

ОТКРЫТЫЕ СЕТИ РАДИОДОСТУПА Open RAN

А. Росляков, д.т.н., заведующий кафедрой сетей и систем связи ПГУТИ / aros1@mail.ru

УДК 621.396, DOI: 10.22184/2070-8963.2022.103.3.40.49

Рассмотрены базовые принципы новой концепции сотовой сети – Open RAN (открытая сеть радиодоступа), согласно которой оборудование реализуется в виде программного обеспечения, работающего на открытых аппаратно-независимых платформах, а любой интерфейс между компонентами радиоподсистемы является открытым и готов к взаимодействию с компонентом другого производителя. Показаны преимущества использования архитектуры Open RAN для операторов мобильной связи, современное состояние стандартизации, возникающие проблемы и имеющийся зарубежный и отечественный опыт.

ВВЕДЕНИЕ

Сеть радиодоступа RAN (Radio Access Network) в различных стандартах мобильной связи представляет собой совокупность элементов, обеспечивающих соединение между абонентским оборудованием и базовой (опорной) сетью с помощью радио- и проводных технологий. С точки зрения экономики, RAN – самая затратная часть сети мобильной связи и, по оценкам экспертов, затраты на нее составляют до 80% капитальных и до 60% операционных расходов оператора [1]. Поэтому поиск путей их снижения является наиважнейшей задачей для бизнеса сотовых операторов.

В настоящее время сети RAN реализуются на базе оборудования ограниченного числа поставщиков-монополистов, так как проприетарные (фирменные) решения разных производителей несовместимы. Это создает ряд проблем бизнесу операторов:

- текущий поставщик решений RAN блокирует или удорожает внедрение решений других вендоров;
- цены на специализированное проприетарное оборудование оператору мобильной сети труднее обосновать и согласовать с поставщиком;

- отсутствуют новые поставщики, способные снизить цены на сложившемся рынке решений RAN.

Кроме того, огромный риск для оператора представляют неизвестные перспективы выпускаемой линейки проприетарных аппаратно-программных решений RAN.

Очевидно, что сократить капитальные расходы на строительство инфраструктуры сетей поколений 5G и 6G [2] возможно только с расширением экосистемы производителей телеком-оборудования и демонаполизации рынка. Поэтому в последние годы была предложена новая концепция – открытая сеть радиодоступа Open RAN, в которой оборудование реализуется в виде программного обеспечения, работающего на открытых аппаратно-независимых платформах, а также любой интерфейс между компонентами радиоподсистемы является открытым и готов к взаимодействию с компонентом любого другого производителя Open RAN. Реализация данной концепции на практике должна привести к устранению зависимости оператора мобильной сети от производителей и, как результат, к ощущаемому снижению расходов операторов на построение сетей 5G/6G.

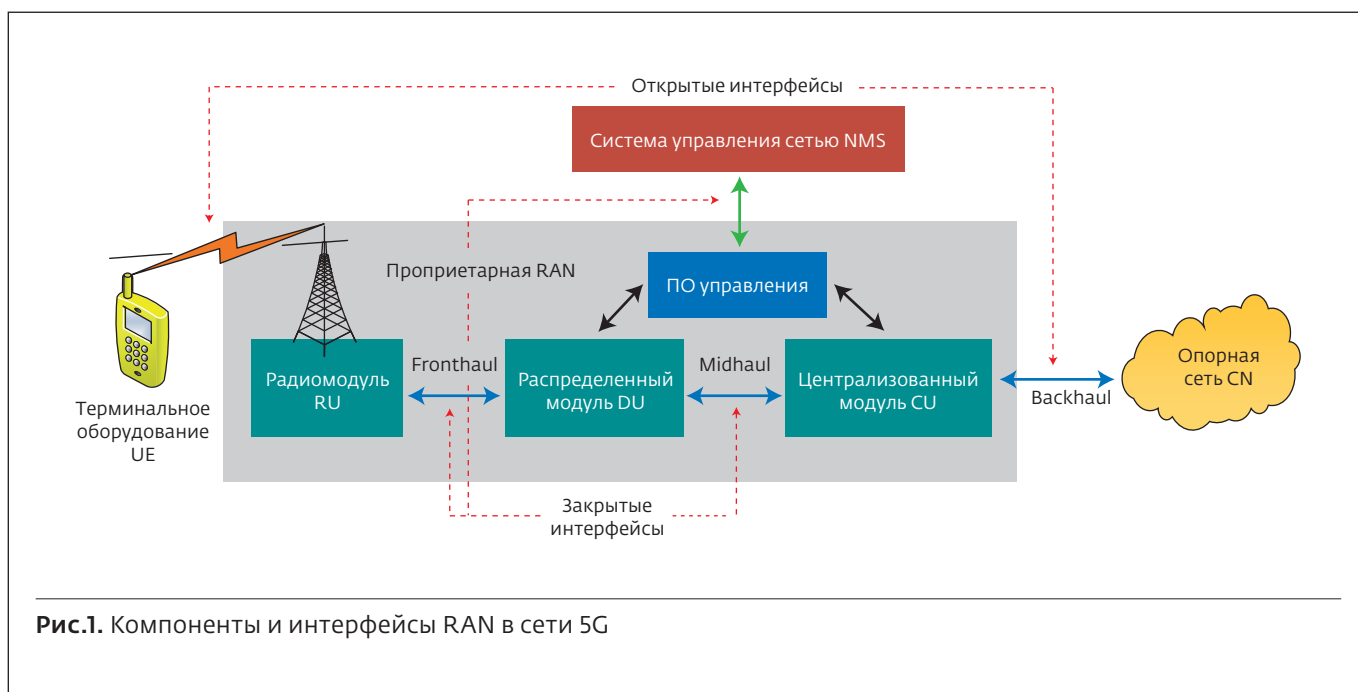


Рис.1. Компоненты и интерфейсы RAN в сети 5G

В статье рассмотрены подсистема RAN в сети 5G и варианты реализации ее интерфейсов, приведены базовые положения архитектуры Open RAN, представлены открытые элементы этой архитектуры и преимущества их использования для операторов связи, показаны состояние стандартизации, проблемы реализации и практический опыт внедрения концепции Open RAN.

ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ИНТЕРФЕЙСОВ ПОДСИСТЕМЫ RAN В СЕТИ 5G

Стандартизацией технологий мобильной связи, включая сеть радиодоступа RAN, базовые транспортные сети и плоскость услуг, занимается проект партнерства 3GPP. 3GPP готовит полные системные спецификации для архитектуры сети 5G, которая в значительной степени ориентирована на модульность, повторное использование и автономность сетевых функций.

Подсистема RAN сети 5G в предложенной 3GPP архитектуре состоит из следующих основных компонентов, соединенных соответствующими сетевыми интерфейсами (рис.1) [3]:

- радиомодуль RU (Radio Unit), в нем реализуются основные функции физического уровня L1/PHY, включая аналого-цифровое/цифро-аналоговое преобразование;
- распределенный модуль DU (Distributed Unit), в котором выполняется обработка цифрового сигнала, полученного от RU,

уровней L1 и L2 (MAC, нижние подуровни RLC);

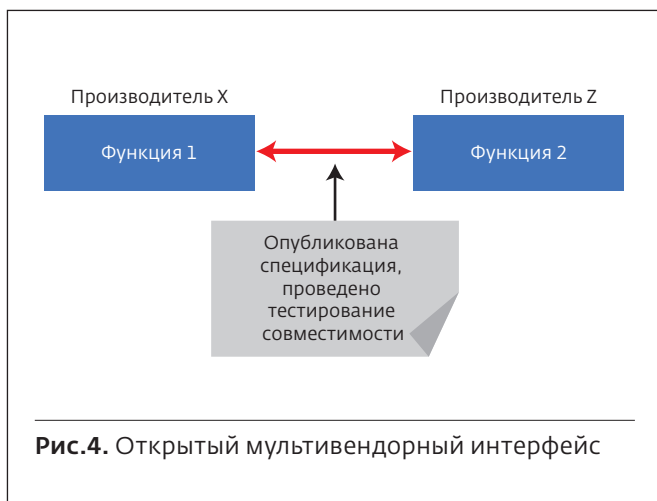
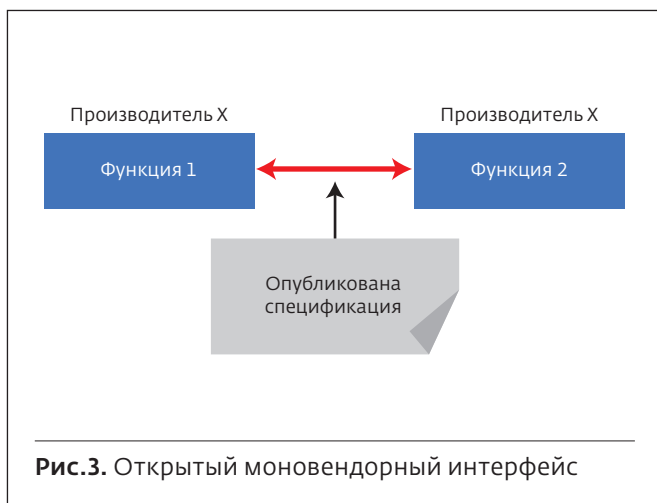
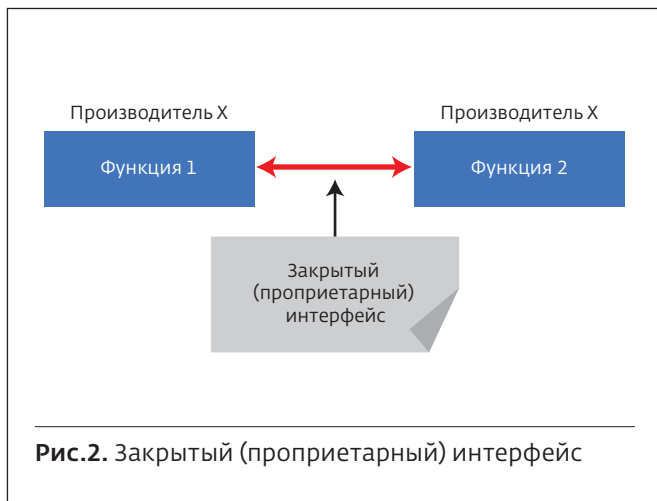
- централизованный модуль CU (Centralized Unit), в нем сконцентрирована обработка цифрового сигнала, полученного от DU, уровней L2 (верхние подуровни RLC, PDCP) и L3.

Подсистема RAN имеет открытые мультивендорные интерфейсы Backhaul в сторону сетевых функций опорной сети CN (Core Network) и терминального оборудования UE (User Equipment), что в целом не является новшеством 5G, так как это использовалось и в предыдущих поколениях мобильных сетей связи.

В то же время интерфейсы RAN между RU и DU (Fronthaul), DU и CU (Midhaul) являются закрытыми (проприетарными). Как правило, закрытым является также интерфейс в сторону системы управления сетью Network Management System (NMS) соответствующего поставщика RAN, которая реализует функции управления авариями, конфигурацией, учетом, производительностью и безопасностью FCAPS (Fault, Configuration, Accounting, Performance, Security).

Возможны три варианта реализации интерфейсов RAN:

1. Закрытый (проприетарный) интерфейс (рис.2). Реализует сугубо уникальные функции оборудования / ПО одного вендора. Как правило, функциональности, реализуемые с помощью данных интерфейсов находятся



в "теневой" зоне спецификаций 3GPP: не описаны там или описаны поверхностно. К достоинствам данного варианта реализации можно отнести предсказуемый уровень производительности ввиду полного

и всестороннего тестирования и верификации решения силами поставщика. К очевидным недостаткам относятся закрытость алгоритмов реализации интерфейса, невозможность интеграции систем других поставщиков, зависимость оператора от жизненного цикла интерфейса, диктуемая внутренними процессами вендора (в любой момент функциональность может перестать работать, если поставщик посчитает дальнейшее ее развитие нецелесообразным).

2. Открытый моновендорный (рис.3). Реализует сугубо проприетарные уникальные функции оборудования/ПО одного производителя, однако, в отличие от проприетарного интерфейса, поставщик в данном варианте реализации публикует полную спецификацию с описанием алгоритмов, реализуемых поверх данного интерфейса функциональностей, а также формат используемых сообщений и сигнального обмена. Достоинства и недостатки схожи с закрытыми интерфейсами, однако в данном случае не блокируется полностью возможность партнерств различных вендоров и интеграции их систем.
3. Открытый мультивендорный интерфейс (рис.4). В данном варианте реализации, помимо публикации спецификаций, силами разных поставщиков осуществляется тестирование совместимости в рамках работы интерфейса и, в случае необходимости, проводится доработка функциональностей, работающих поверх такого интерфейса, с целью обеспечения определенного гарантированного уровня производительности. При этом важно понимать, что этот уровень производительности может быть ниже, чем в случае использования контролируемой среды разработки и тестирования одного производителя, однако в целом является приемлемым для нормального функционирования сети. Помимо очевидных достоинств реализации подобных интерфейсов, нужно отметить ключевой недостаток: дополнительные временные и денежные затраты на тестирование совместимости и доработку таких интерфейсов под нужды второй стороны.

Идея превратить RAN в программное обеспечение, работающее на открытых и аппаратно независимых платформах, возникла вместе с концепцией сети пятого поколения и была частично закреплена в спецификациях Release 15 3GPP [4], который стал первым релизом

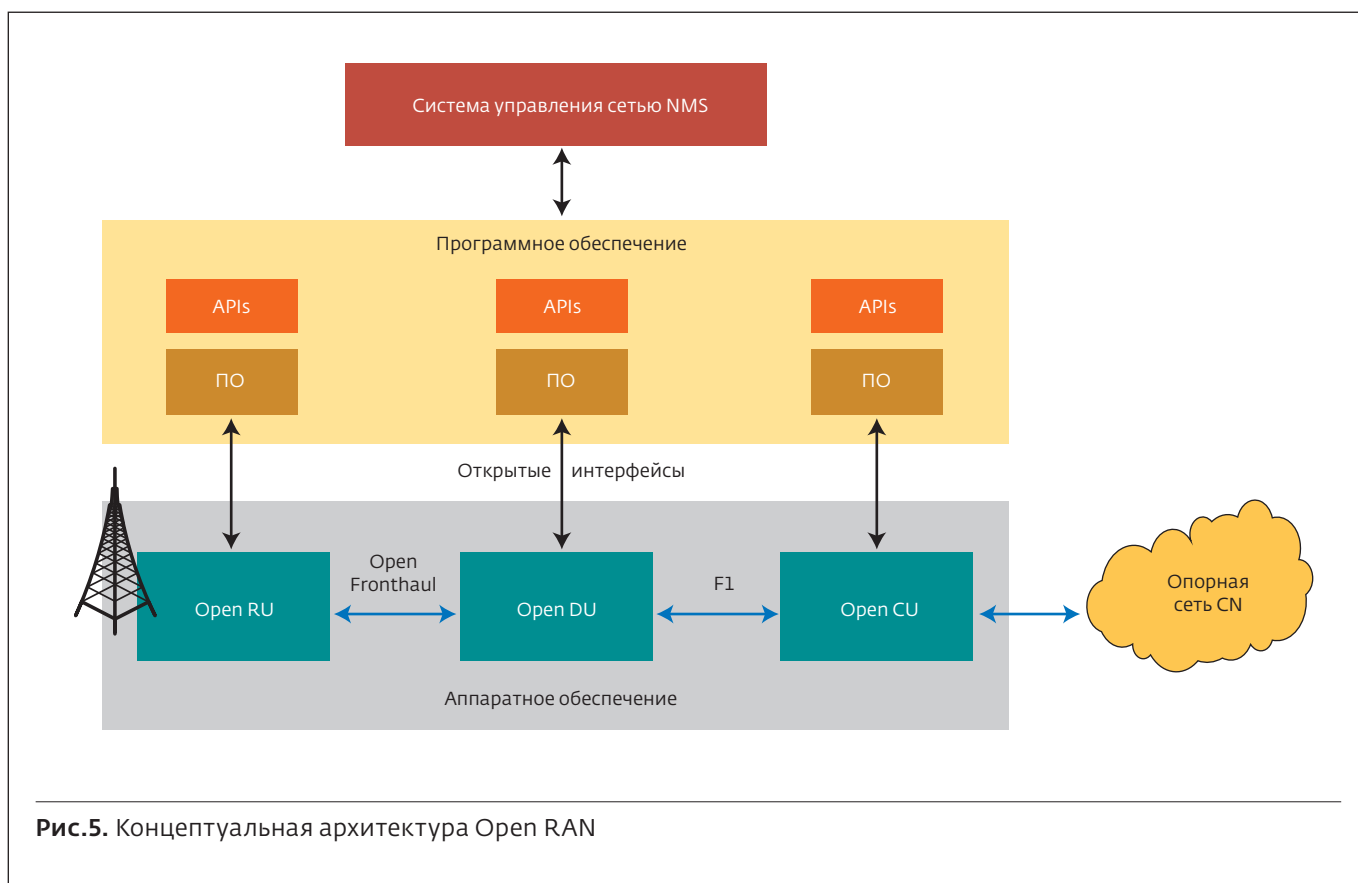


Рис.5. Концептуальная архитектура Open RAN

партнерства, описавшим архитектуру сетей 5G. Отход от монолитной архитектуры построения радиоподсистемы, успехи в реализации виртуальных и облачных сетевых узлов (например, в сегменте опорной сети, где данные архитектурные решения активно применяются операторами с середины 2010-х годов), увеличение роли автоматизации управления сетью на базе подсистем NMS/OSS (Network Management System / Operation Support System) и самоорганизующихся сетей SON (Self-Organizing Network) дали серьезный толчок к появлению Open RAN. Данная концепция позволяет любым производителям поставлять часть компонентов или полное решение RAN "под ключ" операторам сетей мобильной связи в условиях жесткой открытой конкуренции, как технической, так и ценовой. Использование концепции Open RAN обеспечивает операторам большую гибкость и свободу выбора в определении сетевой архитектуры 5G/6G.

АРХИТЕКТУРА OPEN RAN

Основной идеей рассматриваемой концепции является реализация интерфейсов подсистемы RAN в виде открытых и мультивендорных, то есть

в первую очередь интерфейсов между функциями CU, DU, RU и NMS, а также организация сети мобильного радиодоступа из виртуализированных и мультивендорных компонентов с автоматическим управлением, оркестрацией и оптимизацией на базе открытых стандартов (рис.5).

Цели концепции Open RAN таковы:

- открыть рынок для новых поставщиков аппаратно-программных решений RAN;
- обеспечить операторам сетей мобильной связи экономию капитальных и операционных затрат на построение и эксплуатацию сети радиодоступа;
- обеспечить инновационность аппаратно-программных решений RAN;
- сократить время вывода на рынок новых услуг в сетях мобильной связи поколений 5G и 6G.

Подсистема RAN сети 5G в концепции Open RAN включает следующие основные компоненты, соединенные соответствующими сетевыми интерфейсами (рис.6):

1. Радиомодуль RU (Radio Unit). С целью увеличения количества потенциальных поставщиков RU выполнен с использованием максимально унифицированных схем реализации

6. Интеллектуальный контроллер RAN в режиме, близком к реальному времени Near-RT RIC (Near-Real-Time RAN Intelligent Controller), – сетевая функция, которая обеспечивает управление и оптимизацию элементов и радиоресурсов RAN в режиме, близком к реальному времени (задержки 0,1-10 мс), с помощью детального сбора данных и действий через интерфейс E2. Данная функция является опциональной и может быть реализована на базе vCU.

Перечисленные блоки, как правило, могут быть предоставлены отдельными поставщиками, разрабатываемыми только модули vCU или vDU, или только приложения для работы на Non-RT RIC, или контроллеры RIC и т.д. В этом заключается преимущество концепции Open RAN.

ОТКРЫТЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АРХИТЕКТУРЫ OPEN RAN

Архитектура Open RAN включает четыре основных элемента:

1. Открытый мультивендорный интерфейс между RU и vDU – открытый Fronthaul в виде низкоуровневого разделения LLS (Low Layer Split). Этот интерфейс вызывает наибольший интерес со стороны отрасли в целом и на него возлагают большие надежды операторы, так как в идеальном случае появляется возможность выбирать на рынке любой радиомодуль RU и подключать его к любому модулю vDU. Важно отметить, что разделение (Split) функций между RU и vDU может варьироваться в зависимости от задачи, однако есть ряд наиболее популярных схем реализации (Split 6, Split 7.2x), обеспечивающих упрощение и удешевление сети в целом при незначительном удорожании того или иного компонента.
2. Деагрегация аппаратного обеспечения (АО) и ПО. Возможность задействовать разных поставщиков АО и ПО даже в рамках одной сетевой функции. Данный подход применим

ко всем сетевым функциям Open RAN: RU, vDU, vCU, SMO, Non-RT RIC, Near-RT RIC.

3. Открытое управление сетью и автоматизация управления. Открытый мультивендорный интерфейс в сторону плоскости управления, обеспечивающий упрощение задач управления многокомпонентной сетью, поддержку функций AI/ML для оптимизации сети в режимах реального или почти реального времени.
4. Открытое разделение функций между vDU и vCU – высокоуровневое разделение HLS (High Layer Split). Позволяет использовать мощные облачные решения на уровне CU, допуская при этом специализированную (но совместимую с архитектурой x86) компонентную базу на уровне DU.


Каждый из указанных выше открытых элементов архитектуры Open RAN имеет свои преимущества и недостатки при использовании его в сети, что представлено в табл.1.

СТАНДАРТИЗАЦИЯ OPEN RAN

Мировые операторы связи проявляют высокую заинтересованность в возможностях сетевой архитектуры Open RAN. В феврале 2018 года компании AT&T, China Mobile, Deutsche Telekom, NTT DOCOMO и Orange создали специальное объединение O-RAN Alliance [5], которое является ключевой стандартизирующей организацией концепции Open RAN. К настоящему времени в альянс вступили более 30 операторов и 280 производителей и академических учреждений. Среди российских участников O-RAN Alliance такие организации, как "Сколтех" и "Криптонит".

O-RAN Alliance работает в трех основных направлениях:


- создание спецификаций с целью расширения стандартов RAN в сторону открытости и интеллектуальности сетей;
- разработка открытого ПО для Open RAN (в сотрудничестве с Linux Foundation);



ИНФОТЕЛ
Интеллект. Опыт. Результат.

ONEPLAN

**ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И УСЛУГИ
ПО ПЛАНИРОВАНИЮ И ОПТИМИЗАЦИИ
СЕТЕЙ ПОДВИЖНОЙ
И ФИКСИРОВАННОЙ СВЯЗИ**



step@rpls.ru
+7 812 590-77-11
www.rpls.ru

Таблица 1. Преимущества использования открытых элементов архитектуры Open RAN

Открытые элементы архитектуры Open RAN	Преимущества использования для операторов связи					
	Выход на рынок новых поставщиков	Гибкость	Экономия капитальных затрат	Экономия операционных затрат	Скорость выхода на рынок	Инновации
Открытый Fronthaul	++	++	+	--	++	--
Дезагрегация АО и ПО	++	+	+	-	-	-
Открытое управление сетью и автоматизация управления	+	+	+/-	++	+	+
Открытое разделение функций CU/DU (HLS)	+	+	+	-	--	--

- поддержка компаний – членов альянса, в тестировании и интеграции их реализаций O-RAN.

Стоит отметить, что спецификации O-RAN Alliance не являются самостоятельными документами, они дополняют и расширяют спецификации 3GPP, задачей которого является разработка новых стандартов не только RAN, но и всех доменов мобильной связи.

Работа над спецификациями O-RAN распределена между техническими рабочими группами (WG), каждая из которых охватывает определенную часть рассматриваемой архитектуры (см. табл.2).

ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ OPEN RAN

Ожидается, что при практической реализации архитектуры Open RAN возникнет ряд сложностей. Рассмотрим некоторые из них.

Высокая стоимость интеграции системы

Основная проблема открытой архитектуры заключается в том, что новые продукты не будут интегрированы в сеть одним из текущих поставщиков. Продукт должен быть интегрирован третьей стороной, которая может быть такой же или отличаться от поставщика, производящего аппаратное и программное обеспечение решения. Новые компании, создающие часть стека ПО (например, RIC) или специализирующиеся на конкретном аппаратном компоненте (например, блоки RU, vDU, vCU), скорее всего, не будут иметь возможности делать это с таким же уровнем глубины, как у традиционных поставщиков оборудования RAN. Следовательно,

на рынке системной интеграции появятся новые специализированные игроки, но их компетенция в реализации проектов RAN будет ограничена. Это оставляет возможность для существующих поставщиков данного оборудования, которым необходимо будет заключить двусторонние соглашения о поддержке с поставщиками компонентов RAN. Все это может спровоцировать формирование новой модели лицензирования и сборов для мультивендорной поддержки. В конечном итоге операторы столкнутся с необходимостью более интенсивного тестирования при первом развертывании. Следовательно, увеличится стоимость развертывания.

В итоге потенциальная экономия капитальных затрат за счет усиления конкуренции в области аппаратного и программного обеспечения, вероятно, будет компенсирована увеличением капитальных затрат на услуги по развертыванию и установке.

Снижение производительности сети

Открытые мультивендорные интерфейсы стимулируют поставщиков реализовывать только базовую производительность для упрощения дальнейшей интеграции и верификации решения. Ожидается, что сетевой узел, построенный со стеком ПО, созданным несколькими разработчиками программного обеспечения и несколькими производителями оборудования, будет иметь существенно меньше отлаженных проприетарных функций, что в конечном итоге может привести к меньшей производительности, нежели чем у эквивалентного решения,

Таблица 2. Состав рабочих групп O-RAN Alliance

Название РГ	Задачи РГ
РГ 1. Архитектура O-RAN и сценарии использования	Определяет задачи, которые должны быть выполнены в рамках архитектуры и сценариев использования O-RAN
РГ 2. Non-RT RIC RAN и интерфейс A1	Поддержка интеллектуального управления радиоресурсами не в реальном времени, оптимизация процедур высоких уровней (L3 и выше), оптимизация политик в RAN и предоставление моделей AI/ML для Near-RT RIC
РГ 3. Near-RT RIC и интерфейс E2	Определение архитектуры, основанной на интеллектуальном управлении радиоресурсами, работающем в режиме Near-RT. Обеспечение управления и оптимизации элементов и ресурсов сети RAN посредством детального сбора данных и применения политик через интерфейс E2
РГ 4. Интерфейсы Open Fronthaul	Предоставление открытых Fronthaul-интерфейсов, в которых может быть реализована совместимость DU-RU от различных производителей
РГ 5. Интерфейсы F1 / W1 / E1 / X2 / Xn	Предоставление полностью работоспособных мультивендорных спецификаций (которые должны быть совместимы со спецификацией 3GPP) для интерфейсов F1 CU-DU 5G / W1 CU-DU LTE / E1 CU-CU / X2 LTE-CU 5G / Xn CU-CU, а также уточнение спецификаций 3GPP в части этих интерфейсов
РГ 6. Облачные решения и оркестрация	Обеспечение отделения программного обеспечения RAN от базовых аппаратных платформ (дезагрегация АО и ПО) и разработка технологии и эталонных вариантов дизайна/реализации компонентов, которые позволят использовать стандартные аппаратные платформы для всех сетевых функций RAN, включая CU и DU
РГ 7. Аппаратное обеспечение White Box	Разработка и выпуск эталонного проекта для развития разделения (дезагрегации) программной и аппаратной платформ
РГ 8. Эталонный дизайн стека ПО	Разработка архитектуры программного обеспечения, дизайна и дорожной карты релизов для сетевых функций O-RAN CU и DU на основе спецификаций O-RAN и 3GPP для стека протоколов 5G
РГ 9. Транспорт X-haul	Разработка требований к транспортному домену, состоящему из транспортного оборудования, физической среды и протоколов контроля/управления транспортной сетью
РГ 10. Управление и эксплуатация сети OAM	Разработка требований к системе управления и эксплуатации сети, архитектуры управления и интерфейса O1 инфраструктуры SMO

предлагаемого одним поставщиком. Многие из сложных функциональностей (повышение спектральной эффективности, управление интерференцией в сети и увеличение пропускной способности системы), используемые в современных сетях мобильной связи, являются проприетарными.

Ожидается, что общая производительность системы будет хуже, а решения Open RAN будут использоваться достаточно ограниченно: в регионах с меньшими требованиями к трафику и производительности.

Фрагментация отрасли и снижение инновационности

Процесс выполнения регулярных операций эксплуатации сети с той же степенью детализации

и эффективности, привычной оператору сегодня, будет сложным. Система должна быть интегрирована в единую мультивендорную плоскость управления, и управление жизненным циклом каждого из компонентов сети должно быть тщательно спланировано и согласовано между поставщиками. Операторам придется в большей степени контролировать эти аспекты, чтобы гарантировать, что различные поставщики компонентов будут сотрудничать в согласовании дорожных карт для реализации новых сетевых функциональностей или сетевых услуг.

Исправления и решения проблем с аналогичными соглашениями об уровне обслуживания SLA, что и сегодня также является одной из проблем, которую операторам придется решать. При

дезагрегированной системе Open RAN следует ожидать, что у производителей будет меньше стимулов для продвижения сложных общесистемных инноваций, которые требуют координации с другими поставщиками.

ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ OPEN RAN

К операторам, которые уже внедряют концепцию Open RAN, относятся японский Rakuten Mobile, американский Dish Network, европейские Vodafone, Telefonica, Deutsche Telekom, Orange и Turkcell. Ведущие позиции в цепочке поставок решений Open RAN занимают такие компании, как AltioStar, Mavenir и Parallel Wireless [6].

Стоит отметить, что только компания Rakuten на текущий момент реализовала полностью коммерческую сеть LTE/5G (порядка 5 тыс. площадок) на базе концепции Open RAN. Американский оператор DISH также готовится к коммерческому запуску своей 5G-сети Open RAN, однако по масштабам сеть пока уступает сети Rakuten (примерно 500 площадок). Большинство прочих операторов находятся на стадии пилотных испытаний и запускают сети в ограниченном масштабе (до 100 площадок), как правило в зонах, где нет повышенных требований к производительности сети, качеству и пропускной способности – в основном в сельских отдаленных районах.

Успехи Rakuten и DISH отчасти обусловлены тем, что данные операторы впервые выходили на рынок, не имея "наследия" в виде оборудования текущих и прошлых поколений мобильных сетей, что в некотором роде упростило ввод в эксплуатацию таких сетей. Для крупнейших мировых операторов (AT&T, Verizon, T-Mobile и др.) такие запуски ведут к дополнительным сложностям в части интеграции существующей "проприетарной" сети с новой сетью Open RAN.

В 2019 году в Сколковском институте науки и технологий (Сколтех) в рамках Клуба 5G была создана рабочая группа Open RAN [7]. В ее состав вошли представители Центра компетенций НТИ на базе Сколтеха по технологиям беспроводной связи и Интернета вещей (ЦК НТИ БСИВ), мобильных операторов "большой четверки" и "Ростелекома". Заявленные задачи группы: обсуждение, гармонизация интересов и обобщение частных технических требований к сетям 5G на основе архитектуры Open RAN со стороны операторского сообщества. Были сформулированы и обобщены требования операторов по тактико-техническим характеристикам, архитектуре, дизайну и эксплуатационным характеристикам сетевого оборудования 5G RAN. В 2020 году Сколтех совместно с МТС реализовал на территории

Сколково пилотную зону с использованием аппаратно-программных решений 5G Open RAN российского производства [8]. На рис.7 представлен приемопередающий модуль RU, разработанный Сколтехом совместно с компанией "Радио Гигабит" (Н. Новгород), входящей в состав возглавляемого Сколтехом Лидирующего ИЦ по технологиям 5G.

В ноябре 2021 года в ходе тестирования в лаборатории Open RAN на территории Центра 5G МТС в Москве на ВДНХ была достигнута нисходящая скорость передачи данных более 1 Гбит/с [9]. Основу аппаратной части составили стандартные серверы с установленным ускорителем. Для соединения компонентов между собой применено стандартное транспортное оборудование, которое объединяет серверы базовой станции, радиомодуль Open RAN и транспортную сеть. Программная часть работает на базе операционной системы CentOS, установленные программные компоненты разработки Сколтеха реализуют полный стек протоколов базовой станции 5G.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Идея концепции Open RAN состоит в построении сетей радиодоступа в мобильных сетях пятого поколения в виде программного обеспечения, работающего на открытых и аппаратно-независимых платформах. Она имеет много преимуществ для операторов связи, так как позволяет им перейти от фирменных проприетарных аппаратно-программных комплексов к унифицированным мультивендорным решениям, что приведет к усилению конкуренции на рынке решений RAN и естественному снижению их стоимости.

При этом по оценкам экспертов, потребуется несколько лет, прежде чем решения Open RAN достигнут такого уровня зрелости, что могут сравниться по производительности и функциональности с существующими фирменными решениями и будут готовы к коммерческому внедрению при соизмеримом уровне затрат со стороны оператора (с учетом существенного увеличения затрат на интеграцию). В настоящий момент сама концепция и экосистема возможных решений Open RAN не достигли еще этого уровня. Однако при правильной организации процессов разработки и внедрения стандартов Open RAN и интересе к этой концепции со стороны глобальных игроков рынка мобильной связи ситуация может существенно поменяться.

Российским производителям надо быть готовыми к такому повороту в строительстве сетей радиодоступа 5G на базе мультивендорных решений и не

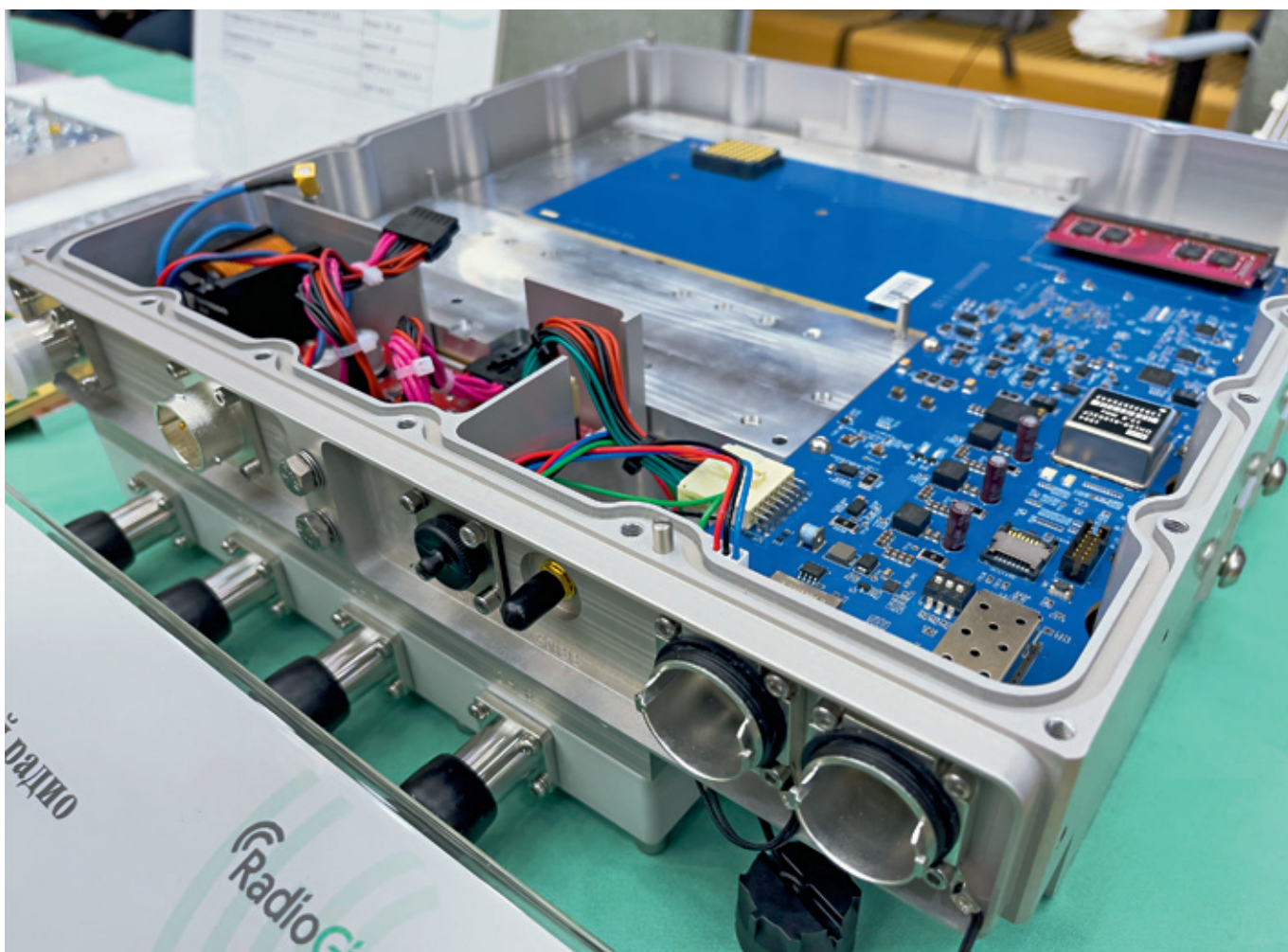


Рис.7. Приемопередающий модуль RU производства компании "Радио Гигабит"

упустить шанса создавать и аппаратное, и программное обеспечение RAN, которое будет совместимо с решениями других поставщиков на базе стандартов O-RAN. Пример Сколтеха и его технологических партнеров показывает, что эта задача вполне по силам отечественным разработчикам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cloud RAN: облачная сеть радиодоступа [Электронный ресурс]. URL: <https://shalaginov.com/2020/05/27/cloud-radio-access-network> (дата обращения: 25.02.2022).
2. Тихвинский В. Архитектура построения и характеристики сетей радиодоступа NG-RAN 5G // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2018. №5. С. 42-51.
3. Богданова Е. Транспортная сеть 5G/IMT-2020 // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2019. №7. С. 40-47.
4. 3GPP Release 15 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.3gpp.org/release-15> (дата обращения: 22.02.2022).
5. O-RAN Alliance [Электронный ресурс]. URL: <https://www.o-ran.org> (дата обращения: 25.02.2022).
6. Трепалина Ю. Рынку Open RAN предсказали стремительный подъем [Электронный ресурс]. URL: <https://nag.ru/news/38951>. (дата обращения: 24.02.2022).
7. Шуб В.Э. Мы создаем российское решение 5G // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2021. №5. С. 8-12.
8. Сколтех и МТС запустили в "Сколково" пилотную зону 5G для перспективных разработок в сфере ИКТ [Электронный ресурс]. URL: <https://www.skoltech.ru/2020/10/skolteh-i-mts-zapustili-v-skolkovo-pilotnuyu-zonu-5g-dlya-perspektivnyh-razrabotok-v-sfere-ikt> (дата обращения: 25.02.2022).
9. МТС испытала 5G-оборудование Open RAN на отечественном ПО [Электронный ресурс]. URL: https://www.cnews.ru/news/line/2021-11-09-mts_ishpytala_5g-oborudovanie (дата обращения: 24.02.2022).