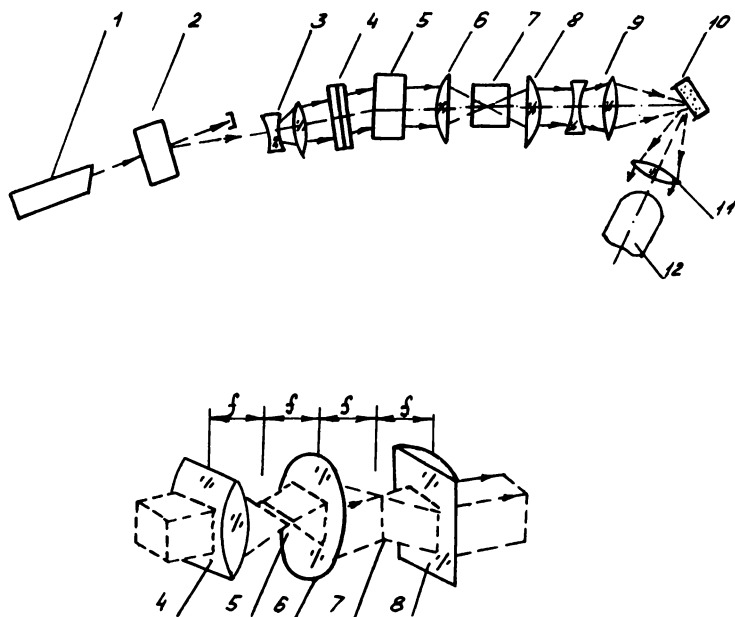


Рис. 5.5. Схема основного звена имитатора

Излучение лазерного генератора 1 с помощью акустооптического модулятора 2 меняется по интенсивности в соответствии с изменением лучистости в пикселях двумерного поля яркостей. Строчно-кадровая развертка луча производится двумерным акустооптическим дефлектором (АОД), построенным на основе акустооптических ячеек 5 и 7.

Условие фазового синхронизма при взаимодействии акустических и оптических волн при изменении частоты ультразвуковой акустической волны достигается за счет уменьшения расходимости оптического луча и увеличения расходимости ультразвукового пучка. Уменьшение расхо-

димости оптического пучка возможно только при увеличении его ширины. Такое изменение структуры пучка обеспечивается телескопической системой 3 и линзами 4, 6 и 8. При этом для получения перетяжки луча во взаимно перпендикулярных направлениях, соответствующих взаимно перпендикулярным направлениям отклонения луча, используют для первого дефлектора линзу с цилиндрической образующей поверхностью 4 и для второго дефлектора – сферическую линзу 6.

Восстановление прежней структуры пучка обеспечивает цилиндрическая линза 8.

Отклоненный пучок концентрируется на диффузном экране с помощью телескопической системы 9. Поле яркостей, сформированное на диффузном экране 10, передается во входной зрачок 12 через линзу-коллиматор 11.

Перейдем к рассмотрению физических генераторов изображений с параллельной выдачей информации. Простейшие из них строятся на основе фотографических транспарантов, облучаемых источником света заданного спектрального диапазона. Информация на фототранспарант может быть выдана из ЭВМ с помощью системы вывода изображений типа FOTOMATION.

Внешний вид проекционного блока имитатора и его считывателя показан на рис. 5.6 и 5.7

Проекционный блок с помощью проектора и системы зеркал, управляемых от ЭВМ, проецирует изображение, нанесенное на фототранспарант, на диффузно-пропускающий пленочный экран. С другой стороны экрана считыватель с помощью оптической системы передает изображение во входной зрачок испытуемого изделия.

Система зеркал, установленная в проекционном блоке, вместе с объективом с переменным фокусным расстоянием в считывателе и управляемая от ЭВМ, обеспечивает моделирование перемещения маяка и приближение изделия к маяку.

Дополнительные возможности имитатора (моделирование крена) изделия дает установленная в считывателе призма поворота изображения маяка.

Перестраиваемые по типу выдаваемого сюжета транспаранты строятся на основе пространственно-временных модуляторов излучения (ПВМИ). Следует выделить светуправляемые многослойные структуры для применения в качестве ПВМИ или, как их называют разработчик (МГТУ) – преобразователи спектра излучения [47, 49].

Наиболее перспективными из них считаются два типа преобразователей:

структуры металл – диэлектрик – полупроводник – жидкий кристалл – металл;

вакуумированные зачерненные мембраны на основе агрегатированных ультрадисперсных структур.

В преобразователях первого типа используется нематический или сегнетоэлектрический смектический жидкий кристалл (ЖК) в сочетании с высокоомным фотополупроводником. Записывающий свет види-

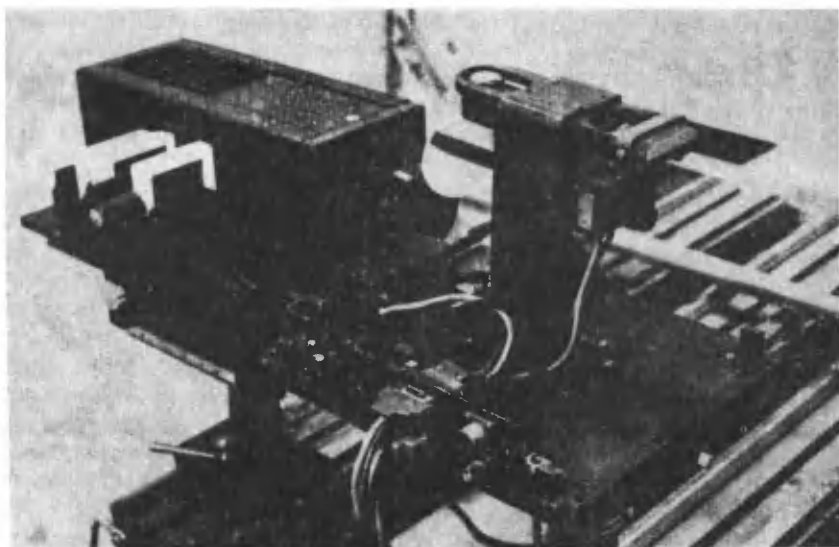


Рис. 5.6. Проекционный блок имитатора

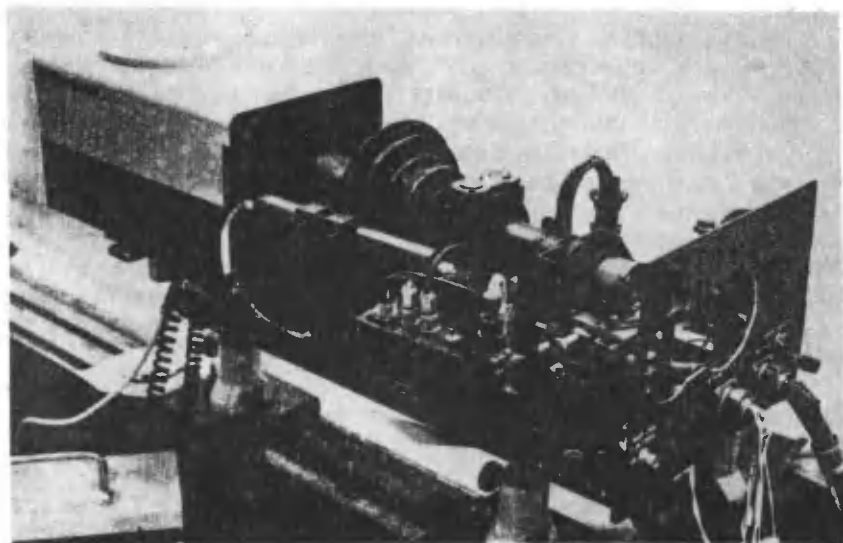


Рис. 5.7. Считыватель имитатора

мого излучения ($0,4...0,6$ мкм) инициирует фотополупроводник и появляющееся на нем напряжение меняет прозрачность ЖК. Для считывания изображения можно использовать излучение в спектральном диапазоне $1,0...5,0$ мкм. Для преобразователя этого типа получены следующие характеристики:

время спада и нарастания отклика $\tau = 0,2...0,3$ с;

пространственное разрешение $n = 3$ линии/мм;

модулирующая способность (контраст) $m = (5...10):1$.

Преобразователи второго типа предназначены в основном для работы в более длинноволновой области спектра ($7...14$ мкм). Преобразование видимого света в тепловое излучение происходит за счет его поглощения структурой и ее разогрева. Получены следующие характеристики преобразователя:

$\tau = 0,2...0,5$ с;

$n = 2$ линии/мм.

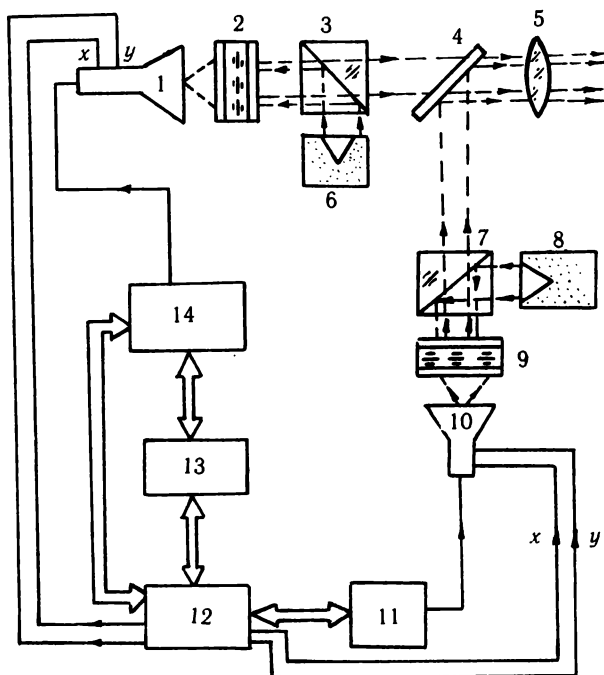


Рис. 5.8. Схема имитатора для ПНМ СТС с двухспектральной ОЭС

На рис. 5.8 показана возможная структурная схема имитатора для испытаний следящей ОЭС с двухспектральным обнаружителем, построенная на основе ЖК ПВМИ. Схема содержит два канала. Каналы с ЖК ПВМИ 2, 9 управляются световым лучом высокоинтенсивных электрон-

но-лучевых трубок (ЭЛТ) 1, 10, содержащих генератор развертки 12. Двумерный массив яркостей, соответствующий моделируемому ЭВМ 13 изображению, поступает от генератора развертки 12 на ЭЛТ через блоки буферной памяти 11, 14. Излучение с блоков излучателей 6, 8 поступает через светоделительные лучики кубика 3, 7 на ПВМИ и, отразившись от них, приобретает пространственную модуляцию. Оптическая пластина 4 суммирует изображения, полученные в каналах. Коллиматор 5 обеспечивает условие «бесконечности».

5.4. Пример комплекса математического и полунатурного моделирования

Одной из основных задач, стоящих перед разработчиками СТС, является обеспечение надежного функционирования элемента в экстремальных погодных условиях и сложной фоновомеховой обстановке. Значительную роль в решении этой задачи играет математическое и комплексное полуфизическое моделирование функционирования системы управления, которое должно обеспечивать проверку всех основных ее элементов, включая аппаратные средства и программное обеспечение, в реальном масштабе времени с учетом возможных внешних условий функционирования.

Для проведения испытаний системы управления в замкнутом режиме за рубежом разработаны специальные оборудование и математическое и программное обеспечение, реализованное на цифровых и гибридных (аналого-цифровых) вычислительных машинах. В частности, на аналого-цифровых вычислительных машинах реализованы программы моделирования аэродинамики изделия, кинематики относительного движения, динамики движения объекта. Кроме того, такая машина осуществляет программное управление ходом испытаний, обеспечивая выполнение заданной циклограммы функционирования. Для стыковки с элементами реальной и стендовой аппаратуры разработаны специальные интерфейсы.

Структурная схема моделирующего комплекса представлена на рис.5.9. Реальные аппаратные и программные средства бортового и наземного оборудования выделены на схеме двойной рамкой, а элементы собственно модели, включая основной управляющий компьютер, – одинарной рамкой. Все блоки или элементы моделирующего комплекса можно разделить на функциональные группы моделей и элементов наземного оборудования, моделей и элементов системы управления собственно изделия и моделей функционирования внешних условий.

Группа моделей и элементов наземного оборудования: 1 – компьютер контроля системы; 2 – наземное оборудование для проверки и контроля функционирования системы; 3 – генератор формирования импульсов заданной формы; 4 – устройство электронной обработки; 5 – устройство приема радиосигналов; 6 – модифицированный генератор импульсов; 7 – модель многофункционального локатора на базе специ-

ализированного компьютера; 8 – модель установки и начальных условий функционирования на базе компьютера «Интеллект-8».

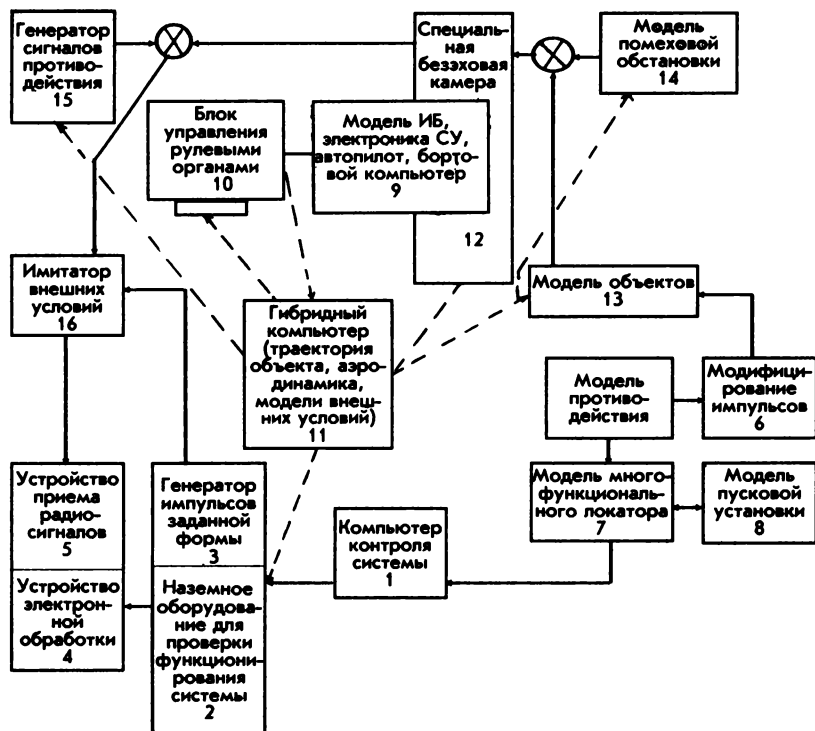


Рис. 5.9. Структурная схема моделирующего комплекса

Включение в состав моделирующего комплекса реального компьютера контроля изделий обеспечивает отработку и проверку реального программного обеспечения наземного оборудования и циклограмму функционирования.

Модели и элементы бортовой аппаратуры: модель головного обтекателя антенны РЛС, модель ГСН, электроника системы управления, автопилот, бортовой компьютер управления – 9 и блок управления рулевыми органами 10.

Вся бортовая аппаратура за исключением бортового компьютера и блока управления рулевыми органами смонтирована на специальном трехступенном стенде. Этот стенд, управляемый гибридным компьютером 11, воспроизводит для ИБ условия движения изделия. В составе программного обеспечения ЭВМ – программы, реализующие модели траектории движения объекта, аэродинамику объекта, кинематику, модели внешних условий. Специальные интерфейсы обеспечивают связь ЭВМ с необходимыми аппаратными или программными элемен-

тами моделирующего комплекса. Моделирующий комплекс обеспечивает приемной аппаратуре изделия возможность получать «реальные» радиосигналы. Для этого предусмотрена специальная радиопоглощающая (безэховая) камера 12 с имитаторами излучения объектов, в которой в ограниченных пределах «моделируется» свободное пространство распространения радиоволн. Размеры камеры составляют 7,5×4,3×4,3 м. Функционирование имитаторов излучения «управляется» моделями объектов 13 и помеховой обстановки 14.

5.5. Решение задач надежности СТС с точки зрения системного анализа

При выборе методического подхода и отработке СТС для оценки надежности следует учитывать ряд принципов:

принцип оптимального распределения задач между подсистемами СТС;

принцип максимизации надежности СТС;

принцип максимизации эффективности выполнения целевой задачи, стоящей перед СТС (показателем выполнения целевой задачи может быть число СПС, математическое ожидание ошибки попадания в заданный объект);

принцип минимизации стоимости выполнения задачи при обеспечении заданной эффективности с требуемой надежностью;

принцип ответственности только на этапах принятия решения о работе носителя СТС (при наличии внешней информации от средств целеуказания).

Приведенные выше принципы должны учитываться при разработке математических моделей. Основным является критерий эффективности системы, оказывающий существенное влияние на интерпретацию свойств системы и результатов ее исследования, т.е. делающий описание целей и задач СТС вполне законченным. Для того чтобы показатель эффективности достаточно полно характеризовал качество работы системы, он должен учитывать все ее основные особенности и свойства, а также условия функционирования и взаимодействия с внешней средой. Показатель эффективности зависит от структуры системы, значений ее параметров, характера воздействий, внешних и внутренних факторов.

Но наличие общего показателя эффективности для исследования надежности такой системы, как СТС, является недостаточным, поэтому приходится вводить множество частных и обобщенных показателей, обращая при этом внимание на их непротиворечивость общему показателю.

Вероятностно-статистическая оценка СТС позволяет определить такие характеристики надежности, как вероятность безотказной работы, частота отказов и т.п. Для ее проведения используются математическое и полунатурное моделирование СТС.

Однако применение системного анализа позволяет решить более сложную и важную для практики задачу – исходя из заданной эффек-

тивности выполнения целевой задачи определить требования к характеристикам подсистем СТС на всех этапах функционирования, в том числе и к показателю надежности. В качестве одного из приемов используется понятие вкладов, которое позволяет выделить наиболее слабые и узкие места и блоки СТС с точки зрения их надежности (см. гл. 3).

При функционировании СТС ее параметры непрерывно меняются $(\bar{V}, x, C_x, C_y, \bar{U}, \dots)$. В соответствии с общей математической моделью надежности изменения любой выходной характеристики подсистемы СТС (ИБ, БВС, СУ, ...) y_i при изменении координат СТС $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ представляются траекторией n -мерного вектора в некотором гиперпространстве допустимых состояний D_i , в общем случае имеющих ограничения.

Выражения для вероятности безотказной работы СТС P_c и среднего времени безотказной работы T_c (представляющего собой среднее время пребывания выходной величины y_i в области D_i – координаты x_i СТС в зоне проекции маяка на земле) имеют следующий вид [49]:

$$P_c(t; y_i \in D) = \iint\limits_{(D)} P(t; y_{i0}; y_i \in D_i) \varphi(y_{i0}) dy_{i0}; \quad (5.3)$$

$$T_c(y_i \in D) = \iint\limits_{(D)} T(y_{i0}; y_i \in D_i) \varphi(y_{i0}) dy_{i0}, \quad (5.4)$$

где y_{i0} – начало траектории выходного параметра $y_i = f_i(x_1, \dots, x_n)$ по условию $(y_i \in D_i)$; $x_1, \dots, x_n$ – параметры подсистем СТС; $\varphi(y_{i0})$ – закон распределения точек начала траектории y_i при некоррелированности параметров подсистем. Если $\varphi(x_{i0})$ – одномерный закон распределения

параметра i -й подсистемы при $t = 0$, то $\varphi(y_{i0}) = \bigcap\limits_{i=1}^n \varphi_i(x_{i0})$; $P(y_{i0}) dy_{i0}$ –

вероятность нахождения начальной точки траектории y в окрестности dy_{i0} точки y_{i0} ; $P(t; y_{i0}, y_i \in D)$ – вероятность того, что время пребывания траектории y_i в области D_i ($y_{i0} \in D_i$) будет больше или равно t ; $P(t; y_{i0}; y_i \in D) = \iiint\limits_{(D)} P(x_1, \dots, x_n; y_{i0}) dx_1 \dots dx_n$ – вероятность то-

го, что траектория y_i , начинающаяся в точке y_{i0} , находится в области значений параметров элементов в окрестности $dx_1, \dots, dx_n$ точек $x_1, \dots, x_n$.

При независимых случайных изменениях параметров на всем интервале $[0 \dots t]$:

$$P(x_1, \dots, x_n) = \bigcap\limits_{i=1}^n P_i(x_1, \dots, x_n),$$

где $P_i(x_1, \dots, x_n)$ – вероятность нахождения i -й подсистемы в области D , получаемой путем аппроксимации гистограммы изменения парамет-

ров подсистемы во времени; $T(y_i 0; y_i \in D_i)$ – среднее время пребывания в области $D(y_i 0 \in D_i)$; $T(y_i 0; y_i \in D) = \int_{x_1} \dots \int_{x_n} P(x_1, \dots, x_n; y_i 0) \times$

$\times T(x_1, \dots, x_n; y_i 0) dx_1 \dots dx_n$; $T(x_1, \dots, x_n; y_i 0)$ – время пребывания в области D_i траектории y_i , начинающейся в точке $y_i 0$, так что $T(x_1, \dots, x_n; y_i 0) > t$.

Функция $T(x_1, \dots, x_n; y_i 0)$ определяется по экспериментальным данным.

Границы области D_i вытекают из требований на выходные характеристики СТС и могут быть определены из условий точности, устойчивости, наблюдаемости, распознаваемости и т.п.

Таким образом, чтобы получить характеристики надежности P_c и T_c по формулам (5.3) и (5.4), необходимо записать соответствующие величины и выражения для вероятностей функционирования каждой подсистемы СТС и распределение точек срабатывания подсистемы во времени или по площади, а также рассчитать границы D_i для каждой подсистемы.

Основными трудностями при решении задачи оценки надежности СТС являются:

одноразовое использование СТС, что требует в некоторых случаях завышения требований к вероятности P_c ;

невозможность многократных испытаний СТС ввиду их чрезвычайной сложности, наукоемкости и технологичности. Поэтому такое важное значение придается численно-аналитическим и полунатурным методам отработки изделия [50]:

многофакторность области применения СТС, что не позволяет даже в условиях математического моделирования «проиграть» все возможные ситуации использования СТС (фон – лес, город, поле, песок, вода; время года, суток; погодные условия; противодействия и т.д.).

Решение этих трудностей заключается не только в системном представлении комплекса, но и в системном и комплексном применении аналитических, имитационных и полунатурных приемов анализа и выбора параметров СТС.

Список литературы

1. *Абраменко Г.В.* Создание высокоточных систем доставки грузов в труднодоступные районы / БИНТИ.– 1993. – № 3.
2. *Абраменко Г.В., Краснощеков А.Ю.* Создание системы центров высокоточных систем доставки грузов в труднодоступные районы / Конверсия в машиностроении. – 1994. – № 1.
3. *Автоматизация поискового конструирования.* / Под ред. А.И.Половинкина.– М.: Радио и связь, 1981.
4. *Вишнякова Л.В.* Метод решения задач определения оптимальных параметров ТС // Труды НИИАС.– 1986. – № 11.
5. *Дитрих Я.* Проектирование и конструирование. Системный подход.– М.: Мир, 1981.
6. *Клиланд Д., Квинт В.* Системный анализ и целевое управление.– М.: Наука, 1974.
7. *Ильичев А.В., Грущанский В.А.* Эффективность адаптивных систем.– М.: Машиностроение, 1987.
8. *Ильичев А.В., Волков В.Д., Грущанский В.А.* Эффективность проектируемых элементов сложных систем: Учебное пособие.– М.: Высшая школа.– 1982.– 280 с.
9. *Абраменко Г.В., Краснощеков А.Ю.* Помощь спускается с неба. / Наука в России.– 1994. – № 1.
10. *Параютная система для доставки грузов* / Г.В. Абраменко, А.Ю. Краснощеков, С.В. Краев, А.Л. Лифиц А.Л. // Патент РФ № 93.031.300 / 23 от 8.06.93.
11. *Эффективность сложных систем.* Динамические модели / В.А. Виноградов, В.А. Грущанский, С.И. Довгодум и др.– М.: Наука, 1989.– С. 285.
12. *Рабочая книга по прогнозированию* / Под ред. И.В.Бестужева-Лады.– М.: Мысль, 1982.
13. *Абраменко Г.В., Краснощеков А.Ю.* Теоретическое обоснование облика системы высокоточной доставки грузов в труднодоступные районы / Техника. Технология. Управление.– 1994.– № 1 – 2.
14. *Николаев В.И., Брук В.М.* Системотехника: Методы и предложение.– Л.: Машиностроение, 1985.– 199 с.
15. *Диалоговые системы* схемотехнического проектирования / Под. ред. В.И. Анисимова.– М.: Радио и связь, 1988.– 287 с.
16. *Теоретические основы САПР.* / В.П. Корячко и др.– М.: Энергоатомиздат, 1987.– 400 с.
17. *Справочник по САПР* / Под ред. В.И.Скурихина.– К.: Техника, 1988.– 375 с.
18. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей.– М.: Физматиздат, 1962.– 560 с.
19. *Брычков Ю.А., Маричев О.И., Прудникова А.П.* Таблицы неопределенных интегралов / Справочник.– М.: Наука, 1986.– 192 с.
20. *Градштейн И.С., Рыжик И.М.* Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений.– М.: Физматиздат, 1963.– 1100 с.
21. *Сборник задач по теории вероятностей, математической статистике и теории случайных функций* / Под ред. А.А. Свешникова.– М.: Физматиздат, 1965.– 632 с.
22. *Ланцош К.* Практические методы прикладного анализа.– М.: Физматиздат, 1961.– 120 с.
23. *Колесников К.С., Козлов В.И., Кокушкин В.В.* Динамика разделения ступеней летательных аппаратов.– М.: Машиностроение, 1977.– 224 с.

24. *Тренажерные системы* / В.Е.Шукунова, Ю.А.Бакулов и др.– М.: Машиностроение, 1981.
25. *Дмитриевский А.А.* Внешняя баллистика.– М.: Машиностроение, 1968.
26. *Программное определение* вида функций распределения случайной величины / Госстрой СССР. – М.: БИЛ, 1975.– Вып. IV.– 18 с.
27. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике.– М.:Наука, 1977.– 832 с.
28. *Вентцель Е.С.* Исследование операций: Задачи, принципы, методология.– М.: Наука, 1988.– 208 с.
29. *Крамер Г.* Математические методы статистики.– М.: Наука, 1978.– 832 с.
30. *Банди Б.* Методы оптимизации. Вводный курс.– М.: Радио и связь, 1988.– 128 с.
31. *Смирнов Н.В., Дукин-Барковский И.В.* Курс теории вероятностей и математической статистики.– М.: Наука, 1965.– 512 с.
32. *Иванов Л.А.* К решению электротехнических и других технических задач с разрывными функциями и начало аналитической теории разрывных функций: Автореферат дис. канд. техн. наук.– М.: МВТУ, 1963.– 31 с.
33. *Справочник по основам радиолокационной техники* / Под ред. В.В.Дружинина.– М.: Воениздат, 1967.
34. *Абчук В.А., Суздаль И.Г.* Поиск объектов.– М.: Сов.радио, 1977.
35. *Васильев Ю.Л., Дмитриев А.Н.* Спектральный подход к сравнению объектов, охарактеризованных набором признаков // Доклады АН СССР. – 1972.– Том 206, № 6.– С. 1309.
36. *Абраменко Г.В.* Применение спектрального подхода к маркетинговым исследованиям / Техника. Технология. Управление. – 1994. № 1 – 2.
37. *Левин. Г.М., Танаев В.С.* Декомпозиционные методы оптимизации проектных решений.– М.: Наука и техника, 1978.
38. *Имитационное моделирование* в задачах синтеза структуры сложных систем / А.Ф. Цвинкун и др.– М.: Наука, 1985.– 207 с.
39. *Глузман Е.Е.* Теория вероятностей и математическая статистика.– М.: Высшая школа, 1972.– 263 с.
40. *Шалыгин А.С., Палагин Ю.И.* Прикладные методы статистического моделирования.– Л.: Машиностроение, 1986.– 320 с.
41. *Статистическая динамика* и оптимизация управления летательных аппаратов / А.А. Лебедев, В.Т. Бобронников, М.Н. Красильщиков и др.– М.: Машиностроение, 1985.– 280 с.
42. *Березин И.С., Жидков Н.П.* Методы вычислений.– М.: Физматиздат, 1960.– 620 с.
43. *Гутер Р.С., Резниковский П.Т.* Программирование и вычислительная техника.– Вып. 2.– М.: Наука, 1971. – 264 с.
44. *Проспекты фирмы DYNATEST: Capabilities in radome microwave boresight-error and antenna calibration measuring systems.* Carco electronics 195 Constitution Drive Menlo Park, California 94025&.
45. *Поляк Ю.Г.* Вероятностное моделирование на электронных вычислительных машинах.– М.: Сов.радио, 1971.– 400 с.
46. *Бабенко В.С.* Имитаторы визуальной обстановки тренажеров летательных аппаратов.– М.: Машиностроение, 1978.
47. *Грузевич Ю.К., Левов С.Н., Морозов С.П.* Преобразователи спектра изображений // Труды МВТУ N 537.– Оптико-электронные приборы. – МГТУ, 1989.
48. *Разрешающая способность* жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов излучения / А.А.Васильев, Ю.К.Грузевич, С.Н.Левов и др. – ФИАН им. Л.Н. Лебедева.– Репринт ФИАН.– 1986.– № 1.
49. *Веников Г.В.* Проектирование и надежность.– М.: Знание, 1971. – 96 с.
50. *Абраменко Г.В., Краев С.В., Лифиц А.Л.* Конструкция самонаводящейся парашютной системы для доставки грузов // БИНТИ. – 1993. – № 1.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Введение	3
Список сокращений	12
Глава 1. Основные понятия	13
1.1. Технический облик СТС. Параметры и их оценка. Пути развития СТС	13
1.2. Система критериев для оценки и выбора параметров ТО	20
1.2.1. Общее представление системы критериев	20
1.2.2. Критерии качества функционирования системы	22
1.2.3. Обобщенные критерии оценки технического облика СТС	25
1.3. Принципы построения автоматизированной системы обlikового проектирования СТС	27
Глава 2. Расчет параметров ТО СТС, исходя из ее целевого назначения	31
2.1. Тактические параметры. Распределение групп ошибок СТС	31
2.2. Проектные параметры. Компоновка СТС	36
2.3. Функциональные параметры	43
2.3.1. Выбор параметров рассеивания грузов в пространстве	43
2.3.2. Функция числа маяков в зоне обзора информационного блока	52
2.3.3. Выбор параметров зоны обзора информационного блока	56
2.4. Вероятность выполнения целевой задачи. Статистическая модель оценки результатов исследований	61
2.4.1. Идеология статистической модели	61
2.4.2. Функция накрытия	64
2.4.3. Оценка достоверности моделирования	67
2.5. Ранжирование оптимальных вариантов СТС	69
2.6. Выбор путей развития СТС	74
Глава 3. Понятие вкладов СТС в общую эффективность выполнения целевой задачи	81
3.1. Понятие вкладов. Оценка СТС на основе вкладов	81
3.2. Чувствительность вкладов к параметрам СТС	85
3.3. Последовательность действий по использованию вкладов	88
Глава 4. Примеры расчета параметров подсистем СТС	93
4.1. Формирование критериев эффективности ИБ и СУ СТС	93
4.2. Определение требуемых значений показателей эффективности	96
4.3. Методика оценки эффективности и выбора характеристик ИБ	98

4.4. Имитационная математическая модель функционирования информационного блока в составе СТС	100
4.5. Аналитическая модель функционирования ИБ	108
4.6. Моделирование условий применения ИБ	111
4.7. Оптимизация параметров блока управления	115
Глава 5. Полунатурное моделирование СТС	124
5.1. Принципы построения комплекса полунатурного моделирования	124
5.2. Моделирование динамики и кинематики движения с помощью динамических стендов	128
5.3. Вопросы полунатурного моделирования систем управления со следящими ОЭС	130
5.3.1. Обоснование структурной схемы имитатора	130
5.3.2. Метод оценки параметров имитатора фона, адекватного реальной обстановке	133
5.3.3. Схемы построения имитаторов фоновой обстановки	136
5.4. Пример комплекса математического и полунатурного моделирования	142
5.5. Решение задач надежности СТС с точки зрения системного анализа	144
Список литературы	147

**Геннадий Викторович Абраменко
Андрей Юрьевич Краснощеков
Елена Борисовна Казанцева
Михаил Григорьевич Фабричный**

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ТЕХНИЧЕСКИЙ ОБЛИК
СРЕДСТВ ТОЧНОЙ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ**

**Редакторы: *В.А.Михайлов, В.Ф.Василькова*
Технический редактор *Т.А.Кирюхина*
Компьютерная верстка *Г.И.Селизановой***

**Сдано в набор 24.10.94. Подписано в печать 15.01.95.
Формат 60×90/16. Печ. л. 9,5 Уч.-изд. л. 11,5.
Изд. № 9992. Бум. офс. № 1. Тираж 1000.**
