УДК 621.396.677:621.382

2-КАНАЛЬНЫЙ АППМ ДЛЯ АФАР UHF-ДИАПАЗОНА: ПРИЁМНЫЙ ТРАКТ

**А.А. Осиповский, А.В. Перевезенцев, А.А. Ревонченков, Ан. В. Редька,
М.А. Шишков**

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

В статье представлены результаты разработки и измерений параметров приёмной части двухканального активного приёмо-передающего модуля (АППМ) UHF-диапазона. Приводятся конструкция, параметры, режимы работы, методика настройки. Исследованы факторы, влияющие на коэффициент шума приёмника, динамический диапазон по блокированию, восприимчивость по блокированию, динамический диапазон по внеполосным ИМП (интермодуляционные продукты), коэффициент передачи приёмного канала, величину интермодуляционных искажений третьего порядка (IPD3).

Ключевые слова: *арсенид галлия, нитрид галлия, активная фазированная антенная решётка, аналоговый приёмо-передающий модуль, мал шумящий усилитель, устройство защиты, интермодуляционные искажения*

Сведения об авторах: *Алексей Алексеевич Осиповский, alexos@pulsarnpp.ru; Александр Владимирович Перевезенцев, к.т.н., perevezencev_av@pulsarnpp.ru; Александр Анатольевич Ревонченков, revonchenkov_aa@pulsarnpp.ru; Андрей Владимирович Редька, redka_anv@pulsarnpp.ru; Михаил Александрович Шишков, shishkov@pulsarnpp.ru*

.....

2-CHANNEL ATRM FOR UHF AESA: RECEIVING CHANNEL

A.A. Osipovskiy, A.V. Perevezentsev, A.A. Revonchenkov, An. V. Redka, M.A. Shishkov

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

This paper presents the results of the designing and measurements of the receiving section of 2-channel UHF active transmit-receive module (ATRM). Structure, parameters, operation mode, tuning guidelines of the device are provided. We have studied the factors influencing the receiver noise figure, blocking dynamic range, blocking sensitivity, off-band intermodulation dynamic range, receiving channel gain, third-order intermodulation distortion (IPD3).

Keywords: *gallium arsenide, gallium nitride, active electronically scanned array, analog transceiver module, low-noise amplifier, power limiter, intermodulation distortion*

Authors: *Aleksey Alekseevich Osipovskiy, alexos@pulsarnpp.ru; Aleksandr Vladimirovich Perevezentsev, Candidate of Engineering Sciences, perevezencev_av@pulsarnpp.ru; Aleksandr Anatolievich Revonchenkov, revonchenkov_aa@pulsarnpp.ru; Andrey Vladimirovich Redka, redka_anv@pulsarnpp.ru; Mikhail Aleksandrovich Shishkov, shishkov@pulsarnpp.ru*

Введение

Одним из основных устройств современных радиолокационных систем для исследования поверхности Земли, систем контроля космического пространства являются активные фазированные решётки (АФАР), в которые помимо излучателей и фазовращателей входят активные элементы, СВЧ преобразователи и другие элементы пространственно-временной обработки, составной частью которых является АППМ [1]. При про-

ектировании модулей такого класса перед разработчиками стоит ряд проблем, требующих комплексного решения, а именно:

- обеспечение защиты приёмного тракта от синхронных и несинхронных помех высокого уровня;
- минимизация коэффициента шума приёмного канала;
- увеличение динамического диапазона приёмного канала;
- обеспечение высокого уровня фильтрации сигналов;

- увеличение КПД всего модуля;
- минимизация габаритных размеров при обеспечении безопасных тепловых режимов работы полупроводниковых приборов.

В последнее время при разработке и изготовлении, как отдельных элементов, так и приёмо-передающих модулей АФАР в целом [2,3] используют электронную компонентную базу на основе перспективных полупроводниковых материалов: арсенида галлия, кремний-германий, нитрид галлия [4,5]. Основным функциональным назначением АППМ являются усиление сигнала излучаемого зондирующего импульса, приём и усиление отражённого сигнала, защита входных каскадов МШУ от синхронных и несинхронных помех высокого уровня. Помехи создают на экране радиолокационной станции ложные отметки, не отличающиеся от отметок реальных целей, а также блокируют приёмный тракт и могут выводить из строя входные элементы. При действии таких помех, которые в свою очередь подразделяются на многократные и однократные ответные импульсные помехи, можно в значительной степени дезориентировать оператора и перегрузить систему обработки информации [6]. Несинхронные импульсные помехи создаются излучением радиоимпульсов в произвольные моменты времени, в общем случае не связанные с временным положением зондирующих импульсов.

Постановка задачи

Основная задача разработки – обеспечение заданных электрических параметров модуля, исследование факторов, влияющих на СВЧ параметры АППМ, создание методов измерения и настройки приёмного тракта АППМ, создание методов оперативной диагностики и выявление в процессе изготовления схемотехнических и конструктивно-технологических недостатков. В целях последующей постановки изделия в производство необходимо провести испытания АППМ и при необходимости, провести корректировку электрической схемы и конструкции.

Блок-схема и состав АППМ

АППМ является двухканальным устройством. В состав приёмного тракта каждого канала АППМ входят: полосно-пропускающий фильтр, циркулятор, устройство защиты, предварительный усилитель (ПУМ), полосно-пропускающий фильтр и выходной усилитель мощности. Состав передающего тракта: предварительный усилитель мощности, выходной усилитель мощности, вентиль, циркулятор и выходной фильтр. Питание и управление каналами приёма и передачи осуществляются с помощью платы питания и управления. Блок-схема одного канала АППМ представлена на рис. 1.

Рис. 1

Блок-схема одного канала АППМ UHF-диапазона

Описание приёмного тракта АППМ

Электрические параметры приёмного канала АППМ

СВЧ параметры приёмного тракта АППМ: рабочий диапазон частот $F_c = 430-440$ МГц, коэффициент передачи приёмного канала $K_{p, \text{прм}} = 35$ дБ, коэффициент шума $K_{ш} < 2,5$ дБ, динамический диапазон по блокированию не менее 70 дБ, восприимчивость по блокированию не менее 20 дБм, динамический диапазон по внеполосным ИМП не менее 90 дБ, неравномерность АЧХ приёмного канала не более 1 дБ в рабочей полосе частот, точка пересечения по IPD3 приёмного канала по выходу не менее 46 дБм, подавление сигналов паразитных полос приёма не менее 70 дБ, верхняя граница линейности амплитудной характеристики при $P_{\text{вх}} = 0,1$ мВт не более 1 дБ, допустимый уровень входной импульсной СВЧ мощности $P_{\text{вх. макс}} > 60$ Вт (при $\tau = 64$ мс, $Q = 2$), развязка между приёмным и передающим каналами $L_p > 20$ дБ, коэффициент стоячей волны по входу $K_{\text{СВ}} < 1,4$,

питание модуля от источников постоянного тока +48 В, +20 В, –12 В.

Составные части приёмного тракта

Блокированием радиоприёмника называется изменение уровня сигнала или отношения сигнал/шум на выходе радиоприёмника при действии радиопомехи, частота которой не совпадает с частотами основного и побочных каналов приёма радиоприёмника. Для обеспечения восприимчивости по блокированию АППМ на вход приёмного тракта устанавливают входной фильтр. Входной (выходной) полосно-пропускающий фильтр (ППФ) выполнен на объёмных резонаторах [7, 8], выбор которых обусловлен минимальными потерями – порядка 1 дБ в полосе пропускания 10 МГц и более 20 дБ вне рабочей полосы (отстройка 30 МГц) при входной СВЧ мощности более 60 Вт, что позволило обеспечить восприимчивость по блокированию более 20 дБм. Амплитудно-частотная характеристика фильтра представлена на рис. 2.

Рис. 2

АЧХ фильтра UHF-диапазона

Корпус ППФ изготовлен из латуни марки Л60 с последующим гальваническим покрытием на основе золота. Фильтр состоит из двух резонаторов, представляющих собой спирали, заземлённые на боковой

стенке, тем самым обеспечивающих необходимый отвод тепла. Габаритные размеры фильтра составляют 35x30x20 мм. Внешний вид фильтра представлен на рис. 3.

а)

б)

Рис. 3

ППФ UHF-диапазона на объёмных резонаторах: а) внешний вид; б) вид с открытой крышкой

В качестве развязки приёмного и передающего канала применяется ферритовый СВЧ циркулятор ФПЦНЗ-39-435Е5. Устройство защиты (УЗ) [9, 10] представляет собой ключ, работающий в активном режиме, выполненный на GaAs диодах производства АО «НПП «Пульсар». При прохождении СВЧ сигнала по каналу приёма диоды открыты и вносимые потери в тракт составляют $L_{\text{откр}} = -0,3$ дБ. В закрытом состоянии просачиваемая мощность с передатчика уходит в СВЧ нагрузку. Испытания УЗ в составе АППМ показали, что при поступлении на вход приёмного устройства им-

пульса мощностью $P_{\text{вх}} = 60$ Вт (при $\tau = 64$ мс, $Q = 2$) просачиваемая мощность составила $P_{\text{вых}} < 5$ мВт [10], при этом динамический диапазон по блокированию составил более 70 дБ. По результатам испытаний максимальная допустимая СВЧ мощность на входе приёмного канала составила 140 Вт.

Предварительный усилитель мощности (ПУМ), ППФ и выходной усилитель мощности (ВУМ) изготовлены на общем основании из материала МД40, выбор которого обусловлен необходимостью рассеивания тепла от мощных СВЧ транзисторов. Внешний вид микромодуля, включающий ПУМ, ППФ и ВУМ, представлен на рис. 4.

а)

б)

Рис. 4

Внешний вид микромодуля, включающий ПУМ, ППФ и ВУМ: а) без экранирующей крышки; б) с экранирующей крышкой

ПУМ представляет собой малошумящий усилитель, выполненный на основе GaAs транзистора производства АО «НПП «Пульсар», с платой питания и согласования. ПУМ настроен и согласован на минимальный коэффициент шума, в результате ток потребления составил 45 мА. ВУМ настроен и со-

гласован для обеспечения динамического диапазона по IPD3, где ток потребления составил порядка 95 мА при напряжении питания 5 В. Это позволило выбрать рабочую точку транзисторных каскадов, обеспечивающую достижение компромисса между требованиями к динамическому диапазону

и коэффициенту шума АППМ. При выбранном режиме работы ПУМ и ВУМ суммарное изменение коэффициента шума варьируется от 1,26 до 1,32 дБ, а коэффициента передачи – от 35 до 36 дБ в заданном диапазоне частот. График частотной зависимости коэффициента шума и коэффициента передачи МШУ показан на рис. 5.

Рис. 5

Измеренный график частотных зависимостей $K_{ш}$ и K_p микромодуля

Выбор режима каскадов ПУМ и ВУМ по постоянному току позволил реализовать компрессию коэффициента усиления ПУМ и ВУМ $\Delta K_{ур.мшу} = 0,2-0,3$ дБ при уровне входной мощности $P_{вх} = 10$ дБм. Этого значения достаточно для получения суммарной компрессии АППМ $\Delta K_{ур.ппм} < 1,0$ дБ. Между каскадами ПУМ и ВУМ установлены два полосно-пропускающих фильтра, выполненных на поверхностных акустических волнах (ПАВ), обеспечивающих дополнительную избирательность приёмника. При этом динамический диапазон по внеполосным ИМП составил более 90 дБ.

Точка пересечения интермодуляции третьего порядка по выходу АППМ [11] определяется методом подачи на вход приёмного тракта двух одинаковых по уровню мощности сигналов с частотами, отличающимися на 1 МГц (рис. 6). Из измеренной выходной характеристики производится расчёт мощности интермодуляционной составляющей третьего порядка по формуле

$$IP_3 = P_{out} + a/2,$$

где IP_3 – мощность точки пересечения интермодуляционных составляющих третьего порядка на выходе АППМ; P_{out} – среднеквадратическая выходная мощность (дБм) двух подаваемых сигналов; a – разность

(дБ) между уровнем подаваемых сигналов и уровнем самой большой интермодуляционной составляющей на входе [12].

При пересчёте параметров IP_3 составили более 46 дБм.

Рис. 6

Измерение интермодуляционных составляющих приёмного тракта АППМ

Управление и функциональный контроль модуля осуществляются по линии LVDS в асинхронном режиме со скоростью 2,5 Мбит/с. Модуль имеет собственную энергонезависимую память, в которой хранятся поправочные коэффициенты приёмного и передающего трактов в части АЧХ, группового времени задержки.

Конструкция АППМ

Корпус 2-канального АППМ изготовлен из сплава Д16Т с радиатором воздушной системы охлаждения, имеет габариты 160x50x280 мм и массу 5 кг. В корпусе СВЧ АППМ имеются четыре секции:

- две идентичных по конструкции секции, в которых расположены СВЧ каналы приёмник-передатчик;
- одна секция, в которой размещена плата управления и функционального контроля с интегральной схемой (ИС) программируемой логики;
- одна секция, в которой размещена плата питания и модуляции приёмного и передающего трактов.

В корпусе, вторым этажом, устанавливается многослойная текстолитовая плата управления каналами и обмена данными на базе ИС с программируемой логикой. УЗ и транзисторные сборки соединяются с платами питания и управления с помощью вертикальных штыревых разъёмов. АППМ имеет 6 входов/выходов СВЧ сигнала приёмника/передатчика, вход КС сигнала

и разъём питания и управления программной логикой. Герметизация корпусов – «сухая пайка». Внешний вид модуля показан на рис. 7. АППМ с открытой крышкой представлен на рис. 8.

Рис. 7
Внешний вид модуля АППМ

а)

б)

Рис. 8

АППМ с открытой крышкой: а – с платой управления, б – без платы управления

Выводы

Приёмные каналы разработанных АППМ обладают следующими основными характеристиками: коэффициент шума $K_{\text{ш}} = 2,0-2,2$ дБ, коэффициент передачи $K_{\text{пр}} = 34,5-36,0$ дБ,

неравномерность АЧХ приёмного канала 0,8 дБ, динамический диапазон по блокированию $D1 = 80$ дБ, восприимчивость по блокированию $N1 = 24$ дБм, динамический диапазон по внеполосной ИМП $D3 = 110$ дБ, точка пересечения ИМП-3 приёмного канала по входу $IMD3 = 47$ дБ, подавление сигналов паразитных полос приёма более 70 дБ, максимальный уровень сигнала на входе приёмного тракта в режиме передачи 60 Вт, максимальное значение КСВн (входные, выходные разъёмы предающего, приёмного трактов) менее 1,3.

Проведённые исследования показали, что:

1. Для достижения наименьшего значения коэффициента шума приёмного канала АППМ в рабочем диапазоне частот необходимо выполнение следующих условий:

– $КСВ < 1,3$ для устройств защиты и фильтрации;

– экранирование между микромодулями должно быть более 30 дБ.

2. Для достижения заданного уровня интермодуляционных искажений третьего порядка необходимо оптимизировать входные и выходные параметры ПУМ и ВУМ.

3. Для исключения влияния сигнала передающего тракта через тракт циркулятора необходимо выключать ПУМ и ВУМ передающего тракта на период приёма.

4. Для повышения КПД АППМ необходимо выключать ПУМ и ВУМ передающего тракта на период приёма или выключать ПУМ и ВУМ приёмного тракта на период передачи.

Литература

1. Активные фазированные решётки // Под ред. Д.И. Воскресенского и А.И. Канащенкова – М.: Радиотехника. – 2004. – 488 с.
2. Ионов Л.П., Колковский Ю.В., Малышев И.В., Миннебаев В.М., Мухин И.И., Репин В.В., Суслов А.А. Разработка МИС с использованием SiGe БиКМОП технологии для построения трактов ППМ АФАР // Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА «Пульсар-2007» / Материалы VI научно-технической конференции (21-23 марта 2007 г., г. Владимир) – Ч. 1. – С.102.
3. Васильев А.Г., Колковский Ю.В., Корнеев С.В., Дорофеев А.А. СВЧ приборы на SiGe и GaN – основа нового поколения СВЧ элементной базы для приёмопередающего модуля АФАР //

- 4-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения (20-21 мая 2009 г., г. Минск) – С. 91-93.
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. – Вып. 2 (222). – С. 5-10.
5. Аболдуйев И.М., Гладышева Н.Б., Дорофеев А.А., Матвеев Ю.А., Миннебаев В.М., Чернявский А.А. СВЧ транзистор средней мощности HEMT на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN // Тезисы докладов III-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (7-9 июня 2004 г., Москва). – Изд-во СПбГПУ. – С. 120.
6. Защита от радиопомех // Под ред. М.В. Максимова. – М.: Советское радио. – 1976. – 496 с.
7. Геворкян В.М., Перевезенцев С.А. Широкополосные полосо-пропускающие фильтры для трактов высокого уровня средней мощности // Материалы 25-й Международной Крымской конференции (6-12 сентября 2015 г., Севастополь). – С. 574-575.
8. В. Беседин. Полуволновый резонатор // *Радиомир КВ и УКВ.* – 2010. – № 10. – С. 28-34.
9. А.Г. Васильев, В.Н. Данилин, Т.А. Жукова. Новое поколение полупроводниковых материалов и приборов: через GaN к алмазу // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес.* – 2007. – № 4. – С. 68-76.
10. И.М. Аболдуйев, В.М. Вальд-Перлов, В.В. Вейц, Г.З. Гарбер, А.О. Герасимов, А.М. Зубков, К.А. Иванов, В.Д. Красильников, В.М. Миннебаев, А.В. Черных. МИС 10-Вт ограничителя СВЧ мощности на GaAs p-i-n диодах // *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы.* – 2011. – Вып. 1 (226). – С. 27-35.
11. Международный союз электросвязи. Процедура испытаний для измерения уровня точки пересечения третьего порядка (IP₃) приёмников радиоконтроля // Серия SM 1837.
12. Международный союз электросвязи. Процедура измерения приёмников // Серия SM 2125. – 2011. – С. 3-19.
2. Ionov L.P., Kolkovskiy Yu.V., Malyshev I.V., Minnebaev V.M., Mukhin I.I., Repin V.V., Suslov A.A. MIC design with SiGe BiCMOS for TRM AESA applications. Pulsar-2007. Solid-state electronics, complex functional blocks of radio-electronic equipment. Proceedings of V scientific and technical conference. Vladimir. 2007. Part 1. p.102.
3. Vasilyev A.G., Kolkovsky Y.V., Korneev S.V., Dorofeev A.A., Microwave SiGe and GaN devices as the foundation of a new generation of microwave electronic components for AESA transceiver module. 4th International scientific conference on military engineering, defense and security issues and the dual-use technologies. Minsk. 2009. pp.91-93.
4. Vasilyev A.G., Kolkovsky Y.V., Korneev S.V., Dorofeev A.A., Minnebaev V.M. SiGe and GaN microwave devices for transceiver and transmitting modules. Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices. 2009. No.2 (222), pp. 5-10.
5. Abolduev I.M., Gladysheva N.B., Dorofeev A.A., Matveev Yu.A., Minnebaev V.M., Chernyavskiy A.A. medium power microwave AlGaIn/GaN HEMT. Abstracts of the 3rd All-Russian conference «Gallium, indium and aluminum nitrides – structures and devices». 07-09.06.2004. Moscow. Published by SPbGPU. pp.120.
6. Protection from radio interference. Edited by M.V. Maksimov. Moscow. *Sovetskoye Radio.* 1976.
7. Gevorkyan V.M., Perevezentsev S.A., Broadband pass-band filters for medium power high channels. Proceedings of 25th International Crimea conference. Sevastopol. 2015. pp.574-575.
8. Besedin V. Half-wave resonator. *Radiomir KV and VHF.* 2010. No.10.
9. Vasilyev A.G., Danilin V.N., Zhukova T.A. New generation of semiconductor materials and devices: through GaN to diamond. Electronics: Science, Technology, Business. 2007. No.4. pp.68-76.
10. 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. Electronic engineering. Ser.2. Semiconductor devices. 2011, No. 1 (226). pp. 27-35.
11. The International Telecommunication Union. Test procedure for measuring the signal level in the 3-rd order intercept point (IP3) of the radio control receivers. Series SM 1837.
12. The International Telecommunication Union. Test procedure for measuring receivers. Series SM 2125. 2011. pp.3-19.

References

1. Active Phased Arrays. Edited by D.I. Voskresenskiy and A.I. Kanashchenkov – М.: Radiotekhnika. 2004. p.488.