

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Факультет информационной безопасности

Кафедра инфокоммуникационных технологий

**В. А. Аксёнов**

## **ГЕТЕРОГЕННЫЕ РАДИОСЕТИ МОБИЛЬНОГО И ФИКСИРОВАННОГО ДОСТУПА**

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики  
и радиоэлектроники в качестве учебно-методического пособия  
для специальности 1-45 01 01 «Инфокоммуникационные технологии  
(по направлениям)»*

Минск БГУИР 2023

УДК 621.396.2(076)  
ББК 32.884.1я73  
А42

Рецензенты:

кафедра связи учреждения образования  
«Военная академия Республики Беларусь»  
(протокол № 16 от 21.04.2022);

главный научный сотрудник государственного научного учреждения  
«Объединённый институт проблем информатики  
Национальной академии наук Беларуси»  
доктор технических наук, доцент С. Ф. Липницкий

**Аксёнов, В. А.**

А42 Гетерогенные радиосети мобильного и фиксированного доступа :  
учеб.-метод. пособие / В. А. Аксёнов. – Минск : БГУИР, 2023. – 62 с. : ил.  
ISBN 978-985-543-695-0.

Рассмотрены общие принципы построения гетерогенных сотовых сетей с основными современными радиоинтерфейсами, представлен обзор основных технических средств реализации гетерогенных структур, приведены задания для практической работы студентов.

Предназначено для студентов, изучающих дисциплину «Гетерогенные сети».

**УДК 621.396.2(076)**  
**ББК 32.884.1я73**

**ISBN 978-985-543-695-0**

© Аксёнов В. А., 2023  
© УО «Белорусский государственный  
университет информатики  
и радиоэлектроники», 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
1. Гетерогенные структуры для сотовых сетей с радиointерфейсами поколений 2G–5G. ....	6
1.1. Гетерогенная сеть с интерфейсом 2G F-TDMA .....	6
1.2. Интернет вещей NB-IoT в мультистандартной сети. ....	11
1.3. HetNet на основе системы LTE с интерфейсом OFDMA .....	20
1.4. HetNet для 5G New Radio. ....	29
1.5. Задание для практической работы студентов .....	33
2. Технические решения для реализации гетерогенных сетей .....	36
2.1. Эволюция архитектуры сети радиодоступа RAN. ....	36
2.2. Проектирование fronthaul с интерфейсом CPRI .....	46
2.3. Интегрированный доступ и транспорт IAB для сети 5G .....	54
2.4. Задание для практической работы студентов .....	59
Список использованных источников. ....	60

## ВВЕДЕНИЕ

Приставка «гетеро-» достаточно часто встречается в научно-технической терминологии. Она происходит от греческого слова ἕτερος – иной, различный. Эта приставка, используемая в образовании составных слов, имеет в русском языке синонимы «ино-», «разно-», «различно-».

Практически всегда приставка «гетеро-» употребляется как противоположность приставки «гомо-», происходящей от греческого слова ὁμός – равный, одинаковый, единый, общий, взаимный.

Например, в радиотехнике широко известен термин «гетеродинный приёмник» (англ. heterodyne receiver). Название объясняется тем, что в таком приёмнике на смеситель подаются разные частоты: входной сигнал на частоте радионесущей и опорный сигнал местного генератора с некоторым другим значением частоты. Соответственно в гомодинном приёмнике (англ. homodyne receiver) на смеситель подаётся опорный сигнал с той же частотой, что и у принимаемого радиосигнала, т. е. частоты одинаковы. Напомним, что более популярное название гомодинного приёмника – приёмник с прямым преобразованием частоты.

Применительно к системам в науке широко используется следующая пара понятий с противоположным смыслом: гетерогенная система (от греч. ἕτερος – разный; γένω – рождать) – неоднородная система и гомогенная система (от греч. ὁμός – равный, одинаковый; γένω – рождать) – однородная система.

Что касается радиосетей (систем) подвижной и фиксированной связи, термин «гетерогенная сеть» (англ. Heterogeneous Network, HetNet) в широком смысле может означать использование на одной территории нескольких разных стандартов радиосвязи, различных частотных диапазонов, разных топологий покрытия, разных размеров зон покрытия (сот), применяемых в разных условиях работы (в помещениях или вне их). Даже само понятие подвижности становится неоднородным, т. к. в современных стандартах радиосвязи предусматривается несколько сценариев передвижения радиосредств: Fixed или Stationary – фиксированные, стационарные терминалы; Pedestrian или Nomadic – пешеходные, «кочующие», пользователи; Mobile – быстро передвигающиеся пользователи (до нескольких сотен километров в час).

Однако в мировой практике самой популярной стала интерпретация понятия HetNet в узком смысле, касающаяся особой организации топологии радиопокрытия, когда маленькие соты (англ. Small cells) работают внутри, под покрытием больших сот. Неслучайно в англоязычной литературе термины HetNet и Small cells часто употребляются как синонимы.

Смысл такой топологии поясняется, например, в [1], где указано, что «...небольшие соты, которые порождаются базовыми станциями с очень низким энергопотреблением, переносят полную ёмкость передаваемых данных обычной соты на относительно небольшую площадь». Другими словами, маленькие соты принимают на себя локальные пучности нагрузки внутри большой соты, а также помогают обслуживать абонентов в проблемных местах этой соты: в зонах радиотени, на дальней границе большой соты и т. п.

Но что такое большие и маленькие соты с точки зрения площади покрытия? В [1] уточняется, что топология HetNet включает в себя «...*фемтосоты*, которые покрывают дом, *пикосоты*, которые покрывают предприятие, и *микросоты*, которые покрывают небольшие городские или сельские районы».

В сотовой связи под городской микросотой традиционно понимают соту с радиусом до 1 км. Соответственно, макросота имеет радиус более 1 км.

В настоящем учебно-методическом пособии рассмотрены особенности построения и планирования гетерогенных сетей для поколений сотовых радиоинтерфейсов от 2G до 5G. Кроме того, представлены варианты технических решений и технологий для реализации сетей HetNet.

Для лучшего понимания материала пособия требуются базовые знания относительно принципов сотовой радиосвязи, частотно-территориального планирования сотовых сетей, расчёта бюджета потерь, основ функционирования радиоинтерфейсов всех поколений сотовой связи.

# 1. ГЕТЕРОГЕННЫЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ СОТОВЫХ СЕТЕЙ С РАДИОИНТЕРФЕЙСАМИ ПОКОЛЕНИЙ 2G–5G

## 1.1. Гетерогенная сеть с интерфейсом 2G F-TDMA

Применение в цифровом интерфейсе второго поколения GSM относительно узких радиоканалов в 200 кГц и схемы множественного доступа TDMA на каждом радиоканале позволило обеспечить высокую ёмкость сотовой сети при возможности использования простейшего и эффективного способа разделения сот по частоте. По этой причине более корректно обозначать GSM как стандарт с комбинированным частотно-временным разделением (доступом) абонентов F-TDMA.

Построение гетерогенной структуры в таком случае не представляет особых сложностей: маленькие соты внутри большой соты просто могут использовать разные по частоте радиоканалы. При этом взаимное влияние сот между собой практически будет отсутствовать.

Первой концепцию гетерогенной GSM-сети под названием Hierarchical Cell Structures (HCS) предложила фирма Ericsson [2]. Первоначально предлагалось разделить все соты на три уровня по охвату территории, как это показано на рис. 1.1 [2, с. 229]. Чем больше площадь соты, тем больше номер её уровня в HCS.

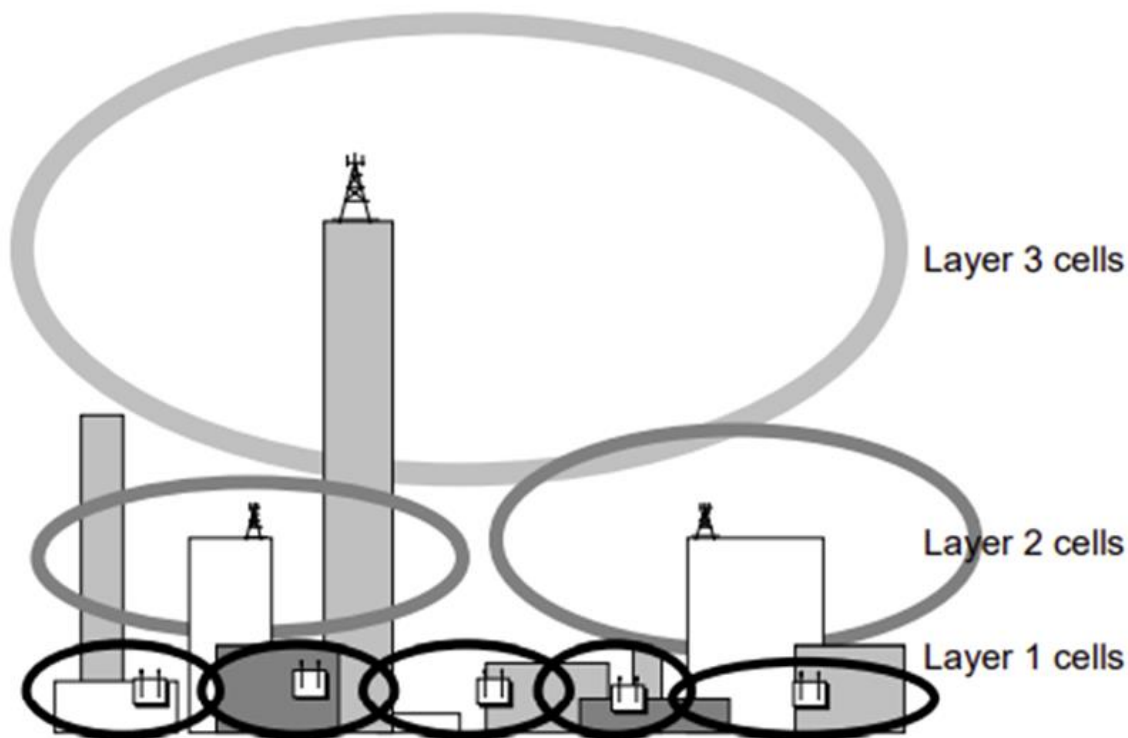


Рис. 1.1. Три уровня сот в гетерогенной сети GSM фирмы Ericsson

По задумке авторов, маленькие соты обеспечивали высокую пропускную способность в точках пучности нагрузки, а более крупные соты в иерархии – их зонтичное покрытие (оригинальный термин Ericsson [2]), чтобы обеспечить доступ абонентов в пробелах покрытия сот нижестоящего уровня.

Различные уровни ячеек можно рассматривать как обозначение приоритета, причём нижний уровень имеет наивысший приоритет. Таким образом, при выборе несущей широковещательного канала BCCH (Broadcast CChannel) мобильная станция (Mobile Station, MS) должна выбирать приемлемый сигнал канала BCCH на как можно более низком уровне. Технология сети HCS позволяла контролируемо перемещаться между слоями сот, облегчая определение размеров и приоритетов.

Вопрос о выборе базовой станции для подключения (процедура Cell search) является важнейшим и общим в технологии гетерогенных сетей для любых радиointерфейсов. Используем рис. 1.2 для пояснения ситуации [3].

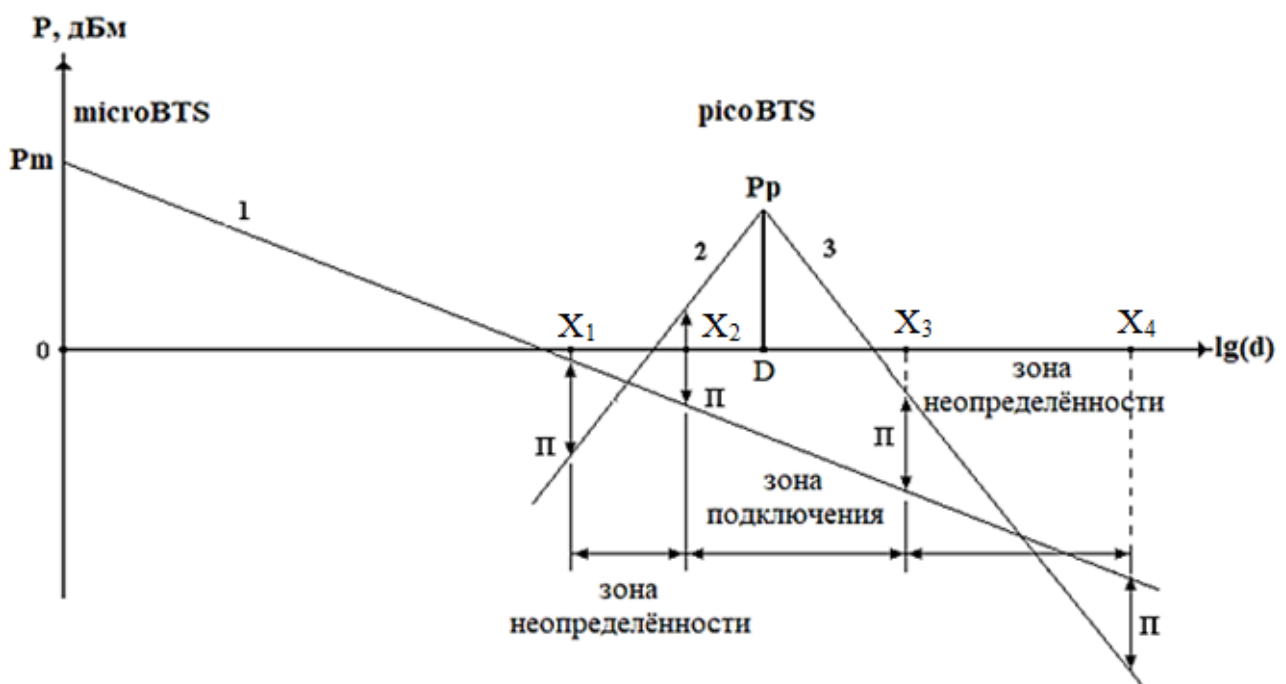


Рис. 1.2. Общий случай распределения мощности сигналов microBTS и picoBTS от расстояния

Во всех сотовых стандартах (а также в транкинговых, в Wireless LAN и т. д.) используется энергетический принцип выбора базы (соты, точки доступа). В GSM он реализуется особенно просто. Каждая базовая станция BTS (Base Transceiver Station) периодически излучает известный всем мобильным станциям сигнал с постоянной мощностью в рамках логического канала FCCH (Frequency Correction CChannel), входящего в более крупный логический канал BCCH.

Излучение FCCN в каждой соте происходит только на одном радиоканале, в нулевом тайм-слоте кадра TDMA. MS сканирует радиоканалы, обнаруживает сигналы FCCN на разных частотах (от разных сот), измеряет их уровень и для дальнейшего взаимодействия выбирает соту (базу), от которой обнаружен наиболее мощный сигнал. Физический смысл такого алгоритма достаточно логичен: наиболее мощный сигнал будет принят от самой близкой по расположению соты (базы).

Как показано на рис. 1.2, microBTS излучает сигнал канала FCCN с уровнем мощности  $P_m$ . При логарифмической оси по дистанции принимаемое значение мощности канала FCCN будет линейно спадать по функции 1, определяемой, например, моделью Хата для городской застройки или иного ландшафта.

Расположенная на удалении  $D$  (если более точно,  $Ig(D)$ ) малая picoBTS будет излучать всенаправленной антенной свой канал FCCN с уровнем мощности  $P_p$ . Спад этой мощности будет происходить по той же модели, но с большей крутизной из-за меньшей высоты установки антенны этой базы (прямые 2 и 3).

Прямые 1, 2 и 3 соответствуют среднему (медианному) уровню мощности принимаемого сигнала. Наличие замираний сигнала в радиоканале требует от MS выполнять накопление и усреднение результатов измерений уровней канала FCCN от разных источников. Выбор той или иной базы будет происходить, если результат измерений двух сигналов будет отличаться на некоторый порог  $\Pi$ . Как видно из рис. 1.2, это приведёт к формированию следующих областей в гетерогенном покрытии:

- от microBTS до точки  $X_1$  и от точки  $X_4$  до границы соты все MS будут однозначно парковаться на эту microBTS;
- от точки  $X_2$  до точки  $X_3$  все MS будут парковаться на малую picoBTS;
- на интервалах от  $X_1$  до  $X_2$  и от  $X_3$  до  $X_4$  возникнет неопределённая ситуация, когда одна часть MS будет переходить на обслуживание к microBTS, а другая – к picoBTS.

Изменение высоты установки антенны picoBTS (что эквивалентно изменению крутизны спада прямых 2 и 3), изменение уровня мощности излучаемого ей канала FCCN и изменение порога  $\Pi$  принятия решения о выборе базы могут привести к заметному перераспределению обслуживаемых абонентов и заметному изменению формы и площади зон ответственности баз. Последнее обстоятельство качественно показано на рис. 1.3 для секторной микросоты [3].



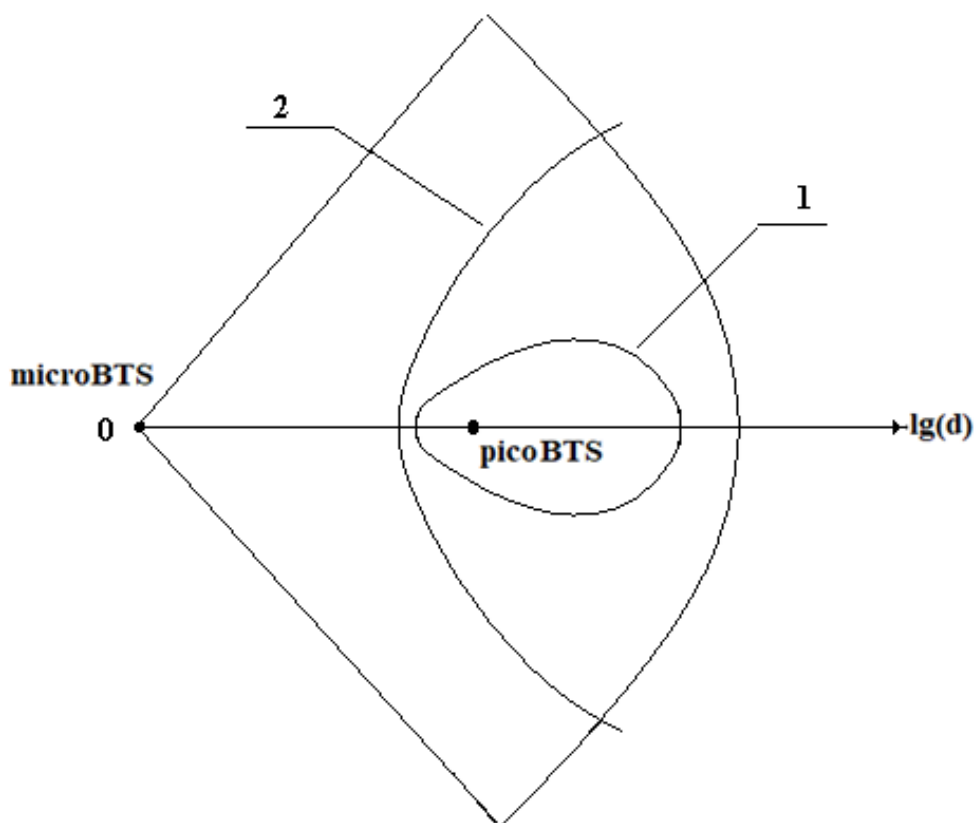


Рис. 1.3. Варианты формы зоны обслуживания picoBTS  
внутри секторной соты microBTS:

- 1 – зона обслуживания при малой высоте установки антенны picoBTS;
- 2 – зона обслуживания при большой высоте установки антенны picoBTS

Подчеркнём, что полученные результаты применимы для всех известных радиointерфейсов сотовой связи. От стандарта к стандарту меняются только названия сигналов для выбора баз (пилотный сигнал, бикон и т. п.) и способ разделения сот (по частоте, по коду, по временному сдвигу процессов и т. п.).

После выбора кандидата на подключение по вышеописанному алгоритму MS синхронизируется с базой и начинает читать её инструкции в рамках логического канала BCCH. Именно на этом этапе можно промаркировать соты в гетерогенной сети в соответствии с их принадлежностью к тому или иному уровню, как это было сделано в HCS-системе Ericsson. Это очень важно, например, для быстро движущихся MS. Для них может оказаться нецелесообразным использовать самый нижний уровень, поскольку будет происходить много хендверов. В этом случае HCS-система Ericsson должна была передавать вызов на более высокий уровень, чтобы снизить потенциальное количество хендверов.

Ещё одним решением для повышения пропускной способности сотовой сети GSM без повышения плотности базовых станций была концепция Ericsson с оригинальным названием Overlaid/Underlaid Subcells, что можно перевести как «наложенные друг на друга субсоты» [2]. По сути, это решение, намного опередившее своё время, в дальнейшем стало использоваться в сотовых системах с OFDM (4G LTE и 5G NR) под названием «фракциональное частотное планирование».

В рамках концепции Overlaid/Underlaid Subcells предполагалось, что набор каналов в базовой станции BTS назначается для передачи с разным уровнем мощности. Каналы для организации меньшей по размеру Overlaid Subcell передавались с меньшим уровнем мощности, а каналы для большей по размеру Underlaid Subcell излучались с большим уровнем мощности, как это показано на рис. 1.4.

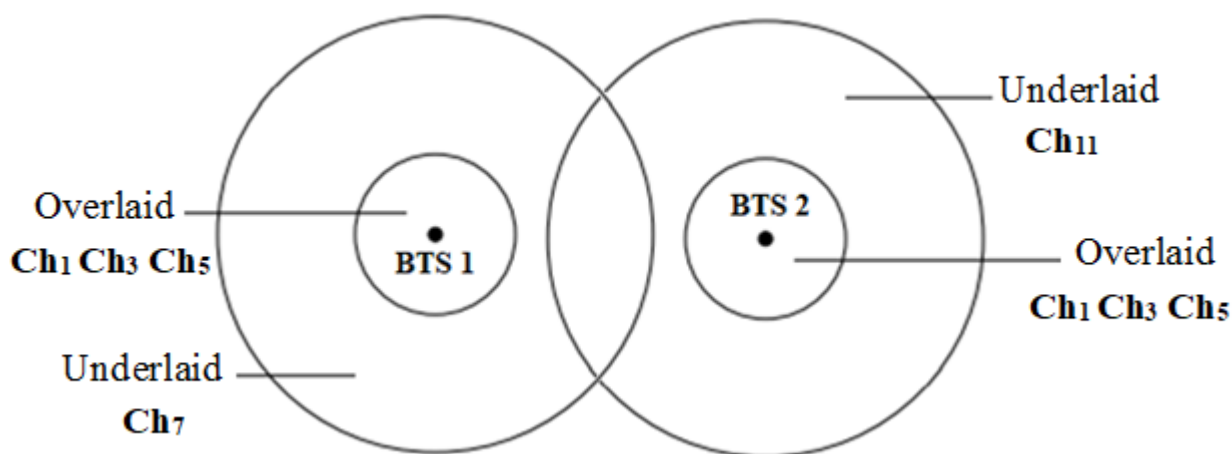


Рис. 1.4. Организация радиопокрытия в сети GSM по схеме Overlaid/Underlaid Subcells от фирмы Ericsson

Эта особенность радиопокрытия позволяет применить два разных шаблона повторного использования частот. В больших и взаимно перекрывающихся Underlaid Subcells необходимо использовать разные радиоканалы в рамках стандартных кластеров GSM. Например, это каналы Ch<sub>7</sub> и Ch<sub>11</sub> (см. рис. 1.4). А для малых и неперекрывающихся Overlaid Subcells соседних BTS можно использовать вообще одни и те же каналы (это каналы Ch<sub>1</sub>, Ch<sub>3</sub>, Ch<sub>5</sub> на рис. 1.4). В результате для каналов Overlaid Subcells может быть достигнут коэффициент переиспользования частот, равный 1, не достижимый в общем случае для систем с частотным разделением сот. Соответственно, в целом для сети происходит повышение эффективности использования спектра. При удачном выборе мест расположения BTS в точках пучности нагрузки (вокзалы и привокзальные площади, торговые центры, рынки и т. п.) решение по схеме Overlaid/Underlaid

Subcells будет оптимальнее в сравнении с равномерным распределением всех каналов по территории большой соты. Кроме того, в случае перегрузки дальней области для её обслуживания могут быть выделены каналы (канал) из ближней области путём повышения их мощности трансляции. Но при этом следует избегать использования одинаковых по номеру каналов для предотвращения интерференции на границе больших сот. Как видно, речь идёт о прообразе межсотовой координации по использованию спектра. Подобная процедура действительно была введена в дальнейшем для сетей 4G LTE.

Основным недостатком разделения большой соты на дальнюю и ближнюю области можно считать необходимость передавать два служебных канала ВССН на двух разных каналах: один на канале для дальней зоны, другой на одном из каналов ближней зоны. Только такое решение гарантирует однозначную парковку MS в «правильную» часть соты. Но это будет означать, что BTS порождает две совершенно автономные соты, т. к. в GSM каждый логический канал сигнализации ВССН переносит уникальный номер для сот.

Использование для трансляции сигнализации ВССН только одного канала для дальней зоны возможно, но будет вызывать замедление подключения всех MS к BTS и ошибки в парковке MS на ближнюю и дальнюю области.

В результате из-за необходимости заметного усложнения программного обеспечения для BTS и всей радиосистемы GSM в целом рассмотренная выше технология Overlaid/Underlaid Subcells фирмы Ericsson не получила широкого распространения у сотовых операторов.

## **1.2. Интернет вещей NB-IoT в мультистандартной сети**

Интересным примером гетерогенного построения сотовых сетей с разделением области покрытия на ближнюю и дальнюю зоны может служить совместное использование в диапазоне 900 МГц технологии U-900 (3G UMTS с радиоинтерфейсом WCDMA), узкополосного интернета вещей NB-IoT (Narrow Band Internet of Things) и технологии предыдущего поколения 2G GSM. Отметим, что технология NB-IoT использует для передачи элементы интерфейса LTE и поэтому может быть отнесена к поколению 4G. Однако, делая акцент на очевидной специфике этой технологии и более позднем времени её внедрения на сетях в сравнении с LTE, ряд авторов относят NB-IoT к технологии поколения 5G.

Рассмотрим проблему функционирования вышеописанной мультистандартной сотовой сети на примере результатов из [4, 5], полученных в сотрудничестве с сотовым оператором A1.

Для радиосетей WCDMA известен эффект зашумления пилотных сигналов, особых служебных сигналов, передаваемых только в DL и служащих для выбора соты, ее индивидуализации, первичной синхронизации в соте и т. д. В описываемой системе передача пилотных сигналов происходит в рамках физического канала Common Pilot Channel (CPICH). Протокол парковки терминала на соту всегда начинается с поиска, приема и правильной интерпретации этих сигналов. К сожалению, интерференция из соседних сот, работающих на том же радиоканале (коэффициент переиспользования частот для WCDMA равен 1) и с такими же по структуре пилотными сигналами, может сделать невозможным их корректный прием и подключение мобильного терминала к данной соте. Положение ухудшается для U-900, где из-за дальнего прохождения радиоволн сравнительно низкочастотного диапазона 900 МГц образуются помехи не только от соседней соты, но и от других более далёких сот сети.

Опыт эксплуатации сотовых радиосетей показал, что эффективным средством борьбы с зашумлением пилотных сигналов может быть увеличение угла наклона диаграммы направленности (ДН) антенны базовой станции в вертикальной плоскости. Под углом наклона понимают угол между горизонталью и направлением максимального значения ДН в вертикальной плоскости.

Можно ожидать, что большой угол наклона для U-900 будет сильно снижать уровень дальней интерференции в радиосети, в определенной мере снижать интерференцию с соседней сотой, но, к сожалению, будет снижаться уровень сигнала (и отношение сигнал/шум) в приграничной области соты, что ведёт к потере её пропускной способности.

Наклон может быть реализован механическим способом (Mechanical DownTilt, MDT), фиксированным электрическим (Electrical DownTilt, EDT), переменным электрическим (Variable Electrical Tilt, VET), электрическим с дистанционным управлением (Remote Electrical Tilt, RET) и плавно регулируемым электрическим наклоном (Continuously Adjustable Electrical DownTilt, CAEDT) с точностью лучше половины градуса.

В практике сотовой связи известны следующие подходы к выбору угла наклона главного лепестка ДН по вертикали (рис. 1.5). При геометрии соты с высотой подвеса антенны базовой станции  $H_{bts}$ , расстоянием (радиусом)  $R$  от антенны до границы соты, понимаемой как граница по разделению обслуживаемого трафика, образуется угол  $\theta_{geo}$  между горизонталью и линией (AB) визирования антенны на границу соты. Значение угла  $\theta_{geo}$  равно

$$\theta_{geo} = \arctg\left(\frac{H_{bts} - H_{ms}}{R}\right), \quad (1.1)$$

где  $H_{ms}$  – высота расположения антенны мобильного терминала, обычно принимаемая за 1,5 м (для упрощения на рис. 1.5 это значение принято за 0 м).

Выбор этого угла для наклона ДН имеет хорошее обоснование, т. к. при нём максимум лепестка ДН направлен в самый удалённый участок соты, на её границу.

Для минимизации интерференции в соседнюю соту (соты) угол наклона, как правило, увеличивают. Имеется вариант наклона на угол  $\nu_{geo}$ , который больше  $\theta_{geo}$  на половину ширины лепестка ДН  $\theta_{bw}$ :

$$\nu_{geo} = \theta_{geo} + \frac{\theta_{bw}}{2}. \quad (1.2)$$

При этом на границу соты наводят линию (АЕВ), проходящую через точку Е в верхней части главного лепестка со спадом  $-3$  дБ. Именно такой вариант используют для U-900 на сети оператора А1 в Республике Беларусь.

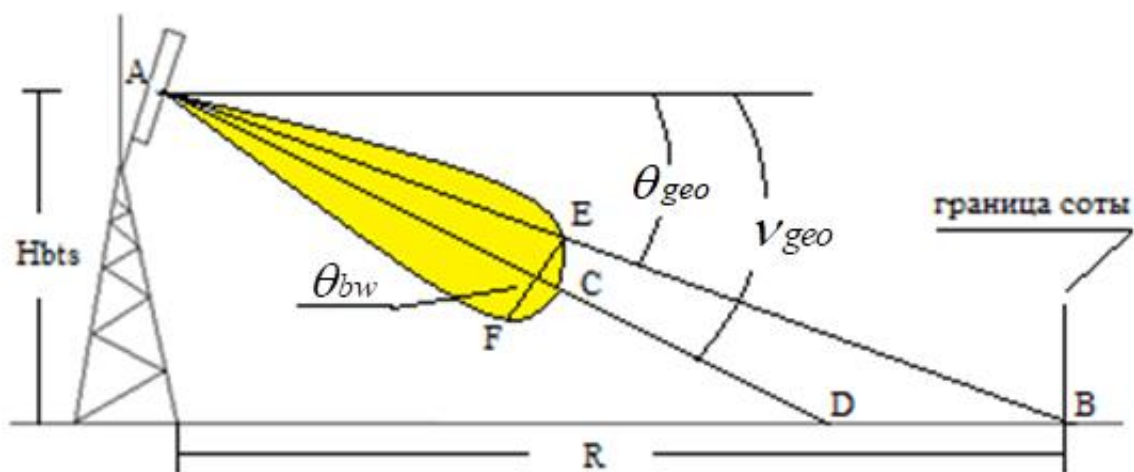


Рис. 1.5. Иллюстрация вариантов угла наклона лепестка ДН антенны в вертикальной плоскости

На основе моделирования сети для макросот WCDMA с радиусом 1500 м и более было предложено ещё одно соотношение для оптимального по пропускной способности угла наклона:

$$V_{opt} = 3 \left[ \ln(Hbts) - R^{0.8} \right] \lg(\theta_{bw}). \quad (1.3)$$

Используя (1.2) и (1.3), можно получить зависимость соответствующих углов наклона от радиуса соты, показанную на рис. 1.6. При вычислениях использовались высоты подъёма антенн 30 и 1,5 м, ширина ДН  $10^\circ$ . Как видно, на наиболее актуальном для города интервале радиусов от 500 до 1500 м выражение (1.2) даёт меньшее значение угла наклона, хотя отличие от (1.3) не превышает одного градуса.

Основная особенность узкополосного интернета вещей NB-IoT с точки зрения радиопокрытия – заметно больший радиус зоны обслуживания базовой станции данной технологии в сравнении с U-900. Это обусловлено следующими основными факторами.

Во-первых, терминал NB-IoT создаёт крайне низкий трафик, что позволяет базовой станции обслуживать тысячи терминалов в соте. Например, в сети NB-IoT оператора А1 был заложен показатель 10 000 терминалов на типовой сайт из трёх секторных сот.

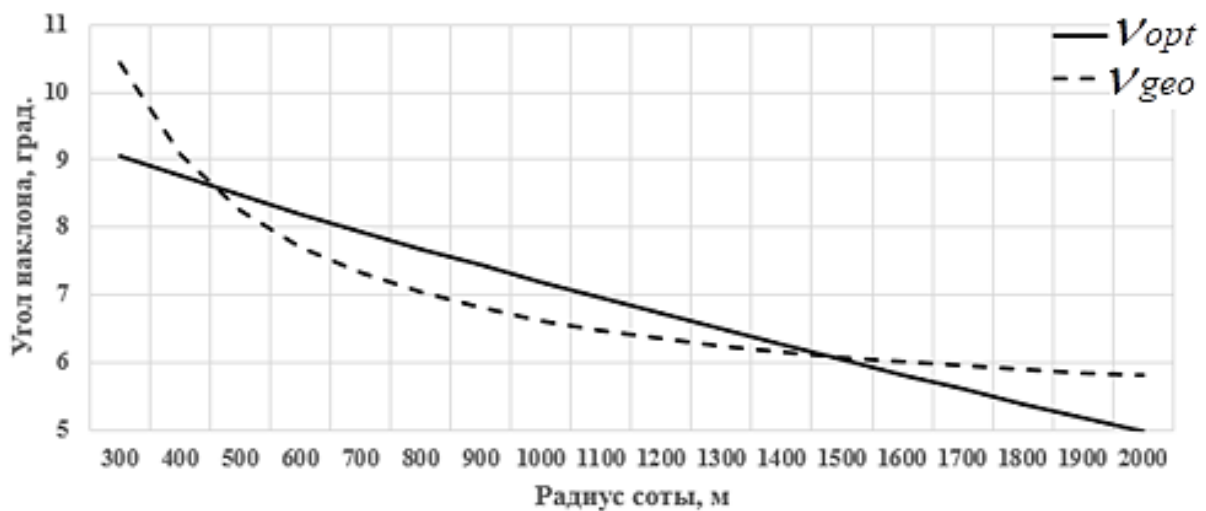


Рис. 1.6. Зависимость углов наклона ДН антенны по вертикали от радиуса соты

Во-вторых, эффективная чувствительность терминалов NB-IoT, закладываемая в расчёт дальности по DL/UL, обычно составляет  $-130 \dots -138$  дБм. Это на 20–28 дБ лучше, чем у сотовых терминалов других технологий.

В-третьих, пиковая мощность излучения терминалов NB-IoT достигает 23 дБм, что сопоставимо с аналогичным показателем терминалов других технологий.

И наконец, оператор сотовой связи платит за разрешение на эксплуатацию технологии NB-IoT на каждой задействованной базовой станции и его устраивает тот факт, что для сети с той же площадью покрытия можно использовать лишь отдельные существующие базовые станции.

В результате сегодня в сети NB-IoT оператора A1 радиус сот составляет около 1200 м, а сот U-900 – только 500 м. Возникает гетерогенная структура, показанная на рис. 1.7, в которой несколько обычных сот U-900 накрываются заметно более крупной сотой NB-IoT.

Сказанное выше об оптимальном угле наклона ДН справедливо и для сот NB-IoT. Однако если в (1.1)–(1.3) подставить в два с половиной раза больший радиус, то, естественно, получим заметно меньшие значения соответствующих углов. Налицо техническое противоречие: для оптимизации покрытия под U-900 главный лепесток ДН антенн желательно опустить вниз, а для NB-IoT его желательно поднять вверх.

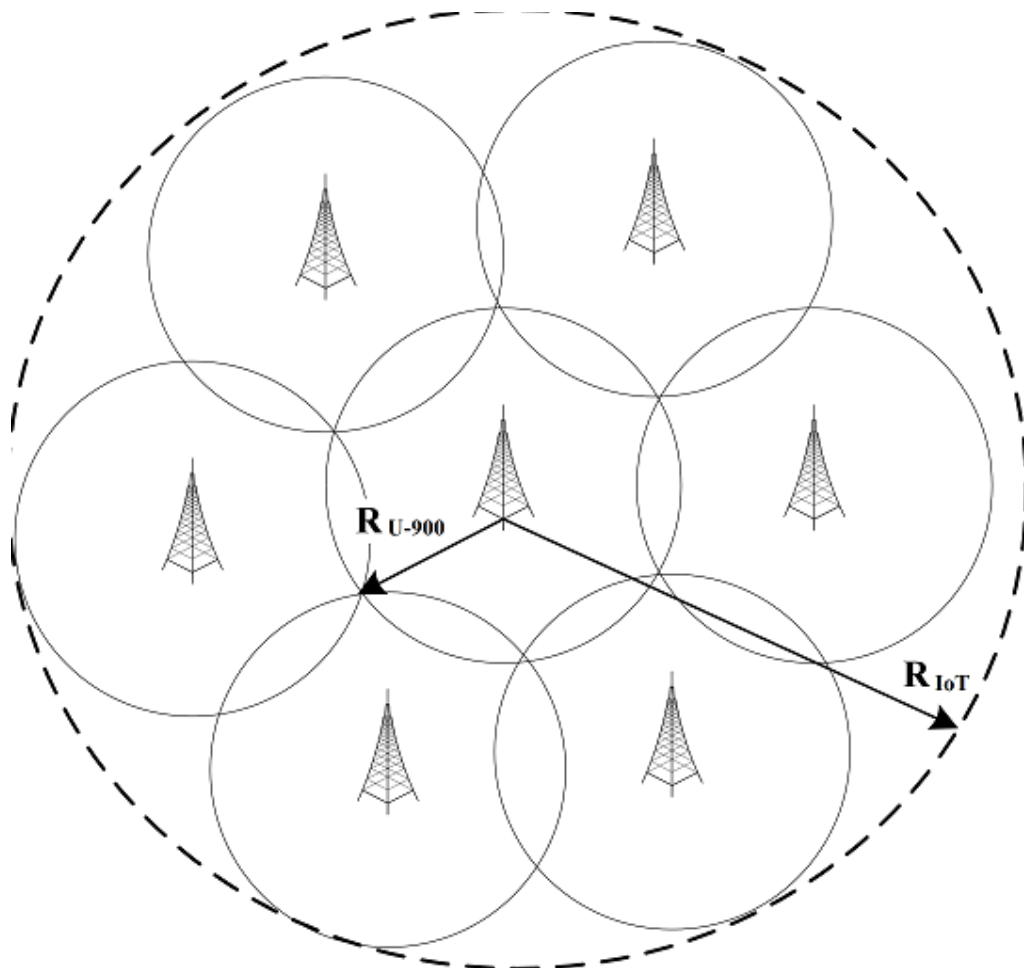


Рис. 1.7. Соотношение радиусов покрытия соты интернета вещей NB-IoT и сот U-900

Хорошим выходом из сложившегося противоречия – и к этому склоняются ведущие производители антенной техники – может быть так называемая вертикальная секторизация соты, т. е. использование панельных антенн с двумя самостоятельными главными лепестками ДН в вертикальной плоскости, имеющими разный наклон и передающими сигналы для разных стандартов сотовой связи, как показано на рис. 1.8.

По технической реализации это могут быть две антенны, каждая со своим EDT (или RET), помещённые в один корпус. Можно использовать две отдельные панельные антенны с разными углами наклона методом MDT и установить их рядом.

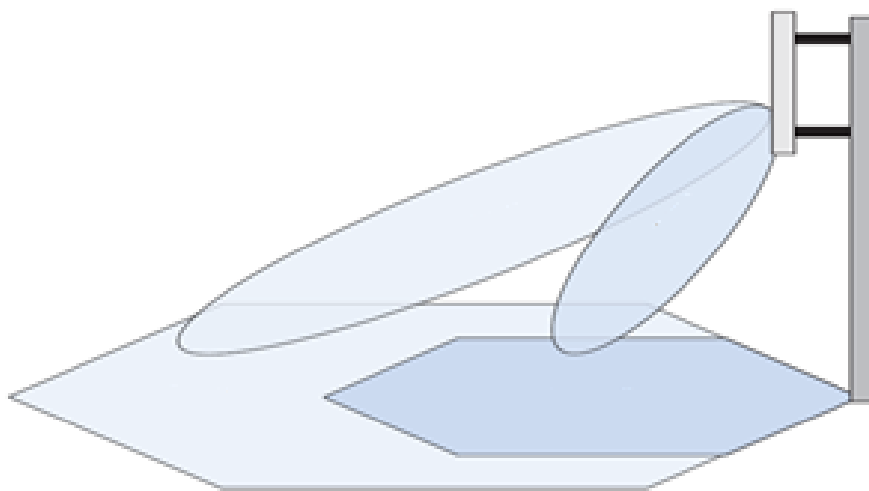


Рис. 1.8. Применение ДН антенны с двумя лепестками в вертикальной плоскости

Экономически такая антенная система будет на порядок дешевле смарт-антенны с цифровым синтезом многолепестковой ДН.

Для оценки целесообразности применения двухлепестковой антенны было выполнено математическое моделирование. В расчётах использовались данные по 15 диаграммам направленности для антенны Huawei ADU4515R5v06 на частоте 960 МГц. Указанная антенна может формировать два самостоятельно управляемых электрическим способом лепестка в вертикальной плоскости с шириной  $12,36^\circ$  и общим коэффициентом усиления от 11,97 до 12,32 дБ в зависимости от угла наклона. Диаграммы соответствовали углам EDT от  $0$  до  $14^\circ$  с шагом  $1^\circ$ .

Для сравнения были выполнены расчёты для простой антенны KATHREIN с заметно меньшей шириной ДН по вертикали  $9,5^\circ$ .



Для оценки уровня принимаемого сигнала по глубине соты при механическом наклоне ДН на угол  $V_{geo}$  использовались данные ДН с нулевым углом EDT и следующие геометрические построения, показанные на рис. 1.9.

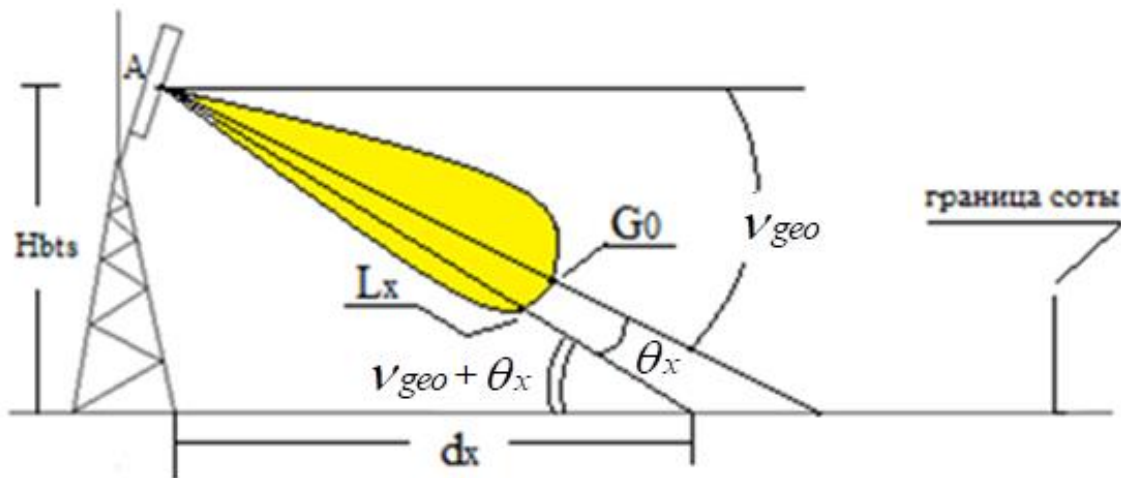


Рис. 1.9. Геометрическая модель для расчёта уровня сигнала

Измеренные значения ДН предоставляются производителями антенн в виде табличных файлов с шагом по углу в  $1^\circ$  от 0 до  $359^\circ$ . При этом максимальное значение ДН принимается за 0 дБ, а остальные точки имеют смысл потерь в децибелах от коэффициента усиления антенны  $G_0$ . При моделировании удобно брать угол  $\theta_x$  по ДН и пересчитывать его в расстояние  $dx$ .

Тогда принимаемый на расстоянии  $dx$  сигнал будет равен

$$Pr(dx) = Pt + G_0 - L_x(\theta_x) - L_p(dx), \quad (1.4)$$

где  $Pr(dx)$  – принимаемая мощность (дБм) на расстоянии  $dx$  (км) под углом вертикальной диаграммы направленности  $\theta_x$ ;  $Pt$  – передаваемая антенной мощность (использовалось значение 44 дБм или 25 В);  $G_0$  – коэффициент усиления антенны;  $L_x(\theta_x)$  – значение потерь (дБ) в диаграмме направленности для угла  $\theta_x$ , отсчитанного от направления максимального излучения;  $L_p(dx)$  – потери (дБ) при распространении на расстояние  $dx$  под углом диаграммы направленности  $\theta_x$ .

При моделировании использовалась модель Хата для условий городской застройки. При значении частоты 900 МГц, высоты подъёма антенны базовой

станции 30 м и антенны мобильного терминала 1,5 м выражение для модели Хата преобразуется к виду

$$L_p(dx) = 126,44 + 35,22 \lg(dx) . \quad (1.5)$$

Как видно из рис. 1.9, для угла передачи  $\theta_x$  расстояние  $dx$  (км) будет равно

$$dx = \frac{(H_{bts} - H_{ms}) \cdot 0,001}{\text{tg}(V_{\text{geo}} \pm \theta_x)} . \quad (1.6)$$

После подстановки (1.6) в (1.5) и преобразования логарифма отношения в разность логарифмов получим

$$L_p(dx) \equiv L_p(\theta_x) = 71,84 - 35,22 \lg(\text{tg}(V_{\text{geo}} \pm \theta_x)) . \quad (1.7)$$

При моделировании электрического наклона использовались соответствующие ДН для разных углов EDT. Представленные выше соотношения сохраняют справедливость, но угол  $V_{\text{geo}}$  приравнивается нулю, а угол  $\theta_x$  должен выбираться больше нуля.

На рис. 1.10–1.11 графически представлены результаты вычислений для механического наклона ДН на 7 и 9°, которые близки  $V_{\text{geo}}$  для соты 1200 и 500 м соответственно, а также на максимальный угол 14°. Аналогичные вычисления для электрического наклона ДН дали практически совпадающие результаты и здесь не приводятся.

Моделирование показало, что вертикальная секторизация для решения поставленной проблемы имеет смысл только при использовании достаточно узких лепестков ДН в вертикальной плоскости (менее 10°) или существенно разного наклона лепестков, численно близкого к ширине ДН. Применение широких лепестков (более 10°) с незначительной разницей в наклоне не даёт преимуществ в сравнении с использованием однолепестковой антенны с той же шириной диаграммы.

Вариант вертикального разделения гетерогенного покрытия при наличии больших и малых сот одного стандарта радиосвязи также представляет интерес. Такой вариант обсуждается, например, в [6, subchap. 9.3].

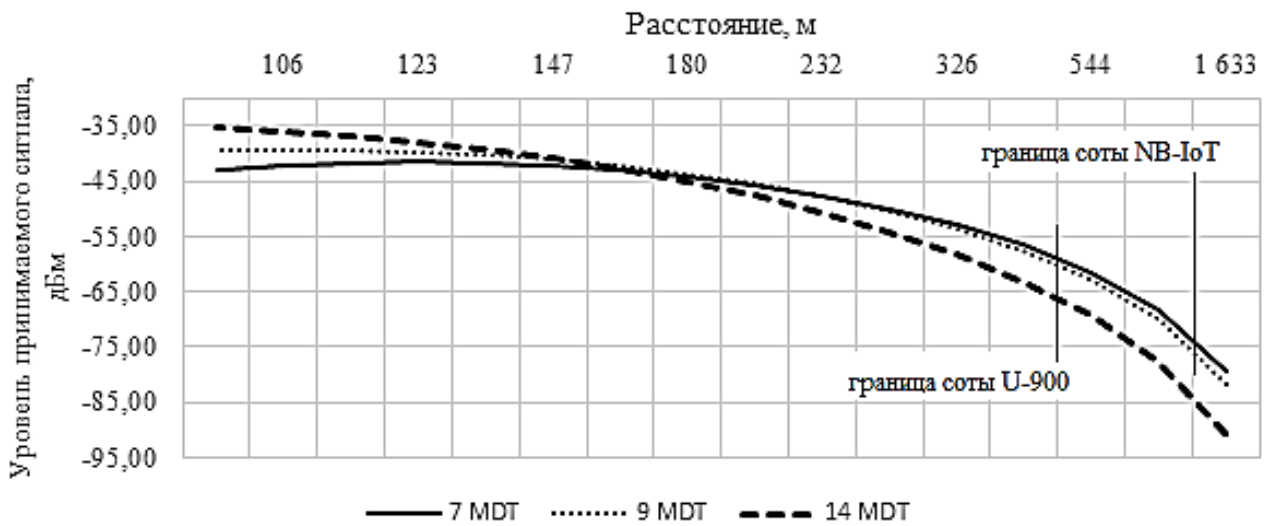


Рис. 1.10. Результаты распределения уровня принимаемого сигнала по дальности для антенны Huawei ADU4515R5v06 с шириной ДН по вертикали 12,36°

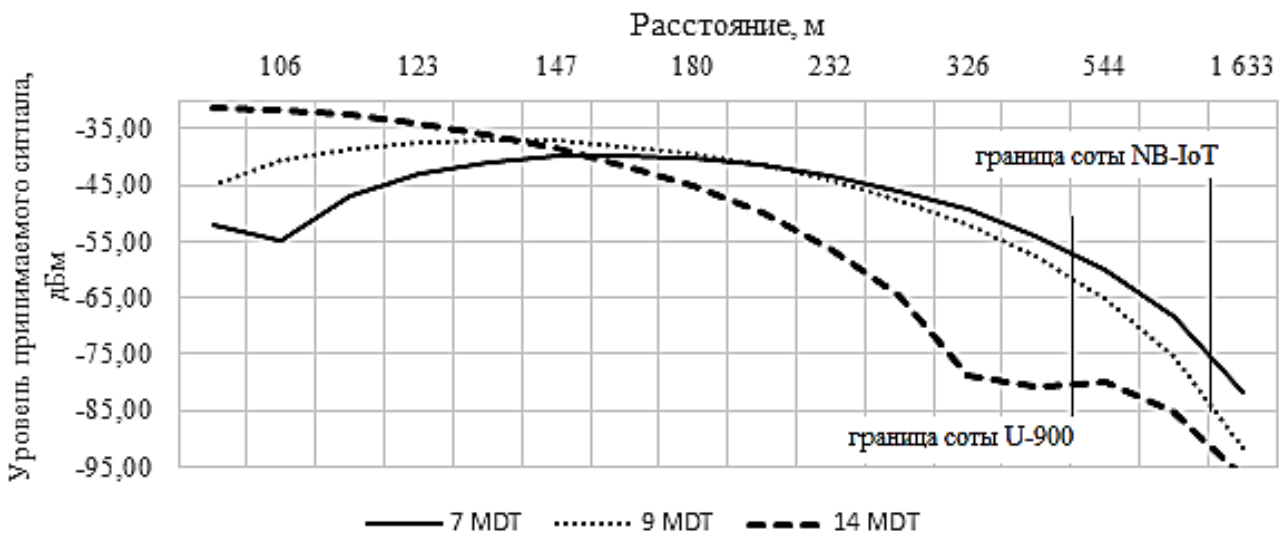


Рис. 1.11. Результаты распределения уровня принимаемого сигнала по дальности для антенны KATHREIN с шириной ДН по вертикали 9,5°

### 1.3. HetNet на основе системы LTE с интерфейсом OFDMA

Увеличение пропускной способности сотовой сети в стандарте 4G LTE изначально достигалось за счёт нового радиочастотного спектра (расширение полос радиоканалов), добавления многоантенных методов передачи MIMO и реализации более эффективных схем модуляции и кодирования. Однако одних этих мер оказалось недостаточно в наиболее загруженных средах и на краях больших сот.

Одним из способов повышения пропускной способности существующей сотовой сети при сохранении её как однородной сети является её уплотнение путём добавления большего количества секторов на каждый eNB (evolved Node Base – стандартизованное название базовых станций в LTE) или развёртывания большего количества eNB. Однако сокращение расстояния между сайтами в городской сети может быть достигнуто только до определённой степени, потому что поиск новых мест для установки больших сайтов становится все труднее и дороже, особенно в центрах городов. К тому же при работе на относительно низких частотах (известны сети LTE даже на частоте 450 МГц) возникает сильная дальняя интерференция в радиосети при повышении плотности обычных баз.

Как указано в [7], по этой причине операторы переходят на гетерогенный вариант развития сети – HetNet путём введения в большие соты малых сот под управлением базовых станций с низким энергопотреблением HeNB (Home eNB), или ретрансляционных узлов RN (Relay Nodes), или удалённых радиотрансиверов RRH/RRU (Remote Radio Head/Unit).

Маленькие соты в первую очередь добавляются для увеличения пропускной способности в «горячих точках» и для заполнения областей, не охваченных макросетью, как на улице, так и в помещении. Они также улучшают производительность сети и качество обслуживания за счёт разгрузки больших сот. В результате, как показано на рис. 1.12, получается гетерогенная сеть с большими сотами в сочетании с малыми сотами, обеспечивающими повышенную скорость передачи данных на единицу площади.

Большие и малые соты в LTE, как и в GSM, могут быть разделены за счёт использования разных частот. Однако сети LTE в основном используют одну и ту же частоту (радиоканал) в соседних сотах для максимального использования лицензированной полосы спектра.

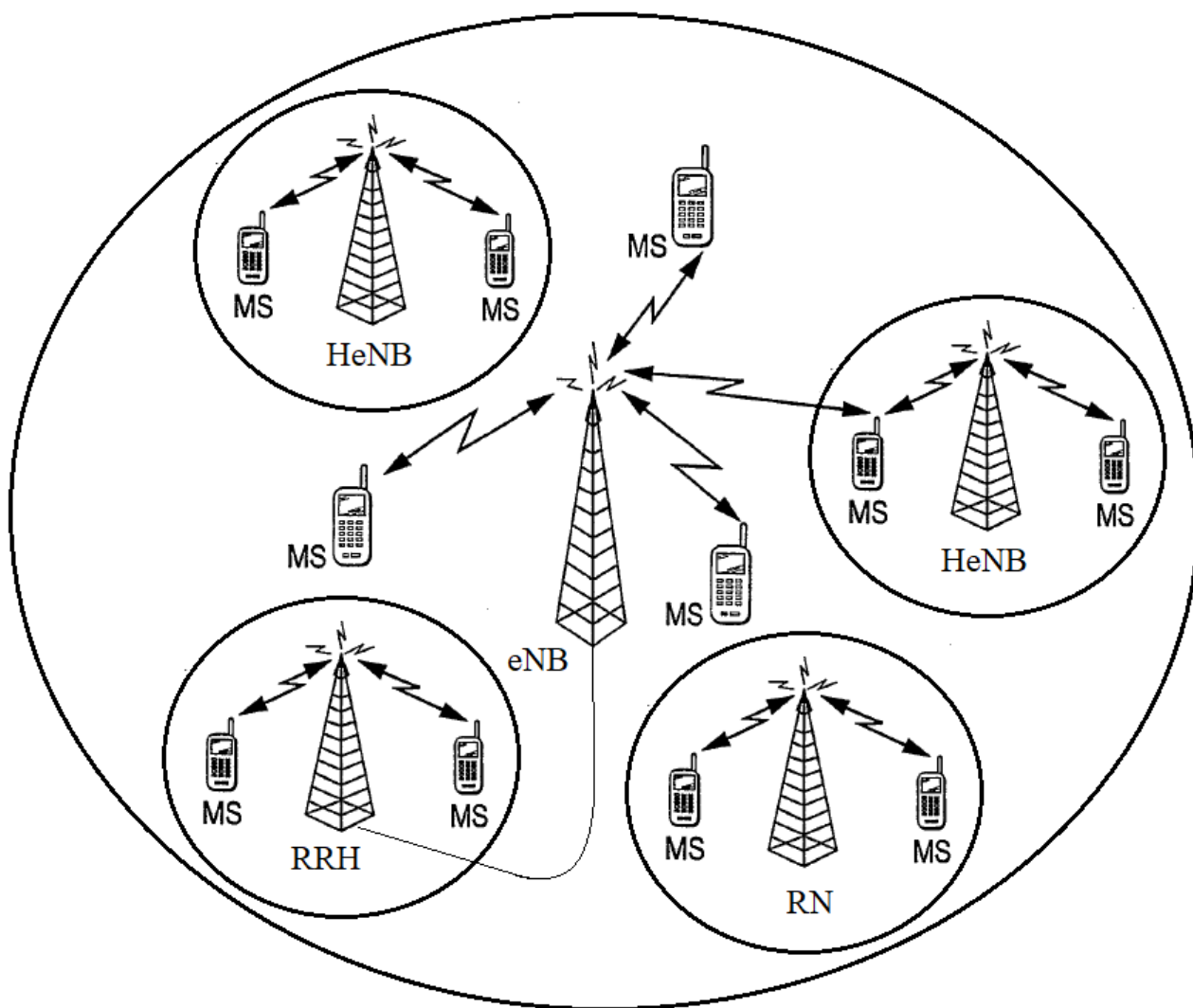


Рис. 1.12. Гетерогенная сеть LTE

Узел HeNB был представлен в спецификации 3GPP LTE Release 9 (R9). Это маломощный eNB, который в основном используется для обеспечения покрытия внутри помещений, фемтосоты, для закрытых абонентских групп CSG (Closed Subscriber Groups), например, в офисных помещениях.

Узел ретрансляции RN – это ещё один тип маломощной базовой станции, добавленный в спецификации 3GPP LTE R10. RN подключается к донорскому eNB (DeNB) через радиointерфейс Un, который основан на интерфейсе LTE Uu для мобильных терминалов, как показано на рис. 1.13. Когда частоты, используемые в Uu и Un для RN, одинаковы, существует риск самоинтерференции в RN. С точки зрения UE RN будет действовать как eNB, а с точки зрения DeNB RN будет рассматриваться как UE.

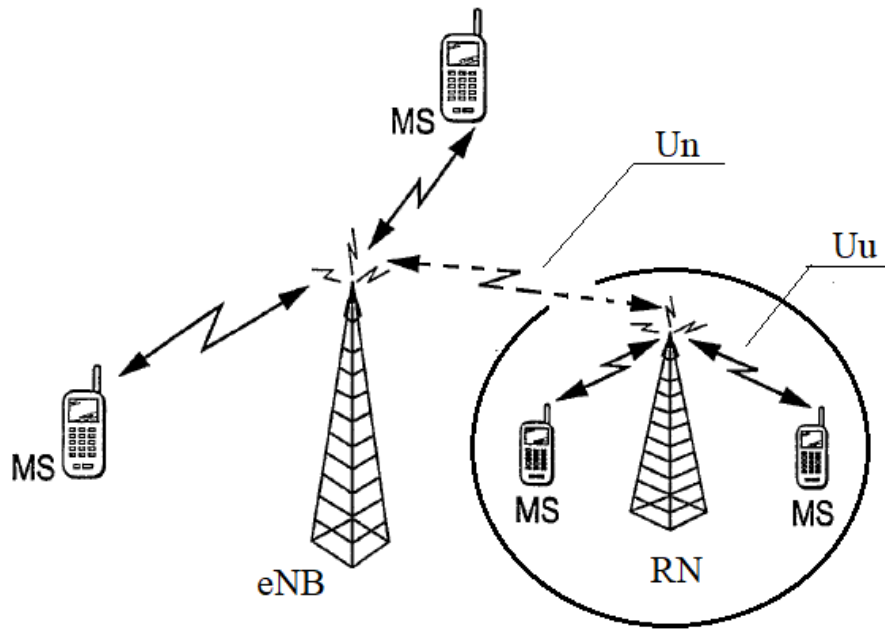


Рис. 1.13. Интерфейсы для узла ретрансляции RN в гетерогенной сети LTE

Удалённый радиотрансивер RRH, подключённый к центральному узлу eNB через оптоволокно, может использоваться для обеспечения покрытия прежде всего «тёмных точек», подземных помещений и т. п. Его можно рассматривать как ещё один сектор центрального узла eNB, а не как отдельную малую соту.

В сети LTE при использовании одинакового радиоканала в соседних сотах MS обычно паркуется к соте с самым сильным принятым пилотным сигналом DL ( $SS_{DL}$ , Strongest received Signal DL), поэтому граница между двумя ячейками находится на линии, где  $SS_{DL}$  одинаков в обеих сотах. В однородных сетях это также обычно совпадает с границей равных потерь на трассе для UL ( $PL_{UL}$ , Path Loss UL) в обеих сотах. В гетерогенной сети с узлом высокой мощности  $P_{high}$  в большой соте и узлами низкой мощности  $P_{low}$  в малых сотах граница равного  $SS_{DL}$  не обязательно будет такой же, как граница равного  $PL_{UL}$ , как это показано на рис. 1.14. Это означает, что MS в зоне между линиями равенства  $SS_{DL}$  и  $PL_{UL}$  будут парковаться, скорее всего, к базе большой соты (узлу eNB), в то время как могли бы парковаться к базе малой соты. Данная область соответствует зоне неопределённости на ранее представленном графике (см. рис. 1.2). Поскольку в LTE используется один и тот же радиоканал, порог  $\Pi$  должен быть выбран достаточно большим, превышающим защитное отношение по соканальной помехе для системы. Как видно из рис. 1.2, это будет провоцировать расширение зоны неопределённости в сторону базы большой соты.

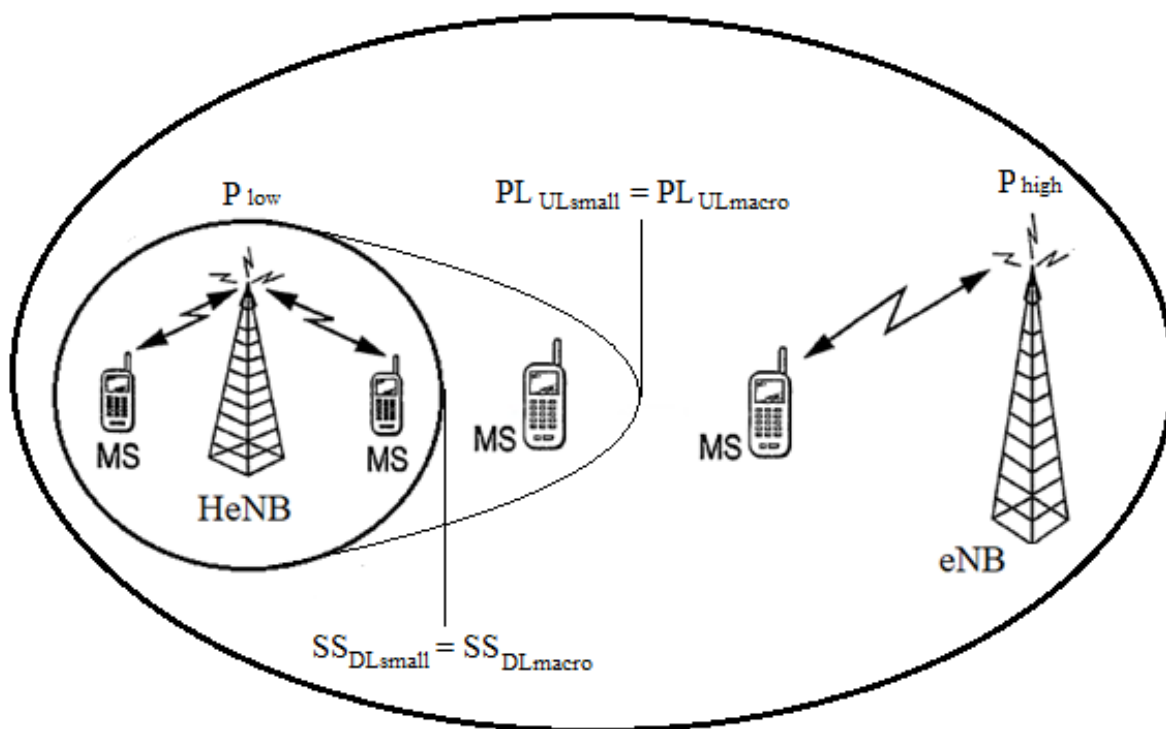


Рис. 1.14. Образование зоны неопределённости в гетерогенной сети LTE

В [7] указывается, что «...основной проблемой при планировании гетерогенной сети является обеспечение того, чтобы маленькие соты действительно обслуживали достаточно большое количество пользователей». Один из способов добиться этого – увеличить площадь, обслуживаемую малой сотой, что можно сделать за счёт:

- физического расширения зоны покрытия путём увеличения мощности излучения и подъёма антенны базовой станции малой соты;
- логического расширения зоны покрытия путём введения положительного смещения порога выбора соты относительно  $SS_{DL}$  маленькой соты (a positive cell selection offset to the  $SS_{DL}$ ).

Второй вариант получил название «расширение охвата соты» (Cell Range Extension, CRE). Его суть сводится к тому, что MS будет выбирать малую соту, даже если уровень принимаемого сигнала  $SS_{DL_{small}}$  от неё ниже, чем  $SS_{DL_{macro}}$ , но не более чем на значение порога offset, как это показано на рис. 1.15.

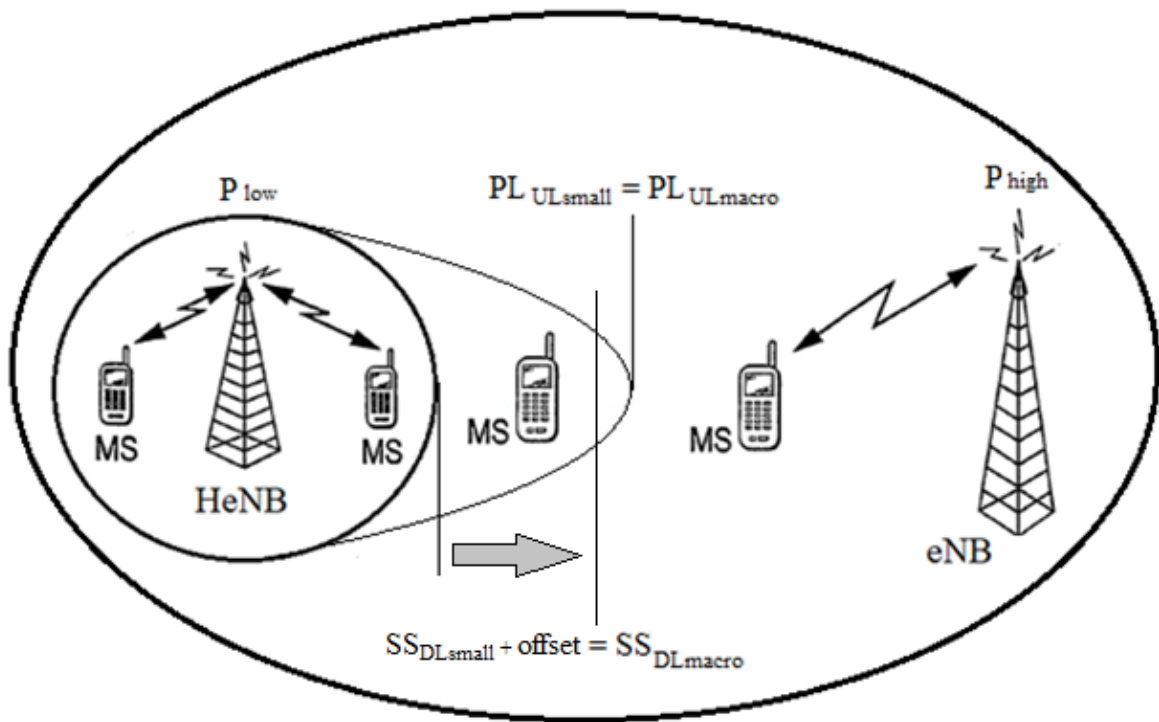


Рис. 1.15. Уменьшение размера зоны неопределённости методом Cell Range Extension

Отрицательным эффектом такого метода является увеличение помех в DL, испытываемых MS, расположенными в области CRE и обслуживаемыми базовой станцией в малой соте. Это может, в частности, повлиять на приём каналов управления DL.

Ряд технологий, добавленных в более поздние спецификации 3GPP LTE, можно использовать для частичного устранения проблемы помех в гетерогенных сетях с небольшими сотами. Рассмотрим их ниже.

**Координация межсотовой интерференции** (Inter-cell Interference Coordination, ICIC) была представлена в спецификации 3GPP LTE Release 8.

eNB могут обмениваться данными с использованием ICIC через интерфейс X2 для уменьшения межсотовых помех для MS на границе соты. Сообщение X2AP (X2 Application Protocol), используемое для этого, называется «Информация о загрузке» (Load Information). Посредством этого сообщения eNB может информировать соседние eNB:

- об уровне помех UL для каждого физического ресурсного блока (PRB);
- о номерах PRB UL, которые будут выделяться MS на границе данной соты и будут чувствительны к помехам UL со стороны соседней соты;
- о том, что мощность DL Tx выше или ниже установленного порогового значения.



Полученная информация используется для оптимизации выделения радиоресурсов: если одна база eNB будет выделять конкретные PRB своим мобильным станциям на границе соты, то соседняя база именно эти PRB своим MS выделять не будет; если наблюдается интерференция в каких-то PRB в данной соте, то соседняя база понизит мощность излучения именно в этих PRB.

ICIC эволюционировала, чтобы лучше поддерживать развёртывание гетерогенных сетей, особенно контроль помех для каналов управления DL. Улучшенная ICIC (Enhanced ICIC, eICIC) была представлена в релизе 3GPP LTE R10. Основное изменение – добавление ICIC во временной области, реализованное за счёт использования почти пустых субкадров (Almost Blank Subframes, ABS), как показано на рис. 1.16.

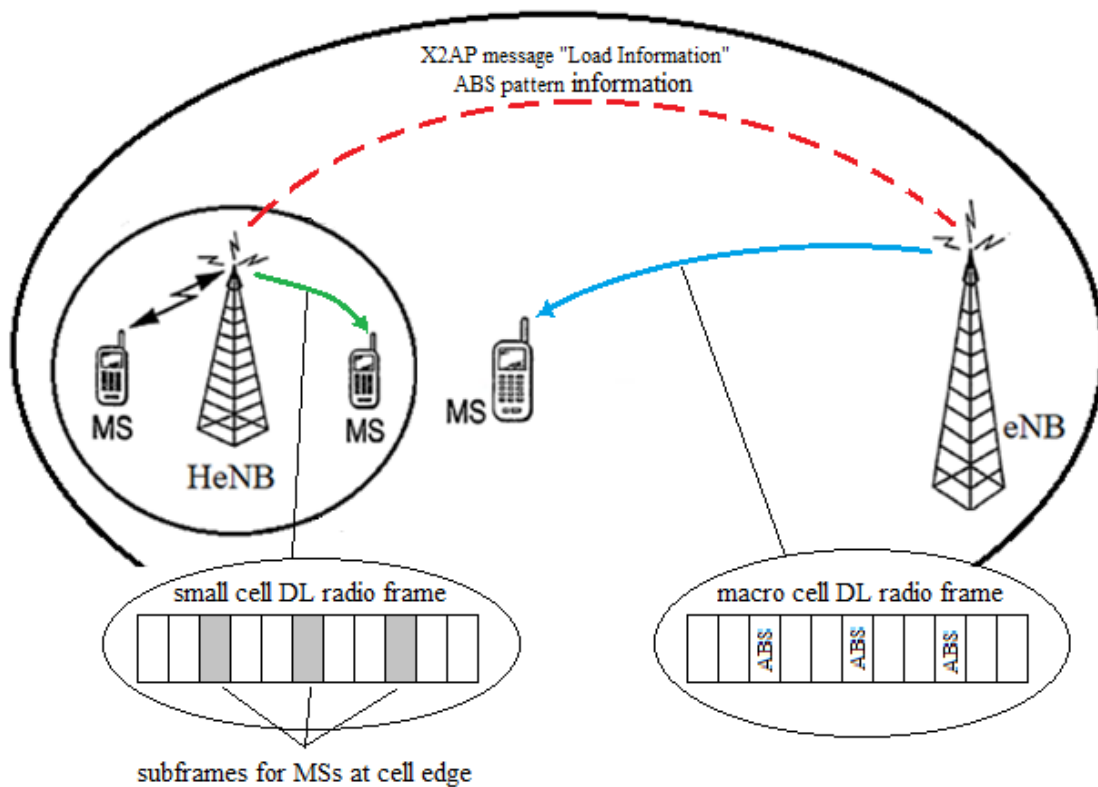


Рис. 1.16. Улучшенная координация межсотовой интерференции (Enhanced ICIC, eICIC)

ABS включает только каналы управления и опорные сигналы для конкретных сот без пользовательских данных и передается с пониженной мощностью. Когда используется eICIC, макроеNB будет передавать ABS согласно полустатическому шаблону. Во время этих подкадров MS на границе, обычно в области CRE малых сот, могут принимать информацию DL, как данные управления, так и данные пользователя. МакроеNB будет информировать eNB в

малой соте о шаблоне ABS (ABS pattern information) посредством сообщения X2AP.

Дальнейшее развитие процедура ICIC получила в релизе 3GPP LTE R11 под названием further enhanced ICIC (feICIC). Основное внимание здесь уделяется устранению межсотовых помех для управляющих сигналов, что позволяет ещё больше расширить диапазон малой соты. eICIC и feICIC особенно важны, когда агрегация несущих не используется.

**Агрегация несущих с их перекрёстным планированием.** Использование несмежных спектральных полос (радиоканалов), получившее название агрегации несущих (Carrier Aggregation, CA), было введено в релизе R10 с обратной совместимостью с релизом R8, чтобы увеличить общую полосу пропускания, доступную для MS, и, следовательно, их максимальную скорость передачи данных. Когда используется CA, несколько радиоканалов, определённых в R8 и называемых компонентными несущими (Component Carriers, CC), агрегируются, объединяются, для любой MS с поддержкой CA могут быть выделены ресурсы на всех CC, в то время как в обычном случае выделяются ресурсы только на одной CC.

Используя планирование между несущими, можно отобразить физические каналы управления DL (Physical DL control channels, PDCCH) на разные CC в больших и малых сотах, как показано на рис. 1.17. PDCCH, несущий информацию управления DL (DL Control Information, DCI) с информацией планирования, должен приниматься MS на границе соты; PDCCH может передаваться с более высокой мощностью, чем каналы трафика. Следовательно, использование разных несущих для PDCCH в больших и малых сотах снижает риск помех PDCCH.

Для примера на рис. 1.17 используются две несущие с шириной полосы в 6 ресурсных блоков PRB. Синяя несущая от macroNB используется как первичная несущая, Primary CC (PCC), зелёная несущая – как вторичная, Secondary CC (SCC). При этом PCC, переносящая PDCCH, передаётся на большей мощности, чем SCC, из-за чего зона обслуживания (покрытия) этой первичной несущей оказывается больше, чем зона обслуживания вторичной несущей.

eNB в маленькой соте также использует на одинаковой мощности излучения две несущие, но в перекрёстном расположении: PCC – зелёная, а SCC – синяя. При этом процедура CRE используется для зелёной несущей PCC.

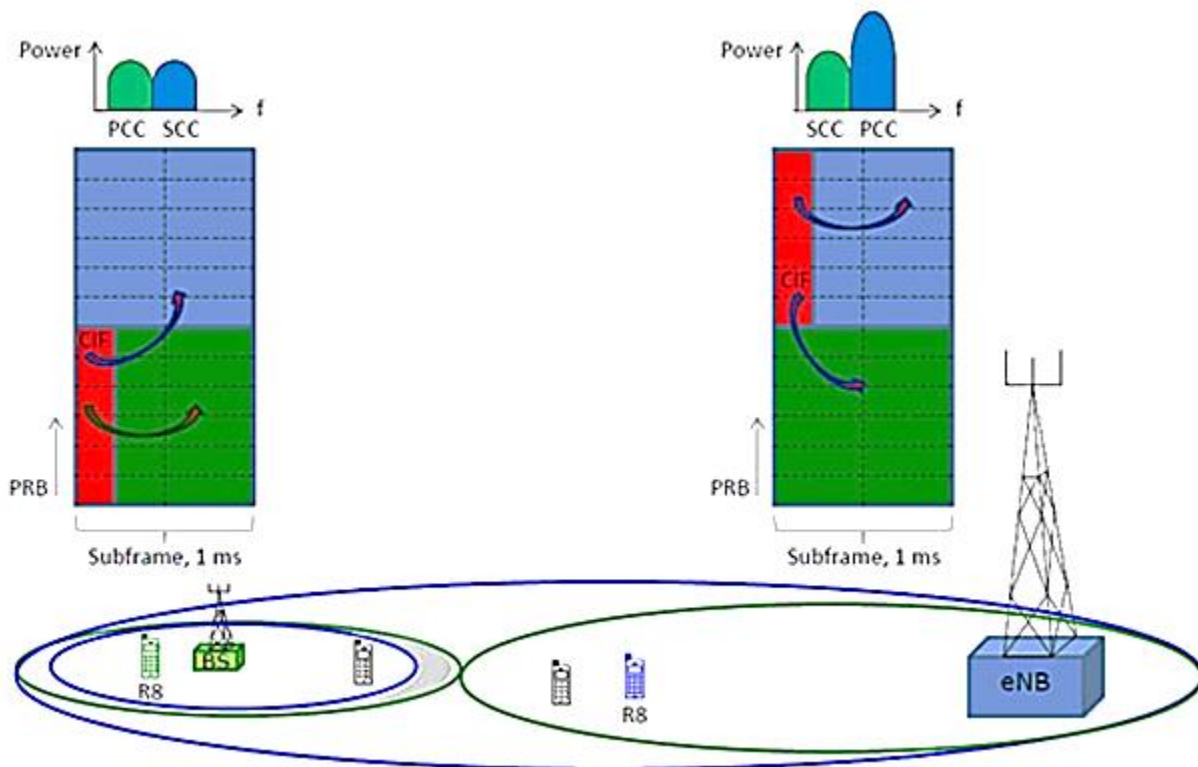


Рис. 1.17. Агрегация несущих с их перекрёстным планированием (PCC – для передачи DCI, управления соединением RRC и передачи данных; SCC – для передачи пользовательских данных)

Красный участок на полях частотно-временного ресурса одной из несущих используется для передачи канала PDCCH, переносящего DCI. При использовании перекрёстного планирования ресурс на этой несущей выделяется автоматически. Выделение ресурса на второй несущей будет указано через Carrier Indicator Field (CIF), входящий в состав DCI. Мобильные станции релиза R8 смогут пользоваться лишь той несущей, где есть передача PDCCH.

Начиная с релиза 3GPP LTE R11 можно обрабатывать CA с CC, требующими другого опережения передачи (Timing Advance, TA). Например, на рис. 1.18 показано объединение в направлении UL несущей PCC для macroeNB со второй несущей SCC для удалённого трансивера RRH, организующего маленькую вторичную соту внутри более крупной первичной соты.

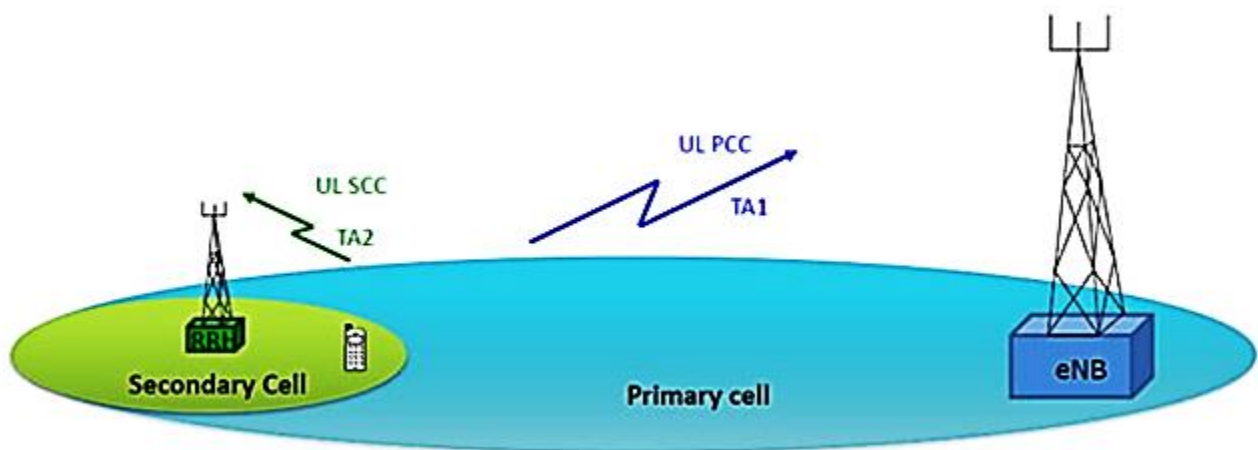


Рис. 1.18. Агрегация несущих с разным опережением передачи  
Timing Advance

**Скоординированная многоточечная связь.** Одним из способов гарантировать, что UE использует как лучшую DL, так и лучшую несущую UL в гетерогенной сети, является использование метода Coordinated Multi Point (CoMP), представленного в релизе 3GPP LTE R11. С помощью CoMP несколько точек передачи/приёма (т. е. eNB, RN или RRH) могут быть скоординированы для предоставления услуги MS. Например, данные могут передаваться одновременно в одних и тех же PRB из более чем одной точки передачи в одну MS, или данные могут быть приняты из одной точки передачи в одном подкадре и из другой точки передачи в следующем подкадре. CoMP можно использовать как в DL, так и в UL. Когда CoMP используется в гетерогенной сети, ряд макросот и малых ячеек может участвовать в передаче данных к одной MS и от неё. Особенно полезной в гетерогенных сетях является возможность для MS в области расширения диапазона ячеек использовать лучший UL в малой ячейке и лучший DL в макросоте, как показано на рис. 1.19.

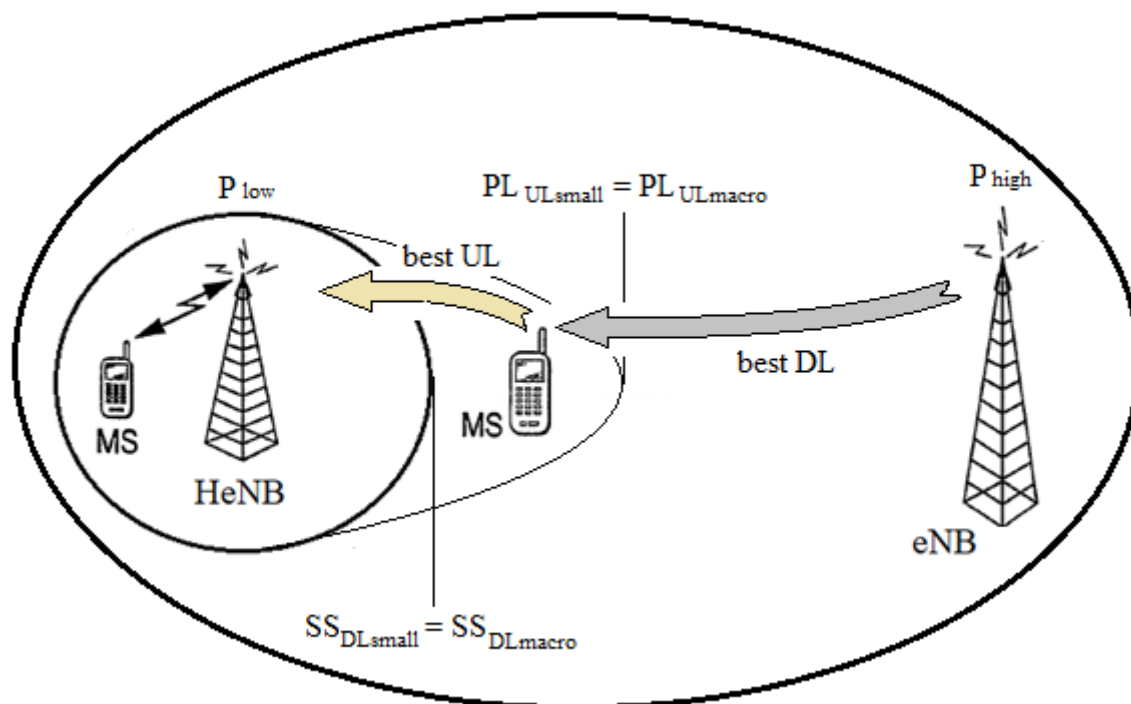


Рис. 1.19. Использование метода CoMP для предоставления терминалам в зоне неопределённости лучшего UL и лучшего DL

Это, однако, требует, чтобы макроеNB и базовая станция в малой соте были синхронизированы, и, скорее всего, потребует комбинации макроеNB с RRH в малой соте.

#### 1.4. HetNet для 5G New Radio

Все особенности организации гетерогенной сети для LTE, рассмотренные ранее, полностью справедливы и для стандарта 5G New Radio (5G NR), т. к. этот стандарт тоже использует метод множественного доступа OFDM (более точно – Flexible-OFDM) с организацией передачи в виде частотно-временных блоков, состоящих из элементарных гранул, называемых PRB.

Однако если сотовые сети LTE могут в принципе существовать в традиционном гомогенном (однородном) виде, то потенциальные возможности сетей 5G New Radio недостижимы без использования гетерогенных структур. Сказанное обусловлено попыткой и необходимостью освоения ранее не использовавшихся в мобильной связи высоких частот. В 5G NR предусмотрено к использованию два частотных диапазона (Frequency Ranges):

- FR1 (от 410 МГц до 7125 МГц);
- FR2 (от 24,250 ГГц до 52,600 ГГц с перспективой расширения до 100 ГГц).

Максимальная ширина радиоканала (несущей) для FR1 установлена в 100 МГц, а для FR2 – 400 МГц.

Стандарты сотовой связи предыдущих поколений (2G–4G) используют частотный диапазон от 410 до 2200 МГц с шириной радиоканалов не более 20 МГц. Отдельные сети LTE «поднимаются» до частоты 3700 МГц. Использование второй, высокочастотной, половины FR1 крайне проблематично из-за роста потерь на этих частотах и заметного уменьшения радиуса сот.

Применение диапазона частот FR2 (24,250–52,600 ГГц) даёт возможность использовать действительно широкополосные каналы до 400 МГц и, соответственно, достичь ранее невиданных скоростей передачи в радиоинтерфейсе. Но на столь высоких частотах совершенно невозможно получить размеры сот, сопоставимые с размерами ныне существующих сотовых сетей. Для решения этих проблем разработчики стандартов 5G предусмотрели только два технических решения:

- использование антенных решёток, формирующих узкий лепесток диаграммы направленности, периодически сканирующей секторную соту (технология beamforming);

- использование концепции гетерогенной сети, HetNet, с организацией радиопокрытия территории посредством множества «быстрых» пико- и фемтосот диапазона FR2, работающих внутри «медленных» макро- и микросот, использующих диапазон FR1.

Возможности технологии beamforming хорошо иллюстрирует рис. 1.20, заимствованный из [8]. Анализ значений на рис. 1.20 приводит к следующим выводам:

- для большой городской секторной 120-градусной соты диапазона FR1 можно использовать для покрытия 4-го лепестка (луча) в 30° каждый с достижимым радиусом 400–700 м;

- для диапазона FR2 можно говорить о пикосотах с круговым или широким секторным покрытием и достижимым радиусом менее 100 м.

Исходя из аналогичных выводов, разработчики концепции 5G NR предложили к внедрению вариант гетерогенной сети, показанный на рис. 1.21.

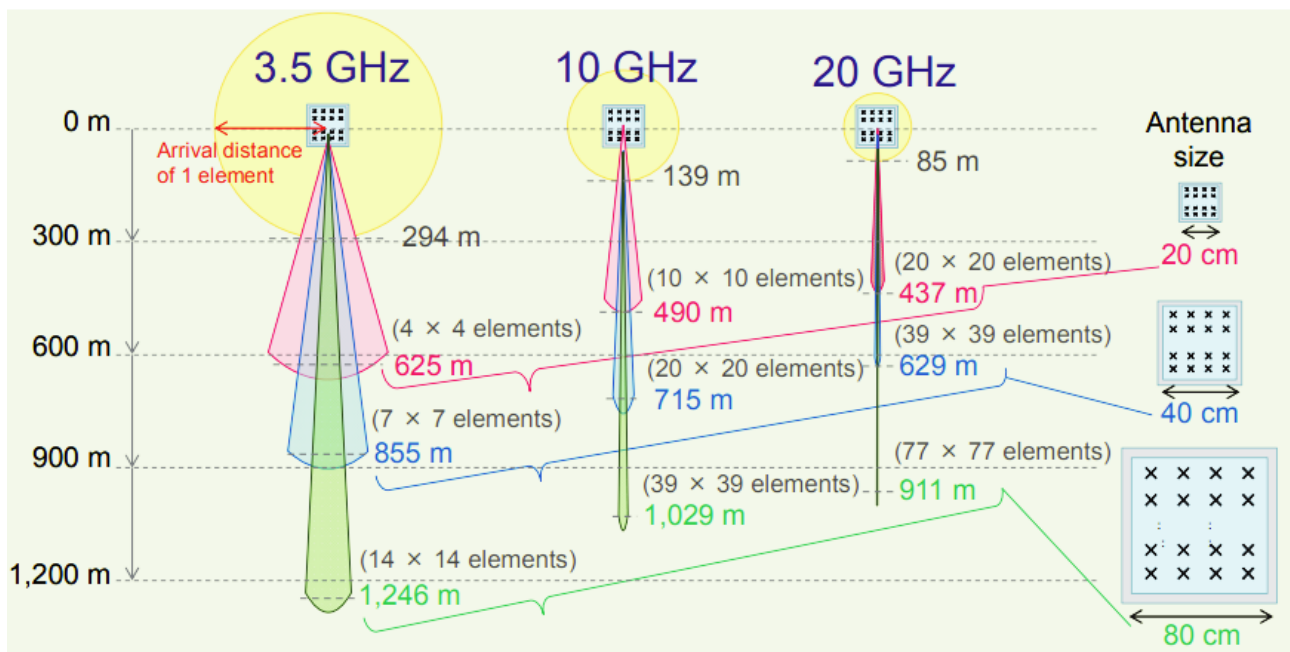


Рис. 1.20. Взаимосвязь радиуса покрытия, ширины формируемого лепестка ДН, размера антенного массива и частоты (мощность Tx = 33 дБм).

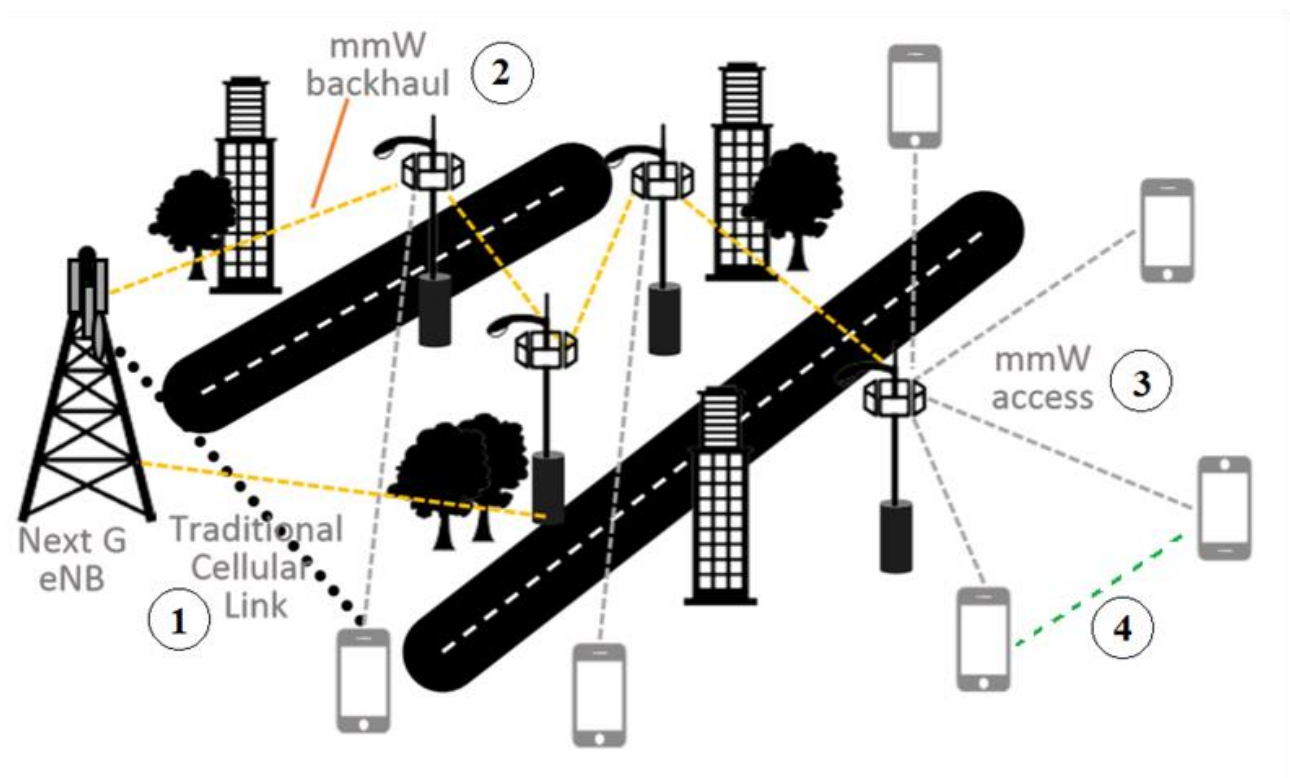


Рис. 1.21. Гетерогенная сеть 5G

В гетерогенной сети предполагается наличие четырёх типов линков, обозначенных номерами на рисунке:

– классический сотовый линк № 1 «сотовая база NG eNB – мобильный терминал», частоты FR1, макро и/или микросота;

– линки типа № 2 «сотовая база – точки доступа», частоты FR2 (mmW backhaul);

– линк № 3 «мобильный терминал – точка доступа», частоты FR2 (mmW access) или Wi-Fi, пико- и наносоты, возможен оптический доступ Li-Fi;

– линк прямой связи № 4 «мобильный терминал – мобильный терминал», получивший название D2D (Device-to-device), возможен широкий ряд интерфейсов.

С учётом наличия электропитания и пучности трафика вдоль проспектов, улиц и шоссе для точек доступа mmW-диапазона была предложена установка на осветительных столбах (опорах наружного освещения). Так родилось название для это класса пикобазовых станций – Pole Station (Pole Site) – дословно «станция (сайт) на столбе». Расположение маленьких сот вдоль улиц автоматически определяет доминанту в физической топологии такой гетерогенной сети. Например, при расположении антенн базы большой соты на перекрёстке пикосоты Pole Stations будут расходиться вдоль примыкающих улиц. Некоторая часть из них может быть расположена в иных местах, для покрытия дворовых территорий, спортивных объектов, кампусов и т. п. Пример именно такой топологии гетерогенной сети, показанной на рис. 1.22, использовался фирмой KUMU Networks [9] для моделирования производительности технологии интегрированного доступа и транспорта IAB, которая будет описана в 2.3.

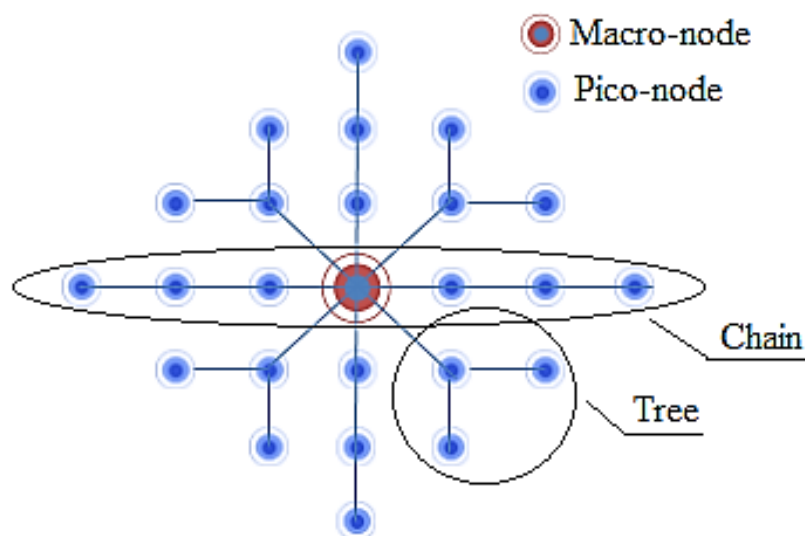


Рис. 1.22. Топология гетерогенной сети 5G при использовании Pole Stations



Как видно из рис. 1.22, структура сети сводится к сочетанию двух топологических решений: цепочечная топология (Chain) и древовидная топология (Tree).

В настоящее время концепция Pole Station стала развиваться в сторону придания этому техническому объекту максимальной многофункциональности, полезной в современной городской среде. Так, на рис. 1.23 показана Smart Pole Station, разработанная в рамках финского исследовательского проекта LuxTurrim5G для инфраструктуры умного города, с установленным на ней оборудованием.

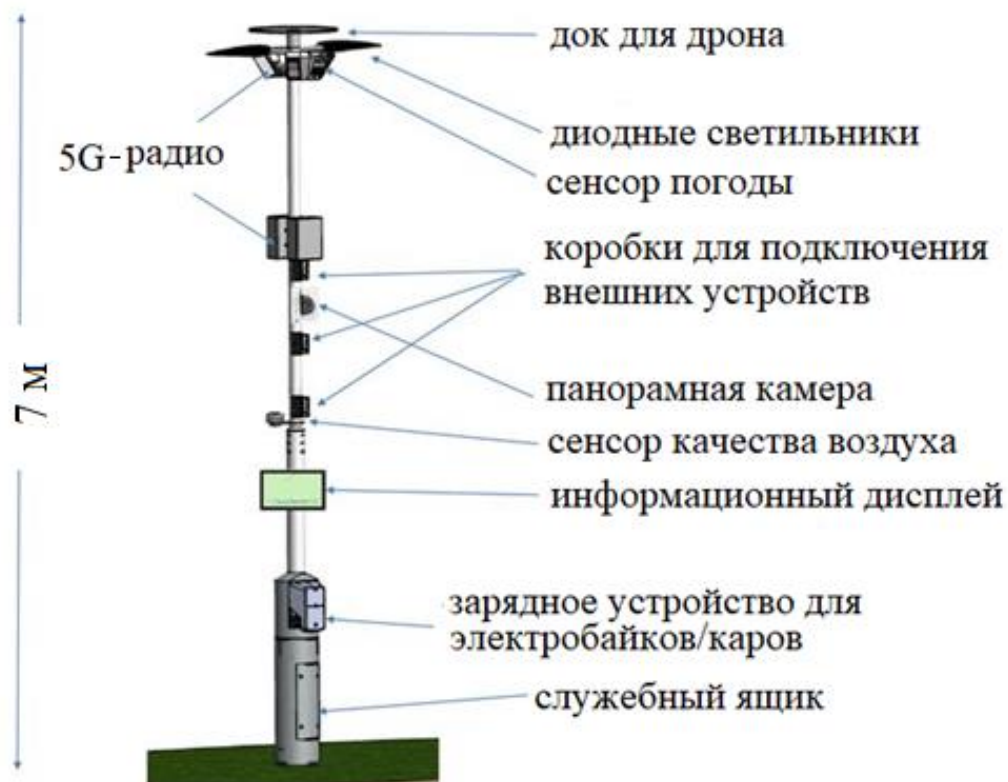


Рис. 1.23. Городская многофункциональная Pole Station

### 1.5. Задание для практической работы студентов

1. На основе модели COST-231 Hata (1.8) для частоты 1795 МГц рассчитать радиус зоны подключения пикобазовой станции (см. рис. 1.2). Для упрощения считать, что в зоне подключения пикобазы наблюдается равномерное распределение уровня сигнала от микробазы со значением минус 80 дБм, как показано на рис. 1.24. В принятых обозначениях радиус зоны подключения эквивалентен расстоянию между точками D и X<sub>3</sub> (или X<sub>2</sub>). Значение порога подключения П принять за 9 дБ (минимальное отношение С/І для стандарта GSM).

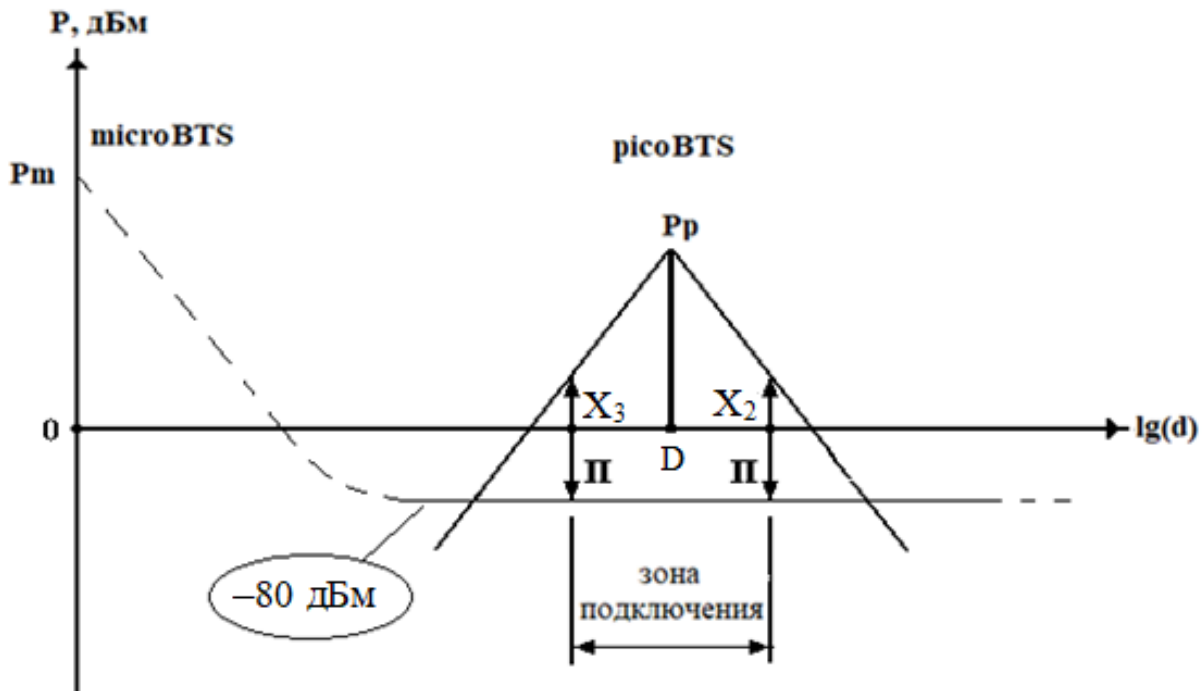


Рис. 1.24. Упрощённая схема для расчёта зоны подключения пикобазовой станции

$$L_u \text{ (дБ)} = 46,3 + 33,9 \cdot \lg(f) - 13,82 \cdot \lg(H_b) - a(H_m) + [44,9 - 6,55 \cdot \lg(H_b)] \cdot \lg(d) + C_m, \quad (1.8)$$

где  $a(H_m) = [1,1 \cdot \lg(f) - 0,7] \cdot H_m - [1,56 \cdot \lg(f) - 0,8]$ ;  $C_m = 3$  дБ для крупного города.

Высоту подъёма антенны мобильной станции  $H_m$  принять за 1,5 м, высоту подъёма антенны пикобазовой станции  $H_b$  за – 10, 20 и 30 м. Мощность излучения (эквивалентную изотропно излучаемую мощность, ЭИИМ)  $P_p$  пикобазы принять за 250 мВт, 0,5 Вт и 1 Вт для всех трёх высот установки антенны.

Сделать выводы о соотношении полученных значений с радиусом (размером) типовой городской микросоты для диапазона 1800 МГц.

## 2. Используя нижеприведённую модель FSP (Free Space Propagation)

$$L_{FSP} \text{ (дБ)} = 32,44 + 20 \cdot \lg(f) + 20 \cdot \lg(d), \quad (1.9)$$

вычислить потери сигнала при распространении на 0,5 км для значений шести частот спектра 5G: нижняя, средняя и верхняя частота диапазона FR1; нижняя, средняя и верхняя частота диапазона FR2.

3. Полагая значение излучаемой мощности (ЭИИМ) 2 Вт и значение чувствительности на приёме минус 95 дБм, сделать вывод о возможности приёма сигналов из предыдущего пункта.

4. Столбы уличного освещения обычно устанавливаются с шагом 35 м. Будем считать, что на столбе смонтирована Pole Station с высотой установки антенны в 10 м. При мощности излучения (ЭИИМ) 250 мВт найти уровень сигнала у земли на удалении 35, 70 и 105 м от данного столба. Расстояние считать как гипотенузу возникающего треугольника. Использовать модель FSP из (1.9) и значение частоты в 25 ГГц. При чувствительности на приёме в мобильном терминале минус 85 дБм сделать выводы о возможности приёма сигнала в точках.

5. В пакете MS Excel построить график зависимости угла наклона  $V_{\text{geo}}$  антенны базовой станции от высоты установки этой антенны  $H_{\text{bts}}$ . Менять значение высоты от 15 до 70 м с произвольным шагом. Использовать выражения (1.1)–(1.2) и графическую модель, представленную на рис. 1.5 из 1.2. Значение ширины ДН антенны  $\theta_{\text{bw}}$  в вертикальной плоскости принять за  $10^\circ$ . Радиус соты принять за 1 км.

## 2. ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ СЕТЕЙ

С момента своего появления концепция HetNet испытывала большие сложности с реальным внедрением на сетях из-за отсутствия разумных по стоимости технических средств её реализации. Маленькие соты были представлены почти исключительно в виде indoor-покрытия. В настоящее время имеется достаточное количество довольно разнообразных технических решений, прежде всего касающихся организации сетей радиодоступа RAN (Radio Access Network), с помощью которых можно эффективно внедрять HetNet. Ниже рассматриваются некоторые из этих технических решений.

### 2.1. Эволюция архитектуры сети радиодоступа RAN

В классической RAN первого и второго поколения сотовой связи, как показано на рис. 2.1, использовались АФУ (антенно-фидерные устройства) на основе медных коаксиальных кабелей и «монолитные» базовые станции, устанавливаемые внизу радиомачт.

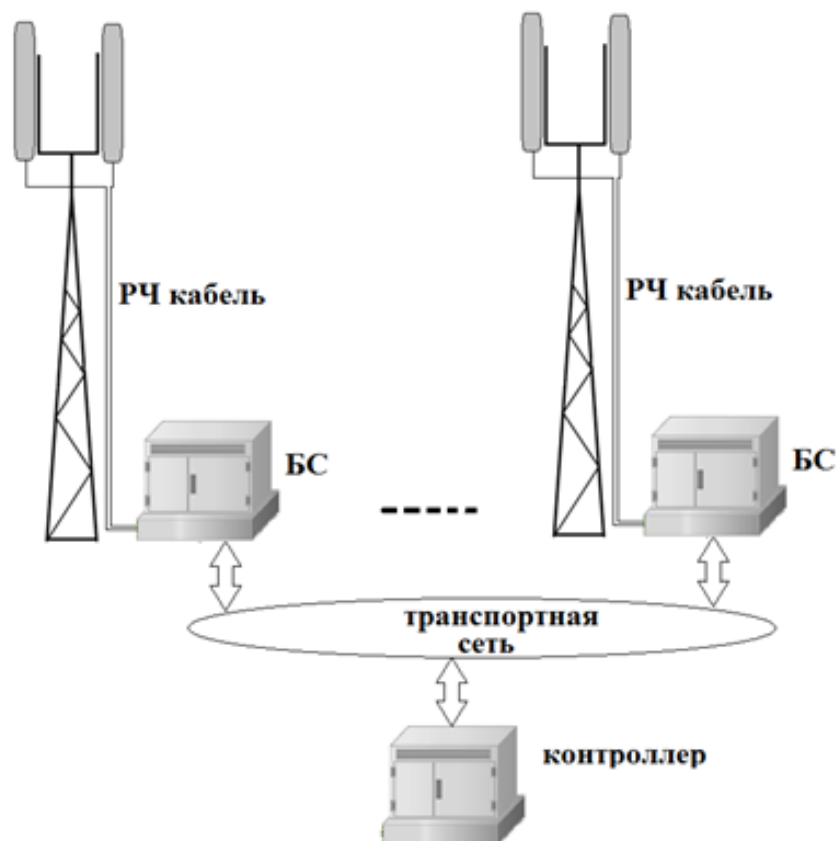


Рис. 2.1. Классическая архитектура RAN для 1G–2G

По интерфейсам типа E1 (2 Мбит/с) все базы на довольно большой территории соединялись с одним контроллером радиосети. Напомним, что во всех без исключения стандартах сотовой связи логическая топология соединения базовых станций с контроллером (устройством более высокого уровня в иерархии сети) – это «звезда». Физически соединить каждую базу напрямую с контроллером не представляется возможным или нецелесообразно, поэтому физическая топология, как правило, представлена древовидной структурой.

Возникавшая транспортная сеть реализовывалась по транспортным технологиям PDH/SDH, где в качестве среды передачи применялись медные четырёхпроводные линии, ВОЛС и радиолинки (радиорелейные линии прямой видимости).

Основной недостаток такого технического решения состоял в больших потерях радиосигналов в АФУ, а на транспортном уровне – в проблемах с передачей пакетного трафика, поэтому в третьем поколении сотовой связи RAN модифицировали (рис. 2.2).

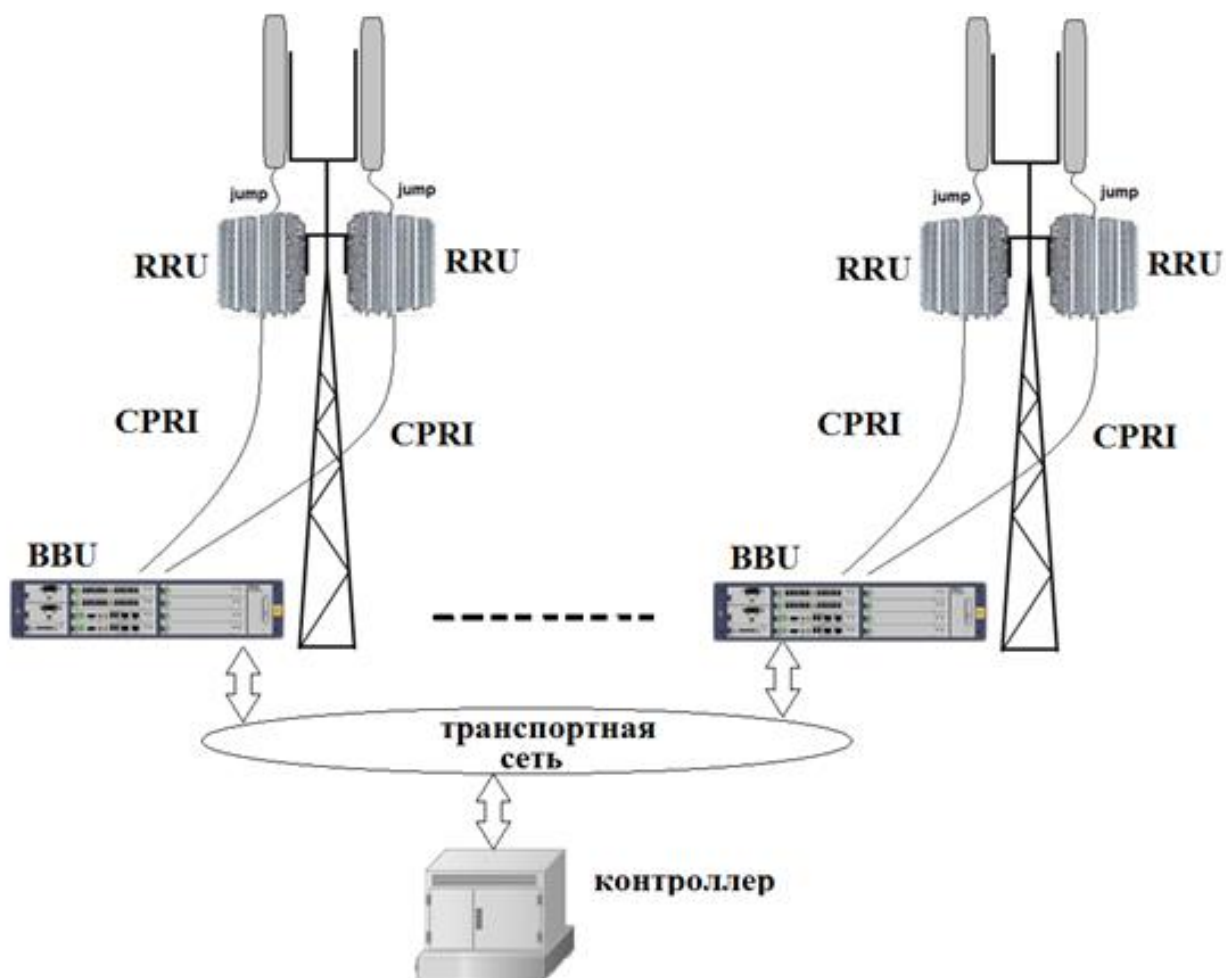


Рис. 2.2. Архитектура RAN 3G с распределёнными базовыми станциями

«Монолитные» базы разделили, перейдя к использованию распределённых базовых станций, состоящих из базового блока BBU (Base Band Unit) и удалённых радиомодулей (трансиверов), называемых или RRU (Remote Radio Unit), или RRH (Remote Radio Head). Каждый RRU обслуживал одну антенну в сайте. При этом потери в АФУ были почти устранены, т. к. RRU монтировались на мачте в непосредственной близости от антенны.

Транспортная сеть была модифицирована введением транспортной технологии Ethernet с протоколом IP. Для связи BBU и RRU нашёл широкое применение интерфейс Common Public Radio Interface (CPRI). В качестве среды передачи CPRI использует ВОЛС или тонкий гибкий коаксиальный кабель. Особенности этого интерфейса будут изложены в 2.2.

С ростом производительности BBU (могут обслуживать десятки RRU) и при наличии весьма малых потерь уровня сигнала и малых задержек в ВОЛС для интерфейса CPRI появилась идея т. н. Centralized-RAN (централизованная RAN, C-RAN), показанной на рис. 2.3. Идея состоит в установке одного или нескольких BBU в специальном месте (часто называемом Central Office или BBU Pool) и соединении их с помощью особой транспортной сети с удалёнными на десятки километров блоками RRU. Такая транспортная сеть, получившая название fronthaul (передняя транзитная/транспортная сеть), передаёт сигналы с применением интерфейса CPRI, используя оптические линии или радиолинки.

Второй по популярности специализированный интерфейс для fronthaul называется OBSAI (The Open Base Station Architecture Initiative). Он был создан в 2002 г. ассоциацией фирм Hyundai, LG Electronics, Nokia, Samsung и ZTE. Этот интерфейс имеет практически те же возможности, что и CPRI.

В сети fronthaul также можно использовать и общеупотребимый Ethernet в вариантах прямой передачи битного потока или путём инкапсуляции данных CPRI.

Транспортная сеть «позади» BBU, которая соединяет базы с подсистемой коммутации (Core Network), называется backhaul и представляет собой почти всегда Ethernet-сеть с технологией IP-MPLS.

При сохранении общей архитектуры в соответствии с рис. 2.3 сеть C-RAN может иметь заметно разное техническое исполнение. Самым простым и прямолинейным можно считать вариант, показанный на рис. 2.4. В этом случае многопортовый базовый блок (блоки) соединяют с каждым RRU непосредственно одиночными оптическими кабелями по схеме «порт BBU – RRU». При этом формируется топология типа «звезда» около каждого BBU.

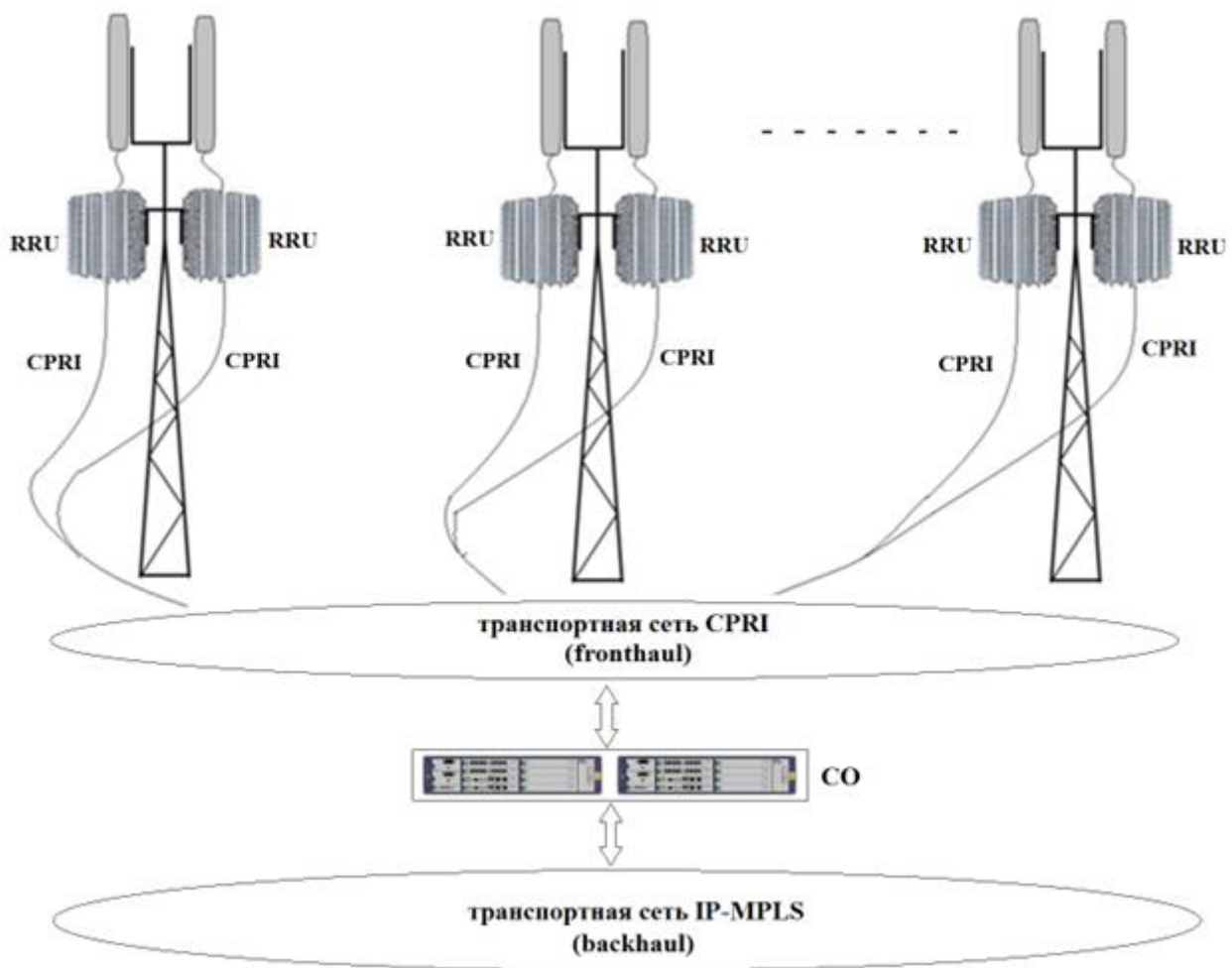


Рис. 2.3. Архитектура Centralized-RAN

Максимальная дальность разноса блоков в таком случае определяется нагрузочной способностью оптических портов BBU и возможными задержками при передаче.

Большой недостаток такого построения fronthaul – множество кабелей, которые надо вести в разные стороны. Это заметно повышает стоимость сети.

Более популярный вариант построения fronthaul в условиях крупного города показан на рис. 2.5. Здесь символически отражено использование стандартных транспортных оптических сетей для передачи сигналов CPRI. Самый простой вариант – пассивная оптическая сеть PON со сплиттерами для охвата большого количества RRU.

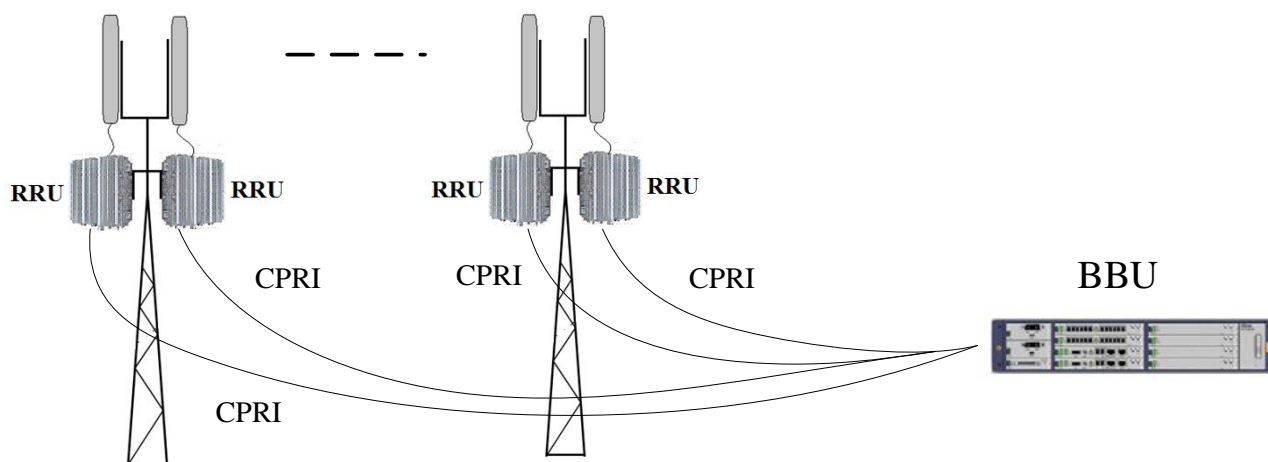


Рис. 2.4. Топология «звезда» Centralized-RAN

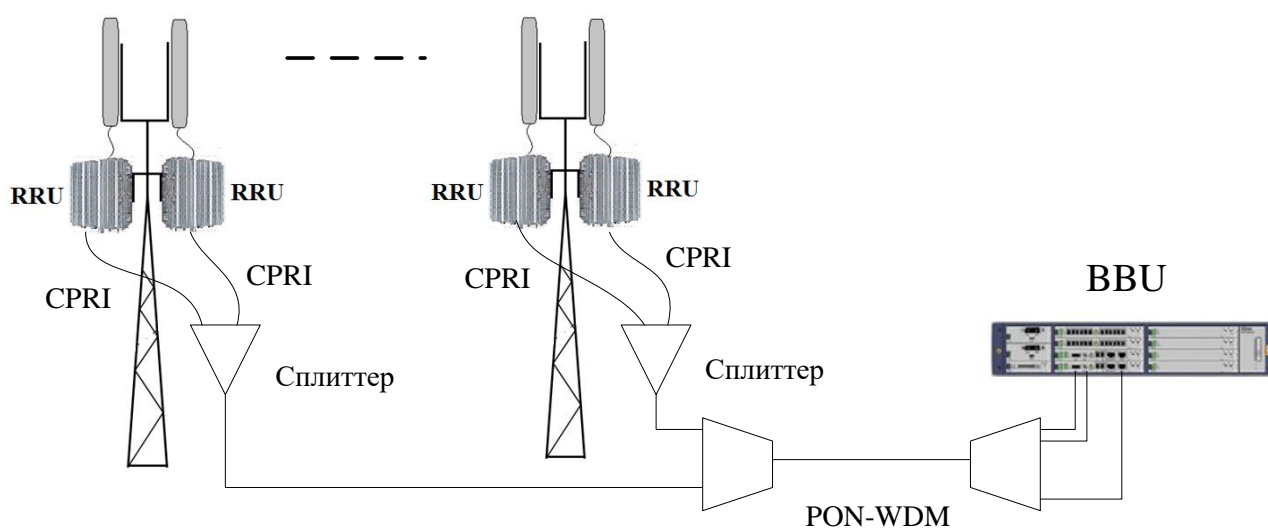


Рис. 2.5. Архитектура Centralized-RAN на основе PON/DWDM

Более сложный вариант – применение для передачи по оптическому волокну транспортной технологии WDM (wavelength division multiplexing), которое представляет собой мультиплексирование с разделением по длине волны. Современные системы WDM на основе стандартного частотного плана (рекомендация G.692 ITU-T) можно подразделить на три следующие группы:

1. Грубые WDM (coarse WDM, CWDM) – системы с частотным разносом каналов более 2500 ГГц, позволяющие мультиплексировать не более 18 каналов. Используемые в настоящее время CWDM работают в полосе от 1271 до 1611 нм, промежуток между каналами 20 нм (2500 ГГц), можно мультиплексировать 16 спектральных каналов.



2. Плотные WDM (dense WDM, DWDM) – системы с разносом каналов около 100 ГГц, позволяющие мультиплексировать до 40 каналов.

3. Высокочлотные WDM (high dense WDM, HDWDM) – системы с разносом каналов 50 ГГц и менее, позволяющие мультиплексировать более 64 каналов.

Частотный план для систем CWDM определяется стандартом ITU G.694.2. Область применения технологии — городские сети с расстоянием до 50 км. Достоинством этого вида WDM-систем является низкая (по сравнению с остальными типами) стоимость оборудования вследствие меньших требований к компонентам.

Частотный план для систем DWDM определяется стандартом ITU G.694.1. Область применения – скоростные местные, зоновые и магистральные сети.

Важное достоинство оптических систем с WDM – возможность применения топологии «кольцо». Это позволяет соединить по кругу много сайтов, используя только одну пару волокон, что заметно снижает затраты на прокладку. Это повышает надежность соединения, т. к. доступ к каждому устройству в кольце есть с двух сторон.

Применение DWDM или CWDM определяется количеством RRU в системе и требуемой для них скорости обмена по интерфейсу CPRI, а это определяется шириной полосы радиоканалов, которые используются в сотах LTE. В результате скорость передачи в оптических кольцах для fronthaul обычно составляет десятки и сотни гигабит в секунду. Максимальная достигнутая скорость для оптических сетей WDM составляет около 27 Тбит/с.

При использовании систем WDM в сети появляются активные устройства типа мультиплексоров/демультиплексоров. Эти устройства могут вносить дополнительные задержки на обработку сигналов, что снижает максимальную дальность в сети между BBU и RRU.

Третий вариант реализации C-RAN предполагает применение радиорелейных линков прямой видимости (рис. 2.6). Радиолинки поддерживают все топологии, принятые для интерфейса CPRI, и являются полным аналогом применения оптических линий. Кроме двух важных пунктов. Во-первых, радиолинки снижают скорость обмена в условиях дождя, снегопада и т. п. Во-вторых, пропускная способность современных радиолинков едва превосходит 10 Гбит/с, что уступает в сравнении со скоростями для оптики.

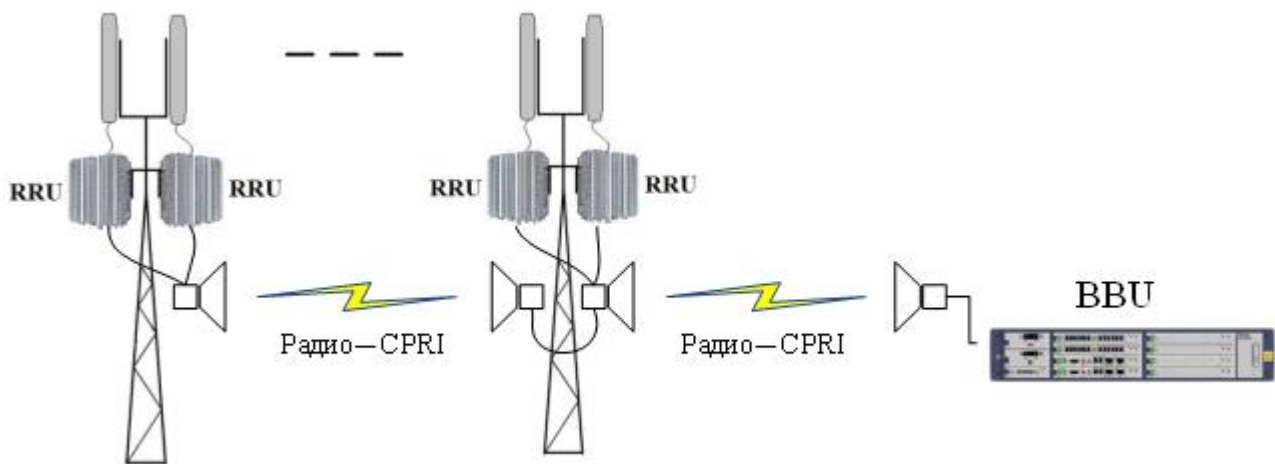


Рис. 2.6. Архитектура Centralized-RAN на радиолинках

Главное достоинство радиолинков – простота и скорость их разворачивания (монтажа) и отсутствие потребности в подземной канализации. Применение радиолинков позволяет сделать полностью автономный сайт, например, на крыше дома. Всё его оборудование будет соединено только двумя проводами с сетью электропитания этого здания.

Вариант архитектуры fronthaul типа «оптическое кольцо» показан на рис. 2.7 в реализации южнокорейской фирмы HFR на оборудовании серии flexiHaul. Fronthaul построен на мультиплексорах нескольких уровней иерархии и производительности. Корневой мультиплексор HSN-8500 организует работу двух оптических колец и их стык с пулом BBU. В кольцах используется DWDM-мультиплексирование на 40 длин волн с суммарной скоростью передачи 180 Гбит/с и поддержкой до 72 RRU/RRH. Подключение удалённых радиомодулей к кольцу осуществляется с помощью мультиплексоров нижнего уровня иерархии (HSN-8300/8100). Эти мультиплексоры отличаются количеством обслуживаемых RRU и/или количеством каналов CPRI.

Расширение полосы радиоканала в сотах вызывает ещё большее увеличение скорости передачи во fronthaul и, соответственно, увеличение стоимости оборудования для этой сети. Поскольку в проекте 5G предполагалось существенное увеличение полос радиоканалов, для решения возможной проблемы с организацией fronthaul была предложена архитектура базовой станции gNB (название базовой станции 5G по стандарту) из трёх блоков, как показано на рис. 2.8. Эти блоки называются RU (radio unit, аналог RRU), DU (distributed unit) и CU (central unit) [9].

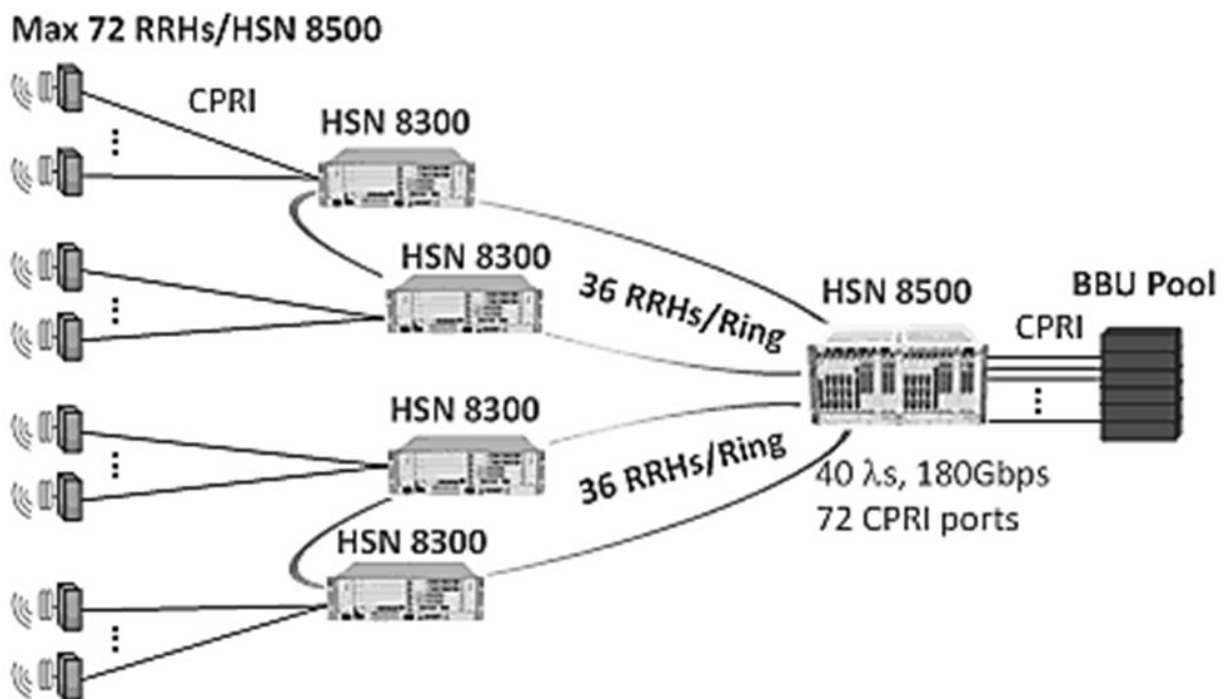


Рис. 2.7. Конфигурация сети fronthaul на основе мультиплексоров HSN-8500 и HSN-8300 южнокорейской фирмы HFR

По функциям базе gNB отданы следующие уровни стека протоколов: обработка радиочастотных сигналов (RF, radio frequency signal processing), физический уровень (PHY, physical), управление доступом к среде (MAC, medium access control), управление радиоканалом (RLC, radio link control), протокол конвергенции пакетных данных (PDCP, packet data convergence protocol), уровни управления радиоресурсами (RRC, radio resource control). При этом, как показано на рис. 2.8, б, от базовой сети 5G (5GC, 5G Core network) и до оборудования конечного пользователя (UE) определены интерфейсы NG, F1, F2 и N1. Можно видеть, что CU взаимодействует с DU через интерфейс F1, а DU с RU – через F2.

Интересно отметить, что в идеологии 5G нет однозначной «привязки» местоположения интерфейсов группы F к конкретным уровням и подуровням стека протоколов базовой станции. Определено восемь опций (уровней) расщепления (split layer options) стека – восемь возможных мест расположения интерфейсов группы F [9]. Пять «верхних» уровней расщепления предусмотрены для F1 и три «нижних» – для F2. По этой причине название этих интерфейсов часто пишут в виде F1 HLS (High Layer Split) и F2 LLS (Low Layer Split).

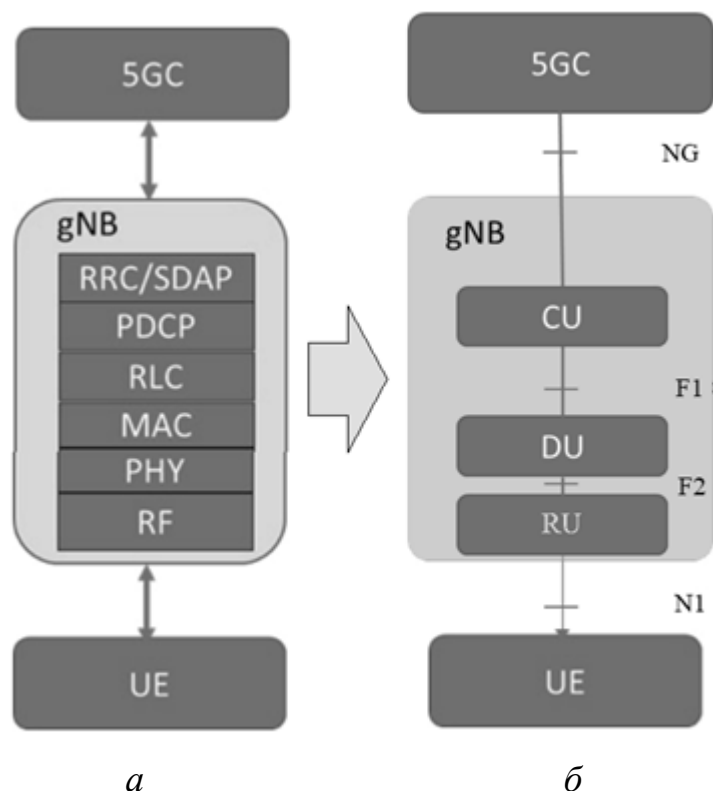


Рис. 2.8. Функциональная архитектура базовой станции gNB (а) и интерфейсы RAN 5G (б)

Благодаря новой логической архитектуре gNB в 5G возможны новые варианты построения RAN, показанные на рис. 2.9. Так, между DU и CU возможно формирование «средней транзитной сети» – midhaul. На рис. 2.9, б fronthaul вырожден до кабелей на мачте с интерфейсом CPRI. В зависимости от производительности оборудования один CU может обслуживать один или более DU, один DU – один или более RU. Для пико- и фемтобазовых станций применима архитектура с рис. 2.1 и 2.2, когда все блоки устанавливаются на мачте или в здании. В целом, разные варианты архитектуры RAN с транзитными транспортными сетями получили общее название xHauling.

Развитие технологий облачных вычислений стимулировало эволюцию Centralized-RAN в Cloud-RAN. Действительно, пул BBU (DU + CU) представляет собой высокопроизводительный вычислительный узел, где «вычислительная начинка» – программное и техническое обеспечение – может быть реализована на публичных или ведомственных облаках, причём на ресурсах одного облака могут быть реализованы элементы сетей разных сотовых операторов. В этом случае используется термин «виртуализация элементов сети оператора».

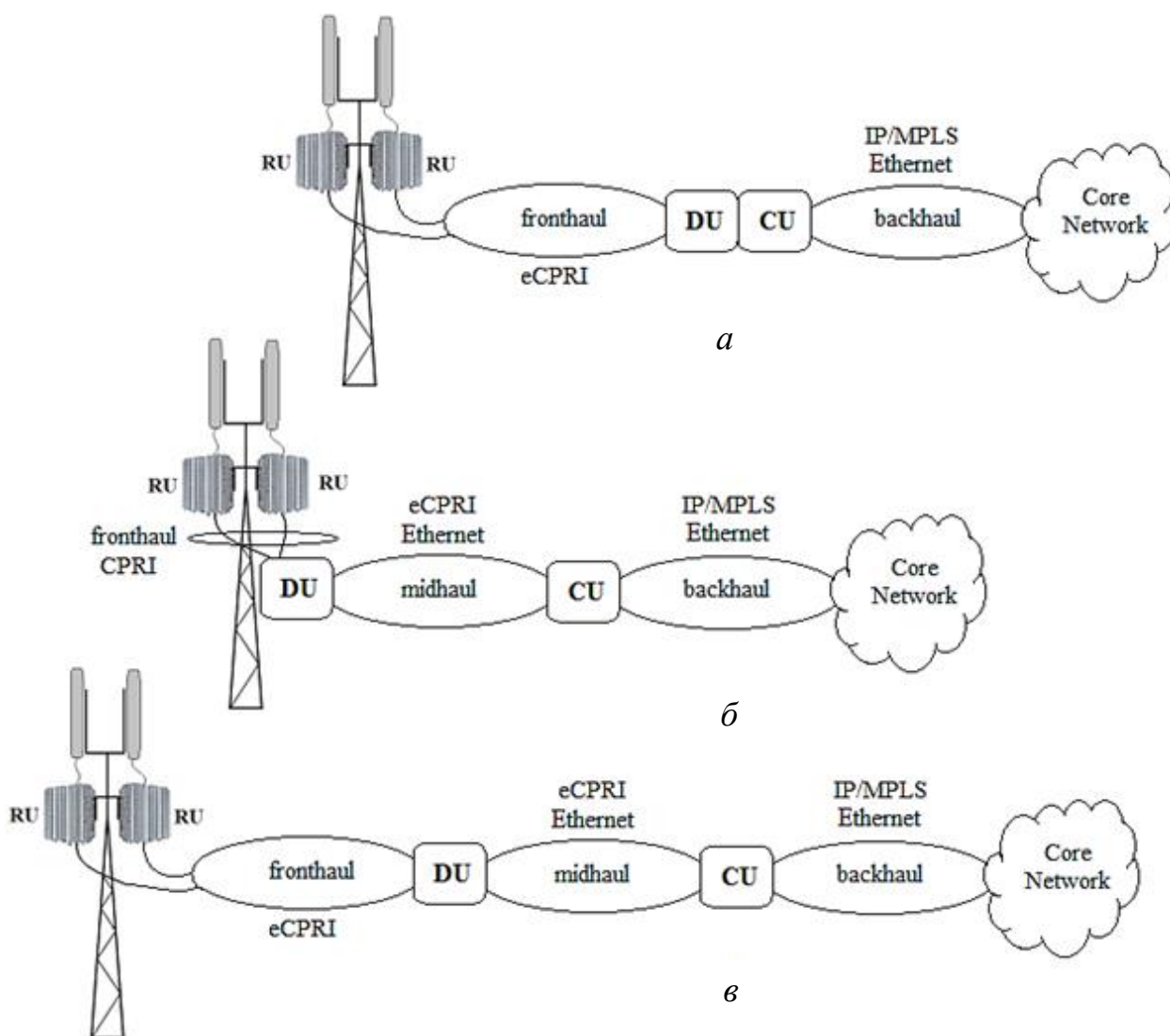


Рис. 2.9. Варианты xHauling для RAN сети 5G:

- a* – DU и CU расположены в общем пуле;
- б* – DU на мачте, CU в общем пуле;
- в* – RU и DU и CU разнесены в пространстве

На рис. 2.10 представлен пример современной сети 5G национального оператора Южной Кореи Korea Telecom (KT). Сеть выполнена в концепции облачной виртуализации элементов сети Edge Clouds + Central Cloud. Так называемые граничные облачные вычисления, или граничные облака (Edge Clouds) представляют из себя вынесенные из административного центра на периферию обычные облака. На схеме сети Korea Telecom корпоративное облако Central Cloud расположено в столице – Сеуле, а Edge Cloud – в городе Пусан. Edge Clouds позволяют уменьшить возможные задержки при передаче информации к конечным пользователям. На схеме показан вариант xHauling, аналогичный рис. 2.9, *a*.

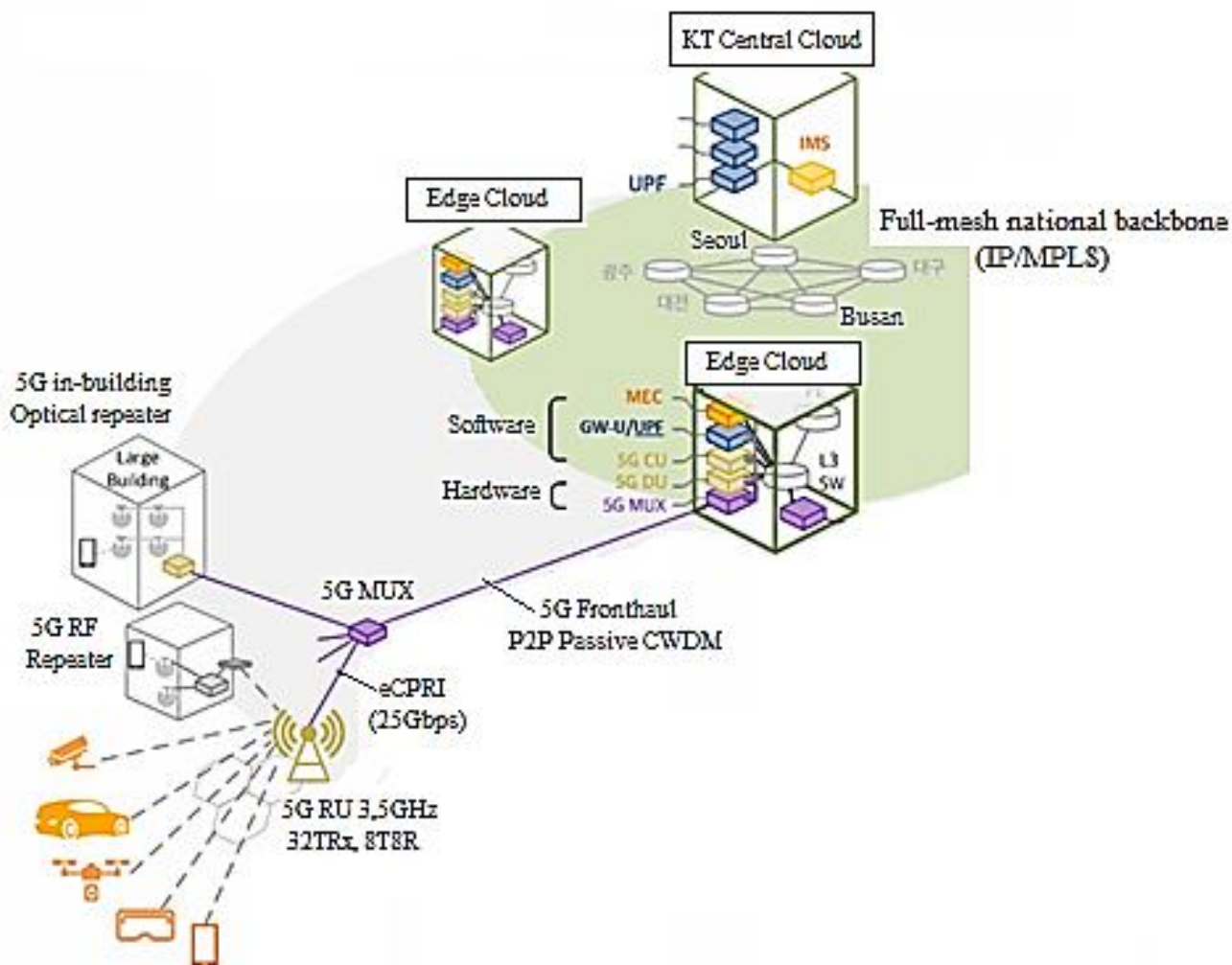


Рис. 2.10. Фрагмент национальной сети 5G южнокорейского оператора связи Korea Telecom (KT)

## 2.2. Проектирование fronthaul с интерфейсом CPRI

CPRI был создан в 2003 г. группой фирм – производителей оборудования для сотовой связи и транспортных сетей: Ericsson, NSN, ALU, NEC, Huawei. Интерфейс специально предназначался для соединения BBU и RRU в распределённых конструкциях базовых станций. Последняя действующая версия V.7.0 разработана в 2015 г. [9].

На логическом уровне в данном интерфейсе предполагается передача трёх основных потоков, как показано на рис. 2.11. Этот поток пользовательских данных в виде битов I/Q предназначен для работы квадратурного модулятора в RRU, поток сигналов синхронизации и поток Control & Management (C&M) – для управления соединением.

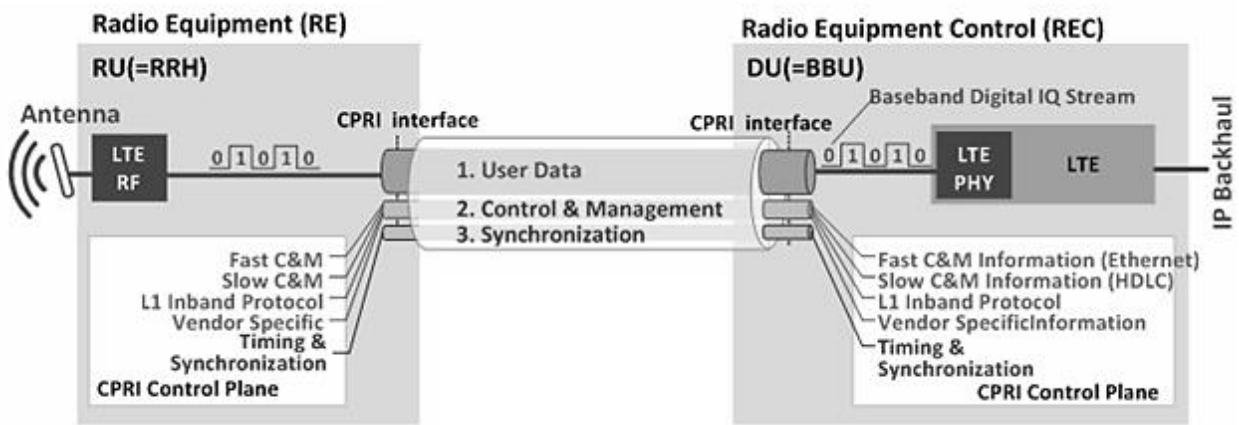


Рис. 2.11. Логическая структура передачи CPRI

Поток С&М состоит из нескольких подпотоков, позволяющих, например, интегрировать передачу системы Ethernet или передавать специфическую служебную информацию, заложенную конкретным вендором (Vendor Specific Information).

На физическом уровне варианты передачи (опции) разделяют по скорости и типу соединительной линии (оптика или электрический сигнал). Варианты опций CPRI показаны в табл. 2.1. Все скорости передачи данных в линии CPRI были выбраны таким образом, чтобы базовая скорость передачи элементарных посылок UMTS, равная 3,84 Мбит/с, могла быть экономичным способом восстановлена из скорости передачи в линии с учетом схем линейного кодирования. Например, скорость 1228,8 Мбит/с соответствует скорости кодирования 122,88 МГц для кодера со скоростью 8/10, а последующее деление частоты в 32 раза обеспечивает базовую скорость передачи элементарных посылок UMTS.

Таблица 2.1

Варианты скоростей CPRI V.7.0

Скорость в линии, Мбит/с	Номер опции	Линейное кодирование	Правило формирование скорости, Мбит/с
614,4	1	8/10	$1 \times 491,52 \times 10/8$
1228,8	2	8/10	$2 \times 491,52 \times 10/8$
2457,6	3	8/10	$4 \times 491,52 \times 10/8$
3072,0	4	8/10	$5 \times 491,52 \times 10/8$
4915,2	5	8/10	$8 \times 491,52 \times 10/8$
6144,0	6	8/10	$10 \times 491,52 \times 10/8$
9830,4	7	8/10	$16 \times 491,52 \times 10/8$
8110,08	7a	64/66	$16 \times 491,52 \times 66/64$
10 137,6	8	64/66	$20 \times 491,52 \times 66/64$
12 165,12	9	64/66	$24 \times 491,52 \times 66/64$
24 330,24	10	64/66	$48 \times 491,52 \times 66/64$

Передача ведётся кадрами, формат которых меняется в зависимости от скорости. На рис. 2.12 и 2.13 показаны, соответственно, базовый кадр для наименьшей скорости передачи и кадр для удвоенной скорости.

На основе базовых кадров организуется сложная иерархическая система передачи, показанная на рис. 2.14. Можно видеть, что 256 базовых кадров объединяются в гиперкадр. 150 гиперкадров образуют «CPRI Frame 10 мс». До 4096 таких фреймов объединяются в фрейм «40,96 с».

Оборудование данного интерфейса может работать в нескольких вариантах топологии: одиночный линк «точка – точка», несколько линков «точка – точка», топология «звезда», топология «цепочка», топология «дерево», топология «кольцо».

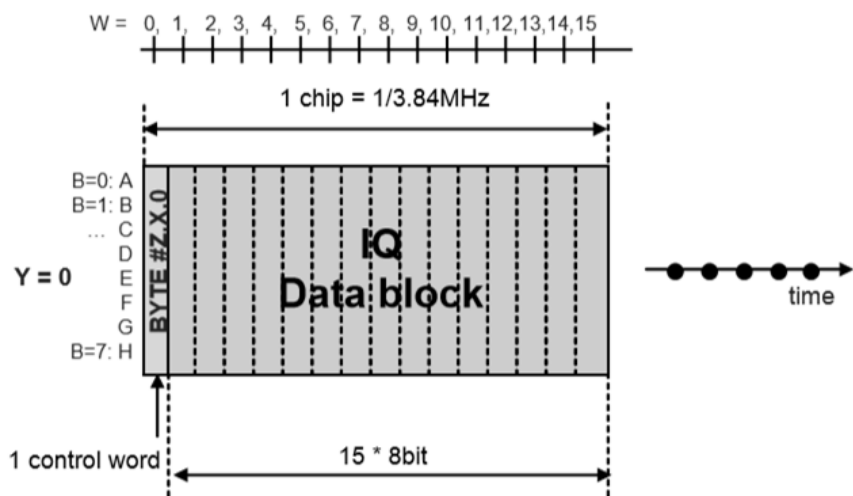


Рис. 2.12. Структура базового кадра для 614,4 Мбит/с

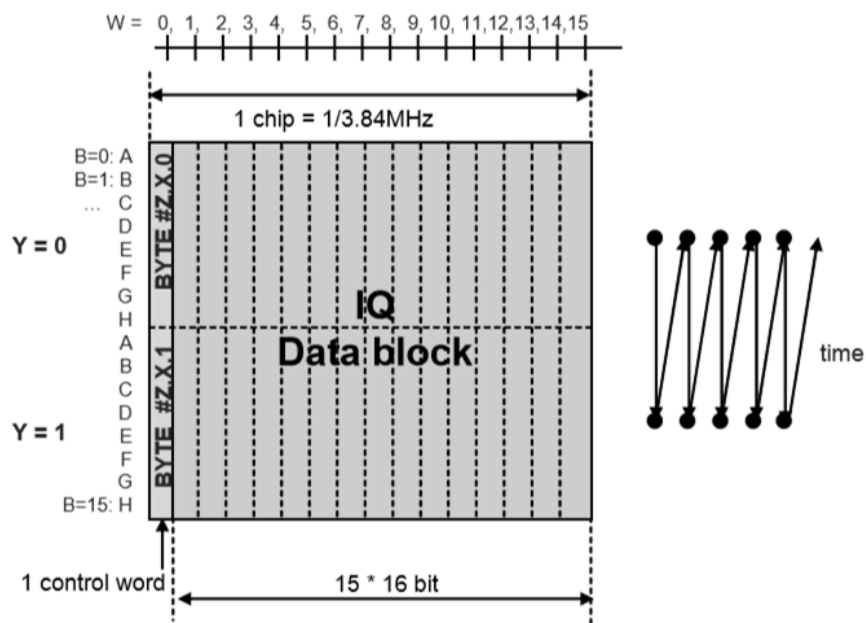


Рис. 2.13. Структура базового кадра для 1228,8 Мбит/с



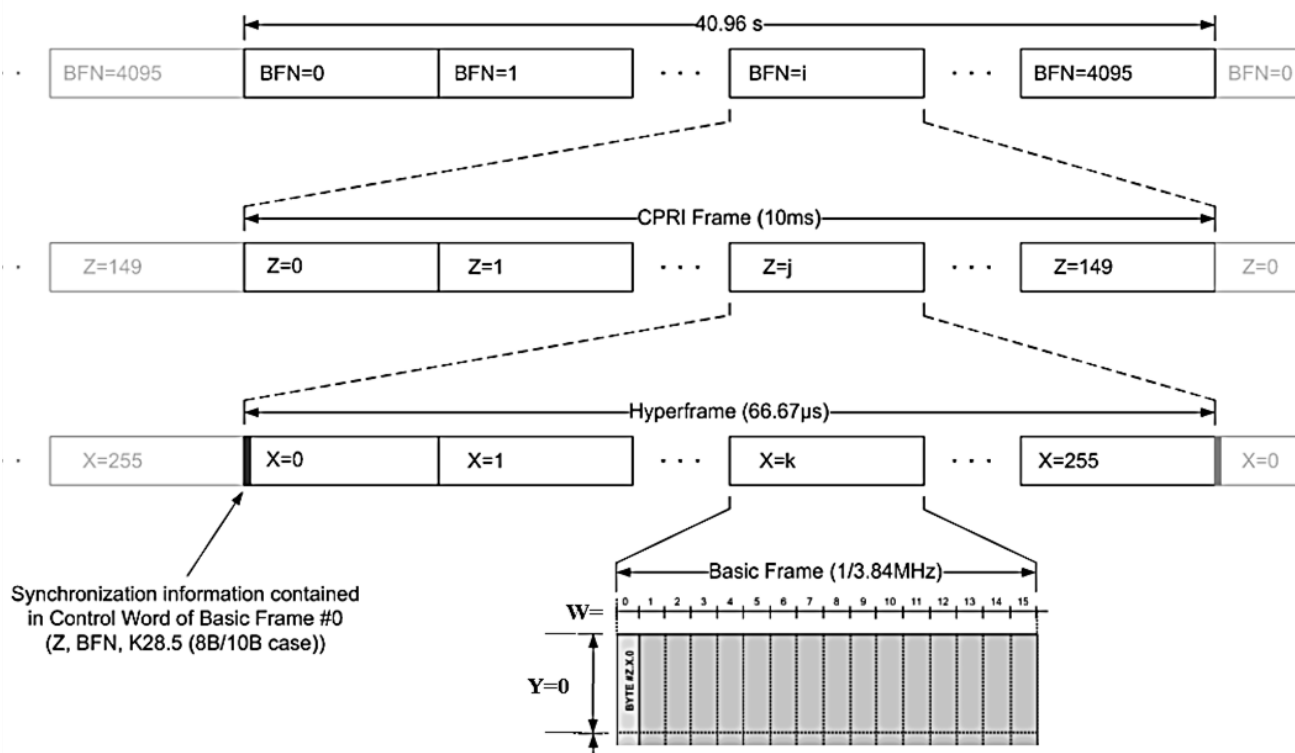


Рис. 2.14. Иерархия кадров CPRI

Процедура проектирования fronthaul сводится к выбору маршрута (длины) оптического кольца для соединения сайтов с RRU/RU, выбору оборудования для организации передачи по ВОЛС, расчёту необходимой скорости передачи по интерфейсу CPRI как для каждого RRU, так и в целом для кольца, расчёту задержки передачи по fronthaul.

Приведём пример расчётов для кольца fronthaul, соединяющего 10 трёхсекторных сайтов LTE с частотным дуплексом и полосой 10 МГц, MIMO 2×2. Расчёт выполним на основе методики из [12–14].

Для расчёта необходимой скорости передачи в интерфейсе CPRI следует знать частоту дискретизации для выбранной полосы. Основные параметры формирования сигналов LTE приведены в табл. 2.2.

Расчёт скорости иллюстрирует рис. 2.15. При полосе радиоканала в 10 МГц частота дискретизации составляет  $F_D = 15,36$  МГц, а период дискретизации будет равен

$$T_D = 1/(15,36 \text{ МГц}) = 65,10 \text{ нс.}$$

Для квантования каждого отсчёта в LTE используется 15 бит. Таким образом, необходимая скорость I/Q данных составит

$$R = 2 \cdot 15 \cdot 15,36 \text{ МГц} = 460,8 \text{ Мбит/с.}$$

Параметры сигнала OFDM DL в радиointерфейсе LTE

Ширина полосы, МГц	Частота дискретизации (тактовая частота), МГц	Размер окна БПФ	Количество поднесущих
1,25	$1/2 \times 3,84 = 1,92$	128	76
2,5	$1 \times 3,84 = 3,84$	256	151
5	$2 \times 3,84 = 7,68$	512	301
10	$4 \times 3,84 = 15,36$	1024	601
15	$6 \times 3,4 = 23,04$	1536	901
20	$8 \times 3,84 = 30,72$	2048	1201

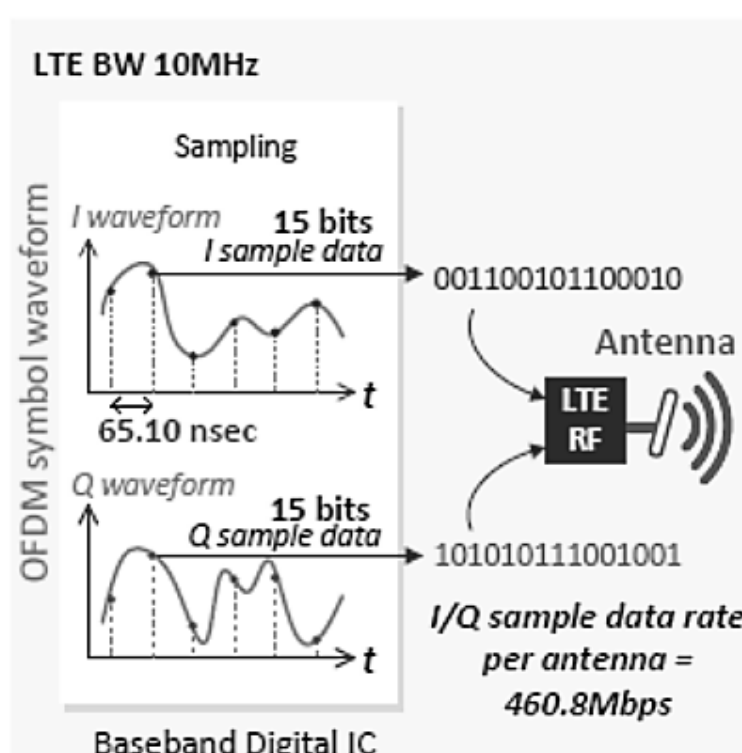


Рис. 2.15. Формирование скорости CPRI для полосы LTE 10 МГц

При использовании технологии MIMO эта скорость должна быть умножена на количество передающих антенн в соте. В нашем случае необходимо умножить полученную скорость на 2:

$$R = 2 \cdot 460,8 \text{ Мбит/с} = 921,6 \text{ Мбит/с.}$$

В интерфейсе CPRI применяется две версии линейного избыточного кодирования со скоростями 8/10 и 64/66 Мбит/с. Следовательно, скорость закодированных данных в интерфейсе составит

$$R_{LC} = 921,6 \cdot (10/8) = 1\,152,0 \text{ Мбит/с},$$

$$R_{LC} = 921,6 \cdot (66/64) = 950,4 \text{ Мбит/с}.$$

Выбирая большее значение скорости (1152,0) и сравнивая его с рядом скоростей CPRI из табл. 2.1, мы видим, что для одного RRU можно использовать стандартный поток 1228,8 Мбит/с (опция скорости № 2). Тогда для сайта из трёх антенн потребуется поток CPRI с «утроенной» скоростью 3686,4 Мбит/с. Для его передачи подойдёт стандартный поток 4915,2 Мбит/с (опция скорости № 5).

Суммарный поток в оптическом кольце из 10 сайтов составит

$$R = 10 \cdot 4\,915,2 \text{ Мбит/с} = 49\,152,0 \text{ Мбит/с} = 49,152 \text{ Гбит/с}.$$

Видно, например, что эта скорость заметно меньше максимально возможной для модулей HSN-8500/8300 в 180 Гбит/с, которая достигается при использовании технологии DWDM (см. рис. 2.7). Можно сделать вывод, что такое решение для транспортной системы будет работоспособным.

Расчёт максимальной длины оптических линий выполним на основе методики из [14], где указывается, что эта максимальная длина в оптическом fronthaul определяется не затуханием сигнала в линии, а исключительно требованиями по задержкам при обмене между устройствами. Например, это расстояние ограничено требованием синхронизации процедуры гибридного автоматического переспроса (HARQ), используемой в качестве механизма повторной передачи между UE и eNB в сети LTE.

На рис. 2.16 поясняются на схеме fronthaul основные требования по задержкам. Как видно, существует жёсткое требование, чтобы задержка в точке приёма-передающей антенны от момента приёма кадра данных от мобильной станции до момента отправки подтверждения ACK/NACK не превышала 3 мс для системы LTE. Соответственно, эта задержка распадается на сумму задержек обработки сигналов во всех устройствах fronthaul и задержки распространения по оптической линии.

В табл. 2.3 приведена сводка всех элементов транспортной сети, участвующих в создании общей задержки. Затем в табл. 2.4 выполнена калькуляция всех компонент задержки с целью определения максимально возможной задержки в оптической линии и определения её максимальной длины. При этом используются типовые значения всех параметров для наихудшего случая. Задержка при распространении «туда-назад» на дистанцию в 1 км в оптической линии выбрано 10 мкс/км, что также является средним типовым значением.

Работа без инкапсуляции OTN (Optical Transport Network) происходит, когда по оптике передаются сигналы непосредственно в формате CPRI, т. е. без дополнительного преобразования в иной формат оптической сети.

Следует обратить внимание, что в табл. 2.3–2.4 и на рис. 2.16 имеются общая цифровая нумерация и буквенная индексация для обозначения процедур, интерфейсов и устройств в сети fronthaul, которые создают или могут создавать задержки при передаче сигналов.

Таблица 2.3

Основные задержки в сети fronthaul

<b>2.1</b> Rx-антенна – модем	<b>2.2</b> Обработка в BBU	<b>2.3</b> Модем – Rx-антенна
а. Задержка в RRU	е. Задержка преобразования CPRI/BBU	j. Задержка передачи по оптике до RRU
б. Задержка преобразования RRU/CPRI	ф. Декодирование кадра UL	к. Задержка в ином активном оборудовании
с. Задержка передачи по оптике до BBU	г. Создание ACK/NACK	l. Задержка преобразования CPRI/RRU
д. Задержка в ином активном оборудовании	h. Создание кадра DL	м. Задержка в RRU
—	и. Задержка преобразования BBU/CPRI	—

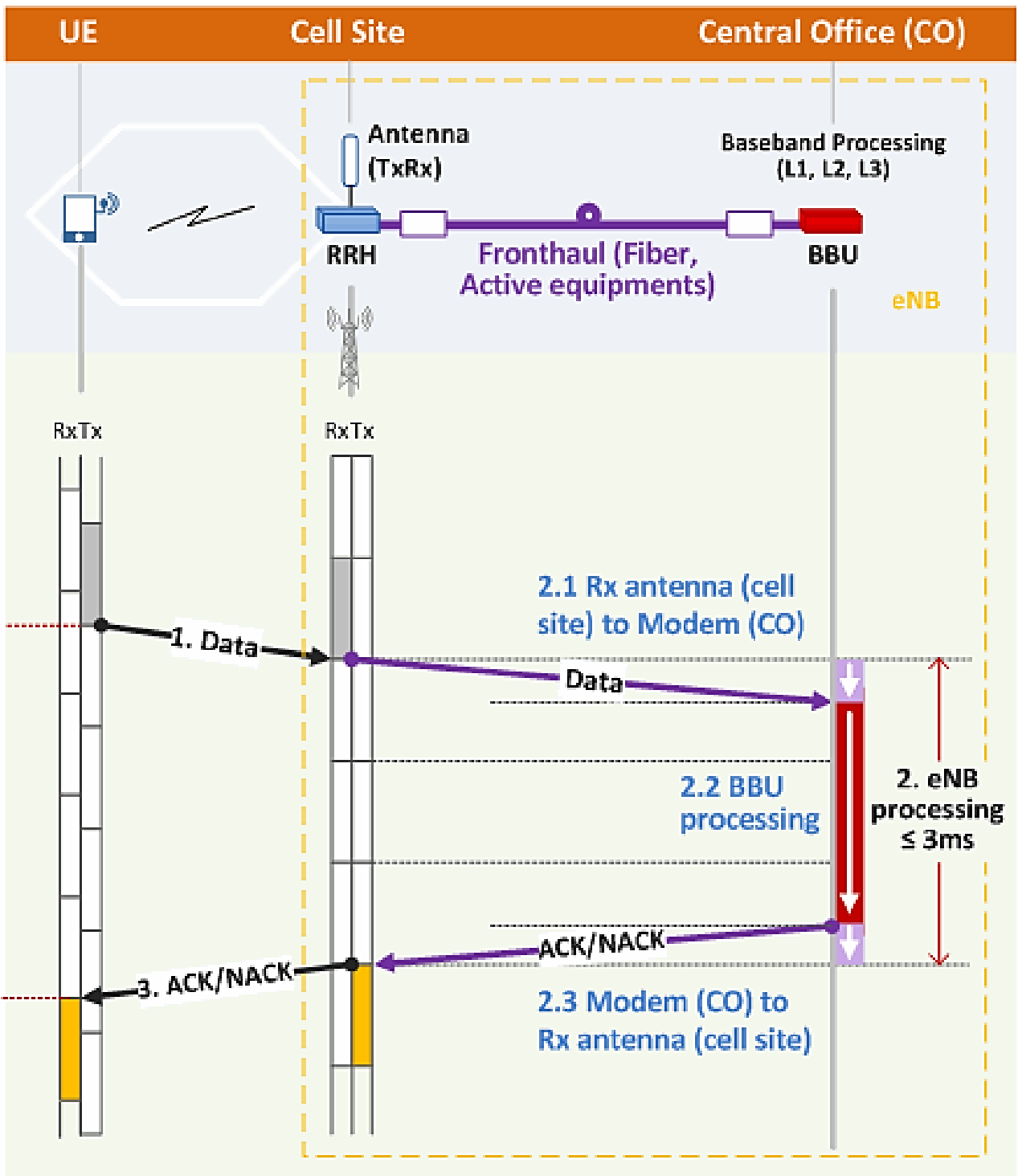


Рис. 2.16. Структура задержек в C-RAN

Калькуляция максимальной длины оптической линии

Компонента задержки (в обе стороны)	Источник задержки	Описание	Типовое значение
(1) Обработка в RRU	RRU	$a + m$	25–40 мкс
(2) Преобразование в CPRI-формат	RRU, BBU	$b + e + i + l$	10 мкс
(3) Обработка в BBU	BBU	$f + g + h$	2700 мкс
(4) Обработка в оборудовании fronthaul	Активные устройства сети fronthaul	$d + k$	40 мкс (OTN-инкапсуляция), 1 – 4 мкс (без OTN-инкапсуляции)
Максимальная задержка в линии, T (без OTN-инкапсуляции)	$T = 3 \text{ мс} - (1 + 2 + 3 + 4) = 3 \text{ мс} - (40 \text{ мкс} + 10 \text{ мкс} + 2700 \text{ мкс} + 4 \text{ мкс}) = \mathbf{246 \text{ мкс}}$		
Максимальная длина линии	$D_{\max} = T / (10 \text{ мкс/км}) = 246 \text{ мкс} / 10 \text{ мкс/км} = \mathbf{24,6 \text{ км}}$		

Найденное значение (24,6 км) сравнивается со значением реальной длины оптического кольца fronthaul, которое можно найти по картам Google Maps, воспользовавшись опцией измерения расстояний на плане города. Следует обратить внимание, что оптические линии в городах прокладывают строго вдоль улиц в канализации связи. В длину кольца надо добавить отрезки оптической линии для подъёма на высоту мачт сайтов (на крыши зданий, где они установлены).

### 2.3. Интегрированный доступ и транспорт IAB для 5G

Как было показано в 1.4, на площади городской микросоты (радиус до 1000 м), обслуживаемой одной базовой станцией gNB, потребуется развернуть десятки пикосот outdoor (вне зданий, радиус 50–150 м) и ещё больше фемтосот indoor (внутри зданий). Такое существенное повышение плотности базовых станций на территории невозможно без модифицирования транспортной сети (backhaul), посредством которой все базы соединяются с подсистемой коммутации (core network).

В настоящее время транспортная сеть backhaul физически реализуется с использованием оптоволоконных линий, прокладываемых в городской канализации связи, или с использованием радиолинков (радиорелейных линий). Только второй вариант без ограничений подходит для быстрого и гибкого развёртывания большого количества пикосотовых базовых станций. Однако классическая архитектура сотового сайта с транспортным радиолинком, показанная на рис. 2.17, *а*, неприемлема из-за высокой цены на транспортное оборудование и необходимости платить за дополнительный радиоспектр, который этот радиолинк использует. Кажется вполне логичным, что при использовании в 5G цифровых антенных решёток с синтезируемыми узкими лучами ДН было предложено выделить один такой луч для транспортного обмена, в то время как остальные лучи будут по-прежнему обеспечивать беспроводной доступ (access) терминалов в соте. Такое решение получило название интегрированного доступа и транспорта – Integrated Access and Backhaul, IAB [9, 10]. Более точно в случае использования одной и той же антенной решетки для доступа и транспорта говорят о virtual IAB Mobile Termination (vIAB-MT). Вариант архитектуры сайта при vIAB-MT показан на рис. 2.17, *б*. На рисунке обозначены: RRU – remote radio unit; BBU – baseband unit; IDU/ODU – indoor/outdoor unit; CPRI – common public radio interface; IF – intermediate frequency; DU – distributed unit.

Следует отметить, что в общем случае для транспортного линка в рамках технологии IAB может использоваться и отдельная направленная антенна, так как трансиверы RRU предусматривают подключение к ним нескольких антенн. Такое решение сайта называется IAB-MT. При этом сохраняется главное принципиальное отличие IAB: транспортный линк и линк доступа используют одинаковую технологию передачи на основе OFDMA и одинаковый диапазон частот.

Топология соединения пикосотовых базовых станций типа Pole Station по технологии IAB показана на рис. 1.22 и состоит из двух вариантов: цепочечное и древовидное соединение базовых станций.

Система названий, введённая для обозначения элементов топологии транспортной сети IAB [9, 10], представлена на рис. 2.18. Первая базовая станция в цепочке или корневая станция в «дереве» подключаются по высокопроизводительному оптическому каналу к Core Network. Такие базы играют роль доноров – IAB Donor – всей вышестоящей транспортной сети. Остальные базовые станции в сети именуется просто узлами IAB Node.

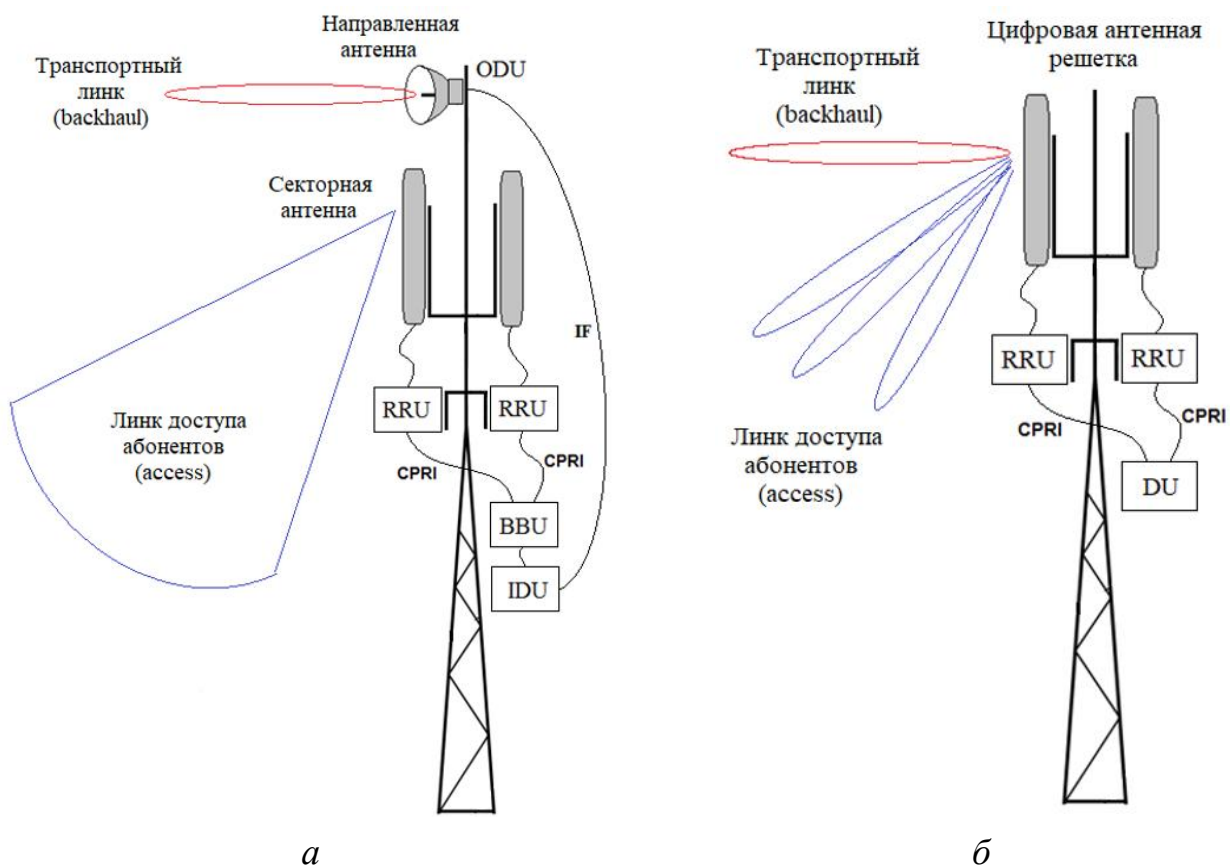


Рис. 2.17. Архитектура сайтов с беспроводным транспортным линком:   
 а – сайт для стандартов 3G–4G; б – сайт 5G NR с технологией vIAB

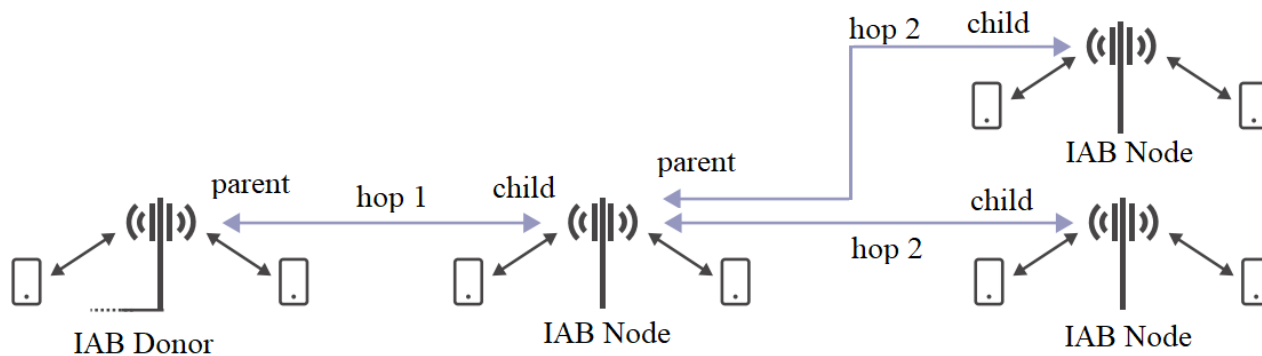


Рис. 2.18. Система названий для обозначения элементов топологии транспортной сети IAB



Передача транспортной информации от донора к ближайшему узлу (узлам) и от него далее называется переходом (англ. hop – перескок). Соответственно, появляется понятие номера, или порядка перехода. Все узлы в цепочке, начиная от донора и далее, вступают между собой в иерархические отношения по схеме «parent – child», или «родительский узел – дочерний узел».

Передача информации в радиointерфейсе 5G NR, как и в LTE, носит гранулированный характер. В качестве минимальной гранулы выступает ресурсный блок Resources Block (RB), состоящий из 12 поднесущих. Для частотного диапазона FR2 предусмотрены нумерологии, равные 3 и 4. Количество передаваемых RB для этих нумерологий представлены в табл. 2.5. Около 10 % ресурсных блоков используются для служебных целей (синхронизация, управление антеннами и лучами, опорные сигналы, измерения и т. п.). Важно также отметить, что для FR2 стандартизирован только временной дуплекс TDD.

Таблица 2.5

Количество ресурсных блоков RB в радиointерфейсе 5G NR для диапазона FR2

Нумерология	Разнос поднесущих, кГц	Минимальное количество RB	Максимальное количество RB	Минимальная ширина канала, МГц	Максимальная ширина канала, МГц
3	120	24	275	34,56	396
4	240	24	138	69,12	397,44

В первом приближении можно считать, что по транспортной сети backhaul будут доставляться RB, необходимые для обслуживания нагрузки в сотах, в линиях доступа. Но и транспортные RB, и RB доступа будут черпаться из одного и того же ресурса. Положим, что используется нумерология 3 и минимальная ширина канала 34,56 МГц с двадцатью ресурсными блоками для трафика. Например, если двум оконечным базам на рис. 2.18 потребуется по 10 RB для обслуживания нагрузки, то донорская база и база первого перехода останутся совершенно без возможности обслуживать свою собственную нагрузку в данный квант времени.

Очень опасны для IAB сети проблемы в радиоканалах транспортных линков, поскольку во всех системах с OFDMA в этом случае выполняется переход к модуляции поднесущих в RB от более эффективного вида модуляции на менее эффективный по скорости, но более помехоустойчивый. Представим

себе, что в нашем примере для сети на рис. 2.18 крайние базы ждут ресурсные блоки с битной ёмкостью, соответствующей модуляции 16QAM, а на участке первого перехода из-за интерференции, например, возможна передача лишь с модуляцией QPSK, которая в четыре раза «медленнее». В оконечных сотах произойдёт блокировка в реализации востребованных абонентами сервисов.

Не столь очевидное влияние на производительность работы сети с технологией IAB оказывает топология самой этой сети. В [10] было выполнено моделирование производительности сети, состоящей из трёх доноров и 54 пикосот, распределённых на некоторой территории. В первом случае доноров и другие узлы соединили по критерию высокого качества транспортного радиоканала (максимизации в линках RSRP – Reference Signal Received Power). Во втором случае использовали критерий «не более трёх дочерних узлов от каждого родительского», или иначе – не более трёх прямых соединений для каждого узла. Два метода создают очень разные топологии с точки зрения порядка переходов. Критерий максимизации RSRP даёт меньший порядок переходов в целом (до четырёх в модели), но приводит к множественным переходам от одного родительского узла IAB. В случае ограничения количества прямых соединений до трёх наблюдается рост порядка переходов до семи.

Численные результаты моделирования показаны в табл. 2.6. Хотя среднее число переходов увеличено, топология с дочерним ограничением в три узла имеет в 10 раз лучшую воспринимаемую пользователем пропускную способность (user perceived throughput, UPT) 5%-го перцентиля. Он также имеет на 75 % лучшую среднюю пропускную способность DL (50%-й перцентиль) по сравнению с методом максимизации RSRP.

Таблица 2.6

Сравнение UPT для различных топологий IAB

Метод формирования топологии транспортной сети	Пропускная способность, Мб/с	
	5%-й перцентиль UPT	50%-й перцентиль UPT
Максимизация RSRP	8	160
Три прямых соединения для узла	80	280

В [10] полагается, что столь существенная разница связана с меньшей перегрузкой начальных транзитных переходов от трёх узлов-доноров, а нагрузка лучше сбалансирована и распределена по топологии сети IAB.

## 2.4. Задание для практической работы студентов

1. На основе вариантов из табл. 2.7 выполнить расчёт необходимой пропускной способности сети fronthaul для сайтов LTE. Сделать выводы о возможности использования оборудования, показанного на рис. 2.7.

Таблица 2.7.

Варианты для выполнения индивидуальных заданий

Параметр	Вариант				
	1	2	3	4	5
Ширина полосы канала, МГц	1,25	5	10	15	20
Количество секторов в сайте	3	3	2	2	3
Вариант MIMO	нет	8×8	4×4	2×2	2×2
Количество сайтов в кольце	20	10	12	8	15
Вариант кодирования	64/66	8/10	64/66	8/10	64/66
Параметр	Вариант				
	6	7	8	9	10
Ширина полосы канала, МГц	1,25	5	5	10	15
Количество секторов в сайте	3	2	2	3	3
Вариант MIMO	нет	2×2	2×2	4×4	8×8
Количество сайтов в кольце	20	20	10	13	9
Вариант кодирования	64/66	64/66	8/10	8/10	64/66

2. Используя сервис Google Maps и приняв действующий радиус сайта 5G NR по UL 250 м, разместить точки установки RU на крышах зданий вдоль проспекта Независимости (г. Минск) на участке от Радиотехнического колледжа до Минского почтамта. Измерить необходимую длину оптического кольца fronthaul при размещении пула CU/DU в здании ЦУМа. В расчёте полагать высоту установки RU относительно земли 25 м.

3. Используя сервис Google Maps и приняв действующий радиус покрытия по UL для Pole Station в 35 м, найти необходимое их количество для покрытия ул. П. Бровки (от проспекта Независимости до ул. Ботаническая). Полагая, что используется технология IAB, оценить минимальный коэффициент усиления антенны (виртуального луча) транспортного линка при подводимой к антенне (лучу) мощности 100 мВт, чувствительности на приёме минус 85 дБм и рабочей частоте 25 ГГц. Потерями в разъёмах, джамп-кабелях и т. п. пренебречь.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. The spectrum policy dictionary. Spectrum primer series. GSMA. Produced February 2017 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2017/04/Spectrum-Policy-Dictionary.pdf>.
2. GSM system survey. Student text. EN/LZT 123 3321 R2C. Copyright © 1999 by Ericsson Radio Systems AB. P. 229–230 [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.academia.edu/24399074/GSM\\_SYSTEM\\_SURVEY](https://www.academia.edu/24399074/GSM_SYSTEM_SURVEY).
3. Аксёнов, В. А. Расчёт параметров зон системного блокиратора для сетей сотовой подвижной электросвязи стандарта GSM / В. А. Аксёнов, А. Г. Галкин // Весн. сувязі. – 2007. – № 2 (82). – С. 36–42.
4. Аксёнов, В. А. Вертикальная секторизация для совместной работы узкополосного интернета вещей и мобильных сервисов 3G / В. А. Аксёнов, С. В. Смоляк, М. Ю. Хоменок // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных : материалы Междунар. науч.-техн. семинара (Респ. Беларусь, Минск, нояб. – дек. 2019 г.). – Минск : БГУИР, 2019. – С. 43–48.
5. Аксёнов, В. А. Влияние промышленного радиопомех на радиус соты с технологией узкополосного интернета вещей / В. А. Аксёнов, С. В. Смоляк, М. Ю. Хоменок // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных : материалы Междунар. науч.-техн. семинара (Респ. Беларусь, Минск, нояб. – дек. 2020 г.). – Минск : БГУИР, 2020. – С. 28–32.
6. Small cell networks: Deployment, Management, and Optimization / H. Claussen [et al.] ; The Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc. – John Wiley & Sons, Inc, 2017. – 555 p.
7. Wannstrom, J. Heterogeneous Networks in LTE [Электронный ресурс] / J. Wannstrom, K. Mallinson. – 2023. – URL: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/1576-hetnet>.
8. 5G multi-antenna technology NTT [Электронный ресурс] / S. Suyama [et al.] // DOCOMO Techn. J. – Vol. 17, № 4. – Apr. 2016. – 2023. – URL: [https://www.docomo.ne.jp/english/binary/pdf/corporate/-technology/rd/technical\\_journal/bn/vol17\\_4/vol17\\_4\\_004en.pdf](https://www.docomo.ne.jp/english/binary/pdf/corporate/-technology/rd/technical_journal/bn/vol17_4/vol17_4_004en.pdf).
9. IAB – the cost-effective solution to quickly expand 5G mmWave coverage [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: <https://www.rcrwireless.com/20200727/5g/iab-the-cost-effective-solution-to-quickly-expand-5g-mmwave-coverage-analyst-angle>.

10. 5G Americas White paper. Innovations in 5G Backhaul Technologies: IAB, HFC & Fiber. Copyright 2020 5G Americas [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: <https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2020/06/Innovations-in-5G-Backhaul-Technologies-WP-PDF.pdf>.

11. CPRI Specification V7.0 (2015-10-09). © 2015 Ericsson AB, Huawei Technologies Co. Ltd, NEC Corporation, Alcatel Lucent, and Nokia Networks [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: [http://www.cpri.info/downloads/CPRI\\_v\\_7\\_0\\_2015-10-09.pdf](http://www.cpri.info/downloads/CPRI_v_7_0_2015-10-09.pdf).

12. An overview of the CPRI specification and its application to C-RAN based LTE scenarios [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/288497258.pdf>.

13. Required CPRI link capacity in function of radio technologies [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: <https://www.netmanias.com/en/post/oneshot/6259/c-ran-fronthaul-cpri/required-cpri-link-capacity-in-function-of-radio-technologies>.

14. Fronthaul size: calculation of maximum distance between RRH and BBU. April 01, 2014 | By Dr. Harrison J. Son, S. M. Shin [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: <http://www.netmanias.com/en/post/blog/6276/c-ran-fronthaul-lte/fronthaul-size-calculation-of-maximum-distance-between-rrh-and-bbu>.

*Учебное издание*

**Аксёнов Вячеслав Анатольевич**

**ГЕТЕРОГЕННЫЕ РАДИОСЕТИ  
МОБИЛЬНОГО И ФИКСИРОВАННОГО ДОСТУПА**  
**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**

Редактор *А. С. Мигно*

Корректор *Е. Н. Батурчик*

Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоя*

Подписано в печать 16.05.2023. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 3,84. Уч.-изд. л. 4,0. Тираж 50 экз. Заказ 174.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.  
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск