

**Ефимов А.Г., Тимошенко В.П.,
Хлыбов А.И., Родионов Д.В**

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Выбор элементной базы для приемо-передающего модуля АФАР X-диапазона

Рассмотрены варианты построения приемо-передающего модуля АФАР. Представлены результаты моделирования кристалла управления амплитудой и фазой СВЧ сигнала. Показано, что использование SiGe технологии может снизить стоимость модуля АФАР без ухудшения технических параметров. Приведены результаты экспериментальных исследований усилителей мощности трех типов. Даны рекомендации по выбору элементной базы модулей АФАР различного назначения.

Ключевые слова: СВЧ, АФАР, фазовращатель, аттенюатор, устройство управления, маломощный усилитель, защитное устройство, усилитель мощности.

Современные радиолокационные системы нового поколения, а также радиолокаторы космического базирования используют активные фазированные антенные решетки (АФАР) выполненные по модульному принципу с целью снижения массогабаритных характеристик и возможности выполнения сложных тактико-технических системных требований. В связи с этим актуальной становится задача повышения интеграции и многофункциональности узлов АФАР.

В данной работе рассмотрены варианты выбора активных СВЧ компонентов на примере приемо-передающего модуля (ППМ) АФАР X-диапазона. Модуль состоит из канала передачи и канала приема. Для управления амплитудой в приемном и передающем каналах служат аттенюаторы (АТТ), а для управления фазой – многоуровневые фазовращатели (ФВ). Для перевода последовательного кода управления в параллельный код служат преобразователи кодов (ПК) [1-2].

Усилитель мощности (УМ) определяет уровень выходной мощности на выходе модуля в режиме передачи. Для компенсации потерь в управляющих устройствах и обеспечения требуемого уровня входной мощности для УМ служит предварительный усилитель мощности (ПУМ). Чувствительность приемного тракта АФАР определяется параметрами маломощного усилителя (МШУ) с учетом потерь в защитном устройстве (ЗУ), которое ограничивает уровень мощности на входе маломощного усилителя (МШУ).

Необходимость защитного устройства на входе приемного тракта определяется назначением системы, так в случае отсутствия мощного отраженного сигнала и развязки выходного циркулятора более 30 дБ ЗУ может не применяться. В остальных случаях для защиты МШУ от перегрузки по входу желательно установка такого устройства. Уровень просачиваемой мощности на выходе ЗУ при входной мощности более 5 Вт не превышает 100 мВт при потерях в штатном режиме при малом уровне сигнала не более 0,5...1,0 дБ.

Выбор схемы МШУ определяется требованиями по коэффициенту шума и динамическому диапазону входного сигнала. Так арсенид-галлиевые усилители в монолитном исполнении, построенные по схеме с автосмещением, обеспечивают коэффициент шума 1,5...2,0 дБ и гарантировано выдерживают непрерывную входную мощность 10 мВт или не менее 100 мВт в импульсном режиме. Традиционная схема

усилителя с двумя питаниями на основе РНЕМТ технологии позволяет получать коэффициент шума порядка 1,0 дБ, но менее устойчива к перегрузкам по входу, что требует установку защитного устройства с увеличением коэффициента шума.

Управляющие устройства, как правило, реализуются на арсениде галлия в монолитном исполнении с полевым транзистором в пассивном включении в качестве переключающего элемента, что позволяет минимизировать потребление по цепям управления. Начальные потери аттенюатора и фазовращателя могут достигать 8 дБ и компенсируются промежуточными усилителями. Необходимо учитывать, что типовое время переключения одиночного разряда фазовращателя или аттенюатора составляет 50 нс, а длительность управляющей кодовой последовательности не менее 550 нс. Для получения более высокого быстродействия необходимо осуществлять управление модулем в параллельном коде.

Учитывая поочередную работу ППМ в приемном или передающем режимах, возможно управлять амплитудой и фазой с помощью универсального управляющего кристалла (Core chip). В состав кристалла кроме фазовращателя и аттенюатора входят компенсирующие усилители и переключатели прием-передача.

Следует отметить, что невозможно реализовать универсальный ППМ. Для каждого конкретного случая определяются состав модуля, конструктивные и технические требования. Различаются также условия эксплуатации и системы управления и питания.

Авторы также провели оценку возможности реализации универсального управляющего кристалла для управления амплитудой и фазой СВЧ сигнала на основе кремниевой технологии с использованием гетеропереходных биполярных транзисторов (ГБТ). При этом уровень линейной выходной мощности для усилителей, изготовленных по данной технологии, не превышает +5дБм [3-4]. Кристалл должен включать в себя следующие блоки: аттенюатор, фазовращатель, переключатели прием/передача, компенсирующие усилители, схему управления с параллельным интерфейсом с ТТЛ уровнями. Учитывая высокую верхнюю граничную частоту гетеро-биполярных транзисторов, проектирование кристалла целесообразно выполнить в рамках SiGe БиКМОП технологии. В качестве схемотехнической базы для высокочастотных блоков обработки сигнала данных выбраны дифференциальные переключатели тока со стабилизированным опорным напряжением, а для низкочастотных управляющих блоков – КМОП логические вентили.

Фазовращатель моделировался с использованием системы Cadence в различных условиях работы в диапазоне частот от 9,1 ГГц до 10,3 ГГц. Абсолютные и относительные сдвиги фаз в трех первых ступенях фазовращателя на частоте 10 ГГц и при двух предельных температурах 0°C и +125°C приведены в Табл.1.

Таблица 1. Сдвиги фаз в усилительных ключах

Сдвиг фазы, градусов	Ключ 1		Ключ 2		Ключ 3	
	при 0°C	при 125°C	при 0°C	при 125°C	при 0°C	при 125°C
В верхнем пути (HPF)	-40.8	-48.9	-15.5	-24.2	5.4	-4.0
В нижнем пути (LPF)	-63.2	-71.3	-59.3	-67.8	-85.5	-94.2
Разностный	22.4	22.4	43.8	43.6	90.9	90.2

Аттенюатор моделировался с использованием системы Cadence в различных условиях работы в диапазоне частот от 0 до 12 ГГц. Диапазон регулировки коэффициента передачи составил от 0 до 24 дБ при токе потребления около 35 мА.

Использование элементной базы, изготовленной по различным технологиям, позволяет реализовать приемо-передающий модуль с оптимальными техническими и

ценовыми характеристиками для любой радиолокационной системы. Проведенный анализ показывает, что универсальный управляющий кристалл, реализованный на основе кремниевой технологии с использованием гетеропереходных биполярных транзисторов, по основным параметрам не уступает УУК, реализованным по арсенид-галлиевой технологии.

Усилители мощности в приемо-передающих модулях обеспечивают уровень излучаемой мощности в радиолокационных комплексах с АФАР, что определяет дальность обнаружения целей. Характеристики усилителя мощности определяют основные массогабаритные параметры ППМ, уровень потребляемой мощности и тепловыделения. В зависимости от назначения радиолокационного комплекса уровень выходной мощности каждого канала АФАР лежит в пределах от 1 до 100 Вт. В диапазоне 8-12 ГГц в ППМ на полупроводниковых элементах, как правило, требуется выходная мощность 5...20 Вт. При данной мощности наибольшее распространение получили арсенид-галлиевые транзисторы, в том числе корпусированные внутрисогласованные транзисторы (Toshiba, Sumitomo). Последнее время широко представлены на рынке многокаскадные усилители мощности в интегральном исполнении, реализованные по PHEMT технологии. Наиболее известны продукты фирм Mimix, теперь M/A-Com (США), METDA (Китай) и других производителей. Усилители мощности фирмы UMS (Франция), изготовленные по технологии PPH25X, сертифицированы для космического применения.

В данной работе представлены результаты исследования параметров кристаллов усилителей мощности фирмы Mimix XP1006 и Vectra Wave VWA5000042 (Франция). Оба кристалла имеют 3 каскада, схожую схемотехническую компоновку и близкие размеры. Смонтированные на металлическое основание, покрытое гальваническим золотом, кристаллы закрепляются в контактирующем устройстве с радиатором и вентилятором для обеспечения стабильного теплового режима. На контактирующем устройстве рядом с усилителем закреплен датчик температуры.

Частота измерений определяется высокочастотным генератором, работающим в непрерывном режиме. Импульсный режим задается генератором импульсов, который управляет модулятором питания стокового напряжения. Структурная схема исследования приведена на рис. 1.

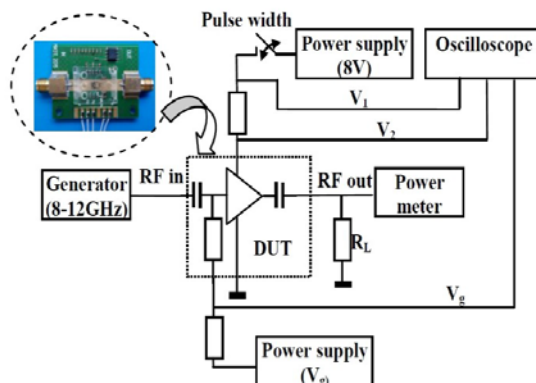


Рис.1. Схема измерения параметров усилителя мощности

Зависимость выходной мощности в диапазоне частот 8...12 ГГц для двух типов усилителей, при длительности импульса 10 мкс и скважности 10%, представлена на рис. 2.

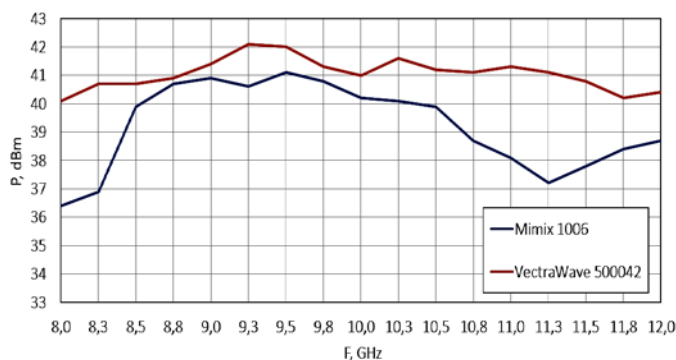


Рис. 2. Зависимость выходной мощности от частоты для кристаллов двух типов

Кристалл второго типа при меньшем напряжении питания 8,5 В обеспечивает выходную мощность более 41 дБм во всей полосе частот при большем коэффициенте полезного действия (23% против 17%) и коэффициенте усиления не менее 24 дБ.

В работе представлены результаты исследования влияния скважности импульсов и длительности импульса на уровень выходной мощности и форму выходного импульса. Измерения проводились при комнатной температуре $T=25^{\circ}\text{C}$ на частоте 10 ГГц при входной мощности $P_{in} = 18$ дБм. Значения уровня выходной мощности и температура посадочного места усилителя для различной скважности приведены в таблице 2.

Таблица 2 Уровень выходного сигнала в зависимости от скважности

Скважность, %	Мощность, дБм	Температура, $^{\circ}\text{C}$
6,57	40,37	26,1
10	40,33	26,1
20	40,12	27,9
30	39,97	29,8

При скважности более 10% наблюдается снижение уровня выходной мощности и возрастание температуры посадочного места кристалла усилителя за счет разогрева кристалла. Значения уровня выходной мощности при различной длительности импульса приведены в Таблице 3.

Таблица 3 Выходная мощность и снижение выходной мощности в зависимости от длительности импульса

Длительность импульса, мкс	Мощность, дБм	Спад, дБм
10	40,33	0,13
100	40,22	0,30
1000	40,11	0,59

С увеличением длительности импульса спад уровня мощности в течение импульса становится более значительным за счет напряженного теплового режима, что необходимо учитывать для обеспечения надежной работы проектируемого усилителя мощности.

Также проведены исследования усилителя мощности фирмы Transcom TC1075G. В отличие от большинства интегральных усилителей данный кристалл имеет два каскада усиления и меньшую рабочую полосу 9,2...10,2 ГГц [5]. Зависимость выходной мощности от напряжения на затворе приведена на рис.3.

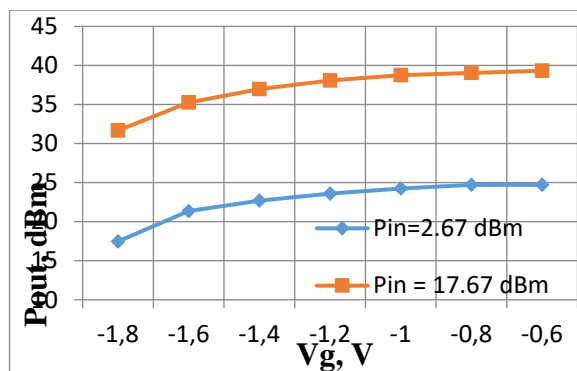


Рис. 3. Зависимость выходной мощности от напряжения смещения

При выборе элементной базы для приемо-передающего модуля X-диапазона МШУ целесообразно реализовывать в интегральном исполнении на арсениде галлия. Предпочтительно использовать схему МШУ с автосмещением с однополярным источником питания. Защитное устройство на входе приемного тракта устанавливается по мере необходимости. Для управления фазой и амплитудой в приемном и передающем каналах возможно использование универсального управляющего кристалла, выполненного по кремний-германиевой технологии. В данной реализации УУК не уступает арсенид-галлиевым схемным решениям.

Усилитель мощности до уровня 10...12 Вт реализуется на кристалле арсенида галлия в виде ИС. Не все УУК обеспечивают требуемый уровень мощности на входе УМ, тогда требуется предварительный усилитель, как и в случае УМ типа TC1075G фирмы Transcom, где двухкаскадная схема не обеспечивает требуемый коэффициент усиления. Суммирование сигналов от двух кристаллов позволяет довести уровень выходной мощности до 15...18 Вт. Уровни мощности выше 20 Вт достижимы при использовании усилителей на нитриде галлия.

Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РФ в рамках исследований по заданию №16.12150.2018/10.11.

Библиографический список

1. Приемо-передающие модули АФАР сайт компании Микран <http://www.micran.ru/productions/svch/aesa/> (дата обращения 09.10.2014)
2. Э.А.Семёнов, А.В.Бутерин, А.В.Иванов, А.В.Езопов ГРУППОВОЙ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИЙ МОДУЛЬ АФАР X-ДИАПАЗОНА ДЛЯ БОРТОВЫХ РЛС НПЦ «Алмаз-Фазотрон», г.Саратов Материалы IX научно-технической конференции ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА. СЛОЖНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ БЛОКИ РЭА 01-03 декабря 2010 г. г. Звенигород
3. Тимошенко В.П., Ефимов А.Г. Проектирование SiGe СВЧ –устройств управления для приемопередающего модуля.//Международный форум «Микроэлектроника -2017» 02-07 октября 2017 Алушта, тезисы докладов с. 377-378.
4. Тимошенко В.П., Ефимов А.Г., Особенности проектирования устройств управления модулем СВЧ АФАР с использованием современных полупроводниковых технологий//Электроника и микроэлектроника СВЧ. Сборник статей Всероссийской конференции. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017, с.639.
5. V.Timoshenkov, Y. Chaplgin, A. Khlybov, D. Rodionov, A. Efimov X - band power amplifier for Active Electronically Scanned Array Antenna, Proceedings of the 2018 IEEE Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2018 ElConRus), 29 Jan 1Feb. 1-3, 2018, DOI [10.1109/ElConRus.2018.8317343](https://doi.org/10.1109/ElConRus.2018.8317343)