УДК 621.391

## Упрощенная модель расчета потерь сигнала в радиолинии, полученная путем сравнения квадратичной формулы Введенского с существующими эмпирическими моделями

#### Дворников С. В., Балыков А. А., Котов А. А.

Постановка задачи: ограниченность применимости квадратичной формулы Введенского и аналитическая сложность эмпирических моделей Окамура-Хата и COST231-Хата существенно снижают возможность проведения на их основе быстрых расчетов «на местах» уровня потерь сигналов дециметрового диапазона радиоволн при планировании зон покрытия сотовых и транкинговых сетей на участках открытой или сельской местности. Целью работы является разработка упрощенной математической модели для экспресс-расчетов затухания сигналов в границах освещенной зоны радиолинии. Используемые методы: системного анализа, электродинамики и математического моделирования в среде MatLab. Новизна: заключается в разработке упрощенной модели на основе измененной квадратичной формулы Введенского с расширением её области применимости по расстоянию. Результат: полученная упрощенная модель расчета затухания сигнала формализована до программного уровня, позволяющего получать графическую зависимость потерь сигнала от дальности связи. Определена область ее применимости, в пределах которой обеспечиваются наиболее точные расчетные значения. Практическая значимость: разработанная упрощенная модель на основе эвристического подхода представляет собой средства математического обеспечения для решения практических расчетных задач, а также создания программных модулей, в частности, в среде MatLab.

*Ключевые слова:* квадратичная формула Введенского, эмпирическая модель Окамура-Хата, эмпирическая модель COST231-Хата, потери в радиолинии дециметрового диапазона волн.

#### Актуальность

Вопросы организации радиосвязи тесно связаны с поиском продуктивных методик расчета энергетического бюджета линий радиосвязи (ЛРС), в том числе, значений напряженности электрического поля или уровня мощности сигнала в точке приема. И хотя данная проблематика неоднократно затрагивалась научной общественностью [1-5], актуальность ее решения все еще имеет место быть. Ключевым моментом в решении указанной задачи является расчет значения потерь сигнала на ЛРС.

Данный аспект достаточно глубоко проработан в теоретическом плане [6-8], однако предлагаемые эмпирические методики, рекомендованные Международным союзом электросвязи (МСЭ), достаточно громоздки [9], а их реали-

#### **Reference for citation:**

URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2019-02/04-Dvornikov.pdf

Библиографическая ссылка на статью:

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. № 2. С. 87-99. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10204.

Dvornikov S. V., Balykov A. A., Kotov A. A. The simplified model for radio signal path loss computation, which was developed by comparing the Vvedensky quadratic equation with existing empirical models. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 2, pp. 87-99. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10204 (in Russian).

зационная сложность предполагает привлечение специалистов, имеющих основательную подготовку в данной предметной области.

Указанные обстоятельства приводят к тому, что на практике развертывание сетей и ЛРС дециметрового диапазона волн, не предполагающих долгосрочную эксплуатацию, осуществляют на субъективных подходах, руководствуясь лишь наличием прямой видимостью между абонентами.

С учетом указанных обстоятельств, целью настоящей работы является разработка упрощенной модели экспресс-расчета затухания сигналов в границах освещенной зоны радиолинии, на основе эмпирической интерполяции квадратичной формулы Введенского и уравнений затухания Окамура-Хата и COST231-Хата [10, 11].

Особенностью разработанного подхода является получение упрощенной модели, в которой в качестве переменных параметров выступают высоты передающей и приёмной антенн, а также значение рабочей частоты [11].

Предлагаемая модель ориентирована для ЛРС, развертываемых на открытой сельской или слабо урбанизированных местностях.

Для упрощенной модели уточнена область ее определения, в пределах которой обеспечивается правомерность получаемых на ее основе результатов.

В интересах апробации теоретических аспектов приведены результаты сравнительного анализа в виде графической зависимости значений потерь сигнала от дальности дистанции, полученных на основе разработанной упрощенной модели и общепринятых.

#### Анализ известных моделей расчета затухания сигнала

Для расчета затухания сигнала в сантиметровом и дециметровом диапазонах волн МСЭ рекомендованы модели COST231–Хата и Окамура-Хата [5, 9], которые получены на основе результатов эмпирических исследований. Основная область их практического применения ограничена дальностями r от 1 км до 20 км. Другое ограничение указанных моделей связано с тем, что они изначально ориентированы на расчет зон покрытия систем сотовой связи, поэтому предполагают использование антенн базовых станций с высотами  $h_{\rm 5C}$  от 30 м до 200 м, и высот антенн мобильных абонентов  $h_{\rm MA}$  от 1 м до 10 м.

При этом модель Окамура-Хата применяется в диапазоне частот от 150 до 1500 МГц, а модель COST231–Хата в более высоком диапазоне, от 1500 до 2000 МГц.

В соответствии моделью COST231–Хата, затухание сигнала на трассе рассчитывается в соответствии с выражением [5, 9]:

$$L_{CX(ropog)} = 46,3 + 33,9 \lg f_{[M\Gamma_{II}]} - 13,82 \lg h_{BC} - a(h_{MA}) + (44,9 - 6,55 \lg h_{BC}) \lg r_{[KM]} + C,$$
(1)

где: C – коэффициент, принимающий значения: C = 0 для пригородных значений с умеренной растительностью и средних городов, C = 3 для крупных городов, дБ;  $f_{M\Gamma_{II}}$  – частота излучения передатчика, МГц;  $a(h_{MA})$  – поправочный коэффициент на высоту приемной антенны, дБ; r – радиус зоны покрытия, км.

Для антенны мобильных абонентов с высотой от 1 м до 10 м, рекомендовано:

$$a(h_{\rm MA}) = (1,11g f_{\rm [M\Gamma u]} - 0,7)h_{\rm MA} - (1,561g f_{\rm [M\Gamma u]} - 0,8).$$
<sup>(2)</sup>

Для нахождения значения затухания на открытой или сельской местности необходимо произвести пересчет формулы (1):

$$L_{(\text{село})} = L_{\text{CX}(\text{город})} - 4,78(\lg f_{[\text{M}\Gamma\mu]})^2 + 18,33\lg f_{[\text{M}\Gamma\mu]} - 40,94.$$
(3)

Далее рассмотрим эмпирическую модель Окамура-Хата, позволяющую проводить расчеты как в городской местности, так и в сельской. Заметим, что ее представление имеет достаточно сложный вид [10]:

$$L_{\text{OX}(\text{ropo},\text{I})} = 69,55 + 26,16 \lg f_{[\text{MF},\text{I}]} - 13,83 \lg h_{\text{BC}} + (44,9 - 6,55 \lg h_{\text{BC}}) \lg r_{[\text{KM}]} - a(h_{\text{MA}}).$$
(4)

Пересчет для открытой или сельской местности для модели Окамура-Хата также производится по формуле (3).

Таким образом, можно заключить, что известные эмпирические модели имеют достаточно сложное аналитическое представление. Поэтому остается актуальным вопрос разработки упрощенной модели расчета затухания сигналов на ЛРС дециметровых волн.

Для этого предлагается рассмотреть классический подход к расчету действующего значения напряженности электрического поля.

В работе [7] предложено применять квадратичную формулу Введенского, в которой для расчета действующего значения напряженности электрического поля в точке приема используется выражение (5):

$$E_{\pi} = \frac{\sqrt{30P_{\pi}G_{\pi}}}{r_{[M]}} W_{T} = \frac{\sqrt{30P_{\pi}G_{\pi}}}{r_{[M]}} \frac{4\pi h'_{1[M]}h'_{2[M]}}{\lambda r_{[M]}},$$
(5)

где:  $W_{\rm T}$  – множитель ослабления напряженности поля волны на реальной трассе;  $P_{\rm n}$  – мощность передатчика, подводимая к антенне, Вт;  $G_{\rm n}$  – коэффициент усиления передающей антенны в направлении корреспондента в разах;  $h'_{\rm 1[M]}$  и  $h'_{\rm 2[M]}$  – приведенные высоты передающей и приемной антенн, м;  $\lambda$  – длина волны, используемая в ЛРС, выраженная через частоту  $\lambda = c / f$ , c – скорость света (300·10<sup>6</sup> м/c), f – частота сигнала в Гц.

Заметим, что область применения формула Введенского ограничивается следующим условием:

$$r_{[KM]} \ge \frac{18h_{l[M]}'h_{2[M]}}{\lambda}, \qquad (6)$$

что несколько снижает ее практическую ценность.

#### Оценка области применимости квадратичной формулы Введенского

В общем случае, начальная граница применимости формулы (5) определенна выражением (6) [7], а дальний предел её практического приложения определяется максимальной дальностью прямой видимости, выраженной в километрах, с учетом возможной дифракции за пределами указанной зоны [6-11]:

$$D_{\max[\kappa M]} = 4,12 \times \left(\sqrt{h_{1[M]}} + \sqrt{h_{2[M]}}\right),\tag{7}$$

где  $h_{1[M]}$  и  $h_{2[M]}$  – высоты подъема *фазовых центров* (авторы акцентируют внимание на данном аспекте, т.к. понятия фазовый центр и высота антенны не являются идентичными понятиями) передающей и приемной антенн.

Заметим, что в формуле (7)  $D_{\max[\kappa M]}$  в км, а значения  $h_{l[M]}$  и  $h_{2[M]}$  в м.

В дальнейшем исследовании будем полагать, что на ЛРС выполняется условие высокоподнятых антенн, т.е.  $h_1 >> \lambda$  и  $h_2 >> \lambda$ , что определено требованиями применимости формулы Введенского [11].

Вместе с тем на параметры и структуру поля оказывает влияние электрическая неоднородность тропосферы, которая проявляется в явлении рефракции радиоволн.

Для описания электрической неоднородности в [6] вводится такая величина, как вертикальный градиент диэлектрической проницаемости тропосферы  $g_{\rm T}$ , который принимает значения  $-13 \cdot 10^{-8} \dots -6 \cdot 10^{-8}$  [1/м].

Величина  $g_{\rm T}$  зависит от различных климатических зон. В качестве первого приближения, дающего представление о сезонном распределении  $\varepsilon_{\rm T}$  (диэлектрической проницаемости тропосферы) можно воспользоваться понятием «стандартной радиоатмосферы» для которой  $g_{\rm T} = -7,85 \cdot 10^{-8} \, 1/{\rm M}$  [7].

Согласно концепции расчетов с позиций эквивалентного радиуса Земли, вертикальный градиент диэлектрической проницаемости тропосферы можно связать с эквивалентным радиусом Земли  $a_{_{33}}$  следующим соотношением (принимая что  $g_{_{T}} = \text{const}$ ) [8]:

$$a_{_{33}} = \frac{a_3}{\left(1 + \frac{a_3 g_{_{\rm T}}}{2}\right)},\tag{8}$$

причем  $a_3 = 6356863 \text{ м} - \text{средний радиус Земли [7]}.$ 

В расчетах напряженности электрического поля в точке приема по квадратичной формуле Введенского используется понятие приведенные высоты антенн, которые связаны с эквивалентным радиусом Земли следующими выражениями [6]:

$$h'_{1} = h_{1} - \frac{r_{[M]}^{2}}{2a_{_{39}}} \left(\frac{h_{1}}{h_{1} + h_{2}}\right)^{2}, \qquad (9)$$

$$h_{2}' = h_{2} - \frac{r_{[M]}^{2}}{2a_{32}} \left(\frac{h_{2}}{h_{1} + h_{2}}\right)^{2}.$$
(10)

Поскольку правомерность действия квадратичной формулы Введенского для сферической поверхности определяется выполнением условия (6), то отсюда следует, что данная модель применима на дальностях, определяемых границами

$$\frac{18h'_{1}h'_{2}}{\lambda} \le r_{\rm [KM]} \le 4,12\left(\sqrt{h_{1}} + \sqrt{h_{2}}\right).$$
(11)

С учетом выражений (9) и (10) формула (11) примет следующий вид:

$$\frac{18\left(h_{1}-\frac{r_{[M]}^{2}}{2a_{_{33}}}\left[\frac{h_{1}}{h_{1}+h_{2}}\right]\right)\left(h_{2}-\frac{r_{[M]}^{2}}{2a_{_{33}}}\left[\frac{h_{2}}{h_{1}+h_{2}}\right]\right)}{\lambda} \leq r_{[{_{\rm KM}}]} \leq 4,12\left(\sqrt{h_{1}}+\sqrt{h_{2}}\right).(12)$$

В рамках проведенных исследований можно сделать следующее заключение. Основными параметрами, определяющими ближнюю и дальнюю границу зоны действия модели Введенского, являются высоты подъема фазовых центров передающей и приемных антенн, а также длина рабочей волны.

#### Обобщенная модель расчета затухания сигнала на ЛРС

Для получения упрощенной модели затухания сигнала на ЛРС целесообразно перейти от действующего значения напряженности электрического поля к значению мощности сигнала в точке приема. Для этого воспользуемся соотношением, предложенным в [7]:

$$P_{\rm np} = \frac{E_{\pi}^2 G_{\rm np}}{480} \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2. \tag{13}$$

где *G*<sub>пр</sub> – коэффициент усиления приемной антенны.

Далее подставим выражение (5) в формулу (13), в результате чего получим значение мощности в точке приема:

$$P_{\rm np} = \frac{\left(\frac{\sqrt{30P_{\rm n}G_{\rm n}}}{r_{\rm [M]}} \frac{4\pi h_{\rm l}'h_{\rm 2}'}{\lambda r_{\rm [M]}}\right)^2 G_{\rm np}}{480} \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 = P_{\rm n}G_{\rm n}G_{\rm np}\frac{\left(h_{\rm l}'h_{\rm 2}'\right)^2}{r_{\rm [M]}^4}.$$
 (14)

Согласно [6, 8] величина потерь передачи в линии радиосвязи  $L_0$  характеризуется отношением мощности излучения передатчика к мощности принимаемого сигнала.

В соответствии с выражением (14), функцию  $L_0$  представим, как отношение мощности излучения передатчика  $P_{\rm n}$  к мощности принимаемого сигнала  $P_{\rm np}$ , с учетом коэффициентов усиления передающей и приемной антенн  $(G_{\rm n} = G_{\rm np} = 1)$ :

$$L_{0} = \frac{P_{\pi}}{P_{\pi p}} = \frac{r_{[M]}^{4}}{G_{\pi}G_{\pi p} \left(h_{1}^{'}h_{2}^{'}\right)^{2}} = \left(\frac{r_{[M]}^{2}}{h_{1}^{'}h_{2}^{'}}\right)^{2}.$$
(15)

В интересах проведения дальнейшего исследования, приведем формулу (15) к логарифмическому масштабу:

$$L_0 = 10 \lg \left(\frac{r_{[M]}^2}{h_1' h_2'}\right)^2 = 40 \lg r_{[M]} - 20 \lg h_1' - 20 \lg h_2'.$$
(16)

#### URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2019-02/04-Dvornikov.pdf

Анализ выражения (16) показывает, что затухание сигнала в ЛРС, определенное квадратичной формулой Введенского и не зависит от частоты. Но при этом именно значение длины волны оказывает влияние на величину ближней границы области её применения (см. выражение (12)) [6, 7].

Произведем расчет потерь затухания по трем рассмотренным выше моделям согласно выражениям (1), (2), (3), (4) и (16) при следующих условиях: частота передачи f = 1500 МГц, высота антенны базовой станции  $h_1 = 30$  м, высота антенны мобильной станции  $h_2 = 1,5$  м, при значении вертикального градиента диэлектрической проницаемости  $g_{\rm T} = -7,85 \cdot 10^{-8}$  1/м для открытой (сельской) местности.

Результаты расчета представлены в графическом виде в диапазоне расстояний от 1 до 20 км на рис. 1.



Рис. 1. Потери сигнала, рассчитанные на основе формулы Введенского, в сравнении с известными моделями

В данном случае область применимости квадратичной формулы Введенского находится в диапазоне расстояний от 23,6 до 27,6 км, что не входит в рассматриваемый диапазон (до 20 км).

В интересах дальнейшего исследования проведем изменения в квадратичной формуле Введенского таким образом, чтобы область её применения совпадала с областями применимости рассматриваемых выше моделей, т.е. на участке от 1 до 20 км.

Поскольку в моделях Окамура-Хата и COST231-Хата для расчетов используется реальная высота подъема фазовых центров антенн, то произведем замену в выражении (16) приведенных высот на реальные значения высот, и значения дальности пересчитаем в километры. В результате получим:

$$L_{0} = 40 \lg(r_{[\text{KM}]} \cdot 1000) - 20 \lg h_{1}' - 20 \lg h_{2}' =$$
  
= 40 lg  $r_{[\text{KM}]} + 40 \lg 1000 - 20 \lg h_{1} - 20 \lg h_{2} =$   
= 40 lg  $r_{[\text{KM}]} - 20 \lg h_{1} - 20 \lg h_{2} + 120.$  (17)

После указанных изменений выражение (17) уже не будет отражать физическую сущность формулы Введенского, на основе которой она получена.

В тоже время модели Окамура-Хата и COST231-Хата являются эмпирическими. С позиций этого же подхода после проведенной модификации формулы (16), полученное выражение (17) также можно интерпретировать как некоторая эмпирическая модель, но полученная аналитическим образом.

Результаты затухания для модели (17) в сравнении с результатами, полученными из уравнений Окамура-Хата и COST231-Хата, показаны на рис. 2.

Следует отметить, что все графические зависимости, представленные на рис. 2 имеют общий тренд изменения уровня затухания с увеличением дальностей.



Рис. 2. Потери сигнала, рассчитанные на основе упрощенной модели, в сравнении с известными

Вместе с тем проведенный анализ полученных зависимостей показывает, что результаты модели (17) отличаются от результатов моделей Окамура-Хата и COST231-Хата лишь на величину постоянного множителя.

Дальнейшие аналитические исследования в данном направлении показали, что модель (17) не зависит от частоты передачи, как собственно и квадратичная формула Введенского в своей области применения не зависят от частоты.

В тоже время модели Окамура-Хата и COST231-Хата зависят от длины волны. Интуитивно понятно, что модель затухания сигнала должна зависеть от его частоты (длины волны). Поэтому учитывая указанные обстоятельства, предлагается выражение (17) сделать зависимым от длины волны:

$$L_0 = 40 \lg r_{\rm [KM]} - 20 \lg h_1 - 20 \lg h_2 - 20 \lg \lambda_{\rm [M]} + 120.$$
<sup>(18)</sup>

Результаты исследования скорректированной модели (18) в сравнении с известными моделями Окамура-Хата и COST231-Хата, представлены на рис 3.

После внесенных изменений, новая модель расчета затухания сигнала (18) учитывает как влияние высот антенн базовой и мобильной станций, так и длину волны радиосигнала.

Однако полученный на ее основе график, на дальностях от 4 до 20 км возрастает быстрее, чем функции потерь сигнала, рассчитанные по моделям Окамура-Хата и COST231-Хата.

С учетом скорости изменения функции затухания по результатам многократного моделирования для различных условий сельской местности был подобран коэффициент перед первым членом выражения (18) таким образом, чтобы график, полученный на основе скорректированной модели, находился в пределах, ограниченных графиками двух известных моделей Окамура-Хата и COST231-Хата.



Рис. 3. Потери сигнала, рассчитанные на основе скорректированной модели, в сравнении с известными

Полученное выражение имеет следующий вид:  

$$L_0 = 37 \lg r_{\text{[км]}} - 20 \lg h_1 - 20 \lg h_2 - 20 \lg \lambda_{\text{[м]}} + 120.$$
(19)

Выражение (19) представляет собой одну из версий скорректированной модели расчета затухания сигнала.

Далее, учитывая, что в рассматриваемой ситуации второй корреспондент является мобильной станцией, ограничим область высот ее антенны от 1,6 м (примерное значение среднего роста для населения, включая мужчин и женщин), что позволяет значение  $h_2$  принять константой  $h_2 = \text{const} = 1,6$  м.

В результате получим уточненную версию скорректированной модели расчета затухания сигнала.

$$L_{0} = 37 \lg r_{\rm [KM]} - 20 \lg h_{\rm l} - 20 \lg 1, 6 - 20 \lg \lambda_{\rm [M]} + 120 =$$
  
=  $37 \lg r_{\rm [KM]} - 20 \lg h_{\rm l} - 20 \lg \lambda_{\rm [M]} + 116.$  (20)

Итоговые выражения (19) и (20) в дальнейшем можно просто интерпретировать как эвристическая модель расчета потерь сигнала для сельской (открытой) местности, предназначенная для экспресс-расчетов.

Область применимости полученной эвристической модели:

- диапазон изменения рабочих частот *f*, 150... 2000 МГц ;
- высоты антенны передающей стороны (базовой станции) *h*<sub>п</sub>, 30...200 м;
- высоты антенны приемной стороны (мобильных станций)  $h_{\rm np}$ , 1,5...2,5 м;
- протяженности трассы *r*, 1...20 км.

# Сравнение результатов расчета потерь сигнала при использовании различных моделей в среде MatLab

По результатам полученных аналитических исследований проведено моделирование в среде MatLab.

Так, на рис. 4 представлены сравнительные результаты для следующих начальных условий: частота передачи f = 900 МГц, высота антенны базовой станции  $h_1 = 20$  м, высота антенны мобильной станции  $h_2 = 1,5$  м.

Анализ полученных результатов, см. рис. 4, показывает, что при таких заданных условиях графики, полученные на основе всех трех моделей расчетов затухания сигнала, совпадают с незначительной погрешностью (менее 1%).



Рис. 4. Потери сигнала, рассчитанные на основе эвристической модели, в сравнении с известными

Следует отметить, что при отсутствии в ближней зоне базовой станции препятствий, высота которых соизмерима с высотой антенны, допускается применение моделей Окамура-Хата и COST231-Хата и для антенн базовых станций, высоты которых менее 30 метров. Следовательно, для указанных условий будет применима и эвристическая модель (19).

Результаты моделирования при других условий в пределах допустимых значений, показали, что расхождение функции затухания сигнала для эвристической модели по отношению к моделям Окамура-Хата и COST231-Хата также не превысили 1%.

#### Заключение

Проведенные результаты аналитического исследования и компьютерного моделирования в среде MatLab позволяют сделать следующие заключения:

- предложенная эвристическая модель базируется на обобщении квадратичной формулы Введенского и эмпирических моделей расчета потерь сигнала на радиолинии Окамуры-Хата и COST231-Хата;
- аналитическая «простота» разработанной модели значительно упрощает экспресс расчеты даже при отсутствии специализированной вычислительной техники, при этом получаемые результаты достаточно близки к результатам, полученным на основе апробированных моделей;

 область применимости эвристической модели расчета затухания лишь незначительно уступает областям применимости моделей Окамуры-Хата и COST231-Хата (рассматриваемый диапазон высот антенн мобильных станций от 1,5 до 2,5 м).

Дальнейшее направление исследования авторам видится в создании автоматизированных расчетных модулей для практических приложений [12, 13], которое могут найти применения в смежных областях, таких как навигация и координатометрия [14-16].

### Литература

1. Макаренко С. И. Перспективы и проблемные вопросы развития сетей связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 18-68. URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/02-Makarenko.pdf (дата обращения 9.05.2019).

2. Василенко Г. О., Иванов М. А. Обзор методов расчета характеристик радиополя в условиях городской застройки // Труды учебных заведений связи. 2000. № 166. С. 91-98.

3. Дворников А. С., Дворников С. В., Котов А. А., Муравцов А. А. Анализ моделей затухания радиосигналов дециметровых волн // Информация и космос. 2018. № 2. С. 6-11.

4. Шайдуров Г. Я. Основы теории и проектирования радиотехнических систем: Курс лекций – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2007. – 292 с.

5. Дворников С. В., Погорелов А. А., Романенко П. Г., Кочетков А. О., Дворников А. С., Домбровский Я. А., Федоренко И. В., Колушев Е. Е., Котов А. А., Дуйсенбеков О. А. Модель затухания сигналов для планирования зон покрытия цифровых телевизионных передатчиков // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. № 1. С. 49-53.

6. Калинин А. И., Черенкова Е. Л. Распространение радиоволн и работа радиолиний. – М.: Связь, 1971. – 440 с.

7. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. – М.: Связь, 1972. – 336 с.

8. Черенкова Е. Л., Чернышев О. В. Распространение радиоволн – М.: Радио и связь, 1984. – 272 с.

9. Рекомендация МСЭ - R 1546-4. Метод прогнозирования для трасс связи "пункта с зоной" для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 3000 МГц. – Женева: МСЭ, 2010.

10. Дворников С. В. Упрощенное представление модели Наta для расчета затухания сигнала на открытых трассах // Информация и космос. 2017. № 3. С. 6-10.

11. Введенский Б. А. Основы теории распространения радиоволи: Распространение в однородной атмосфере. – М.: Объединенное научно-техническое издательство, 1934. – 227 с.

12. Дворников С. В., Власенко В. И., Муравцов А. А., и др. Предложения по применению формулы Введенского для расчета затуханий радиолиний

передачи видео // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. № 2. С. 105-111.

13. Балыков А. А., Овчинников Г. Р., Перепечаев А. Н. Программный комплекс частотно-территориального планирования сетей УКВ радиосвязи с использованием ретрансляторов на БПЛА // Информация и космос. 2014. № 2. С. 28-35.

14. Дворников С. В., Духовницкий О. Г. Оценка помехозащищенности профессионального радионавигационного оборудования системы ГЛОНАСС // Информация и космос. 2015. № 4. С. 73-77.

15. Волков Р. В., Дворников С. В., Саяпин В. Н., Симонов А. Н. Основы построения и функционирования разностно-дальномерных систем координатометрии источников радиоизлучений. – СПб.: ВАС, 2013. – 116 с.

16. Дворников С. В., Саяпин В. Н., Симонов А. Н. Теоретические основы координатометрии источников радиоизлучений. – СПб.: ВАС, 2007. – 80 с.

## References

1. Makarenko S. I. Prospects and Problems of Development of Communication Networks of Special Purpose. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 2, pp. 18-68. Available at: http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/02-Makarenko.pdf (accessed 9 May 2019) (in Russian).

2. Vasilenko G. O. A review of methods for calculating the characteristics of radipole in the conditions of city building. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2000 – vol. 166, pp. 91-98 (in Russian).

3. Dvornikov S. V., Dvornikov A. S., Kotov A. A., Muravtsov A.A. Analysis of models of the attenuation of UHF radio signals. *Informatsiia i kosmos*, 2018, vol. 2, pp. 6-11 (in Russian).

4. Shaidyrov G. Y. *Osnovy teorii i proektirovaniya radiotekhnicheskih system*. [Fundamentals of the theory and design of radio systems]. Krasnoyarsk, Siberian federal University, 2007. 292 p. (in Russian).

5. Dvornikov S. V., Pogorelov A. A., Romanenko P. G., Kochetkov A. O., Dvornikov A. S., Dombrovskiy Y. A., Fedorenko I. V., Kolyshev E. E., Kotov A. A., Dyisenbekov O. A. Signal attenuation model for planning coverage areas of digital television transmitters. *Questions of radio-electronics, the TV equipment series*, 2018, vol. 1, pp. 49-53 (in Russian).

6. Cherenkova E. L., Kalinin A. I. *Radio wave propagation and operation of radio lines* [Radio wave propagation and operation of radio lines]. Moscow, Svaz Publ., 1971. 440 p. (in Russian).

7. Dolyhanov M. P. *Rasprostraneniye radiovoln* [Wave propagation]. Moscow, Svaz Publ., 1972. 336 p. (in Russian).

8. Cherenkova E. L., Chernyshev O. V. *Rasprostraneniye radiovoln* [Wave propagation]. Moscow, Radio i svyaz, 1984, pp. 132-136 (in Russian).

9. Recommendation ITU - R 1546-4. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz. 2010.

10. Dvornikov S. V. Simplified representation of the Hata model for the calculation of the signal release on an open routes. *Informatsiia i kosmos*, 2017, vol. 3, pp. 6-10 (in Russian).

11. Vvedensky B. A. Osnovy teorii rasprostraneniya radiovoln: Rasprostraneniye v odnorodnoy atmosfere [Fundamentals of the theory of radio wave propagation: propagation in a homogeneous atmosphere]. Moscow, Gosudarstvennoye tekhniko-teoreticheskoye izdatelstvo, 1934. 227 p (in Russian).

12. Dvornikov S. V., Vlasenko V. I., Muravtsov A. A., Dvornikov S. S., Kotov A. A. Proposals for the application of the Vvedensky formula for the calculation of attenuation of radio lines of video transmission. *Questions of radio-electronics, the TV equipment series*, 2018, vol. 2, pp. 105-111 (in Russian).

13. Balykov A. A., Ovchinnikov G. R., Perepechaev A. N. The software package of the regional frequency plan of VHF networks with the use of repeaters on UAVs. *Informatsiia i kosmos*, 2014, vol. 2, pp. 28-35 (in Russian).

14. Dvornikov S. V., Dyhovnitskiy O. G. Estimation of noise immunity of professional radio navigation equipment of GLONASS system. *Informatsiia i kosmos*, 2015, vol. 4, pp. 73-77 (in Russian).

15. Volkov R. V., Dvornikov S. V., Sayapin V. N., Simonov A. N. Osnovy postroyeniya i funktsionirovaniya raznostno-dal'nomernykh sistem koordinatometrii istochnikov radioizlucheniy [Fundamentals of the construction and operation of difference-distance measuring systems for the co-ordination of radio emission sources.]. St. Petersburg, Military Academy of Communications, 2013. 116 p. (in Russian).

16. Dvornikov S. V., Sayapin V. N., *Simonov A. N. Teoreticheskiye osnovy koordinatometrii istochnikov radioizlucheniy* [Theoretical bases of coordinates of radio emission sources], Military Academy of Communications, 2007. 80 p. (in Russian).

# Статья поступила: 1 мая 2019 г.

#### Информация об авторах

Дворников Сергей Викторович – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры радиосвязи. Военная академия связи. Область научных интересов: помехоустойчивость систем и линий радиосвязи, теория электросвязи. Е-mail: practicdsv@yandex.ru

Балыков Антон Александрович – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адъюнкт кафедры радиосвязи. Военная академия связи. Область научных интересов: распространение радиоволн; теория электросвязи. Е-mail: etomoiadres@mail.ru

Котов Алексей Александрович – курсант. Военная академия связи. Область научных интересов: распространение радиоволн; теория электросвязи. E-mail: RalkIRI1995@yandex.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

# The simplified model for radio signal path loss computation, which was developed by comparing the Vvedensky quadratic equation with existing empirical models

## S. V. Dvornikov, A. A. Balykov, A. A. Kotov

**Problem statement:** Operational UHF radio signal path loss computations, which are carried out «in a field», for cellular and trunked networks coverage areas planning in open or rural territories have been ineffective. It happens because the Vvedensky quadratic equation, the Okamura-Hata and the COST231-Hata empirical models are often used as an analytical basis of these computations. The first one has poor applicability. The second and the third models have high analytical complexity. **The purpose of the** paper is to create simplified mathematical model of signal attenuation within the radio line visible zone development for rapid computation. Methods. The system analysis method and methods of electrodynamics is used to create the simplified model. For mathematical modeling application package MatLab is used. Novelty. The scientific novelty of the paper lies in the development of a simplified heuristic model of signal attenuation computation based on the modified Vvedensky quadratic equation. Area of applicability, which provides normal result of computation, became wider. Result. Formalized to a software level simplified model for radio signal attenuation computation, allows to get a graphical dependence between the radio signal path loss and the communication range. The area of the model applicability, where the most accurate calculations are provided, is determined. Practical relevance: Simplified heuristic model, as a mathematical support mean, can help to solve practical computational problems. It can also help to create a software by using application packages, for example MatLab.

*Keywords:* quadratic Vvedensky formula, the empirical models of Okumura-Hata, the empirical models of COST231-Hata, losses of the radio line.

#### **Information about Authors**

Sergey Victorovich Dvornikov – Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor. Professor of the Department of radiocommunication. Military Telecommunication Academy. Field of research: theory of telecommunications. E-mail: practicdsv@yandex.ru

Anton Alexandrovich Balykov – Doctoral Student. The postgraduate student of the Department of radio communication. Military Telecommunication Academy. Field of research: wave propagation; theory of telecommunications. E-mail:etomoiadres@mail.ru

Aleksey Alexandrovich Kotov – cadet. Military Academy of communications. Research interests: radio wave propagation; telecommunication theory. E-mail: RaIkIRI1995@yandex.ru

Address: Russia, 194064, Saint-Petersburg, Tihoreckiy prospekt, 3.