

Транспортная оптическая инфраструктура для 5G



Семен КОГАН,
руководитель отдела подготовки
оптических транспортных решений
и технических предложений,
Nokia Solutions and Networks (NSN)

Эволюция требований к транспортному уровню сети

Функциональность сетей пятого поколения (5G) предусматривает увеличение объема сквозных сервисных соединений более чем в 25 раз, снижение задержки передачи сигналов для сервисных соединений более чем в 25 раз, повышение пропускной способности (производительности) сети более чем в 500 раз по сравнению с сетями 4G (LTE).

Общие требования к транспортному уровню сети мобильной связи 5G можно сформулировать следующим образом:

- высокая пропускная способность;
- малая задержка;
- агрегация пакетного трафика;
- внедрение синхронизации не только по тактовой частоте (SyncE), но и по фазе/времени (IEEE 1588v2);

Сети мобильной связи быстро развиваются от поколения к поколению: от 4G к 4,5G и далее к 5G, причем на каждом этапе это развитие сопровождается для пользователей сети ростом пропускной способности соединений в десять раз, а для провайдеров сетей и услуг – значительным ужесточением требований к характеристикам сети.

- высокие требования к надежности (high resiliency) и качеству предоставления услуг (QoS);
- программируемость (SDN), использование открытых прикладных интерфейсов API для управления мультивендорными программными сервисными приложениями и сетевыми элементами транспортной сети;
- конвергентные IP/OPTICs решения.

Необходимость в трансформации существующего транспортного уровня сети оператора мобильной связи, особенно для сети Anyhaul (Fronthaul – Midhaul – Backhaul), непосредственно следует из следующих изменений характеристик сети:

- сервисные соединения пользователя (пропускная способность) – от 150 Мбит/с до 1–20 Гбит/с;
- плотность сайтов радиодоступа – от 20 до 300 на км²;
- топология сети – от древовидной до полностью ячеистой с использованием IPv6;
- задержка на сервисных соединениях – от 20 до 1 мс;
- синхронизация сайтов радиодоступа – от SyncE к сочетанию SyncE & IEEE1588v2 PTP;
- разделение сети на слои (slicing), ориентированные на различные программные сервисные приложения;
- от классических систем централизованного управления сетью NMS (Network Management System) до программно-определяемых решений для мультивендорных сетей операторского

класса с возможностью реализации сервисов поверх различных слоев сети (SDN/slicing).

Ожидается, что транспортные программно-определяемые решения SDN (Software-Defined Networking) будут готовы к массовому развертыванию в 2021–2022 гг. Планируются полная автоматизация взаимодействий между ЦОД поверх оптических транспортных сетей, а также автоматизация предоставления услуг при взаимодействии между физическими (Physical Network Functions – PNF) и виртуализированными (Virtual Network Functions – VNF) сетевыми объектами, например между физическими и виртуализированными маршрутизаторами, и т. п.

Портфель оптических транспортных продуктов компании NOKIA, ориентированных на сети мобильной связи 5G, представлен на рис. 1.

Новые требования к транспортному уровню сети 5G оператора мобильной связи

Эти требования связаны, с одной стороны, с трансформацией сети, когда функции электронной обработки сигналов будут размещаться не на отдельных базовых станциях, а все больше будут централизовываться и виртуализироваться с размещением их на периферийной облачной сетевой инфраструктуре, а с другой – с обратным процессом, когда



Рис. 1. Портфель оптических транспортных продуктов компании NOKIA, ориентированных на сети мобильной связи 5G

некоторые функции ядра сети переносятся на периферию, ближе к конечным пользователям, чтобы добиться снижения задержек и повышения надежности при предоставлении сервисов.

Для удовлетворения спроса на сценарий с диверсифицированным сервисным обслуживанием транспортный уровень сети 5G должен иметь возможность быстрой настройки и развертывания, а значит, большую гибкость и масштабируемость, в связи с чем особое внимание уделяется развитию следующих оптимизированных по стоимости и характеристикам транспортных решений.

- **Anyhaul (Fronthaul – Midhaul – Backhaul)** – для реализации централизованной сети радиодоступа, обеспечивающей масштабируемый доступ большого количества пользователей, использующих различные приложения (Massive Scale Access – MSA). На этом сетевом уровне обеспечиваются сбор и агрегация трафика от уровня радиодоступа (Radio Access Network – RAN) или других точек доступа до уровня универсального адаптивного ядра (Universal Adaptive Core – UAC) 4G/5G, расположенного в периферийной или центральной облачной инфраструктуре. Эффективные решения Anyhaul особенно

важны при эволюции к облачной инфраструктуре на уровне радиодоступа (Cloud RAN). В решениях для базовых станций Nokia AirScale, например, предусматривается разделение трафика, чтобы обеспечить требуемые характеристики для каждого сервиса. Критичные к задержкам сервисы обрабатываются распределенным блоком управления AirScale DU, подключенным через интерфейс Ethernet и расположенным неподалеку от радиоблоков, а централизованный блок управления AirScale CU, выполняющий функции не в реальном времени, полностью виртуализирован и эффективно исполняет свои функции, располагаясь в удаленном ЦОД, размещенном в облачной инфраструктуре.

- **Cloud Interconnect** – для обеспечения взаимодействия поверх транспортных сетей между распределенными облачными сетевыми образованиями. Это сетевое решение должно обеспечить автоматизированное, безопасное и высокопроизводительное взаимодействие, а также широкое масштабирование взаимосвязей между облачными структурами, сетевыми функциями и службами, разнообразными приложениями и сетью Интернет. Промышленная автоматизация,

массовое внедрение Интернета вещей (IoT) и AR/VR (виртуальная и дополненная реальность) – три основных варианта использования периферийных облачных образований (Edge Cloud) на сети провайдера услуг операторского класса.

Промышленная автоматизация требует времени ожидания 1–5 мс; AR/VR, в свою очередь, сочетает в себе низкие требования к задержке 5–10 мс и высокую пропускную способность, в то время как массовое внедрение функциональности IoT предполагает наличие периферийной облачной инфраструктуры (Edge Cloud) с целью удовлетворить требования по затратам и безопасности.

При использовании облачного радиодоступа (Cloud RAN) предъявляются самые строгие требования к задержке, например до 0,2 мс RTT (Round Time Trip). При этом должна учитываться плотность размещения узлов Edge Cloud на сети.

Облачные структуры могут быть размещены как на сети провайдера услуг операторского класса (Communication Service Providers – CSP), так и на корпоративных сетях.

Готовность транспортного уровня к использованию на сети мобильной связи 5G можно оценить по следующим показателям.

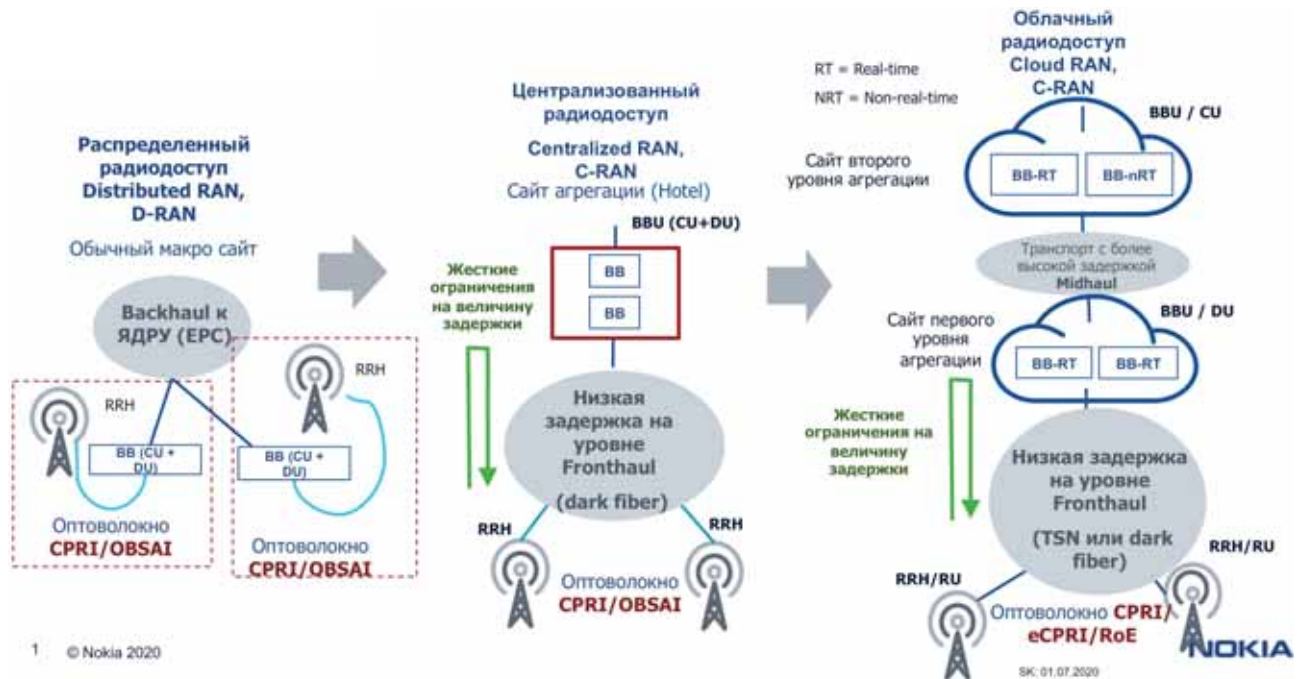


Рис. 2. Эволюция архитектуры радиодоступа от обычного распределенного (Distributed RAN) к централизованному (Centralized RAN) и перспективному облачному (Cloud RAN)

Пропускная способность:

10GE – на уровне 5G RAN Backhaul & Midhaul;
 25GE – на уровне Fronthaul для C-RAN (Centralized RAN & Cloud RAN);
 100GE – для уровней IP/MPLS & Optics Aggregation (MBN) и более для ядра (CORE), а также протяженных магистралей (Backbone).
Задержка:

0,1 мс – на уровне TSN (Time sensitive Networking) Fronthaul network, с учетом необходимости распределения сигналов синхронизации фаза/время;
 1 мс – для периферийных ЦОД;
 10 мс – для централизованных ЦОД.

Обеспечение соединений:

безопасные IP-соединения на ячеистой (mesh) сетевой инфраструктуре; высокие надежность и коэффициент готовности; пакетно-ориентированная синхронизация по тактовой частоте (SynchE) и параметрам фаза/время (IEEE1588v2 PTP).

Автоматизация:

программно-определяемая (SDN) мультивендорная транспортная сеть с прикладными программируемыми интерфейсами API для организации сервисов

с учетом специфики прикладных приложений (service-specific) поверх соответствующих слоев сети (app-driven slices).

Эволюция к сети централизованного и/или облачного радиодоступа C-RAN

Необходимость достижения высокой пропускной способности, спектральной эффективности и снижения величины задержек стимулирует внедрение централизованной и/или облачной архитектуры сети радиодоступа C-RAN. Централизуя функции модуля электронной обработки BBU (Baseband Unit) в архитектуре C-RAN (Cloud-RAN), операторы могут совместно использовать и даже виртуализировать сетевые ресурсы, а также тесно координировать работу больших (макро) и малых (уличных) сот, повышая производительность сети.

В системах 5G функциональность базовой станции (gNB) разделяется в общем случае на три функциональных блока: централизованный (CU), распределенный (DU) и радио (RU), которые

могут быть развернуты в нескольких комбинациях и размещены в разных местах для эффективного предоставления сервисов, требующих малых значений задержек.

Ниже представлены данные по интерфейсам взаимодействия на сетях 4G/5G:

- для сетей 4G (LTE) интерфейсы X2 и S1 определены соответственно как интерфейсы между узлами RAN и между уровнями радиодоступа (RAN) и ядра (Core);
- для сетей 5G определены интерфейсы X2&Xn, S1&NG, F1&E1:
 - кроме интерфейса S1 для взаимодействия между уровнями радиодоступа RAN (ng eNB/gNB) и ядром системы (Core) используется новый интерфейс NG F1;
 - интерфейс NG F1 стандартизирован для обеспечения взаимодействия между DU и CU в NG-RAN (ETSI TS 138 473 V15.2.1 (2018-07); «5G NG-RAN; F1 Application Protocol (F1AP) (3GPP TS 38.473 version 15.2.1 Release 15)»).

Эволюция архитектуры радиодоступа от обычного распределенного (Distributed RAN) к централизованному (Centralized RAN)



Fronthaul FS-LL



Midhaul FS-HL



Backhaul/Backbone



Транспортные интерфейсы	CPRI: статические соединения на фотонном уровне RoE, eCPRI: Ethernet (TSN)	F1 – динамические соединения на уровне Ethernet	S1/NG – динамические взаимодействия IP/Ethernet
Задержка в одном направлении	< 100 мкс (< 50 мкс для RLLC)	< 1 мс	< 10 мс
Синхронизация	По частоте: ITU-T G.8262.1 (SyncE eEEC), IEEE 802.1CM По времени / фазе: IEEE 1588v2, ITU-T G.8275.1, ITU-T G.8273.2 (Class C), IEEE 802.1CM	По частоте: ITU-T G.8262 (SyncE EEC) По времени / фазе: IEEE 1588v2, ITU-T G.8275.1, ITU-T G.8273.2 (Class B)	По частоте: ITU-T G.8262 (SyncE EEC) По времени / фазе: IEEE 1588v2, ITU-T G.8275.1, ITU-T G.8273.2 (Class B)
Типичные клиентские скорости передачи	10 – 25G на каждый радио блок (RU, CPRI/eCPRI)	10G/25G/50G PEthernet	100G/200G PEthernet
Типичные скорости передачи по линии	nx50 Гбит/с на каждый сетевой элемент (NE)	100 Гбит/с	100G/200G
Место размещения	Столб/стойка с дверями (cabinet) / за пределами помещения (outside plant)	СОЦОД (DC) CO-LO	ЦОД (DC)
Node-node connection Конфигурация соединения между узлами	Точка – точка (~20 км)	Точка – много точек (~100 км)	Каждый с каждым соединения в WAN

Таблица 1. Общие требования для транспортной сети уровня Anyhaul 4G/5G
Обозначения: RU – Radio Unit; DU – Distributed Unit; CU – Centralized Unit; FS-HL – Functional Split High Layer; FS-LL – Functional Split Low Layer

и перспективному облачному (Cloud RAN) показана на рис. 2.

Новые транспортные решения имеют следующие отличия:

- традиционный трафик Fronthaul, требующий малой задержки, будет развиваться от протоколов CPRI/OBSAI (Common Public Radio Interface/Open Base Station Architecture Initiative) к пакетно-ориентированному протоколу eCPRI (на основе рекомендации TSN 802.1CM для стандартизованных взаимодействий Fronthaul), передаваемому по коммутируемой пакетной сети Bridged Ethernet;
- использование функциональности mMIMO и возрастающая полоса частот спектра радиодоступа (до сотен МГц) повышают требования к пропускной способности транспорта:
 - до 10G и 25G – для уровней BH (Backhaul) и FS-HL (Functional Split High Layer, Midhaul)
 - от 10G до 25G – на каждый радиоблок RU для FS-LL (Functional Split Low Layer, Fronthaul) eCPRI-сегмента;
- в зонах повышенной плотности нарастает потребность

в агрегации трафика на сайтах или в непосредственной близости от макросайтов до потоков 100G на пакетном уровне или уровне оптической сети.

Общие требования для транспортной сети уровня Anyhaul 4G/5G представлены в табл. 1.

Эволюция протоколов от CPRI к eCPRI на сети радиодоступа C-RAN

Традиционно на транспортном уровне Fronthaul сети централизованного радиодоступа (C-RAN) использовались протоколы CPRI (Common Public Radio Interface) с масштабированием пропускной способности и временным разделением сигналов (BPK/TDM), которые обеспечивают передачу информации о синхронизации в своем составе.

Для улучшения характеристик радиодоступа и повышения эффективности использования пропускной способности транспортной сети на участке Fronthaul (между RU и DU) в системах 5G предлагается вместо традиционного протокола CPRI использовать новый,

пакетно-ориентированный протокол eCPRI (evolved Common Public Radio Interface).

С переходом от CPRI к eCPRI снижаются требования (примерно в десять раз) к пропускной способности соединения на транспортной сети Fronthaul, но, с другой стороны, функция обеспечения синхронизации перестает быть частью протокола взаимодействия и реализуется отдельно от него. Следует также учесть, что, хотя внедрение протокола eCPRI и позволит повысить эффективность использования пропускной способности транспортной сети Fronthaul по сравнению с CPRI, к нему применяются те же жесткие требования по малой задержке, что и для CPRI.

Технология TSN Ethernet для достижения малых задержек на сети Anyhaul/Fronthaul

На уровне Fronthaul транспортных сетей 5G требования к задержке сервисных потоков устанавливаются с учетом:

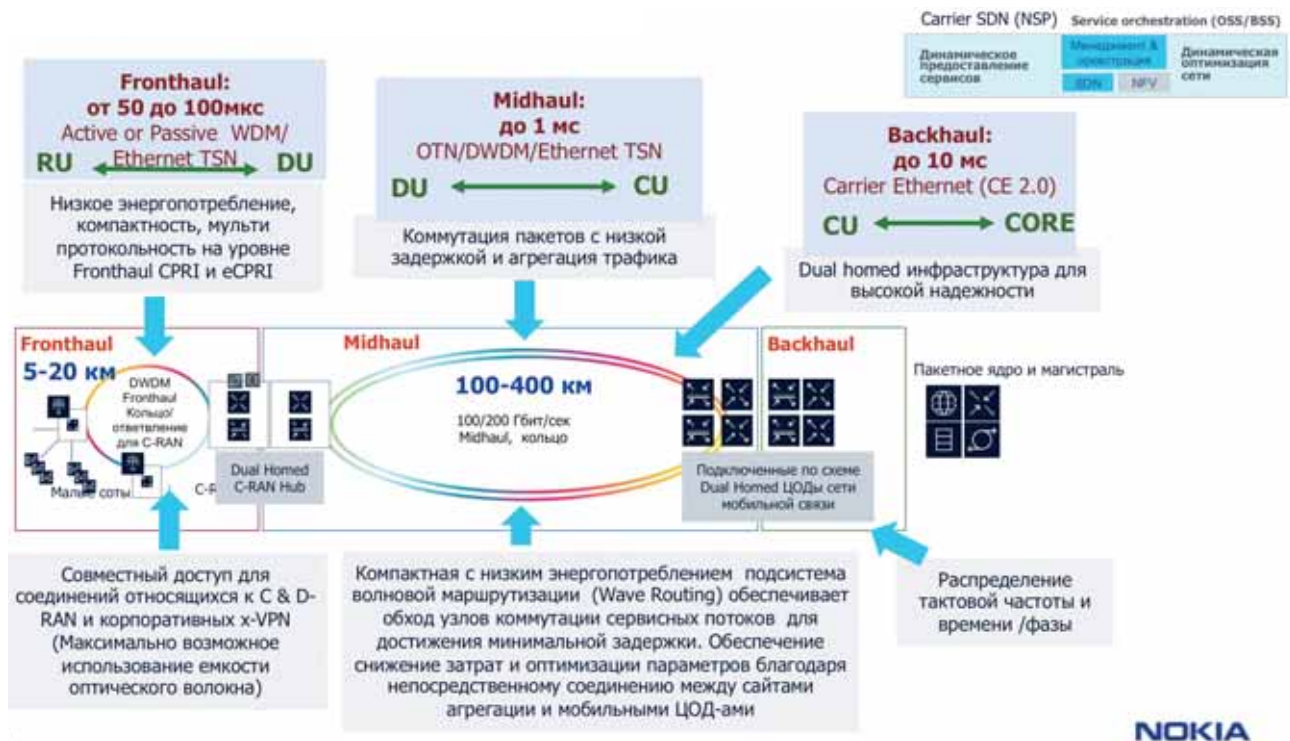


Рис. 3. Функциональное назначение и требования по задержкам на сети Anyhaul 5G

- потребностей используемых приложений;
- сетевых ограничений, связанных с физическим отделением радиоблоков от средств электронной обработки сигналов BBU (в архитектуре Anyhaul разделяется на блоки DU и CU).

Функциональное назначение и требования по задержкам на сети Anyhaul 5G представлены на рис. 3. Решения TSN (Time Sensitive Networking) Ethernet (IEEE 802.1CM)

следует отнести к одной из самых многообещающих новых транспортных технологий Ethernet, разработанных специально для сетей 5G. Внедрение TSN Ethernet позволит удовлетворять требования сети Anyhaul/Fronthaul при совместном использовании (конвергенции) сетей мобильной связи разных поколений, включая требования по пропускной способности и производительности, сверхнизкой задержке, синхронизации,

операционным возможностям и отказоустойчивости. Группа стандартов IEEE 802.1TSN представлена на рис. 4. Стандарт IEEE 802.1CM, относящийся к группе стандартов IEEE 802.1TSN, нацелен на уменьшение задержки сервисных потоков при их агрегации и коммутации в сети FrontHaul. Задержка в агрегации значительна, потому что в узле агрегации циклы (frames) пакетных данных

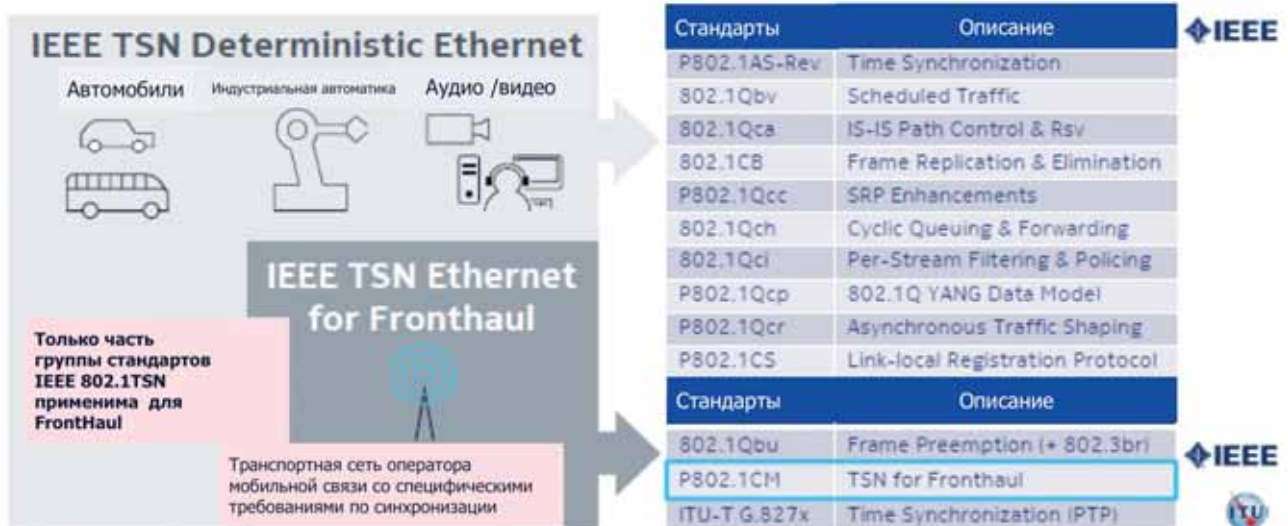


Рис. 4. Группа стандартов IEEE 802.1TSN

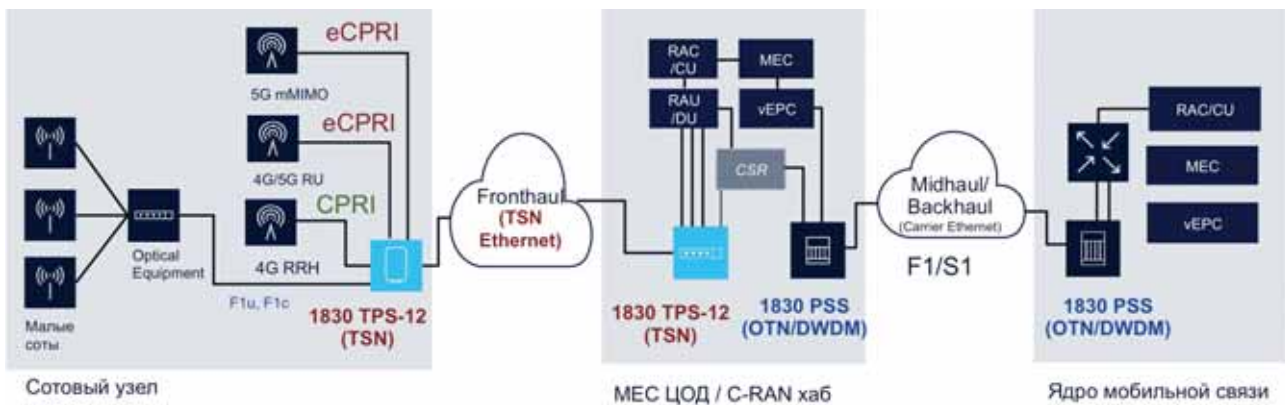


Рис. 5. Пример включения оборудования NOKIA 1830TPS (TSN Ethernet) на уровне Fronthaul и NOKIA 1830PSS (OTN/DWDM) на уровнях Midhaul и Backhaul сети Anyhaul 4G/5G

RAC – Radio Access Controller
RAU - Radio Access Unit

MEC – Multi-access Edge Computing
vEPC - virtual Evolved Packet Core

могут одновременно конкурировать за прохождение одного и того же порта, что приводит к необходимости буферизации (задержке) данных и, как следствие, к динамическому изменению величины задержки при передаче данных.

Профиль А – проблема задержки решается двумя способами. Чувствительный к временным параметрам трафик имеет приоритет над менее чувствительным к временным параметрам трафиком. Последний может быть подан на устройство буферизации, но первый будет передан в приоритетном порядке. Кроме того, в соответствии с профилем А максимальный размер цикла/кадра (frame) Ethernet ограничивается 2000 октетов, чтобы минимизировать время, в течение которого

более чувствительный к временным характеристикам трафик должен будет ожидать своей очереди за менее чувствительным к задержкам трафиком.

Профиль В – добавляется функциональность frame preemption (IEEE 802.3br и 802.1Qbu), позволяющая прервать незавершенную передачу данного цикла для передачи другого цикла, более чувствительного к временным характеристикам. По окончании передачи более чувствительного к временным характеристикам цикла передача менее чувствительного к временным характеристикам цикла возобновляется. Профиль В с прерыванием передачи цикла имеет два преимущества по сравнению с профилем А. Во-первых,

прерывание передачи кадра устраняет необходимость ограничивать размер цикла пакетных данных, применяемый на сети (см. профиль А). Во-вторых, прерывание передачи цикла позволяет ограничить значение задержки, что невозможно реализовать для профиля А. Эта функциональность важна при совместной передаче по сети как сервисов относящихся (например, eCPRI и RoE), так и не относящихся (например, Ethernet VPN) к специфике уровня Fronthaul.

Пример включения оборудования NOKIA 1830TPS (TSN Ethernet) на уровне Fronthaul и NOKIA 1830PSS (OTN/DWDM) на уровнях Midhaul и Backhaul сети Anyhaul 4G/5G представлен на рис. 5.

TPS общие свойства	
Интерфейсы	<ul style="list-style-type: none"> CPRI, OBSAI, eCPRI, Ethernet (F1, S1) От 1 Гбит до 25 Гбит/с на каждого клиента, 100 Гбит/с на линейном окончании
Задержка	<ul style="list-style-type: none"> Задержка в узле с коммутатором TSN < 2 мкс (IEEE 1914.1 NGFI node class A) Задержка в оптическом модуле с учетом FEC (от 0.001 до 3 мкс)
Менеджмент	<ul style="list-style-type: none"> SNMP, CLI, NFM-T ZTP с использованием WaveSuite Commissioning Expert Встроенный в Ethernet VLAN для канала управления Стандартные MIBs и 1830 PSS MIBs 1-Wire менеджмент инвентаризации для управления соседними пассивными устройствами
Сервисы и пересылка кадров (Forwarding)	<ul style="list-style-type: none"> MEF E-Line in R1.0 (E-LAN and E-Tree in future releases) IEEE 1914.3 RoE mapping Forwarding в соответствии с IEEE 802.1CM (forwarding, latency) IEEE 802.1Qbu Frame preemption на основе IEEE 802.3br IET
Синхронизация	<ul style="list-style-type: none"> Синхронизация по частоте (SyncE) в соответствии с IEEE 802.1CM and ITU-T G.8262.1 Время / фаза синхронизация (PTP) в соответствии с IEEE 1588, IEEE 802.1CM, ITU-T G.8275.1, G.8273.2 (Class C) Внутриканальное соединение (in-band) и за пределами полосы передачи оптических каналов (Out-of-band) оптический канал синхронизации OTS 2.0 (двухнаправленный по одному волокну)
Операторского класса OAM	<ul style="list-style-type: none"> Ethernet Service OAM: IEEE 802.1ag, ITU-T Y.1731, MEF17/30.1/35.1 (основано на аппаратных средствах)
Защитное переключение	<ul style="list-style-type: none"> IEEE 802.1AX LAG in R1.0, MC-LAG future ITU-T G.8032 ERP future

Таблица 2. Параметры оборудования NOKIA 1830 Time-sensitive Packet Switch (TPS), соответствующего рекомендациям IEEE802.1CM для TSN Ethernet

Параметры оборудования NOKIA 1830 Time-sensitive Packet Switch (TPS), соответствующего рекомендациям IEEE802.1CM для TSN Ethernet приведены в табл. 2.

Распределение сигналов синхронизации фаза/время поверх транспортной сети

Требования по точности синхронизации фаза/время отличаются для разных систем мобильной связи:

- LTE (FDD) (отсутствуют);
- LTE (TDD) ± 1500 нс;
- LTE-A (MIMO/CoMP) ± 500 нс.

Требования к характеристикам LTE-A находятся в стадии изучения. Значения от 500 нс до 1,5 мкс были упомянуты в документах для некоторых функций LTE-A только для информации. В зависимости от окончательных спецификаций, разрабатываемых в 3GPP, приложения LTE-A могут обрабатываться с различным уровнем точности синхронизации;

- 5G (используются разнообразные алгоритмы MIMO и средства передачи данных) ± 65 нс.

В системах 5G основной акцент делается на распространении сигналов синхронизации фаза/время от первичного источника синхронизации до радиоблоков RU поверх транспортной сети.

Распределение сигналов синхронизации от спутниковых систем GNSS (Global Network Satellite System) может быть рекомендовано только как дополнительное средство повышения надежности системы синхронизации.

В системах 5G в диапазоне радиочастот выше 10 ГГц рекомендуется использовать дуплексную связь с временным разделением (Time Division Duplex – TDD), поскольку в таком случае обеспечивается лучшая пропускная способность при использовании алгоритмов MIMO/формирования луча по сравнению с дуплексной связью с частотным разделением (Frequency Division Duplex – FDD), принятым в системах 4G.

Для функционирования систем TDD синхронизация фаза/время IEEE1588v2 PTP на уровне радиодоступа (Anyhaul) сети 5G становится обязательной.

Параметры сети синхронизации в этой ситуации реализуются в соответствии с рекомендациями IEEE P802.1CM при обязательном наличии сетевой синхронизации по тактовой частоте (SynchE). Относительно пакетных сетей с функциональностью Ethernet Switch рассматриваются следующие три категории требований к синхронизации:

- категория А – максимальная относительная ошибка по времени 60–70 нс;
- категория В – максимальная относительная ошибка по времени 100–200 нс;
- категория С – максимальная абсолютная ошибка по времени 1,1 мкс.

Категории А и В (наиболее строгие) относятся к технологиям радиодоступа при агрегации несущих 4G и 5G на уровне доступа (Radio Access Technologies – RATs), используемым для координации процессов при совместной работе двух радиоблоков RU.

Категория С (наименее строгая) актуальна для технологий радиодоступа (RATs) при использовании функциональности TDD.

В рекомендации МСЭ-Т (ITU-T) G.8273.2 определены разные классы целевых значений точности передачи меток времени (time error accuracy)/целевых рабочих характеристик (performance targets) генераторов меток времени на границах участков телекоммуникационной сети (Telecom Boundary Clocks – T-BC), а также ведомых тактовых генераторов (slave clock), находящихся в составе сетевого оборудования. К ним относятся классы А, В и классы С, D, причем класс А является наименее строгим, а класс D – наиболее строгим.

Для транспортного уровня Fronthaul (на участке между RU и DU) сети 5G необходимо выполнить требования класса С (Transport Boundary Clock – T-BC), предусматривающие точность

передачи меток времени порядка 30 нс. В этом случае будут удовлетворены требования к производительности и пропускной способности радиодоступа (RAN) при передаче новых протоколов eCPRI (evolved Common Public Radio Interface), а также при туннелировании традиционного протокола CPRI (RoE) поверх сети TSN Ethernet.

Многие устаревшие транспортные сети поддерживают только синхронизацию по тактовой частоте и должны быть обновлены для поддержки синхронизации по фазе/времени.

Заключение

Представленные в настоящей статье сведения не исчерпывают всего многообразия решений, востребованных для оптического транспортного уровня сетей мобильной связи пятого поколения. К основным тенденциям развития современных оптических транспортных сетей можно отнести следующие тренды.

Сетевая оптимизация – конвергенция:

- создание единой конвергентной транспортной сети для всех видов услуг и обеспечения программируемости операций и функций сквозь все уровни транспортной сети.

Повышение эффективности – виртуализация:

- абстрактное представление физических сетей с превращением их в многочисленные логические сетевые структуры, удобные как для разделения сети на слои (slicing) и домены, так и для масштабирования услуг и реализации ориентированных на нужды бизнеса операций.

Ускорение предоставления услуг – открытость:

- открытость (open source code) и дезагрегация (disaggregation) транспортной сети, а также использование целевого программного обеспечения (purpose-built software) для упрощения модульного построения конвергентной сети и ускорения предоставления услуг. ■