

ШЕСТИКАНАЛЬНЫЙ ППМ ДЛЯ АФАР X-ДИАПАЗОНА: ПЕРЕДАЮЩИЙ ТРАКТ

© К. А. Иванов, А. А. Осиповский, Ал. В. Редька, Ан. В. Редька, А. В. Тихомиров

ОАО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

В статье представлены результаты разработки и изготовления шестиканального приёмо-передающего модуля для АФАР X-диапазона. Приводятся результаты измерений основных параметров передающего канала ППМ, его конструкция, основные технические характеристики, результаты теплового моделирования работы ППМ в импульсном режиме. Исследованы основные факторы, влияющие на нелинейность ФЧХ в передающем канале, разброс фаз между передающими каналами по ансамблю.

Ключевые слова: АФАР, приёмо-передающий модуль, передающий канал, усилитель мощности, GaN

Сведения об авторах: Иванов Кирилл Андреевич, mail6@pulsarnpp.ru; Осиповский Алексей Алексеевич, alexos@pulsarnpp.ru; Редька Алексей Владимирович, аспирант, redka_av@pulsarnpp.ru; Редька Андрей Владимирович, аспирант, redka_av@pulsarnpp.ru; Тихомиров Александр Владимирович, tikhomirov @pulsarnpp.ru

SIX-CHANNEL TRM FOR X-BAND APAA: TRANSMITTING CHANNEL

K. A. Ivanov, A. A. Osipovsky, Al. V. Redka, An. V. Redka, A. V. Tikhomirov

JCS «S&PE «Pulsar», 105187, Moscow, Okružhnoy proezd, 27

The results of design and fabrication of the six-channel X-band T/R-module for Active phased antenna arrays are presented in the article. The results of measurements of the main parameters of the transmitting channel, its design, main technical characteristics and the results of thermal performance simulation in a pulsed mode are given. The main factors affecting the linearity of the phase response in the transmitting channel, the variation of phase between transmitting channels in the ensemble are investigated.

Keywords: APAA, T/R-module, transmitting channel, power amplifier, GaN

Data of authors: Ivanov Kirill Andreevich, mail6@pulsarnpp.ru; Osipovsky Aleksey Alekseevich, alexos@pulsarnpp.ru; Redka Aleksey Vladimirovich, postgraduate, redka_av@pulsarnpp.ru; Redka Andrey Vladimirovich, postgraduate, redka_av@pulsarnpp.ru; Tikhomirov Aleksandr Vladimirovich, tikhomirov @pulsarnpp.ru

Введение

Приёмо-передающий модуль (ППМ) – это основа пространственного канала обработки сигнала в активной фазированной антенной решётке (АФАР). В его состав входит активный элемент – усилитель, который делает это устройство электродинамически невзаимным. Поэтому для обеспечения возможности работы устройства как на

приём, так и на передачу в нём разделяют передающий и приёмный каналы. Разделение осуществляется либо коммутатором, либо циркулятором.

Передающий канал ППМ потребляет наибольшую часть первичной мощности и требует наибольшего охлаждения. В его состав обязательно входят дискретные фазовращатель и аттенюатор, предназначенные для формирования луча

антенны и проведения различных калибровок и юстировок системы в целом.

На протяжении многих лет ОАО «Научно-производственное предприятие «Пульсар» разрабатывает ППМ различных диапазонов и применений. В качестве активной элементной базы в X-диапазоне используются, как правило, широкозонные материалы [1]. Примеры использования широкозонных материалов в ППМ для АФАР отражены в [2-5].

Результаты работы, описанные в представляемом материале, являются продолжением исследований ППМ [6] и необходимым дополнением к описанию особенностей проектирования и изготовления приёмного тракта многоканального приемо-передающего модуля [7].

Основная задача разработки – обеспечение электрических параметров передающих частей ППМ в заданных условиях внешних воздействующих факторов, создание методик измерения и настройки, соз-

дание методов диагностики и выявление в процессе изготовления схмотехнических недостатков. В целях последующей постановки изделия в производство проведена отработка на 18 модулях ППМ (108 передающих каналов) в комплексе с приёмными каналами, платой управления и обмена данными, проведена корректировка электрической схемы.

Основные характеристики модуля ППМ

Функциональная схема разрабатываемого СВЧ модуля представлена на рис. 1.

В состав каждого из 6 каналов ППМ входят:

- усилитель излучаемого сигнала;
- дискретный фазовращатель в передающем тракте;
- дискретный аттенуатор в передающем тракте;
- ферритовый циркулятор для объединения передающего и приёмного каналов;

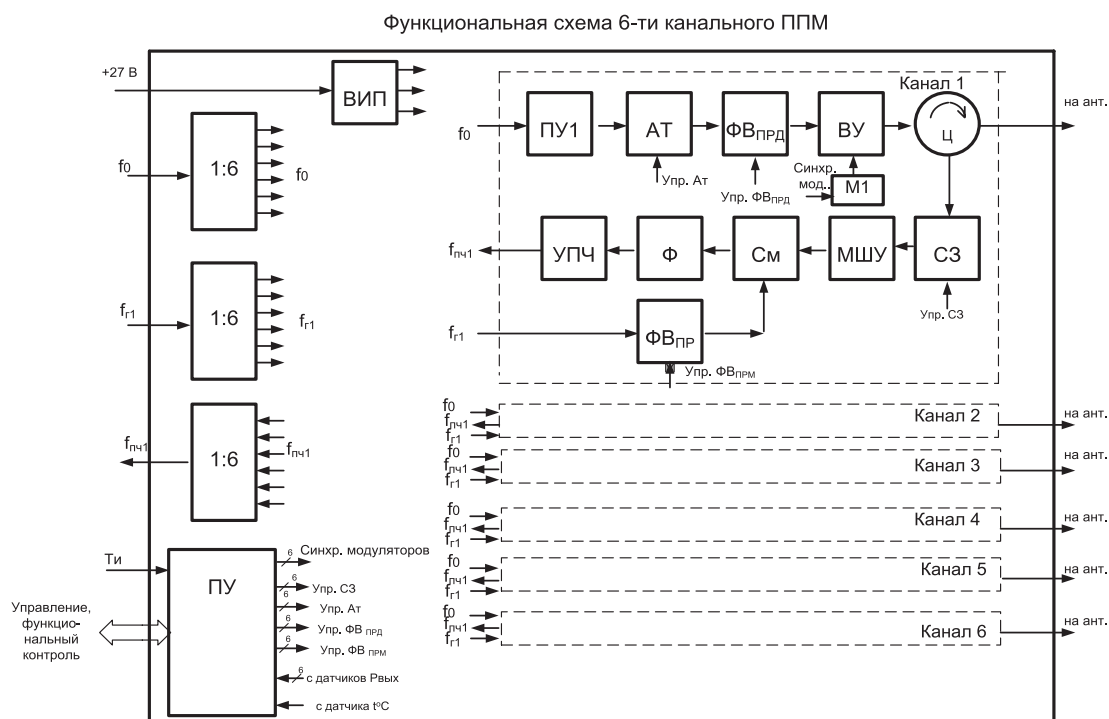


Рис. 1

Функциональная схема шестиканального ППМ:

ВИП – вторичный источник питания; **ПУ1** – предварительный усилитель; **АТ** – дискретный аттенуатор; **ФВ_{прд}**, **ФВ_{пр}** – дискретные фазовращатели; **ВУ** – выходной усилитель;

Ц – циркулятор; **УПЧ** – усилитель промежуточной частоты; **Ф** – полосовой фильтр;

СМ – смеситель; **М1** – модулятор; **МШУ** – малошумящий усилитель; **СЗ** – схема защиты;

ПУ – плата управления и функционального контроля

- импульсный модулятор излучаемого сигнала;
- ключ поглощающего типа на входе передающего тракта;
- схема защиты МШУ приёмного канала;
- маломощный усилитель принимаемого сигнала;
- преобразователь принимаемого сигнала на первую промежуточную частоту;
- дискретный фазовращатель в тракте гетеродина преобразователя;
- фильтр промежуточной частоты;
- дискретный аттенюатор в тракте промежуточной частоты;
- усилитель промежуточной частоты;
- ключ поглощающего типа на выходе тракта промежуточной частоты.

Также в состав модуля входит система делителей основного сигнала и сигнала гетеродина на 6 приёмо-передающих каналах и сумматоры приёмных каналов.

Охлаждение модуля жидкостное. Габаритные размеры модуля 285x150x58 мм, масса 4,6 кг.

Конструктивно шестиканальный ППМ представляет собой два трёхканальных модуля, соединённых между собой радиатором охлаждения [6, 7].

Основные характеристики модуля представлены в табл. 1.

Управление фазой и амплитудой СВЧ сигнала осуществляется в каждом канале отдельно. Для этого разработана плата управления, включающая в свой состав

программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС). Связь с ППМ осуществляется с использованием низковольтной дифференциальной передачи сигналов (LVDS) согласно стандарту TIA/EIA-644-A. Для связи используются две дифференциальные пары проводников: одна на передачу данных к ППМ, другая на приём от ППМ.

Обмен данными осуществляется в асинхронном режиме. Длительность однобитового интервала составляет 400 нс, что соответствует скорости передачи 2,5 Мбит/с. Информационный пакет состояний всех 6 приёмо-передающих каналов передаётся, принимается и устанавливается за время между импульсами модуляции.

Структурная схема приёмо-передающего канала ППМ

Блок-схема приёмо-передающего канала ППМ приведена на рис. 2.

Каждый канал ППМ включает в себя приёмный и передающий тракты. В состав приёмного канала ППМ входят: циркулятор, устройство защиты, маломощный усилитель (МШУ) с полосно-пропускающим фильтром (ППФ), вентиль, смеситель, усилитель промежуточной частоты.

Особенностью схемного решения приёмо-передающего канала является использование одного фазовращателя и в приёмном, и в передающем тракте. Часть передающего тракта ППМ является в этом случае предварительным усилителем сигнала гетеродина для приёмного канала,

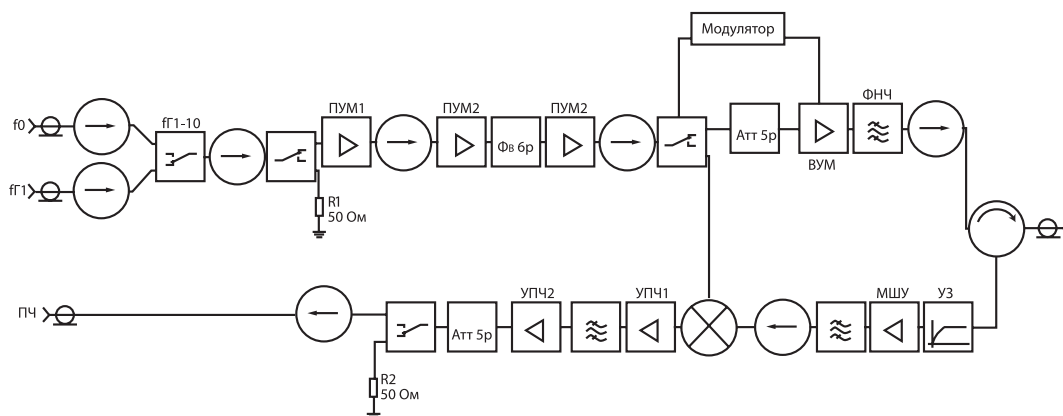


Рис. 2
Блок-схема канала ППМ

Таблица 1

Основные характеристики ППМ

Наименование параметра, единица измерения (режим измерения)	Буквенное обозначение параметра	Норма		
		Не менее	Номинал	Не более
Диапазон рабочих частот, ГГц	$\Delta f_{РАБ}$	8.7		9.0
Выходная импульсная мощность, Вт	$P_{ВЫХ.ИМП}$	4	–	–
Неравномерность мощности в рабочей полосе частот, дБ	$\Delta P_{ВЫХ.ИМП}$	–	–	2.0
Разброс выходных мощностей между каналами	%	–	–	10
Параметры выходного СВЧ сигнала:				
– длительность импульса, мс	$\tau_{И}$	0.1	–	20
– скважность	Q	–	2	–
– длительность фронтов, мкс	$t_{ФР}$	–	–	1
– спад вершины импульса, дБ	ΔP	–	–	0.5
Коэффициент шума приёмного канала, дБ		–	–	3.5
Коэффициент передачи приёмного канала, дБ		20	–	–
Неравномерность АЧХ приёмного канала, дБ	$\Delta K_{УР}$	–	–	2.0
Величина IP3 приёмного канала, дБм	$IP3_{ПРМ}$	22	–	–
Промежуточная частота, ГГц	$f_{ПЧ}$	–	1.3	–
Нелинейность ФЧХ в приёмном и передающем каналах, градусы	$\Delta \Phi_{ПРД}$	–	–	± 10
Разброс фаз между передаю- щими и приемными каналами (соответственно), градусы		–	–	± 10

то есть управление фазой принимаемого сигнала осуществляется путём изменения фазовых состояний сигнала гетеродина. Выбор такой конструкции приёмного тракта позволил существенно уменьшить габариты как приемо-передающего канала, так и ППМ в целом, а также уменьшить количество цепей управления внутри модуля. Это, в свою очередь, наложило на каскад усилителя предварительного передатчика определённые требования, такие

как расширение полосы рабочих частот, ужесточение требований к неравномерности коэффициента усиления как в диапазоне рабочих частот передатчика, так и в диапазоне частот гетеродина приёмника.

Предварительный усилитель мощности приемо-передающего канала

Особенностью построения приемо-передающего канала является то, что предварительный усилитель мощности (ПУМ) вы-

полняет свою функцию как для передающего тракта, так и для канала приёма (используется в качестве предварительного усилителя сигнала гетеродина). В связи с этим к этому узлу предъявляются особые требования:

1. Усилитель должен работать в диапазоне рабочих частот передатчика 8,5-9,0 ГГц и в диапазоне частот гетеродина приёмника 7,2-7,7 ГГц.

2. Неравномерность коэффициента передачи в обоих частотных диапазонах должна быть не более $\pm 0,5$ дБ.

3. В предварительном усилителе мощности должен быть установлен 6-ти разрядный фазовращатель, предназначенный для изменения фазовых состояний как в приёмном, так и в передающем тракте.

Результатом проектирования стала гибридная интегральная схема двухкаскадного ПУМ на основе нитридгаллиевых транзисторов (рис. 3).

ПУМ включает в себя два каскада усиления с отдельным питанием и управляемый цифровой фазовращатель для изменения фазы усиливаемого СВЧ сигнала. Для компенсации начальных потерь фазовращателя и усиления входного сигнала используются GaN транзисторы с максимальной выходной мощностью 6 Вт и коэффициентом усиления не менее 12 дБ. Усилитель мощности обладает коэффициентом усиления не менее 20 дБ в полосе частот 7,1-9,1 ГГц. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ГИС ПУМ приведена на рис. 4.

Особенностью работы полученного усилителя является также то, что корректировка АЧХ в передающем тракте отдельно не представляется возможной, так как это неминуемо приводит к искажению как амплитудной, так и фазо-частотной характеристики (ФЧХ) приёмного канала. То же самое при отдельной корректировке приёмного канала – искажение амплитудной и фазо-частотной характеристик передающего канала.

Таким образом, разработанные усилители мощности после предварительной настройки и установки в приёмно-передающий канал не подвергались какому-либо дополнительному согласованию в тракте. Для

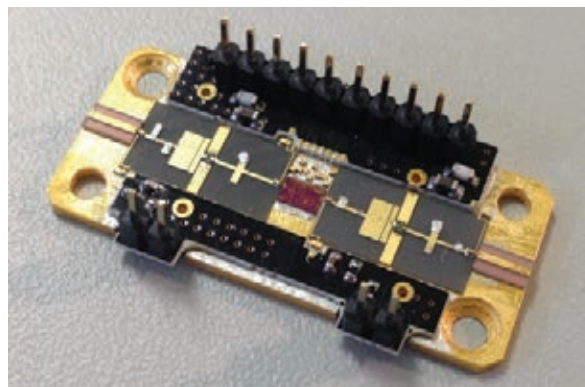


Рис. 3

Внешний вид ГИС ПУМ с 6-ти разрядным фазовращателем

стабильной работы полученного усилителя и для развязки каскадов в тракте на входе и выходе ПУМа установлены развязывающие микрополосковые вентили.

Выходной усилитель мощности ППМ передатчика

Основными элементами выходного усилителя мощности (ВУМ) передатчика ППМ стали нитридгаллиевые транзисторы с выходной мощностью $P_{\text{вых.}} = 6$ Вт. Было принято решение спроектировать ВУМ, который обеспечивал бы не только заданный уровень выходной мощности канала, но и позволил бы получить максимальный коэффициент полезного действия ППМ.

В результате спроектирована ГИС 2-х каскадного усилителя мощности, с двумя параллельно стоящими транзисторами в выходном каскаде (рис. 5).

Разработанный усилитель мощности позволил не только добиться заданных характеристик ППМ, но и обеспечить необходимое подавление на второй и третьей гармониках за счёт пятизвенного фильтра низких частот.

Немаловажным является наличие в схеме подачи питания ВУМ последовательных сопротивлений $R = 20 \dots 40$ Ом в затворных цепях каждого нитридгаллиевого транзистора. Как показали исследования, отсутствие сопротивлений приводит к неустойчивой работе ВУМ и его самовозбуждению.

Полученный таким образом выходной усилитель мощности обладает следующими характеристиками:

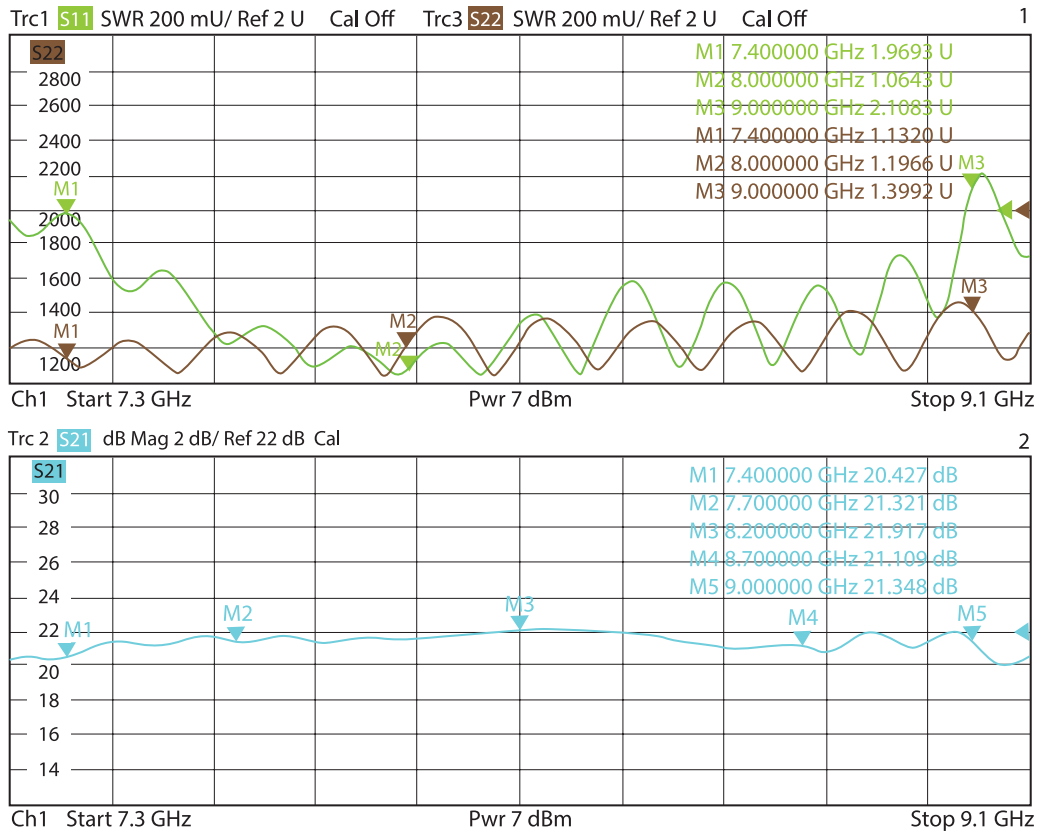


Рис. 4

АЧХ ГИС ПУМ с цифровым фазовращателем

- полоса рабочих частот 8,7-9,0 ГГц;
- коэффициент усиления в рабочей полосе частот не менее 18 дБ;
- выходная мощность не менее 8 Вт при компрессии коэффициента усиления 1 дБ;
- коэффициент полезного действия не менее 35 %.

Измерение фазо-частотных характеристик передающих каналов

Одним из основных требований, предъявляемых к передающему каналу ППМ, является нелинейность ФЧХ в рабочей полосе частот, установленная на уровне не более $\pm 5^\circ$.

В ходе первоначальных исследований ФЧХ передающих каналов ППМ по ансамблю были получены следующие результаты: 70 % модулей укладывались в заданный параметр, а 30 % выходили за его пределы с большим превышением.

При детальном рассмотрении выходных каскадов модулей было установлено, что в 30 % модулей сопротивление в цепях подачи питания затворов СВЧ транзисторов оказалось замкнуто. Это спровоцировало появление области неустойчивой работы СВЧ транзисторов на низких частотах (менее 10 МГц), что привело к искажению фазо-частотной характеристики в диапазоне рабочих частот. Пример искажения ФЧХ передающего канала приведён на рис. 6.

После восстановления резисторов фазо-частотные характеристики были измерены заново. Все передающие каналы ППМ уложились в заданный коридор параметров по нелинейности ФЧХ.

После этого был измерен разброс фаз между каналами по ансамблю модулей. Для корректировки фазы был использован цифровой фазовращатель, установленный в каждом канале передатчика. Для этого была проведена индивидуальная корректировка начальной фазы каждого пере-

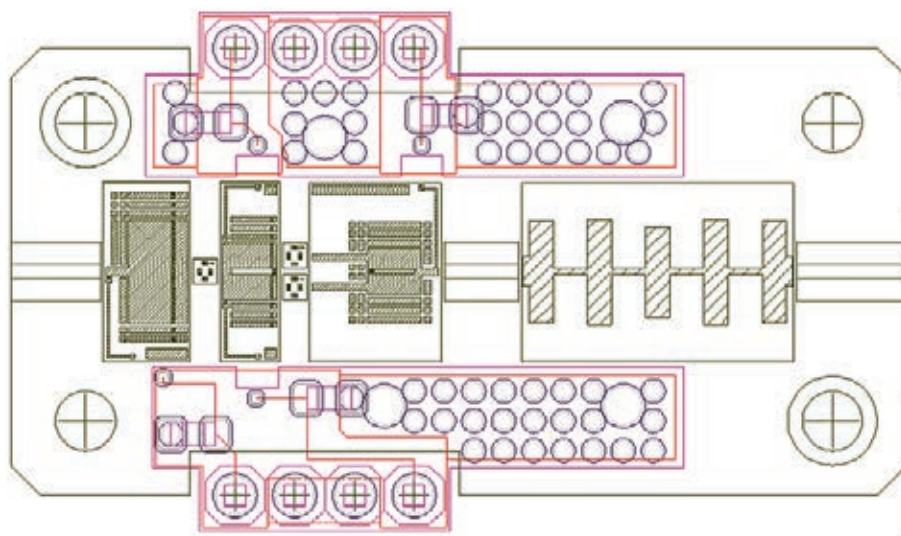


Рис. 5

ГИС выходного усилителя мощности

дающего канала относительно эталонного. Затем поправочные фазовые константы были внесены в ячейку памяти, установленную в модуле ППМ и автоматически загружаемую при подаче питания. Полученное семейство ФЧХ передающих каналов ППМ представлено на рис. 7.

При измерениях установлено, что наклон ФЧХ в диапазоне частот, связанный с электрической длиной передающего канала, может изменяться на величину до $1,5 \lambda$. Это связано с большой электрической длиной тракта и разбросами параметров сборки ГИС из состава ППМ. Для устранения

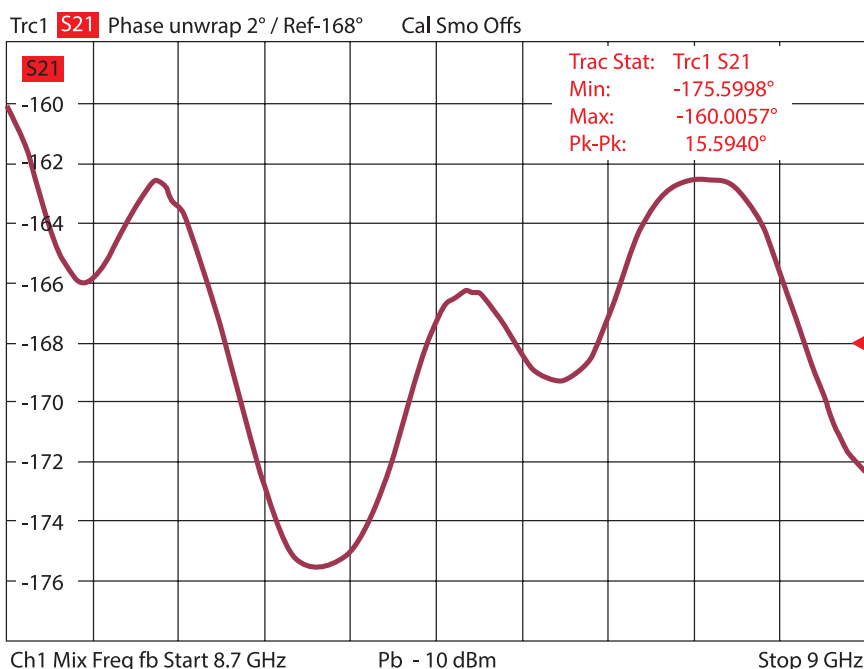


Рис. 6

Искажение ФЧХ вследствие низкочастотной неустойчивости ВУМ

расхождений ФЧХ в каждый передающий канал ППМ должна быть установлена переключаемая линия задержки 2λ .

Особенности теплового режима работы ППМ

Модуль ППМ предназначен для работы в импульсном режиме. Наиболее сложным с точки зрения телонагруженности является режим работы со следующими параметрами СВЧ импульса: скважность $Q=2$, длительность импульса $\tau_{и}=20$ мс.

Предварительно были рассмотрены три основных варианта охлаждения ППМ:

- воздушный;
- с радиатором жидкостного охлаждения;
- с организацией теплоотвода тепловыми трубками.

Вариант с воздушным охлаждением требует кондиционированного воздуха, значительных размеров пластин радиатора (около 30 мм), увеличивающих размеры ППМ, и достаточно сложную пространственную конфигурацию воздухопроводов в составе антенной

решётки. Модуль с жидкостным охлаждением тоже имеет относительно большие габаритные размеры и требует гидроразъёмов для удобства монтажа-демонтажа ППМ. Поэтому первоначально вариант с тепловыми трубками был выбран основным. Рассмотрены три варианта компоновки приёмно-передающего субмодуля с кондуктивным (контактным) охлаждением за счёт теплопередачи тепловыми трубками на панели общего радиатора с жидкостным охлаждением с температурой охлаждающей жидкости в пределах 20-35 °С:

- 1) передающий тракт на теплоотводящем основании, приёмный над ним;
- 2) приёмный и передающий тракты расположены горизонтально в середине субмодуля, отвод тепла осуществляется через боковые стенки;
- 3) приёмный и передающий тракты расположены вертикально в середине субмодуля.

С другого конца тепловой трубы, протяжённостью 60 мм, на шесть тепловых труб сажается 5-мм латунная плита,

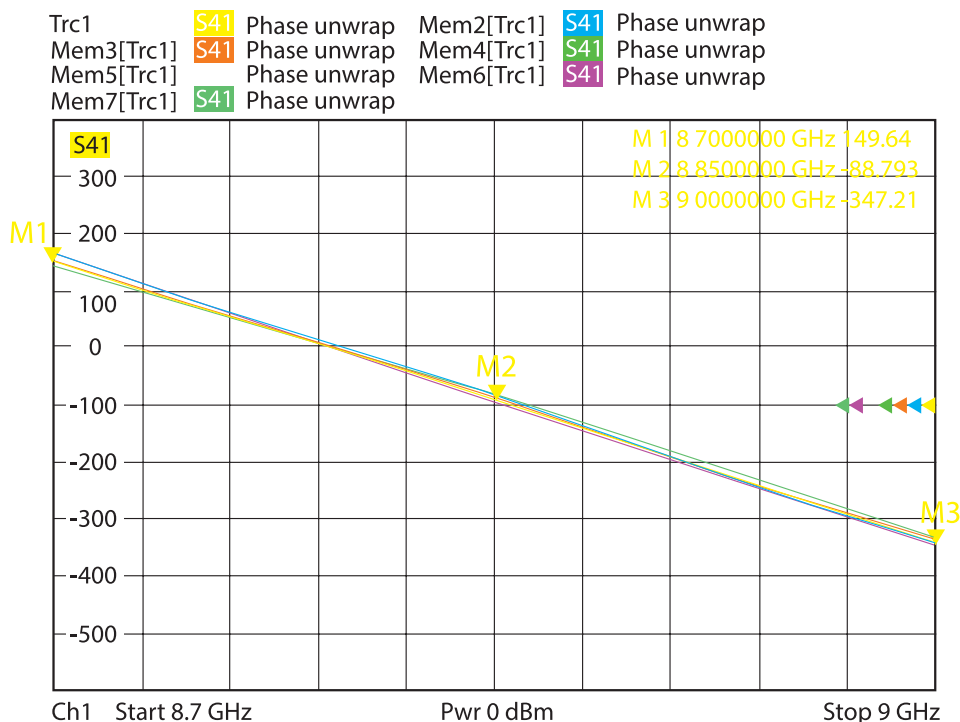


Рис. 7

Результат корректировки начальной фазы каналов по ансамблю ППМ

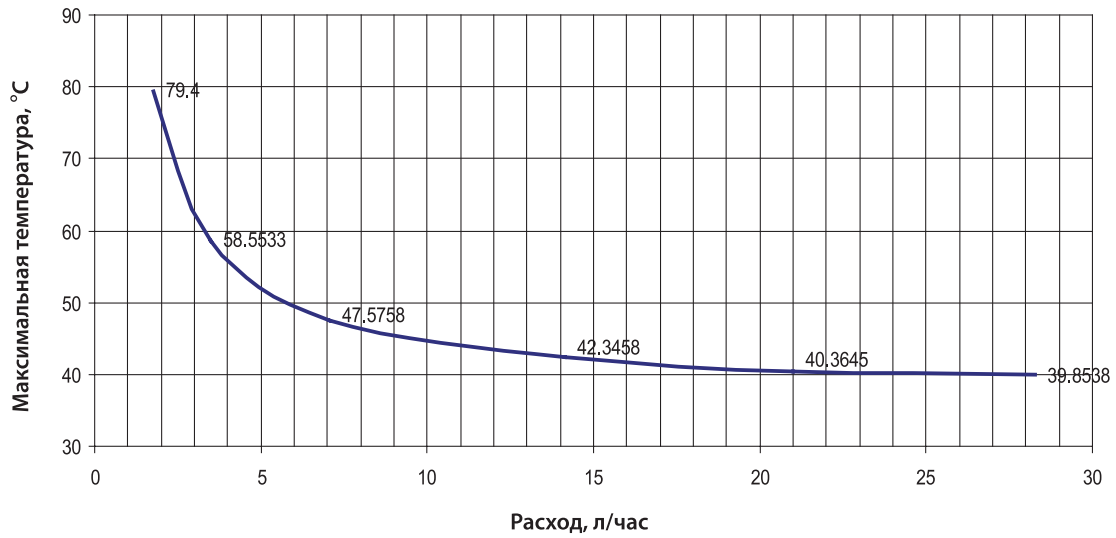


Рис. 8

Зависимость температуры водного бассейна от скорости потока жидкости

на которую крепится водный бассейн размером 50x90x10 мм. Диаметр каждого из двух штуцеров, через которые обеспечивается прокачка воды через бассейн, равна 5 мм. На рис. 8 для варианта 3 приводится зависимость максимальной температуры на самом горячем источнике тепла (7 Вт) от расхода через водный бассейн (один водный бассейн охлаждает 6 элементов).

Проведённые расчёты показали, что теплоотвод на основе тепловых трубок

для варианта 1 не достаточен (перегрев верхней платы может составлять около 60-80 °C) и эффективно решает задачу отвода тепла со второго и третьего варианта компоновок submodule ППМ, обеспечивая перегрев не более 20 °C.

Последующее конструктивное моделирование АФАР показало, что невозможно соблюсти одинаковые требования к длинам тепловых трубок и их взаимному равномерному распределению от-

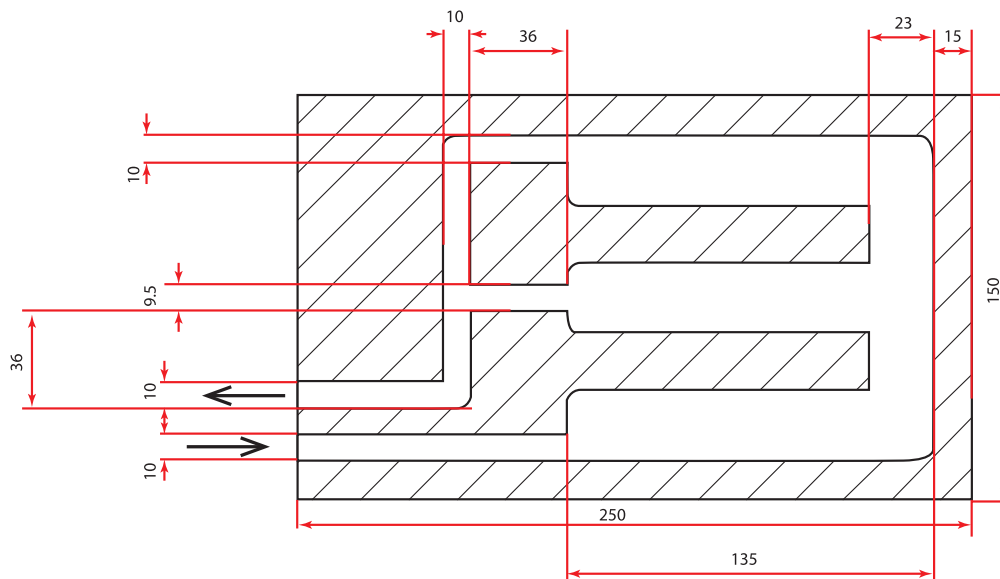


Рис. 9

Сечение радиатора охлаждения

Таблица 2

Результаты проведения теплового расчёта

Расход, л/мин	Скорость на входе штуцера Ø 4,5 мм, м/с	Перепад давления, Па	Максимальная температура на источнике тепловыделения 7 Вт, °С	Разница в температурах между ближним и дальним от входа источником (при мощности 7 Вт), °С
0.029	0.0305	1.05	70.07	4.87
0.058	0.061	3.51	47.82	3.05
0.12	0.122	13.07	36.93	2.2
0.23	0.244	51.2	31.46	1.58
0.35	0.366	113.02	29.57	1.15

носителем охлаждающих поверхностей, поэтому было решено провести моделирование жидкостной системы охлаждения. Для предотвращения перегрева основных теплонагруженных элементов, каковыми являются мощные нитридгаллиевые полевые транзисторы, а также облегчения тепловых режимов работы всего модуля в целом, проведён тепловой расчёт, который позволил выбрать как оптимальную толщину и материал теплоотводящего радиатора, так и его конструкцию, давление и необходимые мощности потоков жидкости через него (рис. 9 и рис. 10).

Результаты проведения теплового расчёта представлены в табл. 2.

Из рис. 10 видно, что выбранная конструкция радиатора позволит обеспечить отвод тепла за счёт равномерного распределения давления воды в основных теплонагруженных участках модуля, которыми являются выходной и предварительный каскады передающего тракта каналов ППМ.

Выводы

1. В результате проведения работ был разработан и изготовлен шестиканальный ППМ для АФАР X-диапазона.

2. Тепловое моделирование ППМ позволило рассчитать конструкцию радиатора жидкостного охлаждения, позволяющего обеспечить безопасные режимы работы полупроводниковой электронной компонентной базы во всех условиях эксплуатации.

3. В результате проведения фазовых измерений по ансамблю из 108 передающих каналов ППМ установлено, что помимо разброса начальной фазы между каналами исключительно важным является угол наклона ФЧХ. Для его корректировки в каждый передающий канал ППМ должна быть установлена линии задержки 2 λ.

Литература

1. Васильев А. Г., Колковский Ю. В., Корнеев С. В., Дорофеев А. А., Миннебаев В. М. SiGe и GaN СВЧ приборы для приёмопередающих и передающих модулей // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2009. – № 2 (222). – С. 5-10.
2. Abolduyev I. M., Zubkov A. M., Minnebaev V. M. X-band power amplifier for active phased-array antennas // proceedings of the 3rd International Conference on Satellite Communications, ICSC'98, part 1, Moscow, 1998, pp. 171-172.
3. T/R Module Solution for X-band Phased-array Radar // Microwave Journal, 2010, October, pp. 146-150.
4. Abolduyev I. M., Minnebaev V. M., Senderuk Yu. S. Transceiver modules for X-band active phased array // Proceedings of 15th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, CriMiCo'2005, Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2005, pp. 145-147.
5. GaN-based Components for Transmit/Receive Modules in Active Electronically Scanned Arrays // CS Mantech Conference, May 13th-16th, 2013, New Orleans, Louisiana, USA, pp. 99-101.
6. Герасимов А. О., Зайцев Ю. П., Иванов К. А., Колковский Ю. В., Осиповский А. А., Перевезенцев А. В.,

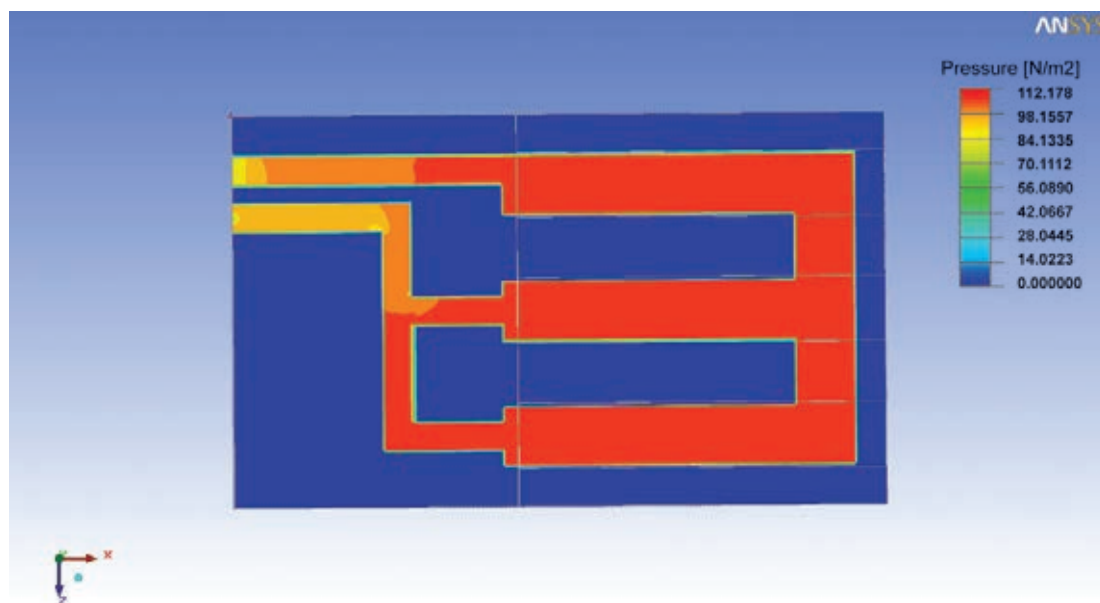


Рис. 10

Распределение давления в радиаторе при расходе воды 0,35 л/мин

- Редька Ал. В., Кулиев М. В., Миннебаев В. М. Шестиканальный ППМ АФАР X-диапазона // Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА», г. Дубна, 8-10 октября 2014 г., с. 33-34.
7. Герасимов А. О., Перевезенцев А. В., Шишков М. А., Шмаков Д. В. Шестиканальный ППМ для АФАР X-диапазона: приёмный тракт // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2015. – № 2-3 (236-237). – С. 12-20.
- References**
1. Vasilyev A. G., Kolkovsky Y. V., Korneev S. V., Dorofeev A. A., Minnebaev V. M. SiGe and GaN microwave devices for T/R and transmitting modules. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2009, № 2, pp. 5-10.
 2. Abolduyev I. M., Zubkov A. M., Minnebaev V. M. X-band power amplifier for active phased-array antennas // proceedings of the 3rd International Conference on Satellite Communications, ICSC'98, part 1, Moscow, 1998, pp. 171-172.
 3. T/R Module Solution for X-band Phased-array Radar // *Microwave Journal*, 2010, October, pp. 146-150.
 4. Abolduyev I. M., Minnebaev V. M., Senderuk Yu. S. Transceiver modules for X-band active phased array // *Proceedings of 15th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, CriMiCo'2005*, Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2005, pp. 145-147.
 5. GaN-based Components for Transmit/Receive Modules in Active Electronically Scanned Arrays // *CS Mantech Conference*, May 13th-16th, 2013, New Orleans, Louisiana, USA, pp. 99-101.
 6. Gerasimov A. O., Zaytsev Y. P., Ivanov K. A., Kolkovsky Y. V., Osipovsky A. A., Perevezentsev A. V., Redka Al. V., Kuliev M. V., Minnebaev V. M. *Materialy XIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tverdotelnaya elektronika. Slozhnye funktsionalnye bloki REA»* [Proceedings of XIII Russian Scientific Conference «Solid-state electronics. Complex functional REB»]. Dubna, 8-10th of October 2014, pp. 33-34.
 7. Gerasimov A. O., Perevezentsev A. V., Shishkov M. A., Shmakov D. V. Six-channel X-band T/R module for APAA: receiving channel. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2015, № 2-3, pp. 12-20.