

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА АКТИВНЫХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Е. В. Овчинникова, А. Н. Рогов

Приводится обзор элементной базы для приемопередающих модулей активных фазированных антенных решеток X-диапазона. Рассмотрена продукция западных, восточных и отечественных компаний-изготовителей сверхвысокочастотной электроники (усилителей, фазовращателей, аттенюаторов, малошумящих усилителей) с целью сравнения их характеристик. Выделены отдельные модели устройств с функционалом, расширяющим возможности калибровки. Производится обзор и сравнение усилителей, построенных на технологическом процессе нитрида галлия и арсенида галлия. Рассмотрены многофункциональные монолитные интегральные схемы и их применение. Произведен обзор высокоскоростных аналого-цифровых преобразователей, а также микросхем, объединяющих несколько аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей в одном корпусе. Рассмотрены отечественные и зарубежные приемопередающие модули. Произведен обзор multifunctionальных монолитных интегральных схем радиотракта приемопередающего модуля и рассмотрены возможности их применения на текущем этапе развития элементной базы. Показаны схемотехнические решения реализации внутренней калибровки передающих и приемных каналов. Описаны тенденции в модернизации и создании приемопередающего модуля нового поколения.

Ключевые слова: элементная база, X-диапазон, активная фазированная антенная решетка, приемопередающий модуль, многофункциональная монолитная интегральная схема, контроль, калибровка, аналого-цифровой преобразователь, усилитель, малошумящий усилитель, фазовращатель, аттенюатор.

Введение

Прогресс в создании новых типов летательных аппаратов привел к существенному уменьшению их эффективной поверхности рассеяния. Это требует использования высокопотенциальных, мобильных радиолокационных комплексов, основанных на применении активных фазированных антенных решеток (АФАР).

Приемопередающий модуль (ППМ) – это элемент АФАР, позволяющий усиливать передаваемые или принимаемые сигналы в широкой полосе частот, а также задавать амплитудно-фазовое распределение этого сигнала для формирования требуемой формы диаграммы направленности [1].

Типовая [2] структурная схема ППМ АФАР представлена на рис. 1.

В состав ППМ входят:

- защитное устройство (ЗУ);
- малошумящий усилитель (МШУ);
- согласующие усилители (СУ);
- ступенчатые фазовращатели (ФВ);
- ступенчатые аттенюаторы (АТТ);
- предварительный усилитель мощности (ПУМ);
- выходной усилитель мощности (ВУМ).

Также в такой схеме дополнительно могут использоваться сверхвысокочастотные (СВЧ) переключатели или ферритовые устройства для совмещения приемного (ПРМ) и передающего (ПРД) каналов, с целью совместного использования функциональных узлов (излучатель, ФВ, АТТ).

Принцип действия ППМ при передаче заключается в том, что СВЧ-сигнал поступает на вход ПРД и задается амплитудно-фазовое распределение сигнала. Согласующие усилители компенсируют

СВЧ-потери в АТТ и ФВ, и сигнал поступает на ПУМ. В свою очередь ПУМ усиливает сигнал и находится в режиме насыщения. Максимальная выходная мощность ПУМ рассчитана таким образом, чтобы ВУМ, при подаче ее на вход, находился в режиме насыщения на 3 – 5 дБ. Затем сигнал усиливается ВУМ и поступает на распределительную систему. При работе на передачу сигналы, поступающие на антенное полотно со всех каналов АФАР, суммируются по амплитуде в определенном направлении сканирования. При этом форму диаграммы направленности можно изменять в процессе эксплуатации за счет управления амплитудой и фазой каждого ППМ по отдельности.

При приеме отразившийся сигнал от сканируемого объекта в заданной области пространства поступает на приемную антенну. Сигнал проходит через распределительную систему и поступает на вход приемного канала ППМ. Если сигнал имеет допустимый уровень входной мощности, то ЗУ ограничивает его до безопасного уровня. Сигнал усиливается МШУ и СУ. Задается требуемая амплитуда и фаза за счет установленных аттенюаторов и фазовращателя. Для компенсации потерь необходимо дополнительное усиление. Далее сигнал с выхода приемного канала поступает на схему суммирования, затем на обработку.

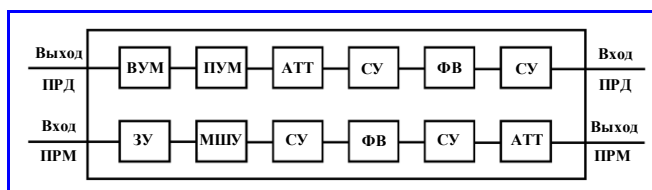


Рис. 1. Типовая структурная схема приемопередающего модуля активных фазированных антенных решеток

В настоящее время, когда импорт западной СВЧ-электроники ограничен, следует обратить внимание на восточных поставщиков и собственные производства.

1. Элементная база активных фазированных антенных решеток

Рассмотрим представленные на рынке элементы СВЧ-тракта [3]. Далее будет рассмотрена продукция ведущих компаний-изготовителей СВЧ-электроники: китайские (КНР) компании – *NEDI Technology Company Ltd. (NEDITEK)*, *Hisiwell Microwave Group (Hisiwell)*, *Shijiazhuang METDA Electronic Technology Limited Corporation (METDA)*; западные – *MACOM*, *Analog Devices, Inc. (ADI)*, *Qorvo, Inc.*, *Texas Instruments*, *Wolfspeed, Inc.*; российские – АО «НПФ «Микран», АО «НПП «Исток» им. Шокина», ФГУП «РНИИРС», АО «Светлана-Рост».

Так как после распределительной системы сигнал ослабляется, то перед излучением в пространство его необходимо усилить. Для этого используют различные СВЧ-усилители.

За последние годы технология применения арсенид галлия GaAs получила широкое распространение в изготовлении микроволновых монолитных интегральных схем (МИС). Все функциональные узлы, представленные на рис. 1, реализуемы на GaAs МИС.

В настоящее время наиболее перспективной технологией является нитрид галлия GaN. На основе современных технологий освоено серийное производство высокочастотных GaN-транзисторов. На их основе создаются интегральные схемы СВЧ-усилителей. Пионерами выхода на коммерческий рынок стали компании *Sumitomo Corporation*, *Wolfspeed*, *MACOM*, *Hisiwell*, *NEDITEC*. В Российской Федерации (РФ) воронежский Научно-исследовательский институт электронной техники (АО «НИИЭТ») сообщил о начале приема заказов на GaN-транзисторы *L*- и *S*-диапазонов частот. *X*-диапазон отечественной промышленностью пока не освоен. Рассмотрим представленные на рынке усилители, изготовленные по технологиям GaN и GaAs. Параметры усилителей приведены в табл. 1. Все значения указаны для скважности $Q = 10$.

При всем развитии GaN-технологии номенклатура GaAs-усилителей представлена гораздо шире, как и список компаний-производителей. Отечественными компаниями-изготовителями освоено производство всех (рис. 1) СВЧ МИС по GaAs-технологии. Характеристики GaAs-усилителей представлены в табл. 2.

Результаты сравнения представлены на рис. 2 и 3.

Исходя из рисунков, можно сделать вывод, что GaN-усилители обладают как большим коэффициентом полезного действия (КПД), так и большей выходной мощностью $P_{\text{вых}}$.

Таблица 1

Параметры усилителей, изготовленных по технологиям GaN и GaAs

Модель	Частота, ГГц	$P_{\text{вых}}$, дБм	$K_{\text{у}}$, дБ	КПД, %
NDAC010122 (КНР)	8,5 – 10,5	29	17	18
NDNC010105 (КНР)	8 – 12	41	33	45
HXNM40012 (КНР)	8 – 12	42	20	30
HXN40096 (КНР)	8,5 – 9,6	52	8	36
HXN40102 (КНР)	9 – 10	52	8	35
BW253 (КНР)	8 – 12	43	20	40
CHA8618-99F (КНР)	6 – 18	42,5	33	40
CHA8212-99F (КНР)	8,5 – 11,5	44	34	36
HMC8415 (США)	9 – 10,5	46	23	40
CMPA601C025F (США)	6 – 12	40	25	32
ADPA1122 (США)	8,2 – 11,8	43,5	21,5	46
CMPA901A035D (США)	9 – 10	45,5	–	–
MAAP-011422-DIE (США)	6 – 18	40	20	33

Таблица 2

Характеристики GaAs-усилителей

Модель	Частота, ГГц	$P_{\text{вых}}$, дБм	$K_{\text{у}}$, дБ	КПД, %
HXC40037 (КНР)	8,5 – 9,6	41	8	30
HXC40042 (КНР)	9 – 10	44	6	30
HX07013030 (КНР)	7 – 13	45	24	40
NDAC010129 (КНР)	2 – 12	30	23	25
CHA7215-99F (Европа)	8,5 – 11,5	39,5	28	34
MP553 (РФ)	8,5 – 11	39,5	27	25
MP565 (РФ)	9,5 – 13,3	35	26	21
5406UE01H4 (РФ)	8 – 12	33	20	–
MP543 (РФ)	8 – 12	30	20	25
Исток (РФ)	8,5 – 10,5	40,5	–	37
SVB0402 (РФ)	8 – 12	21	19,5	–
HMC952A (США)	8 – 14	35	32	26
MAAP-015035 (США)	8,5 – 11,5	41	36	40

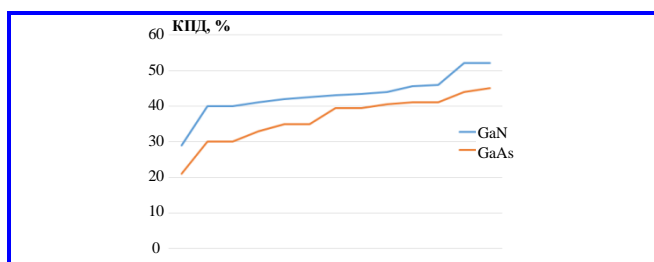


Рис. 2. Сравнение усилителей мощности по коэффициенту полезного действия

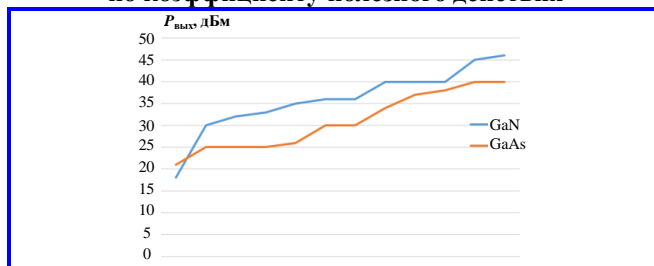


Рис. 3. Сравнение усилителей мощности по выходной мощности

Отдельного внимания заслуживают усилители со встроенным детектором проходящей мощности (MP_245_0 РФ). К сожалению, ограничения по входящей мощности сужают область применения усилителей данного типа. Частично эту проблему помогает решить применение GaN-технологии. Например, усилитель TGA2760-SM может детектировать до 16 Вт выходной мощности.

Также значительно упростить решение задач схемотехнического согласования помогут внутри-согласованные СВЧ-усилители. Их применение позволит сократить время и стоимость разработки. Усилители данного типа производятся как в России, так и за рубежом.

Ведутся активные исследования и разработки [4] по созданию малошумящих усилителей, с применением GaN-технологии. Применение этой технологии положительно скажется на выходной мощности и динамическом диапазоне. От МШУ зависит коэффициент шума приемного канала. МШУ представлены в табл. 3.

Из проведенного сравнения можно сделать вывод, что Россия обладает достаточной номенклатурой МШУ [5, 6] для разработки приемных каналов с различными требованиями. Присутствуют МШУ как с высоким (>25) K_{Σ} (MP531), так и с низким (<1) K_{Σ} (Э910.434815.64).

Также ведутся работы по применению GaN-технологии для фазовращателей и аттенуаторов. Обзор составлялся из цифровых фазовращателей (ЦФВ) и цифровых аттенуаторов (ЦАТТ) с типом управления TTL (Time To Live), так как данный тип управления наиболее удобен при разработке.

ЦФВ представлены в табл. 4.

Ведутся разработки векторных фазовращателей [7] с возможностью компенсации влияния разброса технологических параметров путем калибровки фазовых состояний в процессе измерения характеристик схемы.

ЦАТТ представлены в табл. 5.

Из проведенного анализа видно, что представленные на рынке ЦФВ и ЦАТТ не имеют кардинальных отличий.

Также перспективным техническим решением является использование мультифункциональных монолитных интегральных схем (ММИС), включающих в себя аттенуатор, фазовращатель, усилитель, переключатель, МШУ, ЗУ. Это позволяет увеличить надежность и уменьшить габариты за счет применения меньшего количества кристаллов, расположенных на плате. Также применение дискретных элементов или МИС с низкой степенью интеграции ухудшает параметры устройства из-за взаимного

влияния соединений и рассогласований в СВЧ-трактах. Большое количество паяных и сварных соединений резко снижает надежность и повышает вероятность брака на этапе сборки. Увеличиваются затраты на монтаж и корпусирование. В РФ множество [8 – 11] компаний ведут работы по разработке и производству МИС. Также четыре основные функциональные схемы представлены на рис. 4.

Таблица 3

Параметры малошумных усилителей

Модель	Частота, ГГц	K_{Σ} , дБ	K_{Σ}
NDAC020014 (КНР)	8 – 12	28	0,9
NDAC020162 (КНР)	9 – 10,2	26	0,7
NDAC020160 (КНР)	8,5 – 16	27	1,2
HX130430F4 (КНР)	6 – 18	23,5	1,5
HX130940P3 (КНР)	7 – 13	22	0,8
HX130660 (КНР)	7 – 11	23	1,1
CGY21244H/C1 (США)	8 – 12	33	1,1
CMD309P4 (США)	5 – 11	27	1,5
CMD319C3 (США)	8 – 12	20	0,9
MP531 (РФ)	8 – 12	26	1,6
SVB0503 (РФ)	8,9 – 10,7	19	2
МШУ 50/1 (РФ)	6 – 12	28	2
Э910.434815.64 (РФ)	8 – 12	17	1

Таблица 4

Параметры цифровых фазовращателей

Модель	Частота, ГГц	Количество, бит	Ошибка выставляемая фазы, град.	Потери, дБ
MAPS-010166 (США)	8 – 12	6	5	6,5
CGY2172XAUN/C1 (США)	8 – 12	6	2	8
TGP2109-SM (США)	8 – 12	6	4	6
CGY2172XAUN (США)	8 – 12	6	2	8
CHP3015-QDG (Европа)	8,5 – 10,5	6	4	8
HX533160 (КНР)	6 – 18	6	2	14
NDAC03021 (КНР)	8 – 12	6	1,5	7,5
MP334D (РФ)	9 – 11	6	1,6	7,5
SVA0106 (РФ)	7 – 11	6	4	5

Таблица 5

Параметры цифровых аттенуаторов

Модель	Частота, ГГц	Количество, бит	Точность затухания, дБ	Потери, дБ	Ослабление, дБ
CGY2171XBUN/C1 (США)	1 – 15	6	0,25	5	31,5
HMC424ALH5 (США)	0,1 – 13	6	0,3	3,5	31,5
ADRF5700 (США)	0,1 – 22	5	0,1+2%	1,6	46
CHT4016-99F (Европа)	4 – 16	6		6,5	31,5
HX41160AQ5 (КНР)	0,1 – 13	7	0,6+6%	2	31,5
SVB0301 (РФ)	0,1 – 22	6	0,3	5,5	31,5
MP109D (РФ)	0,1 – 14	6	0,35	5	31,5

На рис. 4, а, представлена двухпортовая конфигурация, представляющая из себя систему управления амплитудой и фазой. А также набор усилителей. Применение данной схемы целесообразно, если приемный и передающий каналы имеют различные антенные системы.

Четырехпортовая схема показана на рис. 4, б, она представляет собой двухпортовую схему, дополненную переключателями с двух сторон.

На рис. 4, в, показана трехпортовая схема «общее плечо». Благодаря третьему переключателю удастся достичь увеличения развязки между приемным и передающим каналами.

Схема на рис. 4, г, обладает наибольшим функционалом за счет дополнительных усилителей TX AMP и RX AMP, но это приводит к увеличению коэффициента шума и чрезмерному выделению тепла. ММИС представлены в табл. 6.

Сравнив характеристики МИС с представленными на рынке аттенуаторами и фазовращателями можно сделать вывод о возможности замены нескольких кристаллов на одну МИС без снижения качества. Представленные в обзоре МИС имеют характеристики, схожие с АТТ и ФВ.

Основой перспективных радиолокационных комплексов являются антенны с цифровым формированием многолучевой диаграммы направленности, которые обладают следующими преимуществами.

Замена тяжелой, нестабильной аналоговой схе-

мы диаграммообразования на высокоточную цифровую. Увеличение точности установки требуемого амплитудно-фазового распределения.

За счет повышения точности угловых измерений и гибкого формирования лучей появляется возможность осуществления формирования нуля диаграммы направленности в направлениях на помехи.

Для осуществления всего вышеперечисленного ПИМ должен осуществлять функции фильтрации и аналого-цифрового преобразования принятого сигнала и цифроаналогового преобразования передаваемого сигнала.

Таблица 6

Параметры мультифункциональных монолитных интегральных схем

Модель	Частота, ГГц	$K_{у, ПРМ}$, дБ	$K_{у, ПРД}$, дБ	$P_{вых, ПРД}$, дБм	$K_{ш}$	СКО фазы	СКО ампл.
MAMF-011015(США)	8 – 11	24	11	23	2	3	0,4
ADAR1000(США)	8 – 16	10	21	14	8	3	0,5
CGY2170YHV/C1(США)	8 – 12	6	6	12	–	4	0,5
CHC3014-99F EU(Европа)	8 – 12	13,5	25	20	5,8	2	0,3
HX0011S/SM-MF(КНР)	7 – 13	13	26	24	8	2,5	0,5
HX0003S/SM-MF(КНР)	8 – 12	5	5,5	12	–	2,5	0,5
Прогресс(РФ)	8 – 11	20	–	–	3,5	–	–
AP001D(РФ)	8 – 11,5	15	14	20	5,5	3	0,5
AP003D(РФ)	8 – 11,5	18	17	20	4,5	2	0,5

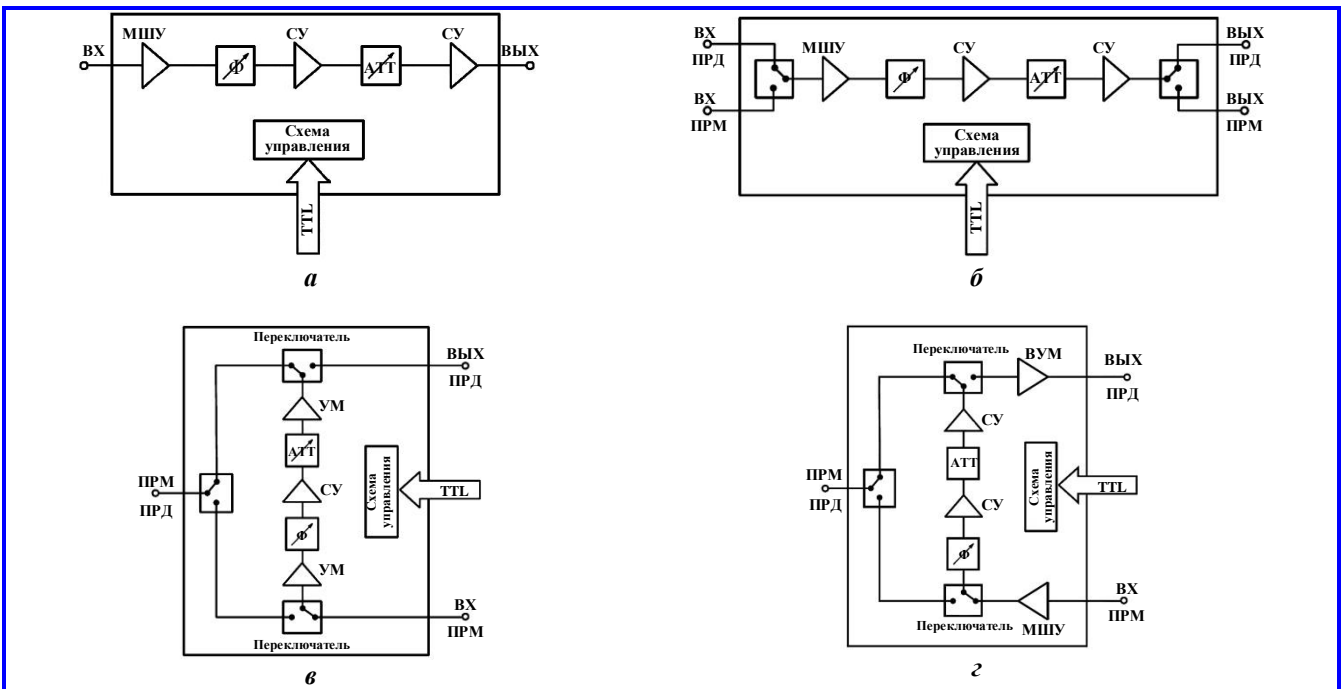


Рис. 4. Четыре основные функциональные схемы монолитных интегральных схем: а – двухпортовая; б – четырехпортовая; в – трехпортовая «общее плечо»; г – трехпортовая «частично общее плечо»

Таблица 7

Характеристики высокоскоростных аналого-цифровых преобразователей

Название	Разрешение, бит	Эффективное число разрядов	Полоса частот, ГГц	Количество каналов	Рассеиваемая мощность, Вт	Частота дискретизации, GSPS
EV12AQ600	12	8,7	6,5	1	6,6	6,4
ADC12DJ5200RF	12	8,6	8	1	4	10,4
HMCAD5831LP9BE	3	2,9	20	1	4,2	26
ADC12DJ4000RF	12	9	8	1	3,6	8
AD9207	12	8,9	8	1	4	6

Таблица 8

Микросхемы приемопередающих модулей с несколькими цифро-аналоговыми и аналого-цифровыми преобразователями в одном корпусе

Микросхема	Тип преобразования	Количество преобразователей, шт.	Частота дискретизации, GSPS	Количество, бит	Статус
AD9084	DAC	4	28	16	В разработке
	ADC	4	20	12	
AD9088	DAC	8	16	16	В разработке
	ADC	8	8	12	
AD9081	DAC	4	12	16	Опытный образец
	ADC	4	4	12	
AMC60804T	DAC	4	1	12	Доступен
	ADC	12	1	12	
LTM9011	DAC	0	–	–	Доступен
	ADC	8	0,125	14	
AD9258	DAC	0	–	–	Доступен
	ADC	2	0,125	14	

Применение аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в приемном канале ППМ положительно скажется на массогабаритных характеристиках и позволит избавиться от потерь в распределительной системе за счет передачи радиолокационной информации в цифровом виде. Высокоскоростные АЦП и их характеристики представлены в табл. 7.

В настоящее время разрабатываются чипы с несколькими цифро-аналоговыми преобразователями (ЦАП) и АЦП в одном корпусе. Это решение является перспективным для использования в ППМ АФАР. Одной из особенностей является свободная конфигурация с возможностью установки различного числа преобразователей на одном кристалле. Для проектирования ППМ антенной решетки наиболее удобно использовать парную конфигурацию АЦП (ADC) и ЦАП (DAC) для формирования приемно-передающего канала. Такие микросхемы представлены в табл. 8.

2. Российские и зарубежные приемопередающие модули X-диапазона

Вышеупомянутый АО «НПП «Исток» им. Шокина» разработал приемопередающие модули М45325 и М45327 (рис. 5, а и б). Данные модули обладают диаграммообразующим submodule с применением многослойной низкотемпературной совместно обжига-

емой керамики (Low Temperature Co-Fired Ceramic, LTCC). Благодаря применению этой технологии удалось осуществить размещение и разводку цепей питания и управления (20 – 30 шт.) в малогабаритном корпусе. Применение предварительного усилителя мощности позволило увеличить выходную мощность до 15 Вт [12], но при этом длина модуля увеличилась на 15 мм.

В ОАО «Минский НИИ Радиоматериалов» разработан и изготовлен приемопередающий модуль, изображенный на рис. 6, активной фазированной антенной решетки для радиолокатора космического базирования. СВЧ-тракт данного модуля состоит из трех submodule. Левый submodule включает в себя высокочастотный двухпозиционный переключатель поляризации и направленный ответвитель в канал калибровки и контроля работоспособности модуля. Центральный submodule осуществляет коммутацию приемного и передающего каналов, формирование заданного уровня СВЧ-мощности, а также защиту и предварительное усиление в приемном канале.

На рис. 7 изображен ППМ немецкой компании Cassidian. В качестве подложки этого модуля используется LTCC керамика с вырезами под усилитель и циркулятор. Модули данной фирмы используются как составные части АФАР CAESAR, которую устанавливают в истребители Eurofighter.

ППМ представлены в табл. 9.

Модуль нидерландской компании TNO (рис. 8) также обладает керамической подложкой и металлокерамическим корпусом, но собран на основе корпусированных интегральных схем. При многотысячных партиях использование SMD-монтажа значительно снижает итоговую стоимость модуля.

Сравнив отечественные ППМ с зарубежными, видно, что зарубежные в качестве подложки используют многослойную LTCC на всей плате, что позволяет существенно уменьшить габариты и дает возможность установки модулей в шаг решетки. Также используют корпусированные интегральные схемы с типом монтажа SMD, что значительно сокращает время сборки модулей и позволяет автоматизировать производство. Если взять во внимание, что в АФАР может использоваться несколько тысяч модулей, то можно говорить о серьезном уменьшении стоимости модулей при увеличении технологичности.

3. Контроль и калибровка

АФАР состоит из множества приемо-передающих модулей, в состав которых входят множество элементов СВЧ-тракта с неравными параметрами.

Из-за влияния различных факторов, будь то влияние внешних помех или неравномерное температурное распределение каналов АФАР, значения коэффициентов усиления, коэффициентов шума, фазового сдвига, вносимого фазовращателем, будут иметь различные значения. Это отрицательно скажется на точности определения дальности и угловых координат цели. Для минимизации влияния неоднородности каналов необходимо производить контроль и калибровку как коэффициентов усиления, так и фазовых сдвигов.

Ввод в состав схемы (см. рис. 1) [13] приемопередающего модуля дополнительных элементов, формирующих цепи взаимодействия с приемным или передающим каналом (рис. 9), позволяют решить задачу оперативного контроля за счет обработки контрольных сигналов, по состоянию которых можно получить данные об электрических параметрах.

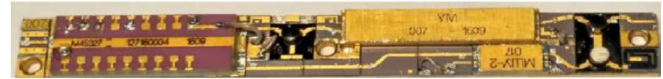
В состав схемы (см. рис. 9) также входят:

- компаратор (КОМ);
- детекторный диод (ДД);
- усилитель постоянного тока (УПТ);
- направленный ответвитель (НО).

Также при добавлении дополнительных элементов, образующих цепь положительной обратной связи (ПОС), можно осуществлять контроль коэффициента усиления приемного канала. Схема с направлением сигналов изображена на рис. 10.



а



б

Рис. 5. Приемопередающие модули АО «НПП «Исток» им. Шокина»: а – М45325; б – М45327



Рис. 6. Приемопередающий модуль ОАО «Минский НИИ Радиоматериалов»

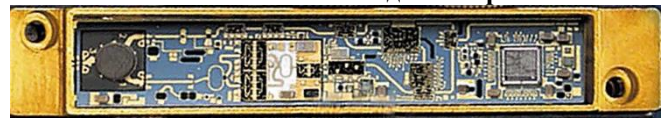


Рис. 7. Приемопередающий модуль немецкой компании Cassidian

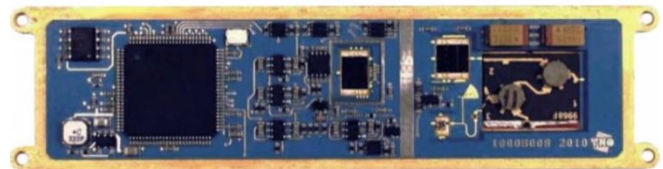


Рис. 8. Приемопередающий модуль нидерландской компании TNO

Таблица 9

Характеристика приемопередающих модулей

ППМ	Страна изготовитель	$P_{\text{вых}}$ Вт	Габариты, мм
M45325	РФ	15	17 × 85
M45327	РФ	10	16,7 × 70
TNO	Нидерланды	8	25 × 110
Cassidian	Германия	8	16 × 70
Микран	РФ	5	40 × 70
NCSIST	Тайвань	12	–
ОАО «Минский НИИ Радиоматериалов»	Беларусь	7	–

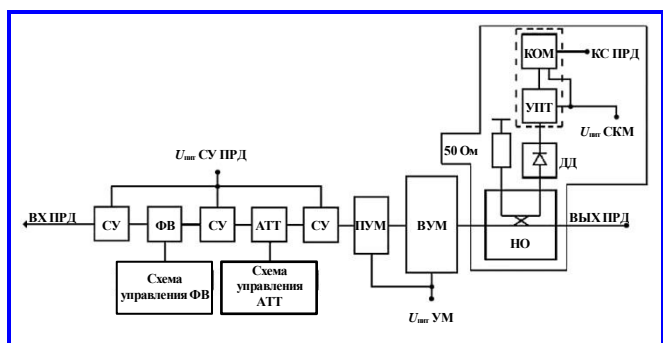


Рис. 9. Схема с системой контроля мощности передающего канала

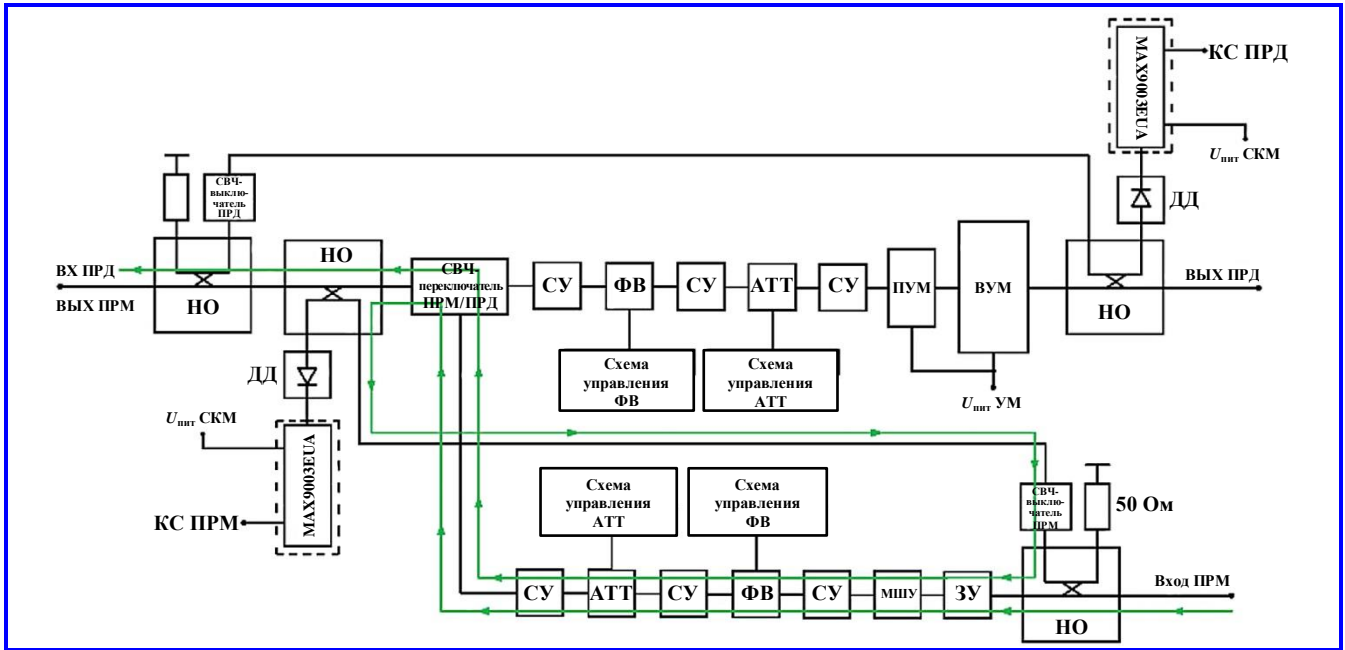


Рис. 10. Схема с системой контроля мощности передающего канала

На вход приемного канала, через направленный ответвитель приемного канала, при замыкании СВЧ-выключателя ПРМ, проникает часть СВЧ-мощности, ответвленной с СВЧ-переключателя через направленный ответвитель с системой контроля мощности. Из-за ПОС возникает самовозбуждение, которое впоследствии будет ослаблено аттенуатором. Расчет по формуле (1) позволяет вычислить K_U тракта:

$$K_{U \text{ ПРМ}} = |K_{\text{ПОС}}| + \sum R_{\text{АТТ ПРМ}}, \quad (1)$$

где $K_{U \text{ ПРМ}}$ – коэффициент усиления приемного канала; $K_{\text{ПОС}}$ – коэффициент передачи ПОС; $\sum R_{\text{АТТ ПРМ}}$ – суммарное введенное ослабление аттенуаторов приемного канала.

Если самовозбуждение не достигнуто, то есть $\Delta\varphi \neq 0$, то требуется поочередно вводить разряды фазовращателя. В случае если самовозбуждение не достигнуто, то канал является неисправным.

При использовании внутренней системы контроля и калибровки появляется необходимость разводки сигналов после усилителя в передающем канале и перед МШУ в приемном. Что делает актуальным применение многослойной технологии для всего ППМ.

Заключение

Таким образом, в статье рассмотрена современная элементная база АФАР, выпускаемая отечественными производителями, а также компаниями из США, Европы и Китая. Существующая аналого-

вая элементная база полностью охватывает X-диапазон частот. Характеристики отечественных ЦАТТ и ФВ не уступают аналогичным зарубежным. Отечественные МШУ обладают меньшей номенклатурой, но при этом достаточной вариативностью параметров. В России GaN-технология, которая обладает лучшими характеристиками по сравнению с GaAs, недостаточно развита для ее использования в X-диапазоне частот.

Сравнение отечественных и зарубежных ППМ показало недостаточную технологичность при многотысячных партиях.

Намечены пути дальнейшего развития, заключающиеся в минимизации габаритных размеров и стоимости, повышение количества МИС с высокой степенью интеграции, применение многослойной технологии изготовления плат. Рассмотрены микросхемы, объединяющие несколько АЦП и ЦАП в одном корпусе, которые являются перспективными при использовании в цифровых активных фазированных антенных решетках. А также рассмотрены практические способы реализации калибровки и контроля с целью оперативной подстройки модулей и гибкого управления их характеристиками.

Литература

1. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д. И. Воскресенского и А. И. Канащенкова. – Москва : Радиотехника, 2004. – 488 с. : ил.
2. Приемопередающие модули АФАР СВЧ-диапазона : учебное пособие / В. А. Иовдальский, А. Г. Далингаер,

- И. А. Соколов [и др.] ; под ред. А. А. Борисова. – Москва : КУРС, 2024. – 200 с.
3. Овчинникова, Е. В. Элементная база АФАР X-диапазона частот / Е. В. Овчинникова, А. Н. Рогов // Материалы Двенадцатой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». – Москва, 2024. – С. 27–28.
4. Кривцун, А. GaN МИС малошумящего усилителя X-диапазона / А. Кривцун, Д. С. Брагин, В. Д. Дмитриев. – DOI : 10.30898/1684-1719.2021.2.1 2 // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2021. – № 2.
5. Кондратенко, А. Разработка GaAs mHEMT МИС МШУ Ku-диапазона частот на основе технологического процесса компании OMMIC / А. Кондратенко // Современная электроника. – 2018. – № 3. – С. 64–67.
6. Кондратенко, А. В. Разработка GaAs МИС малошумящего усилителя X-диапазона / А. В. Кондратенко, П. С. Сорвачев // Электроника и микроэлектроника СВЧ. Сборник статей VII Всероссийской конференции. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018 – С. 68–70.
7. Asoodeh, A. A Full 360 Vector-Sum Phase Shifter With Very Low RMS Phase Error Over a Wide Bandwidth / A. Asoodeh, M. Atarodi // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2012. – Vol. 60. – No. 6. – P. 1626–1634.
8. Гугин, А. Ю. Монолитная интегральная схема управления амплитудой и фазой сигнала X-диапазона частот / А. Ю. Гугин, А. В. Кондратенко // 27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2017). Севастополь, 10 – 16 сентября 2017 г.: рефераты докладов. – Москва ; Минск ; Севастополь, 2017. – Т. 1. – С. 78–84.
9. Разработка GaN аттенюатора и фазовращателя в монолитном интегральном исполнении / А. М. Досанов, А. В. Кондратенко, Д. С. Брагин [и др.] // Научная сессия ТУСУР-2020: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 13 – 30 мая 2020 г.: в 3 частях. – Томск : В-Спектр, 2020. – Ч. 1. – С. 49–53.
10. Функциональные узлы радиотракта ППМ АФАР X-диапазона в монолитном интегральном исполнении / А. В. Кондратенко, Д. С. Брагин, А. М. Досанов [и др.] // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. (Омск, 11 авг. 2020 г.) / АО «КТРВ», АО «ЦКБА», ОмГТУ ; [отв. за вып. С. Д. Сиберт]. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2020. – С. 100–109.
11. Комплект GaAs МИС для ППМ АФАР X-диапазона частот / В. С. Арыков, А. А. Баров, А. В. Кондратенко [и др.] // 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015). Севастополь, 6 – 12 сентября 2015 г.: Материалы конференции, в 2 т. – Севастополь, 2015. – Т. 1. – С. 91–92.
12. Малогабаритный усилитель с выходной мощностью 12 Вт X-диапазона длин волн / В. А. Пчелин, А. А. Лисицын, В. Б. Трегубов [и др.] // Электроника и микроэлектроника СВЧ ; 6 Всероссийская конференция. – Санкт-Петербург : СПбГЭТУ, 2017. – С. 232–235.
13. Приемно-передающий модуль АФАР X-диапазона с внутренней калибровкой приемника и функцией проверки приемного и передающего каналов / М. С. Карасев, А. Г. Далингер, С. В. Шацкий [и др.] // Материалы конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – Санкт-Петербург, 2019. – С. 156–158.

Поступила в редакцию 14.10.2024

*Елена Викторовна Овчинникова, доктор технических наук, доцент,
т. +7 (915) 323-40-36, e-mail: oea8888@gmail.com.
(Московский авиационный институт; МГТУ им. Н. Э. Баумана).*

*Артеми́й Николаевич Рогов, аспирант, т. +7 (910) 435-18-13; e-mail: artem14786@gmail.com.
(Московский авиационный институт).*

COMPONENTS OF ACTIVE PHASED ANTENNA ARRAYS

E. V. Ovchinnikova, A. N. Rogov

The article provides an overview of the element base for x-band transmit-receive modules active phased array radar. The products (amplifiers, attenuators, phase shifters, low noise amplifiers) of western, eastern and local microwave electronics manufacturers has reviewed in order to compare their characteristics. Select items with functionality that expands calibration capabilities. The amplifiers, based on gallium nitride and gallium arsenide, has reviewed and compared. The application of multifunctional monolithic microwave integrated circuits is considered. An overview of high-speed ADCs, as well as chips combining several ADCs and DACs in one package, has been made. Local and foreign T/R modules are considered. An overview of the MMIC is made and the possibilities of their application at the current stage of the development of the element base are considered. Schematic solutions of internal calibration of transmitting and receiving channels are shown. The trends in the modernization and creation of new generation modules are described.

Key words: component base, X-band, active electronically scanned array, transmit/receive module, multifunction microwave monolithic integrated circuits, parameter control, calibration, analog to digital converter, amplifier, low noise amplifier, phase shifter, attenuator.

References

- Active Phased Antenna Array / Edited by D. I. Voskresensky and A. I. Kanashchenkova. – Moscow : Radiotekhnika, 2004. – 488 p. : il.
- APAA receiving and transmitting modules of microwave frequency range : study book / V. A. Iovdalskiy, A. G. Dalin-gaer, I. A. Sokolov [et al.] ; edited by A. A. Borisov. – Moscow : KURS, 2024. – 200 p.

3. Ovchinnikova, E. V. X-band APAA components / E. V. Ovchinnikova, A. N. Rogov // Proceedings of 12th International Scientific Conference «Critical Issues in Designing of ERS Systems». – Moscow, 2024. – P 27–28.
4. Krivtsun, A. GaN monolithic integrated circuit of X-band low noise amplifier / A. Krivtsun, D. S. Bragin, V. D. Dmitriev. – DOI : 10.30898/1684-1719.2021.2.1 2 // Journal of Radio Electronics [Electronic journal]. – 2021. – No. 2.
5. Kondratenko, A. Development of GaAs mHEMT monolithic integrated circuit of Ku-band low noise amplifier on the basis of OMMIC company technological process. / A. Kondratenko // Modern Electronics. – 2018. – No. 3. – P. 64–67.
6. Kondratenko, A. V. Development of GaAs monolithic integrated circuit of X-band low noise amplifier / A. V. Kondratenko, P. S. Sorvachev // Microwave Electronics and Microelectronics, Collection of Proceedings of VII International Conference. – Saint-Petersburg : Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» Publishing House, 2018 – P. 68–70.
7. Asoodeh, A. A full 360 Vector-Sum Phase Shifter With Very Low RMS Phase Error Over a Wide Bandwidth / A. Asoodeh, M. Atarodi // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2012. – Vol. 60. – No. 6. – P. 1626–1634.
8. Gugin, A. Yu. Monolithic integral circuit of amplitude and X-band signal phase control / A. U. Gugin, A. V. Kondratenko // 27th International Crimea Conference «Microwave and telecommunication technology» (CriMiCo 2017). Sevastopol, 10–16 September, 2017 : Abstracts of Reports. – Moscow ; Minsk ; Sevastopol, 2017. – Vol. 1 – P. 78–84.
9. Development of GaN attenuator and phase shifter in monolithic integral version / A. M. Dosanov, A. V. Kondratenko, D. S. Bragin [et al.]. TUSUR-2020 Scientific Session: Proceedings of the International scientific conference for Bachelor, Master and PhD students, Tomsk, 13–30 May, 2020 : in 3 parts. – Tomsk : V-Spectr, 2020. – P. 1 – P. 49–53.
10. Functional nodes of X-band APAA receive and transmitting modules radio link in monolithic integral version / A. V. Kondratenko, D. S. Bragin, A. M. Dosanov [et al.] // Sharing experiences in the area of creation of ultra-wide band radio electronic systems: Proceedings of VIII All-Russian Scientific and Technical Conference (Omsk, 11 August, 2020) / JSC KTRV, JSC CKBA, OmSTU; [responsible for publishing: S. D. Sibert]. – Omsk : OmSTU Publishing House, 2020. – P. 100–109.
11. Set of GaAs monolithic integrated circuit for X-band APAA receive and transmitting module / V. S. Arikov, A. V. Kondratenko [et al.] // 25th International Crimean Conference «Microwave and telecommunication technology» (CriMiCo 2015). – Sevastopol, 6–12 September, 2015 : Proceedings of conference, in 2 volumes. – Sevastopol, 2015. – Vol. 1. – P. 91–92.
12. X-band small-size amplifier with 12 W output power / V. A. Pchelin, A. A. Lisitsin, V. B. Tregubov [et al.] // Microwave Electronics and Microelectronics; 6th All-Russian Conference. – Saint-Petersburg : Saint Petersburg Electrotechnical University, 2017. – P. 232–235.
13. X-band APAA receive and transmitting module with internal calibration of receiver and function for checking the receive and transmitting channel / M. S. Karasev, A. G. Dalinger, S. V. Shatskiy [et al.] // Proceeding of Conference «Microwave Electronics and Microelectronics». – Saint-Petersburg, 2019. – P. 156–158.

*Elena Viktorovna Ovchinnikova, doctor of engineering sciences, associate professor,
t. +7 (915) 323-40-36, e-mail: oea8888@gmail.com.*

*Artemiy Nikolaevich Rogov, postgraduate, t. +7 (910) 435-18-13, e-mail: artem14786@gmail.com.
(Moscow Aviation Institute (National Research University)).*