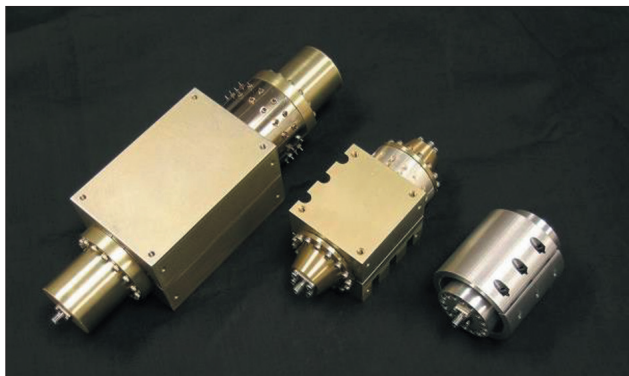


120 Вт в Ka-диапазоне, полученные коаксиально- волноводным суммированием мощности на GaN МИС

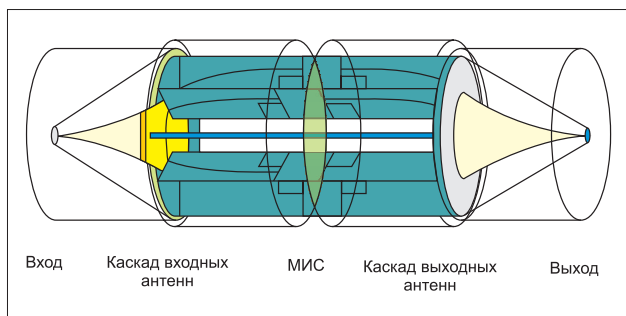
Сочетание мощных монокристаллических интегральных схем (МИС) СВЧ-диапазона и оригинальной системы суммирования мощностей позволило достичь параметров, доступных прежде только усилителям на основе ламп бегущей волны (ЛБВ). В статье рассмотрена сборка с выходной мощностью 120 Вт в диапазоне 27–31 ГГц, состоящая из шестнадцати 10-Вт усилителей выполненных по технологии GaN НЕМТ и коаксиально-волноводной схемы сложения их сигналов. КПД сборки достигает 25%.

ВВЕДЕНИЕ

Патент на разработку широкополосных усилителей, суммирующих мощность от отдельных усилительных структур за счет перехода «полосковая антенна–коаксиальный волновод», изначально принадлежал компании CAP Wireless Inc. С поглощением CAP Wireless компанией TriQuint Semiconductor (вошедшей в Qorvo Inc. — прим. перев.) данная технология вышла на СВЧ-рынок под названием Spatium.



▲ Рис. 1. 16-канальные усилители мощности семейства Spatium



▲ Рис. 2. Структура сложения мощностей усилителя семейства Spatium

Оригинальная платформа включала в себя 16 МИС GaAs-усилителей диапазона 2–20 ГГц с уровнем мощности 10 Вт каждый. Данная платформа за счет сочетания различных технологий (GaAs/GaN), лежащих в основе усилителей, позволяет получить следующие комбинации диапазонов частот и выходных мощностей:

- 6–18 ГГц, 35 Вт;
- 2–6 ГГц, 300 Вт;
- 2–18 ГГц, 40 Вт;
- 2–18 ГГц, 100 Вт.

Оригинальная платформа была первой из пяти, демонстрировавших возможности технологии Spatium, остальные четыре представляют собой такие сочетания диапазонов частот и числа элементов:

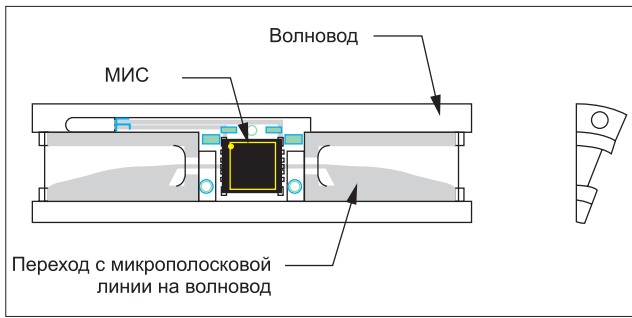
- 4,5–20 ГГц, 16 элементов;
- 4,5–20 ГГц, 10 элементов;
- 7,5–15 ГГц, 16 элементов;
- 10–40 ГГц, 16 элементов.

Данная платформа позволяет комбинировать большие количества МИС-усилителей, обеспечивая многооктавное перекрытие по частоте от 2 до 40 ГГц с низкими потерями при сложении мощностей. Диапазон 10–40 ГГц используется в спутниковых коммуникациях и системах РЭБ. Высокие значения КПД данной платформы обусловлены преимуществами использования GaN-элементной базы, за счет чего сама платформа Spatium подобралась вплотную к характеристикам, ранее достижимым только ЛБВ. На рис. 1 показаны усилители диапазонов 2–20 ГГц, 4,5–20 ГГц и 10–40 ГГц.

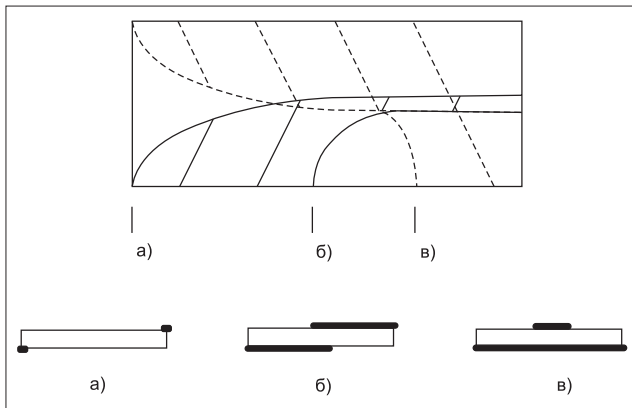
СТРУКТУРА СЛОЖЕНИЯ МОЩНОСТЕЙ SPATIUM НА ОСНОВЕ КОАКСИАЛЬНОГО ВОЛНОВОДА

Пять платформ семейства Spatium основаны на одной и той же масштабируемой архитектуре, показанной на рис. 2.

Структуры разделения мощности сигнала на входе и суммирования на выходе зеркальны относительно центра усилителя. Схема с идентичными сумматорами мощности на выходе



▲ **Рис. 3.** Одна из собранных плат, расположенных радиально в усилителе Spatium

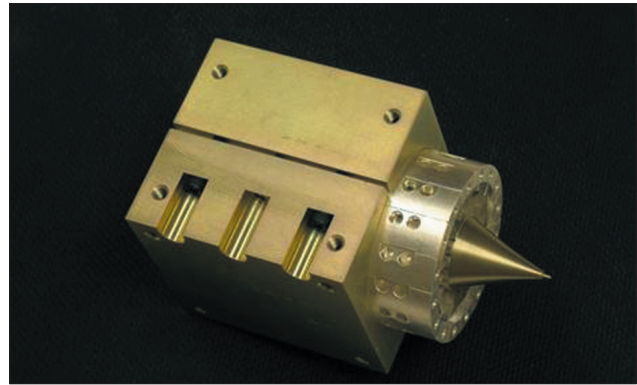


▲ **Рис. 4.** Конструкция микрополосковых плат

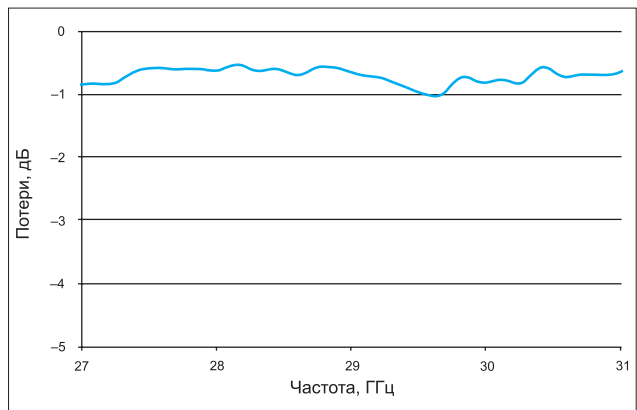
и делителями на входе наиболее проста для разработки и производства. Структура усилителя содержит несколько клиновидных (в поперечном сечении) сборок (рис. 3).

Каждая сборка имеет клиновидную форму и в качестве носителя использует алюминиевое или медное основание. Собранные вместе, они образуют коаксиальную структуру, заключающую в себе электромагнитное поле. Включенная в каждый клин плата является линией передачи СВЧ-мощности на коаксиальный волновод. Ее структура показана на рис. 4. Преобразование поля начинается в точке «а», и к точке «в» электрическое поле оказывается сдвинутым на 90° относительно первоначальной фазы. По завершении перехода на микрополосковую линию на плату можно поместить любой усилитель, согласованный по входу и выходу в данном частотном диапазоне на 50 Ом.

Центр вкручивающейся конической детали в переходе на входе и выходе Spatium совпадает с центром структуры, образованной собранными по кругу платами. Конус, сужаясь, образует центральный проводник коаксиального волновода с со-



▲ **Рис. 5.** Собранный усилитель серии Spatium с удаленным внешним конусом полосково-коаксиального перехода

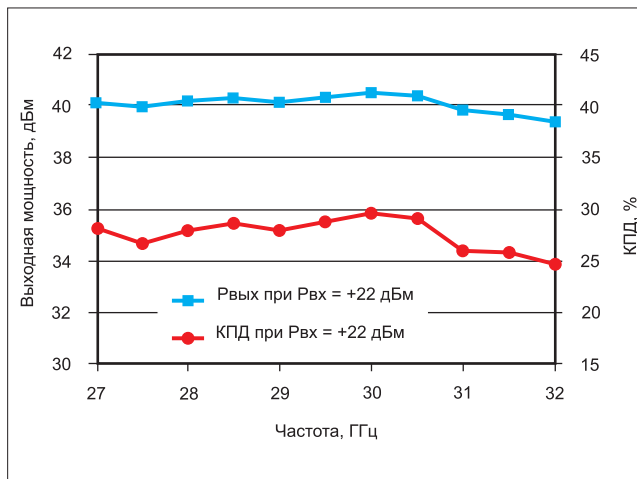


▲ **Рис. 6.** Потери при сложении мощностей в структуре Spatium с пассивными элементами

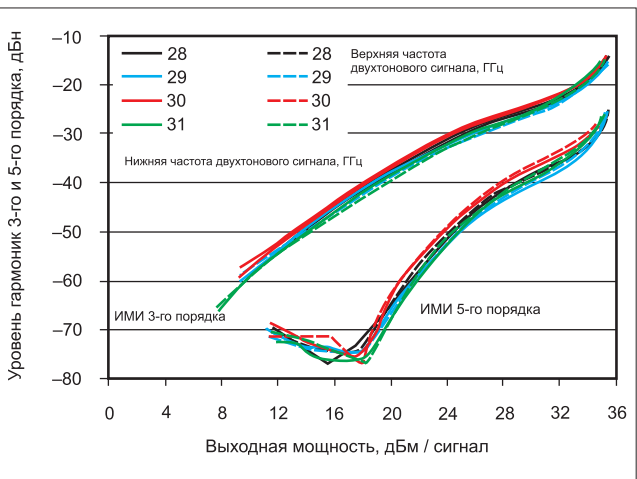
противлением 50 Ом. Геометрические параметры конуса оптимизированы таким образом, чтобы передать сигнал на 50-Ом коаксиальный соединитель в соответствующей полосе частот. Поверхность внешнего конуса также сужается со стороны коаксиального волновода, и, будучи прикрепленной к платам с другой стороны, обеспечивает надежный электрический контакт соседних плат.

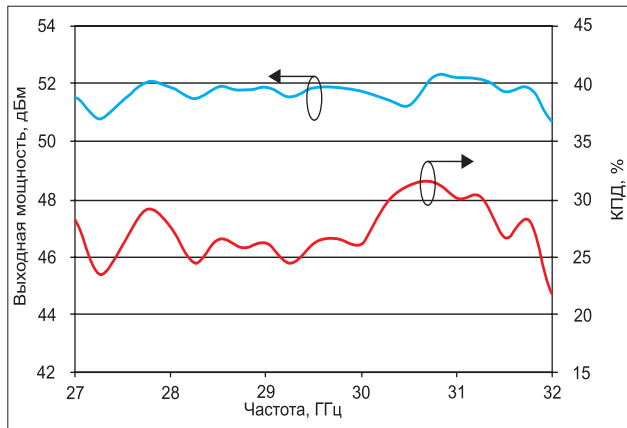
На рис. 5 показан усилитель Spatium диапазона 4,5–20 ГГц с удаленными внешним конусом перехода и соединителем. Хорошо виден внутренний конус перехода и собранные платы усиления.

Каждый элемент структуры Spatium был протестирован с установленными вместо МИС-усилителей 50-Ом пассивными цепями. Результат — потери менее 1 дБ на плату, что показывает согласование всей структуры и то, какую СВЧ-мощность можно подвести к нагрузке и какую МИС усилителя необходимо выбрать для тех или иных целей.



▲ **Рис. 7.** Характеристики системы Spatium





▲ Рис. 8. Мощность в режиме насыщения и КПД системы Spatium

Тестирование структуры Spatium с пассивными ИС на платах для определения вносимых потерь преследовало также цель определить возможность ее использования в системах спутниковых коммуникаций диапазона 27–31 ГГц. Потери составили от 1,4 до 2,4 дБ на всю структуру. Вычитая из этой величины 0,4 дБ — потери микрополосковой платы 0,750" и потери на передачу сигнала при соединении разваркой, и поделив результат на 2 для оценки потерь, связанных только с суммированием мощности, имеем потери 0,5–1,0 дБ. График зависимости потерь при разделении и сложении сигналов от частоты в полосе 27–31 ГГц показан на рис. 6. Так как эти данные включают в себя и потери сигнала в соединителях, то мы имеем полные потери СВЧ-мощности на участке от выходов МИС до нагрузки.

Благодаря малым потерям при суммировании мощности и общей прогнозируемости структуры усилителя Spatium, малосигнальные параметры всего усилителя близки к таковым для каждого из 16 элементов, и общая мощность, поделенная на 16, близка к мощности каждого элемента за вычетом потерь при суммировании мощности. Потери известны и могут быть измерены, таким образом для расчета всей сборки усилителей требуется рассчитать базовый усилительный элемент, из которых состоит Spatium.

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СВЧ GaN МИС

Система Spatium обеспечивает работу в диапазоне 10–40 ГГц, но практическую ценность представляет ее использование для спутниковых коммуникаций в диапазоне 27–31 ГГц. В конце

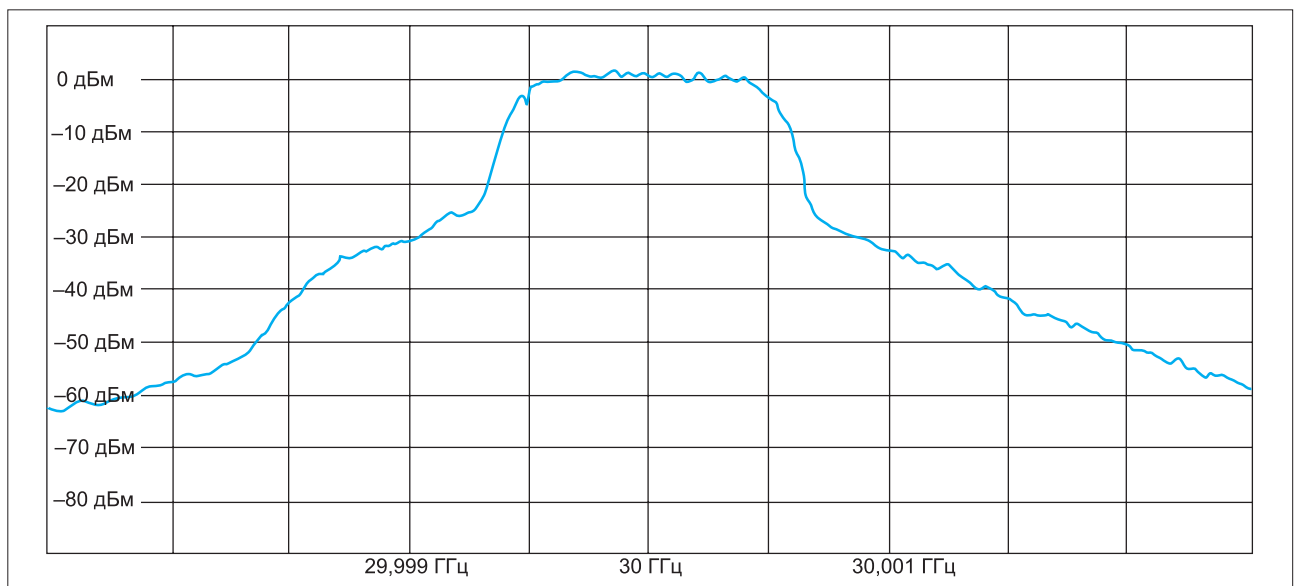
2013 г. Qorvo представило публике новинку — TGA2595, монолитную СВЧ-микросхему, выполненную в соответствии с процессом 0,15 мкм GaN. Микросхема имеет три каскада усиления, балансные вход и выход, 10 Вт выходной мощности и КПД величиной более 25% (рис. 7).

Ключевым параметром в спутниковых коммуникациях является линейность. Методика ее измерения сводится к определению двухчастотных интермодуляционных искажений (ИМИ). Существует требование, согласно которому интермодуляционные составляющие третьего порядка должны быть на 25 дБ ниже суммарной мощности двух тестовых несущих. Это и является максимумом выходной мощности усилителя, находящегося в линейном режиме. Линейность GaAs-усилителей характеризуется уровнем мощности, соответствующем 1 дБ компрессии (P1дБ). Обычно GaAs-устройства имеют очень высокую мощность насыщения, поэтому у них P1дБ и мощность насыщения располагаются близко друг к другу. GaAs-приборы достигают требований линейности, предъявляемым к спутниковым телекоммуникациям с запасом 2–3 дБ ниже требуемого значения P1дБ, без дополнительных схем линеаризации.

GaN-усилители обычно имеют более пологую кривую насыщения мощности. TGA2595 — не исключение, и имеет выходную мощность в режиме насыщения 40 дБ, тогда как параметр P1дБ ниже на 5 дБ. График, приведенный на рис. 7, показывает результаты двухчастотных измерений для TGA2595. Из него видно, что усилитель удовлетворяет требованиям линейности спутниковых коммуникационных устройств, обеспечивая ИМИ 33 дБ для каждой несущей, 36 дБ — для их суммарной мощности. Многие GaN-устройства удовлетворяют данным требованиям, имея выходную мощность большую, нежели уровень P1 дБ. TGA2595, обеспечивая необходимую линейность, имеют при выходной мощности на 4 дБ ниже мощности насыщения такую же линейную мощность, как и большинство доступных на рынке GaAs-устройств в данном частотном диапазоне (опять же, без использования дополнительных средств, повышающих линейность). Но GaN-устройства при этом имеют гораздо более высокий КПД, что делает их оптимальным выбором для устройств спутниковых коммуникаций.

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ УСИЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ SPATIUM

Как уже упоминалось, сборка усилителей Spatium насчитывает 16 микросхем TGA2595, по одной на каждую плату. Каждая



▲ Рис. 9. Спектр выходного сигнала при измерении линейности усилителя Spatium

микросхема TGA2595 припаивается к медно-молибденовой подложке (Cu-Mo-Cu) золото-оловянным припоем и затем эта сборка приклеивается к плате эпоксидным клеем с высокой тепло- и электропроводностью. Соединение выводов сигналов и питания МИС выполнено разваркой провода. Для измерений в пассивном режиме на сборке установлен соединитель 2,92 мм. Поскольку выходная мощность усилителя, составляющая 120 Вт, превышает возможности этого соединителя, большинство клиентов используют волновод WR-28 для последующей передачи СВЧ-мощности в антенну. На выходе был использован именно такой прямоугольный волновод. Встроенный переходник с коаксиального на прямоугольный волноводы изготовлен специально для Spatium. Он обеспечивает переход коаксиальной моды TEM в волноводную моду TE₁₀.

Комбинация из 16 усилительных микросхем TGA2595 дает всей структуре на выходе мощность в режиме насыщения от 120 до 150 Вт в полосе частот 27–31 ГГц. КПД сборки составляет минимум 23% в указанном диапазоне. График на рис. 8 показывает частотную зависимость обоих параметров. Все измерения проводились в режиме насыщения и в непрерывном режиме подачи СВЧ-сигнала. Эти зависимости хорошо коррелируют с графиками, полученными от каждого из устройств сборки в отдельности. КПД обоих усилительных схем (на базе TGA2595 и сборки) близок и отличается незначительно, что говорит о низких потерях при суммировании.

Линейность структуры была также измерена с помощью другого метода, использующегося для усилителей мощности в системах спутниковых коммуникаций. Максимальная линейная выходная мощность определяется, когда на вход подается сигнал с QPSK-модуляцией, а спектральный прирост выходного сигнала, измеренный при сдвиге скорости одного символа, составляет -30 дБн. Для этого эксперимента была выбрана модуляция со скоростью передачи 1 MSPS (мегасимволов в секунду). Максимальная линейная мощность в этом режиме была измерена на частоте 30 ГГц и составила 48 дБм, что на 4 дБ ниже мощности в режиме насыщения.

Такое же значение требуется от микросхемы при измерении двумя частотами для удовлетворения требований линейности. Спектр выходного сигнала показан на рис. 9.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был продемонстрирован результат, полученный системой сложения выходной СВЧ-мощности GaN МИС-усилителя в диапазоне частот Ка. Система обеспечивает широкий диапазон частот, сложение высоких уровней мощности и малые потери. Показанная система — одна из пяти в семействе Spatium, которое обеспечивает масштабируемость и применимость в самых разных областях. Используемая в составе платы усилителя микросхема TGA2595 демонстрирует высокий КПД и линейность в Ка-диапазоне благодаря лежащему в ее основе процессу 0,15-мкм GaN HEMT, разработанному компанией Qorvo.

ЛИТЕРАТУРА:

1. P. C. Jia. A 2 to 20 GHz High Power Amplifier Using Spatial Power Combining Techniques//*Microwave Journal*. April, 2005.
2. S. Behan. Spatially Combined Amplifiers for Wide Band Power Applications//*IMS2009 MicroApps Presentation*. June, 2009.
3. Jinho Jeong, Youngwoo Kwon, Sunyoung Lee, Changyul Cheon, Sovero EA. A 1.6 W Power Amplifier Module At 24 GHz Using New Waveguide-Based Power Combining Structures//*IEEE*. 2000. Vol. 2. Piscataway, NJ, USA.
4. Multi-Octave Spatial Power Combining in Oversized Coaxial Waveguide//*IEEE Trans. Microwave Theory and Tech*. 2002. Vol. 50, № 5.
5. Pengcheng Jia, Lee-Yin Chen, Alexanian A, York RA. Broad-Band High-Power Amplifier Using Spatial Power-Combining Technique//*IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*. 2003. Vol. 51. № 12.
6. P. Courtney, T. Tran, C. Bartak, S. Behan, P. Jia. High Efficiency 80W X-Band Power Amplifier using Coaxial Waveguide Spatial Power Combining Technique//*IMS2010*. June, 2010.
7. C. Campbell, Y. Liu, M. Kao, S. Nayak, P. Courtney. High Efficiency Ka Band Gallium Nitride Power Amplifier MMICs//*IEEE COMCAS 2013 Presentation*. October, 2013.