

## 8-КАНАЛЬНЫЙ ПРИЁМОПЕРЕДАЮЩИЙ МОДУЛЬ X-ДИАПАЗОНА С ПЕРВИЧНОЙ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ СИГНАЛА

В. Е. Акинин, О. В. Борисов, Ю. В. Колковский, В. М. Миннебаев,  
Ал. В. Редька, Ан. В. Редька, А. В. Ушаков, А. В. Царев

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

В статье представлены результаты проектирования и изготовления 8-канального приёмопередающего модуля (ППМ), предназначенного для работы в составе перспективных радиолокационных станций (РЛС) с активной фазированной антенной решёткой (АФАР). Рабочий диапазон частот ППМ  $\Delta F = 9.2-10.4$  ГГц. Выходная мощность передающего канала  $P_{\text{вых}} = 10$  Вт. Коэффициент шума приёмного канала  $K_{\text{ш}}$  не более 3,5 дБ. В модуле реализована первичная цифровая обработка принимаемого сигнала.

**Ключевые слова:** АФАР, приёмопередающий модуль, малошумящий усилитель (МШУ), гибридная интегральная схема (ГИС), диаграмма направленности (ДН), X-диапазон, приёмный канал, передающий канал

**Сведения об авторах:** Акинин Вячеслав Евгеньевич, [akinin\\_ve@pulsarnpp.ru](mailto:akinin_ve@pulsarnpp.ru); Борисов Олег Валерьевич, [466@pulsarnpp.ru](mailto:466@pulsarnpp.ru); Колковский Юрий Владимирович, д.т.н., профессор [kolk@pulsarnpp.ru](mailto:kolk@pulsarnpp.ru); Миннебаев Вадим Минхатович, к.т.н. [minnebaev\\_vm@pulsarnpp.ru](mailto:minnebaev_vm@pulsarnpp.ru); Редька Алексей Владимирович, [redka\\_av@pulsarnpp.ru](mailto:redka_av@pulsarnpp.ru); Редька Андрей Владимирович, [redka\\_av@pulsarnpp.ru](mailto:redka_av@pulsarnpp.ru); Ушаков Александр Васильевич, [ushakov\\_av@pulsarnpp.ru](mailto:ushakov_av@pulsarnpp.ru); Царев Александр Владимирович, [tsarev@pulsarnpp.ru](mailto:tsarev@pulsarnpp.ru).

## 8-TH CHANNEL X-BAND TRANSCEIVER MODULE WITH DIGITAL SIGNAL PRE-PROCESSING

V. E. Akinin, O. V. Borisov, Yu. V. Kolkovskiy, V. M. Minnebaev,  
Al. V. Redka, An. V. Redka, A. V. Ushakov, A. V. Tsarev

JSC «S&PE «Pulsar», 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27

This paper presents the results of design and production of 8-th channel transceiver module (TRM) for advanced active electronically scanned antenna (AESA) radar applications. TRM operating frequency range  $\Delta F = 9.2-10.4$  GHz. Transmitting channel output power  $P_{\text{out}}$  ( $P_{\text{вых}}$ ) = 10 W. Receiving channel noise figure  $NF$  ( $K_{\text{ш}}$ )  $\leq 3,5$  dB. Module features digital signal pre-processing.

**Keywords:** AESA, transceiver module, low-noise amplifier (LNA), hybrid integrated circuit (HIC), beam pattern, X-band, receiving channel, transmitting channel.

**Data of Authors:** Vyacheslav Evgenyevich Akinin, [akinin\\_ve@pulsarnpp.ru](mailto:akinin_ve@pulsarnpp.ru); Oleg Valeryevich Borisov, [466@pulsarnpp.ru](mailto:466@pulsarnpp.ru); Yuriy Vladimirovich Kolkovskiy, Doctor of Engineering, Prof., [kolk@pulsarnpp.ru](mailto:kolk@pulsarnpp.ru); Gennadiy Vyacheslavovich Legaj, [legaj\\_gv@pulsarnpp.ru](mailto:legaj_gv@pulsarnpp.ru); Vadim Minkhatovich Minnebaev, Candidate of Engineering, [minnebaev\\_vm@pulsarnpp.ru](mailto:minnebaev_vm@pulsarnpp.ru); Aleksey Vladimirovich Redka, [redka\\_av@pulsarnpp.ru](mailto:redka_av@pulsarnpp.ru); Andrey Vladimirovich Redka, [redka\\_av@pulsarnpp.ru](mailto:redka_av@pulsarnpp.ru); Aleksandr Vasilyevich Ushakov, [ushakov\\_av@pulsarnpp.ru](mailto:ushakov_av@pulsarnpp.ru); Aleksandr Vladimirovich Tsarev, [tsarev@pulsarnpp.ru](mailto:tsarev@pulsarnpp.ru).

### Введение

Основным и самым массовым элементом любой радиолокационной станции с активной фазированной антенной решёткой

(РЛС с АФАР) является приёмопередающий модуль (ППМ) [1-3]. В зависимости от структуры и назначения системы приёмопередающий модуль может включать в свой состав следующие элементы:

1. предварительный и выходной усилители передающего канала;
2. входной малошумящий усилитель приёмного канала, а также выходные усилители приёмного тракта;
3. устройство защиты приёмного тракта;
4. аттенюатор и фазовращатель передающего канала;
5. аттенюатор и фазовращатель приёмного канала;
6. устройство переключения приём/передача;
7. устройство управления модулем приёмопередающим;
8. развязывающий циркулятор.

Основным функциональным назначением ППМ является усиление зондирующего сигнала, а также приём и усиление отражённого сигнала.

Вследствие того, что в состав ячейки АФАР обычно входит большое количество ППМ (от 32 и более), жесткие требования предъявляются к фазочастотным и амплитудно-частотным характеристикам приёмного и передающего трактов модуля. Для обеспечения возможности управления (корректировки) амплитудой и фазой зондирующего и принимаемого сигналов в приёмных и передающих тактах ППМ устанавли-

ваются фазовращатели и аттенюаторы. Они позволяют сформировать луч подрешётки и получить необходимую для работы диаграмму направленности [4]. На рис. 1 представлен результат фазировки с помощью встроенных фазовращателей 20-ти приёмопередающих модулей в диапазоне рабочих частот.

### Постановка задачи

Целью настоящей работы является разработка 8-канального приёмопередающего модуля с первичной цифровой обработкой сигнала, технические характеристики которого отображены в табл. 1.

Приёмопередающий модуль должен быть изготовлен в пылевлагозащищённом корпусе, габаритные размеры которого не должны превышать 150x150x70 мм, а вес должен быть не более 1 кг.

### Структурная схема и состав приёмопередающего модуля

Структурная схема одного приёмопередающего канала модуля представлена на рис. 2.

В качестве усилителей в передающем тракте модуля ППМ используются гибридные интегральные схемы (ГИС) на основе

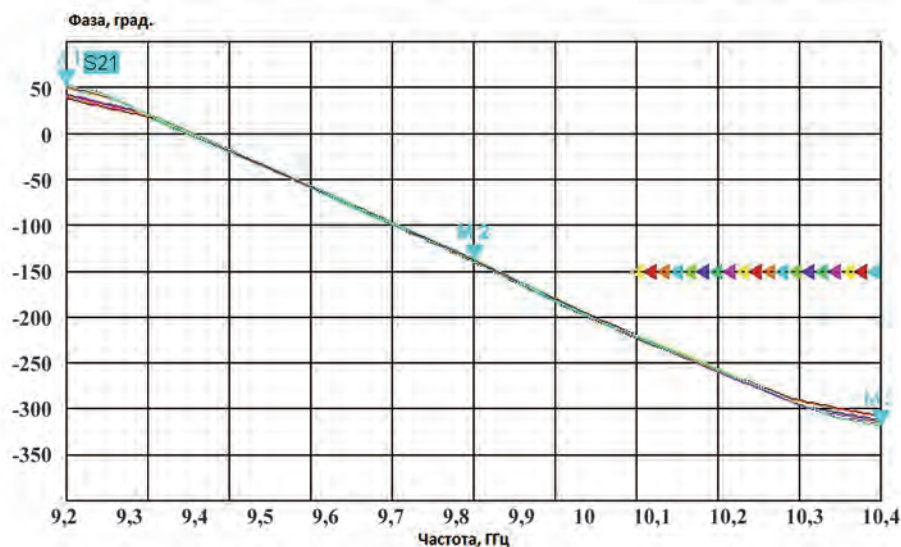


Рис. 1

Результат фазировки 20-ти передающих каналов приёмопередающего модуля с использованием канальных фазовращателей

## Основные технические характеристики ППМ

Наименование параметра, единица измерения	Буквенное обозначение параметра	Норма параметра		
		не менее	номинал	не более
Рабочий диапазон частот, ГГц: - нижнее значение частоты - верхнее значение частоты	$\Delta f_p$ $f_n$ $f_v$	- 10,4	- -	9,2 -
КПД, % (на канал)	$\eta$	25	-	-
Электрические параметры приёмного тракта ППМ				
Коэффициент шума приёмного тракта, дБ	$K_{ш}$	-	-	3,5
Коэффициент усиления приёмного тракта, дБ	$K_{ур}$	25,0	-	-
Неравномерность коэффициента усиления приёмного тракта в диапазоне рабочих частот, дБ	$\Delta K_{ур}$	-	-	2,0
Частота дискретизации АЦП в приёмных каналах, МГц	$Fd$	20	-	-
Среднеквадратичная ошибка изменения фазы приёмного тракта, град.	$\Delta m_{\phi}$	-	-	10
Среднеквадратичная ошибка установки затухания аттенюатора приёмного тракта, дБ	$\Delta m_a$	-	-	1,0
Входная мощность приёмного тракта (на один канал), Вт	$P_{вх. прм.}$	-	-	10
Электрические параметры передающего тракта ППМ				
Выходная импульсная мощность передающего тракта (на один канал), Вт	$P_{вх. макс}$	10,0	-	-
Коэффициент усиления передающего тракта, дБ	$K_{ур}$	30,0	-	-
Неравномерность коэффициента усиления передающего тракта в диапазоне рабочих частот, дБ	$\Delta K_{ур}$	-	-	2,0
Среднеквадратичная ошибка изменения фазы передающего тракта, град.	$\Delta m_{\phi}$	-	-	10
Изменение выходной мощности передающего канала при изменении фазы, дБ	$\delta P_{вых. прд}$	-	-	1,5
Длительность импульса, мкс	$T_{имп.}$	0,4	-	200
Скважность	$Q$	5	-	-

нитрид-галлиевых транзисторов производства АО «НПП «Пульсар». Для обеспечения заданных в техническом задании требований к рабочей полосе частот, коэффициенту усиления, выходной мощности и коэффициенту полезного действия разработана двухкаскадная ГИС предварительно и трехкаскадная ГИС выходного усилителей мощности (ПУМ и ВУМ). В качестве предварительного каскада использовались транзисторы БКВП.757643.046 с шириной затвора  $W = 1.25$  мм, в качестве выходных приборов – БКВП.757.643.048 с шириной затвора  $W = 5$  мм.

Предварительный расчёт ГИС усилителей мощности был произведён в САПР MICROWAVE OFFICE фирмы AWR. Для этого расчёта на основе измеренных вольт-амперных характеристик в библиотеке САПР была адаптирована нелинейная модель транзистора. После этого была проведена оптимизация параметров модели, отвечающих за работу на СВЧ, для того чтобы S-параметры этой модели соответствовали S-параметрам реального транзистора в требуемом диапазоне частот [5].

Электромагнитное моделирование согласующих цепей выполнено в программе

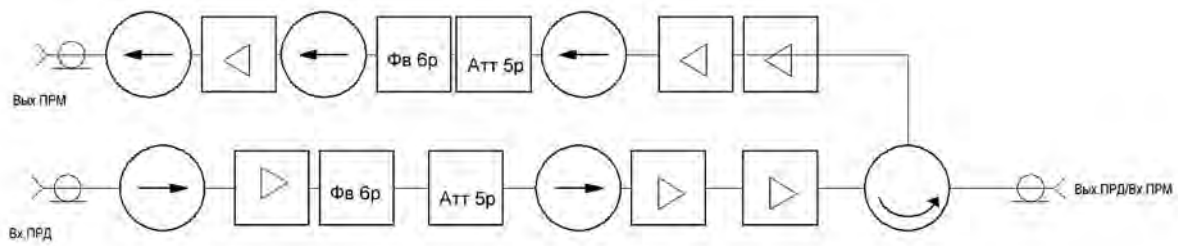


Рис. 2

### Структурная схема канала ППМ

2.5D моделирования Sonnet Suites. Данная программа обладает некоторыми преимуществами перед AWR в части ЭМ моделирования, такими как более полное соответствие расчётов и эксперимента, скорость расчёта схемы, более простой и интуитивно понятный интерфейс, возможность запускать несколько задач последовательно друг за другом в автоматическом режиме и пр. Моделирование каждой платы усилителя производилось отдельно друг от друга в целях экономии времени. В целях экономии времени проектирования прибора разумно производить расчёт навесных конденсаторов как двухполюсников и в дальнейшем «подключать» их в соответствующие порты. Обусловлено это тем, что моделирование схемы, включающей в себя слои с диэлектриками, из которых состоят конденсаторы, требует значительно большего объёма оперативной памяти компьютера, и, как следствие, время расчёта также увеличивается в несколько раз.

Эквивалентная схема трехкаскадного выходного усилителя мощности представлена на рис. 3.

Расчётные зависимости коэффициента усиления, коэффициента полезного действия и выходной мощности ВУМ от частоты представлены на рис. 4.

Внешний вид разработанных и изготовленных ГИС предварительного и выходного усилителей мощности показан на рис. 5.

Как видно из рис. 5, предварительный усилитель мощности построен на основе двух каскадов на GaN транзисторах БКВП.757643.007, а выходной усилитель на основе двух каскадов на GaN транзисторах БКВП.757643.046 и на одном каскаде с использованием транзистора БКВП.757643.048. Оба усилителя имеют согласующие цепи с элементами ввода питания на основе поликорковых плат.

При использовании маломощных усилителей (МШУ) в ППМ АФАР необходимо обеспечить защиту активного СВЧ прибо-

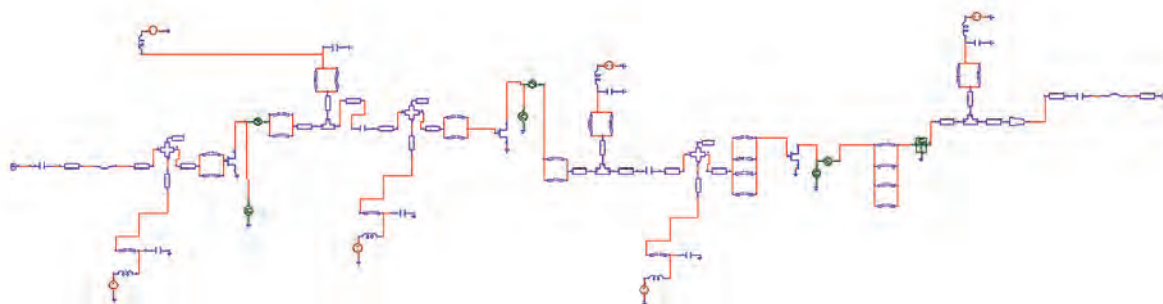


Рис. 3

### Эквивалентная схема трехкаскадного ВУМ

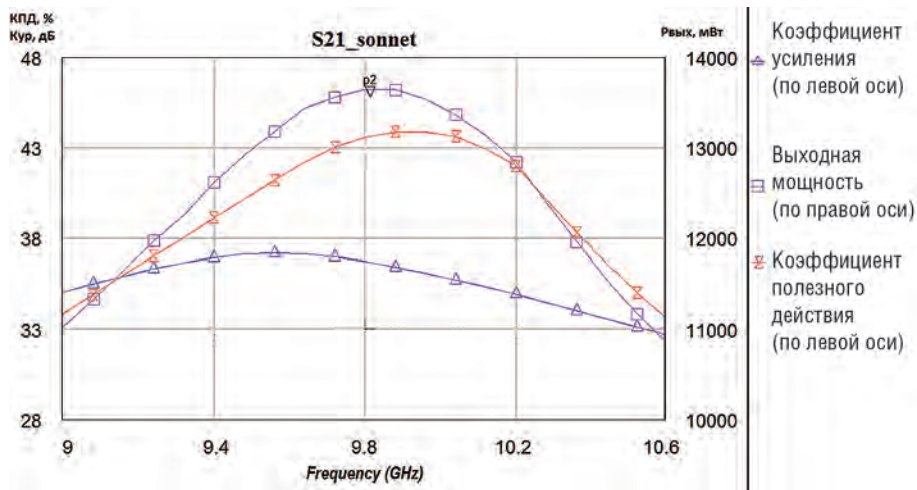


Рис. 4

**Расчётные зависимости коэффициента усиления, коэффициента полезного действия и выходной мощности ВУМ от частоты**

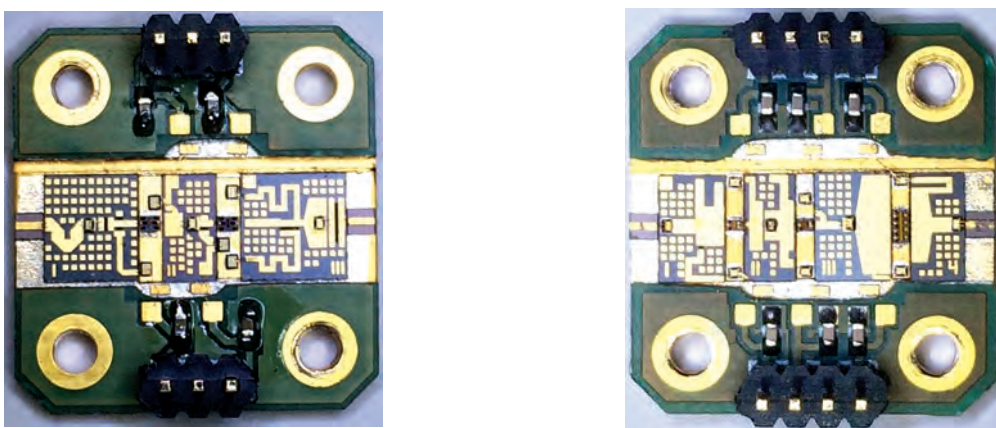


Рис. 5

**Внешний вид предварительного (слева) и выходного (справа) усилителей мощности**

ра от просачивающейся мощности излучателей АФАР. Сложность защиты состоит в том, что величина просачивающейся мощности достигает уровня выходной мощности одного передающего канала.

Основными требованиями к СВЧ приёмному тракту ППМ АФАР являются:

1. обеспечение высокой чувствительности при воздействии синхронных и асинхронных помех за счёт поиска оптимума между значением коэффициента шума входного СВЧ транзистора и величиной максимального неразрушающего уровня СВЧ мощности

на входе транзистора, который определяет величину прямых потерь устройства защиты приёмника;

2. уменьшение габаритов устройства защиты наиболее важно для АФАР, размеры ППМ в которой жестко связаны с длиной волны зондирующих сигналов.

На основании проведённого анализа для минимизации коэффициента шума СВЧ приёмника в присутствии мощных помех в качестве мал шумящего СВЧ транзистора МШУ необходимо использовать GaN мал шумящие транзисторы без использования

устройства защиты, что позволило снизить потери на входе маломощного тракта, сократив коэффициент шума на 0,8 дБ.

АО «НПП «Пульсар» имеет довольно большой опыт в разработке и производстве транзисторов на основе GaN. Для обеспечения требуемого уровня коэффициента пере-

дачи и требуемого значения коэффициента шума [6] в качестве базового кристалла были выбраны серийно производимые на нашем предприятии транзисторы БКВП.757643.007 с шириной затвора  $W = 0,25$  мм.

На рис. 6 и 7 представлены измерения S11 и максимально достижимый коэффици-

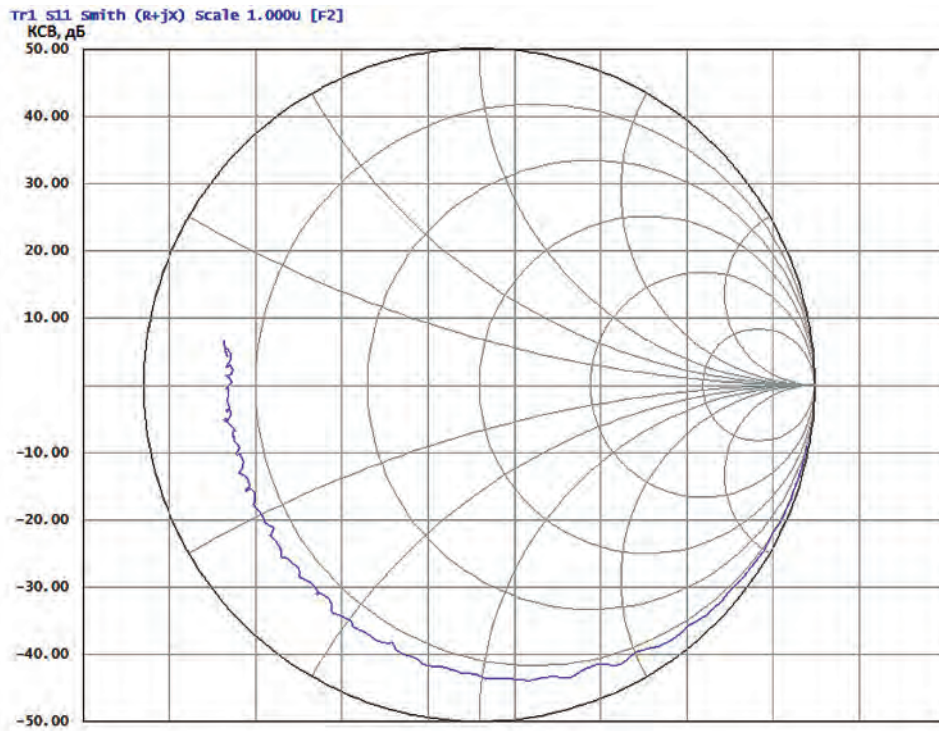


Рис. 6

Результат измерений S11 кристалла БКВП.757643.007

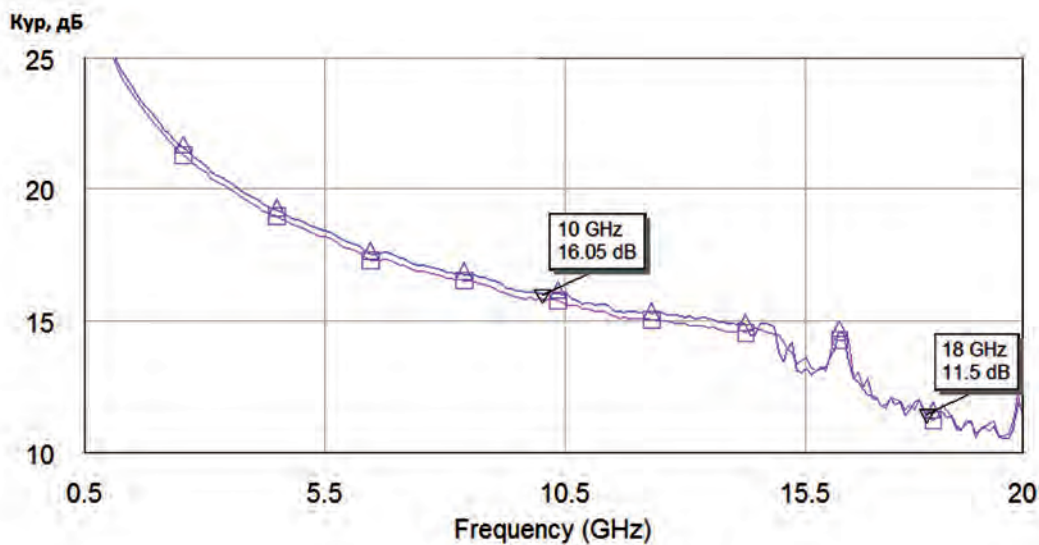


Рис. 7

Максимально достижимое значение коэффициента усиления кристаллов БКВП.757643.007

ент усиления транзистора БКВП.757643.007. Результаты проведённых исследований подтвердили возможность работы кристаллов, а соответственно и возможность построения приёмного тракта ППМ на частотах от 8 до 12 ГГц. Помимо этого, видно, что существует возможность построения приёмных каскадов на частотах до 20 ГГц.

Таким образом, был разработан двухкаскадный малошумящий усилитель на основе кристаллов БКВП.757643.007 (структурная схема представлена на рис. 8), полностью удовлетворяющий требованиям, предъявляемым к разрабатываемому модулю (основные технические характеристики ГИС представлены на рис. 9).

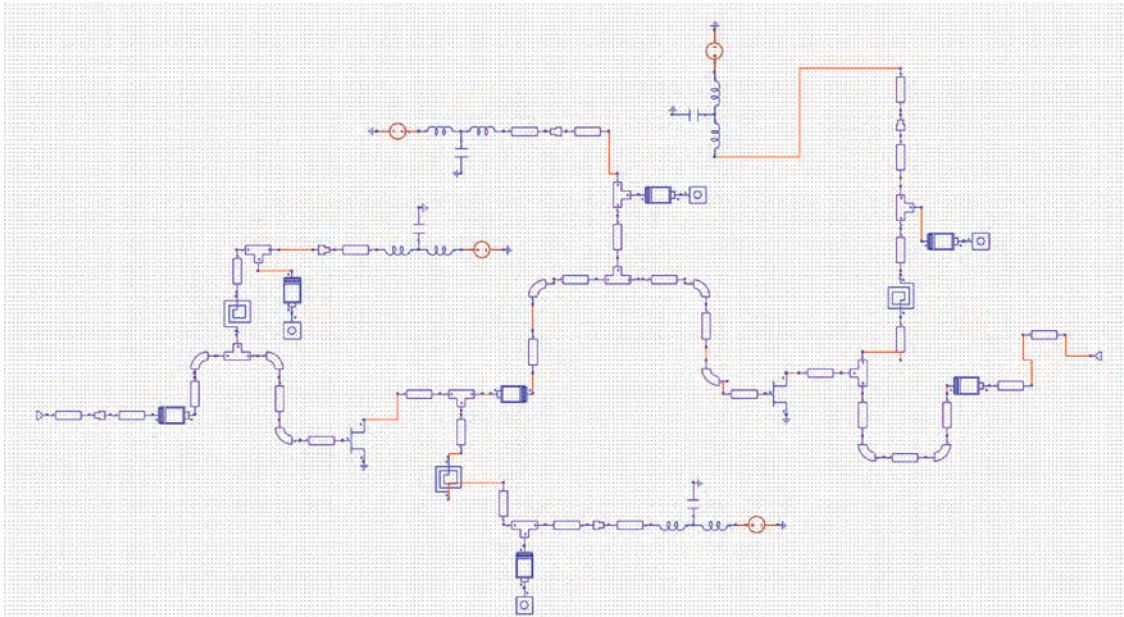


Рис. 8

Электрическая схема двухкаскадного ГИС МШУ

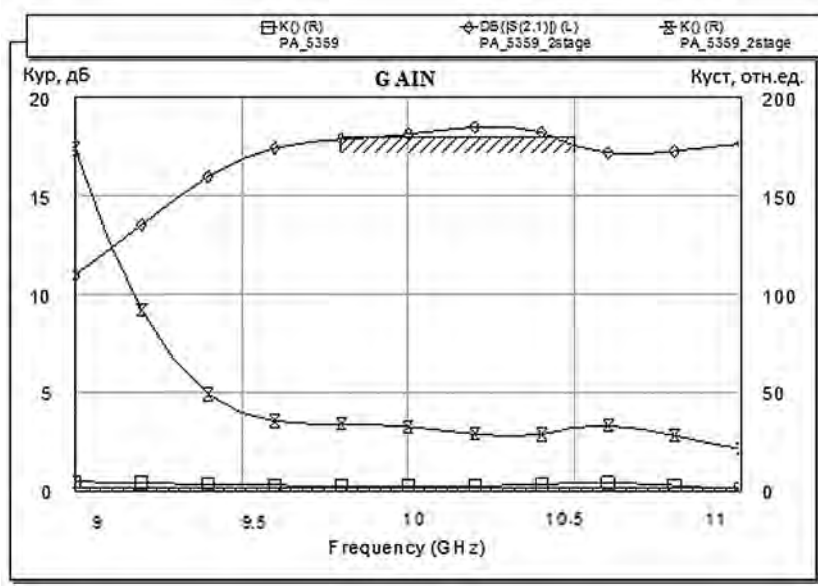


Рис. 9

Расчётные коэффициент усиления и коэффициент устойчивости GaN выходного усилителя (PA\_5359\_2stage) и ВУМ (PA\_5359)

Для реализации первичной цифровой обработки сигнала в ППМ реализовано два преобразования СВЧ сигнала с целью снижения значения частоты, достаточной для работы АЦП. Структурная схема этого преобразования частоты, реализованная в приёмопередающем модуле, представлена на рис. 10.

В результате преобразования и обработки на выходе аналогово-цифрового преобразователя получается цифровой сигнал со следующими характеристиками:

1. один тактовый импульс, 1 слово данных по 10 бит параллельного кода;
2. частота обновления данных на выходе цифровых приёмников не менее 20 МГц;
3. информационный поток составляет не менее 200 Мбит/с.

Для обеспечения суммирования приёмных каналов были спроектированы и изготовлены сумматоры на СВЧ многослойном

материале с использованием технологии переходных отверстий. Данная технология позволила разместить на одной плате помимо сумматоров приёмных каналов также СВЧ делитель для передающих каналов.

Для обеспечения требуемых значений фронта и спада СВЧ выходного сигнала на плате СВЧ делителя/сумматора сигнала установлены быстродействующие ключи. Они позволили получить уверенное подавление сигнала передатчика в момент работы приёмника на уровень не менее 25 дБ.

### Результаты изготовления и измерения приёмопередающего модуля

Разработан 8-канальный приёмопередающий модуль X-диапазона с первичной цифровой обработкой сигнала. Внешний вид 1/2 части модуля представлен на рис. 11.

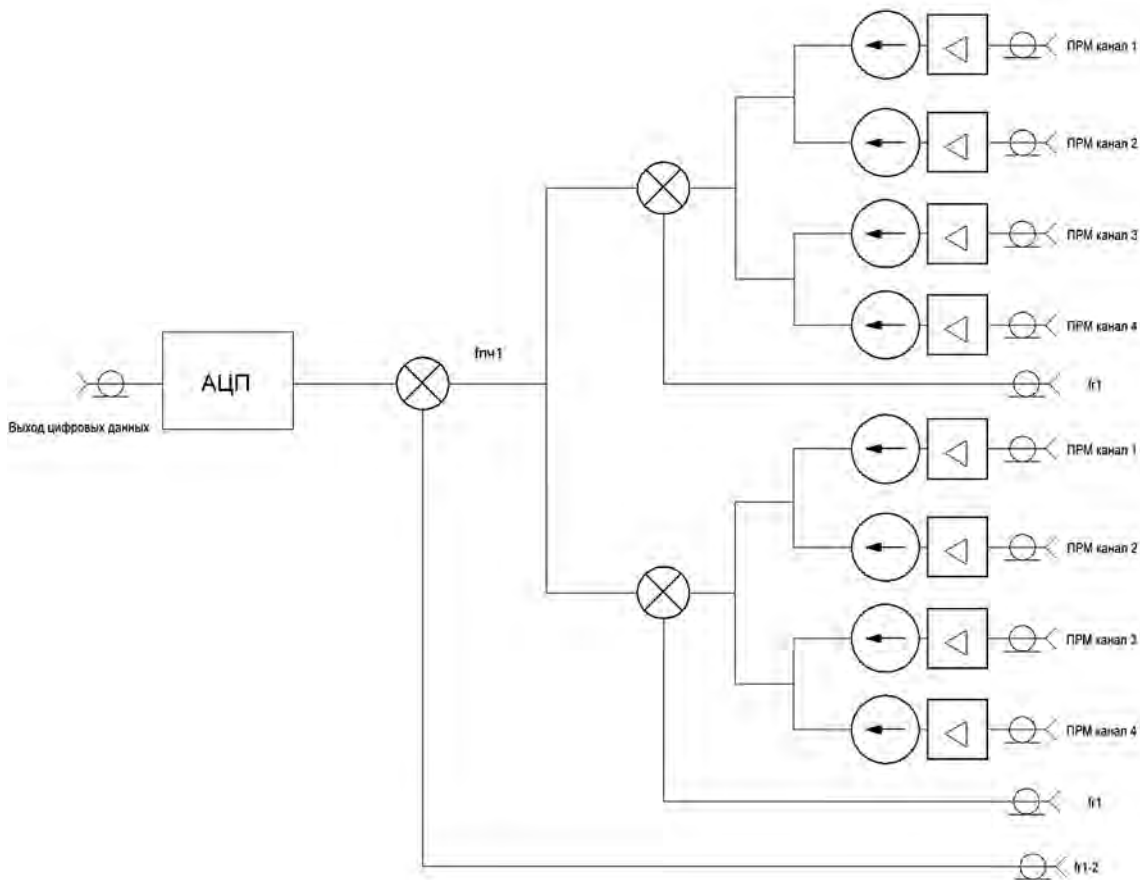


Рис. 10

Структурная схема реализации первичной цифровой обработки сигнала



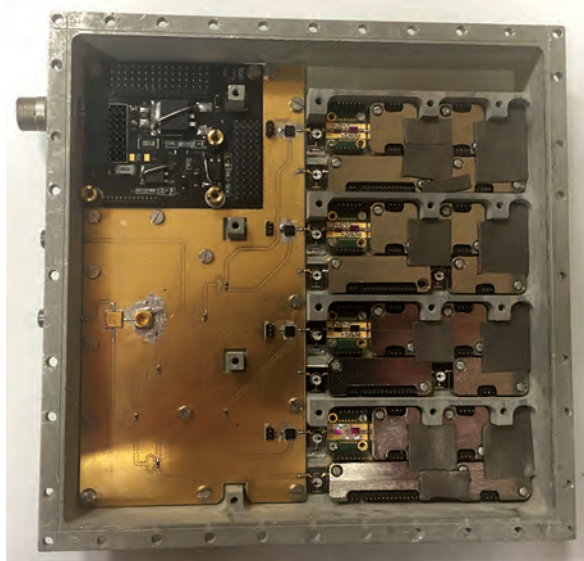


Рис. 11  
Внешний вид СВЧ отсека приёмопередающего модуля

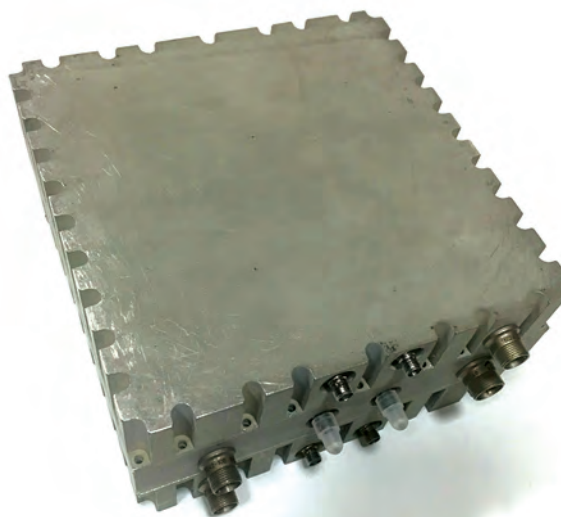


Рис. 12  
Внешний вид 8-канального приёмопередающего модуля

Таблица 2

Основные технические характеристики изготовленных модулей ППМ

Контролируемые параметры	Единицы измерения	Значение параметров по НТД	Номер							
			Завод. № 001							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Рабочий диапазон частот	ГГц	9,2-10,4	Соответствует							
Коэффициент усиления приёмного тракта	дБ	не менее 25	30,1	30,4	30,2	30,3	30,4	30,6	30,5	30,4
Коэффициент усиления передающего тракта	дБ	не менее 30	31,9	31,4	31,3	32,1	31,7	31,3	31,2	31,5
Коэффициент шума приёмного тракта	Вт	не более 3,5	3,2	3,3	3,2	3,3	3,3	3,3	3,2	3,3
Выходная импульсная мощность передающего тракта (на один канал)	Вт	не менее 10	11,3	11,2	11,2	11,3	11,4	11,3	11,4	11,2

В левой части модуля установлены СВЧ делитель/сумматор с ключами на входе передающих каналов, вход первого гетеродина и СВЧ смеситель, а также плата ввода питания.

В правой части модуля установлены 4 приёмопередающих канала. Усилители в приёмном и передающем трактах развязаны ферритовыми микрополосковыми вентилями,

а выход передающего канала и вход приёмного канала – циркулятором ФПЦН2-100-9.5 и циркулятором ФПЦН2-101-9.5.

Вход и выход СВЧ сигналов на антенну осуществляется через разъёмы типа SMP отечественного производства SMP-ВБМГП-Х-1-327-1.С.

Конструктивно модуль собирается из двух идентичных СВЧ отсеков, между

которыми расположена плата управления и цифровой обработки. Внешний вид модуля представлен на рис. 12.

В АО «НПП «Пульсар» была изготовлена опытная партия (6 шт.) приёмопередающих модулей, а также проведены измерения и испытания. Основные технические характеристики (для типового представителя), полученные в ходе проведения измерений, представлены в табл. 2.

Изделия удовлетворяют требованиям по стойкости к воздействию механических, климатических, биологических факторов и специальных сред со значенными характеристиками, соответствующими группе унифицированного исполнения 4У по ГОСТ РВ 20.39.414.1-97.

### Выводы

За счёт сочетания при расчёте СВЧ тракта различных пакетов программ, применения распределённых и сосредоточенных моделей элементов сокращено время расчёта.

Разработаны и изготовлены составные части приёмопередающего модуля (ГИС предварительного усилителя мощности, ГИС выходного усилителя мощности, ГИС 2-каскадного маломощного усилителя мощности приёмного тракта, СВЧ плата делителя/сумматора, плата управления и цифровой обработки) и сам ППМ для АФАР радиолокационного комплекса X-диапазона морского базирования.

Измерения основных характеристик ППМ подтверждают правильность выбранных схмотехнических и конструктивных решений.

Технологический маршрут изготовления модуля приёмопередающего основан на базовых технологических процессах НПП «Пульсар» и может быть использован для проектирования ППМ для АФАР различного назначения.

Использование GaN СВЧ транзисторов позволило повысить энергетические параметры передающего тракта и снизить  $K_{\text{ш}}$  на 0,8 дБ по сравнению с GaAs транзистором с предустановленным устройством защиты.

### Литература

1. Белолипецкий А.В., Борисов О.В., Колковский Ю.В., Легай Г.В., Миннебаев В.М., Крохин А.П., Савкин Ю.П., Редька Ал. В., Редька Ан. В. Антенный электронный блок для спутниковой АФАР X-диапазона // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2017. – Вып. 3 (246). – С. 15-25.
2. 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. – Вып. 2-3 (236-237). – С. 12-20.
3. Иванов К.А., Осиповский А.А., Редька Ал. В., Редька Ан. В., Тихомиров А.В. Шестиканальный ППМ для АФАР X-диапазона: передающий тракт // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2015. – Вып. 2-3 (236-237). – С. 21-32.
4. Кобелева С.П., Перевезенцев А.В., Фомин В.М., Френкель М.М. Расчёт диаграммы направленности активной фазированной антенной решётки // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2017. – Вып. 4 (247). – С. 37-41.
5. Бенуни И.С., Валамин Е.А., Миннебаев В.М., Евграфов А.Ю., Миннебаев С.В., Зубков А.М. Восстановление модели GaN транзистора для работы на большом сигнале // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2017. – Вып. 3 (246). – С. 34-43.
6. Миннебаев С.В., Филатов А.Л., Краснов В.В. Малошумящий транзистор с составным каналом на основе  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2017. – Вып. 4 (247). – С. 21-27.

### References

1. A. V. Belolipetskiy, O. V. Borisov, Yu. V. Kolkovskiy, G. V. Legaj, V. M. Minnebaev, A. P. Krokhin, Yu. P. Savkin, Al. V. Redka, An. V. Redka. Electronic antenna unit for X-band space application AESA. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikoviyе pribory* [Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices]. Vol.3 (246). 2017. No.2. pp.15-25.
2. A. O. Gerasimov, A. V. Perevezentsev, M. A. Shishkov, D. V. Shmakov. Six-channel TRM for X-band AESA: receiving channel. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikoviyе pribory* [Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices]. Vol.2-3 (236-237). 2015. No.2. pp.12-20.

3. K.A. Ivanov, A.A. Osipovskiy, Al. V.Redka, An. V.Redka, A.V. Tikhomirov. Six-channel TRM for X-band AESA: transmitting channel. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikoviye pribory* [Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices]. Vol.2-3 (236-237). 2015. No.2. pp.21-32.
4. S.P. Kobeleva, A.V. Perevezentsev, V.M. Fomin, M.M. Frenkel. Calculation of active electronically scanned antenna array beam pattern. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikoviye pribory* [Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices]. Vol.4 (247). 2017. No.2. pp.37-41.
5. I.S. Benuni, E.A. Valamin, V.M. Minnebaev, A.Yu. Evgrafov, S.V. Minnebaev, A.M. Zubkov. Extraction of GaN transistor model for large signal operation. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikoviye pribory* [Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices]. Vol.3 (246). 2017. No.2. pp.34-43.
6. S.V. Minnebaev, A.L. Filatov, V.V. Krasnov. Low-noise composite-channel  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikoviye pribory* [Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices]. Vol.4 (247). 2017. No.2. pp.21-27.