

Анализ проблемы развертывания при планировании покрытия сети 5G

И. В. Алиев, В. И. Носов

Сибирский гос. унив. телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ)

Аннотация: Глобальный спрос на услуги мобильного Интернета с более высокой пропускной способностью стимулирует постоянную эволюцию технологий сотовой связи. Сегодня сотовые сети насыщены частотами ниже 3 ГГц. Для обеспечения требуемого увеличения скорости передачи данных требуется большая пропускная способность в более высокочастотном диапазоне. Из-за растущих требований к пропускной способности мобильные сети 5-го поколения (5G) нацелены на диапазон частот от 3 до 6 ГГц (FR1). Также для сетей 5G планируется использование частот в диапазоне 24–29 ГГц. Несмотря на ожидаемое широкое использование диапазона частот от 3 до 6 ГГц, имеется мало эмпирических данных о потерях в тракте и опыте планирования сетей мобильной радиосвязи. В данной работе разработана методика определения зоны покрытия базовой станции сети 5G при учёте большинства параметров аппаратуры и сигналов для разных моделей распространения сигнала. Получено выражение для определения скорости передачи данных в аппаратуре 5G-NR в режиме TDD. Представлены результаты расчётов зоны покрытия на примере города Новосибирска для частоты 4.8 ГГц. Проанализирована проблема развертывания при планировании покрытия сети 5G.

Ключевые слова: методика определения покрытия сети 5G, определение скорости передачи данных в сети 5G, модель распространения Лонгли–Райса, модель 3GPP 5G-NR.

Для цитирования: Алиев И. В., Носов В. И. Анализ проблемы развертывания при планировании покрытия сети 5G // Вестник СибГУТИ. 2024. Т. 18, № 2. С. 13–31.
<https://doi.org/10.55648/1998-6920-2024-18-2-13-31>.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Алиев И. В., Носов В. И., 2024

Статья поступила в редакцию 20.07.2023;
переработанный вариант – 14.12.2023;
принята к публикации 17.12.2023.

1. Введение

Увеличение скорости передачи данных в сотовой сети, удовлетворение потребности растущего спроса на передачу данных, обеспечение необходимым качеством услуг большего количества устройств являются основными задачами при разработке новых поколений сотовой связи. В сетях сотовой связи следующего (пятого) поколения 5G предполагается использование самых разнородных устройств, так называемых устройств Интернета вещей (IoT), увеличение пропускной способности до 20 Гбит/с в нисходящей линии и до 10 Гбит/с в обратном направлении, увеличение количества абонентов в 10–100 раз. Постоянно растущий спрос на передачу данных приведет к острой нехватке доступных полос частот в нижних участках спектра и к росту стоимости радиочастотного спектра. Дефицит проявляется особенно остро в нижних участках частотного спектра до 6 ГГц. Из-за проблем с нехваткой более привлекательного частотного спектра в нижних диапазонах в сетях пятого поколения

рассматривается возможность использования высоких (десятки гигагерц) частот, где возможно применение широких полос частот.

Сеть 5G потребует очень высокого уровня доступности сети (99.999 %) и очень высокой надежности сети (99.99 %), что потребует 100 % покрытия сети [1]. Поэтому оптимальное планирование покрытия сети будет ключевым фактором для обеспечения всех требований сети 5G и предоставления пользователям необходимых услуг. Это позволит выполнить все ключевые показатели эффективности сети 5G.

В то время как диапазон 3.5 ГГц был принят в некоторых частях мира для использования в недавно развернутых сетях 5G NR, для развертывания сетей 5G на территории РФ выбраны диапазоны частот 4.4–4.9 ГГц и 24.25–24.65 ГГц. Поскольку большинство существующих приложений мобильной связи используют частоты ниже 3 ГГц, имеется мало эмпирических данных о потерях в тракте и опыте планирования сетей мобильной радиосвязи для диапазона частот от 3 до 6 ГГц. Соответственно, целью данной работы является определение максимальной дальности связи на частотах диапазона 4.8 ГГц, на которых обеспечиваются все ключевые показатели эффективности сети 5G.

Согласно [2] при использовании модели распространения Лонгли–Райса дальность связи от абонентского терминала (АТ) к базовой станции (БС) в сети 5G составила 27.47 км.

В данной работе разработана методика определения зоны покрытия базовой станции сети 5G при учёте большинства параметров аппаратуры и сигналов с использованием моделей распространения сигнала Лонгли–Райса и рекомендации 3GPP 5G-NR. Представлены результаты расчётов зоны покрытия на примере города Новосибирска для частоты 4.8 ГГц. По полученным результатам произведена сравнительная оценка дальности связи для системы 5G с учетом требуемых запасов на различные условия приёма сигналов. Получено выражение для определения скорости передачи данных в аппаратуре 5G-NR в режиме TDD. Проанализирована проблема развертывания при планировании покрытия сети 5G.

2. Модели распространения радиоволн

В системах связи с подвижными объектами установление соединения по радиоканалу между БС и АТ осуществляется при непрерывном изменении условий радиосвязи. Поэтому произвести точный расчет дальности связи не представляется возможным и приходится оперировать вероятностными величинами. Электромагнитное поле в точке приема является результатом взаимодействия прямой волны и волн, отраженных от поверхности земли, неоднородностей рельефа местности, строений. Кроме того, уровень сигнала в точке приема зависит от условий рефракции земной волны при меняющейся атмосфере, а также от дифракции на местных предметах.

Для описания поведения излучаемого сигнала между передатчиком и приёмником в математической форме используются модели распространения радиоволн. Модели распространения радиоволн используются для определения максимальной дальности связи между передатчиком и приёмником на основе максимально допустимых потерь между ними.

Существуют детерминированные (модель Логли – Райса, метод трассировки лучей, метод изображения), эмпирические (модель Окамура–Хата, 3GPP TR 38.901 5G-NR, COST231 – Уолфиша–Икегами) и стандартизированные модели распространения для планирования радиосетей [4]. Детерминированные модели являются вычислительно сложными, требуют высокой степени детального описания и калибровки среды, способны обеспечить точные результаты. Между тем эмпирические и стандартизированные модели основаны на экспериментальных измерениях и широко применяются для прогнозирования средних потерь на пути распространения как функции расстояния, частоты и некоторых других специфичных параметров. Специфичные параметры, используемые в эмпирических и стандартизованных моделях, зависят от окружающей среды и инфраструктуры. Эмпирические и стандартизированные модели требуют всего несколько параметров для обеспечения приемлемой точности

прогнозирования. Такие модели были оптимизированы для оценки потерь на пути распространения (PL – path loss) при использовании частот диапазона до 2 ГГц, поскольку большинство приложений мобильной связи используют данные частоты. В дальнейшем использование данных моделей было оптимизировано для частот до 2.5 ГГц. На частотах выше 3 ГГц для описания поведения излучаемого сигнала между передатчиком и приёмником возможно использование моделей распространения согласно рекомендациям 3GPP TR 38.901 5G-NR, ITU-R.525-2 и Лонгли–Райса.

Так как недооценка потерь на пути распространения может привести к образованию теневых зон в покрытии, переоценка потерь также нежелательна, поскольку это приводит к серьезным проблемам с межсотовой интерференцией. Для точного прогнозирования существующие модели должны быть оптимизированы для условий, в которых они будут использоваться, и при необходимости скорректированы [5].

При распространении в реальных условиях зачастую сложно соблюдать прямую видимость между приёмником и передатчиком. Кроме того, проникновение сигналов с улицы в помещение зависит от материалов здания и сильно варьируется даже в пределах одной и той же зоны покрытия сотовой связи. В плотной городской застройке на пути распространения радиочастотного сигнала существует много поглощающих и отражающих препятствий (например: здания, автомобили, деревья и т.д.). Потери на пути распространения, включающие потери проникновения в здания, вычисляются согласно рекомендации 3GPP TR 38.913 [6]:

$$PL_{\Sigma} = PL_b + PL_{tw} + PL_{in}, \text{ дБ}, \quad (1)$$

$$L_{\text{Бетон}} = 5 + 4 \cdot f, \text{ дБ}, \quad (2)$$

$$L_{\text{Древесина}} = 4.85 + 0.12 \cdot f, \text{ дБ}, \quad (3)$$

$$L_{\text{Стекло}} = 2 + 0.2 \cdot f, \text{ дБ}, \quad (4)$$

где PL_{Σ} – суммарные потери на пути распространения; PL_b – основные потери в свободном пространстве на пути распространения; PL_{tw} – потери проникновения в здание через внешнюю стену; PL_{in} – потери внутри здания, зависящие от глубины проникновения в здание; f – частота, ГГц.

В табл. 1 приведены модели потерь на пути распространения для условий LOS (наличие прямой видимости) и NLOS (отсутствие прямой видимости) согласно рекомендации 3GPP TR 38.901 5G-NR (соответствует рекомендации МСЭ ITU-R.252-2 [8]) «Исследование модели канала для частот от 0.5 до 100 ГГц» для сценария UMa (Urban Macrocell) [6].

В табл. 1 расстояние до точки разрыва d_{BP} согласно рекомендации 3GPP TR 38.901 определяется как:

$$d_{BP} = 4h_{BC}h_{AT}f / c, \quad (5)$$

где f – частота радиоволны, ГГц; h_{BC} , h_{AT} – высоты антенн БС и АТ, м; c – скорость света, м/с.

Таблица 1. Модели потерь на пути распространения
согласно рекомендации 3GPP TR 38.901 5G-NR

Сценарий	Условия	Потери [дБ], f_c [ГГц], d [м]	Теневые замирания (shadow fading) [дБ]	Высота антенны (значения по умолчанию)
UMa	LOS	$PL_{UMa-LOS} = \begin{cases} PL_1 & 10M \leq d_{2D} \leq d_{BP} \\ PL_2 & d_{BP} \leq d_{2D} \leq 5KM \end{cases}$ $PL_1 = 28.0 + 22 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c)$ $PL_2 = 28.0 + 40 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 9 \log_{10}((d_{BP})^2 (h_{BC} - h_{AT})^2)$	$\sigma_{SF} = 4$	$1.5 \text{ м} \leq h_{AT} \leq 22.5 \text{ м}$ $h_{BC} = 25 \text{ м}$
	NLOS	$PL_{UMa-NLOS} = \max(PL_{UMa-LOS}, PL'_{UMa-NLOS})$ для $10M \leq d_{2D} \leq 5 \text{ км}$ $PL'_{UMa-NLOS} = 13.54 + 39.08 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 0.6(h_{AT} - 1.5)$	$\sigma_{SF} = 6$	$1.5 \text{ м} \leq h_{AT} \leq 22.5 \text{ м}$ $h_{BC} = 25 \text{ м}$
		Опционально $PL = 32.4 + 20 \log_{10}(f_c) + 30 \log_{10}(d_{3D})$	$\sigma_{SF} = 7.8$	

Определение расстояния между приёмником БС и приёмником АТ в модели потерь на пути распространения согласно рекомендации 3GPP TR 38.901 5G-NR приведено на рис. 1.

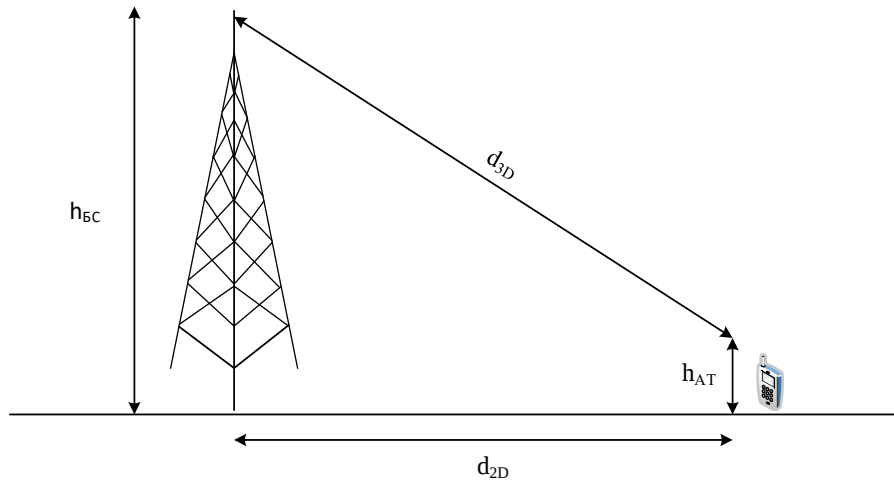


Рис. 1. Определение расстояния между БС и АТ согласно рекомендации 3GPP TR 38.901 5G-NR

Модель Лонгли–Райса (Irregular Terrain Model (ITM)) [9] оценивает потери в тракте распространения радиосигнала от передатчика до приёмника с учётом рельефа местности, включая здания. Данная модель действует в диапазоне частот от 20 МГц до 20 ГГц и обеспечивает оценку потерь в тракте, сочетая физические и эмпирические данные.

Согласно модели Лонгли–Райса, результирующее ослабление PL_0 радиосигнала можно выразить как:

$$PL_0 = PL_{ref} + PL_{fs} + PL_{var}, \quad (6)$$

где PL_{ref} – ослабление дифракцией и рассеянием радиоволны; PL_{fs} – ослабление свободного пространства; PL_{var} – ослабление изменчивостью условий распространения.

Ослабление радиоволны при распространении в свободном пространстве можно выразить как:

$$PL_{fs} = 20 \log(4\pi df / c), \quad (7)$$

где d – расстояние между передатчиком и приёмником, м.

Входные параметры местности для города Новосибирска [9], характеризующие трассу распространения радиосигнала, использованные в модели Лонгли–Райса, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Входные параметры местности

Параметр	Значение
Климат региона	умеренный
Коэффициент рефракции N_0	301
Относительная диэлектрическая проницаемость почвы ε	15
Проводимость почвы σ , См	0.05

Открытая карта улиц OSM (OpenStreetMap – картографический проект по созданию свободной и бесплатной географической карты мира) (рис. 2) и данные рельефа местности (карты SRTM3, Shuttle Radar Topography Mission) для города Новосибирска использованы для определения ослабления сигнала между передатчиком и приёмником.

3. Бюджет радиочастотного канала

Потери на пути распространения определяются как суммарные потери между антенными портами АТ и антенными портами БС и включают в себя усиление антенн, потери в тракте, затенение, потери в здании и т.д.

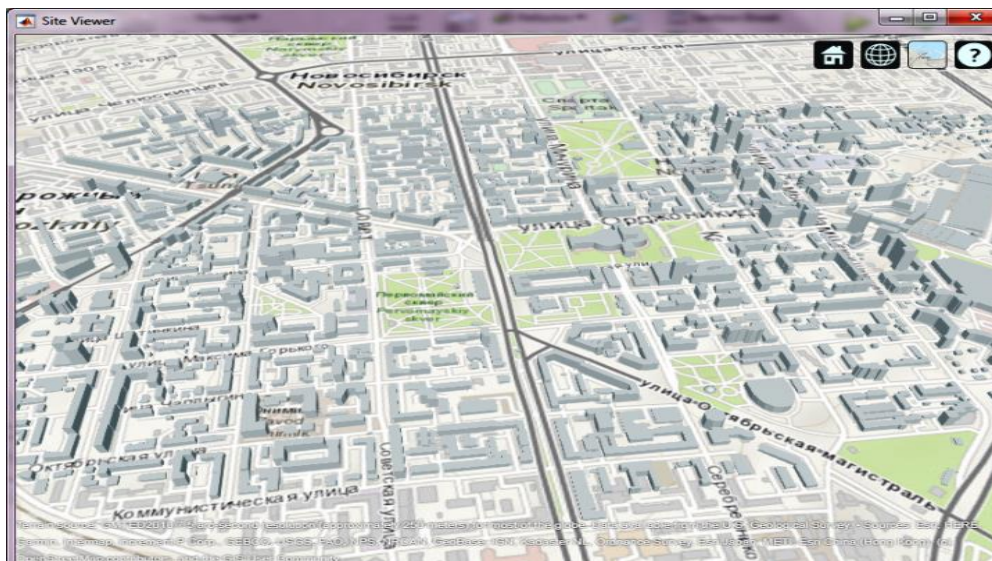


Рис. 2. Пример OSM-карты для города Новосибирска

Максимально допустимые потери (МДП) – это предельное значение потерь в канале связи, при котором услуга может быть предоставлена, которое, следовательно, определяет зону покрытия услуги. МДП в DL [10]:

$$L_{\text{МДП DL}} = P_{\text{RAD BS TX}} - P_{\text{SENS AT RX}}, \quad (8)$$

где $P_{\text{RAD BS TX}}$ – эквивалентный уровень излучаемой мощности передающего устройства базовой станции, дБм; $P_{\text{SENS AT RX}}$ – чувствительность приёмника абонентского терминала, дБм.

МДП в UL:

$$L_{\text{МДП UL}} = P_{\text{RAD AT TX}} - P_{\text{SENS BS RX}}. \quad (9)$$

Предлагаемый шаблон расчета МДП согласно рекомендации 3GPP TR 38.913 приведен в табл. 3.

Таблица 3. Шаблон расчета максимально допустимых потерь

Параметр	Значение
Передатчик	
(1) Уровень излучаемой мощности передатчика, (дБм)	
Приёмник	
(2) Плотность теплового шума (дБм/Гц)	
(3) Коэффициент шума приёмника (дБ)	
(5) Занимаемая полоса частот канала (Гц)	
(6) Уровень мощности теплового шума (2) + (3) + 10 log(5) (дБм)	
(7) Требуемое значение SNR (дБ)	
(8) Чувствительность приёмника (6) + (7) (дБм)	
(9) МДП (1) – (8) (дБ)	

В результате расчёта бюджета канала (рис. 3) определяется уровень мощности сигнала на входе приёмника, который сравнивается с чувствительностью приёмника, чтобы проверить, является ли канал работоспособным.

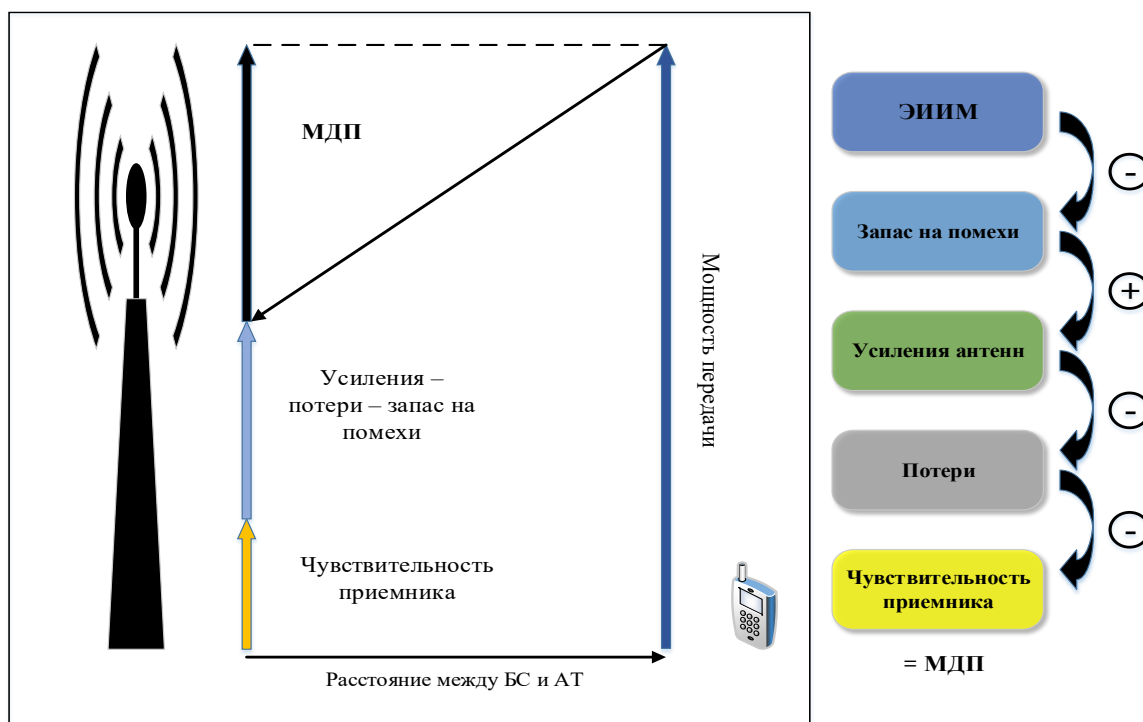


Рис. 3. Принцип расчета энергетического бюджета

Чувствительность приёмника в основном зависит от требований к пропускной способности, поскольку значение SNR напрямую связано с тем, какой пропускной способности мы хотим достичь на границе соты, а для этого важно определить и рассчитать радиус соты.

Предложено выражение для определения скорости передачи данных R_{data} в аппаратуре 5G NR при работе в режиме временного дуплекса TDD:

$$R_{data} (Mbps) = 10^{-6} \cdot K_{par\ subch} \cdot \gamma_{mod} \cdot R_c \cdot BW_{RB}(\mu) \cdot N_{RB} \cdot \frac{N_{OFDM\ in\ CH}}{N_{OFDM\ in\ SLOT}} \cdot (1 - OH), \quad (10)$$

где $K_{par\ subch}$ – количество параллельных подканалов MIMO, ед; $\gamma_{mod} = \log_2 M_{mod}$ – спектральная эффективность M_{mod} позиционной модуляции, (бит/с)/Гц; R_c – скорость кода, ед; $BW_{RB}(\mu)$ – полоса частот, занимаемая одним ресурсным блоком, Гц; μ – нумерология ед; N_{RB} – количество ресурсных блоков, ед; $N_{OFDM\ in\ CH}$ – количество OFDM-символов в канале DL или UL, ед; $N_{OFDM\ in\ SLOT}$ – количество OFDM-символов в слоте, ед; OH – определяет долю служебной информации, для частотного диапазона FR1 принимает значения 0.14 для канала DL и 0.08 для UL.

Максимально допустимые потери на пути распространения, полученные в табл. 3, с учетом различных видов запаса M_Σ определяются как:

$$L_{МДП} = P_t - L_t + G_t - P_{rsens} - L_r + G_r - M_\Sigma, \text{ дБ}, \quad (11)$$

где P_t – уровень мощности сигнала на выходе передатчика, дБм; P_{rsens} – чувствительность приёмника, дБм; G_t, G_r – коэффициенты усиления передающей и приёмной антенн дБи; L_{tf}, L_{rf} – потери в антенно-фидерных трактах передатчика и приёмника, дБ.

Для расчетов зоны покрытия используются основные технические характеристики средств связи, приведенные в табл. 1. Данные, приведенные в табл. 4, соответствуют базовой станции NR Medium Range BS (среднего радиуса действия) [11], [12].

Таблица 4. Характеристики приемопередающей аппаратуры

Параметр	Базовая станция (БС)	Абонентский терминал (АТ)
Уровень мощности передатчика, дБм	38	23
Коэффициент шума приёмника, дБ	7	5
Коэффициент усиления антенны, дБи	21	0
Высота антенны, м	30	1.5

Согласно рекомендации 3GPP 38.213 формат слота включает символы нисходящего канала (D), символы восходящего канала (U) и гибкие символы (F). Рекомендация 3GPP 38.213 определяет 55 форматов слотов для обычного циклического префикса. В табл. 5 приведены некоторые форматы слотов.

Таблица 5. Форматы слотов для обычного циклического префикса

Формат	Номер символа в слоте													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
26	D	D	F	F	F	F	F	F	F	F	F	U	U	U
27	D	D	D	F	F	F	F	F	F	F	F	U	U	U
28	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	F	U

Расчет энергетического бюджета (табл. 6) выполнен для системы 5G с временным дуплексом, работающим в диапазоне 4800 МГц. Для системы с временным дуплексом выбран

вариант конфигурации кадра формата 27 согласно 3GPP 38.213 [13], системная полоса – 40 МГц.

Таблица 6. Энергетический бюджет для условий плотной городской застройки

TDD, полоса 40 МГц (конфигурация кадра – формат 27 согласно 3GPP 38.213)			
	Параметр	DL	UL
$K_{par\ subch}$	Количество параллельных подканалов MIMO	4	4
$N_{OFDM\ in\ CH}/$ $N_{OFDM\ in\ SLOT}$	Отношение числа OFDM-символов в канале к общему числу OFDM-символов в слоте	9/14 = 0.643	4/14 = 0.286
Передатчик			
P_t	Выходной уровень мощности передатчика, дБм	38.0	23.0
G_t	Коэффициент усиления антенны передатчика, дБи	21	12
L_{tf}	Потери в фидерном тракте передатчика, дБ	1	0
P_{RAD}	ЭИИМ, дБм	58	35
Приёмник			
Δf_{subch}	Расстояние между поднесущими, кГц	30	
N_{RB}	Число используемых ресурсных блоков	8	6
BW_{RB}	Полоса частот ресурсного блока, кГц	360	
M_{mod}	Позиционность модуляции	64QAM	16QAM
R_c	Скорость кодирования	910/1024	658/1024
SNR	Требуемое отношение сигнал/шум, дБ	21	9
R_{data}	Скорость передачи данных на краю соты на абонента, Мбит/с (формула (10))	31.7	
R_{data}	Скорость передачи данных на краю соты от абонента, Мбит/с (формула (10))		5.85
N_0	Спектральная плотность уровня мощности теплового шума (дБм/Гц)	-174	
L_N	Коэффициент шума приёмника, дБ	7	5
P_N	Уровень мощности теплового шума, дБм $P_N = N_0 + L_N + 10\log(BW)$	-102.406	-105.656
$P_{r\ sens}$	Чувствительность приёмника, дБм $P_{r\ sens} = P_N + SNR$	-81.41	-96.656
G_r	Коэффициент усиления антенны приёмника, дБи	12	21
L_{rf}	Потери в фидерном тракте приёмника, дБ	0	1
Прочие запасы/выигрыши			
M_{int}	Запас на помехи, дБ	6	3.8
M_{build}	Запас на проникновение в помещение, дБ	20	
$M_{foliage}$	Запас на проникновение на открытой местности, дБ	7.5	
M_{shade}	Запас на затенение, дБ	7.8	
L_{MDP}	Максимально допустимые потери с запасами, дБ	117.61	116.356

После определения необходимой информации о технических характеристиках используемых средств связи можно определить максимально допустимые потери пути распространения согласно моделям потери распространения радиоволн. Максимально допустимые потери пути распространения на трассе для частот диапазона 4.8 ГГц в нисходящей и восходящей линиях составляют 117.61 и 116.356 дБ соответственно.

После определения величины максимальных допустимых потерь на пути распространения, используя выражения для модели потерь на пути распространения 3GPP TR 38.901 5G-NR (табл. 1), можно определить границу зоны обслуживания для заданного частотного диапазона (рис. 4, 5, 6 и 7).

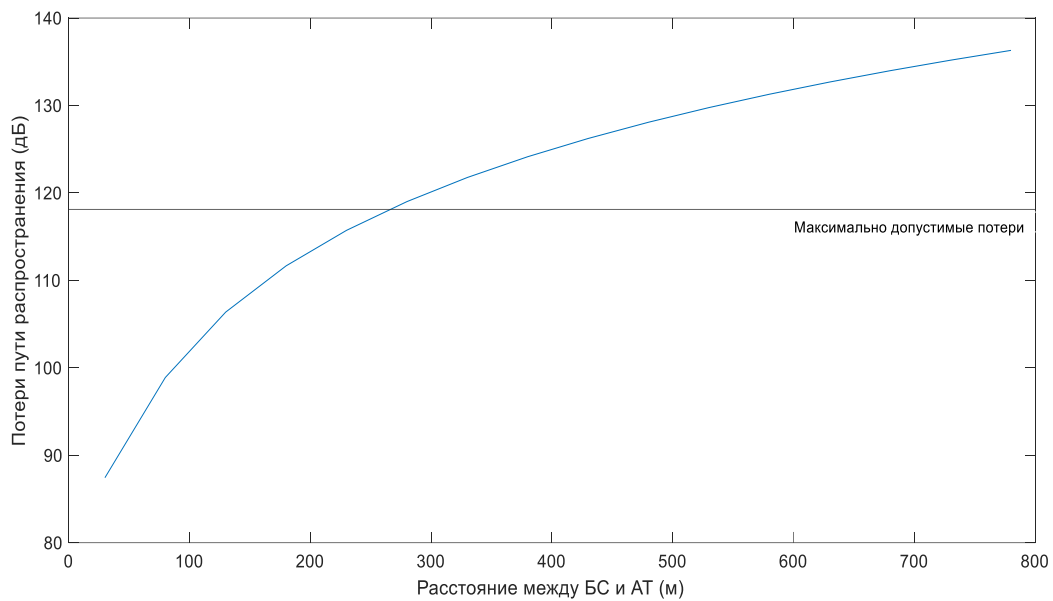


Рис. 4. Ослабление сигнала на входе приёмника АТ в условиях NLOS согласно модели потерь на пути распространения 3GPP TR 38.901 5G-NR

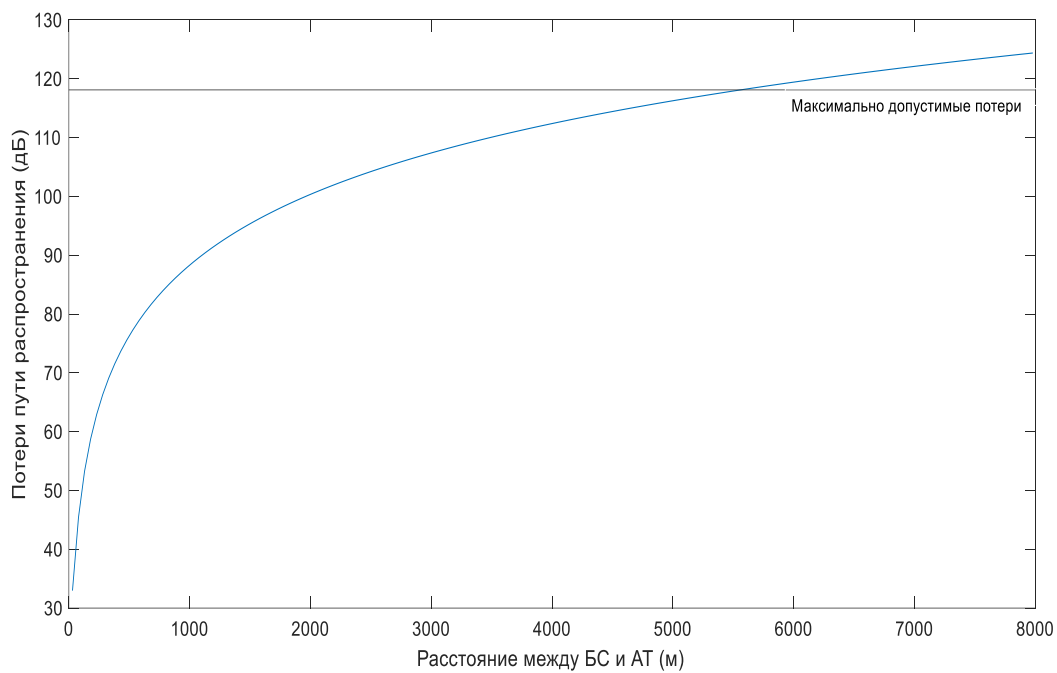


Рис. 5. Ослабление сигнала на входе приёмника АТ в условиях LOS согласно модели потерь пути TR 38.901 5G-NR

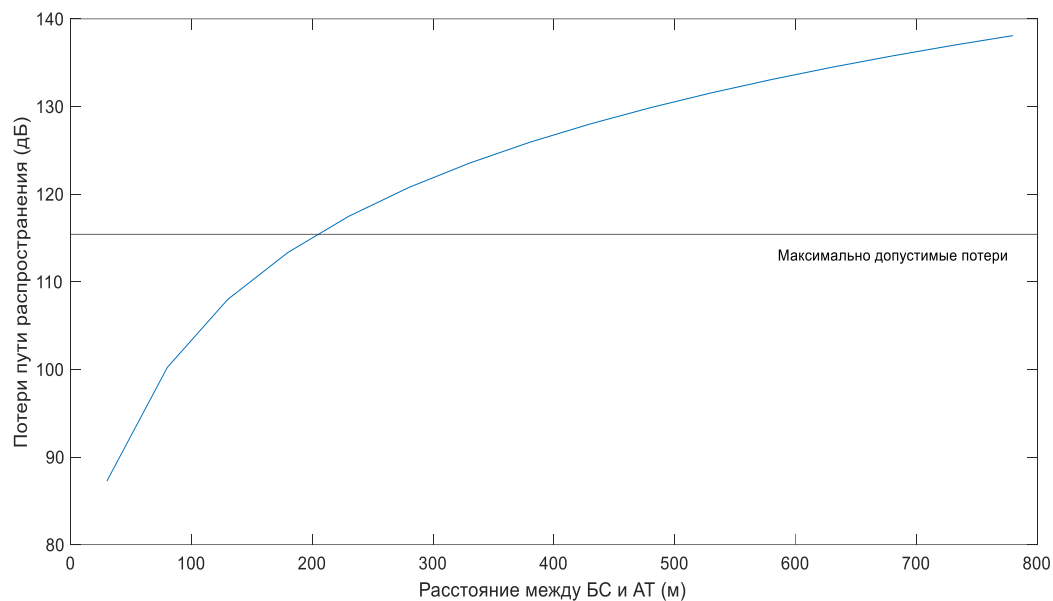


Рис. 6. Ослабление сигнала на входе приёмника БС в условиях NLOS согласно модели потерь пути 3GPP TR 38.901 5G-NR

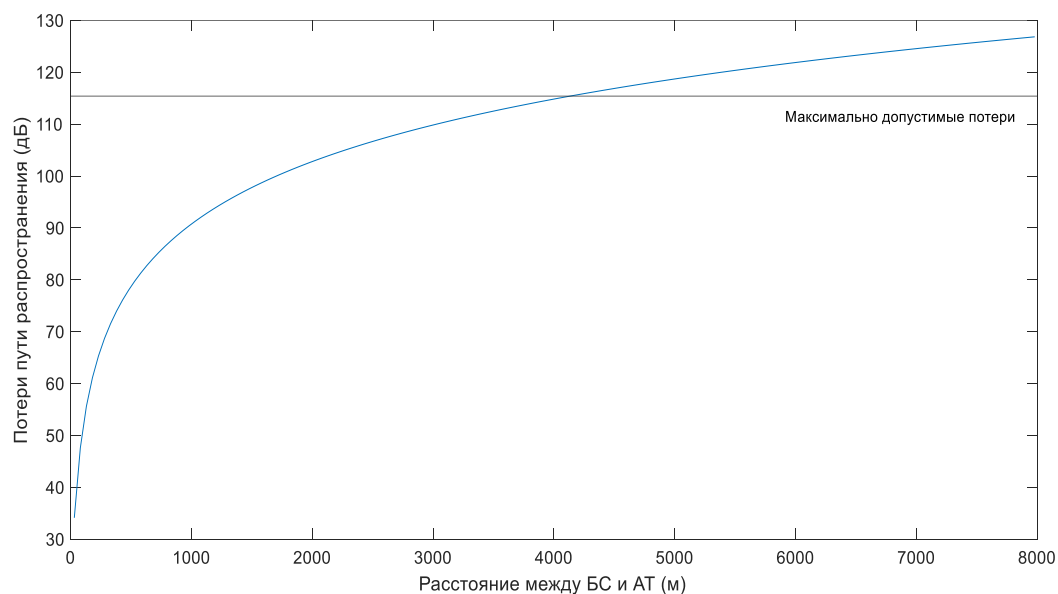


Рис. 7. Ослабление сигнала на входе приёмника БС в условиях LOS согласно модели потерь пути TR 38.901 5G-NR

Модель Лонгли–Райса определяет потери в тракте, связанные с потерями в свободном пространстве, дифракцией на рельефе и препятствиях, отражением от земли, атмосферной рефракцией и тропосферным рассеянием. Данная модель обеспечивает оценку потерь в тракте, сочетая физические и эмпирические данные. На рис. 8, 9, 10 приведены результаты расчета ослабления сигнала согласно модели Лонгли–Райса в условиях плотной городской застройки.

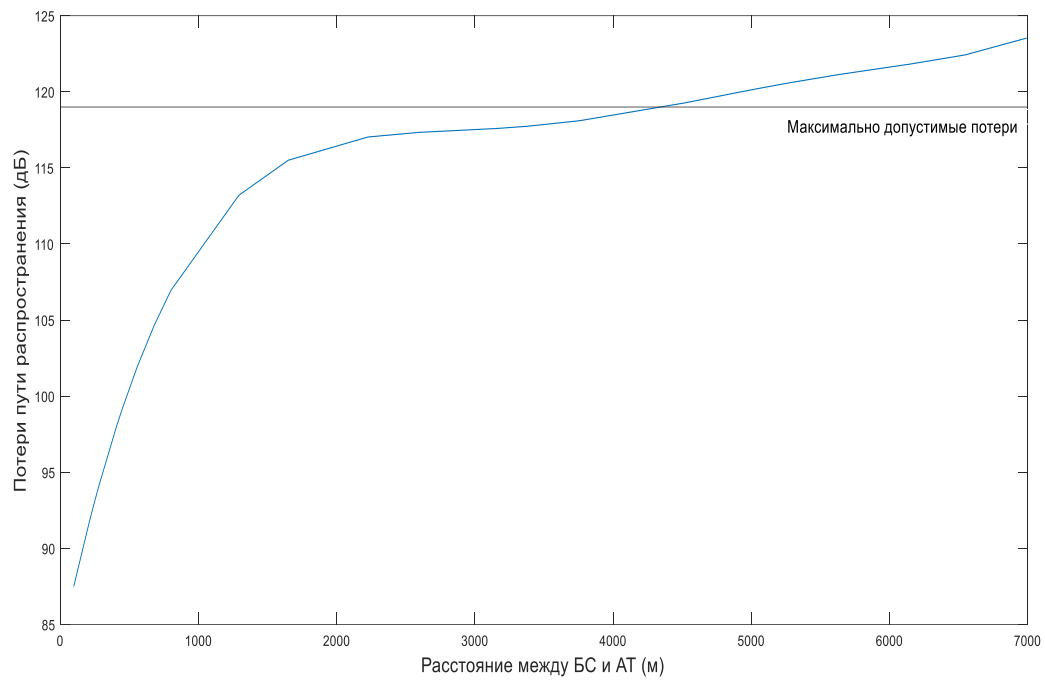


Рис. 8. Ослабление сигнала на входе приёмника АТ в условиях LOS согласно модели Лонгли–Райса

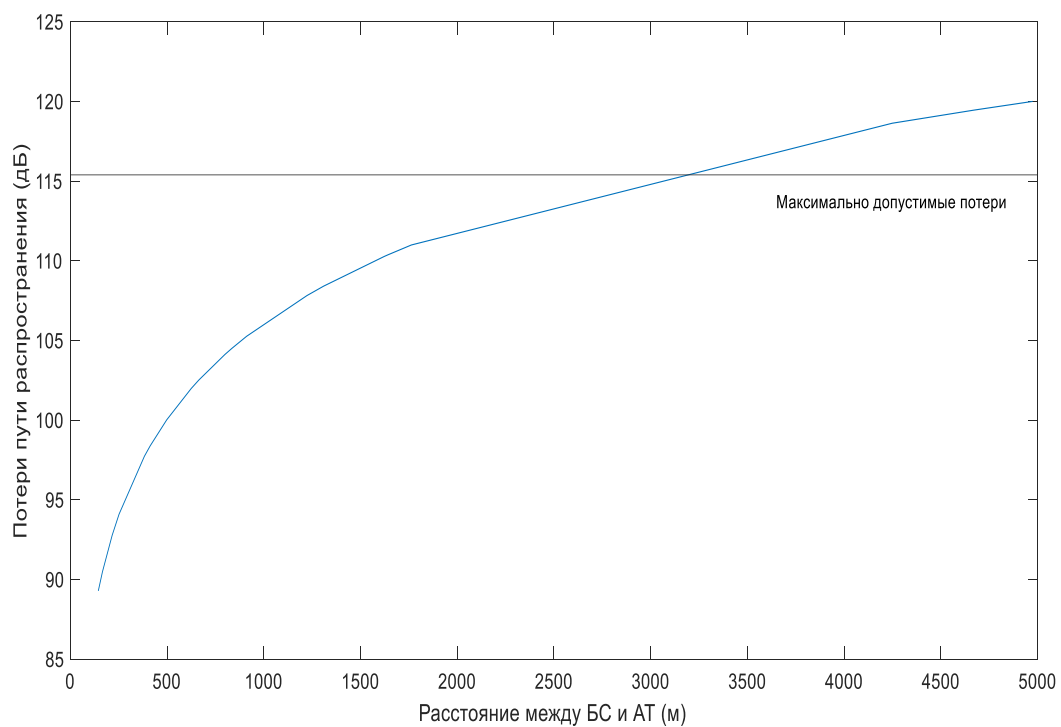


Рис. 9. Ослабление сигнала на входе приёмника БС в условиях LOS согласно модели Лонгли–Райса

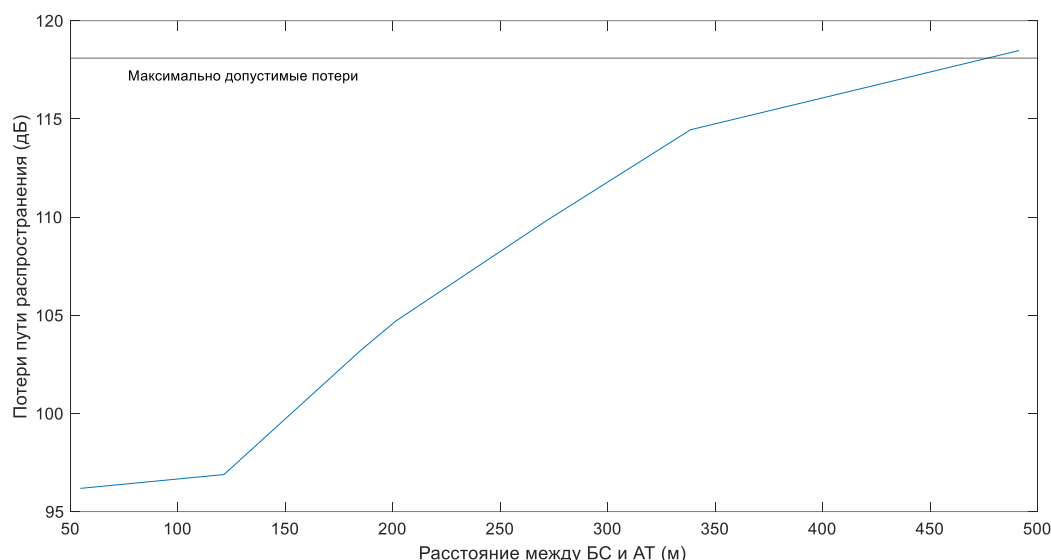


Рис. 10. Ослабления сигнала в условиях NLOS согласно модели Лонгли–Райса

По результатам моделирования с использованием модели Лонгли–Райса в условиях прямой видимости дальность связи на частотах диапазона 4.8 ГГц может составлять до 4.3 км в нисходящей линии и до 3.2 км в восходящей линии. В подавляющем большинстве случаев прямая видимость между БС и АТ отсутствует, т.к. распространение радиосигнала происходит в плотной городской застройке, также учитывается неравномерность рельефа местности, и ослабление сигнала превышает максимально допустимые потери пути распространения. В ситуациях многолучевости, переотражения лучей от различных объектов в условиях отсутствия прямой видимости NLOS максимальная дальность согласно модели Лонгли–Райса может составлять до 450 м. Для обеспечения прямой видимости между приёмником БС и приёмником АТ в условиях плотной городской застройки требуется более плотное расположение БС.

В табл. 7 приведены примерные границы зоны обслуживания и максимальная дальность связи между БС и АТ согласно моделям распространения 3GPP TR 38.901 и Лонгли–Райса для частот диапазона 4.8 ГГц при сценарии UMa LOS и NLOS.

Таблица 7. Максимальная дальность связи между БС и АТ согласно моделям потерь пути распространения согласно рекомендациям 3GPP TR 38.901 и Лонгли–Райса для частот диапазона 4.8 ГГц при сценарии UMa LOS и NLOS

		Максимальная дальность связи от БС к АТ, м	Максимальная дальность связи от АТ к БС, м
	Условия видимости	$f_s = 4.8$ ГГц	
3GPP 5G-NR UMa	NLOS	260	
	LOS	5700	4200
Лонгли–Райса		4300	3200

В результате проведённых расчётов по разработанной методике с учётом городской застройки для условия наличия прямой видимости дальность связи, определенная по двум рассмотренным моделям, составила около 5 км.

Также в результате проведённых расчётов без учёта карты городской застройки в условиях отсутствия помех (без учета запасов) и для условия наличия прямой видимости дальность связи, определенная по модели Лонгли–Райса, составила 26.5 км (рис. 11).

Согласно [2] при использовании модели Лонгли–Райса дальность связи в условиях прямой видимости без учёта городской застройки составила 27 км.

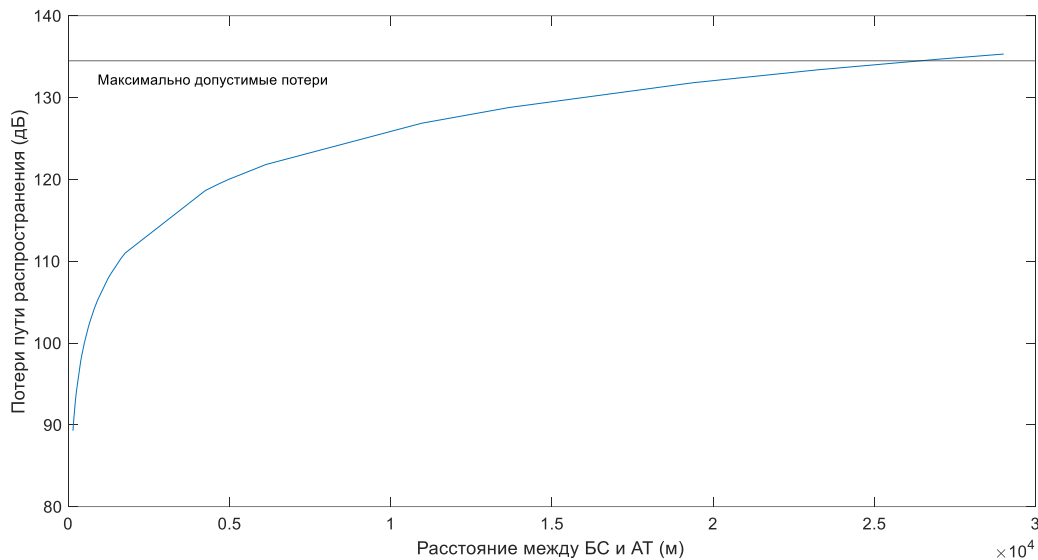


Рис. 11. Ослабление сигнала согласно модели Лонгли–Райса без учета карты городской застройки и без учета помех

Таким образом, можно утверждать, что результаты определения дальности связи, полученные с использованием предложенной методики, практически совпадают с результатами, полученными другими авторами.

4. Анализ проблемы развертывания при планировании покрытия сети 5G

Ключевая особенность сетей сотовой связи заключается в том, что общая зона покрытия делится на ячейки (соты), определяющиеся зонами покрытия отдельных базовых станций. Соты частично перекрываются и вместе образуют сеть. Зона покрытия сотовой сети (рис. 12) – область, в которой каждая БС покрывает определенную географическую область и предоставляет услуги всем абонентским терминалам, находящимся в этой области. Эта область называется ячейкой. Ячейка состоит из всех географических точек, где данная БС обеспечивает необходимый уровень приемного сигнала.

В условиях плотных городских застроек общая зона покрытия сетей мобильной связи состоит из двух основных уровней, сосуществующих на одной территории [12]:

1. Уровень покрытия: состоит из открытых (outdoor) БС, которые обеспечивают широкое покрытие, поддержку мобильности и используются совместно многими АТ.
2. Уровень точек доступа: состоит в основном из внутренних (indoor) БС, которые обеспечивают высокую пропускную способность в небольших локальных зонах для нескольких АТ.

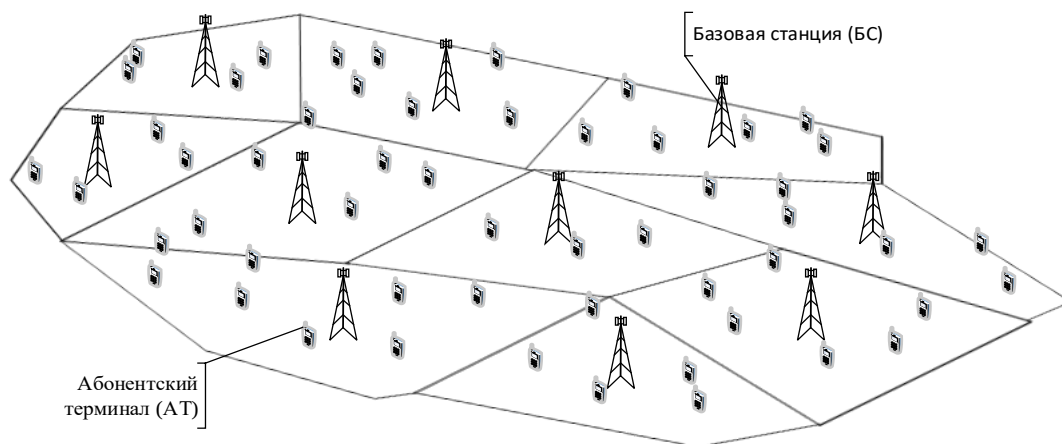


Рис. 12. Зона покрытия сотовой сети

Зоны покрытия соты – область вокруг базовой станции, где пользователь может успешно соединиться с БС и получать услуги приемлемого качества. Радиус соты определяет максимальную границу покрытия соты, и пользователь не будет устанавливать соединения за границей соты. Рассчитав радиус соты, мы можем оценить количество сотовых сайтов, необходимых для покрытия зоны развертывания. При планировании зоны покрытия для исключения внесотовых помех, помех от БС, расположенных в соседних сотах, между БС, расположенными в соседних сотах, должно поддерживаться определенное минимальное расстояние, называемое межсотовым расстоянием (ISD – Inter-Site Distance). Если минимальное расстояние ISD не соблюдается, пользователи могут получать более одного доминирующего сигнала от соседних сотовых станций, что называется внесотовой интерференцией, которая может значительно ухудшить производительность сети.

Более низкие частоты обладают хорошей проникающей способностью и способны обеспечить качественное обслуживание с точки зрения расстояния распространения и надёжности при малых затратах. С другой стороны, очень широкие полосы пропускания могут быть использованы только в более высоких диапазонах частот, где возможно достижение пиковых скоростей. Однако с увеличением частоты сигнала увеличиваются потери распространения, уменьшается эффективное расстояние передачи информации, следовательно, потребуется более плотное расположение БС.

Для улучшения пропускной способности и уровня покрытия особенно важно увеличить спектральную эффективность, поскольку плотность установки БС и использование дополнительной полосы пропускания на более высоких частотах ухудшат поддержку мобильности и покрытие.

Спектральная эффективность канала (бит/с/Гц) – это количество битов информации, которое можно передать по каналу передачи за единицу времени на единицу радиочастотного спектра.

Пропускная способность канала, или предельная скорость передачи информации, определяется теоремой Шеннона:

$$C \leq K \cdot W \cdot \log_2(1 + SNR), \text{ бит/с}, \quad (12)$$

где K – число пространственно ортогональных пользователей; W – полоса пропускания канала; SNR – отношение сигнал/шум.

В зависимости от применяемых схем кодирования/декодирования за счёт изменения требуемого значения SNR в канале передачи между приёмником и передатчиком можно достичь разных значений пропускной способности.

При использовании технологии MIMO передача и приём с пространственным разнесением может увеличить суммарную пропускную способность более чем на порядок за счет одновременного обслуживания K пространственно ортогональных пользователей.

Дефицит свободных частот в нижних участках спектра приводит к необходимости использования частот в более высоких диапазонах спектра. Путем использования массива антенн на высоких частотах можно компенсировать увеличивающиеся потери распространения.

Уровень мощности принимаемого сигнала P_r на входе приёмника АТ при коэффициенте усиления его антенны определяется как:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_0. \quad (13)$$

Коэффициент усиления антенны равен:

$$G_t = G_r = 10 \cdot \log_{10}(4 \cdot \pi \cdot \frac{S_a}{\lambda^2}), \quad (14)$$

где λ – длина волны; S_a – апертюра антенной решетки.

Затухание в свободном пространстве равно:

$$L_0 = 10 \cdot \log_{10} \left(4 \cdot \pi \cdot \frac{d}{\lambda} \right)^2. \quad (15)$$

С учётом уравнений (14) и (15) уровень мощности принимаемого сигнала P_r (14) будет равен

$$P_r = P_t + 2 \cdot 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S_a}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \right) - L_0. \quad (16)$$

Из уравнения (16) следует, что для рассматриваемых условий уровень мощности принимаемого сигнала на входе приёмника не зависит от длины волны, так как в соответствии с уравнением (14) с увеличением частоты рост затухания сигнала в среде распространения L_0 компенсируется ростом коэффициента усиления антенной решётки.

Количество антенн на массив с фиксированной апертурой при расстоянии между антеннами, равном $d = \lambda/2$, равно:

$$S_a = (M_x \cdot d_x) \cdot (M_y \cdot d_y) = (M_x \cdot M_y) \cdot \frac{\lambda^2}{4}, \quad (17)$$

где M_x, M_y – количество антенн в строке (горизонтальная плоскость) и столбце (вертикальная плоскость) плоской прямоугольной антенной решётки.

Необходимо отметить, что ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости зависит от количества антенн M_x , а ширина диаграммы направленности в вертикальной плоскости зависит от количества антенн M_y . Если через M_Σ обозначить общее количество антенн в антенной решётке

$$M_\Sigma = M_x \cdot M_y, \quad (18)$$

то общее количество антенн в антенной решётке будет равно

$$M_\Sigma = 4 \cdot \frac{S_a}{\lambda^2}. \quad (19)$$

Это означает, что освоение более высоких диапазонов частот приведет к увеличению общего количества антенн, т.к. количество антенн на массив с фиксированной апертурой обратно пропорционально квадрату длины волны.

Плотность антенн D_a есть отношение M_Σ к площади зоны обслуживания S_3 :

$$D_a = M_\Sigma / S_3 = M_\Sigma / (\pi \cdot R_3^2). \quad (20)$$

Из (20) следует, что при одинаковой энергетической эффективности в сети сотовой связи можно применять либо соты с большим радиусом зоны обслуживания (макросоты) и большим массивом антенн, либо большое количество сот с малым радиусом зон обслуживания (микросоты) и с небольшим количеством антенн в каждой соте.

В свободном пространстве с равномерным распределением пользователей U количество ортогональных каналов K_U , генерируемых М-ММО, равно числу антенн массива $K_U = M_\Sigma$, поэтому плотность пользователей равна плотности антенн:

$$D_U = K_U / S_3 = M_\Sigma / S_3. \quad (21)$$

Это означает, что для обеспечения такой же плотности пользователей мы можем либо использовать одну большую макроячейку, оборудованную большим числом антенн, либо много маленьких микроячеек, оборудованных небольшим количеством антенн каждая.

В соответствии с (12) и (21) пропускная способность этих двух вариантов построения сети будет одинаковой, так как обслуживаемая ими площадь одинаковая:

$$C_{macro} \leq K_{U macro} \cdot W \cdot \log_2(1 + SNR), \quad (22)$$

$$C_{micro} \leq \sum_{i=1}^N K_{U i micro} \cdot W \cdot \log_2(1 + SNR), \quad (23)$$

5. Заключение

В данной работе разработана методика определения зоны покрытия базовой станции сети 5G при учёте большинства параметров аппаратуры и сигналов для разных моделей распространения. Учитывается количество параллельных подканалов системы ММО, число которых определяется рангом матрицы $K \leq \min \{M, N\}$, где M, N – количество антенн на передающей и приёмных сторонах соответственно. В режиме временного разделения дуплекса TDD определяется отношение числа OFDM-символов в канале DL или UL к общему числу OFDM-символов в слоте. Также определяется коэффициент усиления плоской многоэлементной антенной решётки. При расчётах учитываются запасы на помехи, на проникновение сигнала в помещение, на затенение.

В результате проведённых расчётов по предложенной методике определены границы зоны обслуживания в сети 5G с использованием моделей распространения 3GPP TR 38.901 и Лонгли–Райса для частот диапазона 4.8 ГГц при сценарии UMa LOS и NLOS.

Дальность связи, определенная по двум рассмотренным моделям, с учётом городской застройки для условия наличия прямой видимости составила около 5 км. Дальность связи при использовании модели 3GPP TR 38.901 в условиях отсутствия прямой видимости не превышает 260 м, а при использовании модели Лонгли–Райса, которая учитывает переотражение лучей от различных объектов, дальность может составлять до 450 м.

Также в результате проведённых расчётов без учёта карты городской застройки и без учета запасов для условия наличия прямой видимости дальность связи, определенная по модели Лонгли–Райса, составила 26.5 км.

Получено выражение для определения скорости передачи данных в аппаратуре 5G-NR в режиме TDD. Это выражение учитывает ранг матрицы MIMO, спектральную эффективность M позиционной модуляции, $\gamma_{\text{mod}} = \log_2 M_{\text{mod}}$, (бит/с)/Гц; полосу частот, занимаемую одним ресурсным блоком, количество OFDM-символов в канале DL или UL, количество OFDM-символов в слоте.

Проанализирована проблема развертывания при планировании покрытия сети 5G. Показано, что при обеспечении одинаковой пропускной способности возможны два равноценных варианта построения сетей при использовании либо одной большой макроячейки, оборудованной большим числом антенн, либо многих маленьких микроячеек, оборудованных небольшим количеством антенн каждая.

Литература

1. *Ahamed M. M., Faruque S.* 5G Network Coverage Planning and Analysis of the Deployment Challenges // *Sensors*. 2021. P. 6608.
2. *Мовчан А. К., Рогожников Е. В., Дмитриев Э. М., Новичков С. А., Лаконцев Д. В.* Расчет ослабления сигнала сетей сотовой связи 5G для частот диапазона FR1 // *Доклады ТУСУР*. 2022. Т. 23, № 1. С. 17 – 23.
3. *Sarkar T. K., Wicks M. C., Salazar-Palma M., Bonneau R. J.* Smart Antennas. A survey of various propagation models for mobile communication. P. 239–307.
4. Data sheet 3GPP TR 38.901 V17.0.0 Release 17. URL: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.901 (дата обращения: 28.04.2023).
5. [IMT-2020.EVAL], Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-2020. 2017. URL: <https://www.itu.int/md/R15-SG05-C-0057> (дата обращения: 04.08.2022).
6. *Hufford G. A., Longley A. G., Kissick W. A.* A guide to the use of the ITS irregular terrain model in the area prediction mode / US Department of Commerce, National Telecommunications and Information Administration. NTIA REPORT 82-100, 1982. 73 p.
7. Data sheet 3GPP TR 38.913 version 17.0.0 Release 17 URL: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.913 (дата обращения: 15.03.2023).
8. *Proakis J. G., Salehi M.* Digital Communications, 5th ed.; McGraw-Hill Education: New York, NY, USA, 2007. P. 1170.
9. Data sheet 3GPP TS 38.104 version 17.4.0 Release 17 URL: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.104 (дата обращения: 15.03.2023).
10. Data sheet 3GPP TS 38.101 version 17.4.0 Release 17 URL: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.101-1 (дата обращения: 15.03.2023).
11. Data sheet 3GPP TS 38.213 version 17.1.0 Release 17 URL: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.213 (дата обращения: 15.03.2023).
12. *Bjornson E., Hoydis J., and Sanguinetti L.* Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency // *Foundations and Trends in Signal Processing*. 2017. V. 11, № 3–4. P. 154–655. DOI: 10.1561/20000000093.

Алиев Исфандиёр Вакосович

аспирант кафедры цифрового телерадиовещания и систем радиосвязи, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. +7 383 2698 254, e-mail: aliev_i_v@mail.ru, ORCID ID: 0009-0007-0300-0494.

Носов Владимир Иванович

д.т.н., профессор кафедры цифрового телерадиовещания и систем радиосвязи, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. +7 383 2698 254, e-mail: nvi@sibguti.ru, ORCID ID: 0000-0003-2671-4258.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад соавторов: Каждый автор внес равную долю участия, как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи

Analysis of the Deployment Problem when Planning 5G Network Coverage

Isfandier V. Aliev, Vladimir I. Nosov

Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS)

Abstract: Global demand for higher bandwidth mobile Internet services stimulates the constant evolution of cellular technologies. Today, cellular networks are saturated with frequencies below 3 GHz. To achieve the required increase in data rates, more bandwidth is required in the higher frequency range. Due to increasing bandwidth requirements, 5th generation (5G) mobile networks are targeting the frequency range of 3 to 6 GHz (FR1). It is also planned to use frequencies in the 24-29 GHz range for 5G networks. Despite the expected widespread use of the frequency range from 3 to 6 GHz, there is little empirical data on path losses and experience in mobile radio network planning. In this paper, a methodology has been developed for determining the coverage area of the 5G network base station taking into account most equipment and signal parameters for different signal propagation models. An expression has been obtained to determine the data transfer rate in 5G-NR equipment in TDD mode. Calculations results of the coverage area are presented using the example for the city of Novosibirsk for a frequency of 4.8 GHz. The deployment problem when planning 5G network coverage is analyzed.

Keywords: methodology for determining 5G network coverage; determination of data transfer speed in the 5G network; Longley-Rice and 3GPP 5G-NR propagation models.

For citation: Aliev I. V., Nosov V. I. Analysis of the deployment problem when planning 5G network coverage (in Russian). *Vestnik SibGUTI*, 2024, vol. 18, no. 2, pp. 13-31. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2024-18-2-13-31>.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Aliev I. V., Nosov V. I., 2024

The article was submitted: 20.07.2023;
revised version: 14.12.2023;
accepted for publication 17.12.2023.

References

1. Ahamed, M.M.; Faruque, S. *5G Network Coverage Planning and Analysis of the Deployment Challenges*. *Sensors* 2021, 21, 6608.
2. Movchan A. K., Rogozhnikov E. V., Dmitriev E. M., Novichkov S. A., Lakontsev D. V. Raschet oslableniya signala setei sotovoi svyazi 5G dlya chastot diapazona FR1 [Calculation of signal attenuation of 5G cellular networks for frequencies in the FR1 range]. *Dokladi TUSUR*, 2022, vol. 23, no. 1, pp. 17-23.
3. Tapan K. Sarkar, Michael C. Wicks, Magdalena Salazar-Palma, Robert J. Bonneau. A survey of various propagation models for mobile communication. *Smart Antennas*, Wiley-IEEE Press, 2003, pp. 239-307.
4. Data sheet 3GPP TR 38.901 V17.0.0 Release 17 available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.901 (accessed: 28.04.2023).
5. [IMT-2020.EVAL], *Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-2020*. 2017. available at: <https://www.itu.int/md/R15-SG05-C-0057> (accessed: 04.08.2022).
6. Hufford G. A., Longley A. G., Kissick W. A. *A guide to the use of the ITS irregular terrain model in the area prediction mode*. US Department of Commerce, National Telecommunications and Information Administration, NTIA REPORT 82-100, 1982. 73 p.
7. Data sheet 3GPP TR 38.913 version 17.0.0 Release 17 available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.913 (accessed: 15.03.2023).
8. Proakis J. G.; Salehi M. *Digital Communications*. 5th ed., McGraw-Hill Education: New York, NY, USA, 2007, p. 1170.
9. Data sheet 3GPP TS 38.104 version 17.4.0 Release 17 available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.104 (accessed: 15.03.2023).
10. Data sheet 3GPP TS 38.101 version 17.4.0 Release 17 available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.101-1 (accessed: 15.03.2023).
11. Data sheet 3GPP TS 38.213 version 17.1.0 Release 17 available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.213 (accessed: 15.03.2023).
12. Emil Bjornson, Jakob Hoydis and Luca Sanguinetti, Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency. *Foundations and Trends in Signal Processing*, 2017, vol. 11, iss. 3-4, pp. 154-655. DOI: 10.1561/20000000093.

Isfandiyor V. Aliev

Postgraduate of the Department of Digital Broadcasting and Radio Communication Systems, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Russia, 630102, Novosibirsk, Kirov St. 86), phone: +7 383 2698 254, e-mail: aliev_i_v@mail.ru, ORCID ID: 0009-0007-0300-0494.

Vladimir I. Nosov

Dr. of Sci. (Engineering), Professor; Professor of the Department of Digital Broadcasting and Radio Communication Systems, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Russia, 630102, Novosibirsk, Kirov St. 86), phone: +7 383 2698 254, e-mail: nvi@sibguti.ru, ORCID ID: 0000-0003-2671-4258.