

ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ЗАТУХАНИЯ СИГНАЛА С УЧЕТОМ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАСТРОЙКИ МЕСТНОСТИ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ*

М.В. МАМЧЕНКО, В.А. ЗОРИН, М.А. РОМАНОВА

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
117997, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 65

Аннотация. В работе представлена эмпирическая модель расчета затухания сигнала с учетом коэффициента застройки местности для городских условий в диапазоне частот 150–2000 МГц, предназначенная для обеспечения связи и передачи данных между беспилотными транспортными средствами наземного и воздушного базирования, объединенными в смешанные группы. Представлены описание и анализ основных существующих моделей распространения радиоволн и затухания в различных условиях (город, пригородные районы и сельская местность), в том числе учитывающие коэффициент застройки местности при расчете потерь сигнала на трассе между абонентской и базовой станциями. Оценена применимость основных существующих моделей к условиям функционирования смешанной группы беспилотных транспортных средств, в том числе высотам антенн абонентских и базовых станций и расстоянию между ними. Для диапазона частот 1000–2000 МГц на основе известных моделей Хата (Окамура – Хата) и COST231 – Хата сформированы эмпирические выражения, позволяющие учесть коэффициент застройки для расчета потерь сигнала на трассе между воздушными и наземными беспилотными транспортными средствами в составе смешанной группы.

Ключевые слова: беспилотные транспортные средства, умный город, потери сигнала, затухание сигнала, эмпирическая модель, модель SSIR, модель Окамура, модель Хата, модель Окамура – Хата, модель COST231 – Хата, модель Эриксона 9999

Статья поступила в редакцию 09.02.2022

Принята к публикации 11.02.2022

Для цитирования. Мамченко М.В., Зорин В.А., Романова М.А. Эмпирическая модель расчета затухания сигнала с учетом коэффициента застройки местности для беспилотных транспортных средств // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 1 (105). С. 59–73. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-1-105-59-73

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение получают системы беспилотного транспорта (БТС), функционирующие в среде умного города и предназначенные для перевозки пассажиров и грузов без непосредственного участия человека в процессе управления движением и выполнением заданий. Подобные средства являются основой перспективной концепции организации движения и логистики в умных городах [1].

Развертывание новых систем связи и технологий передачи данных (например, решений Интернета вещей) предполагает, что БТС смогут передавать в центры управления движением (обработки данных) большие массивы информации, в том числе о собственном состоянии, состоянии перевозимых людей/грузов и текущей обстановке в местах

своего нахождения. Кроме того, БТС для их совместного функционирования могут быть объединены в группы, в том числе по принципу гетерогенности (разнородности состава) и межсредности (например, при одновременном использовании БТС воздушного и наземного базирования) [2].

Обеспечение качественной непрерывной связи между группой БТС и центром управления, между ее наземным и воздушным сегментами является основой для успешного функционирования и выполнения задачи всей группы. В случае задействования смешанной группы БТС в условиях отсутствия/недостаточного покрытия действующих систем стационарной беспроводной связи воздушные БТС могут использоваться в качестве базовых станций (БС) для обеспечения передачи данных как в центр управления движением, так и между наземными БТС. В этом случае на распространение радиосигнала и его затухание в зависимости от расстояния будет оказывать значительное влияние высокая плотность застройки и ее гетерогенность в разных районах умного города. Данное условие требуется учитывать при выборе параметров приемо-передатчиков, их антенных систем и высоты полета воздушных БТС, функционирующих в режиме БС для абонентских станций (АС) наземного сегмента смешанной группы [3, 4].

Целью данной работы является анализ основных существующих моделей распространения радиоволн и затухания сигнала в различных условиях (город, пригородные районы, сельская местность), оценка их применимости к моделированию радиосвязи в группе БТС, а также разработка эмпирической модели расчета затухания сигнала с учетом коэффициента застройки местности для городских условий при передаче данных между БТС наземного и воздушного сегментов смешанной группы.

1. ВЫБОР МОДЕЛИ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ СИГНАЛА ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ СВЯЗИ МЕЖДУ ВОЗДУШНЫМИ БТС

Смешанную группу можно условно разделить на два сегмента: наземные и воздушные БТС. Предположим, что наземные БТС осуществляют перемещение по улицам умного города и не заходят внутрь зданий. Будем считать, что наземные БТС являются абонентскими станциями (приемниками радиосигнала), примем высоту подвеса антенны наземного БТС равным 1 м ($h_r = 1$).

Элементы воздушного сегмента БТС будем считать базовыми станциями, передающими радиосигнал. В воздушном сегменте смешанной группы связь между БТС должна обеспечивать возможность быстрой передачи данных между наземными элементами группы и большую дальность радиодоступности при связи между БС. Предположим, что все воздушные БТС осуществляют полеты на одной высоте $h = 100$ м выше уровня зданий, что снижает до минимума влияние городской застройки на распространение радиосигнала в каналах связи между БС, в этом случае влиянием переотражений сигнала от крыш и стен зданий, которое будет незначительным, можно пренебречь. Примем высоту подвеса антенны БС равной 100 м ($h_t = 100$). Предположим, что точное значение несущей частоты БС может отличаться для различных систем и каналов радиосвязи, при этом радиосвязь в каналах «БС – БС» и «БС – АС» организуется в диапазоне 150–2000 МГц.

Схематично организация радиосвязи в смешанной группе БТС представлена на рисунке 1.

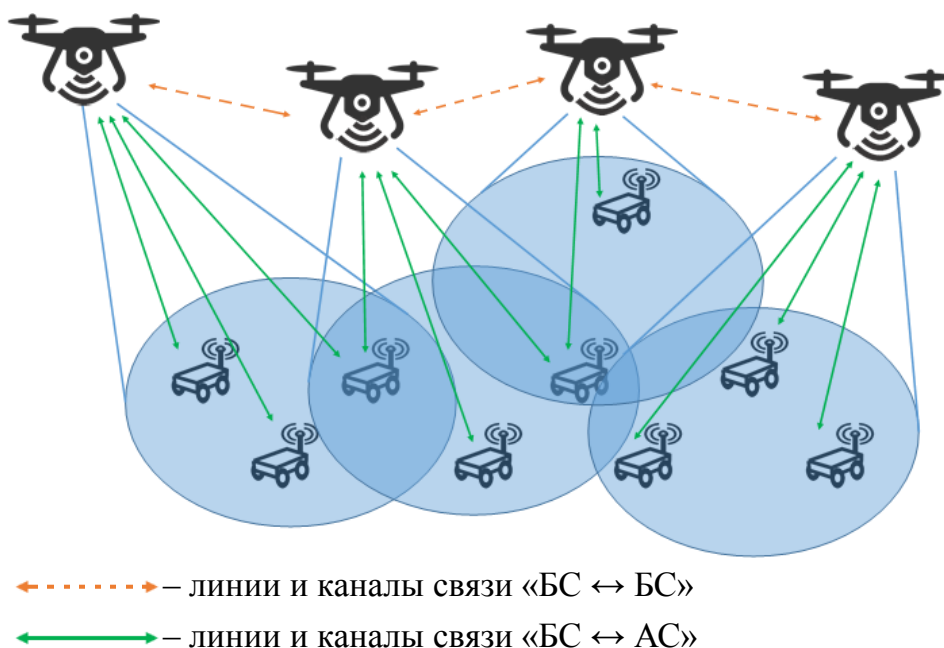


Рис. 1. Схема организации радиосвязи в смешанной группе БТС

Для описания потерь сигнала в каналах связи между БТС воздушного базирования возможно использовать модель распространения и затухания сигнала в свободном пространстве, которая выводится из формулы передачи Фрииса [5]:

$$\frac{P_r}{P_t} = G_r G_t \left(\frac{c}{4\pi R f} \right)^2, \quad (1)$$

где G_t – коэффициент усиления передающей антенны; G_r – коэффициент усиления приемной антенны; P_t – мощность передающей антенны (Вт, без учета потерь); P_r – мощность, принимаемая антенной (Вт, без учета потерь); R – расстояние между антеннами двух воздушных БТС (м); f – рабочая частота (Гц); c – скорость света в среде (м/с).

Зачастую значениями коэффициентов усиления и мощности передающей и принимаемой антенны пренебрегают, а уравнение Фрииса записывают в децибельной форме. В этом случае расчет потери на трассе между БТС в воздушном сегменте группы запишется следующим образом [5]:

$$\begin{aligned} L &= 20 \times \lg \left(\frac{4\pi R f}{c} \right) = 20 \times \lg(R) + 20 \times \lg(f) + 20 \times \lg \left(\frac{4\pi}{c} \right) = \\ &= 20 \times \lg(R) + 20 \times \lg(f) - 147,55. \end{aligned} \quad (2)$$

2. СВЯЗЬ В КАНАЛЕ «ВОЗДУШНЫЙ БТС – НАЗЕМНЫЙ БТС»

В линиях связи между БТС наземного и воздушного базирования на распространение и затухание сигнала уже значительно влияют дифракция радиоволн (в том числе переотражение) и высота зданий. Кроме того, существенное влияние также оказывает плотность застройки местности (района) зданиями, которую можно выразить в виде следующего коэффициента:

$$PB = \frac{S_{\text{здания}}}{S_{\text{общая}}} \times 100, \quad (3)$$

где PB – коэффициент застройки (%); $S_{\text{здания}}$ – площадь местности/района, застроенная зданиями (кв. м); $S_{\text{общая}}$ – общая площадь местности/района (кв. м).

Для расчета и моделирования потерь на трассе с учетом коэффициента застройки в диапазоне 150–1000 МГц может использоваться известная эмпирическая модель CCIR, разработанная сектором радиосвязи МСЭ (МСЭ-R). Модель считается валидной для диапазона частот $150 \text{ МГц} \leq f < 1000 \text{ МГц}$, высот антенны БС $30 \text{ м} \leq h_{te} \leq 200 \text{ м}$, высот антенны АС $1 \text{ м} \leq h_{re} \leq 10 \text{ м}$ и дальности трассы $1 \text{ км} \leq R \leq 20 \text{ км}$. Потери сигнала рассчитываются следующим образом [6, 7]:

$$L = A + B \times \lg(R) - E, \quad (4)$$

$$A = 69,55 + 26,16 \times \lg(f) - 13,82 \times \lg(h_t) - \\ - (1,1 \times \lg(f) - 0,7) \times h_r + 1,56 \times \lg(f) - 0,8, \quad (5)$$

$$B = 44,9 - 6,55 \times \lg(h_t),$$

$$E = 30 - 25 \times \lg(PB), \quad (6)$$

где PB – процент застройки местности (%); f – частота сигнала (МГц); h_t – высота передающей антенны (м); h_r – высота приемной антенны (м) [6].

Недостатком модели CCIR является сравнительно небольшой диапазон частот, на которых она считается валидной. Для расширения и обеспечения возможности моделирования связи между воздушным и наземным сегментами группы БТС необходимо проанализировать и оценить применимость существующих наиболее известных эмпирических моделей расчета затухания сигнала на трассе для частот $f > 1000 \text{ МГц}$ и разработать собственную модель, учитывающую значения коэффициента застройки при расчете потерь мощности сигнала.

3. СУЩЕСТВУЮЩИЕ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ЗАТУХАНИЯ СИГНАЛА НА ТРАССЕ ДЛЯ ЧАСТОТ $F > 1000 \text{ МГц}$

Помимо CCIR, в работе рассматриваются модели Хата (Окамура – Хата), COST231 – Хата и Эриксона 9999. Другие известные модели расчета потерь не рассматриваются по следующим причинам:

1. В модели COST231 – Уолфиша – Икегами максимальное значение высоты подвеса антенны БС составляет 50 м, что не соответствует используемым в работе исходным данным.

2. Несмотря на полноту и комплексность модели Ксиа – Бертони, ее применение в рамках текущего исследования невозможно из-за необходимости наличия значений таких параметров, как высота ближайшего к АС здания по направлению к БС (или средней высоты застройки местности). Учет потерь по данной модели будет реализован в последующих работах [8].

3. Валидный диапазон частот для модели Ибрагима – Парсонса совпадает с аналогичным параметром для модели CCIR.

4. Модель Ли формировалась на основании измерений, проведенных исключительно на частоте $f = 900 \text{ МГц}$.

5. В модели SU1 минимальная высота антенны АС составляет 2 м, что не соответствует используемым в работе исходным данным.

6. Использование модели Окамура [11, 12] связано со сложностями в составлении модели из-за наличия графических зависимостей.

3.1. МОДЕЛЬ ХАТА (ОКАМУРА – ХАТА)

Для упрощения работы с моделью Окамура была разработана модель Хата для частот 150–1500 МГц, где вместо графических зависимостей составляющих потерь используются аналитические выражения. Модель применима для следующих условий: расстояние от АС до БС $1 \text{ км} < R < 20 \text{ км}$, высота антенны БС $30 \text{ м} < h_{te} < 200 \text{ м}$, высота антенны АС $1 \text{ м} < h_{re} < 10 \text{ м}$ [13]. Расчет потерь на трассе в городских условиях осуществляется следующим образом [11, 14]:

$$L_{50}(\text{urban}) = 69,55 + 26,16 \times \lg(f) - 13,82 \times \lg(h_t) + \\ + (44,9 - 6,55 \times \lg(h_t)) \times \lg(R) - \alpha(h_r), \quad (7)$$

где L_{50} – медианное значение затухания сигнала на трассе (дБ); f – частота радиосигнала (МГц); R – дальность связи (км); h_t – высота антенны БС (м); h_r – высота антенны АС (м); $\alpha(h_r)$ – поправочный коэффициент, зависящий от типа местности (дБ) [13].

Модель Хаты позволяет отдельно рассчитывать потери сигнала для больших, средних и малых городов, пригородных районов, а также сельской местности (местности со слабой застройкой). В частности, для средних и малых городов поправочный коэффициент $\alpha(h_{re})$ рассчитывается следующим образом:

$$\alpha(h_r) = (1,1 \times \lg(f) - 0,7) \times h_r - (1,56 \times \lg(f) - 0,8). \quad (8)$$

Поправочный коэффициент для больших городов рассчитывается следующим образом [13, 15]:

$$\alpha(h_r) = \begin{cases} 8,29 \times (\lg(1,54 \times h_r))^2 - 1,1 & \text{для } f \leq 200 \text{ МГц,} \\ 3,2 \times (\lg(11,75 \times h_r))^2 - 4,97 & \text{для } f > 200 \text{ МГц.} \end{cases} \quad (9)$$

Для пригородной зоны потери рассчитываются в соответствии с выражением (10) [15]:

$$L_{50}(\text{suburban}) = L_{50}(\text{urban}) - 2 \times \left(\lg\left(\frac{f}{28}\right) \right)^2 - 5,4. \quad (10)$$

Для районов с малой застройкой или открытой местности расчет потерь осуществляется в соответствии с выражением (11):

$$L_{50}(\text{open}) = L_{50}(\text{urban}) - 4,78 \times (\lg(f))^2 - 18,33 \times \lg(f) - K, \quad (11)$$

где $K = 40,98$ – для пустынной местности, $K = 35,94$ – для сельской местности [12].

3.2. МОДЕЛЬ COST231 – ХАТА

Модель применима для диапазона частот 1500–2000 МГц [16], расстояний между БС и АС 1–20 км, высот подвеса антенн БС и АС 30–200 м и 1–10 м соответственно. Модель позволяет рассчитывать потери для четырех случаев: городских условий (L_0), пригородных районов (L_1), плотной застройки (L_2) и сельской местности (L_3) [17]. Расчет потерь описывается следующей формулой [18]:

$$L_{\text{City}} = 46,3 + 33,9 \lg(f) - 13,82 \times \lg(h_t) - a(h_r) + \\ + (44,9 - 6,55 \times \lg(h_t)) \times \lg(R) + C, \quad (12)$$

где f – частота передаваемого радиосигнала (МГц); h_t – высота передающей антенны (м), $30 \text{ м} < h_t < 200 \text{ м}$; R – расстояние между передающей и приемной антеннами (км), $1 \text{ км} < R < 20 \text{ км}$; h_r – высота приемной антенны (м) $1 \text{ м} < h_r < 10 \text{ м}$; C – коэффициент, $C = 0$ для пригородных значений и сельской местности районов, $C = 3$ для городских условий [14]; $a(h_r)$ – поправочный коэффициент для приемной антенны.

Потери для городских условий L_0 рассчитываются по формуле (12) при $C = 0$, а поправочный коэффициент $a(h_r)$ рассчитывается следующим образом [17]:

$$a(h_r) = (1,1 \times \lg(f) - 0,7) \times h_r - (1,56 \times \lg(f) - 0,8). \quad (13)$$

Потери для пригородных районов L_1 определяются по формуле (14) [17]:

$$L_1 = L_0 - 2 \times \left(\lg\left(\frac{f}{28}\right) \right)^2 - 5,4. \quad (14)$$

Для расчета потерь в условиях плотной городской застройки L_2 в формуле (12) используется значение коэффициента $C = 3$, а поправочный коэффициент $a(h_r)$ рассчитывается следующим образом [17]:

$$a(h_r) = 3,2 \times (\lg(11,75 \times h_r))^2 - 4,97. \quad (15)$$

Потери для районов слабой застройки (сельской местности) находят следующим образом [17]:

$$L_3 = L_0 - 4,78 \times (\lg(f))^2 + 18,33 \times \lg(f) - 40,94. \quad (16)$$

3.3. Модель Эриксона 9999

Представляет собой расширение модели Окамура – Хата для частот $f \geq 1500$ МГц [17]. Потери на трассе рассчитываются по следующей формуле:

$$L = a_0 + a_1 \times \lg(R) + a_2 \times \lg(h_t) + a_3 \times \lg(h_t) \times \lg(R) - 3,2 \times (\lg(11,75 \times h_r))^2 + 44,49 \times \lg(f) - 4,78 \times (\lg(f))^2, \quad (17)$$

где f – частота передаваемого радиосигнала (МГц); h_t – высота передающей антенны (м); h_r – высота приемной антенны (м); R – расстояние между АС и БС (км).

Значения коэффициентов a_0 , a_1 , a_2 и a_3 указаны в таблице 1 [19, 20].

Таблица 1

ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ МОДЕЛИ ЭРИКСОНА 9999

Тип местности	a_0	a_1	a_2	a_3
Городская	36,2	30,2	12	0,1
Пригородная	43,2	68,93	12	0,1
Сельская	45,95	100,6	12	0,1

4. ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАТУХАНИЯ СИГНАЛА В ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ ДЛЯ СМЕШАННЫХ ГРУПП БТС

4.1. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ МОДЕЛЕЙ ЗАТУХАНИЯ СИГНАЛА В ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ

В таблице 2 представлена оценка применимости рассмотренных эмпирических моделей распространения радиоволн в городских условиях с минимально и максимально допустимыми значениями диапазона частот, высоты подвеса антенн АС и БС и расстояния между приемником и передатчиком, для которых вышеуказанные модели считаются валидными.

Таблица 2

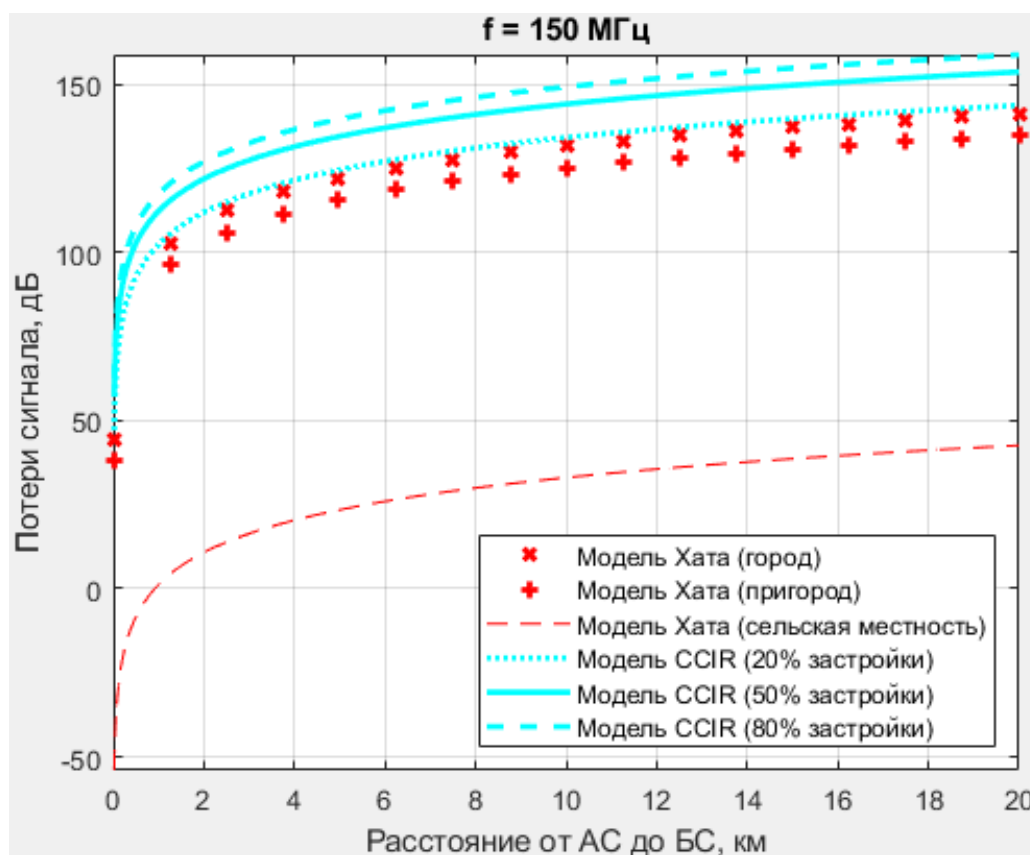
**ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ЭМПИРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН
В ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ**

Название модели	Диапазон частот, МГц	Трасса, км	Высота антенны БС, м	Высота антенны АС, м	Особенности
CCIR	150 – 1000	1 – 20	30 – 200	1 – 10	Учитывается коэффициент застройки
Хата (Окамура – Хата)	150 – 1500	1 – 20	30 – 200	1 – 10	
COST231 – Хата	1500 – 2000	1 – 20	30 – 200	1 – 10	
Эриксона 9999	≥ 1500	1 – 20*	30 – 200*	1 – 10*	Значения * взяты из модели Хата (Окамура – Хата)

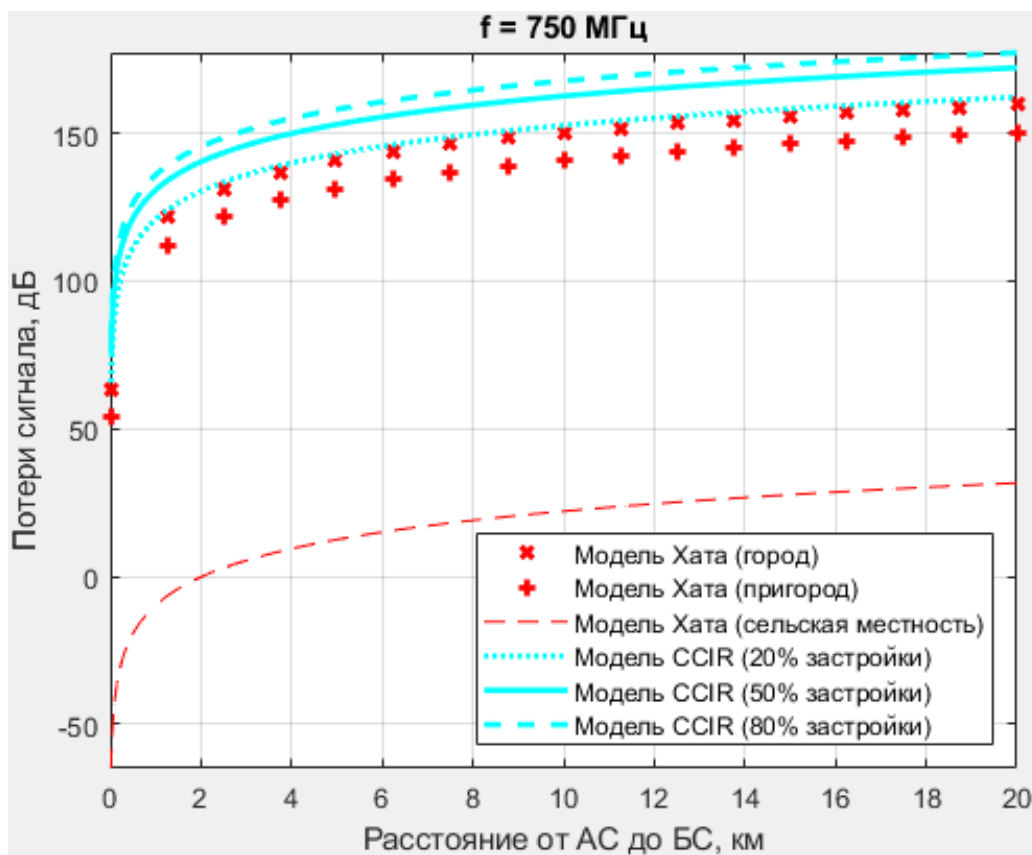
Графики затухания сигнала для рабочих частот 150, 750, 1250 и 1850 МГц, рассчитанные в соответствии с вышеуказанными моделями и с учетом применимости в различных диапазонах частот, представлены на рисунке 2.

В связи с тем, что эмпирическая модель Хата основана на данных модели Окамура, заменяя графические вычисления поправочных коэффициентов аналитическими выражениями, модель Окамура далее рассматривать не будем.

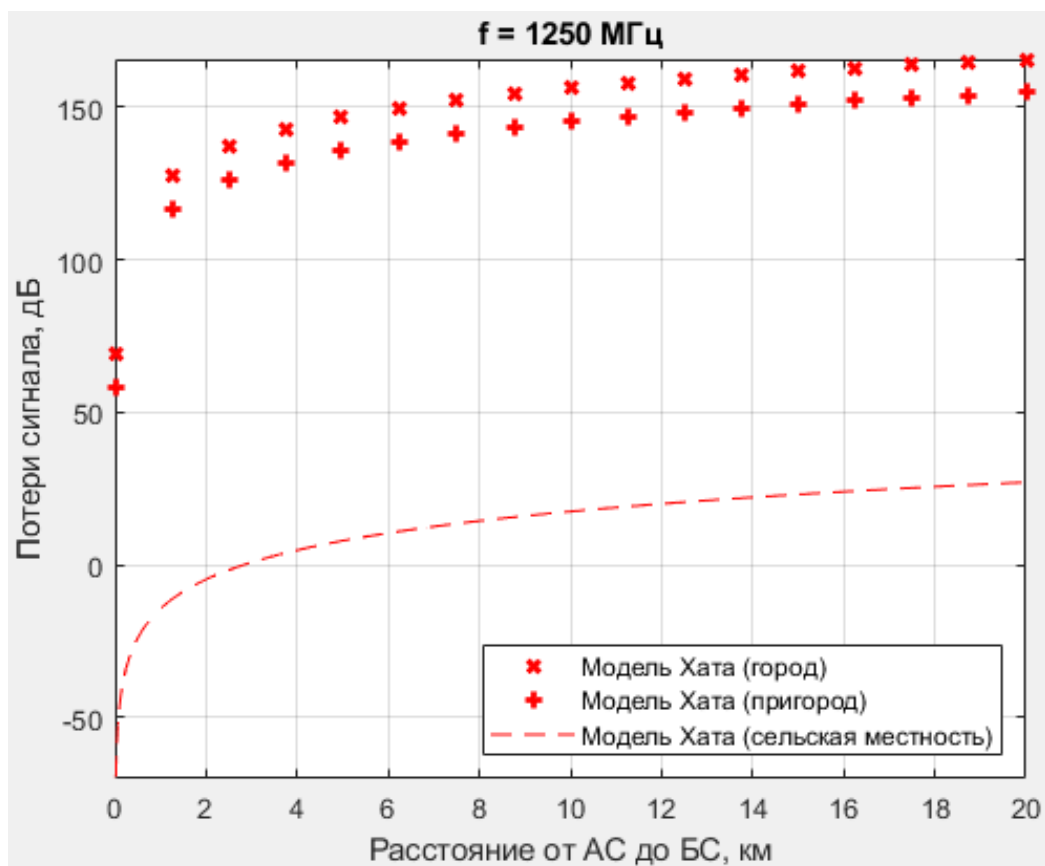
Для диапазонов частот 1000–1500 МГц и 1500–2000 МГц требуется сформировать эмпирическую модель расчета потерь сигнала, учитывающую коэффициент застройки местности (по аналогии с моделью CCIR для диапазона частот 150–1000 МГц). В частности, для диапазона частот 1000–1500 МГц для построения модели возможно использование модели Хата (Окамура – Хата), для 1500–2000 МГц – моделей COST231 – Хата и Эриксона 9999.



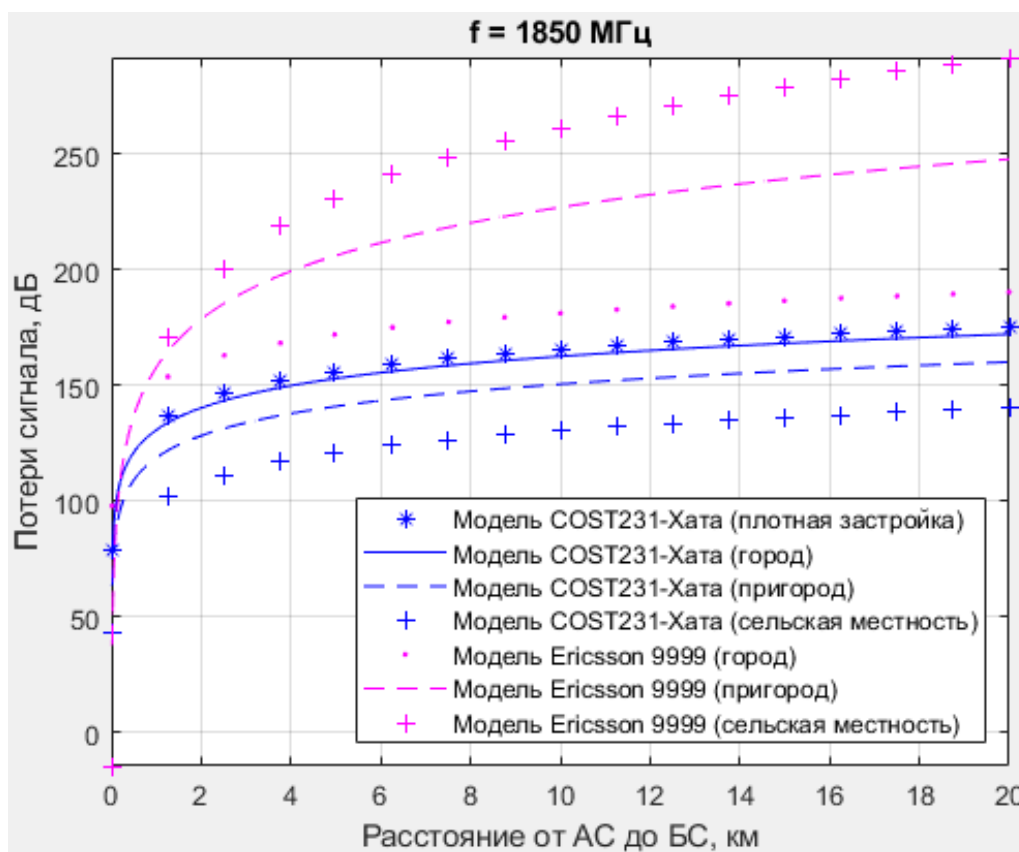
а



б



в



Г

Рис. 2. Графики затухания сигнала в соответствии с рассмотренными моделями

4.2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ЗАТУХАНИЯ СИГНАЛА В ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ С УЧЕТОМ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАСТРОЙКИ ДЛЯ ДИАПАЗОНА 1000–1500 МГц

Из рисунка 2 видно, что для частот 150 и 750 МГц значения затухания сигнала, рассчитанные по модели CCIR для малого коэффициента застройки (>20%), практически полностью соответствовали соответствующим значениям модели Хата (Окамура – Хата) для городских условий. В связи с этим введем в модель (10) с коэффициентом $\alpha(h_{re}) = 3,2 \times (\lg(11,75 \times h_{re}))^2 - 4,97$ дополнительный поправочный коэффициент для учета застройки следующим образом:

$$\begin{aligned}
 L &= L_{50}(\text{urban})_{\text{Hata}} + \frac{PB \times \lg(PB)}{15} = \\
 &= 69,55 + 26,16 \times \lg(f) - 13,82 \times \lg(h_t) + \\
 &\quad + (44,9 - 6,55 \times \lg(h_t)) \times \lg(R) - \\
 &\quad - \left(3,2 \times \left((\lg(11,75 \times h_r))^2 \right) - 4,97 \right) + \frac{PB \times \lg(PB)}{15},
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

где f – частота (МГц), $1000 \text{ МГц} < f \leq 1500 \text{ МГц}$; PB – коэффициент застройки (%), $10 < f \leq 90$; h_t – высота антенны БС (м), $30 \text{ м} < h_t < 200 \text{ м}$; h_r – высота антенны АС (м), $1 \text{ м} < h_r < 10 \text{ м}$; R – расстояние между антеннами АС и БС (км), $1 \text{ км} < R < 20 \text{ км}$.

На рисунке 3 представлены пример расчета потерь в зависимости от расстояния между АС и БС на основании сформированной модели на частоте $f = 1250$ МГц и сравнение с аналогичными значениями, рассчитанными с использованием модели Хата (Окамура – Хата).

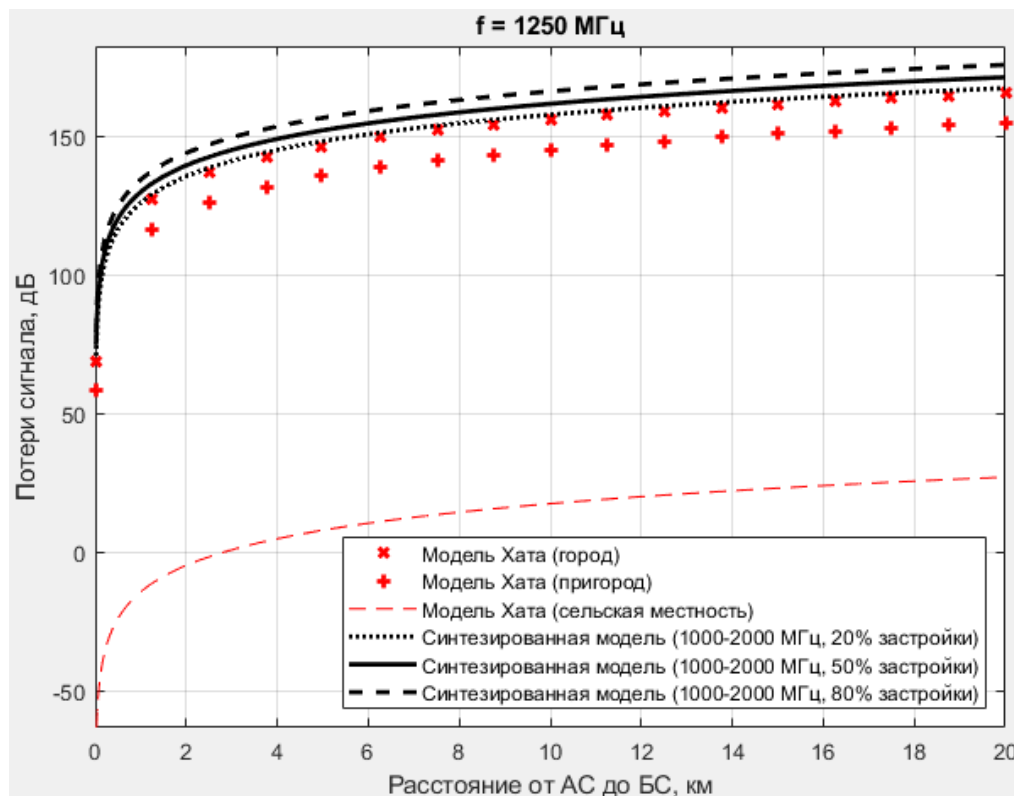


Рис. 3. Расчет потерь сигнала с использованием разработанной модели на частоте $f = 1250$ МГц и сравнение с моделью Хата (Окамура – Хата)

4.3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ЗАТУХАНИЯ СИГНАЛА В ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ С УЧЕТОМ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАСТРОЙКИ ДЛЯ ДИАПАЗОНА 1500–2000 МГц

Для данного диапазона применимы модели Хата (Окамура – Хата) и Эриксона 9999. Однако особенностью последней является то, что из-за специфических значений коэффициентов, используемых по умолчанию, значение потерь в сельской местности больше, чем в пригородной зоне, а в пригородной зоне – больше, чем в городских условиях. Из рисунка 2(г) видно, что модель Эриксона 9999 дает слишком большие значения затухания по сравнению с моделью COST231 – Хата, поэтому возьмем последнюю модель за основу для формирования эмпирической модели с учетом коэффициента застройки для диапазона частот 1500–2000 МГц.

На рисунке 4 представлены расчеты по затуханию сигнала в соответствии с применимыми моделями на пограничных условиях (рабочая частота $f = 1500$ МГц). На рисунке видно, что значения, сформированные в соответствии с моделью затухания сигнала COST231 – Хата в городских условиях L_0 , практически полностью совпадают с аналогичными значениями, рассчитанными по модели Хата (Окамура – Хата) для городских условий. В связи с этим ее возможно взять за основу для формирования модели, учитывающей коэффициент застройки, в диапазоне 1500–2000 МГц.

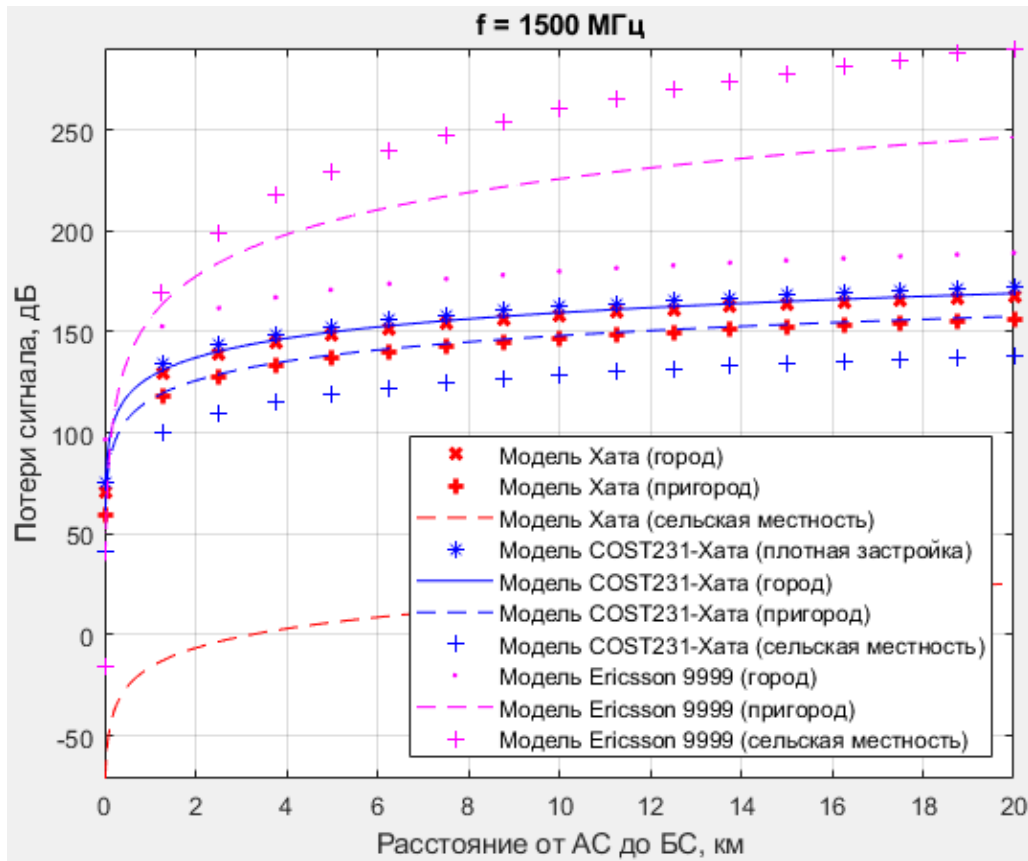


Рис. 4. Расчеты затухания сигнала с использованием известных моделей для рабочей частоты $f = 1500$ МГц

Для этого изменим формулу (18), взяв за основу модель COST231 – Хата в городских условиях L_0 с коэффициентами $a(h_r) = (1,1 \times \lg(f) - 0,7) \times h_r - (1,56 \times \lg(f) - 0,8)$ и $C = 0$. Тогда синтезированная модель с учетом коэффициента застройки для диапазона частот 1500–2000 МГц запишется следующим образом:

$$\begin{aligned}
 L &= L_{0\text{COST231-Hata}} + \frac{PB \times \lg(PB)}{15} = \\
 &= 46,3 + 33,9 \lg(f) - 13,82 \times \lg(h_t) - \\
 &- ((1,1 \times \lg(f) - 0,7) \times h_r - (1,56 \times \lg(f) - 0,8)) + \\
 &+ (44,9 - 6,55 \times \lg(h_t)) \times \lg(R) + \frac{PB \times \lg(PB)}{15},
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

где f – частота (МГц), $1500 \text{ МГц} < f \leq 2000 \text{ МГц}$; PB – коэффициент застройки (%), $10 < PB \leq 90$; h_t – высота антенны БС (м), $30 \text{ м} < h_t < 200 \text{ м}$; h_r – высота антенны АС (м) $1 \text{ м} < h_r < 10 \text{ м}$; R – расстояние между антеннами АС и БС (км), $1 \text{ км} < R < 20 \text{ км}$.

На рисунке 5 представлены пример расчета потерь в зависимости от расстояния между АС и БС на основании сформированной модели на частоте $f = 1850$ МГц и сравнение с аналогичными значениями, рассчитанными с использованием модели COST231 – Хата.

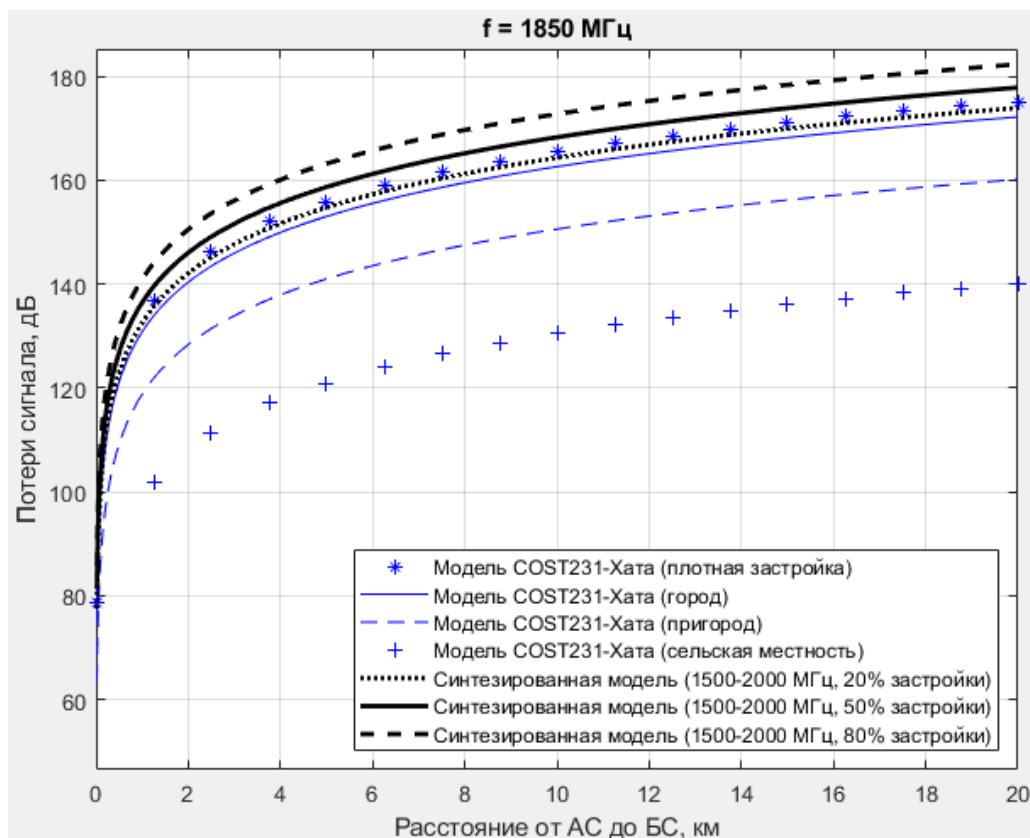


Рис. 5. Расчет потерь сигнала с использованием разработанной модели на частоте $f = 1850$ МГц и сравнение с моделью COST231 – Хата

4.4. ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ СИГНАЛА НА ТРАССЕ С УЧЕТОМ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАСТРОЙКИ В ДИАПАЗОНЕ 150–2000 МГц

На основании модели SSIR и синтезированных моделей для диапазона частот 1000–1500 МГц и 1500–2000 МГц сформируем обобщенную модель расчета потерь сигнала на трассе с учетом коэффициента застройки:

$$L_{AC-BC} = \begin{cases} A + B \times \lg(R) - E, & 150 \text{ МГц} \leq f < 1000 \text{ МГц}, \\ L_{50}(\text{urban})_{Hata} + \frac{PB \times \lg(PB)}{15}, & 1000 \text{ МГц} \leq f < 1500 \text{ МГц}, \\ L_{0\text{COST231-Hata}} + \frac{PB \times \lg(PB)}{15}, & 1500 \text{ МГц} < f \leq 2000 \text{ МГц}, \end{cases} \quad (20)$$

где коэффициенты A, B, E рассчитываются в соответствии с моделью SSIR (4)-(6); $L_{50}(\text{urban})_{Hata}$ – затухание сигнала, рассчитываемое в соответствии с моделью Хата (Окамура – Хата) для городских условий (10); $L_{0\text{COST231-Hata}}$ – потери сигнала, рассчитываемые в соответствии с моделью COST231 – Хата в условиях города по формулам (12) и (13).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена эмпирическая модель расчета затухания сигнала с учетом коэффициента застройки местности для городских условий в диапазоне ча-

стот 150–2000 МГц, предназначенная для использования в интересах обеспечения связи и передачи информации в смешанных группах БТС, состоящих из наземного и воздушного сегментов.

Разработанная эмпирическая модель представляет собой расширение модели CCIR на диапазон частот 1000–2000 МГц. Ее использование позволяет моделировать распространение радиосигнала в городских условиях для оценки и подбора требуемых характеристик систем связи БТС и расчета предельной дальности связи между элементами воздушного и наземного сегментов смешанных групп беспилотных транспортных средств.

В дальнейшем на основе синтезированной модели планируется проведение практических измерений затухания сигнала в городских условиях. Кроме того, будут рассмотрены и адаптированы для расчета потерь сигнала с учетом коэффициента застройки другие существующие модели, в том числе ETSI-33, Хата – Дэвидсона, COST231 – Уолфиша – Икегами, Ксиа – Бертони, Ибрагима – Парсонса и SUI.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Jharko E., Sakrutina E.* Towards the Problem of Creating a Safety Management System in the Transportation Area. IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50. No. 1. Pp. 15610–15615.
2. *Jharko E., Abdulova E., Iskhakov A.Y.* Unmanned Vehicles: Safety Management Systems and Safety Functions. Futuristic Trends in Network and Communication Technologies. FTNCT 2020. Communications in Computer and Information Science. 2021. No. 1396. Pp. 112–121.
3. *Iskhakov A., Jharko E.* Approach to Security Provision of Machine Vision for Unmanned Vehicles of “Smart City”. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2020. Pp. 1–5.
4. *Trefilov P.M., Iskhakov A.Y., Meshcheryakov R.V. et al.* Simulation Modeling of Strapdown Inertial Navigation Systems Functioning as a Means to Ensure Cybersecurity of Unmanned Aerial Vehicles Navigation Systems for Dynamic Objects in Various Correction Modes. 2020 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). 2020. Pp. 1046–1051.
5. *Seybold J.S.* Introduction to RF Propagation. New Jersey: John Wiley and Sons Inc., 2005. 330 p.
6. *Nnadi N.C., Nnadi I.C., Nnadi C.C.* Optimization of CCIR pathloss model using terrain roughness parameter. Mathematical and Software Engineering. 2017. No. 3. Pp. 156–163.
7. *Ozuomba S., Johnson E., Rosemary N.C.* Characterisation of Propagation Loss for a 3G Cellular Network in a Crowded Market Area Using CCIR Model. Review of Computer Engineering Research. 2019. Vol. 5. No. 2. Pp. 49–56.
8. *Saliato A., Roig G., Gómez-Barquero D. et al.* Radio propagation models for DVB-H networks. Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation. 2010. Pp. 1–5.
9. *Ajose S.O., Imoize A.L.* Propagation measurements and modelling at 1800 MHz in Lagos Nigeria. International Journal of Wireless and Mobile Computing. 2013. Vol. 6. No. 2. Pp. 165–174.
10. *Yaremko I.N., Pavlovskaya K.A.* Analiz modeli rasprostraneniya radiovoln SUI dlya resheniya zadach postroyeniya setey sotovoy svyazi 5G [Analysis of the SUI radio wave propagation model for solving the problems of building 5G cellular networks]. *Sbornik*

nauchnykh trudov DonIZHT [Collection of scientific works of DonIZhT]. 2020. No. 56. С. 26–30. (In Russian)

11. *Rappaport T.S.* Wireless Communications: Principles and Practice. 2nd edition. New Jersey: Prentice Hall, 2001. 707 p.

12. *Goldsmith A.* Wireless Communications. 1st edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 674 p.

13. *Hata M.* Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 1980. Vol. 29. No. 3. Pp. 317–325.

14. *Dvornikov S.V., Balykov A.A., Kotov A.A.* A simplified model for calculating signal losses in a radio link obtained by comparing Vvedensky's quadratic formula with existing empirical models. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Control Systems, Communications and Security]. 2019. No. 2. P. 87–99. (In Russian)

15. *Kabaou M.O., Chibani B.R., Abdelkrim M.N.* Path loss models comparison in radio mobile communications. International Journal of Soft Computing. 2008. Vol. 3. No. 2. Pp. 88–92.

16. *Milanovic J., Rimac-Drlje S., Bejuk K.* Comparison of Propagation Models Accuracy for WiMAX on 3.5 GHz. 2007 14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems. 2007. Pp. 111–114.

17. *Zreikat A., Dordevic M.* Performance Analysis of Path loss Prediction Models in Wireless Mobile Networks in Different Propagation Environments. Proceedings of the 3rd World Congress on Electrical Engineering and Computer Systems and Science (EECSS'17). 2017. No. VMW 103. С. VMW 103-1–VMW 103-11.

18. *Dvornikov S.V., Dvornikov A.S., Kotov A.A., Muravtsov A.A.* Analysis of attenuation models of radio signals of decimeter waves. *Informatsiya i Kosmos* [Information and Space]. 2018. No. 2. P. 6–11. (In Russian)

19. *Imoize A.L., Dosunmu A.I.* Path Loss Characterization of Long Term Evolution Network for Lagos, Nigeria. Jordan Journal of Electrical Engineering. 2018. T. 4. No. 2. Pp. 114–128.

20. *Mollet M.S., Kisangiri M.* Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Mobile Communication. Computer Engineering and Intelligent Systems. 2014. Vol. 5. No. 9. Pp. 1–10.

Информация об авторах

Мамченко Марк Владиславович, науч. сотр. лаборатории № 80 «Киберфизические системы», Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук;

117997, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 65;

markmamcha@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6366-9786>

Зорин Василий Александрович, ведущий инженер лаборатории № 80 «Киберфизические системы», Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук;

117997, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 65;

V.a.zorin@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7308-8387>

Романова Мария Андреевна, науч. сотр. лаборатории № 80 «Киберфизические системы», Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук;

117997, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 65;

rma-rda@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5825-209X>

EMPIRICAL MODEL FOR PROPAGATION LOSS USING FLOOR SPACE INDEX FOR UNMANNED VEHICLES*

M.V. MAMCHENKO, V.A. ZORIN, M.A. ROMANOVA

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences
117997, Russia, Moscow, 65 Profsoyuznaya street

Abstract. The paper presents an empirical model for propagation loss, taking into account the floor space index value for urban areas in the frequency range 150 – 2000 MHz. This model is designed to be used for modeling communication and data transfer between unmanned vehicles in mixed groups consisting of a ground segment and an aerial segments. This work provides the description and analysis of the main existing models for radio wave propagation loss in different types of environment (urban, suburban, rural) including ones with the use of the floor space index values to calculate path loss between the receiver and the transmitter (base stations). The applicability of the main models to the conditions of unmanned vehicles operation has been evaluated, taking into account the height of the antennas of both the receiver and the transmitter, as well as the distance between them. Empirical expressions have been formed for the frequency range of 1000 – 2000 MHz based on known Hata (Okumura – Hata) and COST231 – Hata models in order to take into account the floor space index when calculating the path loss between aerial and ground terminals within the mixed group of unmanned vehicles.

Keywords: unmanned vehicles, smart city, path loss, signal loss, empirical model, CCIR model, Okumura model, Hata model, Okumura – Hata model, COST231 – Hata model, Ericsson 9999 model

The article was submitted 09.02.2022

Accepted for publication 11.02.2022

For citation. Mamchenko M.V., Zorin V.A., Romanova M.A. Empirical model for propagation loss using floor space index for unmanned vehicles. News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS. 2022. No. 1 (105). Pp. 59–73. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-1-105-59-73

Information about the authors

Mamchenko Mark Vladislavovich, Researcher of Laboratory № 80 “Cyber-Physical Systems”, Institute of Control Sciences n.a. V.A. Trapeznikov of Russian Academy of Sciences; 117997, Russia, Moscow, 65 Profsoyuznaya street; markmamcha@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6366-9786>

Zorin Vasily Aleksandrovich, Chief engineer of Laboratory № 80 “Cyber-Physical Systems”, Institute of Control Sciences n.a. V.A. Trapeznikov of Russian Academy of Sciences; 117997, Russia, Moscow, 65 Profsoyuznaya street; V.a.zorin@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7308-8387>

Romanova Mariya Andreevna, Researcher of Laboratory № 80 “Cyber-Physical Systems”, Institute of Control Sciences n.a. V.A. Trapeznikov of Russian Academy of Sciences; 117997, Russia, Moscow, 65 Profsoyuznaya street; rma-rda@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5825-209X>

* The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, No. 19-29-06044