

Система деления-суммирования сигналов Q-диапазона частот на основе волноводного радиального делителя и пространственного суммирования мощности

Д.С. Федоров, В.Н. Шацкий

Ростовский-на-Дону научно- исследовательский институт радиосвязи

Аннотация: На основе обзора способов построения распределительных систем для усилителей мощности СВЧ-диапазона предложена конструкция системы пространственного деления-суммирования мощности (далее ПДСМ) в Q-диапазоне частот и усилитель мощности на ее основе.

Ключевые слова: распределительная система, усилитель мощности СВЧ-диапазона, система пространственного деления-суммирования мощности.

Современные тенденции развития радиотехнических комплексов обуславливают повышение требований к составным частям передающих трактов, зачастую превышая возможности существующей элементной базы. Данная проблема особенно актуальна при проектировании выходных усилителей мощности радиопередающих систем на основе монолитных интегральных схем СВЧ-диапазона. Мощность единичного монолитного транзистора, как правило, не превышает десятка ватт, и ограничена, как используемой полупроводниковой технологией, так и сложностями, связанными с нагревом транзистора, его согласованием и прочими технологическими ограничениями. В этом случае, применение схем суммирования выходной мощности единичных транзисторов становится основным решением задачи улучшения характеристик передающих устройств.

Цель работы – повышение уровня выходной мощности усилителя Q-диапазона частот.

Решаемые задачи:

1. Обзор возможных схем построения систем деления-суммирования сигнала для усилителей мощности.
2. Разработка системы деления-суммирования сигнала.
3. Исследование разработанной системы деления-суммирования сигнала в качестве системы распределения мощности усилителя.

За последние десятилетия усилители, выполненные по твердотельной технологии с суммированием мощности одиночных элементов, стали реальной альтернативой вакуумным приборам.

Мощные вакуумные приборы, такие, как клистроны, магнетроны, лампы бегущей волны (далее ЛБВ), по-прежнему используются для усиления сигналов в некоторых диапазонах сверхвысоких частот. В то же время, данные изделия имеют ряд существенных недостатков: жесткие требования к источнику высокого напряжения, собственный термоэлектронный шум, ограниченный срок службы нити накала.

Основными преимуществами применения в усилителях мощности твердотельных устройств, по сравнению с ЛБВ, являются [1]:

- отсутствие необходимости прогрева до выхода на стабильный режим работы (у ЛБВ прогрев может занимать до нескольких минут), что, в свою очередь, требует работы в режиме горячего резервирования и приводит к большим энергозатратам;
- отсутствие необходимости использования высоковольтных источников питания (для ЛБВ требуются источники в диапазоне нескольких киловольт), использование которых увеличивает энергопотребление системы и небезопасно для обслуживающего персонала;
- низкий шум и лучшая линейность.

До последнего времени ЛБВ являлись основой систем спутниковой связи, поскольку твердотельные устройства не могли обеспечить

аналогичные уровни выходной мощности. Применяемые в настоящее время методы суммирования мощности позволяют получать более высокую мощность, что приводит к замене ЛБВ более надежными твердотельными усилителями.

Сумматор при этом должен иметь ряд характеристик, обеспечивающих высокую эффективность работы изделия. А именно:

- содержать согласующие элементы с низкими потерями;
- обеспечивать минимальные потери на суммирование (высокую эффективность суммирования);
- иметь минимальное фазовое и амплитудное рассогласование каналов;
- обеспечивать эффективное рассеивание тепла;
- иметь хорошее согласование входов и выходов.

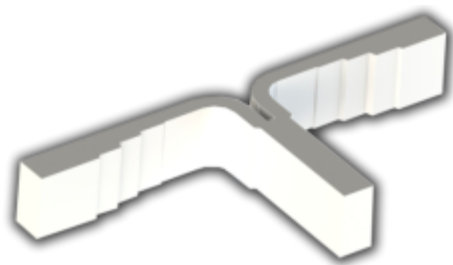
Совокупность требований к системе деления/суммирования усилителей мощности обуславливает появление множества топологий.

Первоначально объединение сигналов выполнялось на двух общих уровнях:

1) на уровне устройства, когда несколько транзисторов размещаются в малой по сравнению с длиной волны области (например, внутри одной микросхемы) и объединяются в один или несколько каскадов для формирования более высокой выходной мощности. Основным недостатком такого способа является малое количество активных устройств, которые можно эффективно объединить;

2) на схемном уровне транзисторы объединяются с помощью различных методов: в микрополосковой, коаксиальной или волноводной среде передачи (рис. 1а). Чаще всего используется последовательная и древовидная (на основе делителей/сумматоров Уилкинсона) структуры систем распределения сигналов. Недостатком данного способа суммирования является то, что он позволяет объединить мощность ограниченного числа

устройств из-за повышения потерь при увеличении количества каскадов. Также распространены радиальные структуры делителей/сумматоров (рис. 1б), в которых сигналы разных устройств объединяются за один этап, снижая потери в линии передачи. Такие сумматоры, как правило, достаточно громоздки и требуют тщательной проработки тепловых режимов работы при использовании большого количества усилителей в малом объеме пространства.



а)



б)

Рис. 1. Деление и суммирование мощности на основе разветвления волноводной линии (а) и с использованием радиальной структуры (б)

Приведенные выше способы суммирования реализуются с использованием направленных сред, и для них существует верхний предел количества усилительных устройств, ограничивающий суммарную выходную мощность.

В настоящее время активно развиваются методы суммирования мощности, в которых не используются направленные среды – методы пространственного суммирования. Преимуществом этих методов является то, что эффективность суммирования не зависит от количества объединяемых устройств, что потенциально дает возможность дальнейшего увеличения выходной мощности.

Пространственное объединение мощности реализуется посредством когерентного сложения мощности сигналов нескольких усилителей в свободном пространстве (воздухе) волноводной структуры. На рис. 2 показан принцип пространственного суммирования мощности.



Рис. 2. Принцип пространственного суммирования мощности

Преимуществами пространственного суммирования являются:

- более широкая, по сравнению с планарными структурами, полоса пропускания;
- более высокая энергетическая эффективность;
- плавное ухудшение характеристик при выходе из строя отдельных усилительных элементов (устойчивость к отказам).

При этом усилители с пространственным суммированием, как правило, имеют сложную конструкцию и требуют высокоточной механической обработки и сборки составных частей.

Известны несколько различных вариантов реализации методов пространственного суммирования мощности [2, 3]. Они отличаются топологией расположения активных элементов, видом структуры, в которую они помещаются, а также способами реализации вывода суммарного сигнала.

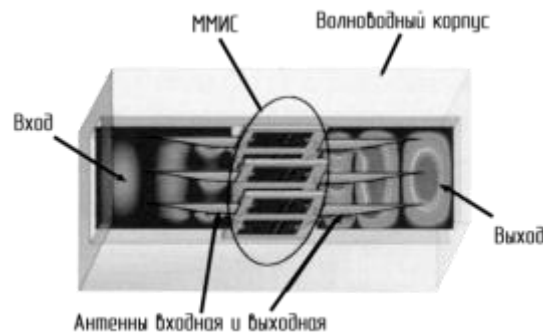
Первые разработки усилителей с пространственным объединением мощности ориентировались на структуры с пакетным суммированием. Массивы активных элементов размещались в двух топологиях: «плитка» и «лоток». В публикациях начала 2000-х годов представлены варианты построения усилителей с пространственным суммированием мощности, в которых активные элементы располагаются в одной плоскости или на параллельных пластинах.

В первом случае активные устройства, интегрированные с излучающими элементами, располагались в узлах сетки, образуя массив, работающий аналогично периодической антенной решетке с шагом, близким к половине длины волны. При этом каждый элемент действовал как независимая ячейка. Активные элементы в такой структуре могут быть размещены на одной из сторон или обеих сторонах массива. Электромагнитные волны возбуждают массив с одной стороны и излучаются с обратной стороны после усиления.

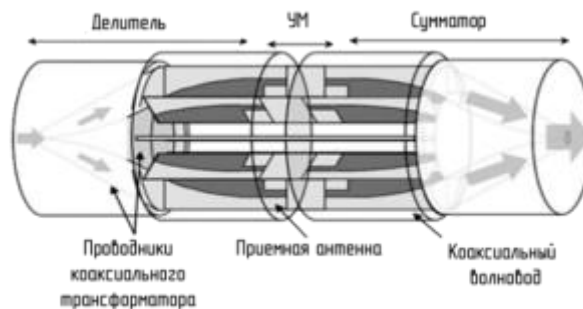
Также известна реализация топологии «плитка», в которой активные устройства объединяются на вертикальном и горизонтальном пересечении металлической сетки. Вертикальные проводники соединяют либо входные цепи, либо выходные цепи усилителей, а горизонтальные проводники соединяют противоположную цепь. Входная волна может быть поляризована для взаимодействия только с входными цепями усилителя, а выходная волна будет поляризована ортогонально. Решетки поляризатора по обеим сторонам конструкции обеспечивают изоляцию между входными и выходными цепями. В этом случае активные элементы обычно расположены намного ближе, чем половина длины волны. Проводники сетки по всей длине действуют как отдельные антенные элементы. Недостатком метода является то, что усиление и мощность на ячейку ограничивают небольшие размеры

ячеек. Кроме того, поскольку активные устройства расположены очень плотно, такой усилитель может быть изготовлен только монолитно.

Пакетная топология использует пластины с торцевыми антенными элементами наподобие лотков, уложенных друг на друга, что обеспечивает двумерное расположение. Лоток принимает входной сигнал, возбуждающий электрическую цепь, которая проходит перпендикулярно плоскости антенной решетки, и излучает с другой стороны, как показано на рисунке 3а.



а)



б)

Рис. 3. Усилитель мощности с суммированием: а) в прямоугольном волноводе; б) в коаксиальном волноводе

Известно несколько подходов для реализации такой топологии, но, в общем, их можно разделить на две группы в зависимости от вида

структуры, в которую помещены лотки: волноводный и коаксиально-волноводный.

В первом случае антенные секции с усилительными элементами размещают в сечении прямоугольного волновода соответствующего диапазона частот (рисунок 3а) [3]. В случае коаксиально-волноводной конструкции (рисунок 3б) активные устройства располагают радиально по окружности на металлических секторальных конструкциях, образующих в сборе канал коаксиального волновода [4]. Суммирование мощности в этом случае выполняется в объеме коаксиального трансформатора сопротивлений.

Следует отметить, что описанные выше способы построения усилителей с расположением в сечении прямоугольного волновода имеют ряд существенных недостатков:

- эффективность суммирования снижается из-за того, что активные элементы находятся в неравных условиях: часть из них находятся вблизи металлических стенок волновода, в то время как другие располагаются в центре его сечения. Это приводит к неравномерности возбуждения усилительных ячеек из-за характера волны, распространяющейся в волноводе, и в целом к снижению эффективности объединения мощности;

- из-за плотной компоновки и невозможности разместить микросхемы усилителей непосредственно на металлическом теплоотводящем основании в данной конструкции сложно обеспечить работу изделия в допустимых тепловых режимах при больших уровнях мощности;

- полоса пропускания такого усилителя ограничена диапазонными свойствами волновода, в котором размещаются лотки.

Указанные проблемы волноводных усилителей решаются использованием конструкций волноводов с преобладающим распространением ТЕМ-волны. Таким образом, дальнейшее развитие получили усилители мощности (УМ) с суммированием в объеме

коаксиального волновода. На рис. 2б представлен вариант реализации такой структуры.

Исходя из приведенных данных, можно сделать вывод о том, что в настоящее время наблюдается тенденция замены в составе радиопередающих технических средств электровакуумных приборов на более надежные твердотельные усилители мощности. При этом сопоставимые показатели по уровню выходной мощности обеспечиваются посредством использования схем с пространственным суммированием.

Зарубежные производители высокоэффективных радиочастотных систем на протяжении последних 20 лет активно развивали данное направление науки и техники, и к настоящему времени организовали серийное производство усилителей вплоть до миллиметрового диапазона [2-7]. В рамках правительственных программ выполняется разработка опытных образцов усилителей более высокочастотных диапазонов для организации высокоскоростных каналов связи.

Существует много публикаций, посвященных поиску решений и практических реализаций идей в области построения усилителей с пространственным суммированием мощности. При этом, большинство производимых изделий использует в качестве структуры секторальную схему с коаксиально-волноводной системой деления суммирования мощности.

На данный момент в области построения усилителей на основе систем деления-суммирования реализованы устройства, внешний вид которых представлен на рисунке 4.

При этом в Q-диапазоне частот реализованы:

– 24-канальный секторальный усилитель с уровнем выходной мощности 46 дБм, показанный на рис. 4б;

– 8- и 4-канальные усилители на основе разветвления волноводной линии (рис. 4е и 4ж, соответственно) с максимальным уровнем выходной

мощности не превышающим 39 дБм. Данные устройства разработаны на базе ФГУП «РНИИРС».

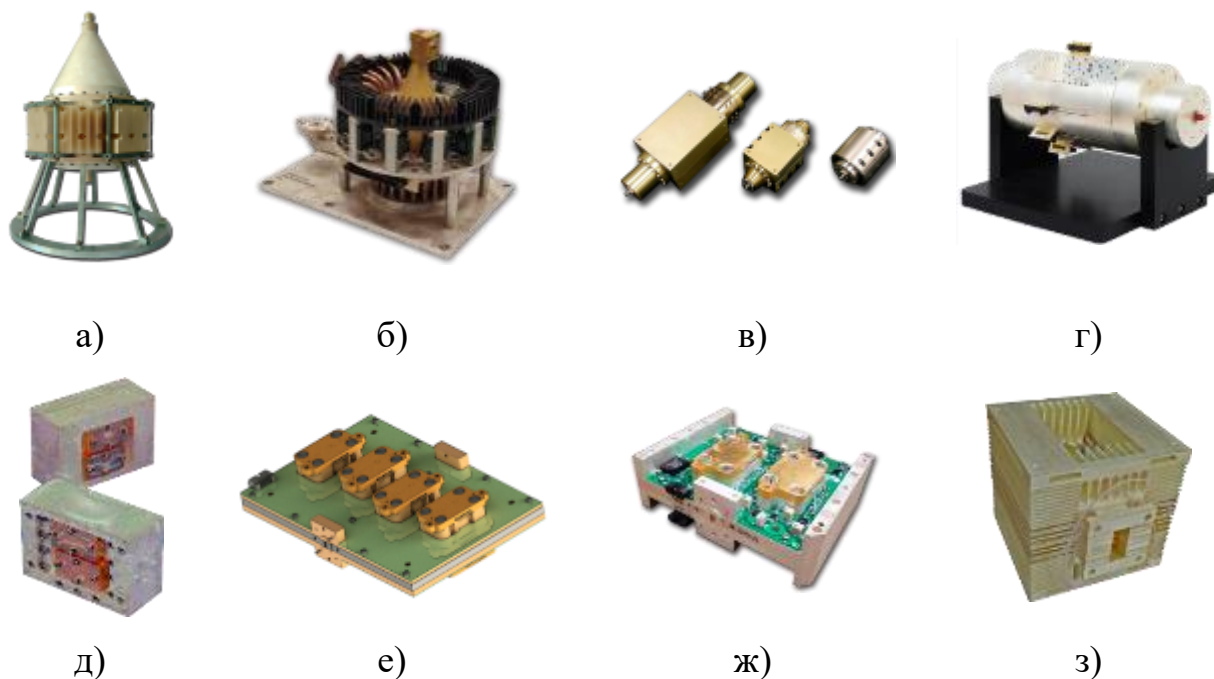


Рис. 4. Усилители на основе систем деления-суммирования мощности

В целом, ФГУП «РНИИРС» опробованы различные схемы построения: секторальная, пакетная, с расположением усилительных ячеек по окружности коаксиальной линии [8]. Расчетным и практическим методом исследованы особенности изготовления данных устройств, функционирующих в различных частотных диапазонах. Показано, что научная база и производственные возможности предприятия позволяют решать задачи по разработке и производству усилителей мощности с пространственным суммированием с характеристиками не хуже зарубежных аналогов.

В то же время, существует ряд задач, для решения которых необходим УМ с уровнем выходной мощности более 50 дБм в Q-диапазоне частот. Использование ранее предложенных усилителей ограничено их конструктивными особенностями. Секторальная схема ограничивает теплоотведение при отсутствии возможности ремонта изделия путем замены вышедших из строя усилительных ячеек. Усилительные элементы

расположены вдоль радиусов коаксиального волновода, они находятся под высокой тепловой нагрузкой. Схемы с разветвлением волноводных линий при большом количестве усилительных элементов приводят к значительному увеличению габаритных размеров. Для рассмотрения возможности использования ММИС усилителей с большим уровнем выходной мощности необходимо разработать конструкцию усилителя, обеспечивающую необходимый тепловой режим при сохранении минимально возможных габаритных размеров. Требования к разрабатываемому усилителю представлены в таблице № 1.

Таблица № 1

Требования к разрабатываемому усилителю

Диапазон рабочих частот	$0,96 F_c - 1,04 F_c$
Уровень выходной мощности	51 дБм
Допустимые габариты, не более	300x300x300 мм

Исходя из представленных требований и известных последних достижений в области построения ММИС в интересующем диапазоне частот, сформулированы следующие требования к системе ПДСМ:

- рабочий диапазон частот: Q-диапазон;
- количество каналов деления-суммирования: 20 каналов;
- потери на суммирование в рабочем диапазоне частот: менее 1,5 дБ;
- расположение оснований ММИС усилителей: на одной плоскости;
- минимально достижимые габаритные размеры;
- ремонтпригодность.

Радиальный волновод хорошо показал себя в работе [7], в качестве распределительной системы фазированной антенной решетки. Чаще всего радиальную линию образуют двумя плоскими дисками, однако при этом волновое сопротивление её изменяется в соответствии с формулой [9, 11]:

$$Z_0(r) = 60 \frac{h}{r}$$

где h – расстояние между поверхностями, образующими линию;
 r – радиус радиальной линии.

В этом случае трудно добиться согласования радиальной линии в достаточно широком диапазоне частот. Если же обе или одна из поверхностей линии являются коническими, так что h пропорционально r , то волновое сопротивление такой радиальной линии не зависит от радиуса, и необходимо только согласовать её с входным и выходным устройствами. На рисунке 5 представлен внешний вид волноводной структуры делителя и его рассчитанные амплитудно-частотные характеристики (далее АЧХ).

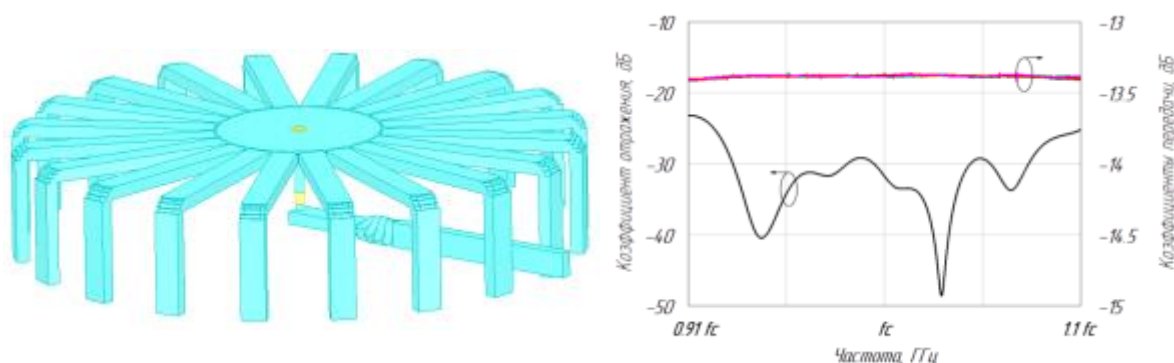


Рис. 5. Предлагаемый делитель мощности и его рассчитанные АЧХ

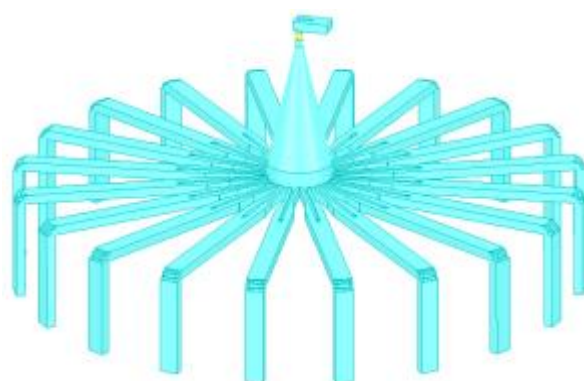
Вход делителя реализован в виде волноводного участка с осевым поворотом, продолжающимся коаксиально-волноводным переходом.

Делитель образован двадцатью волноводными каналами стандартного прямоугольного сечения, расходящимися от участка радиальной линии, возбуждаемой входным коаксиальным каналом. В каждом канале делителя выполнен ступенчатый поворот на 90 градусов, для приведения плоскости стыковки к входному порту усилительной ячейки.

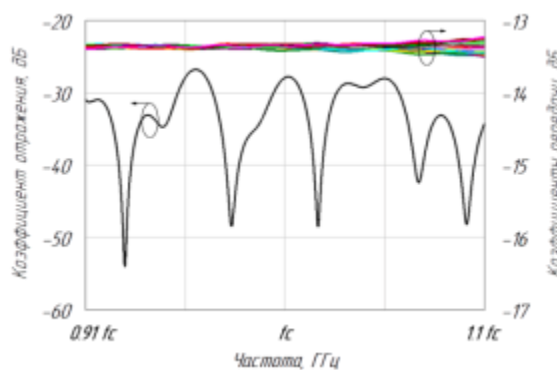
Использование конической радиальной линии в качестве сумматора мощности ограничено уровнем выходной мощности разрабатываемого усилителя, в связи с этим в качестве составной части сумматора мощности решено использовать трансформатор сопротивлений, синтезированный по методу, предложенному Клопфенштейном для плавных переходов [10]. Конструктивно он выполнен в виде коаксиального волновода, внешний диаметр проводника в котором меняется по линейному закону от продольной координаты, а профиль внутренней жилы коаксиального волновода разбит на четыре линейных участка, радиусы на границах которых выбирались расчетным методом.

В целом сумматор мощности, внутренняя структура которого показана на рис. 6а, реализован в виде двадцати волноводных каналов стандартного прямоугольного сечения, содержащих участки П-образных волноводов меньшего сечения, радиально сходящихся к коническому коаксиально-волноводному трансформатору сопротивлений. Со стороны коаксиально-волноводного трансформатора с меньшим сечением реализован коаксиально-волноводный переход. Подключаемый к нему через контактное фланцевое соединение участок регулярного волновода приводит сигнал целевого уровня мощности непосредственно к выходу изделия. Каждый волноводный канал сумматора, как и в делителе, содержит ступенчатый поворот на 90 градусов, обеспечивающий приведение плоскости стыковки к выходному порту усилительной ячейки.

На рис. 6б представлены расчетные характеристики сумматора мощности.



а)



б)

Рис. 6. Предлагаемый сумматор мощности (а)
и его рассчитанные АЧХ (б)

Как видно из рис. 5 и 6, волноводные каналы деления-суммирования мощности выведены таким образом, чтобы усилительные ячейки располагались в одной плоскости.

На рис. 7 показана внутренняя структура каналов системы деления-суммирования мощности усилителя в сборе и расположение усилительных ячеек.

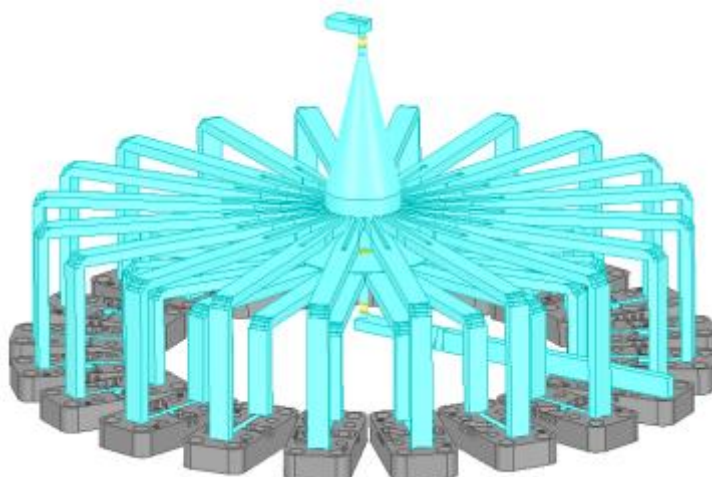


Рис. 7. Внутренняя структура каналов системы деления-суммирования мощности усилителя с подключенными усилительными ячейками

Исследование разработанной системы деления-суммирования сигнала в качестве системы распределения мощности усилителя

На рис. 8 представлены расчетные характеристики системы деления-суммирования мощности усилителя, подтверждающие возможность использования разработанной системы для построения усилителя мощности. Выходы делителя в данном случае подключены ко входам сумматора посредством пятидесятиомных микрополосковых перемычек, размещенных в корпусе усилительных ячеек.

Из графиков следует, что коэффициент передачи в диапазоне рабочих частот составляет не менее минус 0,8 дБ. Коэффициент отражения при этом в рабочем диапазоне не превышает минус 24 дБ.

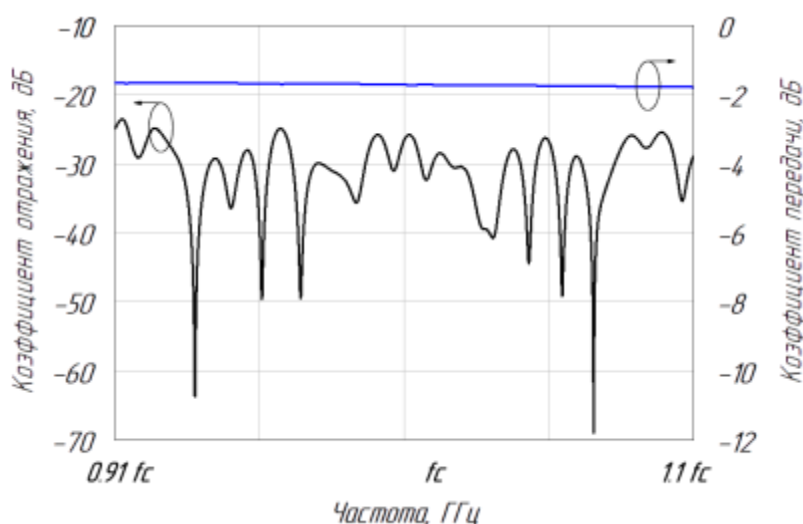


Рис. 8. Расчетные характеристики системы деления-суммирования мощности

Конструктивно структура делителя и сумматора формируется в объеме металла путем соединения нескольких дисков с фрезерованными элементами радиочастотных каналов как показано на рис. 9. Для обеспечения хорошего

электрического контакта в местах стыковки проводящих каналов устанавливаются подпружиненные контактные пластинки.

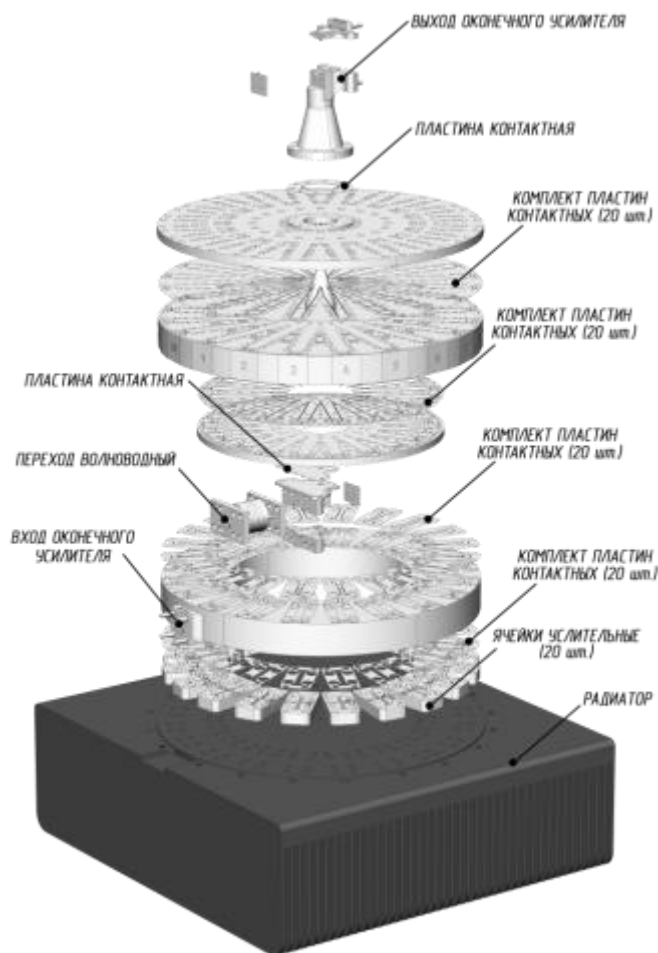


Рис. 9. Конструкция усилителя мощности

На рис. 10 представлена фотография изготовленного макетного образца изделия.

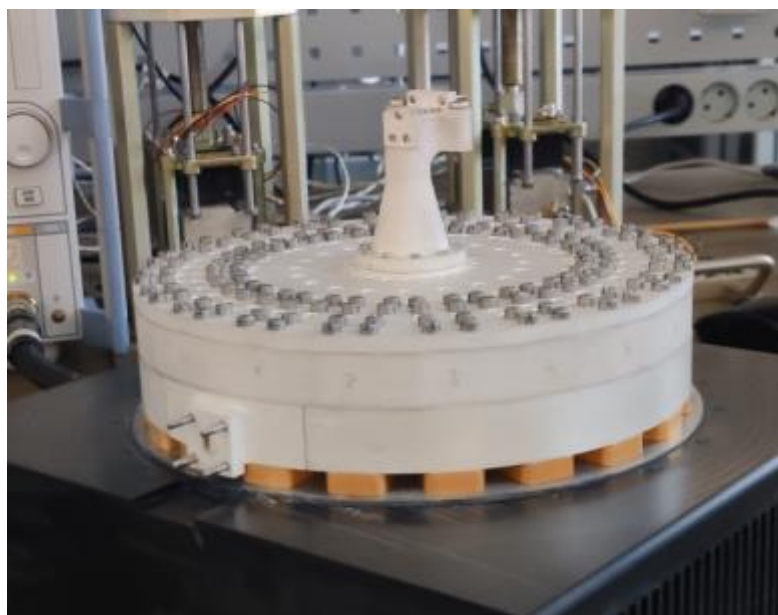


Рис. 10. Макетный образец усилителя мощности

Одним из главных критериев, определяющих внешний облик изделия – является задача обеспечения необходимого теплового режима усилительных элементов. Проведенный тепловой расчет, результаты которого представлены на рис. 11, показал эффективность используемых решений по построению системы теплообмена. Температура активных элементов при обдуве ребер радиатора посредством четырех вентиляторов не превышает 60 °С.

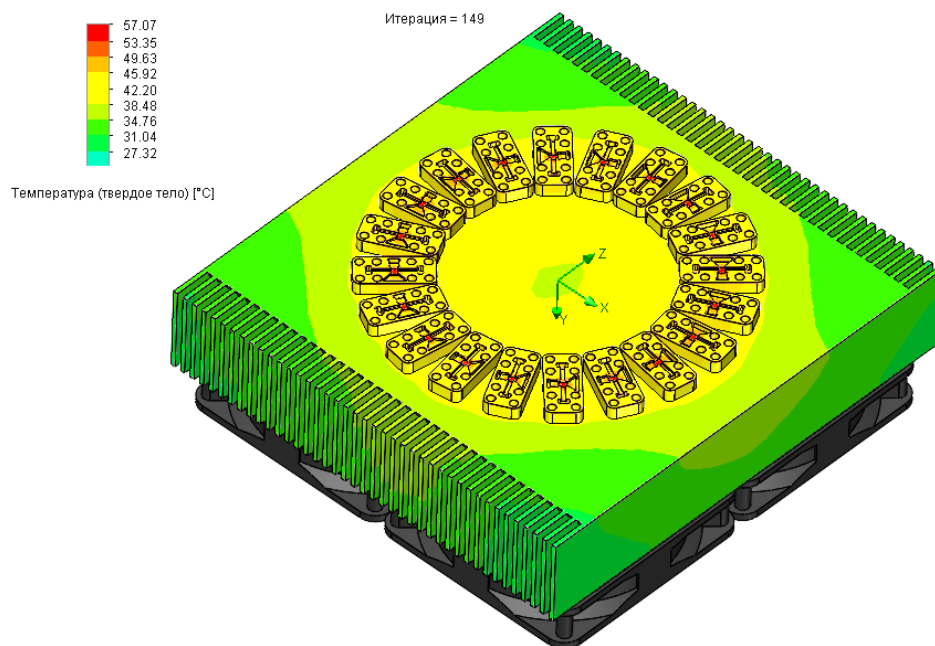


Рис. 11. Результаты теплового расчета

Проведено моделирование 20 канального усилителя мощности.

На основе параметров системы ДСМ и параметров усилительных ячеек (рис. 12), построенных на доступных на данный момент мощных GaN транзисторов получена оценка достижимого уровня выходной мощности 20-канального усилителя Q-диапазона частот, график которой представлен на рис. 13.



Рис. 12. Внешний вид усилительной ячейки

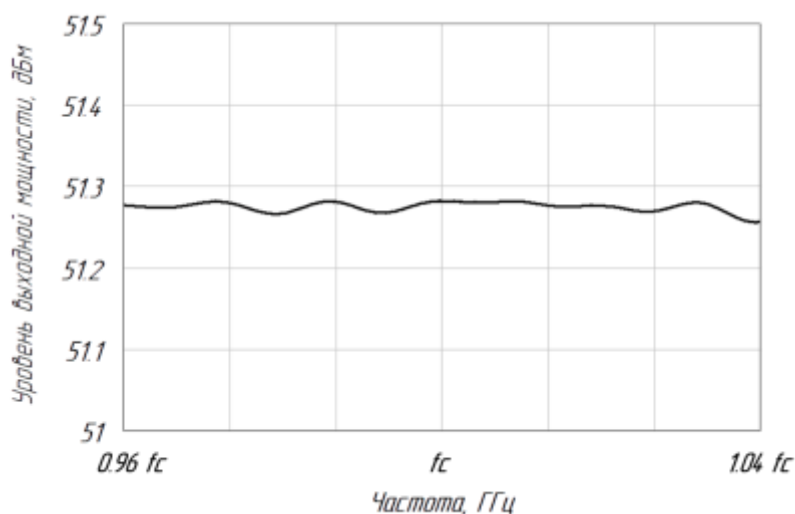


Рис. 13. Расчетный уровень выходной мощности оконечного усилителя

Выводы

1. Проведенный обзор схем построения систем деления-суммирования сигналов показал, что для построения усилителя с повышенным уровнем выходной мощности целесообразно использовать схему суммирования в объеме коаксиального волновода.

2. Разработанная двадцатиканальная система деления-суммирования мощности состоит из радиального волноводного делителя с входным волноводно-коаксиальным переходом и осевым поворотом входной волноводной линии, волноводного радиального сумматора с участками П-образных волноводов, возбуждающих конический коаксиальный трансформатор. Система обеспечивает в заданном диапазоне частот потери суммирования не более 1 дБ, коэффициенты отражения не более минус 24 дБ и позволяет реализовать усилитель с повышенным уровнем выходной мощности и возможностью замены усилительных ячеек.

3. Разработанная конструкция системы деления-суммирования сигналов Q-диапазона частот позволяет реализовать полупроводниковый усилитель с пространственным суммированием мощности. Проведено моделирование разработанной конструкции в виде двадцатиканального

усилителя мощности, способного обеспечить уровень выходной мощности не менее 50 дБм, что на 4 дБ больше, чем ранее разработанные изделия.

Литература

1. A Comprehensive Guide to mmWave Solutions. qorvo.com/design-hub/ebooks/comprehensiveguide-to-mmwave-solutions.
2. Brown E. Spatial Power Combining for High-Power Transmitters, IEEE Microwave Magazine, Wright State University, 2001, pp. 48-59.
3. Методы суммирования мощности в твердотельных СВЧ-усилителях. // Новости СВЧ-техники, 2015, №9, с. 3-35.
4. Javadi-Bakhsh H., Faraji-Dana R. A wideband twenty-element microwave spatial power combiner. // ScientiaIranica. 2014. №21 (3). Pp. 853-860.
5. Kim B, Tran A, Schellenberg J. Full W-band power amplifier/combiner utilizing GaAs technology. In 2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest 2012 Jun 17. Pp. 1-3.
6. Ghanadi Mehdi, A New Compact Broadband Radial Power Combiner. // Berlin 2012. URL: scinapse.io/papers/2213195095.
7. Fan Fangfang, Wang Wei, Yan Zehong. A Novell: 19 Microstrip Radial Power Divider Design for the Application in Antenna Array. // International Workshop on Microwave and Millimeter Wave Circuits and System Technology, 2013. pp. 17-19.
8. Косогор А.А., Шлаферов А.Л., Прищенко А.М., Иванов С.В., Хмара Е.В., Шацкий В.Н. Твердотельный усилитель СВЧ с пространственным суммированием мощности. RU 189022 U1, заяв. 04.02.2019, опубл. 06.05.2019. URL: elibrary.ru/download/elibrary_38146718_88439309.PDF
9. Деркачев П.Ю., Кондрашова Н.С., Мануилов М.Б. Электродинамические характеристики фазированной антенной решетки

миллиметрового диапазона с распределительной системой на радиальном волноводе. // Антенны. 2012. № 9. С. 55-57.

10. Klopfenstein R.W. A transmission-line taper of improved design. // IRE. 1956. №44 (1). Pp. 31-35.

11. Проектирование радиопередающих устройств. // Под ред. д.т.н. Шахгильдяна В. В. // Связь, 1976, с. 266.

References

1. A Comprehensive Guide to mmWave Solutions. URL: qorvo.com/design-hub/ebooks/comprehensiveguide-to-mmwave-solutions.

2. E. Brown. Spatial Power Combining for High-Power Transmitters, IEEE Microwave Magazine, Wright State University, 2001, pp. 48-59.

3. Novosti SVCH-tehniki, 2015, №9, pp. 3-35.

4. Javadi-Bakhsh H., Faraji-Dana R. ScientiaIranica. 2014. №21 (3). Pp. 853-860.

5. B. Kim, A. Tran, J. Schellenberg Full W-band power amplifier/combiner utilizing GaAs technology. 2012. Pp. 1-3.

6. Mehdi Ghanadi A New Compact Broadband Radial Power Combiner. Berlin 2012. URL: scinapse.io/papers/2213195095.

7. Fangfang Fan, Wei Wang, Zehong Yan A International Workshop on Microwave and Millimeter Wave Circuits and System Technology, 2013. pp. 17-19.

8. Kosogor A.A., Shlaferov A.L., Prischenko A.M., Ivanov S.V., Hmara E.V., Shatskiy V.N. Tverdotelnyy usilitel SVCH s prostranstvennim summirovaniem moschnosti. [Solid state microwave amplifier with spatial power summation]. RU 189022 U1, zayav. 04.02.2019, opubl. 06.05.2019. URL: elibrary.ru/download/elibrary_38146718_88439309.PDF.



9. Derkachev P.U., Kondrashova N.S., Manuilov M.B., Antenny. 2012. № 9. pp. 55-57.
10. Klopfenstein R.W. IRE. 1956. №44 (1). Pp. 31-35.
11. Proectirovanie radioperedavchih ustroystv. [Design of radio transmitting devices]. Pod red. d.t.n. V.V. Shahildyana. Svayz, 1976, p. 266.