

PHASED ARRAY
ANTENNA –
EYES OF THE SIGNAL
PROCESSING SYSTEM

O. G. VENDIK

The electronic control of antenna beam position turns the antenna into an active tool for signal processing. The most commonly used design of such an antenna is the Phased Array Antenna (PAA). Various means of actively controlling electromagnetic wave propagation in PAA, particularly the semiconductor p–i–n diodes, are discussed. The historical aspects of the discussed problems are involved.

Электронное управление лучом превращает антенну в активное средство обработки сигналов. Наиболее распространенная форма такой антенны – фазированная антенная решетка (ФАР). Рассматриваются различные способы управления электромагнитными волнами в ФАР, в частности управление с помощью полупроводниковых p–i–n диодов. Изложены исторические аспекты обсуждаемых проблем.

© Вендик О.Г., 1997

**ФАЗИРОВАННАЯ АНТЕННАЯ
РЕШЕТКА – ГЛАЗА
РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

О. Г. ВЕНДИК

Санкт-Петербургский электротехнический университет

ВВЕДЕНИЕ

Представим себе высоконаправленную антенну, обеспечивающую связь с искусственным спутником Земли (ИСЗ). Такая антенна имеет острорасфокусированный луч, точно направленный на объект связи. Примером такой антенны может служить наземная антенна станции “Орбита”, которая использовалась в первых советских системах передачи телевидения и обеспечения многоканальной телефонной связи через ИСЗ. Такая антенна представляет собой параболический рефлектор диаметром порядка десяти метров. Для того чтобы осуществить слежение за объектом связи или радионаблюдения с помощью такой антенны, необходимо поворачивать всю эту довольно тяжелую механическую систему.

Очевидно, что во многих случаях нужна антенна, у которой направление луча не было бы связано с ориентацией всей антенны как механической конструкции. Нужна антенна с немеханическим движением луча или, другими словами, антенна с электронным сканированием. Под сканированием здесь понимается движение луча антенны, осуществляющее обзор пространства в заданном пространственном угле. Такая антенна нужна не только в системах связи с ИСЗ, но и в системе управления движением в районе большого аэропорта. Особую роль антенны с электронным сканированием играли и продолжают играть в системах противоракетной обороны (ПРО). С начала 90-х годов антенны с электронным сканированием стали объектом внимания автомобильных компаний. В этой связи такие антенны могут стать предметом массового спроса, как цветной телевизор или персональный компьютер.

Сложившееся к настоящему времени техническое решение антенны с электронным сканированием представлено в виде решетки, в узлах которой расположены простейшие излучатели электромагнитной волны. Цепи питания этих излучателей организованы так, что излучение, испускаемое каждым излучателем, когерентно с излучением всех излучателей, в то время как фаза излучаемых волн изменяется по заданному закону. Изменение распределения фаз на излучателях позволяет сформировать луч антенны в заданном направлении. Такая решетка излучателей с управляемым распределением фаз волн, излучаемых элементарными излучателями,

получила название фазированной антенной решетки (ФАР). Таким образом, термины *антенна с немеханическим движением луча*, *антенна с электронным сканированием* или *фазированная антенная решетка* практически являются синонимами.

КАК ЭТО НАЧИНАЛОСЬ

Идея, что лучом системы когерентных излучателей можно управлять, изменяя распределение фаз на излучателях, была высказана уже давно¹. Одна из первых антенн с немеханическим управлением диаграммой направленности была построена для трансатлантической радиотелефонной линии связи в 1937 году. Эта антенна, обладая довольно высокой направленностью, позволяла изменять направление приема лучей в вертикальной плоскости и таким путем выбирать направление прихода лучей, наименее ослабленных при отражении от ионосферы. Так как благодаря направленным свойствам антенны осуществлялся прием только одного отраженного луча, то резко уменьшались замирания сигнала. Эта антенна представляла собой систему ромбических антенн, расположенных вдоль прямой на участке длиной около 1,5 км. Управление диаграммой направленности осуществлялось изменением фазовых соотношений между токами в отдельных ромбах. Высокой скорости управления лучом системы ромбических антенн не требовалось.

Развитие радиолокации поставило задачу управления диаграммой направленности антенны в течение интервалов времени, измеряемых вначале миллисекундами, а затем микросекундами и даже долями микросекунды.

Насколько можно судить по известным публикациям, первая антенна с электронным сканированием для применения в радиолокации была осуществлена в Ленинградском электротехническом институте² (ЛЭТИ) в 1955 году в группе под руководством проф. Ю.Я. Юрова (1914–1955). В основу принципа действия антенны было положено управление фазами волн в нескольких излучателях антенны с помощью фазовращателей, содержащих ферритовые элементы. Как раз в те годы в электронике различных частот началось широкое применение ферритов – железосодержащих окислов металлов, которые являются диэлектриками, но обладают магнитными свойствами, близкими к свойствам железа. Работы по радиолокационному использованию антенн с электронным сканированием велись и в США. Первая публикация о фазовращателе на основе феррита, предназначенном для применения

¹ Управление диаграммой направленности неподвижной антенны предложено в работах американского инженера Г.Т. Фрииса (1925 год) и советских специалистов П.Н. Рамлау (1932 год) и А.А. Пистолькорса (1938 год). Ссылки на соответствующие публикации даны в книге [1].

² С 1992 года Санкт-Петербургский электротехнический университет.

в антенне с электронным сканированием, появилась в конце 1954 года, а публикации по самой антенне – в 1956–1957 годах³.

Проблема разработки антенны с электронным сканированием складывается из двух составных частей:

1) выбор числа излучателей и конфигурации их размещения;

2) разработка фазовращателей, управляющих фазой электромагнитной волны в излучателях.

На фотографии⁴ (рис. 1) показан макет антенны, разработанной в 1954–1955 годах и испытанной в июне 1955 года. Антенна представляла собой решетку из четырех диэлектрических излучателей, сверхвысокочастотная (СВЧ) волна к которым подается через фазовращатели, представляющие собой отрезки прямоугольных волноводов, частично заполненных ферритом. Ферритовые вкладыши входят в переменное поле электромагнитов. Внешнее магнитное поле изменяет магнитную проницаемость феррита. Изменение магнитной проницаемости среды, в которой распространяется волна, изменяет фазовую скорость волны, в результате возникает требуемый фазовый сдвиг.

КАК УСТРОЕНА АНТЕННА С ЭЛЕКТРОННЫМ СКАНИРОВАНИЕМ

Следует различать антенны с одномерным и двумерным сканированием или, другими словами,

³ Соответствующие литературные ссылки можно найти в книге [1]. К сожалению, мы не знаем, что содержалось в американском отчете “Ferrite at Microwaves” (Proc. Fourth Symp. Scanning Antennas. NRL. Rep. 400. P. 123–131. Apr. 1952), который не был опубликован в открытой печати. Справедливости ради нужно отметить, что информация о работах в ЛЭТИ по антеннам с электронным сканированием стала доступной для широкого обсуждения только в 80-е годы.

⁴ Фотография любезно предоставлена музеем истории Санкт-Петербургского электротехнического университета (до 1992 года ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина)).

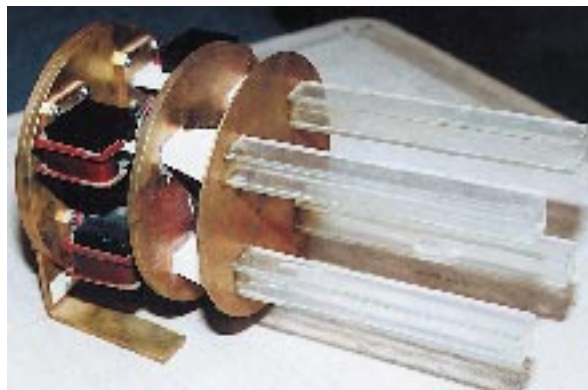


Рис. 1. Лабораторный макет антенны с электронным сканированием, разработанной в 1954–1955 годах в Ленинградском электротехническом институте

антенны с движением луча в одной плоскости и антенны с движением луча в двух плоскостях. Антенны с одномерным сканированием нужны при работе с объектами, лежащими в одной плоскости. Примером может служить антенна радиолокатора, обеспечивающего управление движением в акватории морского порта, где все объекты, с которыми устанавливается связь или за которыми ведется наблюдение, находятся на водной поверхности. Иначе обстоит дело при обеспечении связи с искусственным спутником Земли или при управлении движением в районе большого аэропорта. В этих случаях направления на объекты, с которыми устанавливается связь или за которыми ведется наблюдение, могут находиться под разными углами как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости, поэтому луч антенны должен перемещаться в двух плоскостях.

На рис. 2 показана схема антенны с одномерным сканированием. Антенна представляет собой линейку излучателей, которые на рисунке схематически представлены в виде рупорных излучателей. Вход антенны представлен одним волноводом или коаксиальным кабелем, который соединяется с приемником, передатчиком или другой радиотехнической системой. Между входом антенны и излучателями расположен делитель мощности, и в цепи питания каждого излучателя включен фазовращатель. Фазовращатели управляются от единого устройства управления (компьютера) и формируют требуемое распределение фаз на излучателях. На рис. 2 показан плоский фазовый фронт, расположенный под углом θ_k по отношению к плоскости расположения излучателей. Очевидно, что главный луч антенны формируется вдоль нормали по отно-

шению к фазовому фронту волны, заданной излучателями, и, таким образом, главный луч антенны отклонен от оси симметрии антенны также на угол θ_k .

Напомним, что из законов дифракции электромагнитных волн следует, что ширина луча антенны определяется отношением длины волны излучаемых электромагнитных колебаний к размеру антенны:

$$\Delta\theta \cong \frac{\lambda}{L}, \quad (1)$$

где $\Delta\theta$ – ширина луча, λ – длина волны, L – размер антенны.

Пусть линейка излучателей состоит из N излучателей, d – расстояние между соседними излучателями. Тогда, чтобы обеспечить наклон фазового фронта на угол θ_k , фазовый сдвиг между соседними излучателями должен составлять

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta_k. \quad (2)$$

Разность фаз между соседними излучателями должна лежать в пределах

$$-\pi < \Delta\varphi < \pi. \quad (3)$$

Попытка выйти за обозначенные пределы приведет к неоднозначности положения луча антенны. Сопоставляя формулы (2) и (3), находим пределы качания луча:

$$\theta_{k \min} = -\arcsin\left(\frac{\lambda}{2d}\right), \quad \theta_{k \max} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2d}\right). \quad (4)$$

Теперь можно определить и ширину сектора качания (сканирования) луча:

$$\Delta\theta_k = \theta_{k \max} - \theta_{k \min} = 2 \arcsin\left(\frac{\lambda}{2d}\right). \quad (5)$$

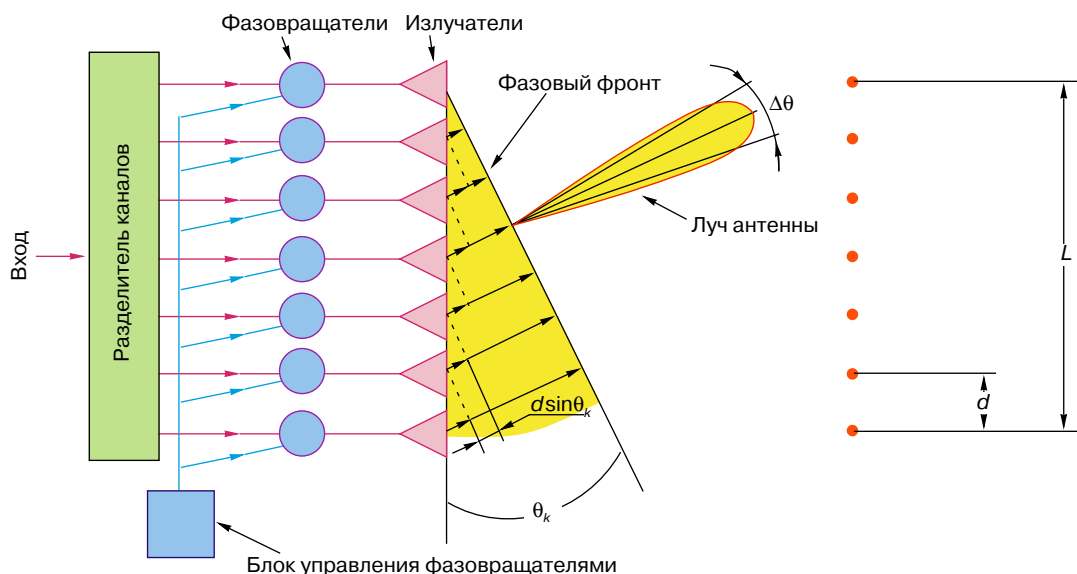


Рис. 2. Схема фазированной антенной решетки

В случае $d \gg \lambda$ формула (5) упрощается:

$$\Delta\theta_k = \frac{\lambda}{d}. \quad (6)$$

Возникает вопрос: что происходит за пределами избранный сектора качания луча, определенного формулой (6)? Если не принять никаких мер, то при $d > \lambda/2$ за пределами сектора качания возникнут дополнительные дифракционные максимумы и диаграмма направленности антенны перестанет быть однонаправленной. Однако дополнительные дифракционные максимумы можно подавить, выбрав элементарные излучатели, из которых составлена линейка, такими, чтобы индивидуальная диаграмма направленности каждого элементарного излучателя обеспечивала подавление излучения за пределами выбранного сектора качания луча линейки излучателей в целом.

Найдем отношение сектора качания луча к ширине самого луча линейки излучателей. Для этого обратимся к формулам (6) и (1). Получим

$$\frac{\Delta\theta_k}{\Delta\theta} = \frac{L}{d} = N, \quad (7)$$

где N – число излучателей в антенне.

Формула (7) определяет число элементов, из которых должна состоять антенна. Элемент включает в себя излучатель, фазовращатель и цепи управления фазовращателем. Так, например, достаточно хорошо направленная антенна должна иметь ширину луча порядка одного углового градуса: $\Delta\theta = 1^\circ$. Пусть $\Delta\theta_k = 90^\circ$, тогда $N = 90$, то есть конструкция линейки излучателей оказывается достаточно сложной.

Рассмотрим антенну в виде решетки излучателей, обеспечивающей электронное сканирование луча в двух плоскостях. Решетка состоит из системы параллельных линеек излучателей, расположенных в одной плоскости. Число излучателей в составе одной линейки назовем числом излучателей в горизонтальной плоскости N_r , а само число линеек – числом излучателей в вертикальной плоскости N_b . Таким образом, общее число излучателей в рассматриваемой решетке

$$N_{\text{общ}} = N_r N_b. \quad (8)$$

Приведем некоторые количественные характеристики.

1. Ширина луча антенны в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно

$$\Delta\theta_r \cong \frac{\lambda}{L_r}, \quad L_r = N_r d_r, \quad (9)$$

$$\Delta\theta_b \cong \frac{\lambda}{L_b}, \quad L_b = N_b d_b. \quad (10)$$

2. Сектор качания луча в горизонтальной и вертикальной плоскостях

$$\Delta\theta_{k,r} = \frac{\lambda}{d_r}, \quad (11)$$

$$\Delta\theta_{k,b} = \frac{\lambda}{d_b}. \quad (12)$$

3. Телесный угол, совпадающий с секторами качания луча антенны,

$$\Delta\Omega_k = \Delta\theta_{k,r} \cdot \Delta\theta_{k,b}. \quad (13)$$

4. Телесный угол, занимаемый лучом антенны¹, и коэффициент направленного действия антенны соответственно

$$\Delta\Omega = \Delta\theta_r \cdot \Delta\theta_b, \quad (14)$$

$$D = \frac{4\pi}{\Delta\Omega}. \quad (15)$$

Используя приведенные выше соотношения, легко убедиться, что отношение телесных углов, занимаемых секторами качания луча и самим лучом антенны, равно полному числу элементов в составе ФАР:

$$\frac{\Delta\Omega_k}{\Delta\Omega} = N_r N_b. \quad (16)$$

Комбинируя (13)–(16), можно получить формулу, определяющую общее число элементов ФАР через ее коэффициент направленного действия и телесный угол сканирования:

$$N_{\text{общ}} = \frac{\Delta\Omega_k}{4\pi} D. \quad (17)$$

Эта формула представляет собой фундаментальное соотношение теории ФАР². Легко подсчитать, что если выбранные секторы сканирования определяются углами качания луча $\theta_{k,r} = \theta_{k,b} = \pm 30^\circ$, а ширина луча в горизонтальной и вертикальной плоскостях $\Delta\theta_r = \Delta\theta_b = 1^\circ$, то число элементов ФАР составляет 3600.

УСТРОЙСТВА ФОРМИРОВАНИЯ ФАЗОВЫХ СДВИГОВ

Как было показано выше, в цепи питания каждого излучателя ФАР должно находиться устройство, обеспечивающее требуемый фазовый сдвиг, – фазовращатель.

Фазовращатели для ФАР можно разделить на две большие группы:

1) аналоговые фазовращатели, фазовый сдвиг в которых представляет собой непрерывную функцию управляющего воздействия (напряжения или тока);

¹ Напомним, что мерой телесного угла является площадь, вырезанная телесным углом на сфере единичного радиуса с центром в вершине угла. Например, для конуса с углом при вершине 120° телесный угол равен π стерадиан. Телесный угол, охватывающий все пространство вокруг заданного центра, составляет 4π стерадиан.

² В наиболее общей форме вывод этой формулы был дан М.И. Конторовичем и В.Ю. Петрунькиным в 1961 году (Радиотехника и электроника. 1961. Т. 6, № 12. С. 1982).

2) цифровые (дискретные) фазовращатели, фазовый сдвиг в которых задается двоичным кодом:

$$\Delta\varphi_q = \frac{\pi}{2^{Q-1}} \sum_{k=0}^{Q-1} a_k^{(q)} \cdot 2^k, \quad (18)$$

где

$$\begin{pmatrix} a_0^{(q)} \\ a_1^{(q)} \\ \dots \\ a_{Q-1}^{(q)} \end{pmatrix} = \mathbf{A}^{(q)}. \quad (19)$$

$\mathbf{A}^{(q)}$ представляет собой Q -мерный вектор, составленный из нулей и единиц. Пусть $Q = 3$, тогда в нашем распоряжении будет восемь различных векторов $\mathbf{A}^{(q)}$. При помощи соотношений (18) и (19) может быть задан следующий набор фазовых сдвигов: $[0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ]$, каждый из которых отвечает своему номеру q .

В основе аналоговых фазовращателей лежит материал, магнитная или диэлектрическая проницаемость которого изменяется под внешним воздействием. Таким материалом может служить феррит, о котором кратко говорилось выше, или сегнетоэлектрик, диэлектрическая проницаемость которого зависит от напряженности электрического поля [2].

Дискретность задания фаз хорошо вписывается в структуру команд управляющей ЭВМ, хотя и порождает некоторые ошибки в задании координат луча антенны, а также приводит к незначительному увеличению уровня боковых лепестков диаграммы направленности антенны. Однако при большом числе элементов ФАР возникшие таким путем погрешности усредняются и выходят на уровень, которым можно пренебречь.

Активным элементом дискретного фазовращателя служит полупроводниковый ключ, в основе которого лежит полупроводниковый $p-i-n$ диод или транзистор. Использование $p-i-n$ диода в СВЧ-цепях основано на том, что $p-i-n$ диод может иметь два разных состояния. В одном из них ($U \leq U_c$) ток через диод не течет, центральная часть диода (i от *intrinsic* – собственный, нелегированный полупроводник) представляет собой диэлектрик, а диод в целом – конденсатор с малой емкостью и относительно малыми потерями. В другом состоянии ($U \geq U_c$) $p-i-n$ диод проводит ток, центральная часть диода заполняется инжектированными носителями заряда, и диод в целом представляет собой резистор с малым сопротивлением. На рис. 3 представлена простейшая схема дискретного фазовращателя, использующего принцип коммутируемых линий. В зависимости от состояния ключей СВЧ-волна может распространяться либо по более длинному пути, либо по более короткому, приобретая таким образом необходимый фазовый сдвиг. Рабочее напряжение $p-i-n$ диода не превышает 1–2 В, уп-

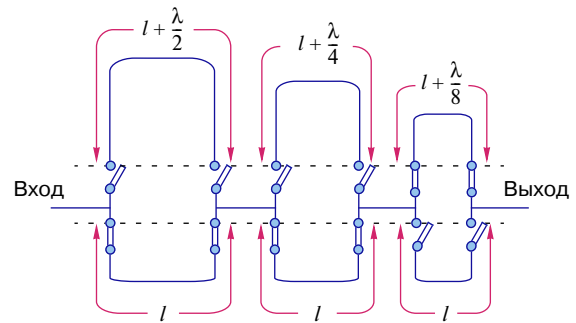


Рис. 3. Схема дискретного фазовращателя, использующего принцип коммутируемых линий

равляющий ток через диод зависит от мощности СВЧ-сигнала, для работы с которым предназначен диод, и находится в пределах 0,1–100 мА. Время переключения $p-i-n$ диода также зависит от мощности управляемого сигнала и лежит в пределах 0,05–5 нс.

В Советском Союзе СВЧ-фазовращатель на $p-i-n$ диодах впервые обсуждался в докладе Б.В. Сестрорецкого на Антенной конференции в 1961 году. Позже материал доклада был опубликован в журнале “Вопросы радиоэлектроники” (ссылка дана в [3, с. 507]). Решающим технологическим приемом изготовления СВЧ $p-i-n$ диодов оказалась ионная имплантация, которая в начале 60-х годов только начала осваиваться в производстве полупроводниковых приборов. Разработка высококачественной технологии СВЧ $p-i-n$ диодов на начальном периоде была обеспечена группой В.М. Гусева, занимавшегося ионной имплантацией в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова (см. [3, с. 553]).

В 1963 году в США “Microwave Journal” опубликовал статью Ф.А. Бранда¹, в которой достаточно подробно излагаются перспективы использования $p-i-n$ диодов в технике СВЧ. В частности, Ф.А. Бранд писал: «Принцип действия переключателей с $p-i-n$ диодами обсуждался на семинаре, организованном редакцией журнала “Microwave Journal” в 1963 году. В настоящее время более 15 фирм ведут разработки переключателей и ограничителей, в которых используются варакторы и диоды с $p-i-n$ переходами».

В 70-х годах развитие техники ФАР потребовало организации массового производства фазовращателей на $p-i-n$ диодах. Результаты усилий ленинградской группы научных работников и инженеров по конструированию и оптимизации СВЧ-фазовращателей на $p-i-n$ диодах отражены в монографии [4]. Во введении к монографии мы читаем: “При разработке практических конструкций фазовращателей и переключателей пришлось отказаться от традиционных методов СВЧ-техники и перейти к использованию принципов и технологии микроэлектроники”.

¹ Brand F.A. // Microwave J. 1963. Vol. 6, № 7. P. 38–55. См. перевод: Зарубежная радиоэлектроника. 1964. № 1. С. 64–79.

На рис. 4 приведен СВЧ-фазовращатель на $p-i-n$ диодах, представляющий собой пример крупносерийной промышленной продукции.

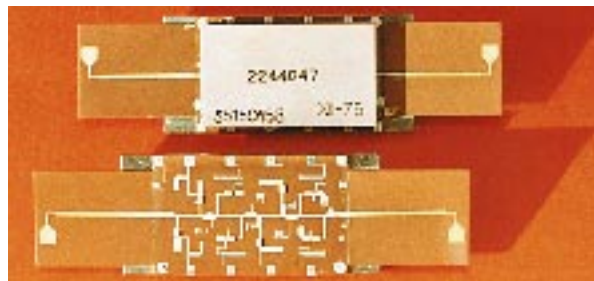


Рис. 4. Дискретный фазовращатель на основе $p-i-n$ диодов. Фазовращатель объединен с излучателями, представленными в виде малогабаритных печатных антенн. На фотографии открытого фазовращателя можно различить четыре ступени управления: 180° , 90° , 45° и $22,5^\circ$

ОПТИМАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛА – ЗАЛОГ УСПЕШНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ ФУНКЦИЙ ЛЮБОЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрим простейший пример – радиолокатор кругового обзора. Такими радиолокаторами оснащены все крупнейшие аэропорты. Подъезжая к аэропорту, можно видеть огромное параболическое зеркало, монотонно вращающееся вокруг вертикальной оси. Это и есть антенна радиолокатора кругового обзора. Такая антенна посылает в окружающее пространство импульсы, которые, отражаясь от целей, несут информацию о координатах самолетов в воздушном пространстве аэропорта. Очевидно, что направления, на которых сосредоточены улетающие и прибывающие самолеты, распределены неравномерно вокруг данного аэропорта и радиолокатор работал бы более эффективно, если бы зондирующий луч его антенны более детально осматривал направления, в которых сосредоточены объекты наблюдения, и за короткие интервалы времени “проскакивал” те секторы, появление целей в которых менее вероятно. Такой режим обзора с переменной скоростью невозможен при использовании антенны со сканированием за счет механического движения ее конструктивных элементов, так как переменная скорость движения привела бы к огромным механическим ускорениям и соответственно неприемлемым механическим нагрузкам на элементы конструкции антенны. Задача обзора пространства с переменной скоростью легко решается антенной с электронным сканированием.

Более сложный пример – работа радиотехнической системы при наличии источников помех. Дифракция СВЧ-волн на большом числе элементов ФАР формирует главный луч антенны, определяющий то направление, в котором антенна обеспечивает максимум излучения или в котором она с наи-

большим усилением принимает сигнал от внешнего источника. Кроме того, диаграмма направленности любой антенны имеет направления, вдоль которых ее усиление равно нулю. Изменяя распределение фаз на элементах антенны, можно управлять направлением нулевого приема. Таким образом, ФАР может быть настроена на максимум усиления в желательном направлении и на нулевое усиление в нежелательном направлении. Такая антенна носит название адаптивной [5]. Адаптивная антенна сохраняет зоркость в заданном направлении и как бы “прищуривает глаз” в направлении помехи. Использование адаптивной антенны существенно повышает надежность функционирования любой радиотехнической системы, будь то радиолокатор, радионавигационная станция или просто система связи. Таким образом, ФАР не просто осуществляет прием или передачу сигналов. Она осуществляет первичную обработку информации на входе радиотехнической системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Появление и развитие ФАР – одна из ветвей триумфального шествия радиоэлектроники XX века. Техника ФАР объединила в себе решение проблем электродинамики, физики твердого тела и способов обработки информации. Развитие техники ФАР оказалось серьезным стимулом решения проблем СВЧ-микроэлектроники как основы микроминиатюризации СВЧ-компонентов и обеспечения их массового производства. Напомним, что в состав ФАР может входить до 10 000 элементов, каждый из которых представляет собой законченное, достаточно сложное устройство. Только широкое освоение производственных приемов микроэлектроники смогло технически и экономически обеспечить приемлемую стоимость больших ФАР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вендик О.Г. Антенны с немеханическим движением луча: Введение в теорию. М.: Сов. радио, 1965. 360 с.
2. Сегнетоэлектрики в технике СВЧ / Под ред. О.Г. Вендика. М.: Радио и связь, 1979. 272 с.
3. СВЧ-устройства на полупроводниковых диодах: Проектирование и расчет / Под ред. И.В. Мальского, Б.В. Сестрорецкого. М.: Сов. радио, 1969. 260 с.
4. Хижа Г.С., Вендик И.Б., Серебрякова Е.А. СВЧ-фазовращатели и переключатели: Особенности создания на $p-i-n$ диодах в интегральном исполнении. М.: Радио и связь, 1984. 184 с.
5. Пистолькорс А.А., Литвинов О.С. Введение в теорию адаптивных антенн. М.: Наука, 1991. 200 с.

* * *

Орест Генрихович Вендик, доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского электротехнического университета, лауреат Государственной премии. Область научных интересов: электроника твердого тела и техника сверхвысоких частот. Автор более 200 научных статей и трех монографий.