

Ю.Л. ХОТУНЦЕВ Г. И. РОЖКОВА



# БИО- ЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ В РАДИО- ЭЛЕКТРОНИКЕ

Ю. Л. Хотунцев,  
*кандидат технических наук,*

Г. И. Рожкова,  
*кандидат физико-математических наук*

# БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

---

Издательство «З н а н и е»  
Москва 1967

## СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Введение . . . . .	3
Техника генерации мощных радиосигналов . . . . .	5
Высокочувствительные приемные устройства на твердом теле . . . . .	6
Теория информации и методы получения радиоинформации . . . . .	10
Новые принципы работы систем сканирования пространства . . . . .	12
Использование вычислительных машин в радиосистемах . . . . .	16
Успехи микроэлектроники . . . . .	19
Радиоэлектроника и бионика . . . . .	22
Живые локаторы . . . . .	24
Сенсорные системы . . . . .	25
Замечательные свойства улитки уха . . . . .	27
«Фильтрация» изображений . . . . .	28
Электронная модель сетчатки лягушки . . . . .	29
Нейроэлектронные системы и машины с «условными рефлексами» . . . . .	31
Литература . . . . .	32

3-4-4  
119-67

**Хотунцев Юрий Леонтьевич,  
Рожкова Галина Ивановна**

## БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

Редактор И. Б. Файнбойм  
Техн. редактор Л. А. Дороднова  
Худож. редактор Е. Е. Соколов  
Корректор Р. С. Колокольчикова  
Обложка Л. П. Ромасенко

А 04410. Сдано в набор 17/V 1967 г. Подписано к печати 10/VII 1967 г.  
Формат бумаги 60×90/16. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1,0,  
Печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 1,85. Тираж 66 500 экз. Издательство «Знание»,  
Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4. Заказ 1786. Типография изд-ва  
«Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.  
Цена 6 коп.

## Введение

---

В жизни современного общества радиоэлектроника играет исключительно важную роль. Она стала одной из основ техники, получила широкое распространение и универсальное применение. Свое столь высокое положение радиоэлектроника завоевывала постепенно.

Первоначально радиосистемы возникли исключительно как системы связи. Их основным назначением была скоростная передача срочных сообщений на максимально возможные расстояния. Передающее устройство системы радиосвязи представляет собой излучатель (генератор) электромагнитных волн, а приемное — систему, реагирующую на присутствие электромагнитного поля. Возможности первых систем радиосвязи были весьма скромными. Далее их совершенствование шло по следующим направлениям: увеличение генерируемой мощности, повышение чувствительности приемной аппаратуры, выбор наилучших способов кодирования и декодирования исходных сообщений, выбор наиболее подходящих для конкретных условий рабочих диапазонов радиоволн, освоение новых диапазонов волн, нахождение наиболее эффективных способов излучения и приема электромагнитной энергии, разработка систем направленного излучения (направленных антенн).

Усовершенствованные и специализированные (для работы в самых различных условиях) системы радиосвязи и в настоящее время составляют значительный процент всех радиосистем.

Достижения в области генерирования электромагнитных колебаний большой мощности, создание высокочувствительной приемной аппаратуры и разработка систем направленного излучения позволили в начале сороковых годов применить радиосистемы и для других целей, в частности, в качестве системы обзора пространства. Примером таких систем могут служить радиолокационные станции (РЛС) для обнаружения в окружающем пространстве различных объектов (чаще самолетов, спутников и т. п.) и определения их координат и скоростей. Принцип работы такой станции заключается в том, что объекты рассеивают радиоволны.

Каждая РЛС содержит передающее и приемное устройство, а также антенную систему, позволяющую излучать электромагнитные волны узким пучком в определенном направлении и принимать их только с этого направления. Электромагнитная энергия обычно излучается передатчиком в виде коротких импульсов. Отраженные объектом импульсы воспринимаются приемником, и по разнице времени излучения и прихода импульса определяется расстояние до объекта.

Специальное устройство производит «качение» луча антенны передатчика по всем направлениям (или сканирование пространства), чем достигается обзор большой части пространства.

К системам обзора пространства относятся также и некоторые пассивные (т. е. лишенные своего передатчика) устройства, которые обнаруживают объекты по их собственному излучению. Примером таких систем могут служить радиотелескопы, предназначенные для приема электромагнитной энергии, генерируемой внеземными источниками.

Разработанные в ходе совершенствования систем связи методы индикации и обработки сигналов оказались удобными и для операций с самыми различными данными, не представленными в виде электромагнитных колебаний. Перевод этих данных в электрическую форму и использование измерительной, анализирующей и обрабатывающей аппаратуры радиосистем оказались исключительно плодотворными. Позже для целей обработки различных данных стали разрабатываться специальные радиоэлектронные устройства. В настоящее время арсенал такой аппаратуры чрезвычайно богат. Широкое применение нашли различного рода преобразователи, усилители, анализаторы, корреляторы, дискриминаторы и другие сложные радиоэлектронные приборы.

Несмотря на то, что радиосистемы в настоящее время достигли высокой степени развития, возникающие новые сложные задачи требуют их дальнейшего совершенствования.

Основным стимулом для улучшения систем связи и обзора пространства явилось начало освоения космоса. Добавление к «сфере обслуживания» систем связи РЛС новых областей — околоземного и космического пространства, а также резкое возрастание скоростей летательных аппаратов потребовали радикального увеличения радиуса действия этих систем и скорости их работы.

Развитие космической радиоэлектроники включает в себя разработку важных проблем связи с космическими объектами и слежения за ними, их стабилизации и управления их движением, проблем наведения и навигации космических кораблей, измерения и обработки данных. От станций дальнего обнаружения космических кораблей требуются невиданные до недавних пор дальности действия, измеряемые тысячами километров. И такую дальность необходимо обеспечить в исключительно сложных условиях — при действии по цели, движущейся с огромной скоростью на высоте в сотни и тысячи километров и имеющей очень малые размеры. Сопровождение космических аппаратов связано с трудностями надежного приема информации на расстояниях до 50 млрд. км. Работы в области наведения и навигации связаны с созданием систем, включающих цифровые вычислительные машины для анализа траекторий и управления и координации работы систем наведения.

Увеличение числа и типов летательных аппаратов, одновременно попадающих в сектор обзора РЛС, поставило задачу одновременного слежения за многими объектами и их опознавания.

В силу этого чрезвычайно возросли в настоящее время и требования к аппаратуре для анализа и обработки поступающей информации — электронным вычислительным машинам (ЭВМ).

Развитие космической навигации стимулировало разработку бортовых систем связи и РЛС для космических кораблей; наиболее актуальными для такой аппаратуры являются вопросы уменьшения габаритов, повышения надежности и экономичности. Проблемы миниатюризации, повышения экономичности и надежности все настойчивее встают и для наземных устройств, так как для выполнения новых усложнившихся задач требуется существенное усложнение схем, а следовательно, значительное увеличение числа компонентов. В связи с этим сильно увеличиваются размеры систем и потребляемая ими мощность, а также возрастает число отказов аппаратуры.

Успехи в развитии микроэлектроники позволили приступить к решению проблем разработки сложных и надежных радиосистем.

Создание новейших радиосистем, сравнимых по сложности своего устройства и сложности выполняемых функций с биологическими системами, привело к необходимости тщательного изучения и технического моделирования объектов и процессов в живой природе.

Прежде чем перейти к описанию некоторых направлений использования биологических принципов в радиоэлектронике, рассмотрим подробнее успехи, достигнутые в различных областях радиоэлектроники в последние годы.

## Техника генерации мощных радиосигналов

---

Современная сложная радиосистема представляет собой комплекс самых различных радиотехнических, электротехнических и радиоэлектронных приборов. Частоты электрических токов, текущих в различных цепях, занимают огромный диапазон от нуля (постоянный ток) до десятков тысяч мегагерц ( $10^{10}$  гц) и выше. Напряжения этих токов имеют значения от долей микровольта до десятков киловольт, а мощности от  $10^{-16}$  до  $10^7$  вт. В отдельных узлах радиосистем используются новейшие достижения генераторной, приемно-усилительной и электронно-вычислительной техники, автоматики и т. п., причем все узлы и приборы представляют собой единую систему и работают в строгой взаимосвязи. Вес крупных радиосистем измеряется десятками тысяч тонн.

Проблема увеличения излучаемой мощности наиболее остро стоит в настоящее время для передающих устройств радиолокационных станций, которые должны обеспечивать обнаружение объектов в космосе и их сопровождение.

Уровни импульсной мощности передатчиков РЛС увеличивались за каждое десятилетие на порядок от 100 кВт в 1940 г. до 1 Мвт в 1950 г. и 10 Мвт в 1960 г.

В настоящее время мощность передатчиков РЛС большой дальности действия в импульсе измеряется десятками мегаватт. Используемые в передатчиках электронные лампы-клинтроны имеют громадные размеры — длину около 3 м и вес около 300 кг. Импульсная мощность радиолокационных систем, включающих ряд передатчиков, достигает 2000 Мвт.

Требуемая высокая пиковая мощность в импульсе не всегда может быть обеспечена по инженерным или экономическим соображениям или приводит к таким вредным последствиям, как появление дополнительных потерь, возникновение рентгеновских лучей и т. д.

Увеличение же длительности импульсов нежелательно, так как при этом уменьшается разрешающая способность РЛС по дальности. Для удовлетворения этих противоречивых требований было предложено использовать специальные сигналы — длинные импульсы с фазовой или частотной модуляцией.

Передатчик генерирует импульсы, частота заполнения которых увеличивается во времени. Имеющаяся в приемнике схема вызывает задержку принимаемого сигнала, обратно пропорциональную его частоте. Низкочастотные составляющие отраженного сигнала получают максимальную задержку, а составляющие самых высоких частот вовсе не задерживаются. Вследствие неравномерной временной задержки передний

фронт принимаемого импульса будет как бы сближаться с задним фронтом; в результате получается сжатие сигнала, благодаря чему сигнал выступает в виде пика над уровнем помех. Сообщалось о системах, использующих технику сжатия импульсов в сотни и тысячи раз.

Трудности, связанные с увеличением мощностей радиопередатчиков, привели к развитию высокочувствительных приемных устройств.

## Высокочувствительные приемные устройства на твердом теле

---

Развитие техники приема в последние годы характеризуется тенденцией к повышению чувствительности приемных устройств. Предельная чувствительность ограничена атмосферными и космическими шумами, а также шумами, присущими различным элементам входных цепей приемного устройства: антенне, усилительным лампам и контурам, кристаллическому смесителю (полупроводниковому диоду, с помощью которого осуществляется преобразование частоты принимаемых колебаний) и т. д.

В связи с большими трудностями на пути уменьшения шумов в приемных лампах сверхвысоких частот (СВЧ) в последние годы стали разрабатываться новые средства уменьшения уровней шумов в приемниках СВЧ и новые принципы, обеспечивающие усиление СВЧ при малом уровне шумов<sup>1</sup>.

Эти работы развивались по четырем направлениям. Первое из них — охлаждение отдельных элементов высокочастотного приемного тракта (в частности, кристаллического смесителя, осуществляющего преобразование частоты в приемном устройстве) до низких и сверхнизких температур. Результаты ряда работ, проведенных в США, показали, что при охлаждении до температур, близких к абсолютному нулю, и отсутствии усилителя высокой частоты на входе приемника можно понизить уровень входных шумов приемника сантиметрового диапазона примерно в два раза.

---

<sup>1</sup> Примечание. Для характеристики шумовых свойств собственно усилительного каскада применяют понятие шумовой температуры. Известно, что активное сопротивление является источником шумов, мощность которых пропорциональна абсолютной температуре сопротивления. Шумовой температурой усилительного каскада называется температура, до которой надо нагреть активное сопротивление, подсоединенное ко входу каскада, электрически идентичного рассматриваемому, но лишенного шумов, для того чтобы мощность шумов на выходе равнялась мощности шумов реального каскада.

Второе направление связано с разработкой квантовомеханических (парамагнитных) усилителей, устанавливаемых на входе приемника, в которых для усиления используется вынужденное (стимулированное) излучение парамагнитных ионов (например, в рубине, содержащем примесь хрома) под действием слабого принимаемого сигнала на частоте этого же сигнала. Благодаря отсутствию электронного луча, основного источника шумов в электронных лампах СВЧ, и работе при температурах, близких к абсолютному нулю, эти усилители имеют весьма малые шумы, в десятки и сотни раз меньшие, чем в ламповых усилителях. В частности, как показали измерения, входная шумовая температура парамагнитных усилителей составляет менее  $20^\circ\text{K}$ , в то время как шумовая температура ламповых усилителей СВЧ, использующих малошумящие лампы бегущей волны (ЛБВ), имеет величину, не меньшую  $400^\circ\text{K}$ . За открытие принципа молекулярного усиления советские ученые Н. Г. Басов и А. М. Прохоров и американский ученый Ч. Таунс в 1964 г. были удостоены Нобелевской премии.

Парамагнитные усилители требуют для своей работы источник СВЧ мощности (для перевода парамагнитных ионов в возбужденное энергетическое состояние), частота которого обычно выше, чем частота усиливаемого сигнала, и магнит, создающий сильное постоянное магнитное поле. Необходимо также применение специальной охлаждающей установки, обеспечивающей работу парамагнитного кристалла при температуре, обычно близкой к температуре жидкого гелия. Отсюда очевидно, что изготовление их сопряжено с рядом конструктивных трудностей, а их эксплуатация довольно затруднительна.

Недостатками парамагнитных усилителей являются насыщение (уменьшение коэффициента усиления под действием сигнала), при очень слабых сигналах (порядка  $10^{-8}$  вт) и большое время восстановления свойств усилителя после воздействия мощного сигнала (порядка 0,1 сек.).

По опубликованным данным, работы по парамагнитным усилителям привели к созданию за границей ряда экспериментальных усилителей на диапазоны 1, 3, 5, 10, 21, 30 см и около 1 м. Имеются сведения о промышленном выпуске усилителей 3 и 10 см диапазонов. Парамагнитные усилители использовались в установке для приема радиолокационных сигналов, отраженных от планеты Венера. Работа по радиолокационному исследованию Венеры, проведенная в СССР под руководством академика В. А. Котельникова, была удостоена Ленинской премии.

Третье направление — разработка так называемых параметрических усилителей. Работа этих усилителей основана на периодическом изменении реактивного сопротивления контура



усилителя (индуктивности или емкости) с определенной частотой, вследствие чего в контур вносится отрицательное сопротивление, что и создает эффект усиления. Эффективная входная шумовая температура наилучших параметрических усилителей доходит до 25—100°К.

Для работы параметрических усилителей также необходимо иметь источник питания высокой частоты, т. е. генератор накачки; его частота в большинстве разработанных усилителей выше частоты усиливаемого сигнала.

В отличие от парамагнитных параметрические усилители не требуют для своей работы ни охлаждения до сверхнизких температур, ни постоянного магнитного поля, и, следовательно, они проще в эксплуатации.

Параметрические явления в механических системах были открыты и исследованы еще в XIX веке. В двадцатых и тридцатых годах текущего столетия советскими учеными Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси и их школой были обстоятельно исследованы параметрические явления в электрических системах, использующих переменную емкость и индуктивность.

Возможность создания параметрических устройств в диапазоне сверхвысоких частот появилась после того, как в пятидесятых годах советские и иностранные ученые предложили использовать в качестве переменной реактивности свойства полупроводников и электронных пучков.

Различают три типа параметрических усилителей СВЧ: полупроводниковые (на полупроводниковых диодах), ферромагнитные, или ферритовые (в них используются нелинейные явления в ферритах), и электроннолучевые, использующие электронный луч с переменной плотностью электронов.

Советский ученый Б. М. Вул предложил использовать зависимость емкости  $p$ — $n$ -перехода полупроводникового диода от подводимого напряжения в параметрических устройствах. П. Мари (Франция) предложил использовать свойства электронного пучка. Разработка этих устройств началась в 1957—1958 гг.

По опубликованным данным, работа по параметрическим усилителям СВЧ интенсивно ведется в США, Англии и Японии. Полупроводниковые устройства, использующие емкость  $p$ — $n$ -перехода в полупроводнике, получили наибольшее распространение благодаря малым шумам, реализуемым при комнатной температуре, простоте схемы и конструкции этих устройств, потенциально высокой надежности, а также относительной легкости разработки диодов с требуемыми параметрами.

Параметрические усилители могут работать при изменении температуры от комнатной до гелиевой при незначительной подстройке усилителя. Шумовые характеристики полупровод-

никового параметрического усилителя, работающего при температуре жидкого гелия, почти такие же, как и у квантовых усилителей.

Недостатками параметрических усилителей являются высокие требования к стабильности мощности и частоты генератора накачки, а также к ферритовым элементам, входящим в схему усилителя. Ферритовые параметрические усилители СВЧ существенно уступают полупроводниковым параметрическим усилителям по шумовой температуре, однако не выгорают в результате попадания в усилитель большой СВЧ мощности.

Электроннолучевые параметрические усилители обладают шумовыми температурами, незначительно превышающими шумовые температуры полупроводниковых параметрических усилителей, однако требуют применения магнитного поля.

В 1959 г. за границей появились сообщения о промышленном выпуске полупроводниковых диодов и параметрических усилителей, работающих в диапазоне 100—10 000 Мгц. Сообщалось о разработке и промышленном выпуске нескольких типов электроннолучевых параметрических усилителей дециметрового диапазона. Хотя параметры промышленных усилителей далеки от оптимальных и много хуже, чем достигнутые в ряде экспериментальных работ, применение этих усилителей дает возможность увеличить дальность действия радиолокатора в 1,5—2 раза, а иногда и значительно больше. Почти в каждой вновь разрабатываемой системе в США предусматривается установка предварительного параметрического усилителя или преобразователя частоты. Несмотря на то, что применение параметрических усилителей усложняет схему приемника, с этим приходится мириться, поскольку никакие другие более простые усилители не могут обеспечить получение столь малых входных шумовых температур. Ожидают, что в 1968 г. выпуск параметрических усилителей в США в 4 раза превзойдет выпуск маломощных ламп бегущей волны, часто используемых в качестве усилителя СВЧ на входе приемного устройства.

Четвертым направлением в исследованиях маломощных усилителей СВЧ является разработка усилителей на туннельных диодах. В этих диодах под действием приложенного постоянного электрического поля протекает электрический ток, нелинейно зависящий от напряжения. В некотором диапазоне напряжений входное сопротивление туннельного диода отрицательно. Это свойство полупроводников было использовано для создания маломощных усилителей СВЧ. Шумовые температуры таких усилителей не опускаются ниже 300°—400°К, и в этом отношении они уступают парамагнитным и параметрическим усилителям. Однако отсутствие генератора накачки, относительная простота усилителя, регулировка только изме-

нением постоянного напряжения привели к широкому применению таких усилителей. Использование малошумящих усилителей позволяет уверенно осуществлять прием сигналов мощностью  $10^{-15}$  вт и менее.

В последнее время за границей появились работы по созданию транзисторных усилителей СВЧ и новых малошумящих смесителей СВЧ, использующих диоды с барьером Шотки.

Такими путями решается проблема увеличения чувствительности приемных устройств станций. В большинстве малошумящих устройств используются свойства приборов СВЧ на твердом теле: туннельных и параметрических полупроводниковых диодов, ферритов и парамагнитных материалов.

Применение элементов на твердом теле в радиоэлектронике приобрело в настоящее время исключительно большое значение. С помощью этих элементов удается усовершенствовать, сделать более надежными, долговечными и малогабаритными блоки радиоаппаратуры как в диапазоне сверхвысоких частот, так и в низкочастотном диапазоне.

## Теория информации и методы получения радиоинформации

---

Для увеличения дальности действия радиосистем и точности выделения принимаемых сигналов необходимо использовать специальные виды модуляции радиосигналов и оптимальные методы обнаружения и определения параметров сигналов, замаскированных шумами и помехами. Семейство радиостанций, основанных на применении новых методов приема и выполняющих свои функции при минимальной мощности передатчика, непрерывно увеличивается.

Применение теории информации к обнаружению и анализу радиосигналов было сделано в пятидесятые годы. Удалось обобщить многие полученные ранее результаты, рассматривая их с точки зрения теории информации.

Задача приема заключается в том, чтобы извлечь информацию из смеси сигнала и шума. Значительная часть литературы по этому вопросу касается методов получения возможно большего отношения мощности сигнала к мощности шума на выходе приемника, так как шум в конечном итоге ограничивает чувствительность и, следовательно, чем шум относительно меньше, тем лучше. Этот подход, однако, не содержит постановки задачи об извлечении информации. Иногда он может ввести в заблуждение, так как не существует общей теоремы, утверждающей, что максимальное отношение сигнала

к шуму на выходе обеспечивает максимальное извлечение информации.

Предположим, что сигнал на входе приемника представляет сообщение  $x$ , которое нужно определить. В то же время неизбежно присутствует шум; получающуюся смесь обозначим через  $y$ . Задача приема заключается в том, чтобы, оперируя над  $y$ , получить возможно большую информацию относительно  $x$ . Однако теория информации утверждает, что никакая операция над  $y$  не может увеличить количество  $x$ -информации, содержащейся в  $y$ , а может только уменьшить  $x$ -информацию. Поэтому в отношении  $x$ -информации задача сводится к ее сохранению, а не к возможно большему ее увеличению. Однако  $y$  обычно содержит также некоторое количество информации, не связанной с  $x$  и не интересующей наблюдателя. Это информация о источниках помех, потерях в каналах связи и т. д. Задачей поэтому является исключение как можно большего количества ненужной информации обычно путем фильтрации, без разрушения какой-либо нужной  $x$ -информации.

С помощью теории информации были разработаны новые методы работы радиосистем. Приемник радиосистемы рассматривается как фильтр, который должен сохранить содержащуюся в сигнале полезную информацию и отсеять все постороннее. При этом используются известные данные о сигнале — ожидаемая форма сигнала, шум, фон, координаты источника сигнала и характер их изменения во времени.

В РЛС важное значение для увеличения объема информации о цели приобретает внутренняя структура принимаемых сигналов, которые больше не рассматриваются как одно целое. Эти сигналы могут сравниваться с прямыми сигналами, излучаемыми станцией. Последние либо просто задерживаются надлежащим образом во времени (автокорреляционный метод приема), либо также изменяются с учетом заранее известных сведений об ожидаемом изменении отраженного сигнала (кросскорреляционный метод).

Данная задача приема может быть решена на основе анализа формы сигналов, позволяющего извлечь ценную информацию о цели, содержащуюся в частотных и фазовых характеристиках отраженных сигналов. Разработанные системы анализа формы сигналов позволяют определять положение целей, измерять их скорости и выделять полезные сигналы на фоне шумов.

Теория информации позволяет оптимально выбрать структуру приемного устройства и способ кодирования сигналов. Общий для радиолокационных систем последних разработок является все возрастающая тенденция к использованию кодирующих устройств в передатчике и устройств декодирования в приемнике. При этом применяются самые разнообраз-

ные методы кодирования, которые обеспечивают высокую степень различимости сигналов разных радиолокационных систем. В результате этого повысилась помехоустойчивость систем, а также устойчивость их к средствам радиопротиводействия.

Применение в некоторых системах корректирующих кодов позволяет выделить полезную информацию в условиях, когда мощность сигнала в тысячи и десятки тысяч раз меньше мощности шумов.

## Новые принципы работы систем сканирования пространства

---

Для излучения радиоволн, создаваемых передатчиком, и приема отраженных радиосигналов в радиолокационных станциях применяют антенны различных типов, обеспечивающие, как правило, направленное излучение и прием. В диапазоне метровых волн долгое время в основном применялись антенны, состоящие из набора вибраторов. Энергия от передатчика распределялась между всеми вибраторами. Электромагнитные поля, создаваемые всеми вибраторами, в некоторых направлениях складывались, а в некоторых компенсировали друг друга.

Говорят, что в первом случае электромагнитные колебания оказывались в фазе, а во втором — в противофазе<sup>1</sup>.

В результате энергия распространялась лишь в определенных направлениях.

Распределение излучаемой энергии по различным направлениям определяет диаграмму направленности антенны — ее важную техническую характеристику.

Чем в меньшем диапазоне углов излучается основная часть энергии, т. е. чем уже сформированный антенный луч, тем точнее могут быть определены координаты цели.

Ширина диаграммы направленности уменьшается при увеличении числа вибраторов в антенне, иными словами, при увеличении «эффективной» площади антенны.

В диапазоне сантиметровых и дециметровых волн используются параболические, рупорные, линзовые и тому подобные антенны. В этих антеннах диаграмма направленности формируется либо с помощью металлического параболоида, в фоку-

---

<sup>1</sup> Колебания, создаваемые генераторами, в большинстве случаев описываются формулой  $y = A \sin(\omega t + \varphi)$ , где  $A$  — максимальное значение  $y$ , называемое амплитудой колебания,  $\omega$  — частота колебания, а  $\varphi$  — начальная фаза колебания в рассматриваемой точке. Величина  $\varphi$  определяет значение  $y$  в начальный момент времени  $t = 0$ .

се которого установлен излучатель, либо с помощью металлического рупора, либо, наконец, с помощью металлической линзы. Во всех этих случаях ширина диаграммы направленности уменьшается при увеличении размеров антенн, т. е. как и ранее при увеличении ее эффективной площади.

В последние годы созданы громадные антенные системы. В 1963 г. в Аресито (Пуэрто-Рико) введен в действие большой радиолокационный телескоп. Диаметр апертуры сферического отражателя равен 305 м при радиусе сферы около 260 м, площадь отражателя составляет 73 000 м<sup>2</sup>. Антенна создает луч шириной 0,6°. Эта система предназначена для изучения ионосферы. Она может быть применена также для наблюдений в пределах солнечной системы, составления подробной карты неба и изучения отдельных электрических явлений.

Выбор Аресито для установки радиотелескопа обусловлен рядом причин: этот пункт находится на широте 20° севернее экватора, что облегчает наблюдение за Солнцем и планетами; там имеется естественная впадина в горах, в которой размещен отражатель; район характеризуется малым уровнем шумов.

После того как впадине была придана нужная форма, в нее был помещен гигантский отражатель, выполненный из полотен стальной сетки. Между полотнами сетки имеется надежный электрический контакт. По краям впадины установлены три массивные башни, к которым на стальных тросах подвешен облучатель радиотелескопа весом 500 т, расположенный над зеркалом антенны на высоте почти 150 м.

Кроме точности определения координат цели, часто необходимо, чтобы за заданное время радиолокатор периодически просматривал определенное пространство, т. е. диаграмма направленности антенны перемещалась в пространстве с определенной скоростью сканирования. Долгое время эта проблема решалась путем механического перемещения всей системы вибраторов, образующих антенну.

В иностранной литературе сообщалось о создании радиолокационной чашеобразной антенны диаметром 45 м, предназначенной для сопровождения спутников. Антенна весит сотни тонн и установлена на платформе, перемещающейся по кольцевому железнодорожному пути. Ее чаша может устанавливаться в любое положение — от горизонтального до вертикального. Управление антенной производится механически с помощью гидравлического привода. Естественно, что высокая скорость перемещения диаграммы направленности в такой системе невозможна. В иностранных журналах описана также радиолокационная станция сопровождения с одной чашеобразной антенной диаметром 18 м. Вследствие того, что антенна РЛС должна формировать узкий луч, к ней предъявляются очень высокие требования в отношении точности ее

изготовления и стабильности. Точность параболичности антенны по всей ее поверхности должна быть в пределах  $\pm 3$  мм. Скорость вращения по азимуту такой антенны — около 6 град/сек.

По мере роста требований к точности определения координат при одновременном увеличении скорости сканирования приходилось искать немеханические решения проблемы перемещения диаграммы направленности антенн в пространстве.

Эта проблема была решена за рубежом путем использования фазированных антенных решеток.

Фазированная антенная решетка представляет собой набор небольших простых излучателей, энергия к которым подводится от одного передатчика (рис. 1). Однако прежде чем

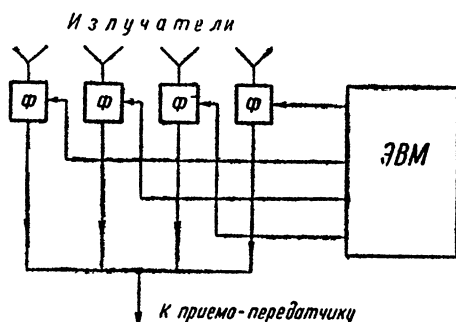


Рис. 1. Пассивная антенная фазированная решетка. Фазовращатели управляются сигналами, получаемыми от электронной вычислительной машины (ЭВМ)

попасть к каждому излучателю, колебания проходят через фазовращатель, который изменяет фазу тока в излучателе, и соответственно фазу электромагнитного колебания, создаваемого этим излучателем. В результате сложения колебаний, создаваемых всеми излучателями, в пространстве возникает поле излучения, зависящее от фаз отдельных колебаний, т. е. от положения фазовращателей в отдельных каналах. Перестройка фазовращателей может осуществляться чрезвычайно быстро электрическими методами, и в фазированных антенных решетках может быть получена весьма высокая скорость сканирования. Поскольку число элементов решетки и соответственно площадь решетки могут неограниченно возрастать, удастся уменьшить ширину диаграммы направленности и повысить точность определения координат цели без уменьшения скорости сканирования.

Фазированным антенным решеткам в новых разработках

уделяется самое большое внимание. Повышенный интерес к фазированным решеткам наблюдается примерно в течение последних 10 лет. Исследования и разработки, выполнявшиеся в эти годы, были довольно продуктивными. Так, созданы действующие макеты фазированных антенных решеток; изучены различные физические процессы, происходящие в этих устройствах; проведены различные исследования методов построения решеток и выбора их формы; разработаны новые типы некоторых компонентов фазированных антенных решеток, например электронные фазовращатели. В настоящее время идеи последних лет получают практическое воплощение.

Описанные в иностранной литературе антенные решетки радиолокаторов дальнего действия имеют размеры до  $100 \times 50 \text{ м}^2$  и включают до 40 000 элементов.

Разработаны конструкции антенных решеток, которые можно монтировать на части сферы, конуса или цилиндра. Это позволит использовать их на самолетах и спутниках. Применение в этом случае электронного сканирования дает большую выгоду, так как требуются малые мощности и отсутствуют механические подвижные системы, дестабилизирующие положение воздушных и космических аппаратов.

В настоящее время разработка антенных фазированных решеток идет по двум направлениям: создание пассивных решеток, каждый излучатель которых снабжен фазовращателем, и создание активных решеток, в которых каждый излучатель имеет отдельный приемно-передающий блок. Здесь мы впервые сталкиваемся с многоканальной радиолокационной системой.

Важным достижением явилось создание фазовращателей с цифровым управлением. Эти устройства представляют собой ферритовые элементы, которые расположены в волноводах (СВЧ) колебаний, и могут переключаться из одного состояния в другое под действием импульсов тока и оставаться в новом состоянии в паузе между импульсами. В результате обеспечивается дискретный сдвиг фазы проходящих по волноводу колебаний СВЧ. Ряд таких элементов, размещенных в одном волноводе, представляет собой цифровой фазовращатель, управление которым может осуществляться непосредственно с помощью команд в виде двоичных знаков, получаемых от цифровых схем, что обеспечивает возможность непосредственного взаимодействия с электронными вычислительными машинами (ЭВМ), управляющими радиосистемой.

Значительные успехи в разработках фазированных решеток почти полностью обусловлены использованием устройств, в которых фаза изменяется не непрерывно, а ступенями, обычно с двухкратным изменением величины (т. е.  $180^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $22^\circ$  и т. д.).



Создание экономичных фазированных решеток определяется не только решением проблемы вращения фазы и разработкой надежных элементов. Чтобы сделать выгодным использование гибкости сканирования, присущей антенной решетке, в систему должна входить быстродействующая ЭВМ для принятия решений, которая управляет работой РЛС и позволяет получить нужную диаграмму направленности. Этой важной проблеме уделяется в настоящее время много внимания.

Повышение скорости сканирования и управление электронным лучом с помощью ЭВМ обеспечат возможность быстрого наведения антенны в секторы наиболее вероятного наличия объектов наблюдения.

За границей были описаны экспериментальные РЛС с приемной и передающей антенными решетками. Электронное управление диаграммой направленности осуществляется в этих системах с помощью быстродействующих ЭВМ, обеспечивающих необходимую «игру лучей».

## Использование вычислительных машин в радиосистемах

---

Создаваемые в последние годы радиосистемы невозможно себе представить без электронных вычислительных машин.

В связи с запуском большого количества спутников возникает проблема совершенствования радиолокационной системы сопровождения большого количества космических летательных аппаратов. Расширение этой проблемы связано, в частности, с расширением автоматизации станций системы сопровождения и управления, использующих комплекс вычислительных машин для расчетов траекторий спутников. Вычислительный центр такой системы на основе выбранного комплекса данных сопровождения от удаленных станций производит расчет изменения орбиты спутника. Полученные данные будут переданы на каждую станцию сопровождения, местная вычислительная машина выполнит расчет данных, необходимых для работы данной станции. Таким образом, несколько электронных вычислительных машин смогут обслуживать множество спутников при минимальном потоке данных между станциями сопровождения и вычислительным центром.

Все цифровые вычислительные машины должны автоматически обрабатывать все данные сопровождения, управления и телеметрии, а также производить проверку и калибровку,

всей действующей аппаратуры станции и сигнализировать в случае появления неисправностей.

Проводятся интенсивные исследования по созданию РЛС, следящих сразу за многими целями, а также способных определять форму и размеры неизвестных спутников с помощью ЭВМ для обработки радиолокационных сигналов.

В данном случае перед автоматически работающей радиосистемой ставится задача опознавания объектов наблюдения, т. е. задача распознавания образов.

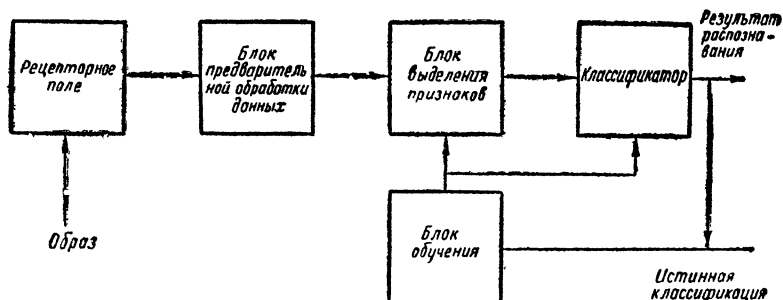


Рис. 2. Общая блок-схема системы для распознавания образа

На рис. 2 приведена общая блок-схема системы распознавания образов. Она может применяться при любой форме задачи распознавания, независимо от того, связана ли блок-схема с пространственными, временными или другими входными сигналами.

Входной сигнал или символ может задаваться в виде изображения в случае пространственных символов, сигнала конечной длительности, меняющегося во времени, в случае временных символов или в виде набора результатов множества наблюдений.

Первый блок — рецепторное (сенсорное) поле — разбивает сигнал на ряд элементов, которые могут быть проанализированы схемой распознавания, и создает описание объекта.

Второй блок схемы, названный блоком предварительной обработки информации, вводится не всегда и предназначен для решения довольно сложной задачи выделения силуэта символа, что иногда бывает необходимо сделать до выделения признаков. Этот блок решает задачу нахождения контура символа и центровки «внимания» системы: он находит определенные линии, выделяет какие-то области символа, производит центровку входного изображения. Иными словами, он выделяет нужную информацию из общего фона.

Следующий блок предназначен для выделения признаков, по которым производится опознавание. Эти признаки передаются в блок «классификатор», принимающий решение о при-

надлежаности опознаваемого объекта тому или иному классу. В том случае, если известна истинная классификация сигналов, блок обучения может уточнить принципы работы блоков выделения признаков и классификации.

Отраженный сигнал РЛС, помимо координат и скорости цели, может дать представление об изменении отражающей площади цели и частоте колебаний этой площади.

Радиолокационные отражения, многократно полученные РЛС от данной цели, преобразуются в цифровую форму и создают представление о характерном «почерке» каждого типа спутников и других космических объектов. Цифровые характеристики будут храниться в запоминающем устройстве вычислительной машины. Таким образом, любая цель сможет быть опознана посредством сопоставления ее «почерка» с цифровыми характеристиками, хранящимися в вычислительной машине.

В иностранной литературе сообщалось о том, что создается гигантский радиолокатор для системы обнаружения и слежения за космосом. В качестве антенны используется фазированная решетка длиной 100 м и высотой 44 м. Радиолокатор может следить за многими целями одновременно.

Цифровые вычислительные машины используются на борту космических кораблей для координации работы всей радиоэлектронной аппаратуры.

Появление антенн с электронным сканированием для самолетов и космических кораблей позволяет создавать многофункциональные радиолокаторы, обеспечивающие широкий обзор пространства. Управление такими локаторами осуществляется с помощью бортовых ЭВМ.

Например, космический корабль «Джеминай» оборудуется системой навигации и управления, содержащей цифровую вычислительную машину, инфракрасные датчики горизонта, систему ориентации, радиолокационную систему встречи, цифровую командную систему и индикаторные устройства. Кроме того, на спутнике устанавливается телеметрическое и связное оборудование, а также радиомаяки.

Радиолокационная система наведения космического корабля «Джеминай» предназначена для осуществления встречи на орбите корабля и ракеты «Аджена».

Система представляет собой сочетание импульсного радиолокатора с ответчиком и обеспечивает необходимую цифровую информацию для вычислительной машины космического корабля на дальностях от 450 км до 150 м и индикацию непрерывных данных дальности и скорости сближения в пределах от 90 км до 6 км. Применение быстродействующей вычислительной машины и кварцевого генератора, работающего на частоте 10 МГц, обеспечивает на максимальной дальности точность измерения расстояния порядка 0,1 %.

Большое внимание за рубежом уделяется бортовым системам обработки данных со сжатием информации.

Бортовые вычислительные машины могут просматривать все данные о космическом пространстве, поступающие от датчиков, и передавать по каналам связи только те данные, которые указывают на изменение каких-либо параметров.

Приведенные примеры показывают, что задачи, решаемые современными радиосистемами, требуют широкого применения цифровых вычислительных машин, используемых для координации работы отдельных элементов системы и обработки потока информации.

Усложнение радиосистем, связанное с усложнением выполняемых ими функций, приводит к увеличению числа используемых компонент и, следовательно, к уменьшению надежности всего устройства и увеличению габаритов и веса. Увеличению надежности радиоаппаратуры уделяется в настоящее время очень большое внимание. Одним из эффективных путей решения этой проблемы является развитие микроэлектроники.

## Успехи микроэлектроники

---

Микроэлектроника, как реально существующая отрасль техники, возникла сравнительно недавно. В отличие от полупроводниковой техники микроэлектроника к моменту своего возникновения смогла опереться на имеющиеся средства производства полупроводниковых приборов и тонкопленочных покрытий просветленной оптики. Она смогла воспользоваться хорошо разработанной теорией физики твердого тела и тонких пленок, перенять опыт разработчиков транзисторов и специалистов по вакуумным приборам.

Развитию микроэлектроники способствовали такие факторы, как необходимость повышения надежности и снижение стоимости аппаратуры при одновременном уменьшении ее габаритов и веса.

Солидная исходная база, имевшаяся к моменту зарождения микроэлектроники, и мощные стимулирующие факторы развития этой отрасли техники привели к значительному прогрессу в исследовательских работах, и очень быстро микроэлектроника получила всеобщее и полное признание.

В настоящее время практически каждая зарубежная фирма, занимающаяся выпуском радиоэлектронной аппаратуры, вынуждена вступить на путь интенсивной разработки миниатюрных устройств и освоения технологии производства тонкопленочных и твердых схем.

Ожидают, что в ближайшее время технические характери-

стики старой аппаратуры по надежности, сложности выполняемых функций, весу и габаритам и прежде всего по стоимости будут значительно уступать показателям аппаратуры, созданной методами микроэлектроники.

Существует несколько методов конструирования микроэлектронных схем. Наиболее известным из них является метод изготовления тонкопленочных схем. Эти схемы состоят из тонкопленочных компонентов, осаждаемых на соответствующей подложке (наиболее часто — из кремния) посредством испарения в вакууме или напыления. Тонкопленочными методами можно изготовить компоненты с параметрами от тысячных долей ома до нескольких мегом и от пико- до микрофарад. Тонкопленочные компоненты стойки к изменениям температуры; можно изготавливать сопротивления с положительными и отрицательными температурными коэффициентами. Тонкопленочные пассивные схемы могут применяться в устройствах, требующих жестких допусков, очень больших или весьма малых величин пассивных компонентов и высокой надежности.

Следует отметить высокую надежность выпускаемых микроузлов: частота отказов составляет величину порядка 0,1% на 1000 часов работы, причем ведутся исследования по дальнейшему снижению ее. Допуски в параметрах могут удерживаться в границах  $\pm 1\%$ .

Тонкопленочные пассивные системы обычно применяют с дискретными полупроводниковыми приборами. Такие смешанные, или гибридные, схемы часто определяют термином «микросхема». Они являются наиболее гибкими микроэлектронными схемами с точки зрения возможностей их применения.

Однако любой метод, требующий конструирования и присоединения дискретных компонентов, не может быть таким же дешевым, как метод изготовления кремниевых интегральных схем, имеющих монолитную структуру.

В монолитных интегральных схемах все активные и пассивные элементы выполнены как одно целое на одной общей кремниевой пластине. Недостатком монолитных схем являются ограниченные величины параметров основных компонентов, а также паразитные явления, ограничивающие их применение в быстродействующих цифровых устройствах. Кроме того, чрезвычайно трудно выдерживать допуски на параметры некоторых активных элементов.

По зарубежным данным транзисторы с хорошими рабочими характеристиками могут быть изготовлены с расстоянием между центрами 0,05 мм. Эта техника позволяет разместить на стороне квадрата 2,5 см приблизительно 500 компонентов, или 250 000 компонентов на площади  $2,5 \times 2,5$  см.

Широкое использование микроэлектронных схем тесно связано с разработкой все более сложных систем.

Несмотря на свою короткую историю развития (6—8 лет) микроэлектроника в настоящее время уже находит практическое применение в различной радиоэлектронной аппаратуре, в частности в космических системах, в промышленном и вещательном телевидении, в вычислительных машинах, а также в различного рода связной и измерительной аппаратуре, особенно там, где находит применение вычислительная техника и где надежности, стоимость, размеры и вес служат факторами первостепенного значения. Применение микроэлектронных схем позволяет сократить общее количество отдельных компонентов системы, облегчая задачу их соединения и в то же время повышая эксплуатационные характеристики системы в целом.

Приведем пример использования микроэлектроники в бытовой радиоаппаратуре.

Фирмой Zenith Radio разработан слуховой аппарат, целиком помещающийся внутри уха. Усилитель нового аппарата выполнен в виде интегральной схемы и, по мнению разработчиков, имеет на 500% лучшую надежность по сравнению с усилителем на дискретных компонентах.

Все компоненты слухового аппарата, включая микрофон, выключатель, регулятор громкости и батарею, размещены в одном корпусе. Диапазон частот аппарата от 430 до 4500 *гц*. Он не имеет шнуров, присоединительных проводов, монтируемых в оправе очков, и других наружных деталей. Вес его 6,2 *г*. Интересно, что розничная цена слухового аппарата 325 долларов.

Интегральные схемы все шире применяются в радиоаппаратуре спутников, вытесняя вместе с другими твердотельными элементами электронные лампы.

Появилось краткое сообщение о разработке радиолокатора для обеспечения встречи на орбите космических аппаратов, собранного полностью на твердотельных компонентах, включая передатчик.

Развитие физики твердого тела, успехи молекулярной техники и техники микроминиатюризации привели к потенциальной возможности изготовления систем, содержащих до  $0,5 \cdot 10^{10}$  элементов в 1 *см*<sup>3</sup>.

Несмотря на успехи во многих областях радиоэлектроники, пока еще не решены такие серьезные вопросы, как опознавание спутников, увеличение дальности действия до сверхбольших расстояний и увеличение надежности радиосистем. Для решения этих вопросов намечается несколько путей повышения эффективности радиосистем. К ним относится в первую очередь техника радиолокации с использованием теории информации. Конструкторские группы за рубежом работают над вопросами создания самоорганизующихся и самоприспосабливающихся РЛС. В таких системах можно было бы более

эффективно использовать всю имеющуюся информацию для отыскания новой необходимой информации. Обработка радиолокационных данных в перспективных РЛС будет производиться в цифровой форме. Для этого необходимо повысить емкость памяти и быстродействие ЭВМ.

## Радиоэлектроника и бионика

---

Сложность современных радиосистем, предназначенных для связи с космическими аппаратами и слежения за ними, систем обзора пространства, наведения и управления, а также устройств, автоматически перерабатывающих большие количества различной информации, растет очень быстрыми темпами. Многие из этих систем уже сейчас содержат сотни тысяч и миллионы элементов. Например, если в 1940 г. количество электронных узлов и деталей на самолете равнялось примерно двум тысячам, то к 1960 г. оно возросло уже до 100 тысяч. Только одна антенная система типа фазированной решетки для современной радиолокационной станции содержит до 40 тысяч элементов.

Условия работы радиосистем описанного типа требуют от них высокой надежности, быстродействия, выполнения сложных операций над входными сигналами, а часто — способности приспосабливаться к меняющимся условиям (адаптации) и обучаться.

Кроме вопросов принципиального характера, усложнение радиосхем, широкое применение в них ЭВМ требуют неотложного решения ряда чисто технических задач: значительного повышения качества компонентов, обеспечения хорошей развязки каналов, создания датчиков и вспомогательных устройств с цифровым выходом и т. д.

Необходимость решения этих сложных технико-тактических задач, плохо поддающихся теоретическому анализу, и все возрастающая потребность в передаче многих аналитических функций человека машине заставили радиоинженеров более внимательно относиться к системам связи, обзора пространства и обработки информации, существующим в живой природе.

Новая область науки и техники — бионика, объединившая исследования объектов, процессов и явлений в живой природе с тем, чтобы в конечном счете использовать полученные знания для создания новой техники, нашла много сторонников и среди радиоинженеров.

В бионике выделяются два важнейших направления исследований:

- 1) разработка принципиально новых технических систем

обнаружения и измерения сигналов, в частности новых типов датчиков;

2) создание новых систем автоматического управления, т. е. систем сбора, передачи, переработки и хранения информации.

Первое направление связано с изучением органов чувств живых организмов, второе — с изучением работы периферической нервной системы и мозга.

В настоящее время выявились следующие основные проблемы в области бионики, которые представляют непосредственный интерес для радиоэлектроники: исследования процессов приема и обработки информации, адаптации, надежности и компоновки (упаковки) элементов систем и создание соответствующих моделей.

Особенности живых систем позволяют надеяться на извлечение полезных рецептов для решения лишь отдельных проблем, близких к проблемам, решаемым природой, так как в целом эти системы создавались для функционирования в специфических условиях, существенно отличающихся от существующих в технике.

Приведем некоторые данные о параметрах элементов и принципах «конструкции» схем живых организмов, которые могут представить интерес для радиоинженеров или даже нашли уже применение в технике.

Нервная система животных, в функцию которой входит сбор и переработка сведений о состоянии среды вне и внутри организма и выработка решений о целесообразных действиях, построена из клеток трех типов:

- 1) воспринимающих элементов, или рецепторов,
- 2) промежуточных, или ассоциативных нейронов, и
- 3) мотонейронов, служащих для передачи команд исполнительным механизмам.

Рецепторные элементы органов чувств многих животных имеют очень высокую чувствительность. Так, человеческий глаз регистрирует попадание на него нескольких фотонов, терморецепторы гремучей змеи реагируют на разность температур в  $0,001^\circ$ , а таракан фиксирует изменение температуры в инфракрасной части спектра с точностью до  $0,01^\circ$ . Наибольший интерес представляет то, что столь высокой чувствительностью обладают системы, работающие при обычных температурах, тогда как достижение высокой чувствительности в технике сопряжено с охлаждением датчиков до низких и сверхнизких температур.

Если рецепторные клетки являются, как правило, специализированными ненейронными структурами, ассоциативные нейроны и мотонейроны представляют собой типичные нейронные элементы, т. е. логические пороговые элементы с большим числом входов и одним выходом. Нейроны очень сильно



различаются между собой по размерам, форме и характеру ветвления своих отростков.

Особый интерес представляет выходной отросток нейрона — аксон, который обеспечивает передачу нервных импульсов на большие расстояния без затухания. Изучению свойств нейронов и аксонов, а также созданию их разнообразных моделей и конструированию схем из них уделяется сейчас очень большое внимание.

Рассмотрим некоторые системы и органы животных, изучение которых может оказаться полезным с точки зрения улучшения существующей передающей и приемной радиоаппаратуры,

## Живые локаторы

---

Что касается проблемы совершенствования передающей аппаратуры, то тут в первую очередь представляет интерес изучение источников энергии животных — живых локаторов.

Большинство высокоорганизованных живых существ для ориентации в окружающей среде и обзора пространства пользуются органами зрения, которые позволяют им обнаруживать и опознавать окружающие предметы по отражаемому ими солнечному свету. Собственными автономными источниками энергии для целей обзора пространства снабжены, как правило, лишь животные, живущие в условиях темноты или в малопрозрачных, мутных средах (летучие мыши, дельфины, электрические рыбы и др.). Лучше всего, с этой точки зрения, изучены летучие мыши, имеющие специальные органы для излучения и приема ультразвуковых импульсов.

Эхолокатор летучих мышей — очень точный «прибор»; он в состоянии обнаружить предмет диаметром всего 0,1 мм. С помощью эхолокаторов летучие мыши не только ориентируются в пространстве, но и охотятся за насекомыми.

Перед стартом летучая мышь издает лишь 5—10 ультразвуковых импульсов в секунду. В полете их число увеличивается до 30. При приближении к препятствию звуковые сигналы следуют еще быстрее — 50—60 раз в секунду. Настигая добычу, некоторые мыши издают даже 250 импульсов в секунду. Увеличение количества импульсов позволяет повысить поток информации о движении цели и точнее координировать действия летучей мыши.

Представляет интерес выяснение принципов работы акустических локаторов летучих мышей по выделению слабых сигналов и борьбе с помехами, создаваемыми другими мышами, особенно у летучих мышей-рыболовов,

# Сенсорные системы

---

Весьма обещающим и плодотворным оказалось знакомство радиоинженеров-конструкторов приемной аппаратуры с сенсорными системами или анализаторами. Любая сенсорная система включает в себя периферический воспринимающий аппарат (орган чувств) и соответствующие мозговые отделы.

При «конструировании» сенсорных систем природа столкнулась с комплексом требований, во многом аналогичным тому, который сейчас пытаются удовлетворить радиоинженеры: обеспечение большой чувствительности, помехозащищенности, быстродействия, высокой надежности, экономичности, проведение сложного анализа обстановки для выявления наиболее важных объектов и т. д.

Прежде чем дать краткое описание работы ряда сенсорных систем, отметим их некоторые общие свойства.

Высокоразвитые сенсорные системы включают следующие основные части:

1. Проекционное устройство и вспомогательные структуры. Их основное назначение — соотносить определенной группе чувствительных элементов (рецепторов) определенную область контролируемого пространства или определенное значение параметра сигнала, а также регулировать чувствительность системы в соответствии с уровнем входного сигнала.

2. Поле воспринимающих элементов — рецепторов.

Назначение рецепторов — определять наличие вблизи них специфического для каждой сенсорной системы вида энергии (стимула, раздражителя) и кодировать параметры стимулов электрическими сигналами.

3. Блок предварительной переработки информации.

Он служит главным образом для уменьшения избыточности поступающих от рецепторов сообщений в целях упрощения и ускорения последующего анализа и экономии числа каналов передачи информации, а также для выделения сигнала из шума.

4. Канал связи периферического органа с центральными структурами.

5. Мозговые центры, обрабатывающие информацию, поступающую с периферии.

Отметим некоторые особенности построения схем анализаторов.

Прежде всего, для всех сенсорных систем установлен принцип локализации функций в определенных областях мозга и существование упорядоченной поточечной проекции нижеле-

жащих отделов на вышележащие, которая выдерживается на всем протяжении сенсорного пути от периферического отдела к коре мозга, хотя такой порядок в принципе и не является необходимым для работы анализаторов.

Характерным для нейронных сетей сенсорных систем является существование огромного числа связей как внутри каждого слоя элементов, так и между слоями, причем каждый элемент вышележащего слоя собирает информацию с большого числа клеток нижележащего слоя, а каждая из этих клеток в свою очередь посылает отростки ко многим клеткам вышележащего слоя. Совокупность рецепторных клеток, оказывающих влияние на работу какой-либо клетки из вышележащих отделов, составляет рецепторное поле этой клетки (рис. 3).

Одним из самых актуальных и перспективных направлений бионических исследований является изучение работы первых ступеней сенсорных систем, так как, несмотря на сопряжение с быстродействующими электронно-вычислительными машинами, современные системы обзора пространства и обработки

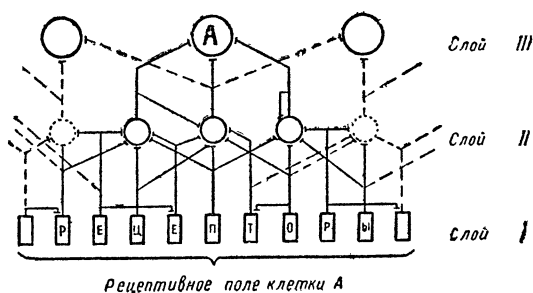


Рис. 3. Пример связей между элементами в сенсорных системах

информации часто не в состоянии справиться со всем объемом поступающих данных. В то же время живые организмы выработали весьма эффективные способы фильтрации полезной информации из всей поступающей. Например, человек, который работает как чрезвычайно перегруженный автомат, ис-

пользует для работы сознания всего  $\frac{1}{10\,000\,000}$  часть поступающей информации. Конечно, этот отбор осуществляется на всем протяжении сенсорных путей, но блоки первичной обработки играют очень существенную роль. Рассмотрим несколько примеров работы таких блоков.

## Замечательные свойства улитки уха

---

В слуховом анализаторе человека обработка речевых сигналов в значительной степени производится уже вспомогательной механической системой уха.

Одна из ее основных частей — улитка представляет собой длинный спиралевидный канал среди костей черепа с двумя мембранными перегородками, заполненный вязкой жидкостью. Воспринимающие клетки располагаются вдоль одной из мембран — базальной или основной. При воздействии звуков разных частот на мембране возникает бегущая волна, достигающая максимума в определенной точке, зависящей от частоты, причем высокие частоты дают возбуждение вблизи входа в улитку, а низкие проникают к ее дальнему концу. Таким образом, в улитке осуществляется в какой-то степени тонопическая проекция, т. е. соотнесение определенных частот звукового сигнала определенным участкам мембраны.

В последнее время появились работы, в которых утверждается, что улитка не просто производит анализ спектра сигнала, а обрабатывает сигнал более сложным образом. Предполагают, что различные части улитки специализированы для кодирования различных характеристик речевых сигналов. Так, считается, что дальний конец внутреннего уха участвует в первую очередь в анализе свойств огибающей кривой речи, меняющихся при переходе от громкой речи к шепоту; отклик средней части определяется качеством произносимых звуков, т. е. их богатством и звучностью, теряющимся при шепоте, и, наконец, наиболее важная часть внутреннего уха, располагающаяся от его центра до входа в него, реагирует на речь почти независимо от того, кто ее произносит, произносится она громко или шепотом. Для распознавания речи практически важна только информация, поступающая с этой части улитки.

Эта информация составляет незначительную долю всей звуковой информации, поступающей в ухо, но ее использование позволяет распознавать звуки речи весьма надежно. Создание системы обработки звука по принципу действия улитки позволило снизить скорость передачи речевых данных в 100—200 раз по сравнению с тем, что имеет место в телефонных каналах связи. А при той же генерируемой мощности уменьшение скорости передачи в 100 раз означает увеличение дальности связи в 10 раз. Американские инженеры, сконструировавшие вышеописанную систему, надеются, что со временем подобные системы позволят осуществить нормальный разговор между людьми на Земле и астронавтом на Марсе.

## «Фильтрация» изображений

---

В зрительном анализаторе высших млекопитающих блок первичной обработки сигналов — сетчатка — имеет более ста миллионов входов (рецепторных клеток) и лишь около одного миллиона выходов, из которых, к тому же, в каждый данный момент работает лишь какая-то часть.

В сетчатке многих животных одним из основных механизмов уменьшения избыточности поступающих сигналов является так называемое боковое (латеральное) торможение, впервые подробно изученное на глазе рака-мечехвоста. Оно заключается в том, что реакция на данный световой раздражитель в данной точке уменьшается, если осветить также и близлежащие участки. Этот механизм приводит к подчеркиванию контуров изображений, так как реакция будет наибольшей в тех местах, где светлые участки изображения граничат с темными.

Имеется уже немало попыток использовать в технических системах свойство глаза выделять контур изображения.

Так, предложена новая система передачи телевизионных изображений, использующая выделение и передачу контуров и восстановление по ним исходных полутоновых изображений на приемном конце. Эта система обещает стать эффективным средством сокращения передаваемой информации.

Другим важным механизмом выделения полезной информации служит свойство функциональных единиц сетчатки — рецептивных полей — реагировать лишь на изменения их освещенности. Простые типы рецептивных полей сетчатки дают реакцию на включение света либо на его выключение, либо и на включение и на выключение.

Такая организация работы сетчатки приводит к тому, что непрерывное восприятие изображения может быть обеспечено только при непосредственном изменении освещенности внутри отдельных рецептивных полей. Этого можно достигнуть либо перемещением образа по сетчатке (за счет движений как объекта наблюдения, так и самого животного или его глаз), либо созданием мелькающего освещения. Мелькающее освещение можно создать только в искусственных условиях, и было показано, что оно менее эффективно, чем смещение изображения по сетчатке; в естественных условиях животные пользуются перемещением образа по сетчатке.

С точки зрения анализа входных сигналов, описанный выше механизм также способствует выделению контуров изображений (так как освещенность данного рецептивного поля меняется только в том случае, если через него проходит граница темного и светлого участков неизменно освещенного изображения) и, кроме того, он позволяет направлять внима-

ние на движущиеся и меняющиеся части изображений, несущие главную информацию об изменениях в окружающей обстановке.

С точки зрения глаза как технической системы он позволяет более экономно использовать пропускную способность каналов связи в нервной системе и сократить число этих каналов.

Кроме отмеченных выше простых рецептивных полей, в сетчатке многих животных встречаются поля, производящие более сложный анализ поступающих сигналов и реагирующие на более узкий класс раздражителей. Сложные рецептивные поля называют также детекторами тех видов изображений или тех параметров изображений, на которые они реагируют. В настоящее время известны, например, такие детекторы, как детекторы границ, кривизны, движущихся краев (у лягушки); детекторы горизонтального и вертикального края (у голубя), детекторы направления движения (у голубя и кролика), детекторы скорости движения (у кролика) и некоторые другие.

Специфичность детекторов, по-видимому, обусловлена образом жизни животных и необходимостью быстрой реакции на жизненно важные раздражители.

Например, детекторы кривизны сетчатки лягушки, реагирующие лишь на небольшие темные объекты, по всей вероятности, играют важную роль в охоте лягушек на насекомых. Детекторы горизонтального края сетчатки голубя, реагирующие только на границу двух областей, расположенную горизонтально, могут иметь значение в ориентации во время полета.

## Электронная модель сетчатки лягушки

---

Проведенные исследования позволили сконструировать ряд моделей, имитирующих некоторые особенности работы органов зрения.

Американскими инженерами сконструирована функциональная электронная модель сетчатки глаза лягушки. Эта модель будет использована для опознавания изображений путем выявления их характерных признаков и параллельной обработки полученной информации.

Модель сетчатки глаза лягушки выполняет операции по классификации признаков изображения, проектируемого на матрицу фотоспротивлений, давая информацию:

- 1) об общих очертаниях объектов;
- 2) о движущихся выпуклых границах предметов;
- 3) об изменении контраста;

4) о затемнении значительного участка поля зрения.

Выделение каждого признака осуществляется с помощью соответствующих логических схем «детекторов».

Функциональная модель содержит семь слоев элементов (оформленных в виде матриц размером  $0,9 \times 0,9 \text{ м}^2$ ), каждый из которых выполняет определенные логические операции. Первые шесть слоев ведут обработку информации. Седьмой слой содержит выходные сигнальные лампочки и систему распределения энергии в модели. Связь между первыми четырьмя слоями осуществляется путем пропускания света от сигнальных лампочек, расположенных на задней поверхности слоя, к фотосопротивлениям, установленным на передней поверхности следующего слоя.

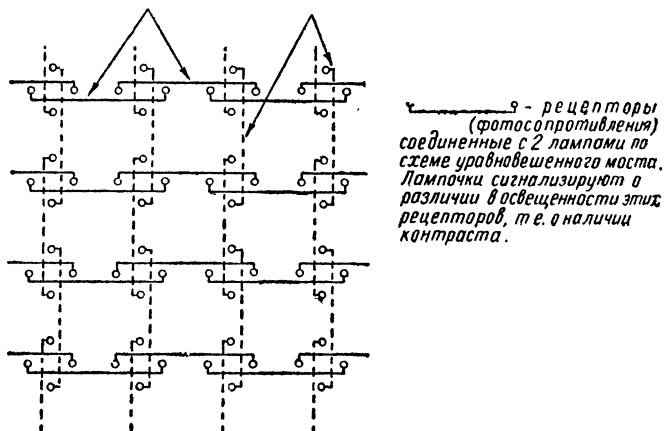


Рис. 4. Часть рецепторной матрицы

Этой цели служат более 2000 пар сигнальная лампочка — фотосопротивление. Сигнальные лампочки и фотосопротивления используются также в элементарных логических схемах. В целом, в модели сетчатки, использующей 32 000 отдельных элементов электрической схемы, включены 3793 фотосопротивления и 2652 сигнальных лампочки, осуществляется 4530 логических операций. На рис. 4 для примера показана часть рецепторной матрицы.

Логическая обработка сигналов осуществляется в помощью логических схем «И», «ИЛИ» и дифференцирующих цепей. Сама по себе модель пригодна только для ограниченного применения, однако она может сыграть важную роль в качестве первого шага в создании нового класса машин, предназначенных для решения сложных задач обнаружения, слежения и наведения. Такое устройство можно использовать для мгновен-

венного распознавания объектов, что позволит экономить драгоценное время, затрачиваемое в настоящее время на баллистические вычисления.

Имеются сведения, что использующий описанные принципы радиолокатор установлен в Лондонском аэропорту. Он служит для предупреждения столкновений самолетов в условиях плохой видимости.

## Нейроэлектронные системы и машины с «условными рефлексами»

---

Работа высших мозговых отделов исследована в гораздо меньшей степени, чем периферических, в частности, из-за трудности доступа ко многим отделам, сложности их строения, множественности их связей с другими структурами и в связи с этим возникающими препятствиями для интерпретации данных эксперимента.

Это привело к тому, что многие исследователи предпочли отказаться в данное время от моделирования работы сложных нейронных сетей и попытаться использовать живые нейронные схемы непосредственно в электронной аппаратуре, т. е. сделать мозг животного частью электронной схемы.

Например, инженеры фирмы Philco Corporation исследовали возможность создания ракетного снаряда воздух — воздух, несущего на своем борту кошку, которая может контролировать его полет и управлять им. Перед глазами кошки помещался телевизионный экран, а телекамера должна была осматривать пространство вокруг ракеты. Кошку предполагалось предварительно обучить опознаванию определенных целей, а выходные элементы ее «систем опознавания и заведения» — соединить с элементами, управляющими движениями снаряда.

Выдвигались предложения использовать в комбинированных системах не только нервную систему животных, но и их «датчики» — чувствительные элементы.

Очень большое число работ посвящено исследованию и моделированию таких фундаментальных свойств нервной системы, как адаптация и обучаемость, и применению результатов этих исследований для создания различных систем, главным образом систем опознавания.

Подробное обсуждение относящихся сюда проблем выходит за рамки данной брошюры. Приведем лишь пример системы опознаваний образов, сконструированной с использованием биологических принципов.

Создана обучающаяся вычислительная машина «Кон-



флекс», пригодная для опознавания практически неограниченного числа классов сложных образов, содержащих не только черно-белые элементы, но и полутона.

Эта машина является машиной класса «Перцептрон». Принцип таких машин был впервые предложен Ф. Розенблатом, а первый экспериментальный образец был создан в 1957 г. Отличительной чертой машин такого типа является случайный характер соединений между матрицей чувствительных элементов (сенсоров) и элементами следующих ассоциативных слоев, причем окончательно параметры связей определяются в процессе обучения.

В отличие от первых машин класса «Перцептрон» в машине «Конфлекс» используются некоторые закономерности образования условных рефлексов у животных. При испытаниях машина «Конфлекс» продемонстрировала возможность опознавания до 100 вариантов написания букв различными шрифтами и почерками и возможность опознавания слов и фотографий (из 6 объектов).



Возможно, уже недалеко то время, когда при обсуждении проекта любой сложной технической системы наряду с патентами других изобретателей будут рассматриваться и соответствующие «патенты» природы. Однако не следует забывать, что биологические прототипы во многих отношениях не могут удовлетворить технику (малая точность, малая скорость протекания процессов, нестабильность и т. д.) и что в бионических исследованиях речь должна идти главным образом об извлечении идей и принципов решения различных задач живой природой.

## ЛИТЕРАТУРА.

Глезер В. Д. и Цуккерман И. И. Информация и зрение. М.—Л., Изд-во АН СССР (Ленингр. отд-ние), 1961.

Хершер, Келли. Функциональная электронная модель сетчатки глаза лягушки. — «Зарубежная радиоэлектроника», 1964, № 4.

Гриффин Дональд. Эхо в жизни людей и животных. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1961.

Уолдридж Д. Механизмы мозга. Пер. с англ. М., «Мир», 1965.



6 коп.

Индекс  
70072

ИДЕТ ПОДПИСКА  
НА 1968 ГОД!

Серия  
научно-  
популярных  
брошюр

## «ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ»

Индекс 70058

Техник, рабочий, бригадир — все, кто ежедневно сталкивается с экономикой своего участка, цеха, завода — нуждается в книгах технико-экономического факультета. Конкретной экономике предприятия и техническому прогрессу посвящены эти книги. Особый интерес представляет эта литература в настоящий момент, так как она пропагандирует решения XXIII съезда КПСС, первые итоги хозяйственной реформы, показывает борьбу за выполнение нового пятилетнего плана развития народного хозяйства.

В 1968 году выйдет 12 номеров, в том числе:  
**Реформа в действии.** Сборник. Предисловие акад. **А. М. Румянцева.**

**Гвишиани Д. М.,** зам. пред. Государственного комитета СМ СССР по науке и технике. **Управлять предприятиями по-современному.**

**Табеев И. А.,** первый секретарь обкома КПСС Татарской АССР. **Экономика: творчество масс плюс организация.**

**Поспелова Н. М.,** канд. экон. наук, **Кравченко О. Я.** На повестке — хозрасчет.

Подписная цена на год — 1 руб. 80 коп.

Серия помещена в каталоге «Союзпечати» в разделе «Научно-популярные журналы» под рубрикой «Брошюры издательства «Знание».

Издательство «Знание»