

ПАССИВНАЯ ИНТЕРМОДУЛЯЦИЯ И АНТЕННЫ НА БАЗЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

В статье рассматривается проблема пассивной интермодуляции (ПИМ) в беспроводных системах передачи сигналов. Приведены результаты исследований, проведенных компанией Rogers Corporation. Предложен ряд материалов, оптимальных для изготовления антенн с низкой ПИМ.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема пассивной интермодуляции в беспроводных системах передачи сигналов решается с 1970-х годов. ПИМ негативно влияет на системы, в которых используется одна антенна для приема и передачи сигналов на нескольких несущих частотах. Даже при незначительных нелинейностях СВЧ-тракта в нем могут возникнуть паразитные внутриполосные сигналы, что может привести к увеличению уровня собственных шумов. Повышенный уровень шума снижает качество работы системы. Такие эффекты становятся все более заметными с каждым новым поколением технологий беспроводной связи. Поскольку пользователи хотят иметь постоянный доступ к сети на все большей скорости, в современных технологиях сотовой связи, например в сетях 4G (Fourth Generation — «четвертое поколение») и LTE (Long-Term Evolution — «долгосрочное развитие»), используются передовые методы модуляции для надежных голосовых и видеозвонков, а также высокоскоростной передачи данных. В таких системах должен обеспечиваться минимальный уровень помех и низкий уровень ПИМ для их оптимальной работы. Минимизация ПИМ обычно включает в себя оценку работы антенн узла сотовой связи или беспроводной базовой станции другого типа. Для антенн с низким уровнем ПИМ используются печатные платы на основе ламинатов (медь-диэлектрик-медь), обеспечивающих низкий уровень ПИМ за счет тщательного подбора материалов, технологии изготовления и современных методов испытаний. При использовании пере-

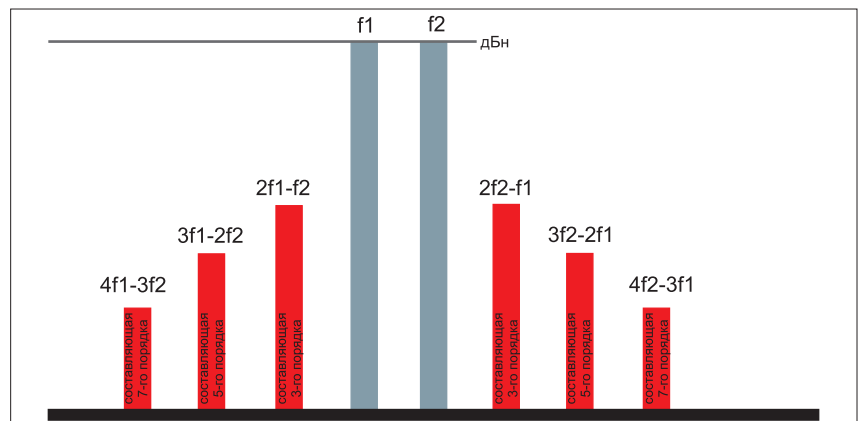
довых технологий конструирования и при правильном понимании, контроле и мониторинге свойств печатных плат на основе ламинатов можно создать отличную систему, устойчивую к ПИМ.

ТЕХНИЧЕСКАЯ СТОРОНА ВОПРОСА

В идеальной линейной электрической системе с несколькими несущими частотами, несмотря на возможное линейное искажение уровней мощности, не могут генерироваться никакие дополнительные частоты. Если же в системе присутствует нелинейность, например, если уровень мощности усилителя приближается к мощности насыщения, могут генерироваться дополнительные частоты, представляющие собой линейные комбинации входных несущих частот. Рассмотрим две близких частоты f_1 и f_2 , работающие в одной и той же полосе (рис. 1). Составляющие ИМ 2-го порядка — это $2f_1$, $2f_2$ и f_2-f_1 . Все составляющие 2-го порядка генерируются на частотах,

далеких от рабочего диапазона, как все составляющие ИМ четного порядка. Составляющие 3-го порядка включают частоты $3f_1$, $3f_2$, $2f_1+f_2$, $2f_1-f_2$, $2f_2+f_1$ и $2f_2-f_1$. В то время как некоторые составляющие 3-го порядка находятся на частотах, далеких от рабочего диапазона, другие ($2f_1-f_2$ и $2f_2-f_1$) могут попадать в него, как показано на рис. 1. Некоторые из высших составляющих ИМ нечетного порядка (5, 7, 9 и т. д.) могут также попадать в рабочий диапазон частот, хотя и на уровнях мощности, которые значительно ниже, чем составляющие 3-го порядка.

ПИМ — это интермодуляция, возникающая в пассивной системе. Уровни мощности ПИМ, как правило, очень низкие по сравнению с передаваемыми сигналами, которые генерируют их. Значение ПИМ -153 дБн соответствует уровню 5×10^{-16} относительно несущей. Так как мощность принимаемых сигналов очень низкая, ПИМ может увеличить уровень собствен-



▲ Рис. 1. Пассивная интермодуляция формируется в пассивных схемах при смешении двух или более несущих сигналов и их гармоник

ных шумов и привести к неполадкам в работе.

Со стороны передающей базовой станции на ПИМ может повлиять целый ряд факторов. Наличие черных металлов или других магнитных материалов в электромагнитном поле вблизи антенны может значительно увеличить ПИМ. Частой причиной ПИМ является несовершенство соединений, например наличие проводящих частиц на контактных поверхностях проводников или брак их металлизации.

При проектировании и использовании антенн на основе печатных плат важно помнить, что ПИМ не относится к основным свойствам диэлектриков. Наряду с вносимыми потерями, коэффициентом усиления, направленностью и многими другими важными электрическими параметрами, ПИМ — это явление, сильно зависящее от конструкции системы. Тем не менее, после проведения обширных исследований в Rogers Corporation, были определены свойства ламинатов, которые могут помочь снижению переменных ПИМ.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПИМ

Конструкторам антенн хорошо известно, что сведение к минимуму плотности тока является ключом к созданию системы с низким уровнем ПИМ. Что касается материала платы, в компании Rogers было определено, что высокая чистота проводника и его низкий профиль, состав и физические свойства диэлектрика, а также адаптация поверхности контакта «проводник–диэлектрик» может привести к минимизации ПИМ.

Rogers Corporation регулярно проводит тестирование ПИМ с 2002 г. и разработала базу данных и знаний, не имеющую аналогов в отрасли производства базовых материалов. Комплект для тестирования ПИМ — Summitek 1900b — был установлен в исследовательских лабораториях и использовался в процессе разработки и периодических проверок материалов. В начале 2015 г. на производственных объектах по изготовлению материалов для антенн компании Rogers были введены два дополнительных комплекта Kaelus IQA-1921c (рис. 2). Теперь в Rogers регулярно производится контроль ПИМ в рамках стандартного производственного процесса.

Стандартный испытательный образец для ПИМ в Rogers Corporation представляет собой линию передачи длиной 305 мм (12") с волновым сопротивлением 50 Ом на диэлектрическом материале толщиной 1,5 мм (0,060") в диапазоне 1900 МГц с использованием двух



▲ Рис. 2. Высокопроизводительный комплект испытательного оборудования с анализатором ПИМ обеспечивает результаты измерений на уровне ПИМ от различных схем на основе ламинатов

сигналов мощностью 43 дБм (20 Вт). Для измерения отраженной пассивной интермодуляции (которую также называют «обратная») один соединитель образца подключается к анализатору ПИМ, а второй — к нагрузке с низким уровнем ПИМ. На базовом материале размером 12×18" протравливаются четыре таких линии. Подключение к плате выполнено с помощью луженых плетеных кабелей 0,141" с низким уровнем ПИМ и легких коаксиальных кабелей, припаянных к микрополосковым соединителям. Итоговое значение ПИМ представляет собой усреднение полученных стабильных значений всех четырех линий.

При попытке провести различие между «хорошим» уровнем ПИМ (возможно, в диапазоне -153 дБн) и «отличным» уровнем ПИМ (возможно, ниже -160 дБн), вариации самих результатов испытаний относительно высоки, так как они не далеки от уровня собственных шумов. Таким образом, очень важно повторное тестирование для понимания относительного уровня ПИМ.

Линия передачи с волновым сопротивлением 50 Ом на ламинате толщиной 0,030" Rogers RO453 обычно имеет ПИМ около -153 дБн. Наши заказчики умеют создавать фильтры на этом диэлектрике с уровнем ПИМ ниже -160 дБн. Этот пример наглядно показывает значение правильного конструирования и, в частности, снижения плотности тока для подавления ПИМ.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АНТЕНН С НИЗКИМ УРОВНЕМ ПИМ

Тестирование, проводившееся на различных производственных площадках Rogers Corporation, показало хорошие параметры ламинатов компании для печатных плат в плане ПИМ и проложило путь к разработке различных типов ламинатов для схем, подходящих для антенн с низким уровнем ПИМ, в том числе термоотверждающихся пластиков серии RO4500 (табл. 1) и материалов для антенн серии AD на основе стекловолоконного политетрафторэтилена (ПТФЭ) и керамики (табл. 2).

Базовые материалы серии RO4500 для антенн включают материалы для плат RO4533, RO4534 и RO4535. Это термоотверждающиеся полимеры с керамическим наполнением с превосходной стабильностью размеров и однородными механическими свойствами для ограничения ПИМ.

Пластики имеют значения диэлектрической проницаемости (Dk) в диапазоне от 3,3 до 3,5 при 10 ГГц в направлении оси Z. Тангенс угла потерь или коэффициент затухания (Df) составляет от 0,0025 до 0,0037 на частоте 10 ГГц. Все три материала для плат могут работать при высоких уровнях тепловой мощности, с отличными

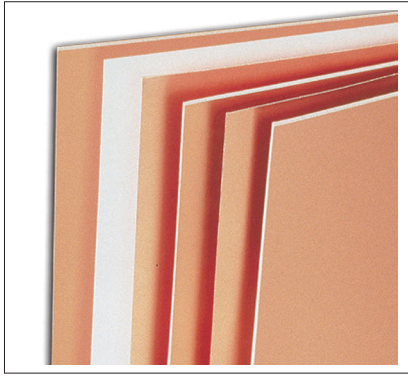
Таблица 1. Термоотверждающиеся ламинаты Rogers Corporation для антенн

| Пластик | Диэлектрическая постоянная (при 10 ГГц, ось Z) | Коэффициент затухания при 10 ГГц | Теплопроводность (Вт/м/К) | ПИМ (дБн) |
|-----------|--|----------------------------------|---------------------------|-----------|
| RO4533 | 3,30 | 0,0025 | >0,60 | <-157 |
| RO4534 | 3,40 | 0,0027 | >0,60 | <-157 |
| RO4535 | 3,50 | 0,0037 | >0,60 | <-157 |
| RO4725JXR | 2,55 | 0,0026 | >0,40 | <-160 |
| RO4730JXR | 3,00 | 0,0027 | >0,40 | <-160 |
| RO4730G3 | 3,00 | 0,0029 | >0,40 | <-160 |

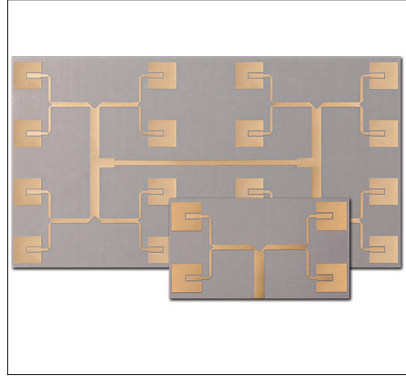
Все материалы были протестированы с использованием микрополосковой испытательной цепи длиной 304,8 мм (12") на диэлектрике толщиной 1,5 мм (0,060").

Таблица 2. Материалы Rogers Corporation для антенн на основе стекловолоконного политетрафторэтилена / керамики

| Пластик | Диэлектрическая постоянная (при 10 ГГц, ось Z) | Коэффициент затухания при 10 ГГц | Теплопроводность (Вт/м/К) | ПИМ (дБн) |
|---------|--|----------------------------------|---------------------------|-----------|
| AD250C | 2,50 | 0,0014 | >0,30 | <-157 |
| AD255C | 2,55 | 0,0014 | >0,30 | <-157 |
| AD300C | 2,97 | 0,0020 | >0,50 | <-157 |



▲ Слоистые пластики серии RO4500 для антенн — это термоотверждающиеся полимерные материалы с керамическим наполнением с малым значением ПИМ



▲ В состав диэлектриков для антенн серии AD входит политетрафторэтилен со специальными наполнителями и стекловолоконным армированием для обеспечения низкого уровня ПИМ

значениями теплопроводности. При проведении испытаний с использованием испытательного приспособления и микрополосковой линии, все три материала показали уровни ПИМ лучше -157 дБн при двух тестовых сигналах мощностью $+43$ дБм.

Материалы для антенн серии AD включают слоистые пластики марки AD250C, AD255C и AD300C. Они состоят из политетрафторэтилена с низкими потерями с тщательно подобранными наполнителями и армированием из стекловолокна для обеспечения высокой механической устойчивости и жестким контролем диэлектрической проницаемости во всем материале. На самом деле, диэлектрическая проницаемость

контролируется в пределах $\pm 0,05$ для всех трех материалов со значениями Dk в пределах от 2,50 до 2,97, измеренных в направлении оси Z при 10 ГГц. Что касается материалов серии RO4500, эти слоистые пластики обладают высокой теплопроводностью и низким коэффициентом теплового расширения по оси Z, обеспечивая высокую стабильность при формовании металлизированных сквозных отверстий. Как и материалы серии RO4500, слоистые пластики серии AD также имеют значения ПИМ ниже -157 дБн при измерении с помощью испытательной аппаратуры и схемы компании Rogers.

Оба семейства материалов для печатных плат имеют очень низкий уровень

ПИМ, влияющий на работу антенны. Но полученные в ходе обширных испытаний и исследований результаты позволили компании Rogers превзойти даже этот низкий уровень ПИМ в диэлектриках для антенн серии RO4725JXR, RO4730JXR и RO4730G3. Эти термоотверждающиеся ламинаты имеют значения Dk, равные 2,55 и 3,0 со значениями тангенса угла потерь 0,0026 и 0,0027 соответственно. Значения ПИМ при измерении с помощью стандартной испытательной схемы и установки оказались ниже -160 дБн (оба измерения проводились на слоистых пластиках толщиной 1,5 мм).

Эти три материала демонстрируют почти не поддающиеся измерению уровни ПИМ и, наряду с ламинатами серии RO4500 и AD, имеют отличные качества для создания антенн и других пассивных схем, где уровень ПИМ необходимо минимизировать. ПИМ может возникать в результате многих факторов. Даже толщина и диэлектрическая проницаемость пластика могут способствовать увеличению ПИМ влияя на физические размеры линий передач, и приводя в итоге к более высокой плотности тока. Используя данные диэлектрики для печатных плат в качестве основы, проектировщики антенн могут быть уверены в создании конструкции антенны с самым низким уровнем ПИМ.