

ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ: ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ И ЭКОНОМИЧНОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ УПРАВЛЯЕМЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК 5G



Ключевыми компонентами для 5G, особенно на частотах миллиметрового диапазона являются антенны с электронным управлением (Electronically steerable antennas, ESA). Типичные ESA представляют собой фазированные решетки на основе кремниевых интегральных схем с формированием необходимой диаграммы направленности посредством фазовращателей. Несмотря на гибкость, которую предлагают ESA, выполненные на основе кремния, на их пути к широкому распространению остается два потенциальных препятствия — значительное энергопотребление и высокая стоимость. Оба фактора приводят к высоким операционным и капитальным затратам сетевых операторов. В качестве альтернативы кремниевым активным фазированным решеткам для приложений 5G предлагаются пассивные фазированные решетки, реализованные на основе жидких кристаллов.

Пятое поколение связи, привычно называемое 5G New Radio, или сокращенно 5G, уже разворачивается по всему миру. Для его реализации используются диапазоны частот, лежащие несколько ниже 6 ГГц (субдиапазон 6 ГГц), и частоты миллиметрового диапазона. Первый диапазон частот, например, выбрали такие операторы, как Deutsche Telekom, O2, Sprint, Vodafone и Three, а ставку на миллиметровые волны сделали AT&T, Verizon и SK Telekom. Однако проблема пятого поколения мобильной связи, в отличие от своих предшественников 4G, 3G и 2G, заключается не просто в выборе диапазона исходя из предпочтений в реализации аппаратной части, а в особенностях распространения радиоволн, в частности миллиметровых, что требует увеличения узлов сотовой сети. Решение с одной вышкой, покрывающей относительно большую площадь, здесь недоступно. Так что для того, чтобы 5G стало «сетью для всего», то есть доступной «для всех и везде», необходимо предоставить аппаратное решение, способное не только обеспечить высокие скорости передачи данных, но и сделать это экономно с небольшим общим энергопо-

треблением и низкими капитальными затратами.

Одним из ключевых аппаратных компонентов физического уровня для систем сотовой связи, как известно, является антенна. До сих пор типичными антенными решениями были либо параболические антенны для линий связи с высоким коэффициентом усиления, например, транзитной связи точка-точка, либо секторные антенны (направленная микроволновая антенна с секторной диаграммой направленности) базовых станций для реализации многоточечной связи. Однако эти типы антенн не предусматривают функции управления лучом диаграммы направленности, в том числе для транзитного (транспортного) соединения, или регулируются в пределах нескольких градусов в одном измерении (1D) для вертикального наклона луча. А вот для 5G требуются полноценно управляемые ESA, особенно на частотах миллиметрового диапазона. Это вызвано тем, что для повышения КПД и снижения мощности передатчика луч диаграммы направленности формируется максимально точно в сторону абонента и, кроме того, отслеживает его перемещение.

ТРЕБОВАНИЯ К 5G-АНТЕННАМ

Полосы частот для связи 5G, как уже было сказано, делятся на диапазоны — субдиапазон 6 ГГц и миллиметровые волны, то есть частоты выше 24 ГГц. Из-за их характеристик распространения диапазон частот субдиапазона 6 ГГц больше подходит для более крупных и менее плотных сот в сельских районах. В этих случаях может оказаться вполне допустимым управление одномерной антенной, например, по азимуту.

Однако суть и преимущество технологии 5G — это предложение не просто услуг связи, а высоконадежные сети с услугами высокоскоростной передачи данных. Для этого требуется широкая полоса пропускания, которую объективно легче и проще реализовать на более высоких частотах, например, в области миллиметровых волн (подробнее в [1]). Этот факт подчеркивается и недавним заявлением Международного союза радиосвязи (International Radio Union (ITU) после Всемирной конференции радиосвязи 2019 года — World Radiocommunication Conference 2019. В результате для облегчения реализации различных сценариев внедрения и использования 5G были определены пять дополнительных полос частот миллиметрового диапазона: 4,25–27,5 ГГц, 37–43,5 ГГц, 45,5–47 ГГц, 47,2–48,2 ГГц и 66–71 ГГц [2].

Недавние аукционы по полосе частот в США, Японии и Европейском союзе, на которых полоса 26 ГГц была выделена для 5G и раннего развертывания 5G на частотах миллиметрового диапазона в США и Азии, тоже демонстрируют повышенный интерес к миллиметровым волнам для таких приложений, как фиксированный беспроводной доступ (fixed wireless access, FWA) и обеспечению hot-spot-покрытия в сотовой сети 5G [3]. Hot-spot буквально означает «горячие точки» — это маленькие, относительно высокой мощности приемопередающие выделенные узлы сотовой сети, охватывающие области или площадь с высоким трафиком, часто временным.

Сказанное выше касается и городских районов с плотной жилищной застройкой и, соответственно, отличающихся высоким мобильным трафиком, то есть с высоким спросом на пропускную способность на одного абонента и большим количеством абонентов, что требуют высоких скоростей передачи данных, а значит, большой пропускной способности. Это неизбежно приводит к увеличению частот до миллиметрового диапазона, где доступны большие полосы частотного спектра.

Однако для того чтобы обслуживать множество пользователей с высокой пропускной способностью, из-за больших потерь в тракте на миллиметровых

частотах и из-за высокого мобильного трафика необходимо развернуть сверхплотную сотовую сеть с большим количеством пико- и фемтосот. Кроме того, чтобы уменьшить влияние потерь на пути распространения миллиметровых волн и снизить помехи в этих плотных сотовых сетях, требуются узконаправленные антенны с высоким коэффициентом усиления и с двумерным управлением лучом или формированием узкого направленного луча и возможностью многолучевого излучения. Более подробно о проблемах реализации возможностей 5G, связанных со структурой сигнала и антеннами, можно ознакомиться в [4].

ФАЗИРОВАННАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА НА ОСНОВЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

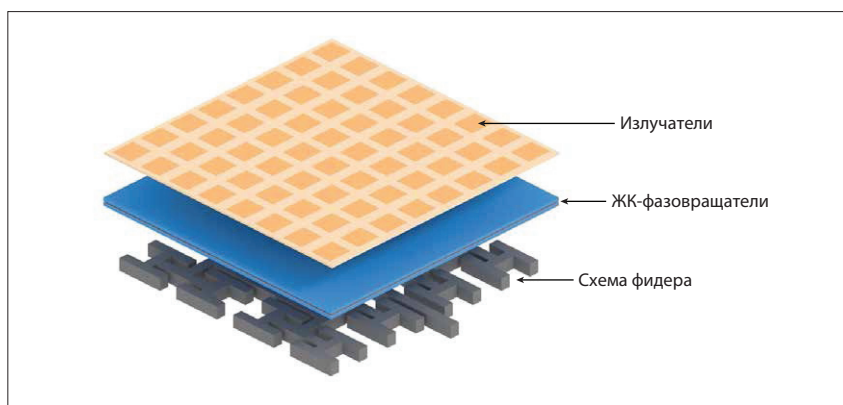
Как подробно описано в [5], технология ЖК-антенны объединяет технологию жидкокристаллического дисплея с антенной структурой микроволнового диапазона и конструкцией антенной решетки, как это в общем виде показано на рис. 1.

Фазированная решетка состоит из питающей схемы (фидера), блока ЖК-фазовращателя, жидкокристаллической структуры типа ЖК-дисплея и блока излучателей. Используя этот подход, все части антенны можно проектировать независимо и по модульному принципу. Блок ЖК-фазовращателя изготавливается по стандартным процессам,

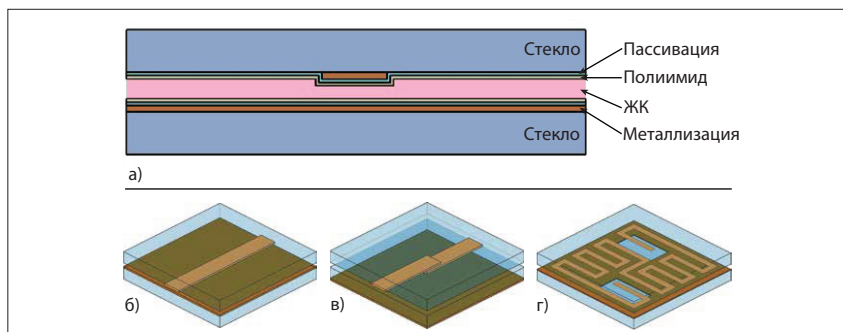
используемым в производстве обычных ЖК-дисплеев. Это позволяет относительно легко и просто организовать их крупномасштабное производство практически с любым размером апертуры, включая как отдельные сегменты, так и большие антенные группы. Блок ЖК-фазовращателя антенны состоит из двух стеклянных листов, разделенных прокладками, между которыми находится жидкокристаллический материал.

В зависимости от выбранной топологии устройства толщина ЖК-слоя может варьироваться от единиц до десятков микрометров. Функцию фазового сдвига, как показано на рис. 2, выполняет инвертированная микрополосковая линия (inverted microstrip line, IMSL) с типичной толщиной ЖК-слоя IMSL приблизительно в 100 мкм. Имеются и другие топологии фазовращателя с толщиной ЖК-слоя всего в несколько микрометров. Это обеспечивают более низкие потери и более компактный размер [6, 7] и существенно снижает время отклика антенны, который может быть сокращен вплоть до уровня миллисекунд [8].

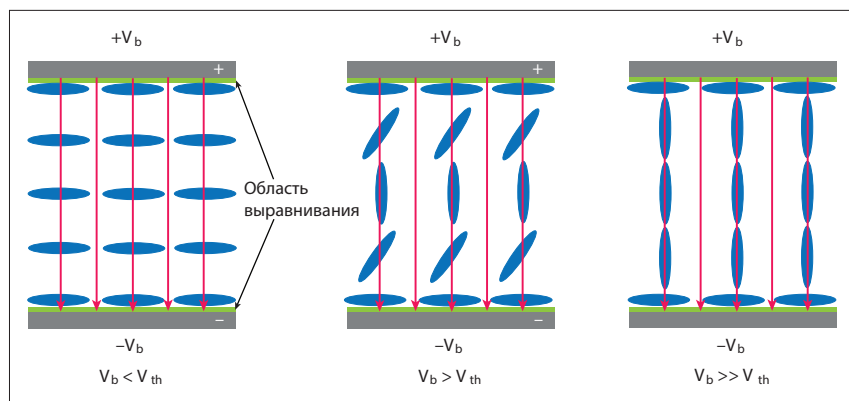
В блоке фазовращателя внутренние поверхности слоев стекла металлизированы, а затем, для закрепления ЖК и обеспечения ориентации материала, покрываются слоем полиимида. Обычно для радиочастотного сигнала из-за своей поляризации ЖК-структура имеет низкую эффективную диэлектрическую проницаемость. Когда между «землей» и сигналом подается напряжение, жид-



▲ Рис. 1. Фазированная антенная решетка на основе жидкокристаллических структур



▲ Рис. 2. Блок фазовращателей: а) поперечное сечение; б) IMSL; в) линия нагрузки; г) схема с входом и выходом



▲ Рис. 3. Настройка ЖК-фазовращателя

кие кристаллы меняют ориентацию в соответствии с величиной приложенного напряжения, как это показано на рис. 3.

Если приложенное напряжение смещения V_b выше порогового напряжения V_{th} , молекулы стремятся ориентироваться в направлении приложенного электростатического поля. Результирующая ориентация определяется равновесием между приложенной электрической силой и силой упругости в объемном ЖК из-за наличия выравнивающего слоя. Следовательно, становится возможной плавная настройка диэлектрической проницаемости ЖК-материала. Чем больше жидких кристаллов ориентировано по полю смещения, тем выше эффективная диэлектрическая проницаемость для проходящего радиочастотного сигнала. Когда напряжение смещения отключено, молекулы из-за наличия слоя и сил упругости выравнивания возвращаются к исходной ориентации. Возможны и другие топологии, предлагающие иные варианты конструктивного исполнения, но базовый принцип работы остается все тот же, без изменений.

На виде сверху матрицы на основе ЖК (рис. 4) видно, что каждая элементная ячейка имеет независимые фазовращатели, которые, когда они получают сигнал от питающей схемы (фидера) с одной стороны, соединяются и передают его излучающим элементам на другой стороне. Таким образом, организуется классическая фазированная антенная решетка, в которой каждый отдельный излучатель

имеет соответствующий ему независимый фазовращатель, формирующий диаграмму направленности антенны.

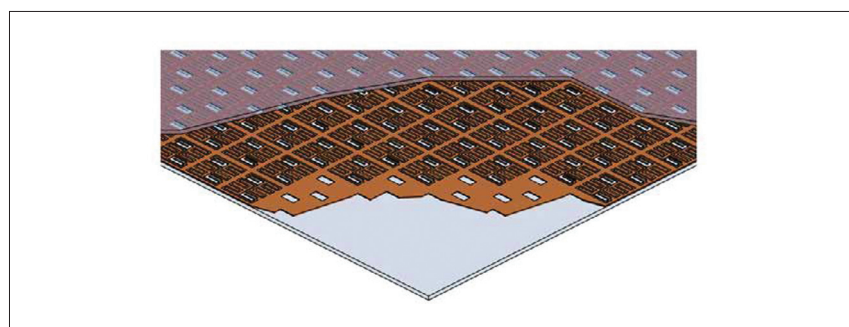
Фазовращатели на основе жидких кристаллов, в отличие от полупроводникового цифрового фазовращателя, благодаря плавной перестройке могут обеспечить любое значение фазы и таким образом осуществлять непрерывное и плавное управление диаграммой направленности антенной решетки. При этом возможны различные размеры панелей: панели по типу телевизионных экранов для спутникового приема, панели размером с компакт-диск для конформных схем или мультиантенные модули для наземных приложений, таких как 5G. Однако интерес представляет не столько перспектива и возможности ЖК-антенн и выполненных на их базе пассивных фазированных антенных решеток, сколько их практическая реализация. Один из возможных вариантов предлагает компания ALCAN, которая разработала и запатентовала недорогое электронное решение, созданное специально для фазированных решеток, выполненных на основе ЖК-фазовращателей.

Преимущества технологии антенн на жидких кристаллах заключается в том, что она является пассивной, управляется со смещением и, соответственно, потребляет очень мало энергии. Так, управление антенной решеткой, состоящей из 512 излучающих элементов, потребляет менее 0,5 Вт мощности. В за-

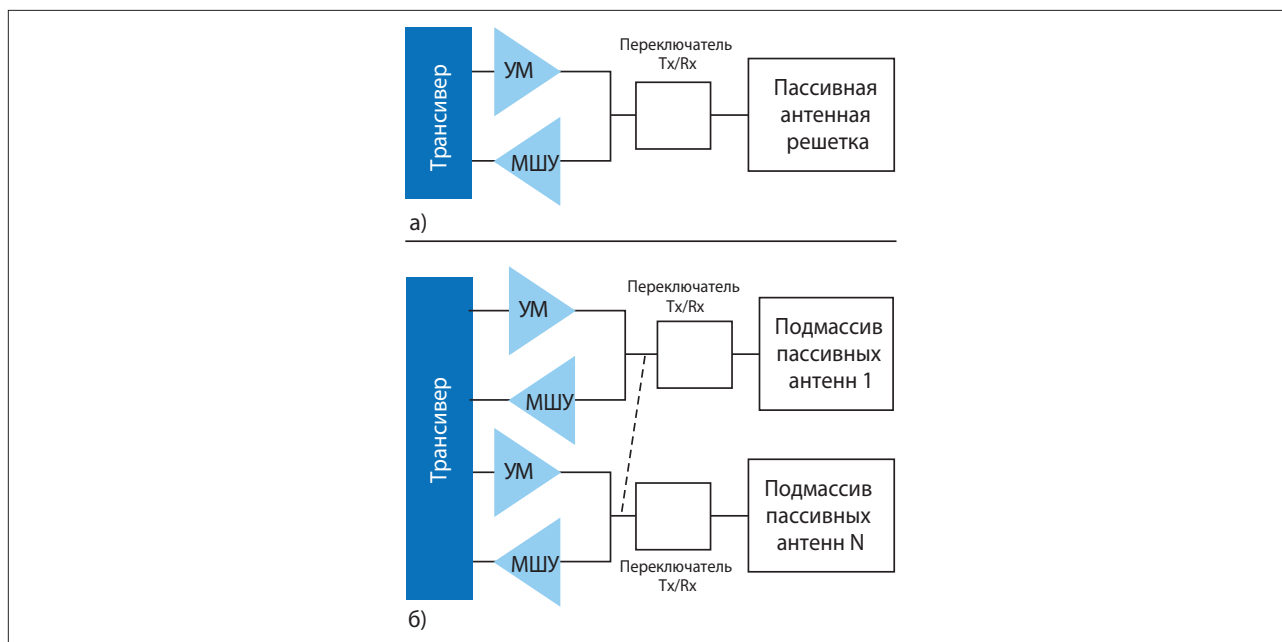
висимости от топологии и выбора конструкции достигаются вносимые потери, которые составляют всего 2–3 дБ, а время управления лучом выражается в миллисекундах [8]. Задержка — это время между возбуждением и соответствующим ему ответом, которое в основном является проблемой обработки сигнала, в то время как задержка управления — это время, необходимое для изменения направления луча. И хотя время реакции ЖК-систем, как уже было сказано, составляет миллисекунды и по факту оно больше, чем у антенных решеток, использующих интегральные схемы формирования луча, что может показаться ограничением, однако время управления порядка нескольких миллисекунд совместимо с задержкой в 1 мс или даже менее. Как известно, любая разработка, тем более в такой деликатной сфере, как системы связи в области миллиметровых волн еще и с формированием и управлением лучом диаграммы направленности, это всегда поиск компромиссов. Соответственно, при реализации проекта придется взвешивать все pro et contra.

Надежное удержание луча на цели требуется для двух основных сценариев. Первый — отслеживание высокоскоростных транспортных средств, таких как поезда и самолеты, что в общем достижимо с помощью ЖК-технологии [9]. Второй — для оптимального распределения ресурсов, когда антенна используется в качестве макробазовой станции и выполняет планирование/переключение между разными пользователями в порядке продолжительности символа/временного интервала, аналогично макробазовым станциям с полосой субдиапазона 6 ГГц. Однако, работая в области миллиметровых волн, антенна базовой станции используется в основном в качестве точки доступа для малых сот или точки доступа фиксированного беспроводного доступа (FWA), где количество пользователей меньше и быстрое переключение между абонентами не требуется.

Другие типы антенн на основе жидких кристаллов основаны на голографическом формировании луча. Они используют жидкие кристаллы в метаматериальном состоянии в антеннах с вытекающей волной. Такие антенны основаны на резонансных метаатомах и имеют фундаментальные ограничения, такие как, например, ограниченная полоса пропускания. Эти решения для взаимодействия с сопряженными структурами требуют десятков тысяч элементов, эквивалентных метаатомам [10] и имеют весьма сложную конструкцию и схемы управления [11]. Поскольку в конечном приложении необходимо управлять несколькими тысячами настраиваемых



▲ Рис. 4. Фазированная антенная решетка на основе ЖК-антенн, в которой каждый излучатель питается от независимого ЖК-фазовращателя



▲ **Рис. 5.** Полностью аналоговая архитектура (а) системы управления лучом диаграммы направленности и архитектура системы гибридного управления лучом (б)

устройств, это становится препятствием для увеличения размера антенны и сказывается на ее стоимости.

АРХИТЕКТУРЫ АНТЕНН ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ 5G

В зависимости от приложения и типа линии связи возможно два антенных решения. Первое — полностью аналоговые антенные решетки управления лучом для каналов широкополосного беспроводного доступа точка-точка (point-to-point, PtP), второе — гибридные аналоговые/цифровые антенные решетки управления лучом с возможностью многолучевого управления для каналов широкополосной многоточечной связи (point-to-multipoint PtMP), таких как базовые станции с массивами MIMO (mMIMO) (рис. 5).

В гибридной архитектуре для каждого подмассива используется одна радиочастотная цепочка, а в аналоговой архитектуре для всего массива предусмотрена одна радиочастотная схема — трансмиттер. ВЧ-тракт трансивера состоит

из одного усилителя мощности (УМ) для передачи, одного малошумящего усилителя (МШУ) для приема и коммутатора Tx/Rx, отвечающего уровням мощности 5G и требованиям дуплексной связи с временным разделением.

Здесь необходимо дать некоторые пояснения. MIMO (Multiple Input Multiple Output, множественные входы, множественные выходы) — это метод пространственного кодирования сигнала, позволяющий увеличить полосу пропускания канала, при котором для передачи данных используются две и более антенны и такое же количество антенн для приема. Передающие и приемные антенны разносят так, чтобы корреляция между соседними антеннами была слабой. Massive MIMO (mMIMO) — это ключевая технология увеличения пропускной способности сети 5G, разработанная компанией Samsung Electronics. Massive MIMO повышает пропускную способность сети и удобство эксплуатации 5G пользователями. Технология Massive MIMO позволяет управлять множеством

антенн для концентрации излучаемых радиосигналов в узком луче, сфокусированном на определенном пользователе, что приводит к значительному увеличению пропускной способности и эффективности при одновременном сокращении помех между находящимися рядом устройствами.

Вернемся к рис. 5. Полностью аналоговая архитектура, показанная на рис. 5а, подходит для однолучевых однопользовательских, PtP-решений и предлагает лучшую стоимость и простоту реализации. При этом архитектура, показанная на рис. 5б, обеспечивает наилучший компромисс между гибкостью формирования диаграммы направленности, стоимостью и сложностью внешнего РЧ-интерфейса для многопользовательских сценариев PtMP.

По сравнению с кремниевыми антеннами формирования диаграммы направленности, для интеллектуальной ЖК-антенны и ее гибридной архитектуры формирования диаграммы направленности требуется меньше высокочастотных

Таблица. ЖК-фазированная антенная решетка в сравнении с фазированной антенной решеткой на основе MMIC

Компания и технологии	Gapwaves Si MMIC [10]	Anokiwave Si MMIC [11]	ALCAN ЖК	ALCAN ЖК
Размер массива (элементы)	8×8	8×8	8×8	10×10
Подмассив (элементы)	1×4 вертикальный	Не требуется	Не требуется	Не требуется
Интерфейсные модули	4 + 1	16	1	1
Средний выход модуля Tx, дБм	8	14	30 (УМ)	33 (УМ)
Пассивное усиление, дБ	24	22	22,75	24,75
ЭИИМ, дБми	44	50	45,25	50,25
Общая потребляемая мощность, Вт	13	20	5,5	8,2
Отклонение луча, град в горизонтальной / вертикальной плоскостях	±45/±10	±60/±60	±60/±60	±60/±60

Примечание. ЭИИМ (англ. EIRP — Equivalent Isotropically Radiated Power), эквивалентная изотропно-излучаемая мощность — произведение мощности радиочастотного сигнала, подводимого к антенне, на абсолютный коэффициент усиления антенны.

к сети и Интернету. Здесь для обработки сценариев управления лучом, таких как отслеживание перемещающихся пользователей до передачи обслуживания соседнему узлу или автоматическое выравнивание канала для установления услуги FWA между базовой станцией и оборудованием в помещении клиента, требуются более широкие лучи диаграммы направленности, чем для каналов PtP. Соответственно, для увеличения пропускной способности через антенные решетки ММО все чаще используются решения с несколькими лучами.

Новая тенденция, называемая self-backhauling (образование транспортных каналов за счет собственных возможностей) или Integrated Access and Backhaul (интеграция каналов доступа и транспорта), использует одну антенну для формирования каналов PtP и PtMP. Для таких случаев применяются модульные антенны mMIMO с гибридной архитектурой формирования луча, которые предлагают лучшие и наиболее совместимые решения.

Что касается пользовательского обслуживания (UE), в нем также требуются антенны с электронным управлением (ESA), особенно для преодоления потерь на трассе на частотах миллиметрового диапазона, но с меньшим числом элементов. Но для некоторых абонентских устройств могут понадобиться антенны с высоким коэффициентом усиления и узкими лучами диаграммы направленности, при этом для выравнивания такого узкого луча UE по отношению к лучу точки доступа необходимо весьма эффективное управление. Кроме того, система должна поддерживать выравнивание, если некоторые UE перемещаются с относительно высокой скоростью — например, в условиях прямой связи в технологии, близкой к C-V2X¹, где реализуется связь через базовую станцию с находящимся рядом транспортным средством.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для систем связи пятого поколения (5G) антенны с электронным управлением становятся основным требованием как для сетевых узлов, так и для абонентских терминалов. В области миллиметровых волн, где они будут развернуты в значительных количествах, такие антенны должны быть небольшого размера для того, чтобы быть незаметными в городских условиях, дешевым, экономически оправданным при эксплуатации, энергоэффективным, потреблять минимальную мощность. К тому же они

должны иметь небольшую массу, что упрощает их установку и обслуживание.

К основным особенностям, которые отличают фазированные решетки на основе жидких кристаллов от других антенных решений, относятся:

1. Энергоэффективность, низкое энергопотребление на уровне нескольких ватт и, соответственно, небольшое тепловыделение.
2. Низкая стоимость по сравнению с традиционными активными фазированными антенными решетками, поскольку они не используют фазовращатели на основе ММС. ЖК-фазированные решетки представляют собой «чистое» пассивное решение с непрерывным управлением лучом.

В зависимости от приложения фазированные решетки на основе жидких кристаллов поддерживают архитектуры формирования диаграммы направленности, которые являются либо полностью аналоговыми для однолучевых ESA, либо гибридными аналогово-цифровыми для многолучевых ESA. Время отклика у них составляет миллисекунды, что совместимо с требованиями к задержке в 1 мс для большинства случаев использования технологии 5G в таких конечных приложениях, как малые соты, точки фиксированного беспроводного доступа и абонентские терминалы, включая мобильные. Антенные матрицы на основе жидких кристаллов необычайно плоские, что делает их совместимыми с низкопрофильными приложениями.

В заключение необходимо отметить, что проблемы широкополосной связи на уровне пятого поколения не заканчиваются. И уже в обозримом будущем мы войдем в шестое поколение (внедрение которого предполагается во второй половине 2020-х — 2030-е гг.), которое сдвинется из гигагерцевой в терагерцевую область, но это уже совсем другой уровень техники и еще более сложных проблем, требующих своего решения. Одна из технологий, которая может быть реализована в шестом поколении средств сотовой связи, — применение радиофотонных цифровых антенных решеток на базовых станциях в сочетании с технологией mMIMO. При этом рассматриваются варианты базовых станций с антенными системами, формирующими порядка 250 лучей диаграммы направленности в рабочем секторе. Однако в этом направлении свое слово могут сказать и ЖК-антенны. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Рентюк В. 5G и миллиметровые волны. // СВЧ-электроника. 2019. № 4.

2. WRC-19 Identifies Additional Frequency Bands for 5G. ITI News, November 2019. www.news.itu.int/wrc-19-agrees-to-identify-new-frequency-bands-for-5g/.

3. Pujol F., Manero C., Remis S. 5G Observatory Quarterly Report 5. European Commission DG Communications Networks, October 2019. www.5gobservatory.eu/wp-content/uploads/2019/10/90013-5G-Observatory-Quarterly-report-5_final.pdf.

4. Рентюк В. От структуры сигналов к ММО: пять важных моментов для понимания проблем 5G New Radio//Беспроводные технологии. 2020. № 1.

5. Weickhmann C. et al. A Low-Cost, Flat, Electronically Steerable Array Antenna for New Massive NGEO Constellations Ground Terminals and Future 5G. EuCAP, April 2019, Krakow, Poland.

6. Goelden F., Gaebler A., Goebel M., Manabe A., Mueller S., Jakoby R. Tunable Liquid Crystal Phase Shifter for Microwave Frequencies//Electronics Letters. 2009. Vol. 45. №. 13.

7. Jakoby R., Karabey O.H., Hu W. Phase Shift Device. U.S. Patent 10141620, issued November 27, 2018.

8. Goelden F., Gaebler A., Mueller S., Lapanik A., Haase W., Jakoby R. Liquid-Crystal Varactors with Fast Switching Times for Microwave Applications//Electronics Letters. 2008 Vol. 44.

9. Hattachi R. E., Erfanian J. NGMN 5G White Paper. NGMN Alliance, February 2015.

10. Johnson M. C., Brunton S. L., Kundtz N. B., Kutz J. N. Sidelobe Canceling for Reconfigurable Holographic Metamaterial Antenna//IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2015. Vol. 63. №. 4.

11. Bhattacharya A. Modeling Metamaterials — Metamaterial Development using Electromagnetic Simulation. Physics' Best. April 2014.

12. Bencivenni C., Emanuelsson T., Gustafsson M. Gapwaves Platform Integrates 5G mmWave Arrays//Microwave Journal. 2019. Vol. 62. №. 2.

13. Introduction to All Silicon Millimeter-Wave 5G Arrays. Anokiwave Inc., March 2019. www.anokiwave.com/contact/overview_request/mmWave_array_wp_request.php.

14. Peterson B. RF Front-end Technology and Tradeoffs for 5G mmWave Fixed Wireless Access//Microwave Journa. 2018. Vol. 61. №. 11.

15. Use of Spectrum Bands Above 24 GHz for Mobile Radio Services. In the matter of GN Docket No. 14-177, IB Docket No. 15-256, RM-11664, WT Docket No. 10-112, IB Docket No. 97-95, Federal Communications Commission, July 2016. www.mentor.ieee.org/802.18/dcn/16/18-16-0058-00-0000-fcc-mmwave-r-o-and-fiprm.pdf.

16. Kodnoeih M. R. D. Development of Next-Generation 5G Directive Antennas at Millimeter Waves, PhD thesis, UNIVERSITE DE NANTES, France, 2018.

17. Ахмед А. М. С., Анусич З., Дурнан Г., перевод и дополнения: Рентюк В. Требования к широкополосным усилителям мощности, используемым в mMIMO-приложениях//СВЧ-электроника. 2020. № 2.

¹ V2X, Vehicle-to-Everything — это использование технологий беспроводной связи в автомобилях для обеспечения активной безопасности. Машина сможет взаимодействовать со всем, что находится вокруг нее.