

УДК 681.5.032

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.35.4.031](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.35.4.031)

## Исследование моделей расчета потерь радиосигналов в сетях радиодоступа

Э.Р. Саргсян✉, А.А. Рындин

*Воронежский государственный технический университет,  
Воронеж, Российская Федерация  
[xanderx2012@gmail.com](mailto:xanderx2012@gmail.com)✉*

**Резюме.** В работе проводится анализ существующих моделей расчета уровня потери сигнала в сетях радиодоступа. Актуальность исследования обусловлена тем, что сети радиодоступа повсеместно применяются в современном мире телекоммуникационными операторами связи для обеспечения коммуникации между абонентами по всему миру. Данная работа анализирует рассмотренные эмпирические и аналитические модели и подтверждает возможность их использования для расчета потери сигнала для сетей радиодоступа. Результаты были получены путем анализа доступных моделей, последующим выбором моделей для расчета в разных условиях (городских, сельских, на открытой местности) и выполнением расчетов на основе данных моделей. Были использованы модели Окамура-Хата, COST231-Хата, Кся-Бертони, для расчета показателей при различных частотах распределения сигнала и с учетом внешних факторов, таких как изменение рельефа местности, наличие высоких зданий, ширину улиц и др. В результате расчетов было выявлено, что для городской местности, на небольшие расстояния лучше всего подходит модель Кся-Бертони так как имеет максимальное количество параметров, которые учитываются в модели, для городской среды. Для открытой местности или маленьких городов можно использовать более простые модели: Окамура-Хата для малых частот от 150 до 1500 МГц и COST231-Хата для высоки частот от 1500 МГц до 2000 МГц. В разделе результатов представлены графики, показывающие зависимость потери сигнала от расстояния, а также позволяющие увидеть, что в городской местности модель Кся-Бертони позволяет более точно рассчитать значение потери сигнала, при этом обеспечивая более положительные результаты. Материал статьи представляет практическую ценность для работ, которые основаны на алгоритмах расчета потери сигнала и позволяет увидеть готовые модели для расчетов и, соответственно, их результаты для различных условий, что убирает необходимость затрачивать время на данные исследования.

**Ключевые слова:** сети радиодоступа, потери радиосигнала, базовая станция, беспроводной сигнал, Окамура-Хата, COST231-Хата, Кся-Бертони, передача сигнала.

**Для цитирования:** Саргсян Э.Р., Рындин А.А. Исследование моделей расчета потерь радиосигналов в сетях радиодоступа. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(4). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1078> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.031

## Research into calculation models of radio signals losses in radio access networks

E.R. Sargsyan✉, A.A. Ryndin

*Voronezh State Technical University,  
Voronezh, Russian Federation  
[xanderx2012@gmail.com](mailto:xanderx2012@gmail.com)✉*

**Abstract:** This work contains the analysis of the existing models for calculating the signal loss level in the radio access network. The relevance of the study is due to the fact that radio access networks are widely used in the modern world by telecommunications operators for communication between subscribers around the globe. This paper analyzes the considered empirical and analytical models and confirms the possibility of their application to calculating signal losses for radio access networks. The results were obtained by analyzing the available models, then by choosing the models for calculation under different conditions (urban, rural, open area) and by performing calculations based on these models. The models of Okamura-Khata, COST231-Khata, Xia-Bertoni were employed to calculate indicators at various frequencies of signal distribution and with consideration to external factors, such as changes in the terrain, the presence of tall buildings, the width of streets, etc. As a result of the calculations, it has been revealed that for urban areas and for short distances, the Xia-Bertoni model is best suited since it has more parameters that are taken into account in the model for the urban environment. For open areas or small towns, simpler models can be used: Okamura-Hata for low frequencies from 150 to 1500 MHz and COST231-Hata for high frequencies from 1500 MHz to 2000 MHz. The results section provides graphs showing the dependency of signal loss on distance and indicating that in urban areas the Xia-Bertoni model can calculate more accurately the signal loss value while providing more positive results. The material of the article is of practical value for works that are based on algorithms for calculating signal loss and enables to see ready-made models for calculations and their results for various conditions accordingly, which eliminates the need to spend time on such studies.

**Keywords:** radio access networks, loss of radio signal, base station, wireless signal, Okamura-Khata, COST231-Khata, Xia-Bertoni, signal transmission.

**For citation:** Sargsyan E.R., Ryndin A.A. Research into calculation models of radio signals losses in radio access networks. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(4). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1078> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.031 (In Russ).

## Введение

В настоящее время существует множество математических моделей для расчета потерь радиосигналов в сетях радиодоступа. В основе таких моделей зачастую используются основы волновой оптики. Данные алгоритмы используются для всех видов телекоммуникационных сетей, однако в данной работе будет рассмотрена возможность применения именно для сетей радиодоступа, которые повсеместно используются в современном мире телекоммуникационными операторами для обеспечения связи.

В работах [1], [2] и [3] описывается общая структура сетей радиодоступа, в частности, формата LTE (4G), а также рассматриваются различные технологии и архитектура проектирования радиосетей.

В работе [4] рассматриваются беспроводные сети передачи данных и расчет потерь на трассе радиоканала, что является основой для данной работы. Также в работах [5], [6] и [7] представлено рассмотрение алгоритмов расчетов потерь сигналов и возможности их применения в различных условиях.

Одними из важнейших пунктов является наличие различных способов передачи информации в радиосетях, так как некоторые сети рассчитаны на проводную передачу информации, некоторые на беспроводную и зависят еще от множества факторов. Данные способы рассматриваются в работе [8].

Также анализируется вопрос исследования и анализа характеристик самоорганизующейся радиосети в работе [9] и моделирования полносвязной радиосети в работе [10].

Процесс проектирования сетей радиодоступа связан с множеством проблем. Одной из существенных проблем является потеря радиосигнала в зависимости от расстояния и местности, на которое он распространяется.

Для решения этой проблемы рассмотрим аналитические и эмпирические модели, для анализа целесообразности их применения в различных условиях (городских, сельских и на открытой местности). Были выбраны следующие модели:

- Окамура-Хата;
- COST231-Хата;
- Кся-Бертони.

Также рассмотрим базовую структуру современных сетей радиодоступа (4G, 5G), что позволит получить более точное понимание, от чего зависит корректная работа сети, какие параметры и внешние условия необходимо учитывать.

Таким образом, целью данного научного исследования является анализ наиболее подходящих алгоритмов для расчёта потери сигнала в сети с учётом условий местности, для определения наиболее подходящего алгоритма при конкретных условиях местности (городской, сельской, открытой).

### Материалы и методы

Сеть 4G (LTE) представляет из себя набор базовых станций eNB (Evolved NodeB или eNodeB), узлы которых соединены между собой с помощью интерфейса X2.

Упрощённая архитектура LTE сети представлена на рисунке 1.

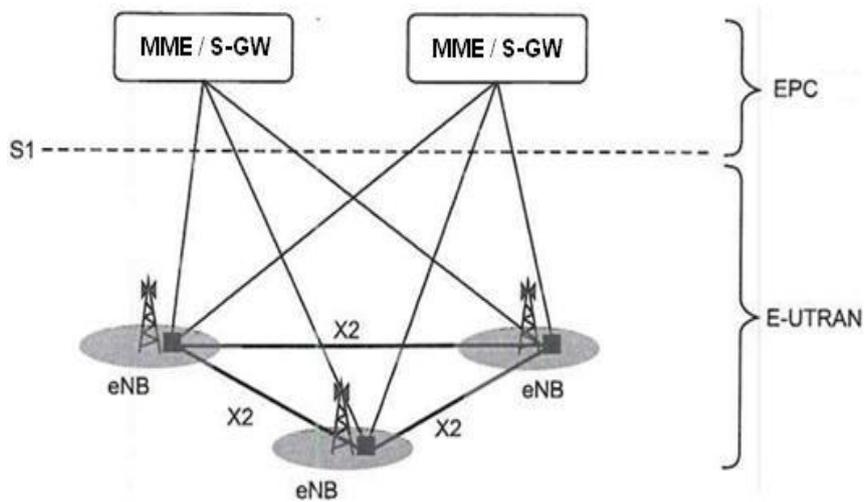


Рисунок 1 – Упрощенная архитектура LTE сети  
 Figure 1 – Simplified LTE network architecture

Ядро сети EPC (Evolved Packet Core) включает в себя:

- обслуживающий шлюз S-GW (Serving Gateway);
- шлюз выхода на пакетные сети P-GW (Packet Data Network Gateway);
- структуры для управления по протоколу Mobility Management MME (Mobility Management Entity);

Функции eNB:

- передача трафика по радиоканалу;
- управление радио-ресурсами;
- поддержка синхронизации передач и контроль уровня помех в соте;
- реализация шифрования и контроль целостности передачи по радиоканалу;
- реализация сжатия данных;
- поддержка мультимедийного вещания.

Интерфейс S1 организован для поддержки передачи данных с обслуживающего шлюза S-GW и мониторинга через MME. При этом одна базовая станция может соединяться с несколькими S-GW.

Интерфейс X2 организован для процесса передачи обслуживания абонента (хендовер) между соседними базовыми станциями. Также необходим для реализации функции балансировки нагрузки между станциями.

Функции обслуживающего шлюза S-GW:

- определение маршрута данных для пакетов внутри сети;
- расчёт качественных показателей (QoS – Quality of Service);
- кеширование пакетов, пребывающих в неактивном состоянии;
- предоставление учетных данных для оплаты услуг и тарификации.

Сети пятого поколения 5G представляют собой структуру использующую множество разнообразных современных технологий, поддерживающую разнообразное программное обеспечение. Архитектура 5G снимает с сетей радиодоступа (RAN) множество ограничений, одним из основных является ограничение по близости распределения базовых станций.

Одной из особенностей 5G сетей является расширения спектра используемых частот для передачи данных, что позволяет применять эти сети в различных условиях и для различных задач. Новое ядро 5G, как определенном стандартом 3GPP, использует облачную архитектуру, которая реализует функции безопасности, управления, проверку подлинности и агрегирование трафика с устройств.

### Модели расчёта потери сигнала

Расчёт потери сигнала от базовых станций беспроводной связи необходим для оценки количества необходимых передатчиков для определенной площади покрытия связи. При этом модель должна учитывать местность, на которой распределяется сигнал:

- город;
- пригород;
- село.

Для расчёта в городских или в сельских условиях существует множество моделей. Для анализа возьмем одни из самых известных: Окамура-Хата и COST231-Хата, которые получены в результате эмпирических исследований. Рекомендованная дальность для расчета потери сигнала в данных моделях составляет от 1 до 20 км. Еще одним условием для использования данных моделей является расчет потери сигнала в рамках сетей радиодоступа, так как изначально эти модели были разработаны под базовые станции большой высоты.

Модель Окамура-Хата применяется в диапазоне частот сигнала от 150 до 1500 МГц, а модель COST231-Хата в диапазоне, от 1500 до 2000 МГц.

Для расчёта по модели Окамура-Хата будет использоваться частота сигнала равная 1000 МГц.

Модель для расчета в городских условиях будет выглядеть следующим образом:

$$L_{OX(\text{город})} = 69,55 + 26,16 * \log f - 13,83 * \log h_{BC} + (44,9 - 6,55 * \log h_{BC}) * \log r - a(h_{MA}) \quad (1)$$

где:  $f$  – частота сигнала (МГц);  $h_{BC}$  – высота базовой станции (м);  $r$  – расстояние зоны покрытия (м);  $a(h_{MA})$  – поправочный коэффициент высоты мобильной антенны.

$$a(h_{MA}) = (1,1 * \log f - 0,7) * h_{MA} - (1,56 * \log f - 0,8) \quad (2)$$

где:  $h_{MA}$  – высота мобильной антенны (м).

Для расчёта потери сигнала в сельской или открытой местности необходимо использовать следующую формулу:

$$L_{OX(\text{село})} = L_{OX(\text{город})} - 4,78 * (\log f)^2 + 18,33 * \log f - 40,94 \quad (3)$$

Далее рассмотрим модель COST231-Хата в рамках городских условий. Формула выглядит следующим образом:

$$L_{OX(\text{город})} = 46,3 + 33,9 * \log f - 13,82 * \log h_{BC} - a(h_{MA}) + (44,9 - 6,55 * \log h_{BC}) * \log r + C \quad (4)$$

где:  $f$  – частота сигнала (МГц);  $h_{BC}$  – высота базовой станции (м);  $r$  – расстояние зоны покрытия (м);  $a(h_{MA})$  – поправочный коэффициент высоты мобильной антенны, рассчитывается по формуле 2;  $C$  – коэффициент, со значениями  $C = 0$  для открытой местности и небольших городов,  $C = 3$  для крупных городов.

Следовательно, также рассмотрим модель COST231-Хата для сельской и открытой местности:

$$L_{OX(\text{село})} = L_{OX(\text{город})} - 4,78 * (\log f)^2 + 18,33 * \log f - 40,94 \quad (5)$$

Как видно из формулы, расчет для сельской и открытой местности модели COST231-Хата совпадает с расчетом в модели Окамура-Хата.

Проведем расчёты для приведенных моделей и сравним их показатели. Входными данными будут:

- частота сигнала - 1000 МГц;
- высота базовой станции – 40 м;
- расстояние зоны покрытия – 1-20 км;
- высота мобильной антенны (средний рост человека) – 1,7 м

Начнем с модели Окамура-Хата и выполним расчет поправочного коэффициента высоты мобильной антенны используя формулу 2:

$$\begin{aligned} a(h_{MA}) &= (1,1 * \log f - 0,7) * h_{MA} - (1,56 * \log f - 0,8) = \\ &= (1,1 * 3 - 0,7) * 1,7 - (1,56 * 3 - 0,8) = \\ &= 4,42 - 3,88 = 0,54 \end{aligned}$$

Далее, используя ранее высчитанный поправочный коэффициент и формулу 1, проведем расчет потери сигнала для городских условий, при условии, что расстояние передачи сигнала  $r = 1$  км.

$$\begin{aligned}
 L_{\text{ОХ(город)}} &= 69,55 + 26,16 * \log f - 13,83 * \log h_{\text{БС}} + (44,9 - 6,55 \\
 &\quad * \log h_{\text{БС}}) * \log r - a(h_{\text{МА}}) = \\
 &= 69,55 + 26,16 * 3 - 13,83 * 1,60206 + (44,9 - 6,55 * 1,60206) * 0 - 0,6333 \\
 &= 69,55 + 78,39 - 22,15 + 0 - 0,54 = 125,3 \text{ дБ.}
 \end{aligned}$$

Также рассчитаем значение для сельской и открытой местности используя формулу 3.

$$\begin{aligned}
 L_{\text{ОХ(село)}} &= L_{\text{ОХ(город)}} - 4,78 * (\log f)^2 + 18,33 * \log f - 40,94 = \\
 &= 125,3 - 4,78 * 9 + 18,33 * 3 - 40,94 = 125,3 - 43,02 + 54,99 - 40,94 = \\
 &= 82,28 + 14,05 = 96,3 \text{ дБ.}
 \end{aligned}$$

Проведем данные расчеты для значения расстояния передачи сигнала  $r$  от 1 до 20 км и приведём сводную таблицу.

Таблица 1 – Расчеты по модели Окамура-Хата

Table 1 - Calculations using the Okamura-Hata model

$r$ , км	$L_{\text{ОХ(город)}}$	$L_{\text{ОХ(село)}}$
1	125.33	96.36
2	135.69	106.72
3	141.75	112.78
4	146.05	117.08
5	149.38	120.41
6	152.11	123.14
7	154.41	125.44
8	156.41	127.44
9	158.17	129.20
10	159.74	130.77
11	161.16	132.19
12	162.46	133.49
13	163.66	134.69
14	164.77	135.80
15	165.80	136.83
16	166.76	137.79
17	167.67	138.70
18	168.52	139.55
19	169.33	140.36
20	170.10	141.13

На Рисунке 2 представлена графическая иллюстрация проведенных расчетов для понимания степени ослабления сигнала в зависимости от расстояния и местности.

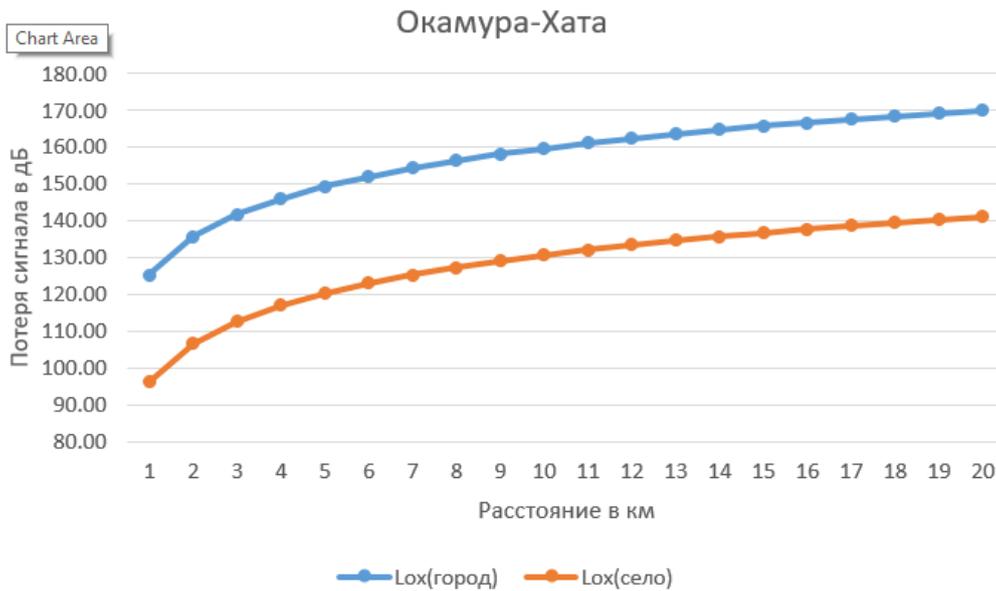


Рисунок 2 – Графическое отображение расчетов по модели Окамура-Хата

Figure 2 – Graphical display of calculations for the Okamura-Hata model

Из результатов видно, что в городской местности, по сравнению с открытой, довольно высокое значение потери сигнала.

Теперь проведем расчет по модели COST231-Хата, при условии расчета для частоты сигнала равной 1800 МГц. Для этого выполним расчет поправочного коэффициента высоты мобильной антенны используя формулу 2:

$$\begin{aligned} a(h_{МА}) &= (1,1 * \log f - 0,7) * h_{МА} - (1,56 * \log f - 0,8) = \\ &= (1,1 * 3,25 - 0,7) * 1,7 - (1,56 * 3,25 - 0,8) = \\ &= 4,89 - 4,27 = 0,62 \end{aligned}$$

Далее, используя ранее высчитанный поправочный коэффициент и формулу 4, проведем расчет потери сигнала для городских условий, при условии, что расстояние передачи сигнала  $r = 1$  км.

$$\begin{aligned} L_{ОХ(город)} &= 46,3 + 33,9 * \log f - 13,82 * \log h_{БС} - a(h_{МА}) + \\ &\quad + (44,9 - 6,55 * \log h_{БС}) * \log r + C = \\ &= 46,3 + 33,9 * 3,255273 - 13,82 * 1,60206 - 0,6 + \\ &\quad + (44,9 - 6,55 * 1,60206) * 0 + 3 = \\ &= 46,3 + 110,3537 - 22,1404 - 0,62 + 0 + 3 = 136,89 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

Также рассчитаем значение для сельской и открытой местности используя формулу 5.

$$\begin{aligned} L_{ОХ(село)} &= L_{ОХ(город)} - 4,78 * (\log f)^2 + 18,33 * \log f - 40,94 = \\ &= 136,89 - 4,78 * 10,596802 + 18,33 * 3,255273 - 40,94 = \\ &= 136,89 - 50,652713 + 59,669154 - 40,94 = \\ &= 86,237287 + 18,729154 = 104,97 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

Проведем данные расчеты для значения расстояния передачи сигнала  $r$  от 1 до 20 км и приведем сводную таблицу для расчетов по модели COST231-Хата.

Таблица 2 – Расчеты по модели COST231-Хата

Table 2 - Calculations using the COST231-Hata model

г, км	L <sub>сх</sub> (город)	L <sub>сх</sub> (село)
1	136.89	104.97
2	147.25	115.33
3	153.31	121.39
4	157.61	125.69
5	160.94	129.02
6	163.67	131.74
7	165.97	134.05
8	167.97	136.04
9	169.73	137.80
10	171.30	139.38
11	172.72	140.80
12	174.02	142.10
13	175.22	143.30
14	176.33	144.40
15	177.36	145.44
16	178.32	146.40
17	179.23	147.31
18	180.08	148.16
19	180.89	148.97
20	181.66	149.73

На Рисунке 3 представлена графическая иллюстрация проведенных расчетов по модели COST231-Хата для понимания степени ослабления сигнала в зависимости от расстояния и местности.

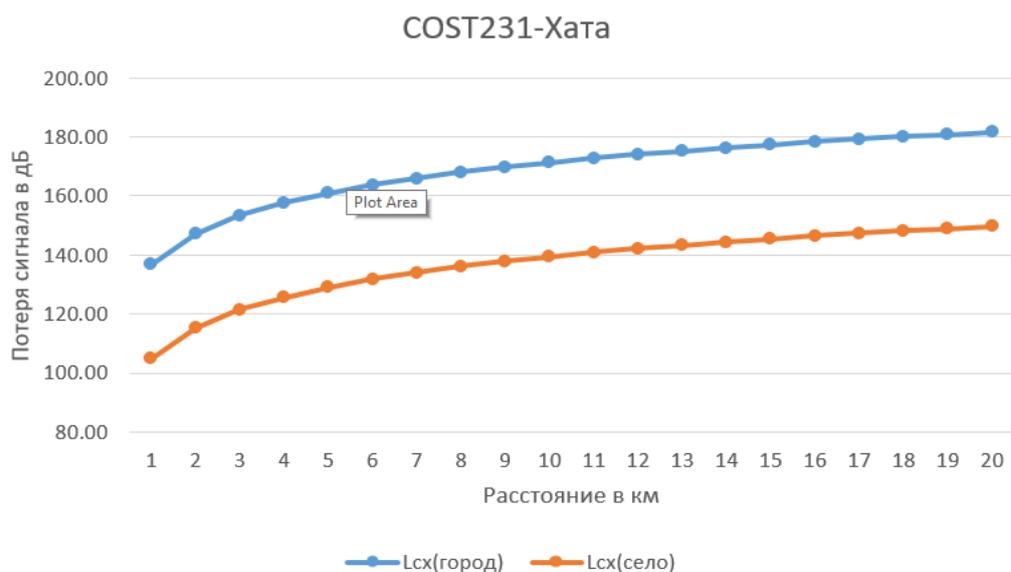


Рисунок 3 – Графическое отображение расчетов по модели COST231-Хата

Figure 3 – Graphic display of calculations for the COST231-Khata model

В сравнении с двумя приведенными выше моделями, также будет рассмотрена модель Кся-Бертони, которая позволяет учесть множество дополнительных параметров для городских условий и благодаря этому увеличить точность расчета.

Модель основана на уравнении волновой оптики и отлично подходит для учета следующих городских условий:

- размер улиц;
- расстояние мобильной антенны до стены здания;
- отражение от стены здания;
- дифракция крыш зданий.

$$L = -10 * \log \left( \frac{\lambda}{4\pi * R} \right)^2 - 10 * \log \left( \frac{\lambda}{2\pi^2 * r} * \left[ \frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right]^2 \right) - \quad (6)$$

$$-10 * \log \left( 2,35^2 * \left[ \frac{\Delta h_b}{R} * \sqrt{\frac{d}{\lambda}} \right]^{1,8} \right)$$

где:

- $\lambda$  – длина волны (м) ( $\lambda = \frac{c}{f}$ , где  $c = 3 * 10^8$  м/с – скорость света);
- $R$  – расстояние между базовой станцией и мобильной станцией (м);
- $\theta = \arctan \frac{\Delta h_M}{x} * \frac{180}{\pi}$  (рад);
- $\Delta h_M = h_0 - h_{МС}$  – разность высот среднего уровня крыш и антенны МС соответственно (м);
- $x = \frac{\omega}{2}$  – расстояние по горизонтали между мобильной станцией и краем крыши, на которую попадает волна (м);
- $\omega$  – средняя ширина улиц (м);
- $\Delta h_b = h_{БС} - h_0$  – разность высот антенны базовой станции и среднего уровня крыш соответственно (м);
- $d$  – средний интервал между кварталами (м).

Расстояние от точки преломления луча до мобильной антенны (м) представлено следующей формулой:

$$r = \sqrt{\Delta h_M^2 + x^2} \quad (7)$$

где:

- $\Delta h_M = h_0 - h_{МС}$  – разность высот среднего уровня крыш и антенны МС соответственно (м);
- $x = \frac{\omega}{2}$  – расстояние по горизонтали между мобильной станцией и краем крыши, на которую попадает волна (м).

Угол падения преломленного луча на мобильную антенну (рад) представлен формулой:

$$\theta = \arctan \left( \frac{\Delta h_M}{x} \right) * \frac{180}{\pi} \quad (8)$$

где:

- $\Delta h_M = h_0 - h_{MC}$  – разность высот среднего уровня крыш и антенны MC соответственно (м);
- $x = \frac{\omega}{2}$  – расстояние по горизонтали между мобильной станцией и краем крыши, на которую попадает волна (м).

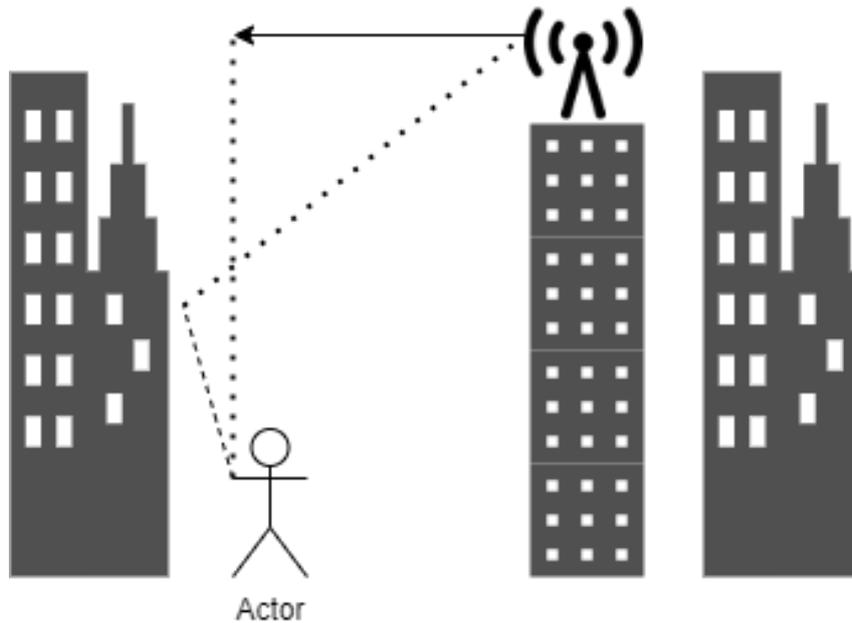


Рисунок 4 – Схема расположения антенны для расчета в модели Кся-Бертони  
Figure 4 – Antenna layout for calculation in the Ksya-Bertoni model

Однако у модели есть недостаток, который выражается в ограничении по дальности, модель можно использовать для расчета в городских условиях на расстояние не более 1,5-2 км.

Входными данными для модели будут:

- частота сигнала  $f$  – 1000 МГц;
- длина волны  $\lambda = 0,3$
- средняя высота крыш  $h_0$  – 55 м;
- высота базовой станции  $h_{bc}$  – 60 м.
- средняя ширина улиц  $\omega$  – 10 м.
- расстояние по горизонтали между мобильной станцией и краем крыши  $x$  – 5 м.
- расстояние зоны покрытия – 0,1 до 1,5 км;
- высота мобильной антенны (средний рост человека)  $h_{ac}$  – 1,7 м;
- средний интервал между кварталами  $d$  – 50 м;
- разность высот антенны базовой станции и среднего уровня крыш соответственно  $\Delta h_b$  – 5 м;
- разность высот среднего уровня крыш и антенны мобильной станции  $\Delta h_M$  – 53,3 м.

Вычислим коэффициент  $\tau$  по формуле 7:

$$r = \sqrt{\Delta h_M^2 + x^2} = \sqrt{53,3^2 + 5^2} = \sqrt{2840,89 + 25} = \sqrt{2865,89} = 53,5340$$

Вычислим коэффициент  $\theta$  по формуле 8:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta h_M}{x}\right) * \frac{180}{\pi} = \arctan\left(\frac{53,3}{5}\right) * \frac{180}{\pi} = 1,4772 * 57,2957 = 84,6408$$

Рассчитаем модель по формуле 6:

$$\begin{aligned} L &= -10 * \log\left(\frac{\lambda}{4\pi * R}\right)^2 - 10 * \log\left(\frac{\lambda}{2\pi^2 * r} * \left[\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta}\right]^2\right) - 10 \\ & * \log\left(2,35^2 * \left[\frac{\Delta h_b}{R} * \sqrt{\frac{d}{\lambda}}\right]^{1,8}\right) = \\ &= -10 * \log\left(\frac{0,3}{4\pi * 0,1}\right)^2 - 10 * \log\left(\frac{0,3}{2\pi^2 * 53,5340} * \left[\frac{1}{84,6408} - \frac{1}{2\pi + 84,6408}\right]^2\right) \\ & - 10 * \log\left(2,35^2 * \left[\frac{5}{0,1} * \sqrt{\frac{50}{0,3}}\right]^{1,8}\right) = \\ &= -10 * (-1,244177) - 10 * (-9,722995) - 10 * 5,799946 = \\ &= 12,44177 + 97,22995 - 57,99946 = 51,67 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

Проведем данные расчеты для значения расстояния передачи сигнала  $r$  от 0,1 до 1,5 км и составим сводную таблицу для расчетов по модели Кся-Бертони.

Таблица 3 – Расчеты по модели Кся-Бертони

Table 3 - Calculations by the Ksya-Bertoni model

$r$ , км	$L_{KB}$ (город)
0.1	51.67227456
0.2	63.1114144
0.3	69.80288224
0.4	74.55055423
0.5	78.23313473
0.6	81.24202208
0.7	83.78600008
0.8	85.98969407
0.9	87.93348992
1	89.67227456
1.1	91.2451966
1.2	92.68116191
1.3	94.00212195
1.4	95.22513992
1.5	96.36374241

На Рисунке 5 представлена графическая иллюстрация проведенных расчетов по модели Кся-Бертони для понимания степени ослабления сигнала в зависимости от расстояния и местности.

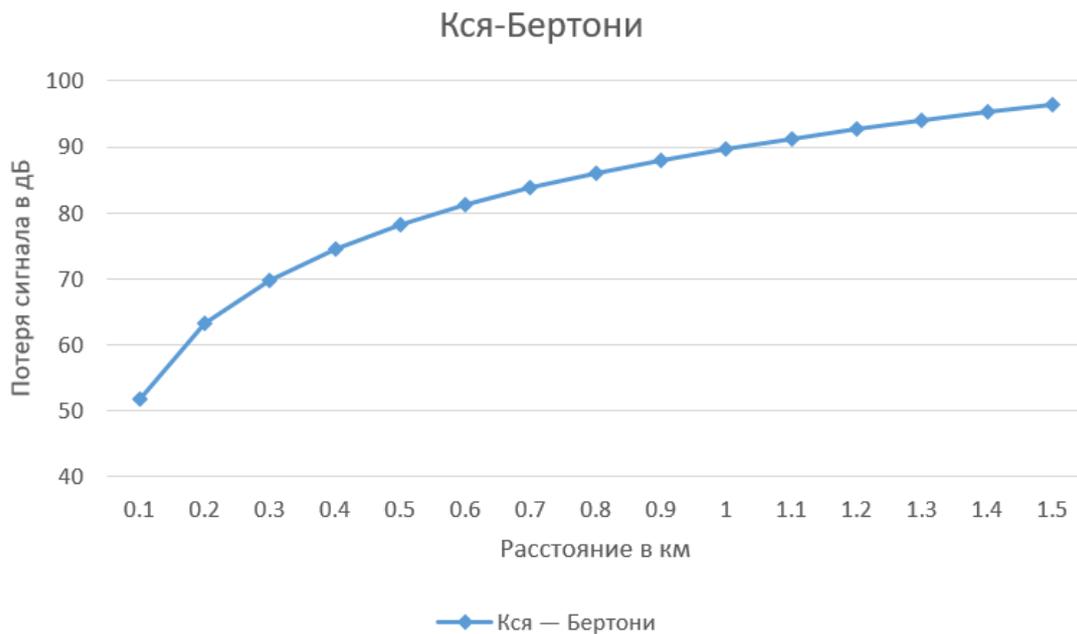


Рисунок 5 – Графическое отображение расчетов по модели Кся-Бертони

Figure 5 – Graphical display of calculations by the Ksya-Bertoni model

### Заключение

Основываясь на показателях, полученных в результате применения моделей Окамура-Хата, COST231-Хата и Кся-Бертони, можно сделать следующие выводы. Все модели подходят для получения необходимых значений, учитывая различные условия, однако целесообразно комбинировать использование этих моделей, в зависимости от места применения, внешних параметров и используемой частоты сигнала передачи. Например, для сельской и открытой местности можно использовать модели Окамура-Хата и COST231-Хата, так как модель Кся-Бертони не подходит для расчетов на длинные дистанции. Какую именно из моделей использовать, зависит от того, какая частота передачи сигнала: на малых частотах (от 150 до 1500 МГц) рекомендуется использовать модель Окамура-Хата, так как она показывает более точные результаты именно в данном диапазоне, а для более высоких частот (от 1500 до 2000 МГц) – модель COST231-Хата соответственно.

При этом при расчетах в городской местности данные две модели также можно использовать, если расчеты производятся для мелких городов или для открытых местностей в городе. Однако для больших городов со множеством высоких зданий рекомендуется использовать модель Кся-Бертони, которая основана на уравнении волновой оптики и отлично подходит для учета следующих городских условий. Данная модель учитывать высоту зданий, ширину улиц, расстояние от мобильной антенны до зданий и высоту базовых антенн. Это позволяет производить более точные расчеты в подобных условиях.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Юрчук А.Б. *Сети мобильной связи LTE. Технологии и архитектура*. Москва: Эко-Трендз; 2010. 284 с.
2. Рыжков А.Е., Сиверс М.А., Воробьев В.О., Гусаров А.С., Слышков А.С., Шуньков Р.В. *Системы и сети радиодоступа 4G: LTE*. СПб: Линк; 2012. 226 с.

3. Сныткин И.И., Спирин А.В. Архитектура пакетных радиосетей систем передачи данных. *Информационная безопасность – актуальная проблема современности*. 2010;111–115.
4. Владимиров С.С. *Беспроводные системы передачи данных. Расчет потерь на трассе радиоканала: практикум*. СПб: СПбГУТ; 2020. 32 с.
5. Дворников С.В., Балыков А. А., Котов А.А. Упрощенная модель расчета потерь сигнала в радиолинии, полученная путем сравнения квадратичной формулы Введенского с существующими эмпирическими моделями. *Системы управления, связи и безопасности*. 2019;87–99.
6. Утц В.А. Исследование потерь при распространении радиосигнала сотовой связи на основе статистических моделей. *Вестник Балтийского государственного университета им. И. Канта*. 2011;5:44–49.
7. Шилин А.Н., Ле Ф.С. Анализ потерь радиосигнала сотовой связи. *Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации*. 2016;33–38.
8. Аксенов А.А. Вопросы передачи информации в радиосетях. *Молодежь и XXI век – 2020 материалы X международной молодежной научной конференции*. 2020;11–14.
9. Приоров А.Л., Седов А.С. Исследование и анализ характеристик самоорганизующейся радиосети. *Перспективные технологии в средствах передачи информации*. 2019;28–33.
10. Царев А.Б., Крахмалева М.М. Моделирование полносвязной радиосети. *Радиотехника*. 2009;95–98.

#### REFERENCES

1. Tikhvinsky V.O., Terentyev S.V., Yurchuk A. B. *Mobile networks LTE. Technology and architecture*. Moscow: Eco-Trends; 2010. 284 p. (In Russ.)
2. Ryzhkov A.E., Sivers M.A., Vorobiev V.O., Gusarov A.S., Slyshkov A.S., Shunkov R.V. *4G radio access systems and networks: LTE*. SPb: Link; 2012. 226 p. (In Russ.)
3. Snutkin I.I., Spirin A.V. The architecture of packet radio networks of data transmission systems. *Informatsionnaya bezopasnost' – aktual'naya problema sovremennosti = Information security as an urgent problem of nowadays*. 2010;111-115. (In Russ.)
4. Vladimirov S. S. *Wireless data transmission systems. Calculation of losses on the path of the radio channel: workshop*. SPb: SPbSUT; 2020. 32 p. (In Russ.)
5. Dvornikov S.V., Balykov A.A., Kotov A.A. Simplified model for calculating signal losses in a radio line, obtained by comparing the Vvedensky quadratic formula with existing empirical models. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Control systems, communications and security*. 2019;2:87–99. (In Russ.)
6. Utz VA Study of losses in the propagation of a cellular radio signal on the basis of statistical models. *Vestnik Baltiyskogo gosudarstvennogo universiteta im. I. Kanta = Bulletin of the Baltic State University. I. Kant*. 2011;5:44–49. (In Russ.)
7. Shilin A.N., Le F.C. Analysis of cellular radio signal losses. *Operativnoye upravleniye v elektroenergetike: podgotovka personala i podderzhaniye yego kvalifikatsii = Operational management in the electric power industry: training of personnel and maintenance of their qualifications*. 2016;33–38. (In Russ.)
8. Aksenov A.A. Questions of information transmission in radio networks. *Molodezh' i XXI vek – 2020 materialy X mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii = Youth and the XXI century – 2020 materials of the X international youth scientific conference*. 2020;11–14. (In Russ.)

9. Priorov A.L., Sedov A.S. Research and analysis of the characteristics of a self-organizing radio network. *Perspektivnyye tekhnologii v sredstvakh peredachi informatsii = Advanced technologies in the means of information transmission*. 2009;95–98. (In Russ.)
10. Tsarev A.B., Krachmaleva M.M. Modeling a fully meshed radio network. *Radiotekhnika = Radio engineering*. 2009; 95–98. (In Russ.)

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Саргсян Эрик Ромович**, аспирант Воронежского государственного технического университета, Воронеж, Российская Федерация  
e-mail: [xanderx2012@gmail.com](mailto:xanderx2012@gmail.com)

**Sargsyan Erik Romovich**, PhD Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

**Рындин Александр Алексеевич**, доктор технических наук, профессор Воронежского государственного технического университета, Воронеж, Российская Федерация  
e-mail: [alexander.a.ryndin@me.com](mailto:alexander.a.ryndin@me.com)

**Ryndin Alexander Alekseevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

*Статья поступила в редакцию 07.11.2021; одобрена после рецензирования 02.12.2021; принята к публикации 28.12.2021.*

*The article was submitted 07.11.2021; approved after reviewing 02.12.2021; accepted for publication 28.12.2021.*