

## ТЕХНОЛОГИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СУММИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ SPATIUM

Усилители мощности Spatium обеспечивают низкие потери, широкую полосу рабочих частот, плавное ухудшение характеристик при отказе, работу при низком напряжении, хорошую линейность и низкий уровень фазового шума, сочетающиеся с высокой надежностью полупроводниковых устройств.

Спутниковая связь играет важную роль в жизни людей во всем мире. Ее применение сегодня достаточно разнообразно — это наземная, авиационная и морская связь, навигация, мониторинг и дистанционное зондирование Земли. Последние тенденции развития спутниковой связи создают новые, более сложные требования к радиочастотному тракту. Ее интеграция с системами мобильной связи пятого (5G) и шестого (6G) поколений приводит к необходимости снизить затраты на разработку устройств и повысить их надежность. Использование спутников малого размера и портативных мобильных спутниковых устройств вызывает потребность в более компактных и легких радиочастотных компонентах с меньшим энергопотреблением. Эти компоненты

должны обрабатывать большую полосу частот, обеспечивая более высокую пропускную способность данных для поддержания таких приложений, как телевидение сверхвысокой четкости, мобильная связь и доступ в Интернет. Кроме того, многие радиочастотные компоненты могут применяться в различных устройствах, работающих в тех же диапазонах частот, что и системы спутниковой связи, например, в радиолокационных системах, системах радиоэлектронной борьбы, системах исследования дальнего космоса и т. п.

Усиление в микроволновом и миллиметровом диапазонах волн обычно основано на мощных вакуумных приборах, таких как клистроны, магнетроны, лампы бегущей волны (ЛБВ) и лампы обратной волны (ЛОВ). Несмотря на неко-

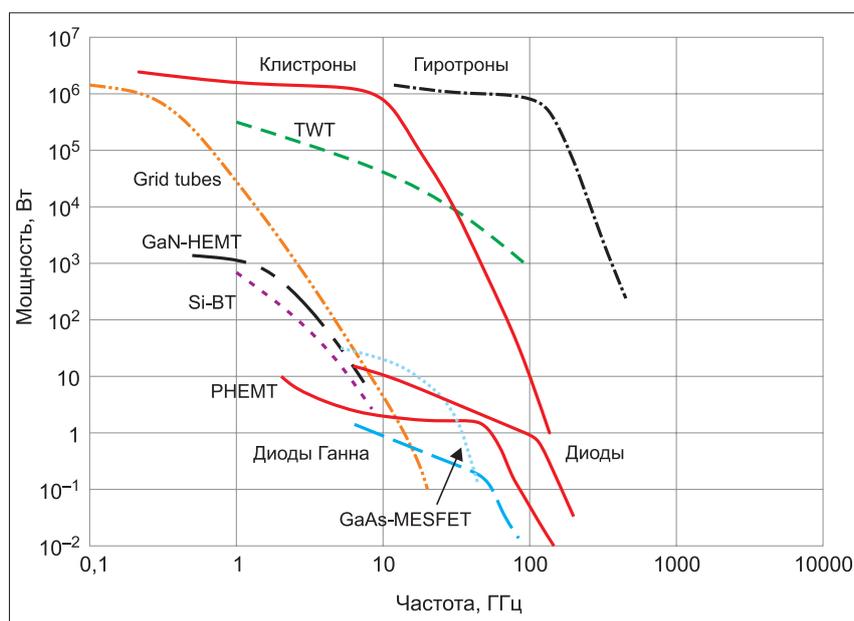
торые недостатки, в частности жесткие требования к источнику высокого напряжения, собственный термоэлектронный шум, ограниченный срок службы нити накала, эти устройства по-прежнему являются стандартным решением в некоторых диапазонах сверхвысоких частот.

В течение последних десятилетий твердотельная технология стала реальной альтернативой вакуумным приборам. На рис. 1 приведено сравнение выходной мощности в зависимости от частоты для различных твердотельных и ламповых усилителей мощности, согласно которому средняя выходная мощность электронных ламп намного больше выходной мощности твердотельных устройств.

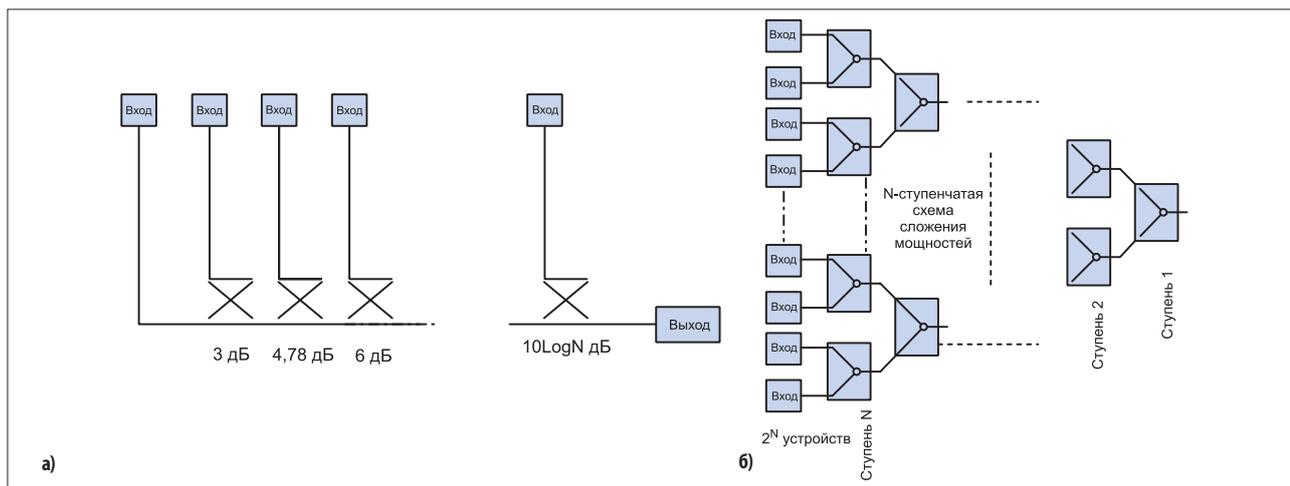
Использование в усилителях мощности твердотельных устройств дает следующие основные преимущества по сравнению с использованием ЛБВ [1]:

- Прежде чем ЛБВ смогут достичь стабильной работы, их необходимо прогреть, что может занять несколько минут. Решение этой проблемы требует работы в режиме горячего резервирования, что приводит к большим энергозатратам.
- Для ЛБВ требуются высоковольтные источники питания, обычно в диапазоне нескольких киловольт, что также увеличивает энергопотребление системы.
- Твердотельные устройства имеют более низкий шум и лучшую линейность, чем ЛБВ. Уровень шума для ЛБВ средней мощности может составлять около 30 дБ, для твердотельного усилителя мощности с теми же параметрами он составляет примерно 10 дБ.

До недавнего времени ЛБВ были основной элементной базой систем спутниковой связи, поскольку твердотельные устройства не могли обеспечивать аналогичные уровни мощности. Применяемые



▲ Рис. 1. Сравнительная характеристика твердотельных и вакуумных усилительных устройств



▲ Рис. 2. Наиболее распространенные методы объединения мощности: а) последовательный; б) корпоративный (древовидный)

в настоящее время методы объединения мощности позволяют получать более высокую мощность, что позволяет заменять ЛБВ более надежными твердотельными устройствами.

Примером являются усилители компании Qorvo, в которых используется запатентованная технология пространственного комбинирования Sratium для обеспечения высокой выходной мощности и высокого КПД в широкой полосе рабочих частот.

### Основные сведения о методах объединения мощности

Для увеличения выходной мощности и надежности твердотельных усилителей целесообразно использовать подход с объединением нескольких монолитных интегральных схем в одном усилителе. Преимуществами усилителей с объединением мощности являются плавное снижение характеристик (graceful degradation), более низкая стоимость, лучшее управление температурой и меньший размер.

В этом случае ключевым компонентом усилителя становится блок сумматора мощности. Среди желаемых характеристик хорошего сумматора можно выделить: согласующие элементы с низкими потерями; минимальные потери при объединении (высокая эффективность объединения); минимальный фазовый и амплитудный шум; хорошее согласование входа и выхода; эффективное рассеивание тепла. Идеальная реализация всех этих функций в одном усилителе, особенно в усилителе высокой мощности, становится сложной задачей для разработчиков радиочастотных устройств.

Разнообразие требований к блоку сумматора мощности и его характеристикам привело к появлению множества топологий. Ранее объединение рассматривалось на двух общих уровнях: уровне устройства и на схемном уровне. В последние

годы обрел популярность метод исследований, известный как пространственное объединение мощности, при котором выходы усилителей объединяются в пространстве.

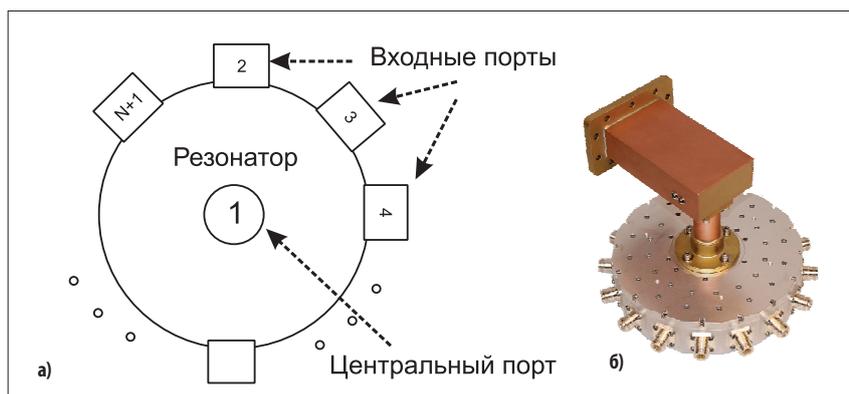
В подходе объединения на уровне устройства группа активных устройств размещается в небольшой, по сравнению с длиной волны, области, например, внутри микросхемы. В этом случае несколько транзисторов, находящихся на одном кристалле, объединены в один или несколько каскадов для достижения более высокой выходной мощности. Преимущество данного метода заключается в небольшом размере и простоте изготовления по технологии массового производства микросхем. Однако такой способ объединения обычно ограничен количеством устройств, которые можно эффективно комбинировать.

На схемном уровне устройства объединяются с помощью различных методов, например, посредством комбайнера Уилкинсона. При этом сигналы можно объединять в микрополосковой, коаксиальной или волноводной среде передачи. Кроме того, объединяющие структуры могут быть выполнены на основе объемных резонаторов и в виде нерезонансных структур.

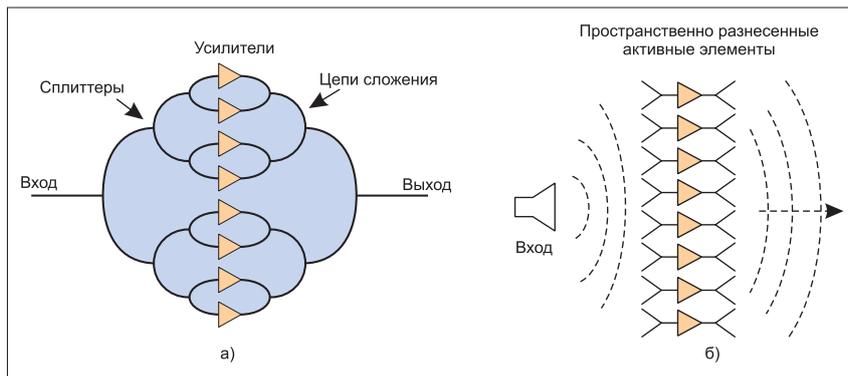
Несмотря на то что количество входов на схемном уровне ограничено, при выборе правильной стратегии объединения можно достичь более высокой выходной мощности. Наиболее популярными методами объединения на схемном уровне являются последовательная (chain), древовидная (corporate) [2] и радиальная структуры.

В сумматоре с последовательной связью выходная мощность каждого усилительного устройства передается на главную линию передачи с помощью направленных ответвителей (рис. 2а). Коэффициент связи для каждого ответвителя определяется общим количеством комбинируемых устройств  $N$  — например, требуемый коэффициент связи на  $N$ -м ответвителе составляет  $10\log N$ . Следовательно, каждый ответвитель имеет свой коэффициент связи, что увеличивает сложность разработки этого типа сумматора по мере увеличения количества устройств или повышения рабочей частоты. Другими серьезными недостатками метода являются ограниченная полоса пропускания и низкая эффективность при объединении большого числа усилительных устройств.

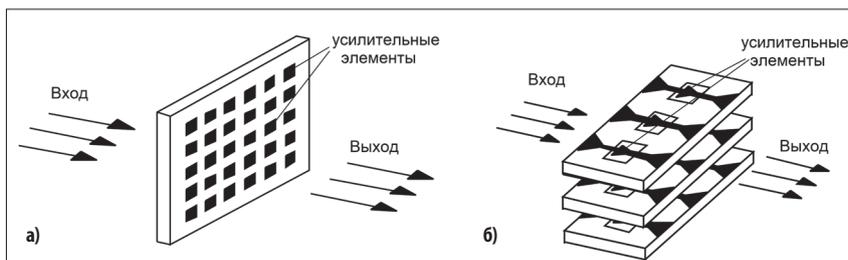
Древовидный сумматор мощности имеет более простую конструкцию. Он



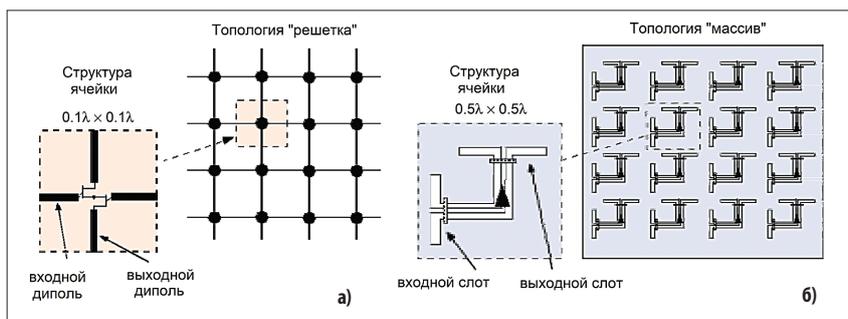
▲ Рис. 3. а) Схема; б) фотография [3] радиального сумматора мощности



▲ Рис. 4. Принцип пространственного объединения мощности



▲ Рис. 5. Методы пространственного объединения мощности: а) топология «плитка»; б) топология «лоток»



▲ Рис. 6. Конструкция методов объединения типа «плитка»: а) — решетка; б) массив

состоит из множества идентичных двухвходных сумматоров, соединенных в виде дерева (рис. 26). Таким образом, за  $N$  этапов можно объединить  $K = 2^N$  усилительных устройств. Основным недостатком данной структуры является то, что она позволяет объединять мощность только ограниченного числа устройств из-за повышения потерь при увеличении количества каскадов.

В отличие от корпоративного сумматора радиальный сумматор мощности (рис. 3) [3] объединяет мощность многих устройств за один этап, тем самым снижая потери в линии передачи. Следовательно, этот метод объединения может обеспечить более высокие коэффициент полезного действия и пропускную способность по сравнению с древовидным объединением мощности. Кроме того, его можно использовать для объединения мощных устройств.

Радиальные сумматоры мощности также имеют некоторые недостатки, особенно при увеличении числа входных портов. С одной стороны, сумматоры этого типа, как правило, отличаются достаточно громоздкой конструкцией.

Более того, при использовании большого количества усилителей мощности в малом пространстве тепловой режим работы такого сумматора требует тщательного изучения.

Когда усилители или компоненты монолитных интегральных схем объединены с использованием направленных сред, существует верхний предел количества усилительных устройств, который накладывает ограничение на суммарную мощность. Существует большой класс методов объединения мощности, в которых не используются направленные среды. В этом случае мощность объединяется в свободном пространстве (рис. 4). Основным преимуществом пространственного объединения мощности является то, что эффективность объединения мощности не зависит от количества объединенных устройств, что позволяет получить большую выходную мощность с помощью большего количества объединенных устройств.

Пространственное сложение мощности — это метод когерентного объединения мощности от нескольких усилительных устройств с использованием свобод-

ного пространства или воздуха в качестве среды разделения/объединения мощности внутри волноводной структуры. Данный метод часто называют квазиоптическим сложением [4].

Можно привести следующие преимущества пространственного суммирования мощности:

- более широкая полоса пропускания (по сравнению с древовидной и последовательной);
- более высокая энергетическая эффективность (КПД);
- устойчивость к отказам.

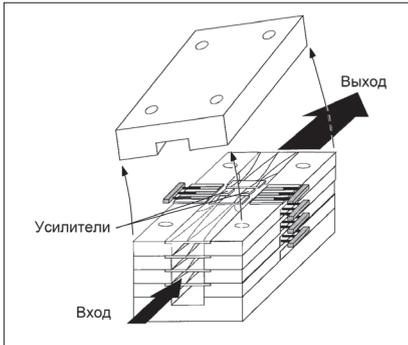
Недостатками пространственного суммирования мощности являются:

- сложная конструкция;
- сложная механическая сборка;
- особенности теплового режима.

Идея сложения мощностей источников гармонических колебаний в пространстве была высказана еще в 1930-х годах И. Х. Невяжским. Тогда же им было реализовано сложение мощностей двух коротковолновых радиопередатчиков, фазирование которых осуществлялось за счет работы от общего задающего генератора. За прошедшее время технология была усовершенствована за счет разработки различных методов объединения мощности. Сегодня можно выделить целые классы подобных методов, причем классификацию можно провести как по топологиям расположения активных элементов, виду структуры, в которую помещены активные элементы, так и по способу реализации вывода полученной суммарной мощности.

Массивы активных элементов для систем пространственного объединения реализуются в двух классических топологиях — «плитка» (tile) и «лоток» (tray). При использовании топологии «плитка» активные элементы располагаются в одной плоскости (рис. 5а), в то время как при использовании топологии «лоток» активные элементы располагаются на параллельных пластинах, как показано на рис. 5б. Для топологии «плитка» были предложены два различных подхода к проектированию: решетка и массив [5].

В топологии «решетка» активные устройства объединяются на вертикальном и горизонтальном пересечении металлических сетки, как показано на рис. 6а. Вертикальные проводники соединяют либо входные цепи, либо выходные цепи усилителей, а горизонтальные проводники соединяют противоположную цепь. Таким образом, входная волна может быть поляризована для взаимодействия только с входными цепями усилителей, а выходная волна будет поляризована ортогонально. Решетки поляризатора по обеим сторонам конструкции обеспечивают изоляцию между входными и выходными



▲ Рис. 7. Волноводный пространственный комбайнер [6]

цепями. В топологии «решетка» активные элементы обычно расположены намного ближе, чем половина длины волны. Проводники сетки по всей длине действуют как отдельные антенные элементы. Недостатком метода «решетка» 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.

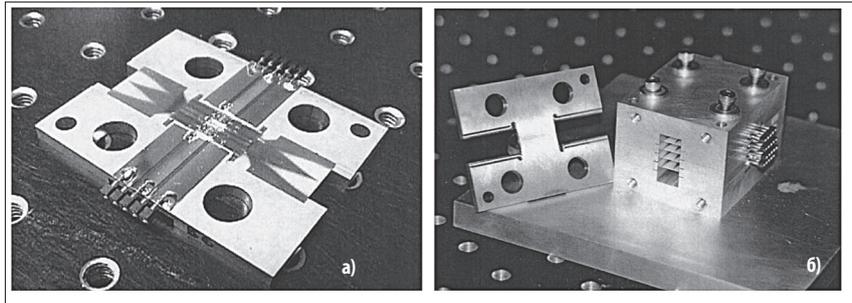
В топологии «массив» отдельные антенные элементы интегрируются непосредственно с активными устройствами или монолитными интегральными схемами, при этом каждый элемент действует как независимая ячейка (рис. 6б) [5]. Массив подобен периодической антенной решетке, чьи элементы размещены примерно на половину длины волны. Активные элементы могут быть размещены на одной из сторон или обеих сторонах массива, электромагнитные волны облучают массив с одной стороны, а излучаются в противоположную сторону.

Топология «лоток» (рис. 5б) 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.

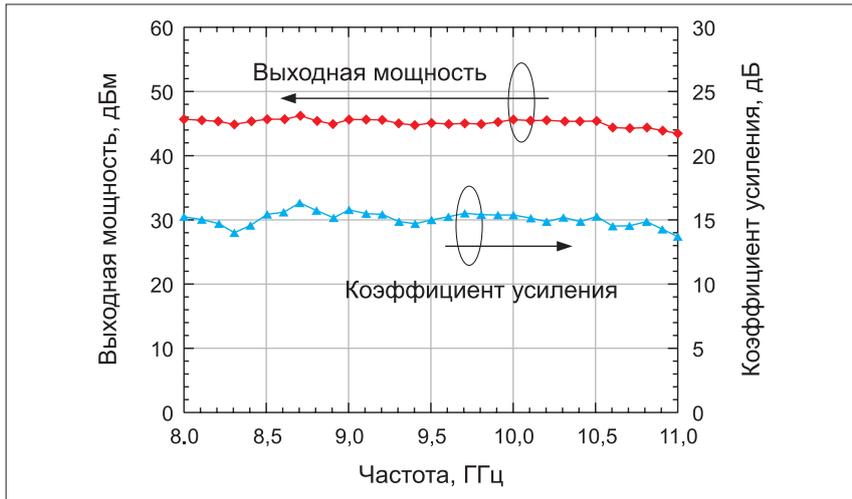
Известно несколько подходов для реализации такой топологии, но в общем их можно разделить на две группы в зависимости от вида структуры, в которую помещены лотки: волноводный и коаксиально-волноводный.

Например, в сумматоре мощности волноводного типа, рассмотренного в [6], конструкция представляет собой несколько активных антенных решеток, состоящих из антенных секций с конической щелевой линией и монолитных интегральных схем усилителей мощности (рис. 7).

Эти массивы установлены на небольшом металлическом приспособлении, как для механической поддержки, так



▲ Рис. 8. а) Фотография элемента конструкции; б) волноводного пространственного комбайнера, состоящего из четырех элементов (лотков) [6]

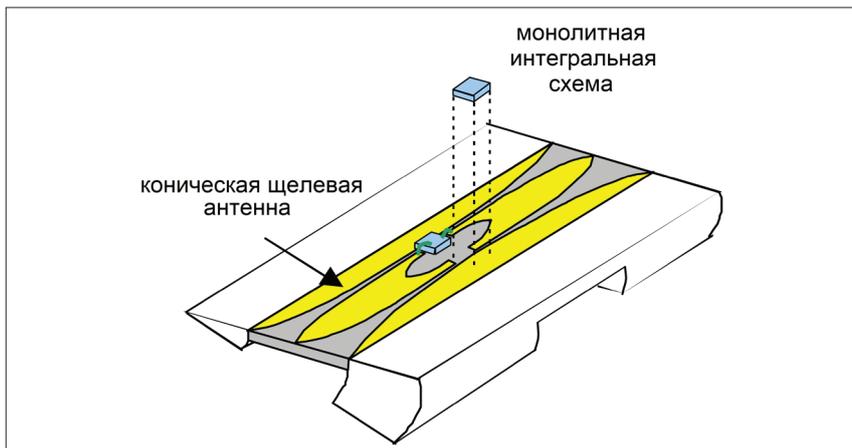


▲ Рис. 9. Характеристики волноводного комбайнера с пространственным сложением мощности (входная мощность 30 дБм) [6]

и для отвода тепла, и вставлены в стандартные волноводы X-диапазона. Фотографии отдельного лотка и всей конструкции сумматора приведены на рис. 8а и 8б, соответственно.

Максимальная выходная мощность, составляющая приблизительно 41 Вт, наблюдалась на частоте 8,7 ГГц с соответствующим коэффициентом усиления около 16,5 дБ. Коэффициент усиления изменяется в пределах 13,8–16,5 дБ, что указывает на широкополосные свойства данной конструкции (рис. 9). Коэффициент полезного действия такого сумматора на разных частотах колеблется в диапазоне 17–27%.

Для исследования плавного снижения характеристик (graceful degradation) два усилителя, расположенные на двух внешних лотках, были намеренно выключены. Никаких катастрофических отказов или резонансных провалов в результате выхода из строя этих усилителей не наблюдалось, выходная мощность и коэффициент усиления постепенно уменьшались при сокращении числа работающих усилителей. Сумматор потерял около 19 и 37% исходной выходной мощности соответственно для случаев, когда один и два усилителя были выключены. Разработчики отмечают, что если бы устройства были идеально изо-



▲ Рис. 10. Конструкция элемента для пространственного суммирования мощности в коаксиальном волноводе [7]

лированы, эти значения составили бы 12,5 и 25% соответственно.

Преимущество данной конструкции состоит в том, что металлический носитель отдельного лотка обеспечивает хорошую теплопроводность. Волноводная структура имеет некоторые недостатки, такие как ограничение полосы пропускания. Преобладающая компонента электромагнитного поля внутри прямоугольного волновода типа  $TE_{10}$  ( $H$  — магнитная или поперечно-электрическая  $TE$ -волна) вызывает неравномерное возбуждение усилителей внутри волновода, что приводит к уменьшению полосы пропускания. Еще один недостаток данной конструкции — относительная большая длина.

Перечисленные выше проблемы волноводных сумматоров мощности решаются применением иных конструкций волновода для получения  $TEM$ -волны ( $T$  — поперечно-электромагнитная волна). Одной из таких конструкций является, например, коаксиальный волновод. Традиционно коаксиальный волноводный сумматор использовался как сумматор с цилиндрическими резонаторами в 70-х годах прошлого века. В работе [7] коаксиальная структура впервые применена к пространственному сумматору мощности. В этом случае конструкция «лотков» представляет собой радиальные структуры (рис. 10) с конической щелевой антенной, равномерно распределен-

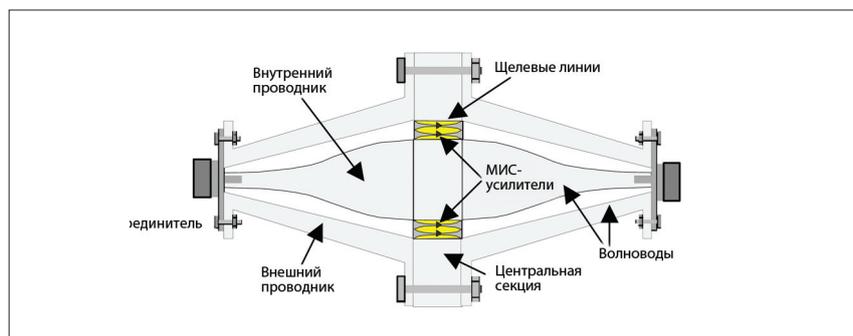
ные в кольцевой апертуре коаксиального волновода.

Компактная решетка из таких ребер, расположенная в коаксиальном волноводе, позволяет получить более широкую полосу пропускания. Сумматор питается от коаксиальной линии увеличенного размера, сужающейся к стандартным коаксиальным разъемам на обоих концах (рис. 11). Коаксиальная структура позволяет каждому усилительному устройству работать с одинаковым электромагнитным полем благодаря  $TEM$ -природе коаксиального кабеля, что обеспечивает оптимальную линейность и эффективность. Данная структура может вместить большое количество элементарных усилителей — микроволновых монолитных интегральных схем (МИС), обеспечить равномерное облучение массива и может быть предназначена для работы со сверхширокополосными сигналами.

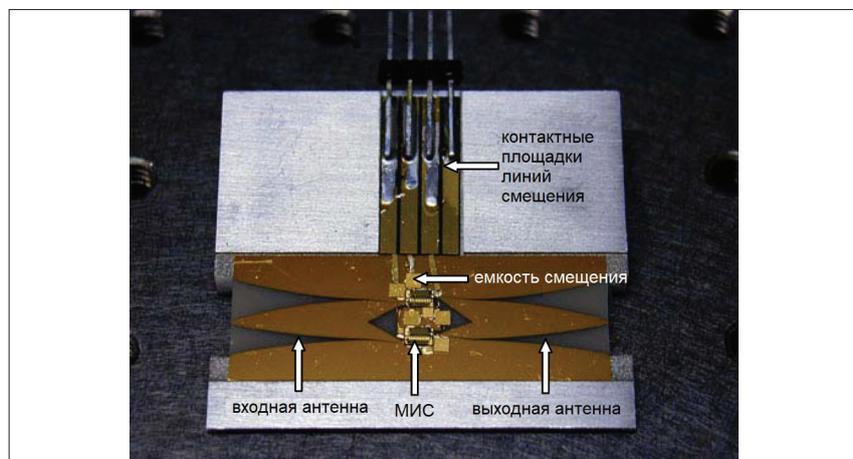
Для создания активного широкополосного усилителя использован набор из 32 широкополосных микроволновых монолитных интегральных схем (МИС) усилителей TGA8349 компании TriQuint. Эта МИС может генерировать выходную мощность 16 дБм в точке 1 дБ компрессии, полоса пропускания отдельной МИС усилителя составляет от постоянного тока до 14 ГГц.

Монтажный лоток с антеннами и усилителями показан на рис. 12. Каждый лоток содержит плату с входными и выходными антеннами коническими щелевыми антеннами и две МИС усилителей, которые припаяны к поверхности платы на основе нитрида алюминия (AlN). Поскольку AlN обладает очень высокой теплопроводностью, тепло, выделяемое маломощной МИС усилителя, может эффективно рассеиваться в волновод через плату. Подложка из AlN толщиной 10 мм расположена на выемке алюминиевого лотка, на ней расположены все антенны, МИС усилителей и конденсаторы смещения. Всего в систему с 16 лотками интегрировано 32 усилителя. Смещающие контактные площадки покрыты эпоксидной смолой сбоку от монтажного лотка. Усилитель TGA8349 с двумя затворами на полевых транзисторах GaAs требует четыре различных номинала напряжения смещения для управления затвором, стоком, вторым затвором и заземлением. Однослойные конденсаторы размещены для фильтрации сигналов переменного тока на линии смещения постоянного тока. Соединительные провода используются для подключения постоянного и радиочастотного сигналов. Для высокочастотных соединений предназначено несколько проводов, чтобы уменьшить паразитную индуктивность.

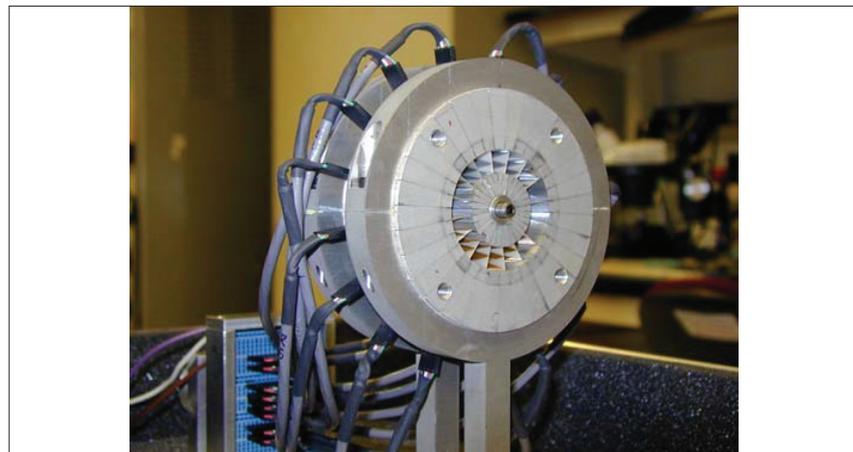
Открытый вид центральной секции показан на рис. 13. Отверстие коакси-



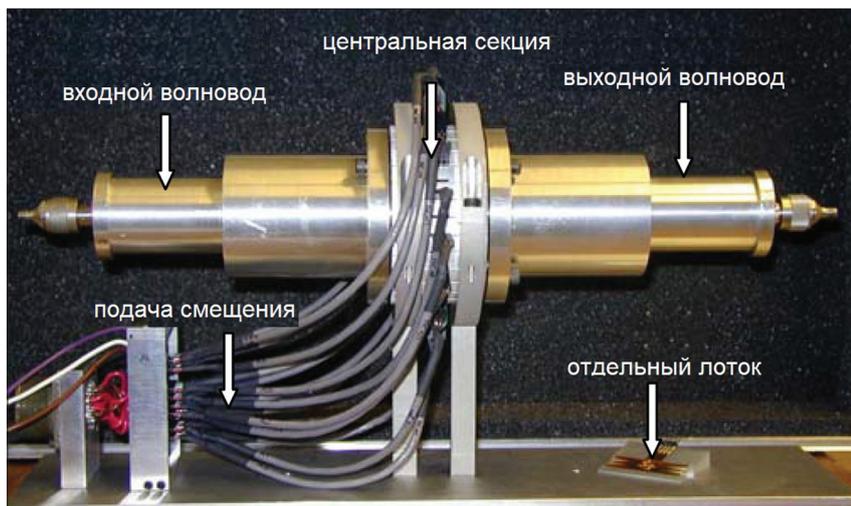
▲ Рис. 11. Конструкция коаксиально-волноводного пространственного сумматора мощности [7]



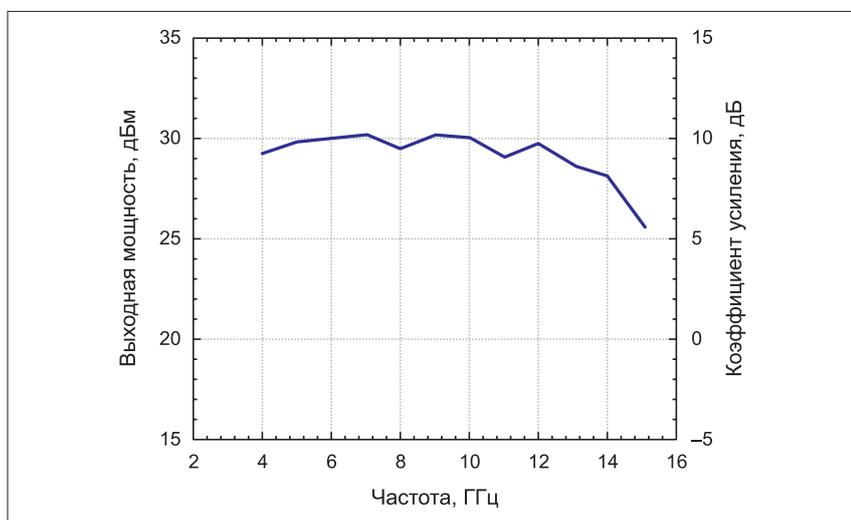
▲ Рис. 12. Фотография одного элемента (лотка) волноводно-коаксиального пространственного сумматора [7]



▲ Рис. 13. Фотография центральной секции коаксиально-волноводного пространственного сумматора мощности [7]



▲ Рис. 14. Фотография коаксиально-волноводного пространственного сумматора мощности [7]



▲ Рис. 15. Характеристики коаксиально-волноводного пространственного сумматора мощности [7]

ального волновода образуется, когда все лотки сложены вместе. На рис. 14 представлена полностью собранная система сумматора, включающая широкополосные коаксиальные конусы для питания нагруженной секции. Линии смещения соединяют контакты монтажного лотка с платой смещения, 8-канальный блок питания обеспечивает напряжение и ток стока, каждый канал управляет двумя лотками, в которых содержится в общем четыре МИС усилителя. Разделение источников питания постоянного тока обеспечивает изоляцию между линиями смещения, что помогает защитить другие схемы при выходе из строя некоторых МИС усилителей.

Разработанный в [7] коаксиально-волноводный пространственный сумматор мощности, включающий 32 микроволновые монолитные интегральные схемы, работал в диапазоне 4–17 ГГц при фиксированной входной мощности 20 дБмВт. В большей части диапазона достигалась выходная мощность 29–30 дБмВт. Верхний предел полосы пропускания сумматора ограничен частотной характеристикой отдельной МИС. Хорошее со-

гласование импеданса было достигнуто в диапазоне 3,5–18 ГГц. Общие потери сумматора, включая омические потери и потери из-за рассогласования, почти постоянны и равны 2 дБ во всем диапазоне. Это соответствует потерям на выходе в точке 1 дБ (точке насыщения) и, следовательно, 75% эффективности объединения (рис. 15).

При сравнении рассмотренных топологий пространственного сложения мощности, следует отметить, что топо-

логия типа «плитка» имеет преимущество при проектировании и производстве. Однако небольшие размеры ячеек ограничивают коэффициент усиления и мощность всей системы. С другой стороны, поскольку в топологии типа «лоток» электрические цепи отделены от массива, она имеет большее пространство для более крупных микросхем и, следовательно, может обеспечивать более высокую выходную мощность. Кроме того, топология типа «лоток» обеспечивает максимальную изоляцию между активными цепями, а также облегчает управление температурным режимом. Таким образом, можно выделить следующие преимущества топологии «лоток» по сравнению с топологией «плитка»: лучшее терморегулирование; более широкая полоса пропускания; более высокое усиление и выходная мощность.

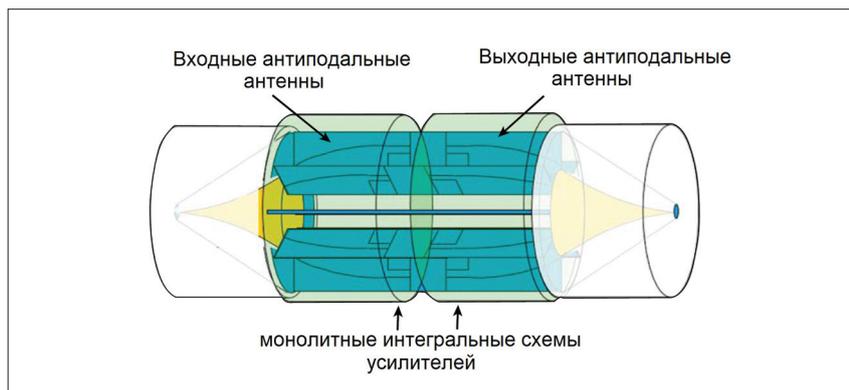
В следующем разделе рассмотрено продолжение работы по оптимизации коаксиально-волноводных пространственных сумматоров и продемонстрированы устройства, позволяющие получить более высокую мощность при меньших размерах.

### Технология суммирования мощности Spatium

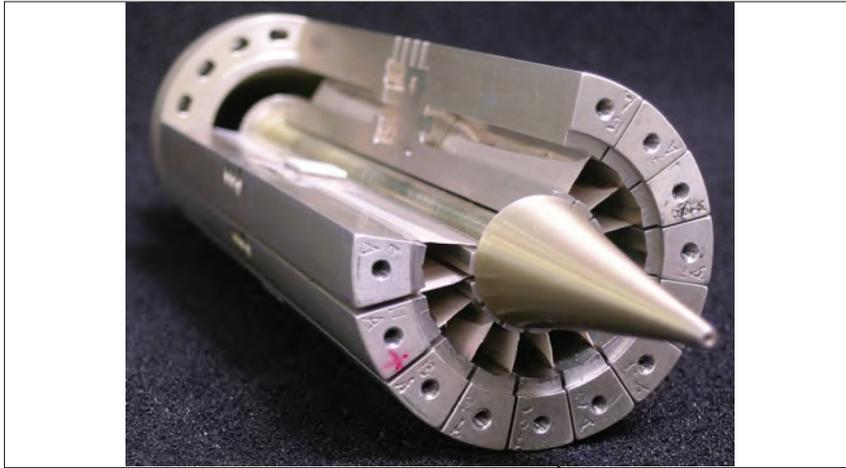
Значительный прогресс в области пространственного объединения мощности достигнут в технологии Spatium™, основанной на разработке, первоначально выполненной в рамках гранта Small Business Innovative Research (SBIR), предоставленного фирме CAP Wireless Inc. военно-воздушными силами США в 2004 году.

Технология Spatium компании CAP Wireless является результатом работы, проделанной техническим директором Pengcheng Jia для получения степени доктора философии в рамках программы развития технологии пространственного комбинирования Калифорнийского университета в Санта-Барбаре (UCSB) [8].

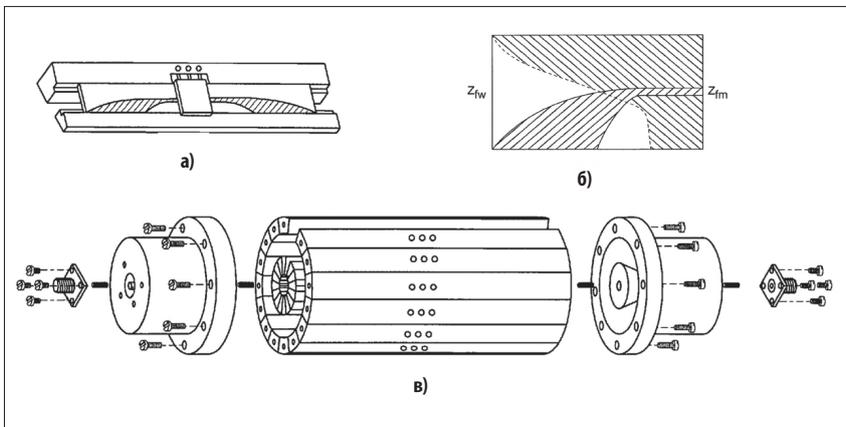
Особенности запатентованной технологии заключаются в следующем. На входе усилителя (рис. 16) централь-



▲ Рис. 16. Пространственная структура Spatium [9]



▲ Рис. 17. Усилитель, выполненный по технологии Spatium [10]



▲ Рис. 18. Запатентованная конструкция коаксиально-волноводного сумматора мощности [11]

ный проводник от коаксиального входного разъема переходит к большему центральному проводнику, а затем к нескольким противоположно расположенным (антиподальным) элементам конической щелевой антенны (так называемого плавникового типа). Широкополосные антенные элементы расположены радиально вокруг центра для сбора всей радиочастотной/микроволновой энергии от входного разъема. Затем они передают эту энергию многочисленным (как правило, шестнадцать) микрополосковым линиям передачи для питания отдельных усилителей. Последние также устанавливаются вокруг центра, каждый в безрезонансном, герметичном керамическом корпусе, включающем соответствующий теплоотвод. Поскольку МИС усилителей являются неотъемлемой частью запатентованной конструкции, устройства на основе технологии Spatium чаще называют не устройствами объединения мощности (комбайнерами), а усилителями мощности. Фотография усилителя, выполненного по данной технологии, приведена на рис. 17.

Входные сигналы одновременно усиливаются с коэффициентом усиления, который может обеспечить каждая отдельная МИС. Затем выходная мощность

усилителей выводится на выходные микрополосковые линии. Они, в свою очередь, соединяются с антенными элементами, расположенными, как и входные антенны, антиподально, и далее с коаксиальной волноводной передающей структурой. Здесь электромагнитные поля, генерируемые выходами усилителей, когерентно объединяются и передаются обратно в центральный провод коаксиального соединителя, расположенного на выходе усилителя.

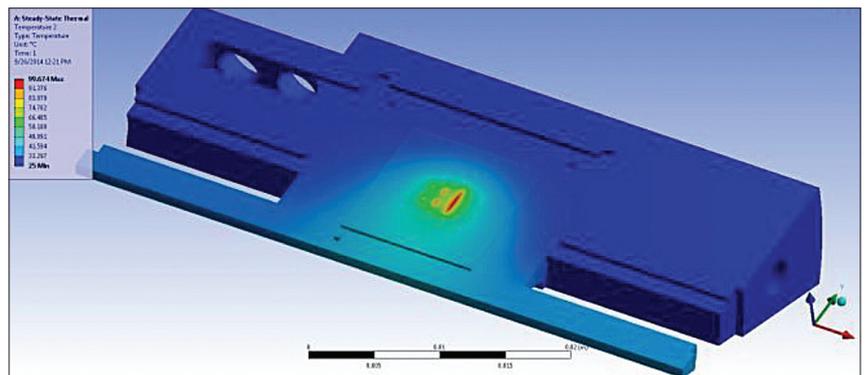
Первоначальные результаты работы были запатентованы компанией CAP Wireless в 2007 году [11]. Технология Spatium, по сути, — усовершенствованная идея пространственного сумматора

волноводного типа. В данном патенте раскрыты структура отдельного лотка, (рис. 18а), конструкция конической щелевой антенны плавникового типа (finline) (рис. 18б), конструкция коаксиального волновода (рис. 18в), а также схема герметичного уплотнения, схема повышения эффективности объединения мощности и схема управления температурой.

Высокая эффективность суммирования мощности в усилителях Spatium предполагает однородные амплитудные и фазовые характеристики отдельных усилителей, а также строго контролируемый баланс амплитуды и фазы для линий питания к усилителям и выходных линий от усилителей, которые объединяются для получения выходного сигнала. Однако из-за большого количества объединяемых элементов среднеквадратичный фазовый шум всего устройства меньше, чем у одного усилительного элемента, и значительно ниже, чем у усилителя на лампе бегущей волны.

Запатентованная структура объединения мощности усилителя Spatium может суммировать выходы МИС 16 усилителей с общими суммирующими и вносимыми потерями менее 0,5 дБ в полосе пропускания более декады, что дает типичную эффективность объединения лучше 90% на частотах миллиметрового диапазона. Потери на объединение мощности в усилителе Spatium не увеличиваются с увеличением количества элементов, как в обычном микрополосковом или полосковом сумматоре мощности, например, с древовидной структурой (рис. 26). При этом не требуется, чтобы количество усилительных устройств было степенью двойки. Следовательно, в усилителях Spatium можно ожидать низких потерь на объединение и высокой эффективности, даже если для достижения конечной выходной мощности объединяются 18 или 23 усилителя [12].

Собственная полоса пропускания усилителя Spatium практически не ограничена, низкая частота ограничена длиной конструкции, а высокая частота — механическими допусками. Диаметр усилите-



▲ Рис. 19. Моделирование тепловых характеристик отдельного клина [13]

лей в значительной степени определяется МИС усилителей, связанными с ними требованиями упаковки и напряжения смещения, а также температурными режимами.

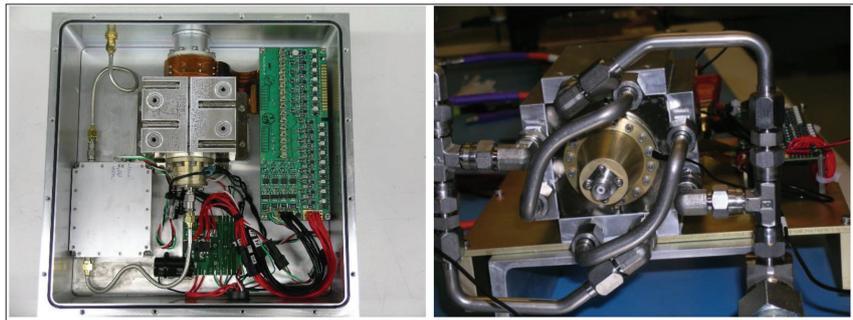
Несмотря на то что технология Sratium достаточно эффективна с точки зрения объединения мощности высокочастотных GaAs и GaN МИС усилителей, высокая плотность мощности усилителей Sratium, особенно с 16 или более каскадами МИС, представляет проблему при проектировании теплоотводящих конструкций.

Усилитель Sratium выделяет значительное количество тепла, которое необходимо надлежащим образом отводить для достижения максимального срока службы и надежности. Для предотвращения перегрева температура каждой из 16 секций (клиньев) усилителя Sratium должна поддерживаться ниже +85 °С. Для того, чтобы лучше понять тепловую нагрузку на каждый клин при установке в окончательной конструкции усилителя Sratium, были изготовлены прототипы клиньев с упакованными в корпуса МИС, установленными на различных теплоотводящих материалах, и выполнено тепловое ИК-сканирование. Подробное тепловое моделирование может подтвердить схему управления температурным режимом и выделить области, требующие улучшения (рис 19).

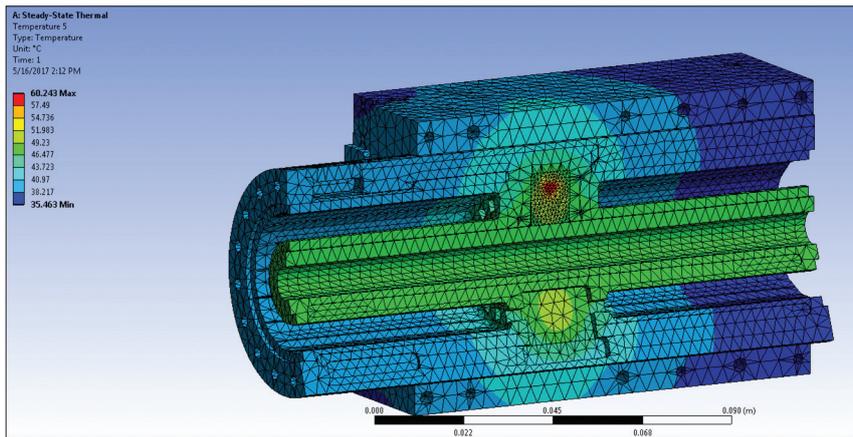
Усилитель с технологией Sratium — это только усилитель. В большинстве случаев он не включает ни температурной компенсации любого типа, ни защиты от перегрева или понижения температуры. В усилителях есть индикаторы постоянного изменения температуры (недоступные для пользователя), показывающие максимальную температуру, при которой усилитель работал или подвергался воздействию. Сам пользователь несет ответственность за поддержание (и при желании мониторинг) температуры усилителя для обеспечения надежной работы с заданными характеристиками.

Отвода тепла от усилителя можно добиться с помощью любого из традиционных средств, включая: принудительную конвекцию воздуха; кондуктивный метод (подвод к охлаждающей пластине); жидкостное охлаждение; радиатор. Большинство усилителей Sratium предназначено для использования с кондуктивным охлаждением.

Для того чтобы довести технологию усилителей Sratium до более высоких уровней мощности, превратив ее в практическую замену ламповым усилителям, компания-разработчик исследовала возможности использования улучшенных систем отвода тепла. К ним относятся жидкостное охлаждение с помощью за-



▲ Рис. 20. Некоторые способы охлаждения усилителей Sratium: а) конвекционное с пассивной конвекцией; б) жидкостное [13]



▲ Рис. 21. Тепловое моделирование с изображением поперечного сечения конструкции Sratium [13]

патентованной теплопроводной жидкости Fluorinert, а также композитные терморегулирующие материалы, например, пиролитический графит.

В [13] приведены некоторые реализованные решения (рис. 20) по управлению температурным режимом. Каждое решение уникально и зависит от рассеиваемой мощности, метода охлаждения и доступного пространства, а также от требований к эксплуатации и сроку службы.

В современных продуктах с технологией Sratium распределение тепла равномерно, а взаимный нагрев сведен к минимуму (рис. 21). Из-за низких потерь на объединение происходит меньшее рассеяние тепла. Это в свою очередь требует меньшей мощности отдельных уси-

лителей для получения заданного уровня мощности.

Секции коаксиальной конструкции идентичны и взаимозаменяемы. Полоса пропускания и механическая реализация позволяют многократно использовать конструкцию, предоставляя возможность быстро внедрять новые полупроводниковые устройства и технологии по мере их появления.

Таким образом, благодаря эффективному объединению большого числа усилителей, усилители мощности Sratium обеспечивают: низкие потери, широкую полосу рабочих частот, плавное ухудшение характеристик при отказе, работу при низком напряжении, хорошую линейность и низкий уровень фазового

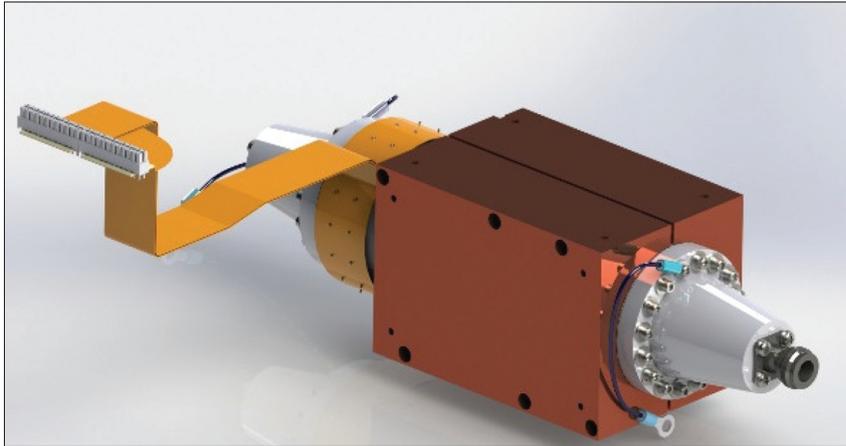


▲ Рис. 22. Фотография усилителей Sratium [10]

Таблица 1. Усилители Spatium компании Quorgo

Модель	Описание	$F_{\min}$ , ГГц	$F_{\max}$ , ГГц	$P_{\text{sat}}$ , Вт	G, дБ	$G_{\text{ss}}$ , дБ	P, дБм	КПД, %	V, В
QPB1000	Усилитель высокой мощности Spatium GaN, 2–18 ГГц, 75 Вт	2,0	18	75	18	20	48	18	22
QPB1005	Усилитель высокой мощности Spatium GaN, 450 Вт, 2–6 ГГц	2	6	400	17	25	19	20	28
QPB1006	Усилитель высокой мощности Spatium GaN, 150 Вт, 2–7,5 ГГц	2,0	7,5	150	22	30	52	25	28
QPB2731	Усилитель высокой мощности Spatium GaN 100 Вт, 27–31 ГГц	27	31	100	18	20	48	12	22
QPB2731N	Усилитель высокой мощности Spatium GaN 100 Вт, 27–31 ГГц	27	31	100	13	22	50	23	22
QPB3238	Модуль пространственного Spatium 130 Вт, 32–38 ГГц	32	38	125	10	19	51	15	24

**Примечание.** В заголовке таблицы 1 используются следующие обозначения:  $F_{\min}$ ,  $F_{\max}$  — минимальная и максимальная частота рабочего диапазона, соответственно,  $P_{\text{sat}}$  — выходная мощность в режиме насыщения, G — коэффициент усиления  $G_{\text{ss}}$  — коэффициент усиления в режиме слабых сигналов, P — мощность, КПД — коэффициент полезного действия, V — напряжение питания.



▲ Рис. 23. Фотография усилителя QPB1000 компании Quorgo

шума, сочетающиеся с высокой надежностью полупроводниковых устройств.

### Продукты и разработки

Несколько коммерческих продуктов усилителей, в которых используется технология Spatium, предлагались компанией CAP Wireless до 2013 года.

Выходная мощность первых усилителей СНРА0618–2 с технологией Spatium, содержащих 16 GaAs МИС мощностью 2 Вт каждая, составила 35 Вт в полосе частот 6–18 ГГц при эффективности суммирования мощности 70–75%.

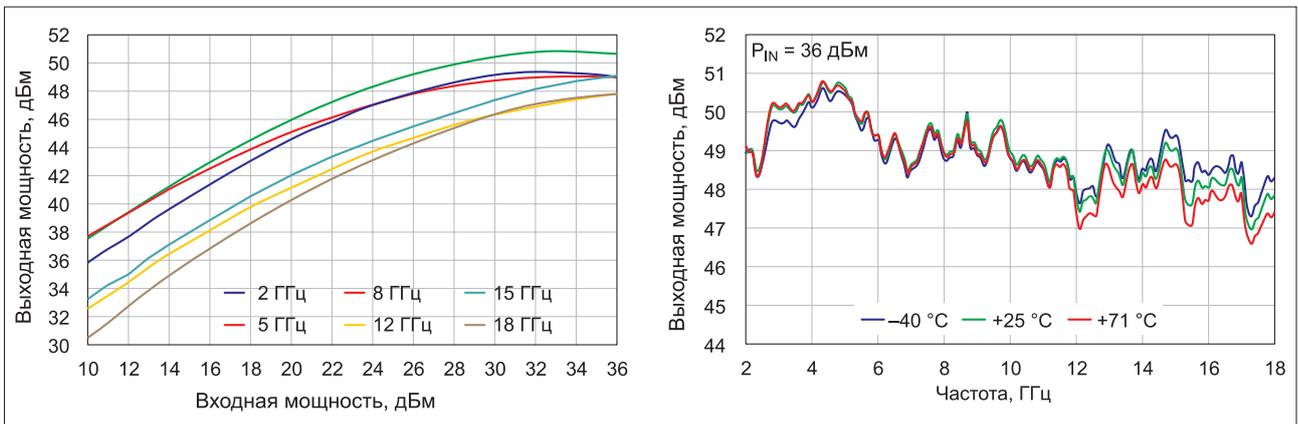
Первое поколение устройств Spatium, предназначенных для диапазона частот 2–20 ГГц, имело размеры

2,81×3,00×9,90 дюйма. После поднятия нижней границы частотного диапазона до 4,5 ГГц, конструкция второго поколения, перекрывающего диапазон частот 4,5–20 ГГц, составила 2,40×2,40×5,00 дюйма. Размеры усилителя Spatium третьего поколения, разработанного для приложений Ka-диапазона, были сокращены еще больше (рис. 22).

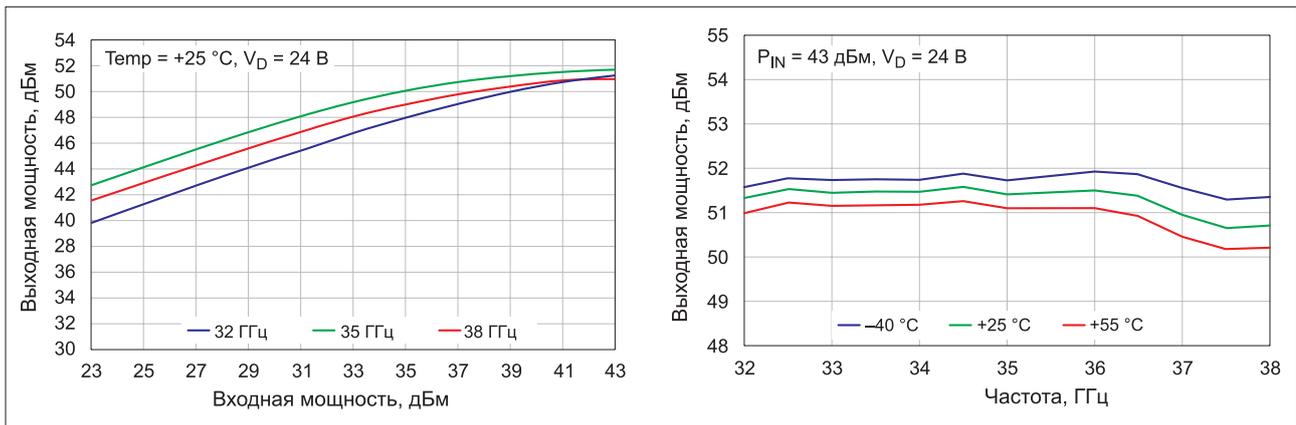
В августе 2013 года TriQuint объявила о приобретении компании CAP Wireless и запатентованной ею технологии Spatium. [14]. В феврале 2014 года компания RF Micro Devices, ведущий разработчик и производитель РЧ-приборов с высокими эксплуатационными характеристиками, и TriQuint Semiconductor,

ведущий поставщик РЧ-решений и технологических инноваций, объявили о заключении окончательного соглашения о слиянии, которое привело к созданию новой компании. Теперь продукты и разработки под торговой маркой Spatium предлагаются компанией Quorgo [15]. В настоящее время широкополосные продукты Spatium, выпускавшиеся компанией CAP Wireless, устарели, вместо них предлагается новая линейка усилителей, которая включает шесть наименований (таблица 1), различающихся между собой мощностью и диапазоном частот. Все современные усилители используют технологию GaN, в отличие от усилителей предыдущих поколений, где в некоторых моделях использовались МИС на основе GaAs. Устройства на основе GaN показывают лучшую линейность в сравнении с GaAs и очень низкие фазовые шумы, что важно для применения методов модуляции высокого порядка. Исследования показывают, что линейность GaN выше, чем GaAs, до 2 дБ при работе в одночастотном режиме и до 1,5 дБ в многочастотном режиме [16].

Самый широкополосный продукт этой линейки усилитель QPB1000 (рис. 23) — мощный усилительный модуль на основе твердотельных GaN-усилителей. Для усилителя требуется +22 В постоянного тока и терморегулятор, предоставляемый заказчиком. Устройство подходит для ис-



▲ Рис. 24. Зависимость выходной мощности усилителя QPB1000 от входной: а) при различных частотах и зависимости мощности насыщения от частоты; б) при различных рабочих температурах ( $P_{\text{in}} = 36$  дБм)



▲ **Рис. 25.** Зависимость выходной мощности усилителя QRB3238 от входной: а) при различных частотах и зависимость мощности насыщения от частоты; б) при различных рабочих температурах ( $P_{in} = 43$  дБм)



▲ **Рис. 26.** Фотография усилителя модели RM022020



▲ **Рис. 27.** Фотография усилителя с пространственным объединением мощности компании RF Core

питательного оборудования большой мощности, систем связи, приложений для подавления помех или любых приложений, требующих возможности усиления сигналов в широком диапазоне частот 2,0–18,0 ГГц.

Усилитель имеет хорошую линейность, особенно на высоких частотах (рис. 24а), мощность в режиме насыщения составляет 50–110 Вт для разных частот диапазона (рис. 24б).

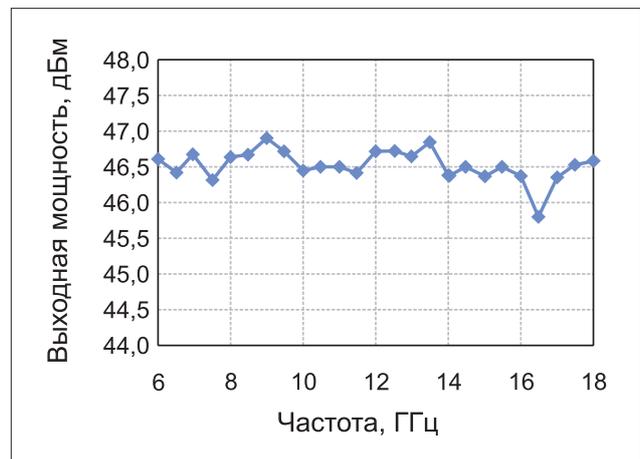
Поставляемая в комплекте плата смещения обеспечивает все необходимые номиналы напряжения от одного входа +22 В. Доступны функции отключения и импульсной работы, а также вывод сводной информации о неисправностях. Также предусмотрен текущий индивидуальный мониторинг устройства в аналоговом формате.

Менее широкополосные, но более мощные усилители QRB1005, QRB1006 для С-диапазона и QRB2731, QRB2731N и QRB3238 для Ка-диапазона обеспечивают лучшие характеристики линейности и неравномерности мощности насыщения в диапазоне рабочих частот (рис. 25).

Положительное напряжение питания стока и отрицательное напряжение питания затвора подаются на каждую МИС через узел печатной платы из отдельного узла платы смещения (Bias Card). Узел платы смещения генерирует отрицательное напряжение питания затвора из положительного входного напряжения. Карта устанавливает правильную последовательность подачи напряжения стока и затвора на МИС, чтобы предотвратить повреждение усилителя. Путь обратного тока от усилителя Spatium к основному источнику питания проходит через провода, которые подключены к «цилиндру» усилителя Spatium (рис. 23).

Плата смещения может быть интегрирована с усилителем, или поставляться отдельно. В виде отдельных продуктов представлены платы смещения QRB4220 и QRB4221. Они специально разработаны для интеграции в усилитель, что позволяет уменьшить размер и вес, а также снизить электрические потери в цепях смещения. Платы обеспечивают индивидуальные настройки смещения для каждой секции усилителя.

Стандартные усилители Spatium используются в более крупных устройствах, таких как инструментальные усилители. В качестве примера одного из этих инструментальных усилителей, основанных на технологии Spatium, можно привести разработанный компанией CAP Wireless и выпускаемый в настоящее время усилитель модели RM022020, который имеет типичную выходную мощность в режиме насыщения 20 Вт в диапазоне 2–20 ГГц. Усилитель обеспечивает усиление 40 дБ с диапазоном регулировки усиления 10 дБ и имеет уровень паразитных излучений до -75 дБн. Его габаритные размеры 17,1×16,9×5,1 дюйма (43,4×42,9×13,0 см). Он также подходит для приложений радиоэлектронной борьбы и радиоэлектронного противодействия (рис. 26).



▲ **Рис. 28.** Зависимость мощности насыщения от частоты усилителя RCA60180H46A

**Таблица 2.** Повышающие преобразователи компании Wavestream

Модель	Описание	$F_{\min}-F_{\max}$ , ГГц	$P_{\text{sat}}$ , дБм	$G_{\text{ss}}$ , дБ	V, В
MBB-XDS080	Компактный повышающий преобразователь X-диапазона, 80 Вт	7,9–8,4	62	49	28 или 48
WBAK-050G01-0004	Компактный повышающий преобразователь Ka-диапазона, 50 Вт	28,0–29,0; 29,0–30,0; 30,0–31,0	47	$62,5 \pm 2,5$	20–56
WBAK-050G01-0005	Компактный повышающий преобразователь Ka-диапазона, 50 Вт	27,5–28,5; 28,25–29,25; 29,0–30,0	47	$62,5 \pm 2,5$	20–56
JNB-KAM050	Повышающий преобразователь Ka-диапазона, 50 Вт	30,0–31,0	47	$62,5 \pm 2,5$	90–246
MMB-KAD012	Повышающий преобразователь GaN Ka-диапазона, 12 Вт	29–30; 30–31	41,5	57	22–54
BUE060G02A	Повышающий преобразователь Ku-диапазона, 60 Вт	13,75–14,5	47,8	70	22–50

**Примечание.** В заголовке таблицы 2 используются следующие обозначения:  $F_{\min}-F_{\max}$  — рабочего диапазон передаваемых частот,  $P_{\text{sat}}$  — выходная мощность в режиме насыщения,  $G_{\text{ss}}$  — коэффициент усиления в режиме слабых сигналов, V — напряжение питания.

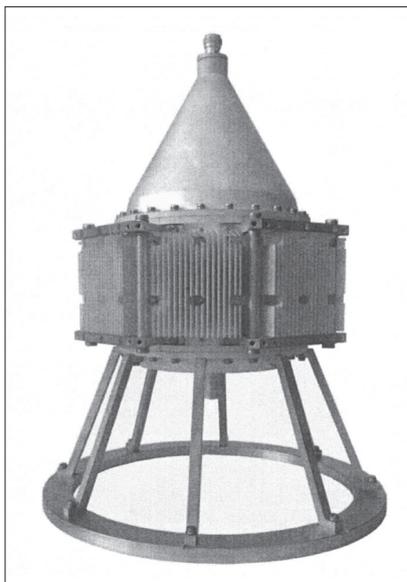
Следует также упомянуть производителей электронных компонентов, в линейке продуктов которых содержатся компоненты, выполненные по технологии пространственного объединения мощности коаксиально-волноводной структуры. Одним из таких производителей является корейская компания RF Core [17] с двумя усилителями: RCA140155H54A диапазона 14–15,5 ГГц мощностью 240 Вт с коэффициентом усиления 68 дБ и RCA60180H46A диапазона 6–18 ГГц мощностью 40 Вт с коэффициентом усиления 29 дБ (рис. 27). Оба усилителя имеют хорошие характеристики неравномерности мощности насыщения в диапазоне рабочих частот (рис. 28).

Американская компания Wavestream [18] также сообщает о запатентованной технологии пространственного объединения мощности Spatial advantEdge™, используемой при производстве блоков повышающих преобразователей (BUC — block upconverter) для Ku-, Ka- и X-диапазонов (таблица 2).

Все представленные в таблице 2 модели имеют уровень паразитных излучений –60 дБн, кроме модели BUE060G02A, работающей с уровнем паразитных излучений –55 дБн. Все модели, кроме JNB-KAM050 питаются от источников напряжения постоянного тока.

В России в 2019 году получен патент на полезную модель [19], в которой применен коаксиально-волноводный метод пространственного суммирования мощности (рис. 29). Разработанная конструкция позволяет использовать в усилительных ячейках микросхемы усилителей мощностью 50 Вт с расчетной выходной мощностью всего усилителя СВЧ с пространственным суммированием мощности до 1 кВт. Готовых изделий, выполненных в соответствии с патентом, в серийном производстве пока не представлено.

Тем временем компания Qorvo продолжает исследования предшественников в данной области. В современных разработках, запатентованных компанией в последние несколько лет,



**▲ Рис. 29.** Общий вид макета твердотельного усилителя СВЧ с пространственным суммированием мощности, в котором используются 24 платы одиночных усилителей [19]

представлены усовершенствованные конструкции антенн [20], применены антенные сборки [21], а также предусмотрено соединение усилителей между собой с выводом соединительных проводников на внешнюю поверхность [22]. Заявлены конструкции усилителей мощностью 100 Вт, работающих в диапазонах 27–31 ГГц и 32–38 ГГц [23]. Судя по всему, следует ждать появления на рынке новых устройств, использующих технологию пространственного суммирования мощности Spatium. ■

#### ЛИТЕРАТУРА

1. A Comprehensive Guide to mmWave Solutions. [www.qorvo.com/design-hub/ebooks/comprehensive-guide-to-mmwave-solutions](http://www.qorvo.com/design-hub/ebooks/comprehensive-guide-to-mmwave-solutions).
2. Russel K. J. Microwave power combining techniques//IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1979. Vol. MTT-27. No. 5.
3. [www.mpdigest.com](http://www.mpdigest.com)
4. Spatial Combining Technology: Revolutionizing the Microwave Power Amplifier. [www.microwavejournal.com/articles/print/6838-spatial-combining](http://www.microwavejournal.com/articles/print/6838-spatial-combining), CAP Wireless Inc., 7 pages

5. Harvey J., Brown E. R., Rutledge D. B., York R. A. Spatial Power Combining for High power transmitter//IEEE microwave magazine. 2000. Vol. 1. Iss. 4.

6. Cheng N.-S., Alexanian A., Case M. G., Rensch D. B., York R. A. 40-W CW Broad-Band Spatial Power Combiner Using Dense Finline Arrays//IEEE Transactions on Microwave. 1999. Vol. 47. Iss. 7.

7. Jia P., Chen L.-Y., Alexanian A., York R. A. Multioctave Spatial Power Combining in Oversized Coaxial Waveguide//IEEE Transactions on Microwave. 2002. Vol. 50. Iss. 5.

8. Jia P. Broadband High Power Amplifiers Using Spatial Power Combining Technique. A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical and Computer Engineering. 2002.

9. Montgomery R., Courtney P. Solid-State PAs Battle TWTAs for ECM Systems//Microwave Journal. June 14, 2017.

10. Spatium Info Flyer 09\_28\_09.

11. US 7,215,220 B1.

12. Browne J. Spatial Combining Creates Linear Power//Microwaves&RF. Dec. 15, 2011.

13. APPLICATION NOTE: Spatium® Amplifier Modules.

14. Гольцова М. TriQuint Semiconductor. Продвигаться дальше и быстрее//ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2014. № 7.

15. [www.qorvo.com/](http://www.qorvo.com/)

16. Лаврентьев М., Гелерман Д. Новое поколение твердотельных усилителей мощности GaN НЕМТ в системах спутниковой связи и вещания//Первая миля. 2013. № 3.

17. [www.rfcore.com](http://www.rfcore.com)

18. [www.wavestream.com](http://www.wavestream.com)

19. Патент RU 189022 U1 «Твердотельный усилитель СВЧ с пространственным суммированием мощности».

20. Патент US 10741899 B2 Spatial coupler and antenna for splitting and combining electromagnetic signals.

21. Патент US 10749276 B2 Spatial power combining devices and antenna assemblies.

22. Патент US10263651 B1 Spatial power — combining devices with amplifier connectors.

23. GaN Pas Deliver 100 W, 27–31 and 32–38 GHz, Qorvo, Inc, Microwave journal, 2020.