АНТЕННЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ БЛОК ДЛЯ СПУТНИКОВОЙ АФАР X-ДИАПАЗОНА

© А. В. Белолипецкий, О. В. Борисов, Ю. В. Колковский, Г. В. Легай,
В. М. Миннебаев, Ал. В. Редька, Ан. В. Редька

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

В статье представлены результаты проектирования и изготовления антенного электронного блока (АЭБ), предназначенного для работы в составе активной фазированной антенной решетки (АФАР) бортового радиолокационного комплекса дистанционного зондирования Земли. Рабочий диапазон частот АЭБ $\Delta F = 9,3-9,8$ ГГц. Сектор углов электронного сканирования луча АФАР по азимуту $\pm 1,5$ град, по углу места ± 15 град. Ширина диаграммы направленности по азимуту в пределах 4-5 град, по углу места в пределах 3,8-4,5 град.

Ключевые слова: АФАР, приёмно-передающий модуль, диаграмма направленности, X-диапазон, антенный электронный блок

Сведения об авторах: Белолипецкий Алексей Владимирович, belolipetskiy_av@pulsarnpp.ru; Борисов Олег Валерьевич, 466@pulsarnpp.ru; Колковский Юрий Владимирович, д.т.н., профессор, kolk@pulsarnpp.ru; Легай Геннадий Вячеславович, legaj_gv@pulsarnpp.ru; Миннебаев Вадим Минхатович, к.т.н., minnebaev_vm@pulsarnpp.ru; Редька Алексей Владимирович, redka_av@pulsarnpp.ru; Редька Андрей Владимирович, redka_av@pulsarnpp.ru

ELECTRONIC ANTENNA UNIT FOR X-BAND SPACE APPLICATION AESA

A. V. Belolipetskiy, O. V. Borisov, Yu. V. Kolkovsky, G. V. Legai, V. M. Minnebaev,
Al. V. Redka, An. V. Redka

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

Results of design and manufacturing of electronic antenna unit for active electronically scanned antenna array (AESA) of onboard radar complex for the Earth remote sensing are given in this article. Electronic antenna operation frequency range $\Delta F = 9,3-9,8$ GHz. Electron beam angles sector in azimuth is $\pm 1,5$ deg, by elevation angle is ± 15 deg. Antenna beam width in azimuth is in the range of 4-5 deg, by elevation – in the range of 3,8-4,5 deg.

Keywords: AESA, transceiver module, antenna beam pattern, X-band, electronic antenna unit

Data of authors: Belolipetskiy Aleksey Vladimirovich, belolipetskiy_av@pulsarnpp.ru; Borisov Oleg Valerievich, 466@pulsarnpp.ru; Kolkovsky Yuri Vladimirovich, Sc.D., Prof., kolk@pulsarnpp.ru; Legai Gennadiy Vyacheslavovich, legaj_gv@pulsarnpp.ru; Minnebaev Vadim Minkhatovich, Ph.D., minnebaev_vm@pulsarnpp.ru; Redka Aleksey Vladimirovich, redka_av@pulsarnpp.ru; Redka Andrey Vladimirovich, redka_av@pulsarnpp.ru

Введение

Современные геоинформационные технологии значительно изменили понятие «карта местности» – теперь она воспринимается не статической картиной, а динамической базой данных о территории, до-

пускающей различные представления. Составляющие карту объекты в дополнение к пространственным характеристикам, определяющим их геометрию и взаимное расположение в заданной системе координат, приобретают также временные параметры,

описывающие изменение свойств объектов во времени, и тематические характеристики, уточняющие существенные свойства объектов. Наиболее эффективным способом получения первичной информации для перспективных геоинформационных систем является развёртывание космических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), обеспечивающих глобальный мониторинг в интересах поддержки принятия решений различного уровня и контроля их выполнения. Технически реализуемые приборы систем ДЗЗ перекрывают широкий спектр излучений от оптики до радиоволн, причём СВЧ диапазон в окнах прозрачности атмосферы (длины волн от единиц сантиметров до единиц метров) обладает рядом особенностей повышающих его информативность.

Основными преимуществами радиолокационных систем, по сравнению с оптическими, являются:

- независимость качества съёмки от погодных условий и условий освещённости;
- возможность наблюдения объектов, скрытых снежным или растительным покровом;
- широкие полосы обзора и большие дальности наблюдения;
- высокая точность определения пространственных характеристик объектов наблюдения;
- возможность выявления тематических (поляриметрических, резонансных) характеристик объектов наблюдения;
- перспектива построения многопозиционных систем, в которых передатчики и приёмники размещаются на разных носителях и образуют 3D-информационное поле.

В настоящее время одним из наиболее эффективных и перспективных видов дистанционного зондирования Земли является радиолокационный мониторинг. Для этих целей используются радиолокационные средства, имеющие в своём составе радиолокаторы с синтезированной апертурой. Радиолокационные системы ДЗЗ с синтезированием апертуры, способны формировать радиолокационные изображения (РЛИ) близкие по качеству к оптическим. В свою

очередь, в составе таких локаторов всё чаще используются активные фазированные антенные решётки (АФАР) [1-3].

Использование АФАР приносит и свои преимущества наблюдения: это в первую очередь достаточно быстрое геометрическое перенаправление излучаемого сигнала и возможность формирования нескольких диаграмм направленности, позволяющее одновременно наблюдать существенно разнесённые на территории объекты.

В активной фазированной антенной решётке каждый элемент решётки или группа элементов имеют свой собственный передатчик, приёмник, а также устройства управления фазой сигнала – фазовращатели и устройства управления амплитудой сигнала – аттенюаторы. В качестве примера таких систем с АФАР можно назвать аппараты TerraSAR-X производства ф. Astrium (Германия) и Cosmo SkyMed производства ф. Thales Alenia Space (Италия).

Основными составляющими элементами таких антенных решёток являются антенные модули с заданными периметром излучающей решётки и шагом одиночных излучателей. В состав таких модулей обычно входят твердотельные приёмопередающие модули, вторичные источники питания, модули предварительного усиления и задержки, антенные решётки (микрополосковые или волноводно-щелевые), а также комплекты СВЧ кабелей и кабельные сборки питания и управления.

Постановка задачи

Целью настоящей работы является разработка антенного электронного блока для спутниковой АФАР X-диапазона, имеющего следующие характеристики:

- тип антенной решётки АЭБ – плоская прямоугольная;
- размеры излучающей апертуры: по продольной оси X_B – 379,2 мм, по поперечной оси Y_B – 368 мм;
- число излучателей АЭБ (приёмопередающих каналов ППМ) – 16;

– количество формируемых антенной лучей на приём и передачу – 1;

– сектор углов электронного сканирования луча АФАР: по азимуту (в сечении по длинной стороне излучающего полотна) $\pm 1,5$ град, по углу места (в сечении по короткой стороне излучающего полотна) ± 15 град;

– относительный уровень боковых лепестков диаграммы направленности АЭБ в полосе частот: при установке луча по нормали к плоскости не более минус 12 дБ, во всём секторе сканирования не более минус 11 дБ.

Ширина ДН АЭБ на приём и передачу определяется режимом работы бортового радиолокационного комплекса (БРЛК) и направлением главного лепестка диаграммы направленности:

– ширина ДН по азимуту в пределах $4 \div 5$ град;

– ширина ДН по углу места в пределах $3,8 \div 4,5$ град.

Поляризация режимов работы на передачу и приём (передача/приём): Вертикальная/Вертикальная, Горизонтальная/Горизонтальная, Вертикальная/Горизонтальная, Горизонтальная/Вертикальная, Горизонтальная/(Горизонтальная + Вертикальная), Вертикальная/(Вертикальная + Горизонтальная).

Уровень кроссполяризационной развязки в максимуме диаграммы направленности в секторе углов сканирования в рабочей полосе частот не более минус 25 дБ.

Структурная схема и состав антенного электронного блока

Структурная схема АЭБ с устройством управления представлена на рис. 1.

В состав антенного электронного блока входят следующие основные узлы:

– восемь 2-канальных приёмопередающих модулей, передающий канал, который спроектирован на основе GaN транзисторов [4] с выходной мощностью более 10 Вт на канал [5];

– 2 делителя/сумматора на 8 для распределения излучаемых и принимаемых СВЧ сигналов, а также тракта контрольного сигнала;

– вторичный источник питания (ВИП);

– 2 групповых излучателя ГИ8 – микрополосковые антенные решётки, предназначенные для излучения сигнала и приёма отражённого;

– кабельная сеть, включающая СВЧ кабельную сеть, кабели подачи питания и кабели сети управления.

Двухканальный двухполяризационный приёмопередающий модуль разработан на

Рис. 1

Блок-схема антенного электронного блока с устройством цифрового управления (УПР), работающим от персонального компьютера (ПК)

базе GaN HEMT и предназначен для работы в импульсном симплексном режиме со скважностью $Q=14$. Использование нитрид-галлиевых приборов обусловлено преимуществами, описанными в [4-13].

НПП «Пульсар» обладает многолетним опытом разработки и изготовления приёмопередающих модулей, в том числе для АФАР, с использованием активных и управляющих СВЧ элементов, изготовленных на различных полупроводниковых материалах [14, 15].

В разработанном ППМ фазовращатели для осуществления управления фазой СВЧ сигналов установлены в каждом приёмном и передающем каналах. Структурная схема ППМ такова, что используемые в передающем канале дискретные аттенюаторы и фазовращатели, а также предварительный усилитель мощности, также входят и в состав приёмных трактов ППМ, образуя аналог двунаправленного усилителя с изменением направления прохождения сигнала аналогично устройству типа «core-chip» [5].

Схемотехнически делитель/сумматор изготовлен на плате с синфазными делителями на основе мостов Вилкинсона [16]. Внешний вид делителя/сумматора на 8 представлен на рис. 2.

Представленная на рис. 2 плата выполнена на основе диэлектрического материала RO4003, расчёт сумматора проведён с акцентом на амплитудно- и фазо-частотную идентичность всех 8-и каналов изделия. Делитель/сумматор на 8 физически разделён на 2 части: первая отвечает за переда-

ющий и приёмный сигналы (тракты), вторая является элементом тракта калибровки (контрольного сигнала).

В качестве излучающей части в составе модуля АЭБ используются 2 групповых излучателя ГИ8, изображённые на рис. 3.

Каждый групповой излучатель предназначен для работы на группу из 4-х двухканальных приёмо-передающих модулей. Конструктивно ГИ8 представляет собой сборку из 3-х частей:

- нижняя плата с делителями/сумматорами СВЧ сигнала с площадками под разъёмы и щелевыми переходами;
- промежуточная часть в виде решётки из диэлектрика;
- излучающая/принимающая часть полотно с излучателями (патчами).

Расчёт групповых излучателей и их изготовление выполнены АО «РТИ». В результате этой работы в АО «НПП «Пульсар» были переданы опытные образцы групповых излучателей.

Излучатель состоит из двух многослойных плат на основе диэлектрических пластин RO4003 (верхней и нижней) и металлической платформы (рис. 3). Металлическая платформа является конструктивным элементом, к ней крепятся обе многослойные платы на основе диэлектрических пластин RO4003 (диэлектрическая проницаемость 3,38, тангенс угла потерь 0,0023) с помощью винтов M2 и втулок, обеспечивающих получение требуемых расстояний между пластинами и металлической плат-

Рис. 2

Внешний вид делителя/сумматора на 8 и СВЧ платы, входящей в его состав

Рис. 3

Внешний вид излучающей решётки АЭБ на основе 2-х групповых излучателей ГИ8

формой, а также обеспечивается с её помощью крепёж двух коаксиальных врубных разъёмов каждого излучателя. Металлическая платформа также является основой для установки ППМ, которые соединены с антенной врубными разъёмами.

Ключевые показатели для излучателя: эффективность, направленные свойства, полоса пропускания и поляризационная чистота. Последний из них – наиболее трудно реализуемое требование, так как двойные поляризованные РСА системы могут требовать от излучателя уровня кроссполяризации менее минус 30 дБ. Сами по себе отдельные накладки и близко не могут обеспечить выполнение этого требования, поэтому должны использоваться дополнительные методы.

Один подход – использование «последовательного вращения» соседних излучателей, чтобы ослабить их паразитное излучение. Для апертурно связанных накладок было найдено, что только конструкция, в которой накладки являются зеркальными относительно обеих основных плоскостей, обеспечивает взаимно-поляризационное подавление без возбуждения нежелательных дифракционных лепестков в диаграмме излучателя.

Полученные излучатели прошли входной контроль, который осуществлялся проведением измерений коэффициента стоячей волны от частоты (параметр S11 и S22) для каждого из двух входов излучателя (рис. 4) и СВЧ характеристик в безэховой камере (БЭК) в дальней зоне (рис. 5).

Рис. 4

Результат измерений КСВ группового излучателя ГИ8 по 2 входам-выходам

Рис. 5

Результат измерения диаграммы излучателя
(слева – в азимутальной плоскости, справа – в угломестной плоскости)

Как видно из рис. 4 и рис. 5:

- излучатель обладает КСВН менее 1,5 в полосе частот более 1200 МГц по каждому из двух входов;
- ширина лепестка в азимутальной плоскости составляет 5-6 градусов, а в угломестной плоскости около 8 градусов. Такое значение ширины главного лепестка в угломестной плоскости объясняется тем, что при измерении диаграммы направленности антенны СВЧ сигнал подавался на половину излучателей решётки АЭБ (4 ППМ вместо 8). При работе в

штатном режиме в составе модуля два групповых излучателя устанавливаются вместе и формируют один луч. В такой конфигурации излучатель становится симметричным (16x16 излучающих патчей вместо 16x8 на одном ГИ8).

Результаты измерения изменения амплитуды главного лепестка и уровня боковых лепестков печатного излучателя по горизонтальной и вертикальной поляризации в диапазоне частот приведены на рис. 6.

Таким образом, измеренные характеристики групповых излучателей подтвер-

(а)

(б)

Рис. 6

Изменение амплитуды главного лепестка (а) и уровня боковых лепестков (б) печатного излучателя по входу H (горизонтальная поляризация – синяя линия) и входу V (вертикальная поляризация – красная линия) в диапазоне частот

дили удовлетворительное совпадение с расчётными параметрами, а сами ГИ8 признаны годными для проведения дальнейших испытаний в составе антенного блока.

В состав АЭБ входит вторичный источник питания. Входное напряжение источника питания $U_{вх}=60$ В. Разработанный для АЭБ источник питания обеспечивает приёмо-передающие модули всеми необходимыми напряжениями питания, а также имеет вход для осуществления управления.

Результаты измерений антенного электронного блока

В АО «НПП «Пульсар» был разработан и изготовлен антенный электронный блок, внешний вид которого представлен на рис. 7.

Измерения разработанного антенного блока в АО «НПП «Пульсар» проводились в БЭК. Оборудование и разработанное специальное программное обеспечение позволяет производить два вида измерений:

- 1) измерение диаграммы направленности антенны в дальней зоне (рис. 8);
- 2) проведение измерений амплитудно-фазовых характеристик модулей с использованием планарного сканера с дальнейшим математическим пересчётом данных в дальнюю зону и построением диаграммы направленности измеряемого изделия (рис. 9).

Первый вид измерений позволяет получить данные для элементов антенных решёток, дальняя зона для которых не превышает 8 метров. Программное обеспечение этих измерений позволяет задавать необходимый сектор сканирования и шаг сетки сканирования. Опорно-поворотное устройство, предназначенное для осуществления измерений, позволяет устанавливать на свою платформу изделия весом до 90 кг. Устройство имеет отдельный модуль управления, синхронизированный с векторным анализатором цепей и управляющим компьютером.

Представляемый в результате измерений файл позволяет проводить анализ полученных данных независимо от процесса измерений. Имеется возможность пройти по всей сетке частот, проконтролировав тем самым изменение амплитуды и ширины главного лепестка и амплитуды и положения боковых лепестков диаграммы направленности.

Второй вид измерений позволяет проводить анализ СВЧ характеристик модулей, размеры которых существенно выше разрешающей способности дальней зоны.

Результаты измерений выводятся на экран как в виде 3D модели, отображающей амплитудно-фазовое распределение, так и в виде данных математического пересчёта в дальнюю зону.

Рис. 7

Внешний вид АЭБ со стороны аппаратуры

Рис. 8

Интерфейс ПО для проведения измерений в дальней зоне

Таким образом, в БЭК АО «НПП «Пульсар» были проведены измерения СВЧ характеристик изготовленного антенного электронного блока. Результаты измерений приведены на рис. 10.

Как видно из полученных диаграмм, усиление в максимуме диаграммы направлен-

ности составило не менее 51 дБ, ширина главного лепестка – не более 4,6°, уровень боковых лепестков – не более 15 дБ. Измерения проводились в секторе $\pm 90^\circ$.

Полученные результаты полностью подтверждают проведённое ранее математическое моделирование составных частей

Рис. 9

Интерфейс ПО для проведения измерений планарным сканером

Рис. 10

Результаты измерения диаграммы направленности антенного электронного блока в дальней зоне

изделия и позволяют с уверенностью говорить о правильности выбранных схемотехнических и конструктивных решений.

В настоящее время ведутся работы по осуществлению эксперимента с электронным сканированием лучом – проведение сканирования лучом за счёт управления им с помощью фазовращателей, входящих в состав каждого передающего и приёмного каналов. Для этого дополнительно изготавливается макетный модуль управления антенным электронным блоком и рассчитываются константы, необходимые для управления фазовращателями во всех приёмопередающих модулях.

Выводы

Разработаны и изготовлены составные части антенного электронного блока (приёмопередающие модули, модуль сумматора/делителя на 8, вторичный источник питания, низкочастотная и высокочастотная кабельные сети) и сам антенный электронный блок для АФАР радиолокационного комплекса.

Показано, что проведённые измерения групповых излучателей ГИ8 подтверждают результаты компьютерного моделирования.

Проведённые измерения диаграммы направленности АЭБ на приём и передачу в безэховой камере подтверждают пра-

вильность выбранных схемотехнических и конструктивных решений как в части микрополосковой антенны, так и в части приёмопередающих модулей.

Разработанный технологический маршрут изготовления антенного блока основан на базовых технологических процессах НПП «Пульсар» и может быть использован для проектирования антенных модулей АФАР различного назначения

Литература

1. Вендик О. Г., Парнес М. Д. Антенны с электрическим сканированием. – 2001. – 252 с.
2. Неронский Л. Б., Михайлов В. Ф., Брагин И. В. Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой: учеб. пособие. – СПб.: СПбГУАП, 1999. – 220 с.
3. Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования // Под ред. В. С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2010.
4. Колковский Ю. В., Миннебаев В. М. Применение GaN устройств в условиях космического пространства // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2014. – № 2 (233). – С. 20-27.
5. Колковский Ю. В., Миннебаев В. М., Никольская Ю. О., Редька А. В. Двухканальный приёмопередающий модуль для АФАР X-диапазона на широкозонных полупроводниковых приборах // Материалы

- международной конференции «Микроэлектроника 2015», 2015, с. 192-196.
6. Аболдуйев И. М., Гарбер Г. З., Зубков А. М., Иванов К. А., Колковский Ю. В., Красильников В. Д., Миннебаев В. М. Температурная зависимость параметров мощных полевых транзисторов на основе нитрида галлия и алмаза // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2015. – № 1 (235). – С. 18-25.
 7. Kozlov N. F., Sinkevich V. F., Vashenko V. A. Isothermal Current Instability and Local Breacdown in GaAs FET // Electronic Letter, 1992, t. 28, № 13, pp. 1265-1267.
 8. Damian C., Gelerman D. A new generation of Gallium Nitride (GaN) based Solid State Power Amplifiers for Satellite Communication // Copyright Advantech Wireless Inc., 2012.
 9. Cha S. et. al. Wideband AlGaIn/GaN HEMT Low Noise Amplifier For Highly Survivable Receiver Electronics // IEEE MTT-S Digest 2004.
 10. J.C. de Jaeger, et al. Noise Assessment on AlGaIn/GaN HEMTs on Si or SiC substrates: Application to X-band Low Noise Amplifiers // Proceedings of the 13th GAAS Symposium, Paris, 2005.
 11. Груздов В. В., Герасимов А. О., Миннебаев В. М., Перевезенцев А. В. Вопросы устойчивости ППМ на GaN к входной СВЧ мощности // «Мокеровские чтения». Труды 7-й международной научно-практической конференции по физике и технологиям наноструктурной СВЧ электроники. – М.: НИЯУ МИФИ, 2016. – С. 41-42.
 12. Аболдуйев И. М., Гарбер Г. З., Зубков А. М., Иванов К. А., Колковский Ю. В., Миннебаев В. М., Редька А. В., Ушаков А. В. Импульсный режим работы мощных СВЧ гетеро-полевых AlGaIn/GaN транзисторов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2012. – № 1 (228). – С. 48-53.
 13. Герасимов А. О., Синкевич В. Ф., Миннебаев В. М., Редька А. В. Импульсный усилитель мощности X-диапазона на GaN СВЧ транзисторах: опыт изготовления // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2012. – № 1 (228). – С. 30-37.
 14. Васильев А. Г., Колковский Ю. В., Корнеев С. В., Дорофеев А. А., Миннебаев В. М. SiGe и GaN приборы для приемопередающих и передающих модулей // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2009. – № 2 (223). – С. 5-10.
 15. 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.
 16. Том Петтис Сложение мощности на УКВ, QEX, январь 1990, с. 13-14.

References

1. Vendik O. G., Parnes M. D. *Antenny s elektricheskimi skanirivaniem* [Electronically scanned antennas]. 2001, 252 p.
2. Neronsky L. B., Mikhailov V. F., Bragin I. V. *Mikrovolnovaya apparatura distantsionnogo zondirovaniya poverkhnosti Zemli i atmosfery. Padiolokatory s sintezirovannoy aperturoy* [Microwave equipment for Earth surface and atmosphere remote sensing. Synthetic aperture radars]. Saint-Petersburg, SUAI Publ., 1999, 220 p.
3. Verba V. S., Neronsky L. B., Osipov I. G., Turuk V. E. Space radar systems for Earth remote sensing // Ed. by V. S. Verba. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010.
4. Kolkovsky Yu. V., Minnebaev V. M. Application of GaN devices in space environment. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2014, № 2 (233), pp. 20-27.
5. Kolkovsky Yu. V., Minnebaev V. M., Nikolskaya Yu. O., Redka A. V. X-band AESA dual-channel transceiver module based on wideband gap semiconductor devices. *Materialy mezdunarodnoy konferentsii «Mikroelektronika 2015»* [Proceedings of International Conference «Microelektronika 2015»], 2015, pp. 192-196.
6. Abolduev I. M., Garber G. Z., Zubkov A. M., Ivanov K. A., Kolkovsky Yu. V., Krasilnikov V. D., Minnebaev V. M. The microwave parameters temperature dependence of the GaN and diamond power FETs. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2015, № 1 (235), pp. 18-25.
7. Kozlov N. F., Sinkevich V. F., Vashenko V. A. Isothermal Current Instability and Local Breacdown in GaAs FET // Electronic Letter, 1992, t. 28, № 13, pp. 1265-1267.
8. Damian C., Gelerman D. A new generation of Gallium Nitride (GaN) based Solid State Power Amplifiers for Satellite Communication // Copyright Advantech Wireless Inc., 2012.
9. Cha S. et. al. Wideband AlGaIn/GaN HEMT Low Noise Amplifier For Highly Survivable Receiver Electronics // IEEE MTT-S Digest 2004.
10. J.C. de Jaeger, et al. Noise Assessment on AlGaIn/GaN HEMTs on Si or SiC substrates: Application to X-band Low Noise Amplifiers // Proceedings of the 13th GAAS Symposium, Paris, 2005.

11. Gruzlov V. V., Gerasimov A. O., Minnebaev V. M., Perevezentsev A. V. Issues of GaN-based TRM resistance to microwave input power. «Mokerovskie chteniya». *Trudy 7 mezdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii po fizike i tekhnologiyam nanostrukturnoy SVCH elektroniki* [«Mokerovskie chteniya». Proceedings of 7-th International Science Conference on Physics and Technology of Microwave Nanoelectronics]. Moscow, NRNU MEPhI Publ., 2016, pp. 41-42.
12. Abolduev I. M., Garber G. Z., Zubkov A. M., Ivanov K. A., Kolkovsky Yu. V., Minnebaev V. M., Redka A. V., Ushakov A. V. The pulse mode operation of the microwave power AlGaIn/GaN FETs. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2012, № 1 (228), pp. 48-53.
13. Gerasimov A. O., Sinkevich V. F., Minnebaev V. M., Redka A. V. X-band power pulsed amplifier on base of GaN microwave transistors: manufacture experience. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2012, № 1 (228), pp. 30-37.
14. Vasilyev A. G., Kolkovsky Yu. V., Korneev S. V., Dorofeev A. A., Minnebaev V. M. SiGe and GaN heterostructure microwave devices for transmitting and receiving modules. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2009, № 2 (223), pp. 5-10.
15. 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.
16. Tom Pettis Hy-Brid Hi-Power, QEX, Jan 1990, pp. 13-14.