

ШЕСТИКАНАЛЬНЫЙ ППМ ДЛЯ АФАР X-ДИАПАЗОНА: ПРИЁМНЫЙ ТРАКТ

© А. О. Герасимов, А. В. Перевезенцев, М. А. Шишков, Д. В. Шмаков

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

В статье представлены результаты разработки и измерений параметров приёмной части шестиканального приемо-передающего (ППМ) модуля X-диапазона. Приводится конструкция, параметры, режимы работы, методика настройки. Исследованы факторы, влияющие на коэффициент шума приёмника, его динамический диапазон, начальную фазу коэффициента передачи приёмных каналов по ансамблю, величину интермодуляционных искажений третьего порядка (IP3).

Ключевые слова: X-диапазон, активная фазированная антенная решётка, приемо-передающий модуль, малозумящий усилитель, ограничитель мощности, гибридная интегральная схема, смеситель СВЧ сигналов, интермодуляционные искажения, усилитель промежуточной частоты, начальная фаза

Сведения об авторах: Герасимов Андрей Олегович, gerasimov@pulsarnpp.ru; Перевезенцев Александр Владимирович, к.т.н., perevezencev_av@pulsarnpp.ru; Шишков Михаил Александрович, shishkov@pulsarnpp.ru; Шмаков Дмитрий Владимирович, shmakov@pulsarnpp.ru

SIX-CHANNEL TRM FOR X-BAND APAA: RECEIVING CANNEL

A. O. Gerasimov, A. V. Perevezencev, M. A. Shishkov, D. V. Shmakov

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

Results of development and measurements of X-band receiving part of six-channel transceiver module (TRM) are presented. The design, parameters, operating modes, and tuning technique are described. Factors influencing the noise figure, dynamic range, initial phase of channels gain, and IP3 distortions are considered.

Keywords: X-band, active phase array, antenna transceiver module, low-noise amplifier, limiter power, hybrid integrated circuit, mixer of microwave signals, intermodulation distortions, intermediate frequency amplifier, initial phase

Data of authors: Gerasimov Andrey Olegovich, gerasimov@pulsarnpp.ru; Perevezencev Aleksander Vladimirovich, Ph.D., perevezencev_av@pulsarnpp.ru; Shishkov Mikhail Aleksandrovich, shishkov@pulsarnpp.ru; Shmakov Dmitry Vladimirovich, shmakov@pulsarnpp.ru

Введение

Фазированные антенные решётки, в которые помимо излучателей и фазовращателей входят активные элементы, СВЧ преобразователи, аналого-цифровые преобразователи и другие элементы пространственно-временной обработки, называются активными (АФАР) [1]. Приемо-передающий модуль (ППМ) является основной ячейкой для обработки и формирования сигнала в АФАР и выполняет следующие функции:

1. Осуществляет приём и усиление СВЧ сигналов с требуемым коэффициентом шума в рабочей полосе частот с заданным динамическим диапазоном;

2. Выполняет преобразование СВЧ сигнала, как правило, с понижением частоты и последующим его усилением;

3. Обеспечивает избирательность в тракте СВЧ и промежуточной частоты;

4. Формирует заданный уровень зондирующего импульса в антенне АФАР;

5. Регулирует отдельно амплитуду и фазу принимаемых и излучаемых частот и обеспечивает шаг, глубину, точность установки и стабильность во времени;

6. Позволяет управлять программной логикой функционирования ППМ, хранит и обменивается кодами команд управления и данных фаз и амплитуд сигнала для всех каналов модуля.

В НПП «Пульсар» разработкой и изготовлением как отдельных элементов, так и ППМ АФАР X-диапазона в целом занимаются достаточно давно [2, 3]. При этом всегда максимально использовалась передовая электронная компонентная база на основе перспективных полупроводниковых материалов: арсенид галлия, кремний-германий, нитрид галлия [4].

Постановка задачи

Основная задача разработки – обеспечение электрических параметров приёмной части модуля в соответствии с техническим заданием, исследование факторов влияющих на СВЧ параметры ППМ, создание методик измерения и настройки, создание методов оперативной диагностики и выявление в процессе изготовления схемотехнических и конструктивно-технологических недостатков. В целях последующей постановки изделия в производство необходимо провести отработку функционирования ППМ в комплексе с передающими канала-

ми, платой управления и обмена данными, и, при необходимости, провести корректировку электрической схемы и конструкции. Обработка результатов проводилась на 18 модулях ППМ (108 приёмных каналов).

В состав приёмного канала ППМ входят: циркулятор, ограничитель мощности, малошумящий усилитель (МШУ), смеситель, усилитель промежуточной частоты (УПЧ), фильтры высокой и промежуточной частоты (ВЧ, ПЧ), управляемый 5-и разрядный аттенюатор, сумматоры на 3 и на 2 на частоте $F_{пч} = 1,3$ ГГц, делители на 2 и на 3 сигнала гетеродина $F_{гет} = 7,4-7,7$ ГГц. Состав передатчика: делители на 2 и на 3 сигнала передатчика $F_c = 8,7-9,0$ ГГц, первый предварительный усилитель (ПУМ1) с делителем на 3 и СВЧ ключом, второй ПУМ с СВЧ ключом (ПУМ2), третий ПУМ с 6-и разрядным фазовращателем (ПУМ3), ГИС аттенюатора с ключом и выходной усилитель мощности (ВУМ) с фильтром. Укрупненная структурная схема ППМ представлена на рис. 1.

Составные части приёмного тракта

Ограничитель мощности (ОМ) и МШУ изготовлены на общем основании из материала МД40, выбор которого обусловлен необходимостью рассеивания тепла от ОМ. Ограничитель выполнен на GaAs диоде, работающем в пассивном режиме (без управляющего напряжения). В зависимости от уровня входной СВЧ мощно-



Рис. 1

Укрупнённая структурная схема ППМ X-диапазона

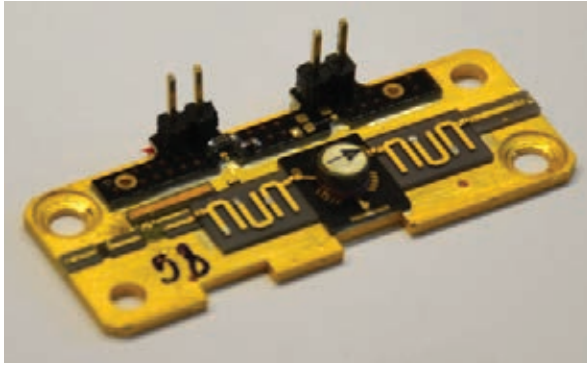


Рис. 2

Ограничитель мощности с МШУ

сти ОМ вносит потери от $L_{откр} = -0,3$ дБ до $L_{закр} = -25$ дБ. Испытания ОМ в составе ППМ показали, что при поступлении на вход приёмного устройства импульса мощностью $P_{вх} = 20$ Вт (при $\tau = 30$ мс, $Q = 2$), просачивающаяся мощность $P_{вых} < 100$ мВт [6, 7]. По результатам испытаний максимальная допустимая СВЧ мощность на входе приёмного канала составила 26 Вт. Внешний вид ГИС представлен на рис. 2.

Малошумящий двухкаскадный усилитель представляет собой GaAs монолитную интегральную схему (МИС). МИС имеет схему управления токами каскадов от 45 до 95 мА при напряжении питания 3 В, что позволяет выбирать рабочую точку транзисторных каскадов, обеспечивающую достижение компромисса между требованиями к динамическому диапазону и коэффициенту шума ППМ. В зависимости от выбранного режима работы суммарное изменение коэффициента шума ГИС варьируется от 1,6-1,7 дБ до 1,8-1,9 дБ, а коэффициента пере-

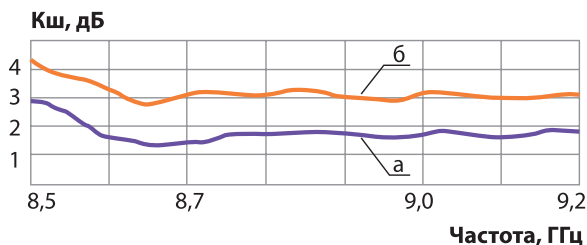


Рис. 3

Измеренный типовой коэффициент шума ГИС МШУ (а) и канала ППМ (б)

дачи – от 18-18,5 до 21-21,5 дБ. График частотной зависимости коэффициента шума ГИС МШУ и канала ППМ показаны на рис. 3. Подбор режима по току позволил реализовать компрессию коэффициента усиления ГИС МШУ $\Delta K_{ур.мшу} = 0,2-0,3$ дБ при уровне входной мощности $P_{вх} = -10$ дБм. Как будет показано далее, этого значения достаточно для получения суммарной компрессии ППМ $\Delta K_{ур.ппм} < 1,0$ дБ. Компрессия коэффициента усиления ГИС МШУ $\Delta K_{ур.мшу} = 1,0$ дБ достигается при $P_{вх} = -5,7$ дБм. Между полосно-пропускающими фильтрами (ППФ) в ГИС установлены микрополосковые вентили, обеспечивающие согласование и выравнивание амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) [8]. Результаты измерения фазо-частотной характеристики показали, что неравномерность ГИС МШУ составила $\Delta\varphi_{мшу} = \pm 2,5-4^\circ$. Статистическая закономерность, подтвержденная на 120 ГИС, показала, что электрическая длина МШУ при корректировке АЧХ вместе с ППФ уменьшается в среднем на 10 % и это необходимо учитывать при передаче изделий в производство.

Подавление на частотах зеркального канала приёма $F_{зк} = 6,1-6,4$ ГГц в ГИС МШУ составило 55-63 дБ. Для выполнения требований по подавлению зеркального канала приёма $L_{зк} > 60$ дБ, на входе МШУ применён резонатор в виде четвертьволнового шлейфа, увеличивающий на 10-15 дБ подавление зеркальной частоты и вносящий в рабочей полосе потери не более 0,1 дБ. Интермодуляционные искажения третьего порядка ГИС МШУ составили $IMP3 = 22,5-24,5$ дБм.

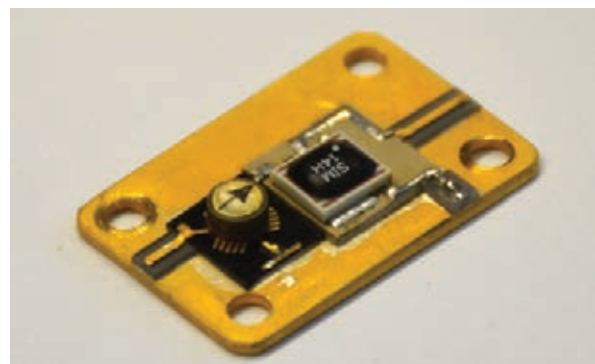


Рис. 4

ГИС смесителя

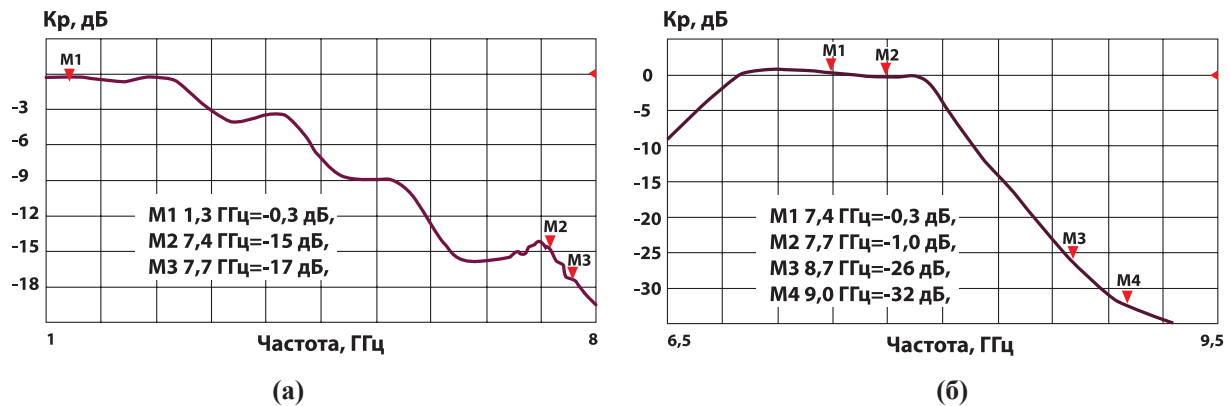


Рис. 5

АЧХ ППФ с рабочими частотами: (а) – 1,3 ГГц, (б) – 7,4-7,7 ГГц

Смеситель представляет собой гибридную схему, изображённую на рис. 4, на входе СВЧ сигнала установлен вентиль, обеспечивающий регулярность СВЧ тракта. Максимальная мощность сигнала на входе смесителя $P_c = +10$ дБм, мощность гетеродина $P_{гет.} = +17-20$ дБм. Исследование МИС различных производителей, использующих разные схемы смесителей, показали, что требования к смесителю, как преобразующему устройству, являются противоречивыми (минимальный коэффициент шума и максимальный уровень выходной линейной мощности) и выбор конструктивной и схемотехнической реализации смесителя является решением задач компромиссов.

Последующие измерения показали, что развязка между приёмным и передающими каналами определяется не развязкой в циркуляторе и их конструктивным взаимным расположением, а связью по цепи, являющейся общей для гетеродина приёмника и тракта передатчика. Поэтому схема смесителя была дополнена ППФ на частотах гетеродина, что обеспечило развязку более 20 дБ между приёмным и передающим каналом. Для обеспечения защиты от перегрузки усилителя промежуточной частоты сигналом гетеродина, необходима установка фильтра ПЧ ($F_{пч} = 1,3$ ГГц) с потерями $L < -0,5$ дБ. Использование ПАВ с $L_{пав} = -3,0 \dots -3,5$ дБ приводит к росту коэффициента шума ППМ на 0,2-0,3 дБ. Задача решена установкой двухзвенного фильтра на связанных линиях, выполненного на поликоровой подложке и

обладающего потерями $L_{ппф} = -0,3$ дБ при подавлении частот гетеродина $F_{гет} = 7,4-7,7$ ГГц более 15 дБ. Измеренная АЧХ фильтров изображена на рис. 5. В результате проведённых мероприятий компрессия коэффициента передачи в ГИС смесителя составляет $\Delta L_{см} < 0,3$ дБ. Экспериментально установлено, что сигнал гетеродина не оказывает влияние на шумы приёмника, если соотношение амплитуды сигнала и собственных шумов источника гетеродина превышает 75 дБ.

Усилитель промежуточной частоты состоит из двух каскадов усилителей, управляемого пятиступенчатого аттенюатора с минимальным дискретом 1 дБ и двух фильтров на ПАВ. Питание УПЧ $U_{пит} = +5$ В, $I_{пит} = 300$ мА, коэффициент усиления $K_{ур.пч} = 20-22$ дБ, регулируемый. Внешний вид усилителя представлен на рис. 6.

Первоначальные измерения динамического диапазона усилителя показали, что при максимально возможном уровне сигнала на входе УПЧ $P_{вх} = +3 \div 5$ дБм компрессия коэффициента усиления составляет $\Delta K_{ур} < 0,5$ дБ. При этом в усилителе замечено проявление нелиней-

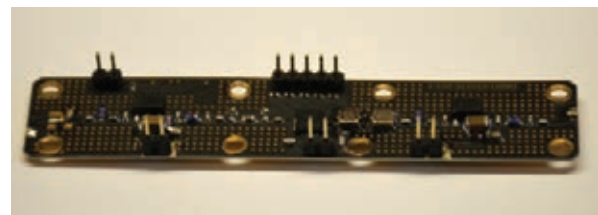


Рис. 6

Усилитель промежуточной частоты 1,3 ГГц

ности по напряжению питания. Исследованы следующие схемы вводов питания:

- с помощью индуктивностей 47 нГн – в этом случае при токе 150 мА/каскад создаётся падение напряжения 0,3-0,4 В, компрессия коэффициента усиления составляет $\Delta K_{ур} = 0,5$ дБ;

- с помощью индуктивностей 10 нГн (более толстая проволока) – падение напряжения 0,05 В, компрессия коэффициента усиления составляет $\Delta K_{ур} = 0,3$ дБ;

- с помощью параллельного LC-фильтра (три витка проволоки $Ш = 0,3$ мм и ёмкости 3,9 пФ) – падение напряжение отсутствует, компрессия коэффициента усиления составляет $\Delta K_{ур} < 0,25$ дБ.

Начальная фаза коэффициента передачи УПЧ имеет разброс в точке $\Delta\varphi = \pm 20^\circ$, большой разброс объясняется применением фильтров ПАВ разных производителей в результате их апробации. Значение разброса уменьшено до $\Delta\varphi = \pm 5^\circ$ по ансамблю при введении отбора фильтров на ПАВ по фазочастотным характеристикам.

Шесть приёмных каналов ППМ имеют общий выход на частоте 1,3 ГГц. Для суммирования сигнала ПЧ используются два сумматора на 3 внутри каждой половины модуля и один внешний на 2. Значения потерь в сумматорах соответственно 5 дБ и 3 дБ или 8 дБ для каждого канала приёма. Для подавления сигнала ПЧ в

каждом канале используется управление питанием УПЧ. Включенный и выключенный усилитель имеют разный $K_{СВН}_{Вых}$ 1,5 и 3,5 соответственно. Настройкой второго каскада по выходу удалось получить $K_{СВН}_{Вых} = 2,4$ в обоих состояниях, что также приводит к потерям сигнала при суммировании. Как изменение $K_{СВН}$ в различных состояниях УПЧ, так и большее значение $K_{СВН}_{Вых}$ УПЧ влияют на неравномерность и уровень коэффициента передачи сумматоров, которые могут меняться в зависимости от того какие из шести усилителей в данный момент включены или выключены. Лучший результат получается при включенных усилителях, каналы имеют максимальный коэффициент передачи и минимальную неравномерность в диапазоне частот, что облегчает достижение максимального динамического диапазона выходного каскада, так как коэффициент передачи можно регулировать во всех каналах модуля и получить параметр $IP3 = 22,5-25$ дБм. Решением здесь является либо установка вентиля на выходе каждого каскада УПЧ, либо использование ключа с переключением на нагрузку 50 Ом, имеющего хороший динамический диапазон на уровне сигнала 250-300 мВт и подавление сигнала ПЧ более 50 дБ. До установки развязки коэффициент передачи каналов составлял значе-

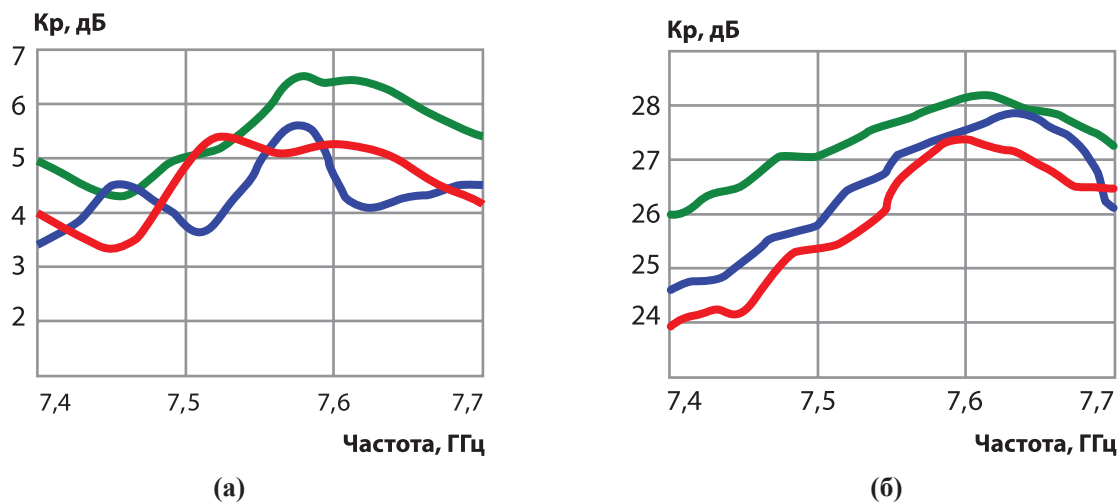


Рис. 7

Неравномерность коэффициента передачи 3-х каналов гетеродина:

(а) – после модуля ПУМ1, (б) – всего СВЧ тракта гетеродина

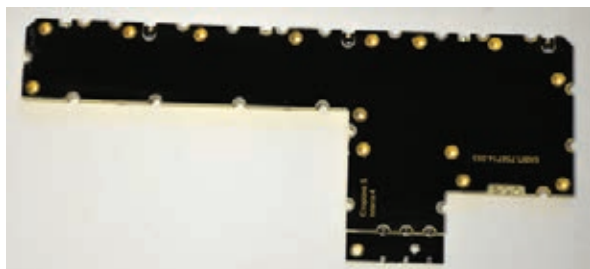


Рис. 8
Плата СВЧ и ПЧ тракта

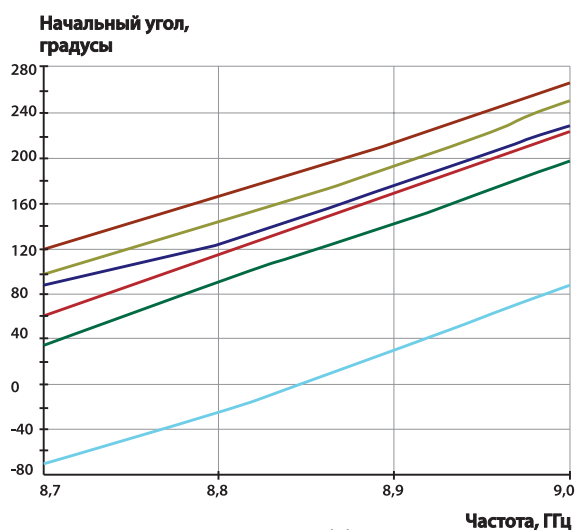
ние на 1-3 дБ меньше, а параметр интермодуляционных искажений $IP3 = 18-23$ дБм.

Подобная проблема существует и в тракте гетеродина, где сигнал с общего усилителя ПУМ1 делится на три канала без СВЧ развязки. Неравномерность деления коэффициента передачи в модуле гетеродина ПУМ1 показана на рис. 7а, а всего СВЧ тракта гетеродина на рис. 7б. За счёт отражения сигнала меняется не только амплитудно-частотная характеристика, влияющая на неравномерность сигнала на входе смесителя, но и фазо-частотная характеристика. Измерения показали, что без применения специальных мер в единичных образцах ППМ разброс фаз между каналами гетеродинов может достигать до $\Delta\varphi_k = \pm 17^\circ$, а неравномерность амплитуды сигнала гетеродина до $\Delta K_{yp} = 3-4$ дБ. Амплитуд-

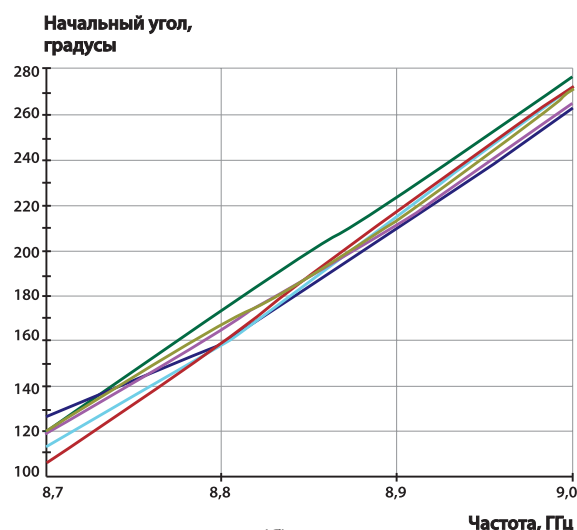
но- и фазо-частотная неравномерность сигнала гетеродина являются одним из слагаемых неравномерности электрической длины приёмного канала в целом.

Источником неравномерности в единичных случаях оказывается плата тракта СВЧ и ПЧ, изображённая на рис. 8.

Плата представляет собой четырёхслойную структуру, выполненную из двухслойных плат, соединённых между собой пайкой под прессом: 1-й слой общий, 2-ой – тракт промежуточной частоты 1,3 ГГц, 3-й – общий, 4-й – тракт гетеродина/передатчика. Некачественная сборка платы может привести к появлению резонансов и, как следствие, изменению АЧХ и ФЧХ СВЧ тракта. Исключить данную неопределённость можно при использовании многослойной платы и установкой СВЧ вентиляей. Управление фазой приёмных каналов осуществляется фазовращателем модуля ПУМ3, работающего в двух режимах приём/передача и хранящего данные для двух состояний. Начальная фаза всех приёмных каналов приводится к каналу, имеющему наибольший начальный угол, поправочные значения фаз хранятся в буфере ИС. Разность длин каналов выбиралась отрезком СВЧ кабеля в тракте гетеродина. Фазо-частотные характеристики шести каналов одного ППМ до и после «сведения» фаз представлены на рис. 9.



(а)



(б)

Рис. 9

Фазо-частотные характеристики модуля ППМ:

(а) – до сведения фаз, (б) – после сведения фаз

Электрические параметры приёмного канала и описание конструкции ППМ

СВЧ параметры приёмной части модуля: рабочий диапазон частот $F_C = 8,7 - 9,0$ ГГц, диапазон частот гетеродина $F_{ГЕТ} = 7,4 - 7,7$ ГГц, промежуточная частота $F_{ПЧ} = 1,3$ ГГц, полоса промежуточных частот $\Delta F_{ПЧ} = 38$ МГц, коэффициент шума $K_{ш} < 3,5$ дБ, коэффициент передачи $K_{ур} = 22-24$ дБ, верхняя граница линейности амплитудной характеристики $P_{ВХ. -1 дБ} > 0,1$ мВт, допустимый уровень входной импульсной СВЧ мощности $P_{ВХ. МАКС} > 20$ Вт (при $\tau = 30$ мс, $Q = 2$), подавление частоты зеркального канала приёма $L_{ЭК} > 60$ дБ, развязка между приёмным и передающим каналом $L_p > 20$ дБ, коэффициент стоячей волны по входу $KСВ < 1,5$, диапазон изменения амплитуды выходного сигнала $L_{АТТ} > 27$ дБ (минимальный разряд $L_d = 1$ дБ), диапазон изменения фазы выходного сигнала $\Delta\phi = 360^\circ$ (минимальный разряд $\Delta\phi_d = 5,6^\circ$), величина интермодуляционных искажений третьего порядка $IP3 > 22$ дБм, нелинейность фазово-частотной характеристики $\Delta\phi_{нел} < \pm 10^\circ$, разброс фаз между приёмными каналами $\Delta\phi_k < \pm 10^\circ$, подавление сигнала промежуточной частоты при включении выходного ключа $L_{к.пч} > 50$ дБ, питание модуля от источников постоянного тока $+30$ В, $+7$ В, -7 В.

ППМ представляет собой трёхэтажную конструкцию: два симметричных корпуса СВЧ ППМ, которые расположены с

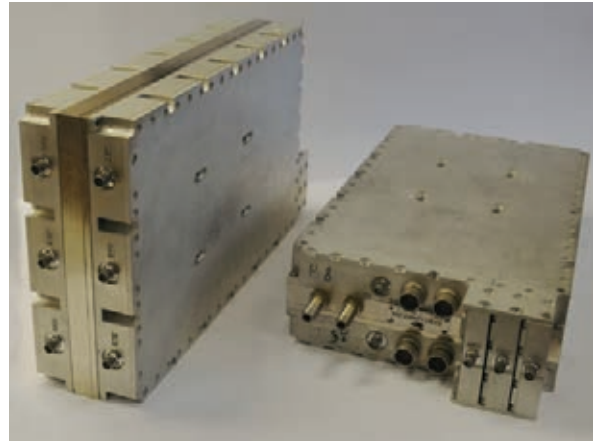


Рис. 10

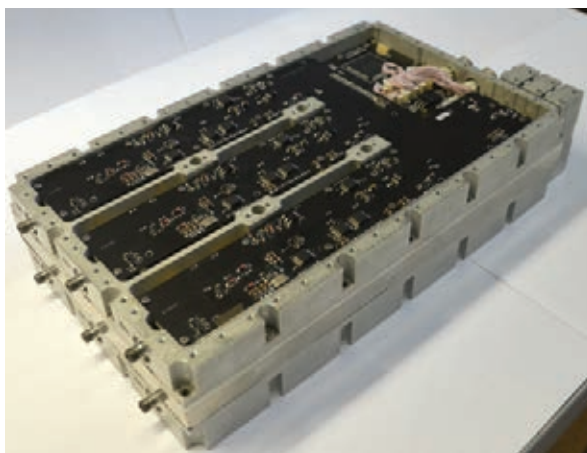
Внешний вид модуля ППМ

двух сторон на радиаторе жидкостного охлаждения. Габаритные размеры модуля $285 \times 150 \times 58$ мм, масса 4,6 кг. В корпусах СВЧ ППМ имеются четыре секции:

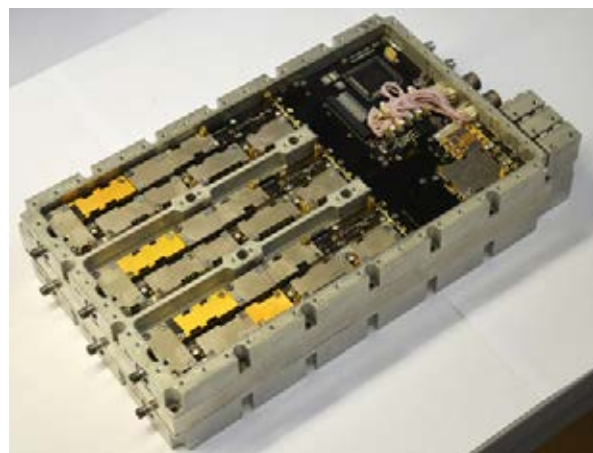
- три идентичных по конструкции секции, в которых расположены ГИС пары приёмник-передатчик;
- одна секция, в которой размещены платы СВЧ и ПЧ сумматоров, а так же плата с интегральной схемой (ИС) программируемой логики.

В каждом корпусе вторым этажом устанавливается многослойная текстолитовая плата с вторичными источниками питания, шинами управления каналами и обмена данными на базе ИС с программируемой логикой. Гибридные СВЧ сборки соединяются с платой питания и управления с помощью

двух сторон на радиаторе жидкостного охлаждения. Габаритные размеры модуля $285 \times 150 \times 58$ мм, масса 4,6 кг. В корпусах СВЧ ППМ имеются четыре секции:



(а)



(б)

Рис. 11

ППМ с открытой крышкой: (а) – с платой управления, (б) – без платы управления

вертикальных штыревых соединений. Электрическое соединение двух половин модуля осуществляется с помощью многожильного кабеля-перемычки и трёх внешних СВЧ сумматоров. ППМ имеет 6 входов/выходов СВЧ сигнала приёмника/передатчика [9], входы СВЧ сигнала гетеродина и передатчика, выход промежуточной частоты и разъём питания и управления программной логикой [5]. Герметизация корпусов – «сухая пайка». Внешний вид модуля показан на рис. 10. ППМ с открытой крышкой представлен на рис. 11.

Выводы

Приёмные каналы разработанных ППМ обладают следующими основными характеристиками: коэффициент шума $K_{ш} = 2,9-3,4$ дБ, коэффициент передачи $K_{ур} = 22,5-24,0$ дБ, нелинейность фазы приемного канала ППМ в рабочем диапазоне частот $\Delta\varphi_0 < \pm 10^\circ$, неидентичность фазовых состояний каналов ППМ по ансамблю $\Delta\varphi_K < \pm 10^\circ$, допустимая максимальная входная мощность $P_{ВХ.МАКС.} = 26$ Вт, подавление частоты зеркального канала $L_{ЭК} > 65$ дБ.

Проведённые исследования показали, что:

1. Для достижения нелинейности фазы приёмного канала ППМ в рабочем диапазоне частот $\Delta\varphi_0 < \pm 10^\circ$ и неидентичности фазовых состояний каналов ППМ по ансамблю $\Delta\varphi_K < \pm 10^\circ$ необходимо выполнение следующих условий:

- КСВ $< 1,3$ для СВЧ и ПЧ микромодулей;
- экранирование между микромодулями должно быть более 30 дБ;

- компрессия коэффициентов усиления СВЧ микромодулей должна быть менее 0,3 дБ, а всего приёмного СВЧ тракта менее 1,0 дБ.

2. Для достижения заданного уровня интермодуляционных искажений третьего порядка необходимо оптимизировать не только параметры МШУ, смесителя и УПЧ, но и ГИС тракта гетеродина.

3. Для исключения влияния сигнала гетеродина до уровня $P_{Г.ВХ} < -55$ дБм через тракт циркулятора необходимо не только выключать ВУМ на период приёма, но и устанавливать выключатель в СВЧ тракте передатчика с уровнем подавления $L_{КЛ} > 25$ дБ.

Литература

1. Активные фазированные решётки / под ред. Д. И. Воскресенского и А. И. Канащенкова. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.
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. 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.
4. 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.
5. Герасимов А. О., Зайцев Ю. П., Иванов К. А., Колковский Ю. В., Осиповский А. А., Перевезенцев А. В., 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.
6. Аболдуев И. М., Вальд-Перлов В. М., Вейц В. В., Герасимов А. О., Миннебаев В. М., Мочалов М. Н. 300-ваттная ГИС устройства защиты X-диапазона // Материалы IX научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА», г. Звенигород, 1-3 декабря 2010 г., с. 32.
7. Аболдуев И. М., Вальд-Перлов В. М., Вейц В. В., Гарбер Г. З., Герасимов А. О., Зубков А. М., Иванов К. А., Красильников В. Д., Миннебаев В. М., Черных А. В. МИС 10 Вт ограничителя СВЧ мощности на GaAs p-i-n диодах // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2011. – № 1 (226). – С. 27-35.
8. Герасимов А. О., Миннебаев В. М., Мочалов М. Н. Корректировка амплитудно-частотной характеристики малошумящего усилителя S-диапазона в условиях серийного производства // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2010. – № 1 (224). – С. 3-6.
9. Голик А. М., Емец В. Ф., Клейменов Ю. А., Левчук В. Б. Приёмопередающие модули активных

ФАР // Зарубежная радиоэлектроника. – 1993. – № 5. – С. 12-19.

References

1. *Aktivnye fazirovannye reshetki* [Active phased arrays]. Edited by D. I. Voskresenskogo and A. I. Kanaschenkova, Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004, 488 p.
2. Abolduev 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. Abolduev 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.
4. Vasilyev A. G., Kolkovsky Y. V., Korneev S. V., Dorofeev A. A., Minnebaev V. M. SiGe and GaN microwave devices for transceivers and transmitting modules. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2009, № 2, pp. 5-10.
5. Gerasimov A. O., Zaytsev Y. P., Ivanov K. A., Kolkovsky Y. V., Osipovsky A. A., Perevezencev A. V., Redka A. I., 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.
6. Abolduev I. M., Vald-Perlov V. M., Veits V. V., Gerasimov A. O., Minnebaev V. M., Mochalov M. N. *Materialy IX Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tverdotelnaya elektronika. Slozhnye funktsionalnye bloki REA»* [Proceedings of IX Science Conference «Solid-state electronics. Complex functional radar blocks»]. Zvenigorod, 1-3rd of December 2010, p. 32.
7. Abolduev I. M., Vald-Perlov V. M., Veits V. V., Garber G. Z., Gerasimov A. O., Zubkov A. M., Ivanov K. A., Krasilnikov V. D., Minnebaev V. M., Chernykh A. V. 10 W GaAs PIN diode microwave power limiter MIC. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2011, № 1, pp. 27-35.
8. Gerasimov A. O., Minnebaev V. M., Mochalov M. N. Adjustment of frequency response characteristic of S-band low noise amplifier in serial production. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2010, № 1, pp. 3-6.
9. Golik A. M., Emets V. F., Kleymenov Y. A., Levchuk V. B. Transceivers of active PAR. *Zarubezhnaya radioelektronika* [Foreign electronics], 1993, № 5, pp. 12-19.