

В. В. Груздов¹¹ АО «Научно-производственное предприятие «Пульсар»»

СЛОЖНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ БЛОКИ СВЧ РЭА

В настоящей работе рассмотрены некоторые СВЧ сложные функциональные блоки РЭА, разработанные в АО «НПП «Пульсар»». Приведены функциональные или структурные схемы и параметры шести СВЧ-модулей и блоков, применяющихся в радиолокационной аппаратуре X- и S-диапазонов частот. Рассмотрены переключающие устройства X-диапазона на основе полупроводниковых приборов, а также СВЧ-генераторы на диэлектрических резонаторах.

Ключевые слова: *приемо-передающие модули, сверхширокополосный усилитель мощности, передающий тракт шестиканального ППМ для АФАР X-диапазона, переключающие устройства X-диапазона, приемные тракты ППМ, СВЧ-генераторы на диэлектрических резонаторах.*

Введение

Качественно новый уровень современной СВЧ-радиоэлектроники обеспечивается специализированной ЭКБ, состоящей из функционально-завершенных подсистем – СВЧ интегрированных функциональных модулей на основе нового полупроводникового материала – нитрида галлия [1–3]. Это, прежде всего, приемо-передающие модули (ППМ), обеспечивающие реализацию активных фазированных антенных решеток (АФАР), которые в настоящее время широко применяются в радиоэлектронных системах (РЭС) радиолокации и связи.

Наибольшими преимуществами СВЧ-приборы на нитриде галлия обладают при использовании в космических системах, работающих в условиях воздействия факторов космического пространства [2].

При создании ППМ используются преимущества нитрид-галлиевых СВЧ-транзисторов по сравнению с арсенид-галлиевыми с более высокими:

- рабочими температурами;
- рабочим напряжением;
- радиационной стойкостью.

Сравнение зависимости от температуры уровня выходной мощности и коэффициента передачи нитрид-галлиевых и арсенид-галлиевых транзисторов с одинаковой шириной затвора показывает, что рабочая температура активной области СВЧ-транзистора может быть увеличена с 90 до 150 °С [4]. Транзисторы на нитриде галлия представляют в первую очередь интерес как мощные СВЧ-приборы [5, 6]. Но нитрид-галлиевые структуры весьма перспективны и для малошумящих транзисторов. Нитрид-галлиевые транзисторы

устойчивы к воздействию уровней СВЧ-мощности до 50 Вт, что позволяет применять их в приемных устройствах радиолокационных станций без устройств защиты [7].

Другим преимуществом применения нитрид-галлиевых СВЧ-транзисторов в ППМ АФАР является более высокий коэффициент полезного действия транзисторных каскадов по сравнению с арсенид-галлиевыми.

Важнейшей задачей при создании современных РЭС, использующих сложные кодированные сигналы, является реализация длинно-импульсных режимов работы.

В настоящей работе рассмотрены некоторые СВЧ сложные функциональные блоки РЭА, разработанные в АО «НПП «Пульсар»»

Двухканальный нитрид-галлиевый приемо-передающий модуль X-диапазона частот [8]

Приемопередающий модуль (ППМ) является ключевым элементом обработки и формирования сигнала в АФАР и выполняет, как правило, следующие функции:

- прием и передачу СВЧ-сигналов;
- преобразование СВЧ-сигнала;
- обеспечение частотной избирательности;
- регулировку амплитуды и фазы принимаемых и излучаемых СВЧ-сигналов.

Приемо-передающий модуль представляет собой двухканальный модуль с возможностью переключения поляризации излучаемого и принимаемого сигналов «1 вход–4 выхода», предназначенный для включения в состав приборов СВЧ-тракта для бортового радиолокационного комплекса.

Выходной каскад передающих каналов ППМ построен на мощных нитрид-галлиевых транзисторах. Они позволяют обеспечить заданный уровень выходной мощности в рабочей полосе частот с достаточным уровнем коэффициента полезного действия (КПД).

Структурная схема ППМ построена таким образом, что используемые в передающем канале цифровые аттенюаторы, фазовращатели и предварительный усилитель мощности входят в состав приемных трактов ППМ. Функциональная схема ППМ представлена на рис. 1.

Для управления переключением поляризации предусмотрен ключ, построенный на основе GaAs р-і-п диодов. Аналогичный ключ используется для осуществления переключения трактов приема и передачи.

Модуль включает в себя канал контрольного СВЧ-сигнала.

Режим работы ППМ симплексный. Для обеспечения данного вида функционирования необходимо использовать «защитные интервалы» между включением приемного тракта и выключением передающего.

Разработанный ППМ обладает следующими основными характеристиками:

- диапазон рабочих частот – 9350–9750 МГц;
- выходная импульсная мощность – не менее 8 Вт;
- неравномерность выходной мощности – не более 2,0 дБ.

Сверхширокополосный усилитель мощности S-диапазона на основе GaN-транзисторов [9]

Конструктивно модуль состоит из:

- входного вентиля;
- предварительного усилителя;
- усилителя мощности;
- вторичного источника питания (ВИП).

Структурная схема СВЧ-модуля показана на рис. 2.

В выходном и предварительном каскадах СВЧ-модуля ВУМ используются мощные внутрисоглазованные GaN СВЧ-транзисторы VT1, VT2 и VT3 с коэффициентом усиления КУ 8÷10 дБ и уровнем выходной мощности 10, 35 и 100 Вт.

Выходной каскад, выполненный на четырех мощных GaN СВЧ-транзисторах, обеспечивает при нормальном режиме работы заданный уровень выходной мощности. Для достижения более высоких показателей времени наработки на отказ коэффициент нагрузки снижен на 25%. Два идентичных

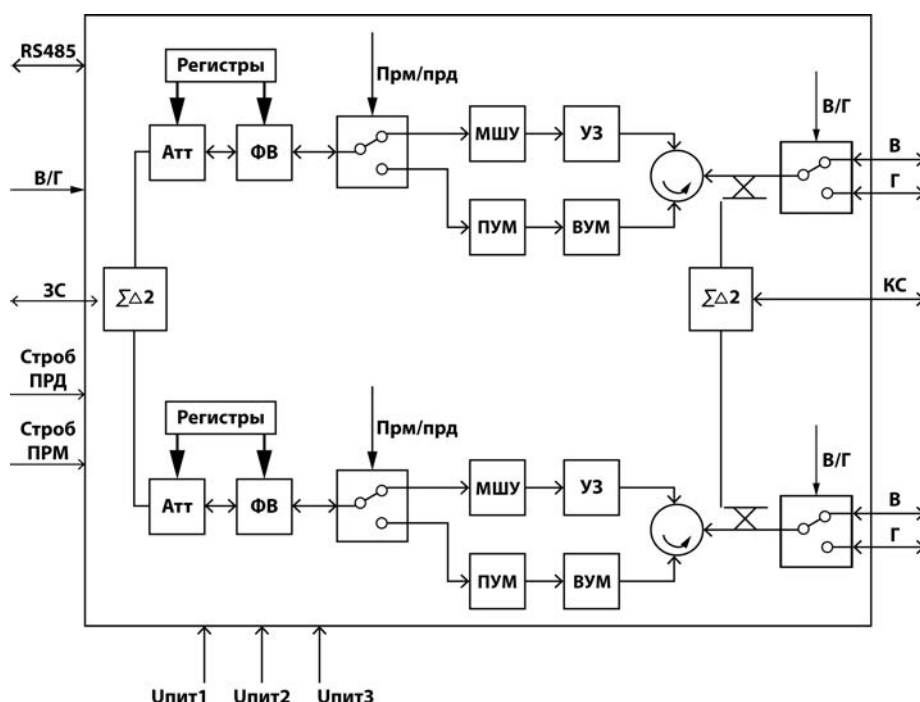


Рисунок 1. Функциональная схема ППМ: Атт – аттенюатор; ФВ – фазовращатель; МШУ – малошумящий усилитель; ПУМ – предварительный усилитель мощности; ВУМ – выходной усилитель мощности; КС – контрольный сигнал; В – СВЧ-сигнал с вертикальной поляризацией; Г – СВЧ-сигнал с горизонтальной поляризацией; УЗ – СВЧ-устройство защиты; ЗС – зондирующий сигнал; В/Г – сигнал переключения вертикальной/горизонтальной поляризации; Строб ПРД – импульс включения/выключения передатчика; Строб ПРМ – импульс включения/выключения приемника; RS485 – последовательный порт стандарта RS485; ПРМ/ПРД – сигнал переключения прием/передача; $\Sigma\Delta 2$ – сумматор/делитель на 2; Упит1, Упит2, Упит3 – номиналы питания 1, 2 и 3 соответственно

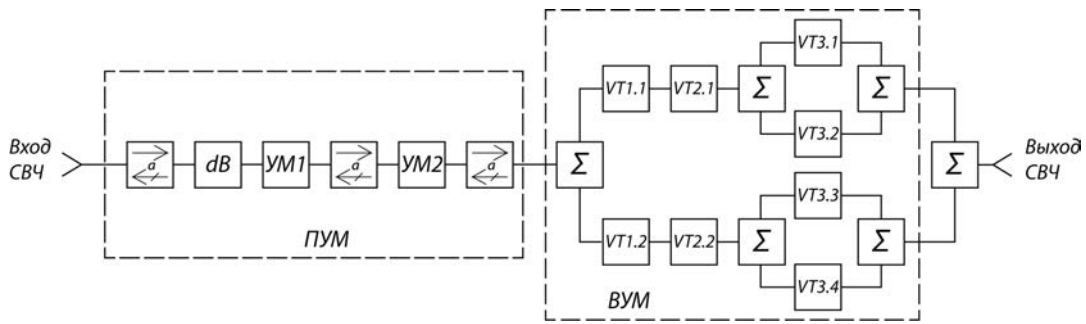


Рисунок 2. Структурная схема СВЧ-усилителя мощности

канала выходного усилителя мощности включены параллельно и работают на общий сумматор. Коэффициент нагрузки предварительных каскадов снижен на 15%.

Технические характеристики разработанного модуля:

- рабочий диапазон частот – $\Delta f_{РАБ} = 2,0-2,7$ ГГц;
- выходная мощность – $P_{ВЫХ} \geq 120$ Вт;
- неравномерность АЧХ во всем диапазоне рабочих частот – $\Delta A_i \leq \pm 1$ дБ;
- неравномерность АЧХ в любом участке диапазона рабочих частот с полосой – 6 МГц $\Delta A_i \leq \pm 0,5$ дБ;
- нестабильность выходной мощности во всем диапазоне рабочих температур – $\delta P_{ВХ} \leq \pm 1$ дБ;

- относительный уровень гармоник – $\alpha_{гар} \leq -20$ дБ;
- КПД $\eta \geq 35\%$.

Передающий тракт 6-канального ППМ для АФАР X-диапазона [10]

Приемо-передающий модуль различных диапазонов и применений АО «НПП «Пульсар»» разрабатывает на протяжении многих лет. В X-диапазоне в качестве активной элементной базы для них используются, как правило, широкозонные материалы [11]. Примеры использования широкозонных материалов в ППМ для АФАР отражены, например, в [12, 13].

Функциональная схема разрабатываемого СВЧ-модуля представлена на рис. 3. Каждый канал ППМ

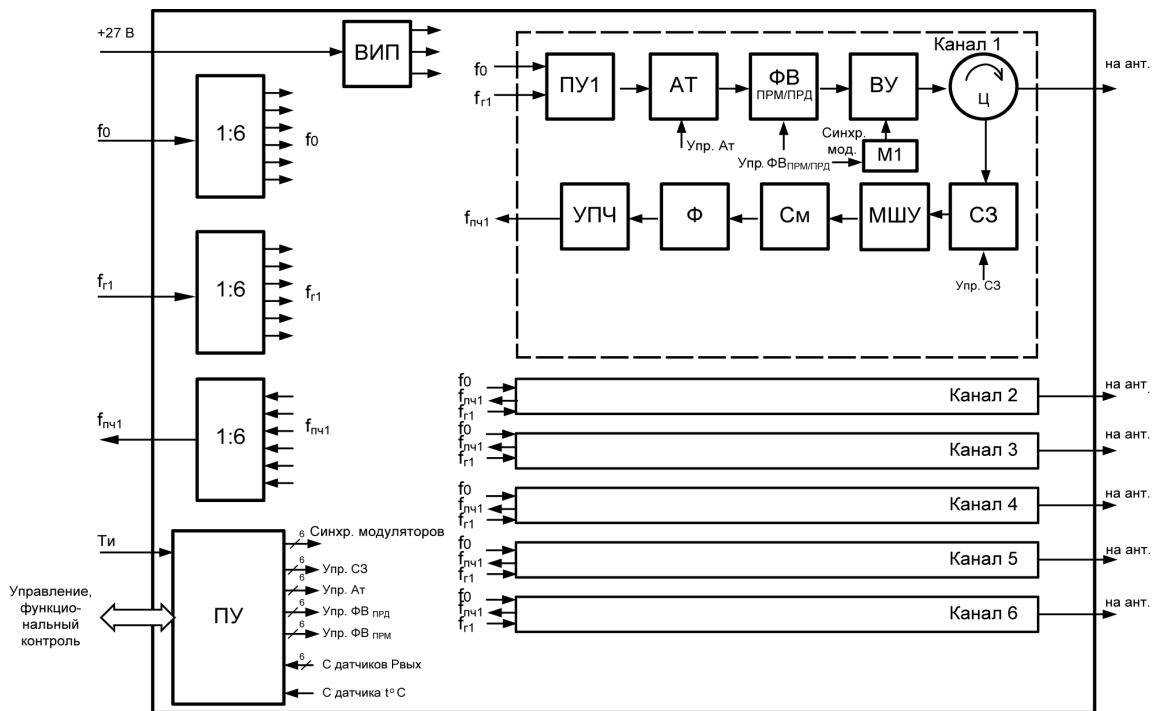


Рисунок 3. Функциональная схема шестиканального ППМ: ПУ1 – предварительный усилитель; ВУ – выходной усилитель; УПЧ – усилитель первой промежуточной частоты; МШУ – малозумящий усилитель; Ц – циркулятор; АТ – дискретный аттенюатор; ФВПРД и ФВПРМ – дискретные фазовращатели; СЗ – схема защиты; М1 – модулятор; См – смеситель; Ф – полосовой фильтр; ВИП – вторичный источник питания; ПУ – плата управления и функционального контроля

включает в себя приемный и передающий тракты. Охлаждение модуля жидкостное. Габаритные размеры модуля составляют 285x150x58 мм, масса – 4,6 кг.

Функциональная схема шестиканального приемо-передающего модуля представлена на рис. 1.

В состав каждого из шести каналов ППМ входят:

- усилитель излучаемого сигнала;
- дискретный фазовращатель в передающем тракте;
- дискретный аттенюатор в передающем тракте;
- ферритовый циркулятор для объединения передающего и приемного каналов;
- импульсный модулятор излучаемого сигнала;
- ключ поглощающего типа на входе передающего тракта;
- схема защиты входа приемного канала;
- малошумящий усилитель принимаемого сигнала;
- преобразователь принимаемого сигнала на первую промежуточную частоту;
- дискретный фазовращатель в тракте гетеродина преобразователя;
- фильтр промежуточной частоты;
- дискретный аттенюатор в тракте промежуточной частоты;
- усилитель промежуточной частоты;
- ключ поглощающего типа на выходе тракта промежуточной частоты.

Как видно из рис. 1, основной сигнал и сигнал гетеродина подаются на вход модуля ППМ и, пройдя через систему делителей на 6, транслируются в каждый приемо-передающий канал. С другой стороны, шесть принятых антенной и усиленных приемными каналами через сумматор на 6 попадают на выход приемо-передающего модуля.

Особенностью схемного решения приемо-передающего канала является использование одного фазо-вращателя и в приемном, и в передающем тракте. Часть передающего тракта ППМ является в этом случае предварительным усилителем сигнала гетеродина для приемного канала, то есть управление фазой принимаемого сигнала осуществляется путем изменения фазовых состояний сигнала гетеродина.

Отдельно стоит отметить, что в модуле реализован функциональный контроль и управление каналами ППМ. Данная функция позволяет управлять аттенюаторами и фазовращателями в каждом приемном и передающем канале отдельно, устройствами защиты приемного тракта, а также проводить контроль выходной мощности каналов.

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

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

Переключающие устройства X-диапазона на основе полупроводниковых приборов [14]

Одними из важных элементов СВЧ радиоэлектронной аппаратуры являются переключающие устройства, обеспечивающие коммутацию каналов в приемопередающих модулях (ППМ) радиосистем с активными фазированными антенными решетками. Отличительной чертой таких модулей является то, что в одном сечении СВЧ-тракта совмещаются выходы передающего тракта, коммутируемые на излучатели различной поляризации, и входы приемного тракта, коммутируемые на эти же излучатели, но работающие в режиме приема. Параметры переключателей определяют потери выходной мощности от выходного усилителя ППМ до излучателей в передающем тракте и снижение чувствительности входного тракта.

Существует несколько технических решений, обеспечивающих коммутацию приемных и передающих каналов и излучателей антенного полотна. Применение переключателей в схеме коммутации ограничивается недостаточным уровнем основных параметров переключателей. Поэтому необходимый уровень линейной переключаемой мощности в X-диапазоне должен быть не менее 10 Вт, изоляции выключенного СВЧ-тракта в X-диапазоне – не менее 30 дБ, а уровень потерь открытого СВЧ-тракта в X-диапазоне – не более 0,4–0,6 дБ.

В табл. приведены характеристики переключающих устройств (SPDT) на основе различных типов твердотельных приборов.

В АО «НПП «Пульсар»» был спроектирован и изготовлен переключатель СВЧ-мощности на основе GaAs p-i-n диодов со следующими характеристиками:

- прямые потери < 0,55 дБ в диапазоне частот 8–9,5 ГГц;
- развязка каналов > 25 дБ;
- уровень входной мощности – до 35 дБм;
- потребляемый ток при ($P_{\text{вх}} = 35$ дБм) $P_{\text{дс}} = 330$ мА.

Таблица. Характеристики переключателей приборов

Технология	Частотный диапазон, ГГц	Вносимые потери, дБ, 18 ГГц	Развязка каналов, дБ, 18 ГГц	Потери на отражение, дБ, 18 ГГц	Линейная мощность, дБм	Размер кристалла, мм ²	Упр, В, (мА)
GaN HEMT	DC-18	1,5	25	12	42	1,9	40
GaAs HEMT	DC-35	1,7	27	-	15	1,8	1,8
GaAs pinD	DC-70	0,4	47	-	-	-	5 (10)
SiGe HBT	8–40	1,9	29	10	10	1,4	0,95
CMOS	DC-60	1,2	33	7	7	0,26	2,1

На рис. 4 представлены зависимости, описывающие режим работы р-і-n диодов переключателя.

В рамках работы [14] была разработана монолитная интегральная схема переключателя (МИС) на основе AlGaIn/GaN HEMT-технологии. В ходе компьютерного моделирования были произведены сравнения моделей переключателей транзисторов и модели для общего применения. Разработанная МИС обладает следующими характеристиками:

- прямые потери < 0,9 дБ в диапазоне частот 9–11 ГГц;
- развязка каналов > 40 дБ;
- уровень входной мощности – до 42 дБм;
- потребляемый ток – 0,01 мА.

Шестиканальный ППМ для АФАР X-диапазона: приемный тракт

В работе АО «НПП «Пульсар»» [15] были представлены результаты разработки и измерений параметров приемной части шестиканального приемно-передающего модуля X-диапазона. При проектировании приемного тракта модуля такого класса перед разработчиками стоял ряд проблем, требующих комплексного решения, а именно:

- осуществить прием и усиление СВЧ-сигналов с требуемым коэффициентом шума в рабочей полосе частот с заданным динамическим диапазоном;
- выполнить преобразование СВЧ-сигнала с понижением частоты и последующим его усилением;
- обеспечить избирательность в тракте СВЧ и промежуточной частоты;
- сформировать заданный уровень зондирующего импульса в антенне АФАР;
- отрегулировать отдельно амплитудой и фазой принимаемых и излучаемых частот и обеспечить шаг, глубину, точность установки и стабильность во времени;
- обеспечить управление программной логикой функционирования ППМ, хранение и обмен кодами команд управления и данных фаз и амплитуд сигнала для всех каналов модуля;
- минимизировать габаритные размеры при обеспечении безопасных тепловых режимов работы полупроводниковых приборов;
- обеспечить удобство эксплуатации и обслуживания.

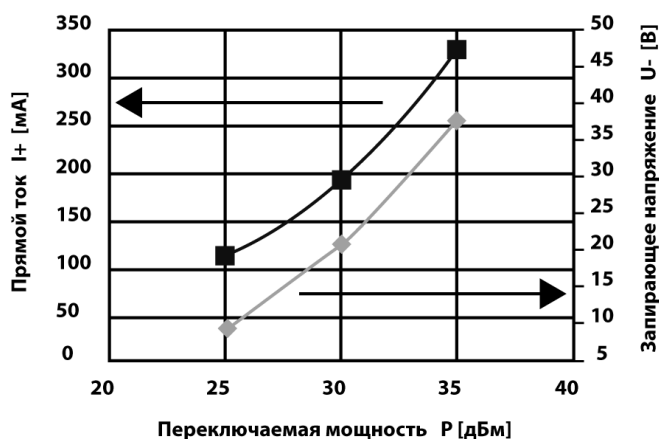


Рисунок 4. Режим работы р-і-n диодов

Структурная схема ППМ представлена на рис. 5.

В состав приемного канала ППМ входят: циркулятор, ограничитель мощности, малозумящий усилитель (МШУ), смеситель, усилитель промежуточной частоты (УПЧ), фильтры высокой и низкой частоты (ВЧ, ПЧ), управляемый 5-разрядный аттенюатор, сумматор на 3 и на 2 на частоте $F_{пч} = 1,3$ ГГц, делитель на 2 и на 3 сигнала гетеродина $F_{гет} = 7,4–7,7$ ГГц. Состав передатчика: делитель 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-разрядным фазовращателем (ПУМ3), ГИС аттенюатора с ключом и выходной усилитель мощности (ВУМ) с фильтром.

Приемные каналы разработанных ППМ обладают следующими основными характеристиками: коэффициент шума $K_{ш} = 2,9–3,4$ дБ, коэффициент



Рисунок 5. Структурная схема ППМ

передачи $K_{ур} = 22,5-24,0$ дБ, динамический диапазон $IP_3 = 22,5-25$ дБм, 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 $L_{ЗК} > 65$ дБ.

СВЧ-генераторы на диэлектрических резонаторах [16]

СВЧ-генераторы на диэлектрических резонаторах (ДР) широко применяются в качестве источников высокостабильных, мал шумящих электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 2 до 18 ГГц для устройств формирования сигналов (УФС) радиолокационных станций. Генераторы на ДР отличаются высокой стабильностью, долгим сроком эксплуатации и малыми габаритами.

При проектировании генераторов на основе диэлектрических резонаторов перед разработчиками возникает целый спектр проблем:

- минимизация шумового спектра сигнала;
- обеспечение мощности сигнала не менее 8 дБм;
- обеспечение возможности перестройки частоты генератора до 300 кГц;
- подавление гармонических составляющих до величины не менее -60 дБ;
- минимизация габаритов и обеспечение технологичности изготовления.

Эти задачи были решены при разработке генератора на ДР, функциональная схема которого приведена на рис. 6.

Электрическая схема генератора на ДР состоит из активного элемента – транзистора BFP540, пассивной схемы (4 радиальных шлейфа и полоскового шлейфа). Эти шлейфы в сочетании с керамическим резонатором определяют рабочую частоту генератора. Задание рабочей точки активного элемента осуществляется резисторами и развязано фильтрами LC. Для развязки трактов СВЧ-питание подается через полосковый шлейф.

Для устранения побочных резонансов необходима согласованная нагрузка. Цепь согласования, определяющая коэффициент отражения от нагрузки, реализована емкостями на выходе генератора на ДР.

Результаты измерений разработанного генератора на ДР:

- центральная частота – 6048 МГц;
- перестройка частоты – ± 150 кГц;
- СПМШ -129 дВс/Гц при отстройке 100 кГц;
- выходная мощность сигнала – 10 дБм.

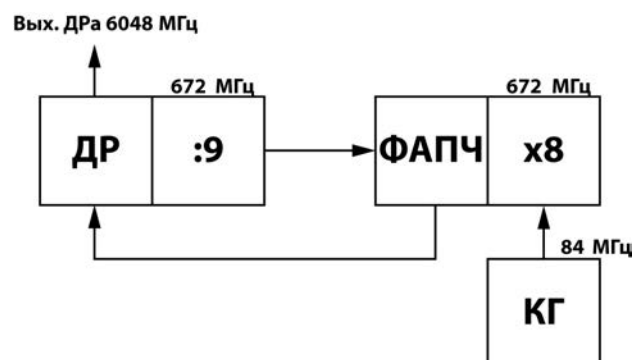


Рисунок 6. Блок-схема генератора на ДР

Выводы

1. Результаты создания ряда СВЧ-модулей различного назначения, представленные в этой работе, позволяют утверждать, что в настоящее время СВЧ сложные функциональные блоки РЭА могут быть полностью реализованы на нитриде галлия с использованием уникальных преимуществ этого материала в радиолокационной аппаратуре X- и S-диапазонов частот.
2. Использование нитрид-галлиевых приборов в передающих и приеме-передающих модулях позволяет увеличить уровни выходной мощности в 2–3 раза и реализовывать СВЧ-аппаратуру высокой плотности упаковки.
3. Применение нитрид галлиевых приборов в СВЧ-генераторах с диэлектрическими резонаторами позволяет снизить уровень спектральной плотности шума выходного сигнала за счет реализации более мощных автогенераторов, что позволяет уменьшить коэффициент усиления буферных каскадов СВЧ-генератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Груздов В. В., Колковский Ю. В., Миннебаев В. М. СВЧ-электроника на основе нитрида галлия – основное направление создания радиоэлектронных систем // *Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы*. 2013. Вып. 2 (231). С. 88–101.
2. Колковский Ю. В., Миннебаев В. М. Применение GaN устройств в условиях космического пространства // *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*. 2014. Вып. 2 (233). С. 20–25.
3. Груздов В. В., Колковский Ю. В. Критические технологии – основное направление создания СВЧ радиоэлектронных систем // *Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы XIII научно-технической конференции*, г. Дубна, 8–10 октября 2014 г., С. 7–9.
4. Qureshi J., Pelk M., Marchetti M. et al. A 90-W Peak Power GaN Outphasing Amplifier With Optimum Input Signal Conditioning // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 57, no. 8, August 2009, p. 1925.
5. Rudiger Quay, Gallium Nitride Electronics // Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg. 2008. 469 p.
6. Кищинский А. А. Широкополосные транзисторные усилители мощности СВЧ-диапазона – смена поколений // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2010. № 2.
7. Перевезенцев А. В. Четырехканальный приемник X-диапазона на GaN- и SiGe-микросхемах // *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*. 2011. Вып. 2 (227). С. 114–119.
8. Борисов О. В., Герасимов А. О., Колковский Ю. В. и др. Двухканальный нитрид-галлиевый приемо-передающий модуль X-диапазона частот // *Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научно-технической конференции*. М.: АО «НПП «Пульсар»», 2015. С. 137–140.
9. Аболдуев И. М., Борисов О. В., Герасимов А. О. и др. Сверхширокополосный усилитель мощности S-диапазона на основе GaN-транзисторов // *Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научно-технической конференции*. М.: АО «НПП «Пульсар»», 2015. С. 141–142.
10. Иванов К. А., Колковский Ю. В., Миннебаев В. М., Фурсов С. А. и др. Передающий тракт 6-канального ППМ для АФАР X-диапазона // *Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научно-технической конференции*. М.: АО «НПП «Пульсар»», 2015. С. 152–156.
11. Васильев А. Г., Колковский Ю. В., Концевой Ю. А. СВЧ-приборы и устройства на широкозонных полупроводниках. М.: Техносфера, 2011. 416 с.
12. 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.
13. 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.
14. Аболдуев И. М., Вейц В. В., Евграфов А. Ю. и др. Переключающие устройства X-диапазона на основе полупроводниковых приборов // *Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научно-технической конференции*. М.: АО «НПП «Пульсар»», 2015. С. 157–158.
15. Герасимов А. О., Колковский Ю. В., Миннебаев В. М. и др. Шестиканальный ППМ для АФАР X-диапазона: приемный тракт // *Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научно-технической конференции*. М.: АО «НПП «Пульсар»», 2015. С. 163–164.
16. Глыбин А. А., Зиневич В. С., Перевезенцев А. В., Финкель И. В. СВЧ-генераторы на диэлектрических резонаторах // *Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научно-технической конференции*. М.: АО «НПП «Пульсар»», 2015. С. 170–172.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Груздов Вадим Владимирович, к.э.н., профессор, генеральный директор АО «НПП «Пульсар»», 105187, Москва, Окружной пр-д, д. 27, e-mail: gruzdov@pulsarnpp.ru.

COMPLEX FUNCTIONAL BLOCKS OF ULTRA-HIGH FREQUENCY ELECTRONICS

This article reviews some microwave complex functional blocks of Electronics, developed by OJSC «NPP “Pulsar”». The functional and structural schemes and parameters of six microwave modules and blocks that are used in radar equipment designated for X- and S-range frequencies have been described. X-range switching devices based on semiconductor devices, and microwave generators of the dielectric resonators have been investigated.

Keywords: receiving and transmitting modules, ultra-wideband power amplifier, transmitting the path of 6-channel Receiving and transmitting module for AESA of X-range, X-range switching device, receiving paths of Receiving and transmitting module, microwave generators on dielectric resonators.

REFERENCES

1. Gruzдов V. V., Kolkovskiy Yu. V., Minnebaev V. M. SVCh-elektronika na osnove nitrida galliya – osnovnoe napravlenie sozdaniya radioelektronnykh sistem [Microwave electronics based on gallium nitride – the main direction of the creation of electronic systems]. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory*, 2013, Issue 2 (231), pp. 88–101.
2. Kolkovskiy Yu. V., Minnebaev V. M. Primenenie GaN ustroystv v usloviyakh kosmicheskogo prostranstva [Application of GaN devices in space conditions]. *Elektronnaya tekhnika, Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory*, 2014, Issue 2 (233), pp. 20–25.
3. Gruzдов V. V., Kolkovskiy Yu. V. Kriticheskie tekhnologii – osnovnoe napravlenie sozdaniya SVCh radioelektronnykh sistem [Critical technologies – the basic direction of creation of microwave electronic systems]. *Tverdotel'naya elektronika. Slozhnye funktsional'nye bloki REA: materialy XIII nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, g. Dubna, 8–10 oktyabrya 2014, pp. 7–9.
4. Qureshi J., Pelk M., Marchetti M. et al. A 90-W Peak Power GaN Outphasing Amplifier With Optimum Input Signal Conditioning. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 57, no. 8, August 2009, p. 1925.
5. Rudiger Quay, Gallium Nitride Electronics. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, 469 p.
6. Kishchinskiy A. A. Shirokopolosnye tranzistornye usiliteli moshchnosti SVCh-diapazona – smena pokoleniy [Broadband transistor power amplifiers of microwave spectrum – change of generations]. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes*, 2010, no. 2.
7. Perevezentsev A. V. Chetyrekhkanal'nyy priemnik Kh-diapazona na GaN i SiGe mikroskhemakh [Four channels receiver of X spectrum on GaN and SiGe microcircuit]. *Elektronnaya tekhnika, Ser. 2, Poluprovodnikovye pribory*, 2011, Issue 2 (227), pp. 114–119.
8. Borisov O. V., Gerasimov A. O., Kolkovskiy Yu. V. i dr. Dvukhkanal'nyy nitrid-gallievyy priemo-peredayushchiy modul' Kh-diapazona chastot [Two channels gallium nitride-receiver-transmitter module frequency X-spectrum]. *Tverdotel'naya elektronika. Slozhnye funktsional'nye bloki REA: materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. M.: OAO «NPP “Pul'sar”», 2015, pp. 137–140.
9. Abolduev I. M., Borisov O. V., Gerasimov A. O. i dr. Sverkhshirokopolosnyy usilitel' moshchnosti S-diapazona na osnove GaN-tranzistorov [Ultra-wideband power amplifier for S- spectrum on GaN- based transistors]. *Tverdotel'naya elektronika. Slozhnye funktsional'nye bloki REA: materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. M.: OAO «NPP “Pul'sar”», 2015, pp. 141–142.
10. Ivanov K. A., Kolkovskiy Yu. V., Minnebaev V. M., Fursov S. A. i dr. Peredayushchiy trakt 6-kanal'nogo PPM dlya AFAR Kh-diapazona [The delivering path of 6-channels PPM for the active phased antenna bar of X-spectrum]. *Tverdotel'naya elektronika. Slozhnye funktsional'nye bloki REA: materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. M.: OAO «NPP “Pul'sar”», 2015, pp. 152–156.
11. Vasilev A. G., Kolkovskiy Yu. V., Kontsevoy Yu. A. SVCh-pribory i ustroystva na shirokozonnnykh poluprovodnikakh [Microwave devices and devices for wide-zones semiconductors]. M.: Tekhnosfera, 2011. 416 p.
12. 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.
13. 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.
14. Abolduev I. M., Veyts V. V., Evgrafov A. Yu. i dr. Pereklyuchayushchie ustroystva Kh-diapazona na osnove poluprovodnikovyykh priborov [X-spectrum switching devices based on semiconductor devices]. *Tverdotel'naya elektronika. Slozhnye funktsional'nye bloki REA: materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. M.: OAO «NPP “Pul'sar”», 2015, pp. 157–158.
15. Gerasimov A. O., Kolkovskiy Yu. V., Minnebaev V. M. i dr. Shestikanal'nyy PPM dlya AFAR Kh-diapazona: priemnyy trakt [Six channels MRP for active phased antenna arrays of X-spectrum: receiving channel]. *Tverdotel'naya elektronika. Slozhnye funktsional'nye bloki REA: materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. M.: OAO «NPP “Pul'sar”», 2015, pp. 163–164.
16. Glybin A. A., Zinevich V. S., Perevezentsev A. V., Finkel I. V. SVCh-generatory na dielektricheskikh rezonatorakh [Microwave generators on dielectric resonators]. *Tverdotel'naya elektronika. Slozhnye funktsional'nye bloki REA: materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. M.: OAO «NPP “Pul'sar”», 2015, pp. 170–172.

AUTHOR

Gruzдов Vadim, PhD (Economics), Professor, General Director of OJSC «NPP “Pulsar”», 27, Okruzhnoy proezd, Moscow, 105187, e-mail: gruzdov@pulsarnpp.ru.