

Особенности реализации метода цифровых предискажений в системах радиосвязи мм-диапазона

Х. Йектаи¹, П. Прайт², Ф. Кирни³

УДК 621.396 | ВАК 05.27.01

Частоты миллиметрового диапазона, используемые в сетях 5G New Radio, обеспечивают возможность резкого повышения скорости передачи данных, в то же время создавая определенные проблемы при создании связного оборудования. В статье обсуждаются архитектурные особенности базовых станций, работающих в мм-диапазоне длин волн и на частотах ниже 6 ГГц. Особое внимание уделено вопросам реализации метода цифровых предискажений (DPD) в этих системах. В то время как DPD является хорошо зарекомендовавшим себя методом повышения энергоэффективности на частотах ниже 6 ГГц, в большинстве станций мм-диапазона его не применяют. На примере прототипа 256-элементной антенны мм-диапазона, построенного на базе формирователей луча и трансиверов компании Analog Devices, в статье показано, как с помощью DPD можно повысить эффективную изотропную излучаемую мощность (EIRP) на 3 дБ, что позволяет на 30% сократить количество элементов антенны по сравнению с антенной без DPD.

ВВЕДЕНИЕ

Помимо уменьшения задержек и повышения надежности, резкий рост спроса на более высокую скорость передачи данных стал одной из основных движущих сил стандарта 3GPP 5G NR. Несмотря на то, что системы 4G LTE были ориентированы на частотный диапазон ниже 3 ГГц, освоение нового спектра частот в диапазоне от 3 до 5 ГГц в последние годы позволило расширить полосу пропускания канала в сетях 5G NR. По сравнению с 4G LTE максимальная полоса пропускания канала увеличилась с 20 до 100 МГц на частотах ниже 6 ГГц. Кроме более широкой полосы пропускания канала, использование нескольких передающих и приемных антенн и, в конечном итоге, внедрение технологии Massive MIMO еще больше повысили спектральную эффективность. Эти улучшения помогают обеспечить более высокую пропускную способность, однако из-за фундаментального ограничения – относительно небольшого объема выделенного спектра ниже 6 ГГц – максимальная скорость передачи данных для пользователей остается ниже 1 Гбит/с.

В стандарте 5G NR, впервые в истории стандартов 3GPP, для мобильных устройств сотовой связи выделены частоты миллиметрового диапазона между 24,25 и 52,6 ГГц. Этот частотный диапазон обозначается как FR2, а диапазон ниже 6 ГГц – FR1. В диапазоне FR2 доступны гораздо более широкие полосы спектра по сравнению с FR1. Один канал в FR2 может иметь ширину до 400 МГц, что обеспечивает беспрецедентную пропускную способность. Тем не менее, использование частот миллиметрового диапазона создает новые проблемы при реализации как базовой станции, так и пользовательского оборудования. Самыми значительными из этих проблем являются более высокие потери в тракте передачи и более низкая выходная мощность, что значительно усложняет энергетический баланс линии связи между базовой станцией и пользовательским оборудованием.

Потери в тракте передачи между базовой станцией и пользовательским оборудованием определяются как $P_t(dB) = 10 \log_{10}(P_t/P_r)$, где P_t и P_r – переданная и принятая мощность соответственно. В свободном пространстве принимаемая мощность является функцией расстояния и длины волны (эта зависимость известна также как формула Фрииса): $P_r(d, \lambda) = P_t G_t G_r (\lambda / 4\pi d)^2$, где G_t и G_r – коэффициенты усиления антенны передатчика и приемника соответственно, λ – длина волны, а d – расстояние между передатчиком и приемником.

¹ Analog Devices, разработчик архитектур беспроводных систем, hossein.yektaei@analog.com.

² Analog Devices, разработчик алгоритмов, patrick.pratt@analog.com.

³ Analog Devices, технический руководитель, frank.kearney@analog.com.

В типичной среде беспроводной связи из-за отражений от близлежащих объектов и потерь из-за конструктивных материалов смоделировать и оценить потери в тракте передачи намного сложнее. Однако, чтобы оценить потери в тракте передачи на частотах миллиметрового диапазона в сравнении с частотами ниже 6 ГГц, предположим, что радиоволны распространяются в свободном пространстве, коэффициенты усиления антенн близки, а расстояния между базовой станцией и пользовательским оборудованием равны между собой. При использовании такого допущения получим, что потери в тракте передачи на частоте 28 ГГц по сравнению с 900 МГц будут выше на $10 \log(28\,000/900)^2 = 29,8$ дБ!

Усилители мощности базовых станций на частотах ниже 6 ГГц нередко выдают десятки ватт ВЧ-мощности с эффективностью более 40%. Это стало возможным благодаря внедрению высокоэффективных архитектур усилителей мощности, таких как усилитель Доэрти, и использованию усовершенствованных методов цифровых предискажений. Напротив, высоколинейные усилители мощности класса АВ миллиметрового диапазона обычно обеспечивают менее 1 Вт ВЧ-мощности и КПД менее 10%. На частотах миллиметрового диапазона такие условия усугубляют проблемы с энергетическим балансом линии связи между базовой станцией и пользовательским оборудованием. Решение обеих проблем – больших потерь в тракте передачи и малой мощности усилителей – заключается в более точной передаче мощности в определенное местоположение в пространстве. Это достигается с помощью активных фазированных антенных решеток, которые предоставляют возможность формирования и управления положением диаграммы направленности.

АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ В СЕТЯХ 5G МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Антенные решетки – не новая концепция. Пассивные решетки использовались в антеннах базовых станций сотовой связи с первых лет развертывания GSM, а в радиолокационных системах они используются уже несколько десятилетий. Как было указано выше, решение проблем больших потерь в тракте передачи и низкой мощности на усилителях мощности на частотах мм-диапазона заключается в использовании активных фазированных антенных решеток. Это достигается размещением множества антенных элементов в массиве, при этом каждый элемент возбуждается усилителем малой мощности. Использование большого количества элементов увеличивает общую излучаемую мощность антенны, в то же время повышает коэффициент усиления антенной решетки и сужает результирующий радиолуч. Теория работы фазированных антенных решеток выходит за рамки данной статьи. Дополнительная информация по этой

теме изложена в серии статей Analog Dialog. Phased Array Antenna Patterns [2–4].

Высокая стоимость активных фазированных антенных решеток ограничивает их применение, в основном, аэрокосмической и оборонной сферами. Последние достижения в области полупроводниковых технологий в сочетании с высоким уровнем интеграции позволили АФАР стать коммерчески рентабельными в приложениях для сетей 5G. Компания Analog Devices предлагает активные устройства формирования луча, в которые интегрированы 16 полных каналов передачи и приема с соответствующими усилителями мощности и маломощными усилителями, а также функционал управления фазой и усилением каждого канала и TDD-ключи. Все это на одном кристалле. Первое поколение этих устройств было реализовано с использованием БиКМОП-технологии на основе SiGe (ADMV4821). Для повышения энергоэффективности и снижения стоимости во втором поколении устройств используется КМОП КНИ-процесс (ADMV4828). Высокоинтегрированные и энергоэффективные устройства формирования луча, наряду с повышающими/понижающими преобразователями частоты мм-диапазона (ADMV1017/ADMV1018) и синтезаторами частоты (ADF4371/ADF4372), обеспечивают комплексное решение для РЧ-интерфейсов базовых станций сетей 5G мм-диапазона.

На частотах миллиметрового диапазона элементы антенны достаточно компактны. Например, площадь простой микрополосковой патч-антенны, работающей на частоте 28 ГГц, обычно меньше 10 мм². Поэтому для увеличения коэффициента усиления можно разместить множество антенн на относительно небольшой площади.

Рассмотрим, например, антенную решетку, состоящую из 256 элементов (восемь рядов, 16 столбцов) и содержащую излучающие элементы с двойной поляризацией (рис. 1). Красные и синие линии на рис. 1 обозначают элементы с поляризацией 45° и –45° соответственно.

Общая площадь такой антенной решетки при расстоянии между антенными элементами, равными $\lambda/2$, составляет $8(\lambda/2) \cdot 16(\lambda/2) = 32\lambda^2$. Если сравнить антенны на 900 МГц и 28 ГГц, то общая площадь антенны на 900 МГц равна 3,55 м², в то время как площадь 28-ГГц антенны составляет всего $3,67 \cdot 10^{-3}$ м² – почти в 1000 раз меньше! В то время как размер 256-элементной антенной решетки на 900 МГц совершенно неприемлем, аналогичная антенна на 28 ГГц может быть реализована на печатной плате на площади менее 40 см².

На основе многослойной печатной платы с использованием формирователей луча и повышающих/понижающих преобразователей мм-диапазона от Analog Devices была разработана 256-элементная антенная решетка мм-диапазона с двойной поляризацией, рассчитанная на частоту 28 ГГц. Чтобы снизить стоимость и избежать

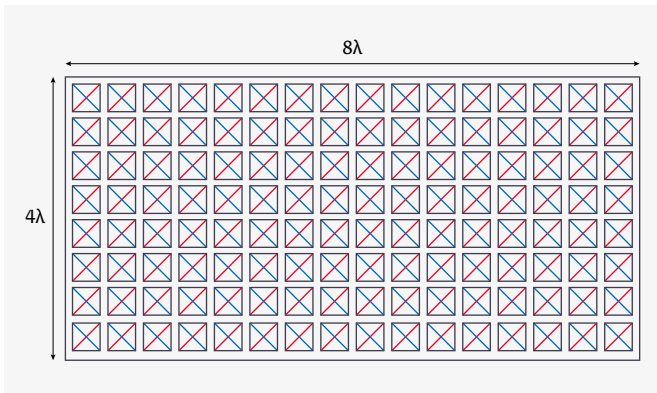


Рис. 1. 256-элементная антенная решетка с излучающими элементами с двойной поляризацией

дорогостоящих и вызывающих потери соединений между антенной и радиостанцией, активные компоненты были установлены с одной стороны, а антенные элементы – с другой стороны печатной платы (рис. 2).

На плате AiB256 установлено 16 КМОП КНИ-микросхем формирователя луча ADMV4828, каждый из которых обеспечивает 16 каналов передачи и 16 каналов приема, подключенных к 128 антенным элементам в каждой поляризации, перекрывая диапазон частот от 26,5 до 29,5 ГГц. Каждый из 64 антенных элементов с одинаковой поляризацией подключен к отдельному повышающему/понижающему преобразователю мм-диапазона ADMV1018. Таким образом, можно сформировать суммарно четыре независимых луча антенны. Упрощенная блок-схема для половины схемы печатной платы AiB256 показана на рис. 3.

Чтобы получить более высокие значения эффективной изотропной излучаемой мощности (EIRP), можно объединить на ПЧ два набора из 64 антенных элементов с одинаковой поляризацией для генерации двух лучей, при этом 128 антенных элементов формируют каждый луч. Эта плата широко использовалась в компании Analog Devices при разработке собственных алгоритмов калибровки антенн и цифровых предсказаний.

КОНФИГУРАЦИЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ ДЛЯ ЧАСТОТ НИЖЕ 6 ГГц И мм-ДИАПАЗОНА

При проектировании базовой станции, рассчитанной на желаемую частоту и зону покрытия, часто в качестве основных требований указывают диаграмму направленности и эффективную изотропную излучаемую мощность (EIRP). Стандартная базовая станция (максосота) на 900 МГц содержит 4Tx/4Rx-радиоблок, подключенный к внешней антенне (рис. 4).

Внутри антенны находятся два столбца поперечно-поляризованных (красные/синие линии для поляризаций $\pm 45^\circ$) диполей. Каждый из четырех РЧ-портов возбуждает



Рис. 2. Компонентная сторона платы AiB256 (AiB означает antenna in board или «антенна на плате»), содержащей 16 формирователей луча и четыре повышающих/понижающих преобразователя мм-диапазона

диполи одной поляризации в одном столбце. В данном примере сигнал с одинаковой фазой и амплитудой разделяется между шестью диполями с одинаковой поляризацией. Наличие большего количества элементов в вертикальном направлении (столбце) сжимает луч в вертикальной плоскости (см. рис. 4). Это требуется потому, что большая часть пользовательского оборудования находится ниже высоты антенны. Часто бывает, что луч немного наклоняется вниз, чтобы больше ограничить зону покрытия соты и избежать помех другим сотам. При расстоянии между элементами антенны, равном $\lambda/2$, ширина луча половинной мощности (угол, при котором мощность передачи падает на 3 дБ относительно пика луча) такой антенны обычно составляет около 90° в горизонтальной плоскости и менее 20° в вертикальной плоскости. Такой широкий луч обычно перекрывает сектор 120° , и его не нужно перенаправлять для отслеживания движения пользовательского оборудования. Высота и ширина антенны составляют $6 \cdot (\lambda/2) = 2$ м и $2 \cdot (\lambda/2) = 0,33$ м соответственно. Коэффициент усиления антенны для каждой поляризации при усилении 5 дБи на дипольный элемент составляет приблизительно $10 \cdot \log(12) + 5$ дБи = 15,8 дБи. Если каждый усилитель мощности обеспечивает 40 Вт (46 дБм) РЧ-мощности, то величина EIRP на поляризацию составит 46 дБм + 3 дБ (два столбца) + 15,8 дБи = 64,8 дБм. Ожидается, что такой уровень EIRP обеспечит хорошее покрытие на расстоянии нескольких км на частоте 900 МГц.

Теперь рассмотрим работу платы AiB256 на частоте 28 ГГц со 128 антенными элементами на поляризацию, расположенными в виде матрицы восемь рядов x 16 столбцов, как показано на рис. 1. При расстоянии между элементами $\lambda/2$ и коэффициенте усиления 5 дБи на элемент, общий коэффициент усиления антенны приблизительно равен $10 \cdot \log(128) + 5$ дБи = 26 дБи. По сравнению с примером для базовой станции на 900 МГц усиление антенны

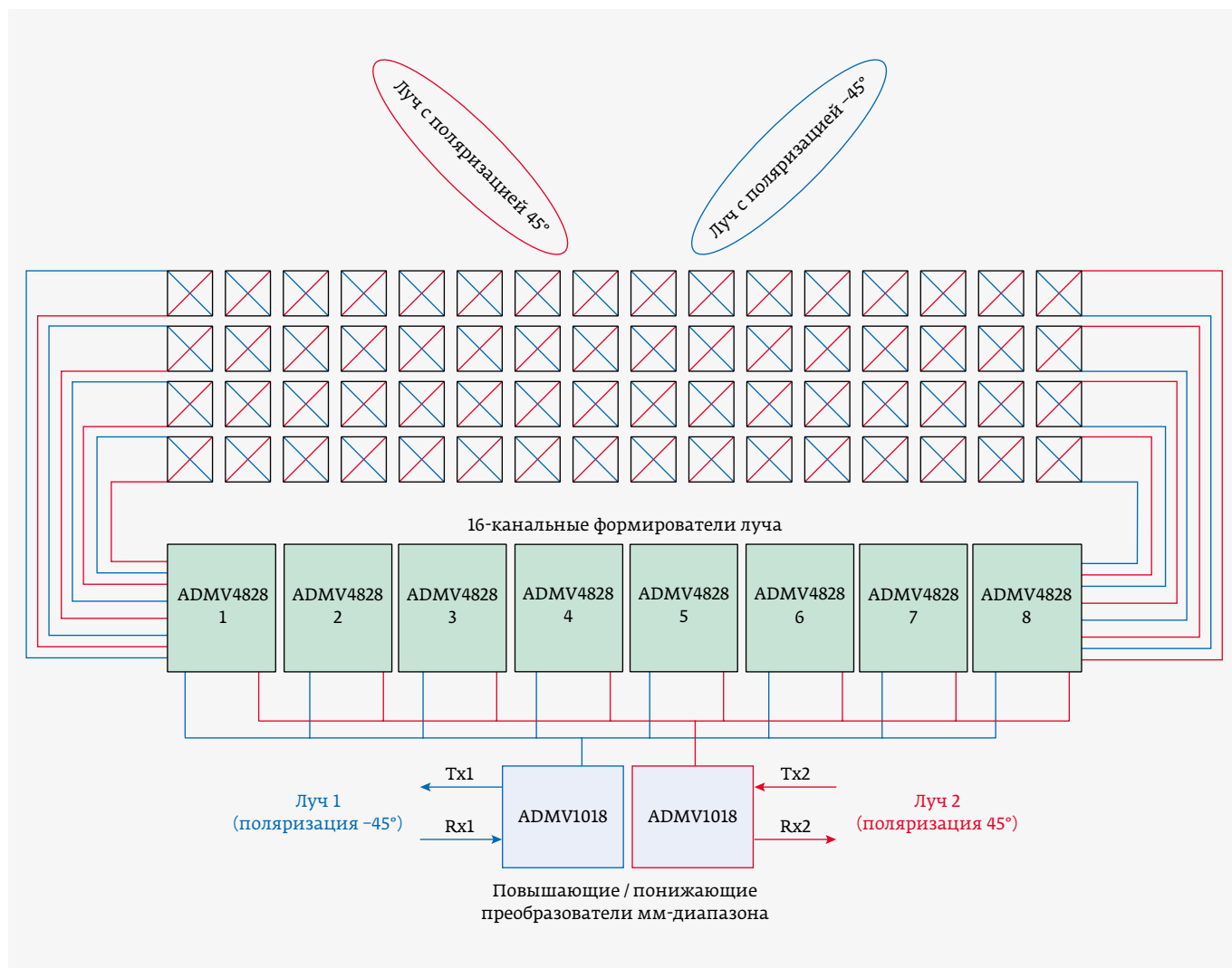


Рис. 3. Функциональная блок-схема для половины схемы AiB256 (показаны не все межкомпонентные соединения)

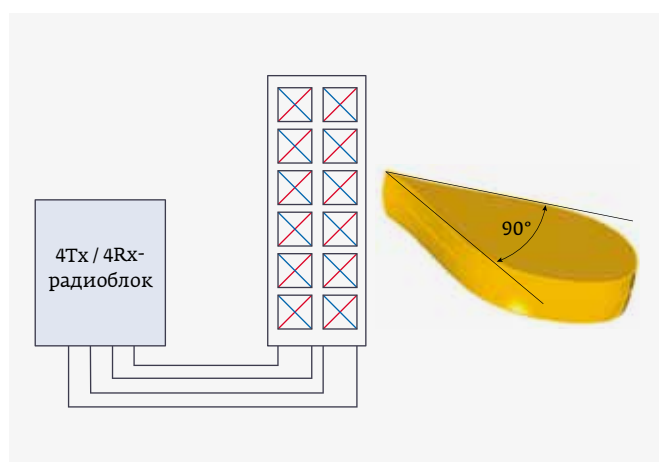


Рис. 4. Базовая станция на 900 МГц с 4Tx/4Rx-радиоблоком и двухрядной антенной с двойной поляризацией

на 10,2 дБ выше. Однако это происходит за счет меньшей ширины луча. Ширина луча по уровню 3 дБ составляет всего 12° в вертикальной плоскости и 6° в горизонтальной плоскости. Такой узкий луч не может полностью охватить сектор 120°. Решение состоит в том, чтобы сначала найти активное пользовательское оборудование в зоне покрытия соты, направить на него луч и отследить его перемещение в соте. Стандарты 5G определяют процедуры захвата и отслеживания лучей, что выходит за рамки данной статьи. Чтобы рассчитать величину EIRP такой радиосистемы, предположим, что каждый тракт передачи выдает 13 дБм РЧ-мощности. Полная мощность на поляризацию составляет $13 \text{ дБм} + 10 \cdot \log(128) = 34 \text{ дБм}$. В сочетании с усилением антенны 26 дБи общее значение EIRP на поляризацию составит $34 \text{ дБм} + 26 \text{ дБи} = 60 \text{ дБм}$. В типовом сценарии развертывания вне помещений такой уровень EIRP обеспечивает перекрытие до нескольких сотен метров на частоте 28 ГГц.

ПРЕИМУЩЕСТВА МЕТОДА ЦИФРОВЫХ ПРЕДЫСКАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ С ЧАСТОТАМИ НИЖЕ 6 ГГц

Стандарты беспроводной связи 5G и 4G основаны на сигналах OFDM с изначально высоким отношением пиковой мощности к средней мощности (PAPR). Чтобы усилить и передать эти сигналы с высоким качеством и избежать засорения соседних каналов, необходимо предусмотреть меры, чтобы не сжимать и не ограничивать пики сигнала. Для этого требуется, чтобы усилитель мощности работал на средних уровнях мощности на 6–9 дБ ниже его максимальной пиковой мощности. Работа усилителя мощности в таком режиме приводит к очень низкому КПД, часто менее 10%.

Эффективные архитектуры усилителей мощности, такие как усилители Доуэрты, поддерживают высокий КПД при работе в режиме на 6–9 дБ ниже пиковой мощности, но их линейность значительно хуже усилителей мощности класса АВ. Если не предусмотреть специальных мер для повышения линейности эти усилители не будут отвечать требованиям приложения по величине вектора ошибки (EVM) и коэффициенту мощности в соседнем канале (ACPR). Одним из наиболее популярных методов линейаризации является метод цифровых предискажений (DPD), который широко применяется в системах с частотой менее 6 ГГц.

В системах с частотами ниже 6 ГГц требуется, чтобы для стандарта 3GPP 38.104 величина EVM не превышала, соответственно, 8 и 3,5% для модуляций 64-QAM и 256-QAM [1]. Для удовлетворения этих требований величина PAPR сигнала должна поддерживаться в пределах от 6 до 9 дБ. Для стандарта 3GPP 38.104 значение ACPR обычно должно быть меньше –45 дБн. В предыдущем примере для 900-МГц 4Tx/4Rx-радиостанции и среднеквадратичной выходной мощности на каждый передатчик, равной 40 Вт, если усилители мощности работают в линейной области для удовлетворения требований EVM и ACPR, их эффективность обычно не превышает 10%. Это означает, что каждый из четырех усилителей мощности потребляет более 400 Вт для того, чтобы обеспечить ВЧ-мощность на уровне 40 Вт. Таким образом, только четыре усилителя мощности потребляют более 1600 Вт! Это серьезно влияет на габариты, эффективность охлаждения, надежность и эксплуатационные расходы радиостанции. Напротив, при использовании усилителя Доуэрты в сочетании с методами снижения пик-фактора (CFR) и DPD КПД усилителя мощности превышает 40%. Это означает, что каждый усилитель мощности потребляет менее 100 Вт для генерирования 40 Вт ВЧ-мощности. Четыре усилителя мощности потребляют менее 400 Вт. Остальная часть радиостанции обычно потребляет менее 50 Вт. Следовательно мощность, потребляемая усилителем, составляет более 85% от общей мощности постоянного тока,

потребляемой радиостанцией, даже если используются усилители Доуэрты с DPD и CFR.

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА DPD В АНТЕННАХ мм-ДИАПАЗОНА

На плате AiB256 имеется 256 цепей передачи и приема, способных генерировать два или четыре луча со 128 или 64 усилителями мощности для каждого луча. Как и для систем с частотой менее 6 ГГц, требования по EVM для мм-диапазонов составляют 8 и 3,5% для модуляций 64-QAM и 256-QAM соответственно. Однако требования по ACPR для миллиметрового диапазона намного менее жесткие, чем для частот ниже 6 ГГц; в стандарте 3GPP 38.104 они составляют 28 дБн для частоты 28 ГГц и 26 дБн для 39 ГГц.

Каждый усилитель мощности класса АВ в формирователе луча ADMV4828 может обеспечить пиковую мощность на уровне 21 дБм. Работа усилителей мощности в ADMV4828 при выходной мощности приблизительно 12 дБм (среднеквадратичное значение) оставляет запас в 9 дБ для пиковой мощности и обеспечивает выполнение требований как по EVM, так и по ACPR. При выходной мощности 12 дБм (16 мВт) каждая цепь передачи потребляет около 300 мВт, что дает в результате эффективность, равную 5%. Часть мощности в цепи передачи потребляется регулирующими фазовращателями, которые необходимы для формирования луча. Каждый приемный тракт, включая регулируемые фазовращатели, потребляет около 125 мВт мощности постоянного тока.

Исходя из приведенных выше значений мощности, ясно, что доля потребляемой усилителем мощности в радиостанции миллиметрового диапазона по отношению к общей потребляемой мощности по постоянному току намного меньше по сравнению с радиостанцией, работающей на частоте менее 6 ГГц. В связи с этим возникает вопрос, может ли радиостанция мм-диапазона по-прежнему получить преимущества из-за DPD или нет?

Чтобы ответить на этот вопрос, следует разработать подходящую архитектуру для DPD в мм-диапазоне длин волн. Реализация метода DPD в системах мм-диапазона аналогично системам, работающим на частотах ниже 6 ГГц, требует наличия петли DPD около каждого усилителя мощности. В примере для AiB256 это будет означать 256 петель DPD! Очевидно, что такой подход очень дорог и энергозатратен. Поскольку каждый усилитель мощности выдает небольшую мощность (обычно 12 дБм), общая эффективность системы с DPD, скорее всего, будет меньше, чем у системы без DPD.

К счастью, у этой проблемы есть изящное решение. Плата AiB256 может формировать максимум четыре луча, используя 64 усилителя мощности в каждом луче (см. рис. 3). Это означает, что каждый усилитель мощности получает на входе тот же сигнал, что и другие

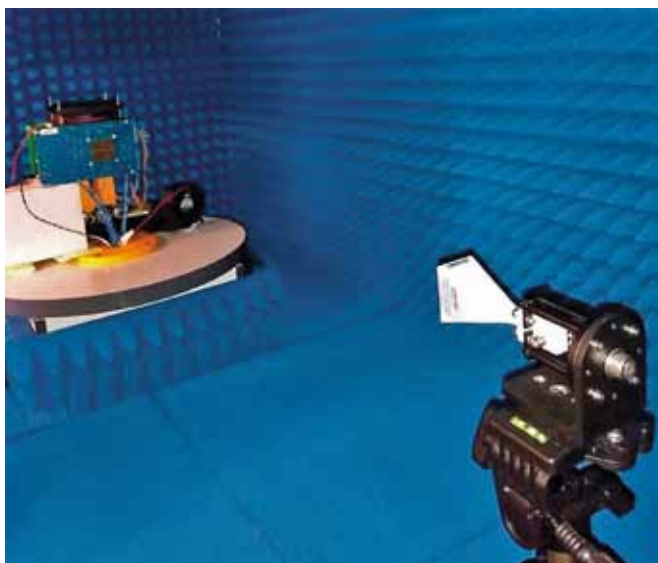


Рис. 5. Рупорная антенна дальней зоны в качестве приемника наблюдения DPD

63 усилителя, не считая относительного фазового сдвига для управления лучом. Если одним контуром DPD охватить кластер из 64 усилителей мощности, то понадобится всего четыре петли DPD для всей антенной решетки AiB256. Другими словами, контур DPD реализуется для каждого луча, а не для каждого усилителя мощности. Назовем это групповым DPD, чтобы отличить его от DPD для систем с частотой менее 6 ГГц, в которых каждый усилитель мощности имеет свою петлю DPD.

Приемник наблюдения должен «смотреть» в точку визирования луча, в которой сигналы от всех усилителей мощности суммируются синфазно, чтобы он мог скорректировать искажение, вызванное интегральной агрегацией 64 усилителей мощности в дальней зоне. Для оценки на раннем этапе проектирования мы использовали рупорную антенну дальней зоны в качестве приемника наблюдения DPD (рис. 5) и продемонстрировали, что для луча может быть реализован один контур DPD для улучшения показателей EVM и ACPR. В будущих изделиях Analog Devices можно будет создать интегрированный канал наблюдения, чтобы упростить реализацию DPD.

В тестовой установке использовались интегрированные трансиверы ADRV9029 со встроенными функциями CFR и DPD для сигналов с полосой до 200 МГц. В будущих поколениях трансиверы Analog Devices будут поддерживать полосу пропускания не менее 400 МГц с DPD.

Наш анализ показал, что групповое DPD мм-диапазона может повысить EIRP луча более чем на 3 дБ (от 1,5 до 3,2 дБ) в диапазоне частот от 26,5 до 29,5 ГГц. При оптимизации согласования на выходе и смещения формирователя луча на определенных частотах можно обеспечить среднеквадратичное значение выходной мощности

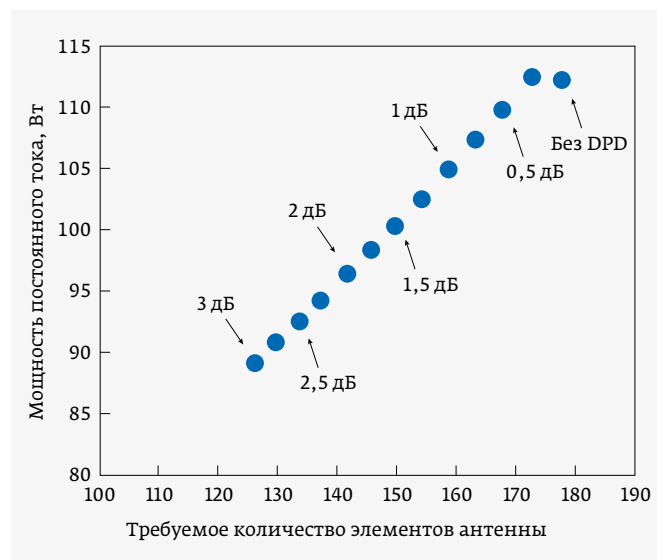


Рис. 6. Требуемое количество элементов антенны и потребляемая мощность постоянного тока в зависимости от уровня повышения EIRP из-за DPD

до 13 дБм при сохранении показателей EVM и ACPR. Однако невозможно сохранить такие характеристики в широком диапазоне частот и на множестве устройств. В качестве альтернативы, при выполнении определенных условий (уровень мощности в режиме насыщения усилителя мощности должен быть выше 21 дБм), использование DPD неизменно обеспечивает выходную мощность более 14 дБм во всем интересующем диапазоне.

В спецификации антенных решеток мм-диапазона ключевым требованием является величина EIRP для луча антенны. Если мощность на один элемент антенны относительно мала, то для достижения целевого значения EIRP требуется множество элементов, что, в свою очередь, увеличивает стоимость, потребление и габариты антенны. Чем больше элементов в антенне, тем уже луч. Более узкие лучи не всегда желательны; они усложняют наведение луча и отслеживание мобильных пользователей. График на рис. 6 показывает зависимость количества требуемых элементов и мощности, потребляемой антенной решеткой, от того, насколько DPD повышает EIRP (в диапазоне от 0 до 3 дБ) при сохранении целевого показателя EIRP на уровне 60 дБм.

Если повышение EIRP на 3 дБ достигается за счет применения DPD, количество требуемых элементов уменьшается почти на 30%, а рассеиваемая мощность снижается примерно на 20%. По сравнению с примером для системы с частотой менее 6 ГГц, где DPD снижает энергопотребление усилителя мощности в четыре раза, экономия энергии в антенне мм-диапазона не столь значительна. Однако для оборудования мм-диапазона мы получим дополнительный выигрыш, который состоит в том, что

уменьшение количества элементов на 30% значительно снижает стоимость и габариты антенной решетки. В будущем можно будет использовать более эффективные архитектуры усилителей мощности в формирователях луча мм-диапазона для дальнейшего повышения энергоэффективности с применением DPD.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация DPD в антенных решетках для сетей 5G миллиметрового диапазона ставит новые задачи по сравнению с системами для частот ниже 6 ГГц. Охват DPD-контуром кластера усилителей мощности, формирующих луч антенны, в отличие от отдельных DPD-контуров для каждого усилителя мощности, делает возможным и полезным применение групповых DPD. Анализ показал, что можно получить ощутимые преимущества с точки зрения более высокой выходной мощности, снижения потребления и уменьшения количества единиц оборудования. Тем не менее, следует осмотрительно подходить к применению DPD: в системах мм-диапазона этот метод требует иного подхода, по сравнению с системами,

работающими на частотах ниже 6 ГГц. По мере развития архитектуры усилителей мощности мм-диапазона пути реализации метода DPD в системах связи стандарта 5G могут меняться, что, возможно, потребует переосмысления перспектив применения этого метода.

По вопросам поставки продукции Analog Devices обращайтесь в компанию ЭЛТЕХ по электронной почте analog@eltech.spb.ru.

ЛИТЕРАТУРА

1. 3GPP TS 38.104: Base Station (BS) Radio Transmission and Reception. 3GPP, March 2017.
2. **Delos P., Broughton B., Kraft J.** Phased Array Antenna Patterns. Part 1: Linear Beam Array Characteristics and Array Factor. – Analog Dialogue, Vol. 54, No. 2, May 2020.
3. **Delos P., Broughton B., Kraft J.** Phased Array Antenna Patterns. Part 2: Grating Lobes and Beam Squint. – Analog Dialogue, Vol. 54, No. 2, June 2020.
4. **Delos P., Broughton B., Kraft J.** Phased Array Antenna Patterns. Part 3: Sidelobes and Tapering. – Analog Dialogue, Vol. 54, No. 3, July 2020.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



ФАЗИРОВАННЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ

Хансен Р. С.

2-е изд.; пер. с англ. под ред. А. И. Синани

При поддержке ОАО «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В. В. Тихомирова»

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2012. – 544 с.,
ISBN 978-5-94836-323-3

Цена 975 руб.

В книге дается всесторонний анализ особенностей проектирования и исследования характеристик фазированных антенных решеток и входящих в них систем. Особое значение придается рассмотрению алгоритмов, пригодных для использования на ПК.

Книга предназначена для научных работников и инженеров, занимающихся исследованиями и разработками фазированных антенных решеток, а также для аспирантов и студентов старших курсов, специализирующихся в области антенн и устройств СВЧ.

Книга также будет интересна широкому кругу специалистов, поскольку в ней представлена обширная информация о различных типах антенных устройств с электронным управлением лучом и входящих в них функциональных системах.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphaera.ru, sales@technosphaera.ru

20-я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА ЭЛЕКТРОНИКИ

ChipEXPO-2022

КОМПОНЕНТЫ | ОБОРУДОВАНИЕ | ТЕХНОЛОГИИ

ВЫСТАВКА ПРОЙДЕТ



13-15.09

В ТЕХНОПАРКЕ ИННОВАЦИОННОГО ЦЕНТРА



СКОЛКОВО



ТЕМАТИЧЕСКИЕ ЭКСПОЗИЦИИ:

- ✓ Предприятия радиоэлектронной промышленности России
- ✓ Поставщики электронных компонентов
- ✓ Участники конкурса "Золотой Чип"
- ✓ Новинки производителей электроники
- ✓ Стартапы в электронике (стенд Инновационного центра Сколково)
- ✓ Дизайн-центры электроники

ОФИЦИАЛЬНАЯ
ПОДДЕРЖКА:



МИНПРОМТОРГ
РОССИИ



ОРГАНИЗАТОРЫ:

ЗАО «ЧипЭКСПО», 111141, Москва, Зеленый пр-т, д.2
Тел.: +7 (495) 221-50-15, E-mail: info@chipexpo.ru
<http://www.chipexpo.ru>