

Б. Высокый,
Б. Войнич

“Разумная обшивка”

Перспективы развития бортовых радиоэлектронных систем

Стремительный рост объема памяти носителей информации и скорости ее обработки, появление новых, более эффективных технологий создают благоприятную почву для ускоренного развития радиоэлектронных систем, изменяя принципы их построения и инженерный облик. Так, благодаря использованию микроэлектронных активных антенных решеток и монолитных ИС самой высокой степени интеграции современные бортовые радиоэлектронные системы сегодня можно изготавливать в виде обшивки летательного аппарата. Работы над “разумной обшивкой” ведутся и в России. Отечественным специалистам, в частности, удалось разработать универсальные микроэлектронные модули, которые позволяют создавать активные и пассивные многофункциональные радиоэлектронные системы, на два порядка превосходящие традиционные по техническим и стоимостным характеристикам.

В классической бортовой радиолокационной станции (РЛС) [1], выполненной на традиционной антенной системе с параболическим рефлектором, сигнал передатчика через переключатель прием-передача поступает на облучатель антенны. Зеркало антенны через систему приводов механически соединено с фюзеляжем или корпусом летательного аппарата. Для стабилизации положения оси антенны при колебаниях корпуса летательного аппарата на двигатели приводов подаются специальные сигналы с системы стабилизации антенны. Сигналы обеспечивают разворот антенны в сторону, противоположную колебаниям фюзеляжа, удерживая луч антенны неподвижно по отношению к направлению на цель.

Для создания диаграммы направленности определенной ширины зеркало антенны необходимо изготавливать с высокой точностью. Неровности на его поверхности не должны превышать значения $(1/16 \div 1/20)\lambda$, где λ — длина рабочей волны. Кроме того, зеркало должно иметь достаточно высокую механическую прочность, чтобы сохранять постоянство формы поверхности при движении антенны и перегрузках во время маневра летательного аппарата.

Поворот оси диаграммы направленности в классической бортовой РЛС осуществляется механическим поворотом всего зеркала антенны вместе с облучателем, который расположен на определенном фокусном расстоянии от зеркала.

В большинстве антенн с параболическими отражателями [2] отношение фокусного расстояния к диаметру антенны составляет $0,3 \div 0,5$. Поэтому объем $V_{ЗА}$, необходимый для размещения зеркальной антенны с облучате-

лем, может быть приблизительно оценен как $V_{ЗА} \approx 0,25 D_3^3$, где D_3 — раскрыв зеркальной антенны. Если выразить D_3 через ширину диаграммы направленности α и длину рабочей волны как $D_3 = \lambda/\alpha$, то выражение примет вид:

$$V_{ЗА} \approx 0,25 \frac{\lambda^3}{\alpha^3}$$

При оценке объема всей РЛС с зеркальной антенной $V_{РЛС}$ значение $V_{ЗА}$ необходимо увеличить в $1,5 \div 2$ раза, чтобы учесть другие элементы радиолокационного тракта, например систему приводов антенны, передатчик и др.:

$$V_{РЛС} \approx (1,5 \div 2) \cdot 0,25 \frac{\lambda^3}{\alpha^3} = (0,37 \div 0,5) \frac{\lambda^3}{\alpha^3}$$

Поскольку передатчик такой РЛС генерирует короткие импульсы мощностью в десятки и сотни киловатт, для предотвращения электрического пробоя между элементами передатчика, модулятора и источника питания эти устройства герметизируют с помощью защитных кожухов, которые, к тому же, обеспечивают необходимый теплоотвод. В результате объем и масса РЛС возрастают почти на 50%.

При проектировании бортовых РЛС с зеркальными антеннами нельзя забывать об электрической прочности антенно-фидерного тракта, в который входят вращающиеся волноводные устройства и облучатель антенны. Почти вся мощность, излучаемая РЛС, сосредоточена на выходе облучателя. Поэтому при увеличении высоты подъема РЛС над землей около облучателя возможен пробой воздуха, который нарушает работу РЛС*. Габариты или пло-

щадь облучателя обычно стараются делать поменьше, чтобы не затенять раскрыв антенны. В результате напряженность поля увеличивается, и вероятность пробоя повышается.

Инженерный облик бортовой РЛС коренным образом меняется, если в качестве антенны использовать *плоскую активную фазированную решетку (АФАР)*. В этом случае большая часть устройств, входящих в состав РЛС, размещается с одной стороны такой АФАР [3]. Современные бортовые радиоэлектронные системы в основном построены на основе АФАР.

При одинаковой с параболической антенной площади, например 1 м^2 , на поверхности АФАР можно разместить до 4 тыс. излучателей с расстоянием между ними $\lambda/2$ при $\lambda = 3 \text{ см}$. Для формирования синфазного поля в раскрыве АФАР необходимо синфазно управлять отдельными усилителями, каждый из которых работает на свой излучатель. Такую возможность обеспечивает схема разводки, которую можно разместить как на обратной, так и на передней стороне АФАР. Поворот диаграммы направленности на определенный угол, а также стабилизация луча в пространстве производится не путем поворота всей антенны, а изменением фазового распределения в раскрыве АФАР с помощью фазовращателей.

Построение РЛС на основе АФАР существенно улучшает массогабаритные характеристики и надежность станции. Объем, занимаемый РЛС с АФАР ($V_{АФАР}$), можно оценить по выражению:

$$V_{АФАР} = (0,01 \div 0,04) D_{АФАР}^3 \approx (0,01 \div 0,04) \frac{\lambda^3}{\alpha^3}$$

Как видим, объем РЛС с АФАР на один-два порядка меньше объема РЛС

*Как показывают результаты летных испытаний, электрическая прочность воздуха с подъемом сначала уменьшается, и при высотах около 40 км достигает минимума. При дальнейшем увеличении высоты электрическая прочность воздуха возрастает.

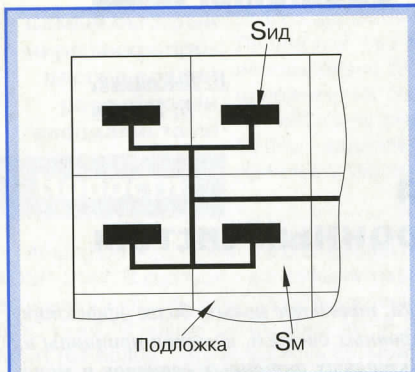


Рис.1. МАФАР на диэлектрической подложке

с зеркальной антенной. В конструкции АФАР можно размещать очень большое число маломощных генераторов. В результате при больших значениях суммарной излучаемой мощности существенно снижается вероятность пробоя воздуха.

Современная элементная база и новейшие микроэлектронные технологии позволяют создавать полностью микроэлектронные АФАР (МАФАР), в состав которых могут входить основные компоненты РЛС. Рассмотрим возможность построения таких РЛС на примере оценочного расчета конструкции МАФАР [1].

На рис.1 приведена часть диэлектрической подложки, на поверхности которой расположены все активные и пассивные элементы РЛС. Расстояние между центрами излучателей антенной решетки принято равным половине длины волны в воздухе λ_B , что обеспечивает максимальный угол поворота диаграммы направленности без образования бокового дифракционного лепестка, следующего в процессе сканирования за главным лепестком. В этом случае площадь поверхности подложки, которая может быть отведена для размещения всех элементов модуля РЛС, составляет $S_M = \lambda_B / 2 \cdot \lambda_B / 2 = 0,25 \lambda_B^2$.

Если в качестве излучателя использовать плоский полуволновой вибратор и расположить его над поверхностью подложки (т.е. в воздухе), то все элементы РЛС придется размещать с другой стороны подложки (т.е. за излучающей поверхностью), поскольку площадь такого излучателя равна $S_{ИВ} = \lambda_B / 2 \cdot \lambda_B / 4 = \lambda_B^2 / 8$. По такому принципу построены объемные модули, разрабо-

танные по программам MERA и PASSR [4]. Однако объемные модули имеют целый ряд недостатков, в частности значительный объем, массу, сложность построения цепей управления и питания. Положение существенным образом меняется, если излучатель напылить в виде микрополосковой линии на поверхность подложки с большим значением диэлектрической проницаемости ϵ . Тогда размеры излучателя будут зависеть от длины волны в диэлектрике (подложке) λ_D , значение которой, как известно, связано со значением длины

волны в воздухе λ_B соотношением

$$\lambda_D = \frac{\lambda_B}{\sqrt{\epsilon_{эф}}}$$

где $\epsilon_{эф}$ — эффективная диэлектрическая проницаемость подложки. Для расчетов значения $\epsilon_{эф}$ можно воспользоваться графиком на рис.2, где W — ширина микрополоскового излучателя, h — толщина подложки.

Площадь, занимаемая одним микрополосковым излучателем, значительно меньше площади плоского полуволнового вибратора. Поэтому при переходе к МАФАР на поверхности каждого модуля образуется свободная площадь, на которой можно располагать бескорпусные активные элементы, а также микрополосковые линии разводки цепей питания и управления.

Исходя из приведенных соотношений и данных работы [1], можно записать выражение для баланса площадей на поверхности модуля:

$$S_M \geq S_{ид} + S_{пнт} + S_{му} + S_{см} + S_{пунч} + \dots$$

где $S_{ид}$ — площадь, занимаемая излучателем на подложке; $S_{пнт} = 1,08 \lambda_D^2$ — площадь, занимаемая переключателем приемопередача; $S_{му} = 0,42 \lambda_D^2$ — площадь, занимаемая усилителем мощности и цепями питания и управления; $S_{см} = 0,13 \lambda_D^2$ — площадь, занимаемая смесителем; $S_{пунч} = 0,14 \lambda_D^2$ — площадь, занимаемая предварительным усилителем промежуточной частоты.

Анализ конкретного баланса площадей показывает, что

создание передающей, приемной или приемопередающей МАФАР на подложке из определенного материала технически возможно.

Огромны преимущества бортовых МАФАР, работающих в миллиметровом диапазоне волн. Об этом говорит зависимость дальности действия радиолокационной системы $R_{РЛС}$ от параметров входящих в нее устройств [5]:

$$R_{РЛС} = \sqrt[4]{\frac{P_{из} S_1 S_2 \sigma}{4\pi \lambda^2 P_{пр мин}}}$$

где $P_{из}$ — мощность излучения; S_1 — эффективная площадь передающей антенны; S_2 — эффективная площадь приемной антенны; λ — длина рабочей волны; $P_{пр мин}$ — минимальное значение принимаемой мощности, σ — эффективная площадь рассеяния радиолокационной цели.

Из этого соотношения следует, что дальность действия радиолокационной системы существенно зависит от длины рабочей волны, т.е. увеличивается с уменьшением λ .

Площадь приемной и передающей МАФАР можно значительно увеличить

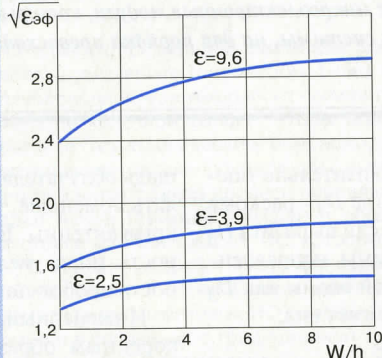


Рис.2. График для расчета эффективной диэлектрической проницаемости

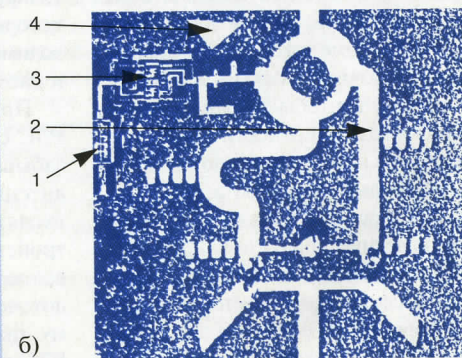
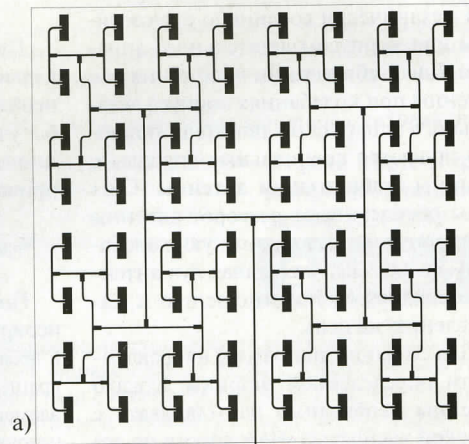


Рис.3. Универсальный микроэлектронный модуль МАФАР размерами 40x40 мм (а). Элементы модуля (б): 1 — автогенератор 30 мВт, 16 ГГц, размеры — 2x3 мм; 2 — умножитель частоты 50—100 мВт, 32 ГГц; 3 — смеситель -7дБ, размеры — 10x12 мм; 4 — усилитель 300 мВт, размеры — 3x5 мм;

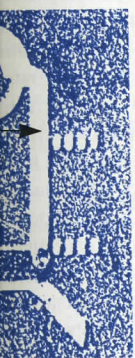
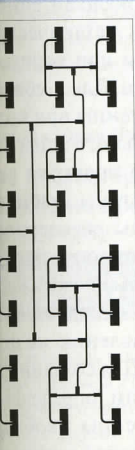
приемной или АФАР на под- материала тех-

ства бортовых в миллиметро- б этом говорит действия ра- мы РРДС от па- е устройств [5]:

σ , S_1 — эф- передающей ан- вная площадь д- длина рабочей малые значе- ности, σ — эф- ссеяния радио-

ия следует, что иолокационной зависит от дли- увеличивается с

и передающей ьно увеличить



ктронный модуль элементы модуля (б): размеры — 2x3 мм; 0 мВт, 32 ГГц; — 10x12 мм; — 3x5 мм;

по сравнению с антеннами в виде параболических рефлекторов. Поскольку форма МАФАР не обязательно должна быть строго плоской, их можно располагать на больших неплоских поверхностях корпуса и крыльев летательного аппарата в виде обшивки. Возникающие при этом искажения фазового фронта излучаемых и принимаемых сигналов компенсируются сигналами, подаваемыми на фазовращатели. Для искусственного “выравнивания” поверхности МАФАР используют соответствующие алгоритмы автоматического диаграммоформирования.

Над созданием таких МАФАР серьезно работают специалисты ряда российских предприятий и вузов. В ходе НИОКР найдено немало оригинальных технических решений. Одно из них — **универсальный модуль МАФАР** требуемого размера. Модуль представляет собой поликорковую подложку размером 40x40x0,25 мм, на одной стороне которой размещена решетка из 64 прямоугольных микрополосковых излучателей. Питание излучателей осуществляется с помощью микрополосковой несимметричной линии по разветвленной схеме, т.е. по схеме параллельного синфазного питания. Изгибы линий выполнены так, что их длина кратна $\lambda_d/2$. Обратная сторона подложки имеет металлизированную поверхность, на которой размещены полупроводниковые активные элементы. При необходимости активные устройства можно разместить и на передней стороне модуля.

Области применения микрополоскового модуля охватывают системы связи, радиолокационные и радионавигационные станции, устройства связи между компьютерами, командные радиолитии, средства охранной сигнализации и другие радиоэлект-

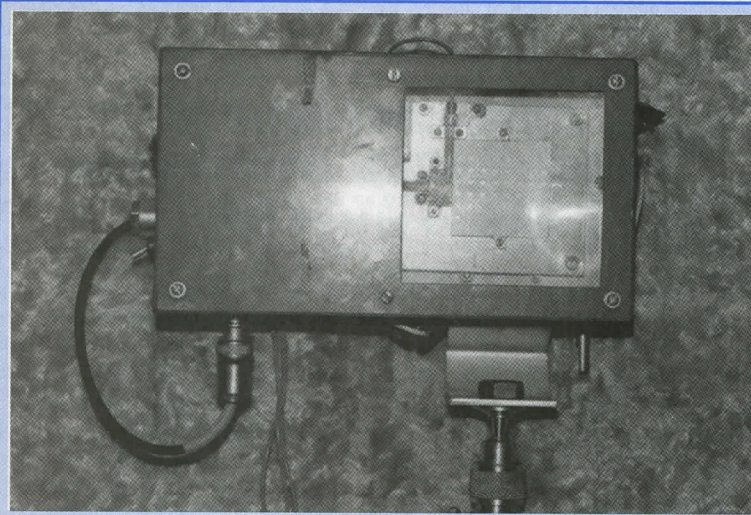


Рис.4. Лабораторный макет универсального модуля

ронные системы. Благодаря особой схеме модулятора, которая способна выполнять и функцию смесителя для приемного тракта, модуль можно использовать как в передающих, так и в приемных радиотрактах.

На рис.3 схематически изображена антенная решетка универсального модуля и увеличенная фотография его отдельных элементов, а на рис.4 — фотография лабораторного макета универсального модуля, работающего на частоте 32 ГГц. Результаты экспериментальной оценки демонстрационных образцов подтвердили следующие параметры модулей, функционирующих на частотах 32—36 ГГц:

Ширина диаграммы направленности.....	10–12° в обеих плоскостях
Излучаемая мощность.....	до 100 мВт
Полоса пропускания.....	>1,5% несущей частоты
Потери на преобразование (шум-фактор).....	6,5 дБ
Масса.....	не более 5 г
Виброустойчивость в полосе частот 50–3000Гц.....	до 15g
Ударопрочность.....	до 150g
Устойчивость к ускорению.....	до 500g

На универсальных модулях может быть сконструирован радиолокатор предупреждения столкновений наземных транспортных средств. Для создания системы предупреждения столкновений летательных аппаратов в воздухе необходимо примерно 10 радиолокато-

ров — по числу секторов наблюдения. Общая масса такой автономной системы не превысит 10 кг, а габариты — 80x160x25 мм. Такие радиолокационные системы будут размещаться на поверхности ЛА в виде **разумной обшивки**.

Экспериментальные исследования показывают, что, используя универсальные микроэлектронные модули как базовые элементы, за короткий срок можно создать активные и пассивные многофункциональные РЭС, по техническим и стоимостным

характеристикам примерно на два порядка превосходящие аналогичные системы в традиционном исполнении. На сегодня разработчиками подготовлена техническая документация и изготовлена партия лабораторных макетов универсальных микроэлектронных модулей, действующих в диапазоне крайне высоких частот.

Контактный телефон
для заинтересованных в сотрудничестве
(095) 158-68-00 (кафедра МАИ)

Литература

1. **Войнич Б.А.** Энергетический и конструкторский расчет микроэлектронных радиотехнических систем. — М.: МАИ, 1997.
2. **Сколник М.** Введение в технику радиолокационных систем. — М.: Мир, 1965.
3. Конструирование аппаратуры на БИС и СБИС. Под ред. Б.Ф.Высоцкого и В.Н.Срегенского. — М.: Радио и связь, 1989.
4. **Высоцкий Б.Ф., Войнич Б.А.** Элементы инженерного расчета микроэлектронных радиолокационных устройств. — М.: МАИ, 1994.
5. **Бакулев П.А., Сосновский А.А.** Радиолокационные и радионавигационные системы. — М.: Радио и связь, 1994.

Представляем авторов статьи

ВЫСОЦКИЙ Богдан Федорович. Выпускник Киевского политехнического института, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники СССР, лауреат Государственной премии и премии Минвуза СССР. Специалист в области конструирования бортовых радиоэлектронных систем. Автор более 80 научных работ и 25 изобретений.

ВОЙНИЧ Борис Александрович. Выпускник Московского авиационного института, кандидат технических наук, доцент МАИ, лауреат премии Минвуза СССР. Специалист в области бортовых радиоэлектронных систем в микроэлектронном исполнении. Автор более 70 научных работ и 15 изобретений.