Интеграция антенн в многослойные керамические подложки

Низкотемпературные многослойные керамические подложки LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics) имеют более высокую диэлектрическую проницаемость, чем большинство органических печатных плат. В сочетании с высокочастотными свойствами и практически любым числом слоев это считается хорошим условием для высокой плотности монтажа. Теплопроводность LTCC в 10 раз выше, чем у обычных печатных плат, что является преимуществом при необходимости отвести тепло от полупроводниковых компонентов. Структурирование осуществляется методом трафаретной печати, что представляет собой еще одно преимущество для недорогого серийного производства таких модулей.

Петер Улиг (Peter Uhlig)

uhlig@imst.de

М. Гайслер (M. Geissler)
Сибилл Хольцварт (Sybille Holzwarth)
Рейнхард Кульке (Reinhard Kulke)
Йорген Ляйс (Jürgen Leiss)
Дирк Мантойфель (Dirk Manteuffel)
М. Мартинес-Васкес (M. Martínez-Vázquez)

Перевод: Андрей Новиков

andrej.novikov@uni-rostock.de

Введение

За последние 10 лет появились LTCC-системы с еще меньшими потерями, которые особенно хорошо подходят для интеграции модулей микро- и миллиметровых волн. Интеграция антенны во входной каскад микроволнового модуля — последовательный шаг, который необходим для предотвращения фазовых и амплитудных погрешностей, возникающих из-за кабеля и разъема. Хотя более высокая диэлектрическая проницаемость вызывает и дополнительные проблемы. Некоторые антенны становятся благодаря ей более компактными, но за счет ширины полосы частот. Благодаря трехмерной интеграции в LTCC становятся возможными новые концепты антенн, которые более чем компенсируют этот недостаток. Далее будут приведены некоторые примеры таких решений для различных частот и соответствующие результаты измерений.

Многослойная структура LTCC особенно хорошо подходит для интеграции полосковых антенн. Излучателем полосковой антенны является металлическая поверхность, которая отделена от поверхности заземления слоем диэлектрика. Хотя форма такого излучателя (патч-антенна) может быть любой, тем не менее, большинство разработок базируются на прямоугольниках, кругах, треугольниках или эллипсах. Благодаря небольшой конструкции и механической прочности такие патч-антенны особенно интересны для мобильных применений. Питание излучателя происходит по микрополосковой линии передач на том же уровне, через щелевое соединение коаксильного кабеля с волноводом или через сквозное соединение с сетью питания. Антенна с одним излучателем может охватывать полосу частот от 6 до 10% и иметь направленность от 6 до 8 дБ [1]. Конечно, можно расположить несколько таких излучателей вместе для того, чтобы получить плоскую антенну с улучшенными характеристиками направленности. Специальные сети питания и форма излучателя ведет к линейной или круговой поляризации.

Патч-антенна

Самая простая форма патч-антенны — это прямоугольный излучатель с одной точкой питания. Степень свободы в создании конструкции при этом хорошо контролируется. Во многих научных работах было доказано, что такой тип можно успешно применять в диапазоне до 60 ГГц. Круговой поляризации можно добиться с помощью использования двух точек питания, которые эксплуатируются с разностью фаз в 90° [2]. На рис. 1 изображена антенна с диапазоном в 1,5 ГГц на LTCC-подложке с гибридным кольцевым соединением и двумя точками питания. Сдвиг фаз осуществляется здесь за счет гибридного кольца. Размер квадратной патч-антенны приблизительно соответствует половине длины волны в подложке. Более высокая диэлектрическая проницаемость способствует тому, что антенна получается более компактной. Входное сопротивление излучателя настраивается за счет изменения расстояния от точки питания до соединения с корпусом. Значительная толщина этой антенны необходима для того, чтобы получить требуемую ширину полосы частот. Такая антенна демонстрирует хорошие результаты в качестве приемной антенны для полосы L1 европейской спутниковой навигационной системы Galileo.

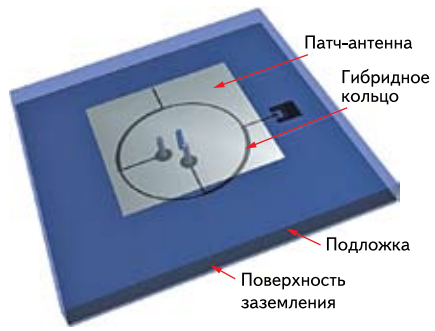

Рис. 1. Патч-антенна на LTCC Dupont 951

Двухдиапазонная антенна для глобальной навигационной спутниковой системы (GNSS) Galileo

В данном случае необходимо покрыть два диапазона частот одной антенной. При этом речь идет о двух диапазонах сигнала системы Galileo: L1 — центральная частота 1,575 ГГц, ширина полосы частот 30,8 МГц и E5a — центральная частота 1,176 ГГц, ширина полосы частот 20,5 МГц. Если увеличить ширину полосы частот отдельной патч-антенны для того, чтобы покрыть оба диапазона, то это вызвало бы ограничения функционирования обеих рабочих частот.

Этот недостаток можно устранить с помощью использования для каждого диапазона частот отдельного излучателя с относящейся к нему сетью питания, которая также специально для этого оптимизирована. Расположение этих патч-антенн друг над другом в многослойной плате представляет собой трудности для проектировщиков антенн из-за их двухстороннего соединения, однако решает задачу покрытия обоих диапазонов одной компактной антенной [2]. На рис. 2 изображена схематическая структура антенны. Благодаря диэлектрической проницаемости LTCC-подложки, равной 6,6, возможно разместить антенну на 60×60 мм². Требуемая ширина полосы частот делает необходимой высоту субстрата в 10 мм.

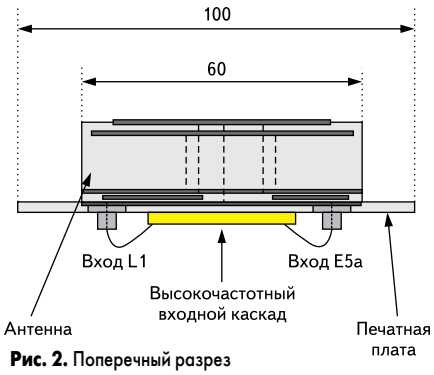

Рис. 2. Поперечный разрез вмонтированной антенны

Сигналы Galileo имеют круговую поляризацию для того, чтобы не возникала необходимость отслеживать поляризацию при мобильных применениях. В случае с представленной здесь антенной поляризация достигается за счет двух точек питания для каждого излучателя, которые подключены при помощи сквозного соединения к выходам каждого гибридного кольца.

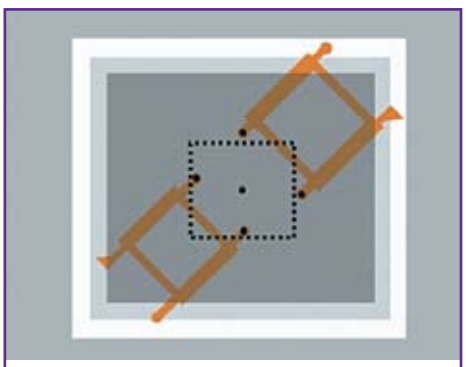

Рис. 3. Антенна, вид сверху

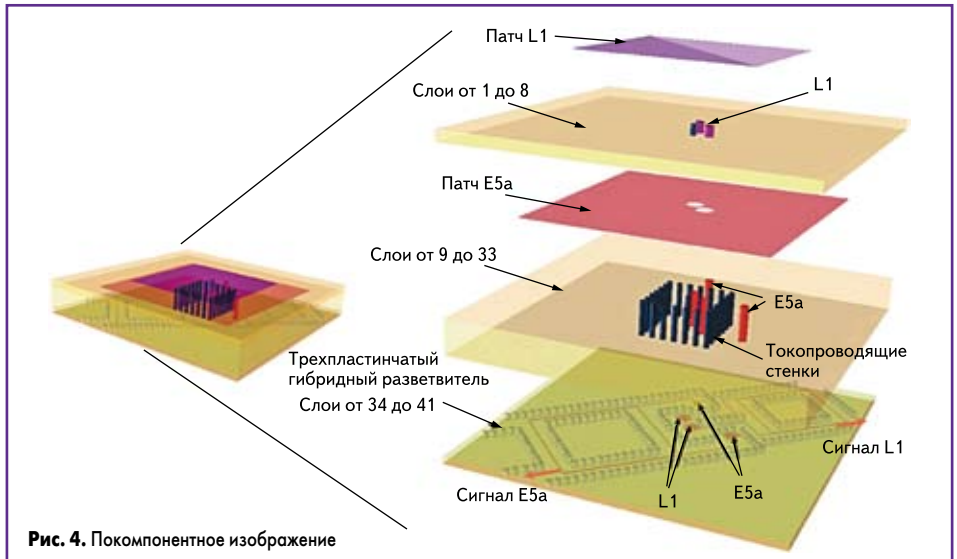

Рис. 4. Покомпонентное изображение двухдиапазонной антенны для глобальной навигационной спутниковой системы (GNSS) Galileo

Вид сверху на рис. 3 показывает расположение обоих гибридных колец и перегородку — соединение с корпусом для большего излучателя. На рис. 4 изображена внутренняя структура LTCC-антенны. Для обоих элементов-излучателей L1 и E5a предусмотрены дополнительные поверхности для лазерной подгонки для того, чтобы контролировать допуск материала и производственный допуск.

На рис. 5 изображена изоляция 90° гибридного ответвителя, которая была измерена для расчета ширины полосы частот антенны. Оба входа имеют хорошую подгонку для соответствующей рабочей частоты. Измеренные диаграммы направленности изображены на рис. 6 (E5a)

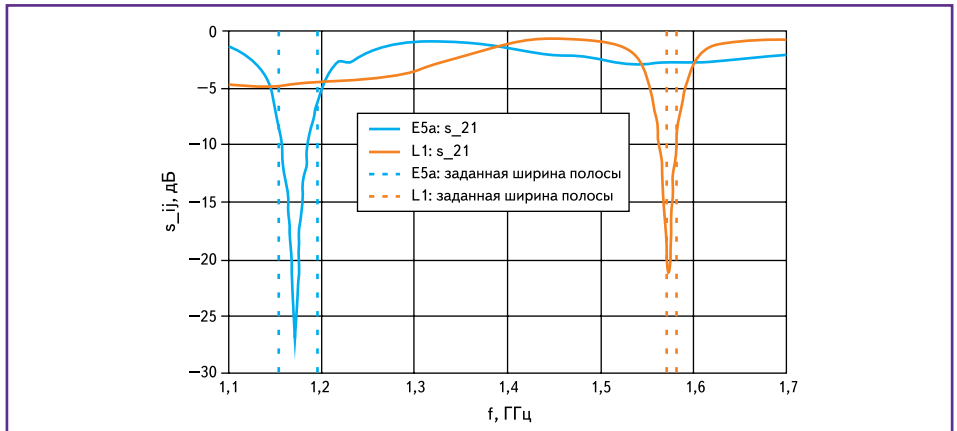

Рис. 5. Изоляция 90° гибрида, измеренная для расчета ширины полосы частот антенны

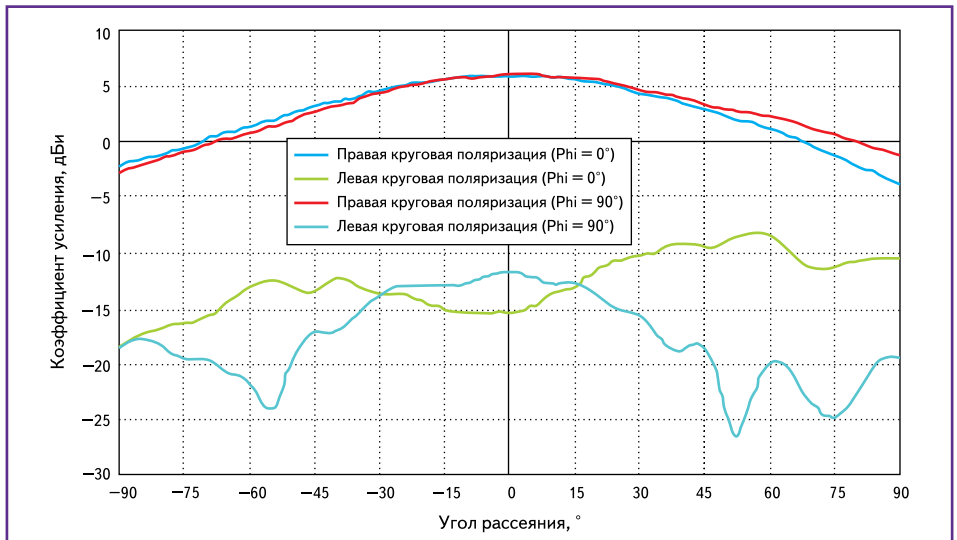

Рис. 6. Диаграмма направленности для собственной и кросс-поляризации (E5a — 1,176 ГГц)

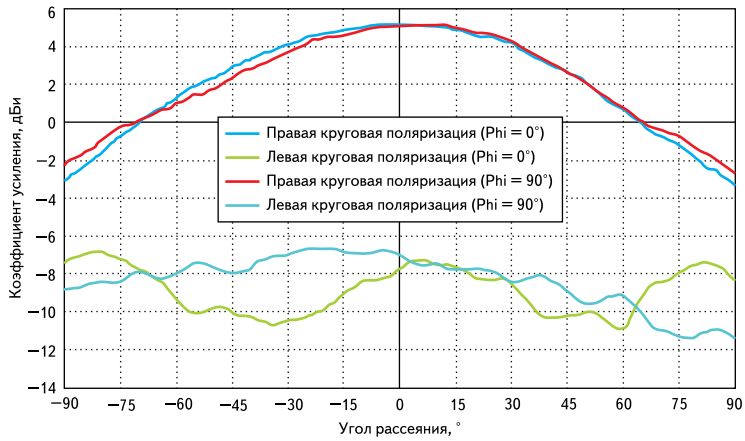

Рис. 7. Диаграмма направленности для собственной и кросс-поляризации (L1 — 1,575 ГГц)

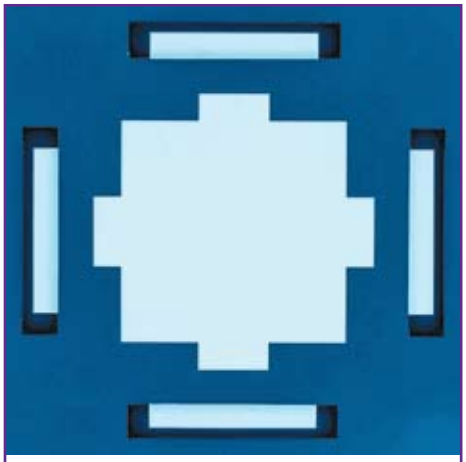

Рис. 8. LTCC двухдиапазонная Galileo антенна

и рис. 7 (L1). Диаграммы показывают попарно ортогональную проекцию электрического поля и подтверждают отличную симметрию антенны. Обе верхние кривые (голубая и красная) относятся к компонентам основной (собственной) поляризации, в то время как обе другие кривые (зеленая и бирюзовая) представляют компоненты кросс-поляризации. Расстояние между кривыми в обоих случаях является величиной разрыва поляризации и также представляет собой хороший результат.

Так как поверхности для подгонки для E5a находятся во внутренних слоях, необходимы полости для того, чтобы обеспечить доступ для лазера (рис. 8).

Рис. 9. Однополосковый патч

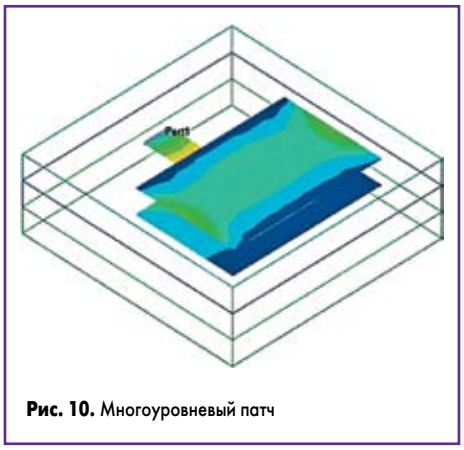

Рис. 10. Многоуровневый патч

Частотно-модулированная РЛС 24 ГГц непрерывного излучения с интегрированной антенной

Описанный здесь LTCC-модуль используется для многоуровневой патч-антенны (Stacked Patch Antenne) при достижении необходимой ширины полосы частот для точной РЛС при 24 ГГц. Этот электронный модуль разработан для автомобильного рынка, поэтому разработка технологии изготовления подложки, а также технологии изготовления электронных компонентов проводилась с учетом экономических аспектов.

Как раз для применений в радарах и радиотехнике интеграция антенны в высокочастотный модуль представляет особый интерес. Кабель и разъем к антенне оказываются лишними, за счет чего можно избежать демпфирования и разности фаз, которые с ними связаны. Высокая диэлектрическая проницаемость LTCC (типично 6–8) тем не менее осложняет проектирование широкополосных антенн, так как ширина полосы частот уменьшается с увеличением диэлектрической проницаемости. Многослойная структура LTCC помогает решить эту проблему: расположенные друг над другом, соединенные компоненты антенны используются для того, чтобы значительно увеличить ширину полосы частот антенны [1].

Для объяснения этого принципа необходимо сравнить полосковую антенну, которая питается от микрополоскового проводника, со структурой из двух соединенных, расположенных друг над другом излучателей. Красная кривая на рис. 11 показывает входное сопротивление полосковой антенны на рис. 9 по сравнению с многоуровневой патч-антенной на рис. 10 (зеленая кривая). Подобно полосовому фильтру используются немного расстроенные по отношению друг к другу резонаторы для того, чтобы получить желаемую ширину полосы частот.

В данном случае использовалась LTCC-подложка с пятью слоями диэлектрика. Модуль был изготовлен с помощью недорогих отдельных полупроводниковых компонентов вместо дорогих СВЧ-ИС (MMICs Microwave Monolithic Integrated Circuits). Полосковая антенна занимает одну сторону многослойной керамики, в то время как входной каскад модуля радара располагается на другой стороне. Таким образом, модуль СВЧ с интегрированной антенной размещается на полной площади 34×21 мм^2.

Антенна должна соответствовать следующим требованиям: ширина полосы частот 2 ГГц при центральной частоте 24 ГГц. Ширина полосы частот имеет решающее значение, так как отклонение частоты частотно-модулированного радара определяет его разрешение по дальности. Поляризация должна быть линейной с хорошей развязкой кросс-поляризаторов. Полуширина должна составлять в плоскости колебаний электрического вектора волны ±15° и в азимуте ±30°. Этот проект антенны может быть приспособлен к другим требованиям путем изменения числа рядов и колонок в антенной решетке, при этом основной концепт не меняется. Выгодная ширина частоты полос при этом остается.

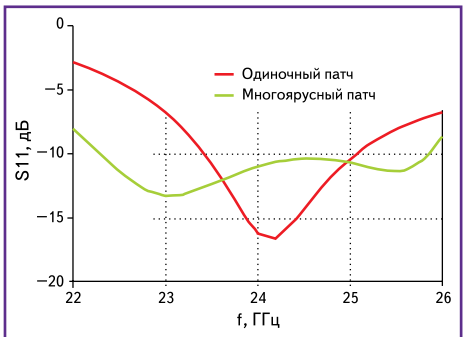

Рис. 11. Входное сопротивление

На рис. 12 представлена схема целого модуля радара, который изображен на рис. 13 в поперечном разрезе. На обратной стороне подложки LTCC находится СВЧ-ИС сенсора радара (рис. 14). Распределительная сеть на уровне вмонтированных излучателей соединена через отверстие в слое заземления с микрополосковой линией входного каскада.

На рис. 14 изображена верхняя сторона платы с электронными модулями сенсора радара. Излучатель, управляемый напряжением (Voltage Controlled Oscillator, VCO), передает сигнал с частотной модуляцией. Одноступенчатый усилитель класса A (Buffer Amplifier) разъединяет VCO и отвечает за необходимый уровень передачи. Шлейфовый ответвитель разделяет сигнал передачи и приема антенны. Сигнал передачи распределяется на антенну и преобразователь частоты, исходящий от антенны сигнал приема ведется к преобразователю частоты. Простой балансный

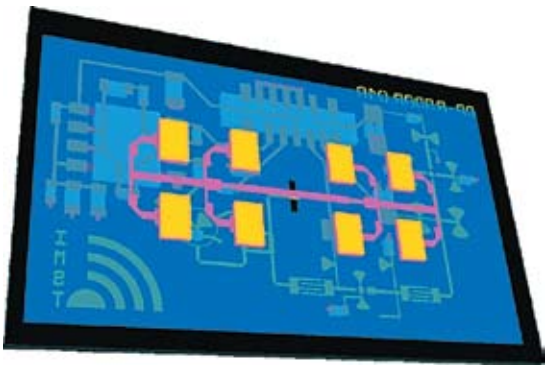

Рис. 12. Схема модуля частотно-модулированной РЛС непрерывного излучения с интегрированной многоуровневой антенной

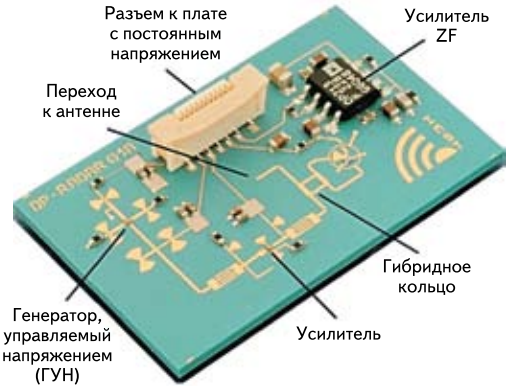

Рис. 14. Входной каскад модуля радара на обратной стороне антенны

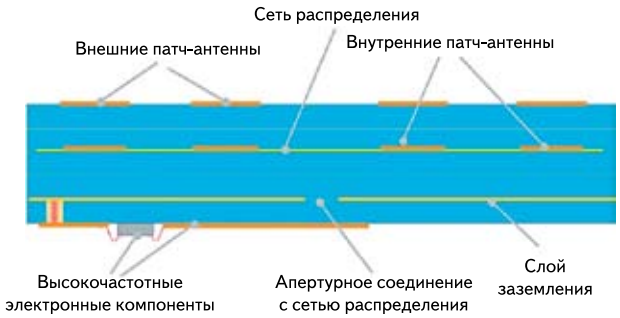

Рис. 13. Поперечный разрез многослойной структуры модуля радара

смеситель состоит из гибридного кольца и диодной пары. Уровень ZF-сигнала усиливается для дальнейшей обработки (IF-Amplifier).

Весь сенсорный модуль с антенной моделировался и оптимизировался при помощи FDTD (Finite Difference Time Domain — моделирующего устройства метода конечных разностей во временной области) EMPIRE [5]. Электромагнитное моделирование и измерения доказывают, что были определены спецификации для диаграммы направленности и диапазона частот.

Модуль антенны для цифрового формирования диаграммы направленности

Патч-антенны могут быть просто скомбинированы в регулируемую фазирующую антенную решетку, отдельные излучатели которой могут питаться с различной фазой и амплитудой. Результатом является антенна с электронно изменяемой диаграммой направленности. Христиан Гюйгенс уже в XVII веке наглядно объяснил принцип интерференции элементарных волн [7]. Если все отдельные излучатели будут получать питание синфазно, результирующий фронт волны будет проходить параллельно к плоскости антенны, а волна будет распространяться перпендикулярно. Питание отдельных излучателей с различной фазой позволяет изменять направление луча, в то время как оснащение модификатором амплитуды позволяет оказывать влияние на форму луча. Традиционные антенные решетки получают питание от распределительных сетей, фазовращателей и регуляторов амплитуды для отдельных излучателей. В случае цифрового формирования диаграммы направленности (Digital Beam Forming) сдвиг фаз и изменение параметров амплитуды для каждого электронного компонента антенны в первичной полосе частот проводятся при помощи цифрового процессора обработки сигналов. К тому же сигнал каждого отдельного компонента должен быть усилен, смешан и пройти АЦ или ЦА преобразование. Результатом этого схемотехнического процесса в сочетании с быстрыми алгоритмами является недостижимая другим путем гибкость характеристик направленности и скорость преследования цели. Эти свойства делают динамическую фокусировку луча (ДФЛ) интересной для применения в радарной технике, а также для мобильных, спутниковых широкополосных систем связи.

Антенны с линейной поляризацией дополнительно к азимуту и плоскости колебаний электрического вектора волны должны быть также подведены относительно поляризации. При круговой поляризации в этом нет необходимости. В случае с описанной антенной круговая поляризация достигается при помощи гибридного кольца для каждого компонента антенны [8]. Благодаря расположению по принципу последовательного вращения поляризация становится еще лучше [9].

В рамках проекта SANTANA была создана 8×8 антенная решетка по технологии LTCC для 30 ГГц, которая подходит для создания больших ДФЛ-антенн (например, 64×64) [6]. Площадь для соединения отдельных компонентов ограничена расстоянием до следующего компонента (λ/2, в данном случае около 5 мм). Сложная калибровочная сеть еще больше повышает плотность корпусирования ИС.

Многослойные керамические платы LTCC делают возможным вертикальную интеграцию в диэлектрике, пригодном для СВЧ, и с необходимой плотностью. На площади одного антенного элемента помещаются гибридное кольцо для питания передающей антенны и весь входной каскад (Front-End) СВЧ. На остальных слоях размещается сложная калибровочная сеть. Эта сеть позволяет автоматически калибровать весь модуль. Расположенные в ряд полости для отдельных излучателей с токопроводящими стенками (Via-Fences) улучшают точность калибровки и характеристики направленности благодаря развязке с соседними электронными компонентами. Завершение гибридного кольца неотражающей поверхностью способствует его приспосабливаемости без необходимости коррекции внутренних сопротивлений.

На рис. 15 изображена внутренняя структура элемента антенны (в данном случае

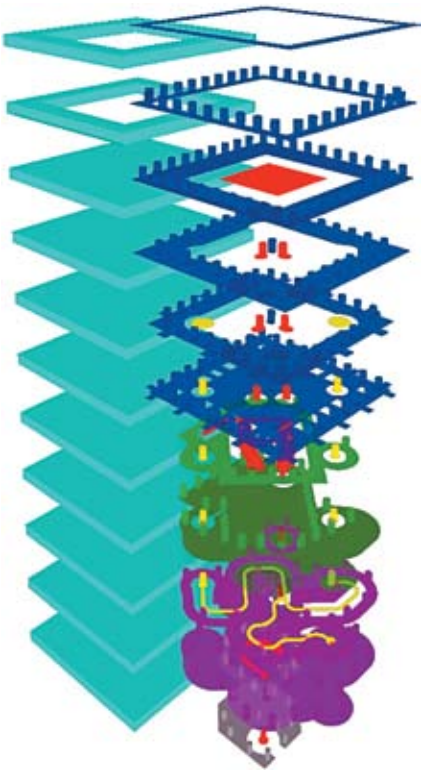

Рис. 15. Схематическое изображение элемента антенны с 11 слоями LTCC с пространственно разнесенными составными частями

Рис. 16. Конструкция для измерения дальнего поля антенной решетки в измерительной камере компании IMST GmbH

предыдущая модель с 11 слоями FERRO A6). Четыре функциональных блока различаются по цветам: антенна синяя, гибридное кольцо зеленое, части калибровочной сети фиолетовые, переход к конечному элементу антенны серый. Траектория сигнала обозначена красным цветом, а траектория калибровки — желтым. Функции этой антенны, требования к ней и особенности ее действия были подробно описаны в ранее опубликованных работах [8].

Фактические характеристики при эксплуатации управляемой антенной решетки и анализ полосы частот для передачи сигналов без модуляции были проведены на измерительном приборе в тестовой антенной камере (рис. 16) и в полевых условиях.

Результаты измерений совпадают с результатами моделирования методом FDTD, что подтверждает электромагнитную модель (рис. 17), которая была использована для моделирования и оптимизации антенны.

На рис. 18 и 19 представлены результаты измерений для компонентов с правой круговой основной поляризацией (RHCP) и с левой круговой кросс-поляризацией (LHCP) с различными отклонениями от перпендикуляра. Компоненты с основной поляризацией демонстрируют при любых отклонениях хорошие результаты (рис. 18). Уменьшение на боковых

Рис. 17. Электромагнитная модель 4×4 группы

лепестках диаграммы направленности достигает без модулятора амплитуды 9 дБ. Диаграмма на рис. 19 доказывает наличие хорошей поляризационной развязки независимо от отклонения.

Результаты для других плоскостей вращения (не представленных здесь) похожи.

Многослойная антенна, интегрированная во внутренние слои

Далее будет использована измененная щелевая антенна для покрытия большей ширины полосы частот. Щелевой излучатель помещен в полость, которая заполнена диэлектриком (LTCC) и имеет токопроводящие стенки. Помимо большой полосы частот такая конструкция способствует хорошей развязке с соседними элементами, что важно при расположении в антенной решетке.

Если поверхность заземления микрополосковой линии передачи прервать щелью определенной длины, перенаправленный ток заземления будет вести к образованию стоячей волны на этом щелевом проводнике. Эта щель является излучательным элементом (апертурный излучатель) и может использоваться в качестве антенны. Щелевая антенна обычно имеет бóльшую ширину полосы частот, чем патч-антенна. Благодаря ее форме, она излучает с обеих сторон поверхности заземления, что является преимуществом для некоторых применений.

В рамках проекта EASY-A создаются широкополосные антенны на 60 ГГц для того, чтобы в будущем можно было изготовить WLAN-системы с более высокой скоростью передачи данных [10]. Для описанного здесь применения излучение необходимо лишь в полупространстве в одну сторону подложки, энергия излучения в обратную сторону была бы в данном случае нежелательной потерей. Для этого апертурный излучатель экранируется по направлению к обратной стороне. Оптимальное расстояние от апертуры до поверхности заземления составляет четверть длины волны для того, чтобы преобразовать короткое замыкание в холостой ход (Back Short). Между двумя металлическими поверхностями могут распространяться волны параллельных пластин. Чтобы предотвратить этот нежелательный поток энергии, преобразование короткого замыкания в холостой ход ограничивается поверхностью под апертурой и экранируется токопроводящими боковыми стенками. В субстрате LTCC токопроводящие стенки создаются с помощью сквозных соединений с необходимыми промежутками, так называемыми Via-Fences. Ступенчатая конструкция таким образом полученной полости помогает сохранить ширину полосы частот апертурного излучателя (рис. 20 и 21). Такая антенна может быть использована как отдельный излучатель в мобильной установке или как группа в базовой станции. Антенна состоит из полости, которая заполнена диэлектриком и питается от полоскового проводника. На рис. 22 изображены также Via-Fences, которые ограничивают полость по сторонам. Антенна состоит из 5 слоев материала DuPont 943.

Результаты моделирования (рис. 23) показывают, что, основываясь на этом концепте, можно создать широкополосную антенну. При дальнейшей оптимизации этого моделирования необходимо учитывать омические и диэлектрические потери, а также допуски при производстве.

Характеристики направленности остаются неизменными во всем диапазоне эксплуатации (рис. 24 и 25). При центральной частоте, 60 ГГц, ширина диаграммы направленности 3 дБ составляет 95° на уровне φ = 0° и 85° на уровне φ = 90°.

Рис. 18. Диаграмма направленности модуля 4×4 с различными отклонениями, phi = 90° (компоненты основной поляризации)

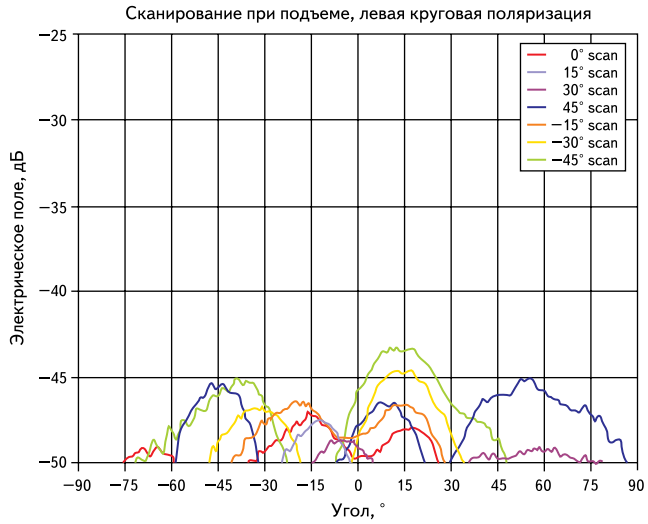

Рис. 19. Диаграмма направленности модуля 4×4 с различными отклонениями, phi = 90° (компоненты кросс-поляризации)

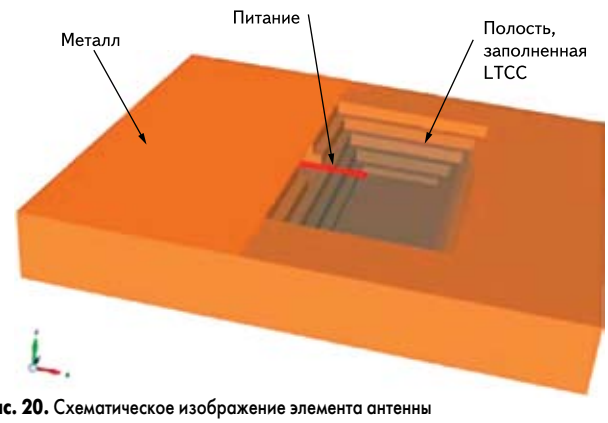

Рис. 20. Схематическое изображение элемента антенны

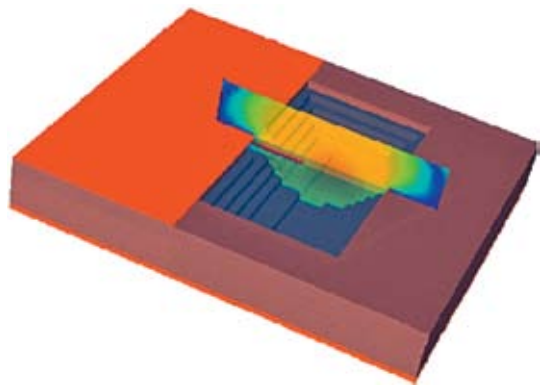

Рис. 21. Антенна с поперечным срезом через электрическое поле

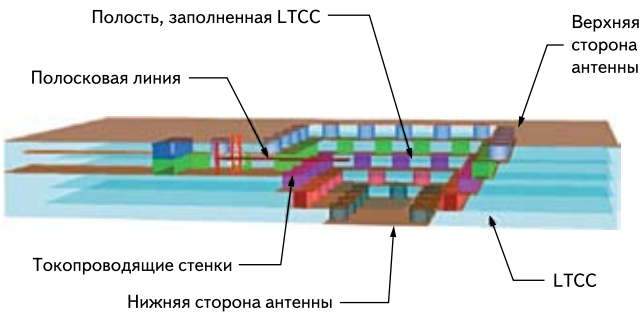

Рис. 22. Поперечный срез апертурного излучателя с заполненной LTCC полостью

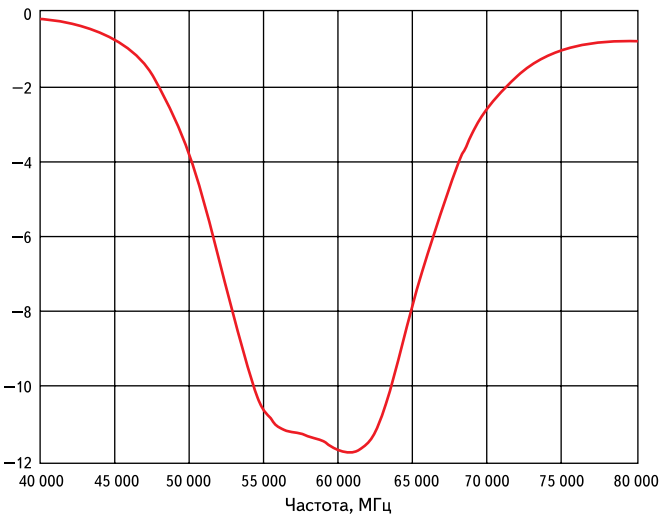

Рис. 23. Затухание отражения

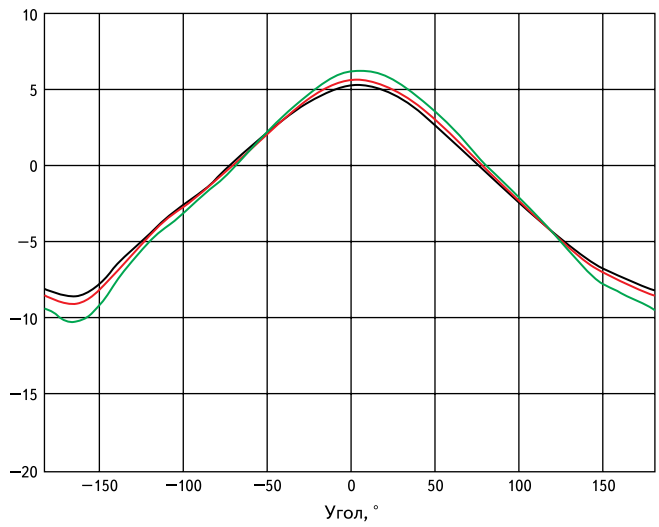

Рис. 24. Диаграмма направленности (компонента θ-поля, φ = 0°): черная = 57 ГГц; красная = 60 ГГц; зеленая = 66 ГГц

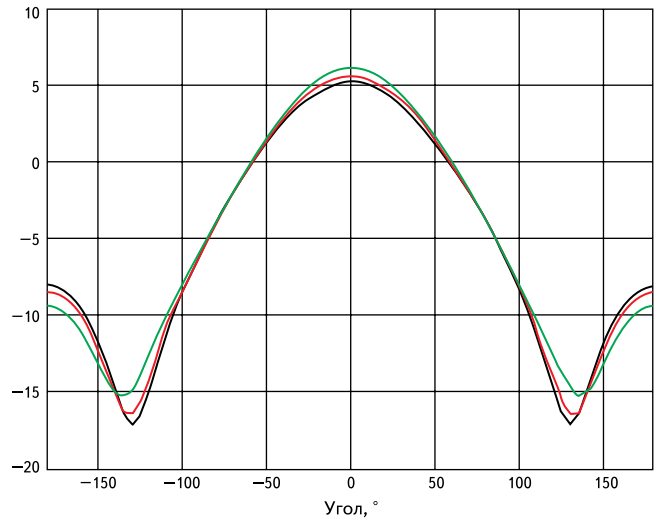

Рис. 25. Диаграмма направленности (компонента θ-поля, φ = 90°): черная = 57 ГГц; красная = 60 ГГц; зеленая = 66 ГГц

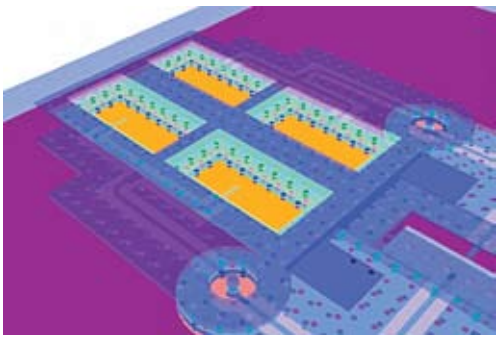

Рис. 26. Прозрачная косая проекция LTCC-модуля с антенной решеткой 2×2

Коэффициент усиления антенны может быть увеличен за счет группирования нескольких элементов, как показано на рис. 26.

Выводы

Даже для необычно толстых субстратов LTCC представляет собой хорошее решение для трехмерной интеграции высокочастотных конструкций, таких как комплекс сложных антенн с сетями питания и активными компонентами СВЧ. Относительно высокая диэлектрическая проницае-

мость позволяет компактно сконструировать отдельные излучатели так, чтобы они соответствовали расположению в теоретическом описании антенной решетки. Многослойная структура LTCC предлагает большое количество решений для интеграции антенн и высокочастотных входных каскадов.

Представленные здесь результаты были частично получены в ходе проектов SANTANA 2, INDOOR — Galileo/GPS Indoor Navigation& Positionierung и EASY-A. Эти национальные исследовательские проекты были осуществлены при поддержке Федерального министерства экономики и технологий и Немецкого центра авиации и космонавтики (Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., DLR), номера проектов 50YB0311, 50 NA 0507 и 01BU0807.

Примечание. *Оригинал статьи опубликован в журнале PLUS (Produktion von Leiterplatten und Systemen. 2010. № 1. Германия).*

Литература

1. James J. R., Hall P. S. Handbook of Microstrip antennas. P. Peregrinus, 1989.
2. Martínez-Vázquez M., Baggen R., Leiss J., Holzwarth S. Circularly polarised patch over EBG groundplane for GPS applications / Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007 IEEE, Volume, Issue. 9–15 June 2007.
3. Uhlig P., Manteuffel D., Malkmus S. High Layer Count in LTCC Dual Band Antenna for Galileo GNSS/CICMT 2008 Munich. April 21–24, 2008.
4. Uhlig P., Günner C., Holzwarth S., Kassner J., Kulke R., Lauer A., Rittweger M. LTCC Short Range Radar Sensor for Automotive Applications at 24 GHz / IMAPS 2004. Long Beach, 2004.
5. IMST GmbH, User and Reference Manual for the 3D EM Time Domain Simulator Empire, November 2003 — http://www.empire.de/empire.pdf
6. Uhlig P., Holzwarth S., Litschke O., Simon W., Baggen R. A Digital Beam-Forming Antenna Module for a Mobile Multimedia Terminal in LTCC Multilayer Technique / EMPS 2005. Brugge, Belgium.
7. Huygens C. Traité de la Lumière. Leiden, 1678.
8. Litschke O., Simon W., Holzwarth S. A 30 GHz highly integrated LTCC antenna element for digital beam forming arrays / Conference proceedings APS2006. Washington, 2006.
9. Teshirogi, et al. Wideband circularly polarised array antenna with sequential rotations and phase shift of elements / International Symposium on Antennas & Propagation Proceedings. Japan, 1995.
10. EASY-A: Enablers for Ambient Services & Systems, Part A — 60 GHz Broadband Links — www.easy-a.de