

# Оценка распространения GSM сигнала на трассе со сложным рельефом и хвойным лесом

Д. Вегера, Г. Жиба, В. Писаренко

**Аннотация**—Существует огромное количество различных технологических решений, позволяющих осуществлять прием и передачу различного рода информации путем свободного распространения радиоволн в окружающей среде. Несмотря на развитие телекоммуникаций, все еще остаются труднодоступные районы, которые не позволяют обеспечить качественный прием, передачу голоса и данных. Радиоволны, распространяющиеся в лесу, имеют высокие потери на трассе по сравнению с другими средами. При строительстве новых базовых станций необходимо учитывать ослабление сигнала за счет лесных массивов.

Поэтому на примере уже существующего объекта связи рассматриваются методики расчета затухания и дальности распространения радиосигнала для технологии GSM с учетом лесных массивов и сравниваются с фактическими показателями. Дается краткое описание технологии GSM, разработанной программы, используемых методов. Представлены результаты моделирования затухания и дальности распространения радиосигнала. Предложенные методы, модели и технические решения позволяют учесть распространение радиоволн еще на этапе проектирования радиосистем и устройств связи для практической реализации современной инфраструктуры передачи голоса и данных на сложных по рельефу загородных трассах. Для решения поставленных задач используются методы математического моделирования, вычислительной математики, системного анализа, методы программирования и натурального экспериментального исследования.

**Ключевые слова**—GSM, метод параболического уравнения, формула Введенского, распространение радиоволн, ЕММ 1.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Конкурентоспособность оператора связи на телекоммуникационном рынке определяется надежным и качественным предоставлением услуг связи. Сотовая сеть оператора строится на основе базовых станций (БС), которые позволяют абонентам оставаться на связи.

Статья получена 29 июля 2021.

Денис Владимирович Вегера, Кафедра Вычислительной техники, Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия (e-mail: vegera79@mail.ru).

Григорий Вячеславович Жиба, Кафедра Вычислительной техники, Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия (e-mail: grisha2160@mail.ru).

Валерий Павлович Писаренко, Кафедра Вычислительной техники, Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия (e-mail: valpp@khhb.ru).

При строительстве новых БС на сложных по рельефу загородных трассах, отдаленных и труднодоступных населенных пунктов находящихся вдали от крупных городов, оператор должен учитывать выбор стандарта сотовой связи, с помощью которого будет осуществляться передача данных, а также ослабление сигнала за счет лесных массивов.

В статье рассмотрены результаты расчетов параметров распространения радиоволн стандарта GSM в диапазоне 1800 МГц на сложной по рельефу загородной трассе Хабаровского края. На примере уже существующего объекта связи рассматриваются методики расчета затухания и дальности распространения радиосигнала с учетом лесных массивов и сравниваются с фактическими показателями. Затем на основе полученных результатов, производится выбор методики, наиболее совпадающей с фактическими показателями и выбирается подходящая для предварительного определения мест установки новых базовых станций. Для оценивания параметров используется метод имитационного моделирования. В качестве среды разработки имитационной модели выбран программный пакет Matlab.

## II. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

GSM (Global System for Mobile Communications) – глобальный стандарт цифровой мобильной сотовой связи, с разделением каналов по времени (Time Division Multiple Access) и частоте (Frequency Division Multiple Access). Стандарт GSM в России используют частоты в 900 и 1800 МГц для голосовых и текстовых сообщений [1].

GSM-900 работает в диапазоне частот 890 до 915 МГц от абонента к БС и от 935 до 960 МГц от БС к абоненту. Максимально излучаемая мощность мобильных телефонов составляет 2 Вт. Принципиальным плюсом 900 диапазона считается радиус действия до 35 км в прямой видимости. Затухание сигнала на расстоянии до 50м в прямой видимости от антенны составляет 66 дБ.

GSM-1800 работает в диапазоне частот 1710 до 1785 МГц от абонента к БС и от 1805 до 1880 МГц от БС к абоненту. Максимальная излучаемая мощность мобильных телефонов стандарта GSM-1800 составляет 1 Вт. 1800-й диапазон подходит в основном для густонаселенных пунктов, так как может обслужить большое количество абонентов. Радиус действия в

прямой видимости составляет 8 км. Затухание сигнала в пространстве на расстоянии до 50 м в прямой видимости от антенны, не учитывая преграды, составляет 72 дБ.

Лесная среда является одним из основных факторов, затрудняющих прохождение радиоволн практически во всех диапазонах частот [2-9]. Для оценки влияния лесных массивов на распространение радиосигнала существуют различные методы для прогнозирования распространения радиосигнала в системах подвижной радиосвязи.

Для оценивания параметров используется метод имитационного моделирования [8-16]. В качестве среды разработки имитационной модели выбран программный пакет Matlab. Интерфейс разработанной программы представлен на рис. 1.

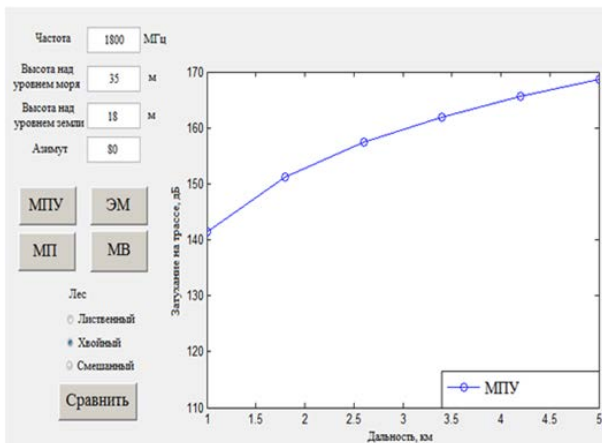


Рис. 1. Интерфейс разработанной программы

Разработанная программа позволяет выбрать модель и по заданным параметрам вычислить затухание и дальность распространения сигнала. Частотный диапазон, выбранных моделей, позволяет сделать анализ для GSM-900 и GSM-1800.

Для исследований распространения радиосигнала GSM и сравнением с разработанными моделями была выбрана БС, установленная на сложной по рельефу загородной трассе в Хабаровском крае и работающая в диапазоне 1800 МГц. Измерения проводились летом 2021 года. Лес хвойный. В качестве источника сигнала используется двухсекторная антенна фирмы Kathrein: сектор 1 – 0°, сектор 2 – 60°. Для электроснабжения применяется схема альтернативной энергетики [17]. Измерения проводились в движении, для выяснения стабильности сигнала и в конкретных точках, на внушительном отдалении от БС. Расстояние мест контрольных измерений было выбрано, таким образом, чтобы измерительный комплекс находился в зоне излучения антенны. В состав измерительного оборудования входили измерительный комплекс для анализа радиопокрытия в сетях GSM, для мониторинга и контроля работы использовался персональный компьютер с специальным программным обеспечением. Для тестирования работы использовались 4 сотовых телефона фирмы Huawei, LG, Samsung и Apple. На рис. 2 представлен профиль трассы с указанием рельефа местности и покрытия, значения уровня сигнала,

которые предложено считать соответствующими «очень плохому», «плохому», «хорошему» и «очень хорошему» качеству, представлены в таблице 1.

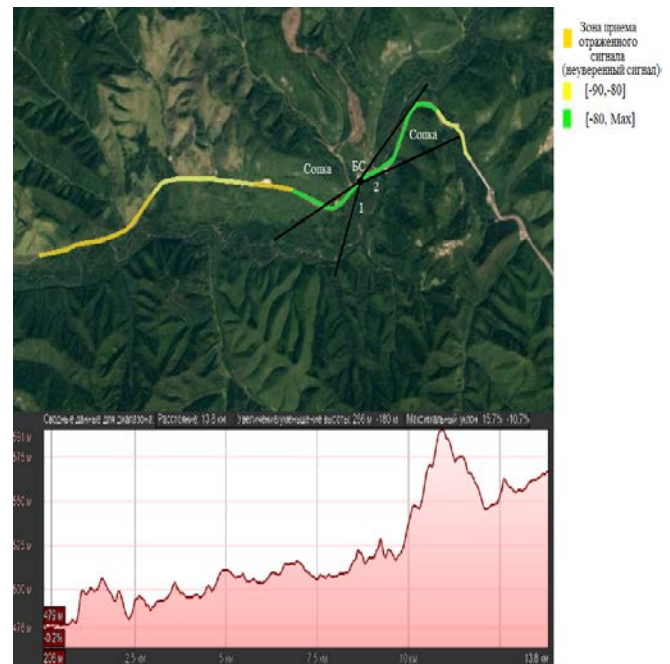


Рис. 2. Профиль трассы с указанием рельефа местности и покрытия GSM-1800

Таблица 1 – Значения уровня сигнала

Качество сигнала	Значение уровня сигнала, дБм
Очень хороший	$\geq -80$
Хороший	-80 до -90
Плохой	-90 до -100
Очень плохой	$\leq -100$

Как видно по рисунку 2, трасса имеет сложный рельеф, и из-за сильного перепада высот удается обеспечить сигналом связи лишь ее отдельный участок. За счет отражения от природных объектов при распространении сигнала в секторе 1 покрытие трассы составляет 7,9 км. На пути распространения сигнала в секторе 2 встречается подъем, прямую видимость ограничивает сопка, вследствие чего покрытие трассы составляет 3,5 км. Так же необходимо учитывать, что на более дальних расстояниях телефон способен осуществлять вызов, но возможно пропадание сигнала и плохая слышимость.

### III. МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЯ РАДИОСИГНАЛА

Исходя из частотного диапазона и профиля трассы Хабаровского края, рассматриваются следующие методы: метод параболического уравнения (МПУ) [18-23], метод Попова (МП) [24-25], эмпирический метод (ЭМ) [26] и метод Введенского (МВ) [27]. Для оценки эффективности методов, результаты сравниваются с фактическим покрытием GSM-1800.

Прогнозирование уровня радиосигнала в общем виде сводится к определению усредненной медианной мощности сигнала (УММС) в точке приема. УММС -

величина, которая определяется для 50% времени наблюдения и 50% точек приема, находящихся на расстоянии R [1].

$$P_{ПРМ} = P_{ПРД} D - \alpha_M (R, f, h_{БС}, \alpha_x), \quad (1)$$

где  $P_{ПРД}$  – мощность передатчика, подводимая к антенне;  $D$  – коэффициент усиления антенны;  $\alpha_M$  – величина ослабления сигнала, зависящая от R;  $f$  – частоты сигнала;  $h_{БС}$  – высота подвеса антенны БС относительно уровня земли,  $h_{АС}$  – высота антенны относительно уровня земли АС,  $\alpha_x$  – дополнительный коэффициент ослабления и зависящий также от R, f,  $h_{БС}$ ,  $h_{АС}$ .

Метод параболического уравнения (МПУ) принадлежит М. А. Леонтовичу, который преобразовал исходную краевую задачу для функции  $U(x,z)$ , где  $x$  – горизонтальная,  $z$  – вертикальная прямоугольные координаты,  $U$  – комплексная амплитуда поля, временной множитель  $\exp(i\omega t)$ .

Предполагается, что поле в направлении  $x > 0$  может быть представлено плоской волной вида  $U_0 = e^{-ik_0 x} V(x,z)$   $V(x,z)$ . Наложив требование на вторую производную функции,  $V$  по переменной  $x$   $|(\partial^2 V)/(\partial x^2)| \ll |(\partial^2 V)/(\partial z^2)| \approx 2k_0 |\partial V/\partial x|$ , и пренебрегая в исходном уравнении для функции  $V$  второй производной  $V$  по  $x$ , получается параболическое уравнение

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} - 2ik_0 \frac{\partial V}{\partial x} + k_0^2 [\varepsilon(x, z) - 1]V = 0, \quad (2)$$

где  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ ,  $\lambda_0$  – волновое число и длина волны в свободном пространстве,  $\varepsilon(x,z)$  – относительная комплексная диэлектрическая проницаемость среды [22-23, 28].

При решении ПУ учитывается подход, основанный на вычислении прямого и обратного преобразования Фурье:

$$U(x, p) = F[u(x, z)] = \int_{-z_{\max}}^{z_{\max}} u(x, z) e^{-j p z} dz, \quad (3)$$

$$U(x, p) = F^{-1}[U(x, p)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-p_{\max}}^{p_{\max}} U(x, z) e^{j p z} dp, \quad (4)$$

где  $p_{\max} = k \sin \theta_{\max}$ , а максимальная высота  $Z_{\max}$  связана с размером преобразования Фурье  $L$  критерием Найквиста [29]:  $Z_{\max} p_{\max} = \pi L$ , который позволяет определить шаг по высоте  $\Delta z$  и дальности  $\Delta x = \Delta z / \sin(\theta_{\max})$ . Таким образом, на каждом шаге численного решения вычисляется выражение:

$$u(x + \Delta x, z) = e^{\frac{j k}{2} (n(z)^2 - 1) \Delta x} F^{-1} [F[u_f(x, z)] e^{-j \frac{p^2 \Delta x}{2k}}], \quad (5)$$

или

$$u(x + \Delta x, z) = e^{j k (n(z) - 1) \Delta x} F^{-1} [F[u_f(x, z)] e^{j k (\sqrt{1 - \frac{p^2}{k^2}} - 1) \Delta x}]. \quad (6)$$

Для учета кривизны Земли необходимо выполнить замену  $n(z)$  модифицированным показателем преломления  $m(z) = n(z) + z/a$ , где  $a$  – радиус Земли. Тогда с учетом выражения  $m(z)^2 \approx n(z)^2 + 2(z/a)$ . Получается решение ПУ для расчета напряженности поля

$$u(x + \Delta x, z) = e^{\frac{j k}{2} (n(z)^2 - 1 + \frac{2z}{a}) \Delta x} F^{-1} [F[u(x, z)] e^{j k (\sqrt{1 - \frac{p^2}{k^2}} - 1) \Delta x}]. \quad (7)$$

Для того, чтобы учесть влияние рельефа, используется метод ступенчатого моделирования. При распространении над горизонтальными участками  $S_1$  поле вычисляется с использованием выражений (5) и (6), а на вертикальных участках  $S_2$  результаты численного решения приравниваются к нулю, как это показано на рис. 3.

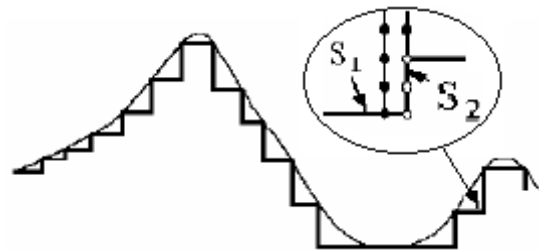


Рис.3. Моделирование геометрии рельефа

Затухание сигнала на частоте 1800 МГц для сектора 1 рассчитанное методом параболического уравнения представлено на рис. 4, а для сектора 2 на рис. 5.

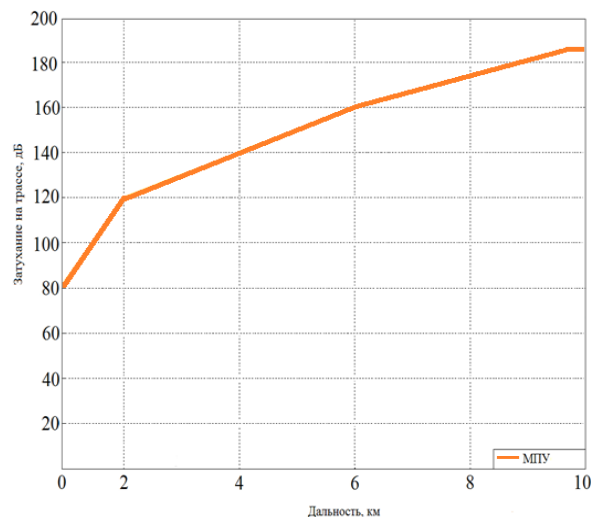


Рис. 4. Затухание сигнала на частоте 1800 МГц для сектора 1 рассчитанное методом параболического уравнения

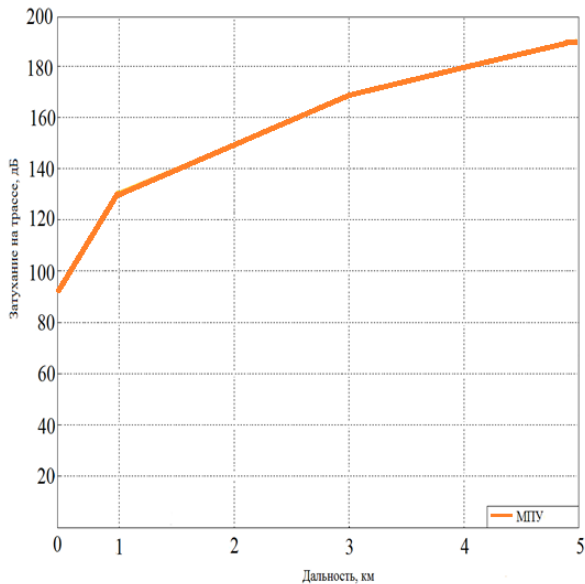


Рис. 5. Затухание сигнала на частоте 1800 МГц для сектора 2 рассчитанное методом параболического уравнения

Прогнозирование уровня радиосигнала на частоте 1800 МГц для сектора 1 рассчитанное методом параболического уравнения представлено на рис. 6, а для сектора 2 на рис. 7

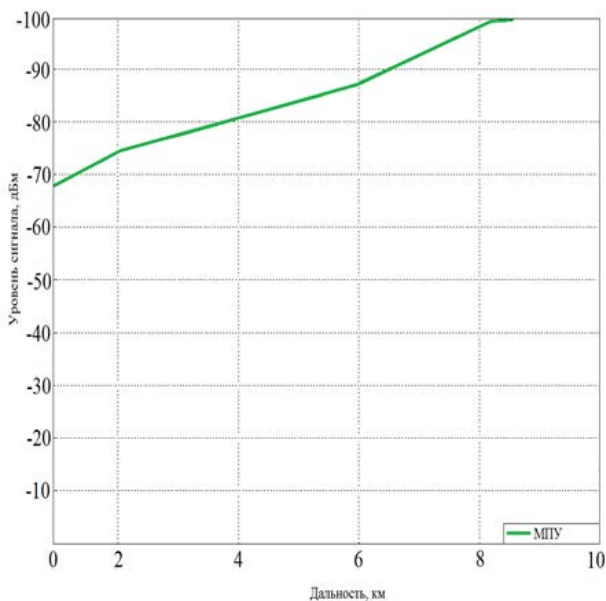


Рис. 6. Уровень радиосигнала на частоте 1800 МГц для сектора 1 рассчитанный методом параболического уравнения

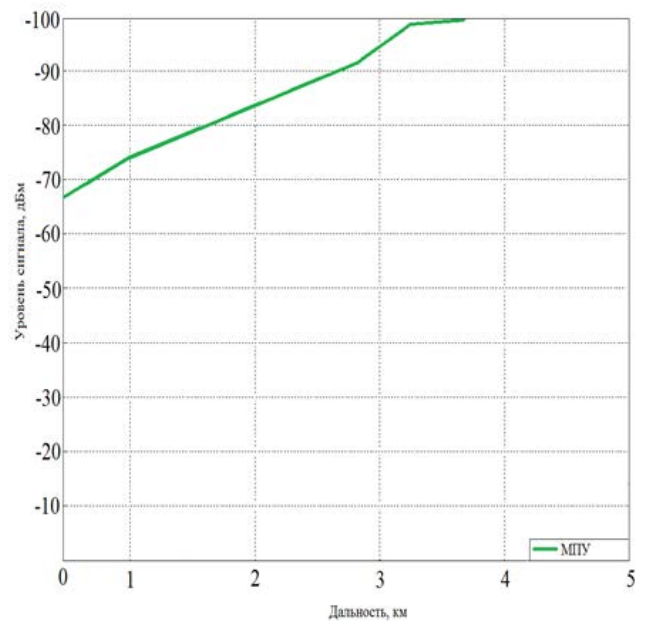


Рис. 7. Уровень радиосигнала на частоте 1800 МГц для сектора 2 рассчитанный методом параболического уравнения

Метод Попова учитывает сложные процессы рассеяния и поглощения статистически распределенными в лесах деревьями и их элементами. Для того, чтобы учесть влияние рельефа используется модель неоднородной среды, когда лес представляет собой сложную структуру, как показано на рис. 8.

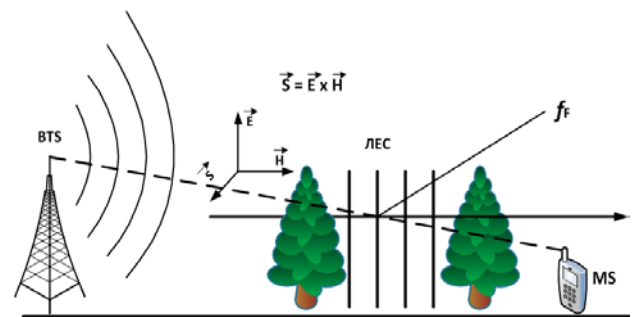


Рис. 8. Модель неоднородной среды, когда лес представляет собой сложную структуру

При допущении, что лесной массив представляет собой вертикально ориентированную в пространстве слоистую структуру, для которой при вертикальной поляризации электромагнитных волн эффективная комплексная диэлектрическая проницаемость:  $\epsilon_m' = \epsilon(1-f_F) + \epsilon_F' f_F$ , или  $(\epsilon_m')/\epsilon_1 = 1 + (\epsilon_F' - 1)f_F$ , а величина эффективного коэффициента затухания:

$$a_{m1} = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sqrt{\epsilon_1} \sqrt{A_1^2 + B_1^2 \sin\left[\frac{1}{2} \arctg\left(\frac{B1}{A1}\right)\right]}, \quad (8)$$

$$\begin{cases} A_1 = 1 + (\epsilon_F') f_F \\ B1 = \epsilon''_F f_F \end{cases} \quad (9)$$

Нормированное распределение поля в пространстве

$E_z(y)$  записывается в виде  $E_z(y)=e\psi(y)$ . Приближенное решение уравнения для малых значений коэффициента преломления  $n$  путем разложения в ряд по показателям экспоненты выглядит так  $E = \exp(\psi_0 + \psi_1 + \psi_2 + \dots)$ , где  $\exp \psi_0$  – падающая на лес электромагнитная волна,  $\exp \psi_1$ ,  $\exp \psi_2 \dots$  – рассеянные в лесном массиве составляющие электромагнитного поля.

Приближенное решение для малых значений  $n$  запишется в виде:

$$[\nabla^2\psi + (\nabla\psi)^2 + k_m^2(1 + 2\delta n)] = 0 \quad (10)$$

где  $k_m^2$  – среднее значение эффективного волнового числа для электромагнитной волны, распространяющейся в лесу. Уравнение (10) является нелинейным дифференциальным уравнением первого порядка относительно  $\nabla\psi$ .

Таким образом степень функции  $e\psi(r)$  определится в виде:

$$\psi = \ln |\cos[a(c_1 - y)]| + c_2 \quad (11)$$

или

$$\psi = \ln |\cos[k_m \sqrt{1 + 2\delta n}(c_1 - y)]| + c_2. \quad (12)$$

Аналогично решается уравнение  $[\nabla^2\psi_0 + (\nabla\psi_0)^2 + k_m^2] = 0$ , при этом его решение имеет вид:

$$\psi_0 = \ln |\cos(k_m (c'_1 - y))| + c''_2. \quad (13)$$

где интегральные константы  $c'_1$  и  $c''_2$ . В полученных решениях (12) и (13) не определены интегральные константы, значения которых зависят от границ лесного массива.

В общем случае уравнение (10), является неоднородным волновым уравнением, которое можно свести к интегральному уравнению [30]:

$$\psi_1(y) = \left[ \frac{1}{E_{z_0}(y)} \right] \int_V G(y - y') (\nabla\psi_1 \nabla\psi_1 + k_m^2 2\delta n) E_{z_0}(y') dV', \quad (14)$$

где координата  $y'$  и объем  $V'$  находятся в произвольной точке лесного массива. Использование метода итераций [30], позволяет найти первое приближение Рытова:

$$\psi_1(y) = \left[ \frac{1}{E_z(y)} \right] \int_V G(y - y') \delta n(y') E_{z_0}(y') dV'. \quad (15)$$

Таким образом, напряженность поля можно записать в виде:

$$E_z(y) = \exp(\psi_0 + \psi_1) = E_{z_0}(y) \exp[\psi_1(y)]. \quad (16)$$

Затухание сигнала на частоте 1800 МГц для сектора 1 рассчитанное методом Попова представлено на рис. 9, а

для сектора 2 на рис. 10.

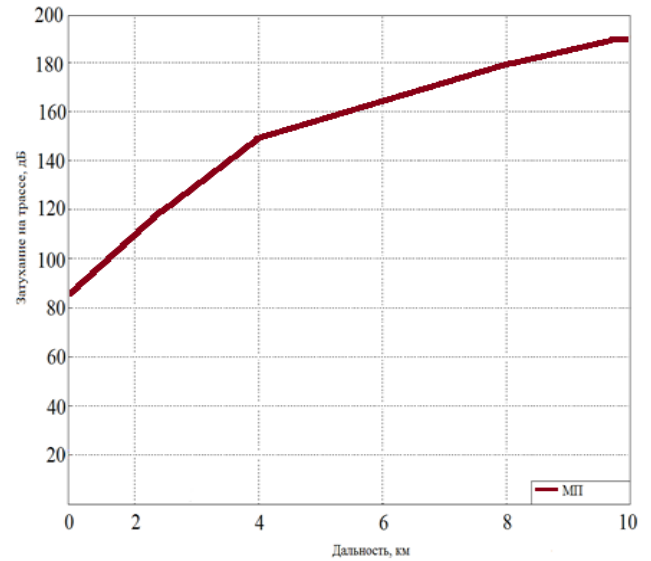


Рис.9. Затухание сигнала на частоте 1800 МГц для сектора 1 рассчитанное методом Попова

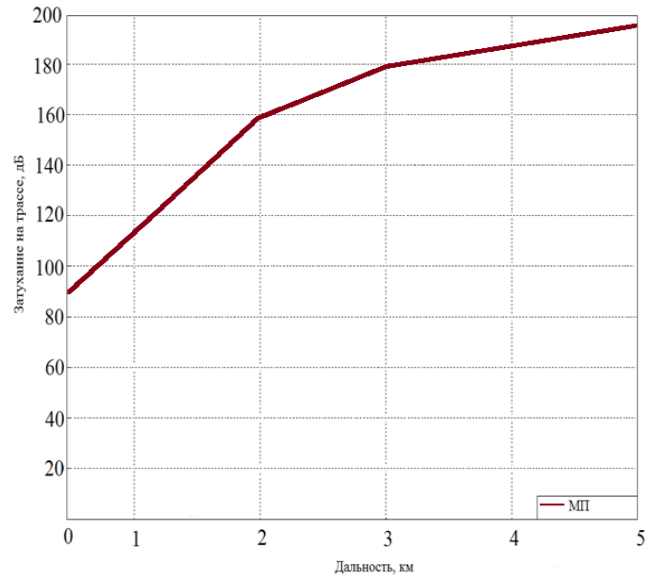


Рис.10. Затухание сигнала GSM-1800 для сектора 2 полученное методом Попова

Прогнозирование уровня радиосигнала на частоте 1800 МГц для сектора 1 рассчитанное методом Попова представлено на рис. 11, а для сектора 2 на рис. 12.

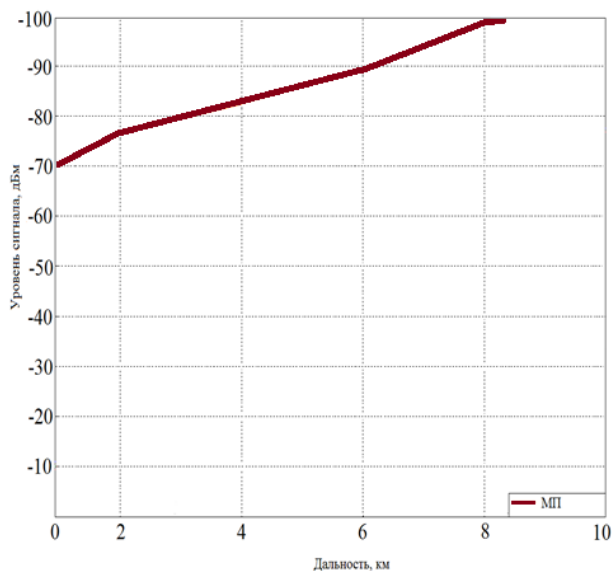


Рис.11. Прогнозирование уровня сигнала на частоте 1800 МГц для сектора 1 рассчитанное методом Попова

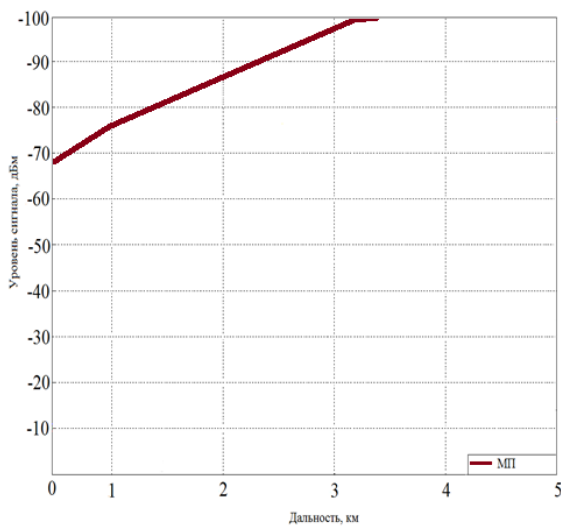


Рис.12. Прогнозирование уровня сигнала на частоте 1800 МГц для сектора 2 рассчитанное методом Попова

Эмпирический метод базируется на использовании математических моделей. В данной работе используется модель ЕММ 1 (Empirical Mathematics Model). Данная модель подходит для диапазона частот от 30 МГц до 3 ГГц. Оценка напряженности электромагнитного поля и затухание проводится с использованием разработанного алгоритма и расчетных формул, опубликованных в Рекомендации Международного союза электросвязи ITU-R P.833-5 [26]. Профиль рельефа местности на трассе задается в виде пар чисел  $(d_i, h_i)$ ,  $i = (0, n)$ , где  $d_i$  – расстояние по дуге большого круга в метрах от точки профиля с индексом 0 до точки профиля с индексом  $i$ ,  $h_i$  – высота местности над уровнем моря в метрах в точке профиля с индексом  $i$ . Участки леса на трассе распространения радиоволн задаются в виде пар чисел  $(d_{f1i}, d_{f2i})$ ,  $i = (1, n_f)$ , где  $d_{f1i}$  – расстояние от точки стояния передатчика до начальной точки участка леса по дуге большого круга в метрах,  $d_{f2i}$  – расстояние от точки стояния передатчика до конечной точки участка леса по дуге большого круга в метрах,  $n_f$  – число участков леса

на трассе.

Для вычисления напряженности электромагнитного поля составляется профиль рельефа местности на трассе распространения радиоволн  $(d_i, H_i)$ ,  $i = (0, n)$ , пересчитанный с учетом кривизны Земли; вычисляется число  $k$  точек преломления пути радиоволн от электрического центра антенны передатчика к электрическому центру антенны приемника, координаты точек преломления  $(d_{pi}, H_{pi})$ ,  $i = (1, k)$ ; определяется затухание за счет дифракции радиоволн на препятствиях, имеющихся на трассе без учета леса.

Затем строится профиль леса на трассе  $(d_{fi}, H_{fi}, p_{fi})$ ,  $i = (0, N_f)$ , где  $d_{fi}$  – расстояние от точки стояния передатчика до точки профиля леса по дуге большого круга в метрах,  $H_{fi}$  – высота точки профиля леса в метрах,  $p_{fi}$  – признак точки профиля леса,  $(N_f + 1)$  – число точек профиля леса. Высота точки профиля леса равна высоте местности в данной точке над уровнем моря, увеличенной на среднюю высоту деревьев  $h_f$ . После этого, используя полученные результаты, вычисляется затухание и напряженность электромагнитного поля на трассе с учетом леса.

Затухание сигнала на частоте 1800 МГц для сектора 1 рассчитанное эмпирическим методом представлено на рис. 13., а для сектора 2 на рис.14.

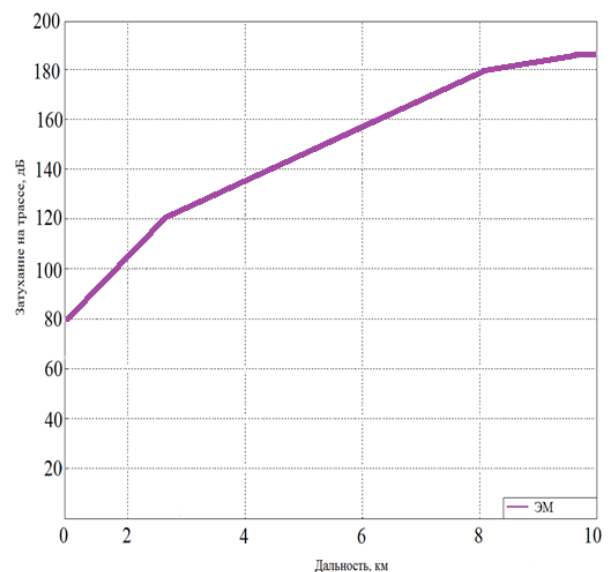


Рис.13. Затухание сигнала на частоте 1800 МГц для сектора 1 рассчитанное эмпирическим методом

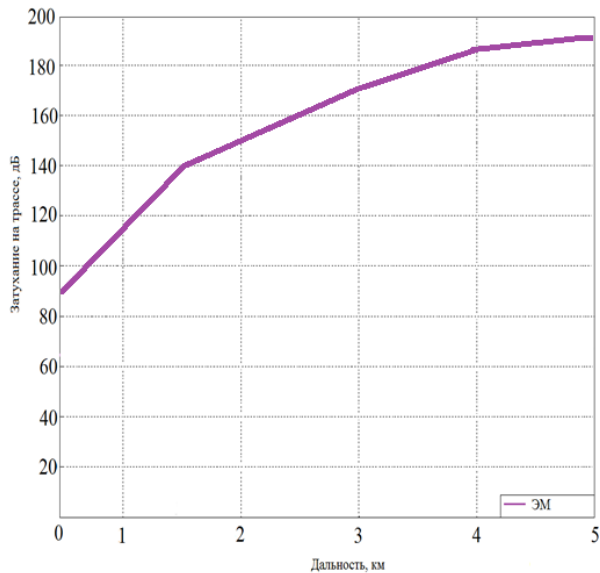


Рис. 14. Затухание сигнала на частоте 1800 МГц для сектора 2 рассчитанное эмпирическим методом

Прогнозирование уровня радиосигнала на частоте 1800 МГц для сектора 1 и сектора 2 рассчитанное эмпирическим методом представлено на рис. 15 и рис. 16.

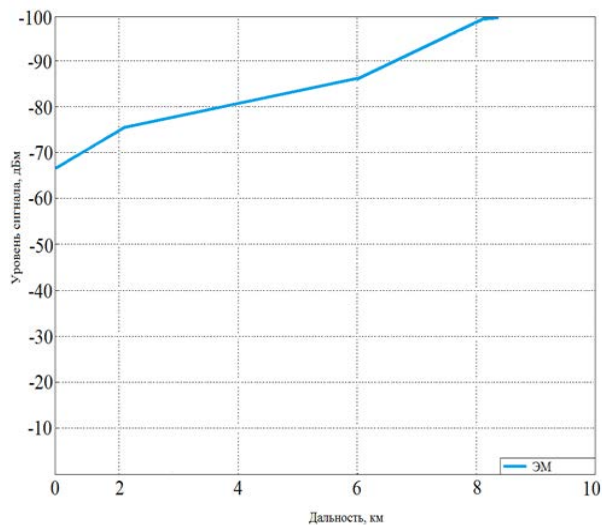


Рис. 15. Прогнозирование уровня сигнала на частоте 1800 МГц для сектора 1 рассчитанное эмпирическим методом

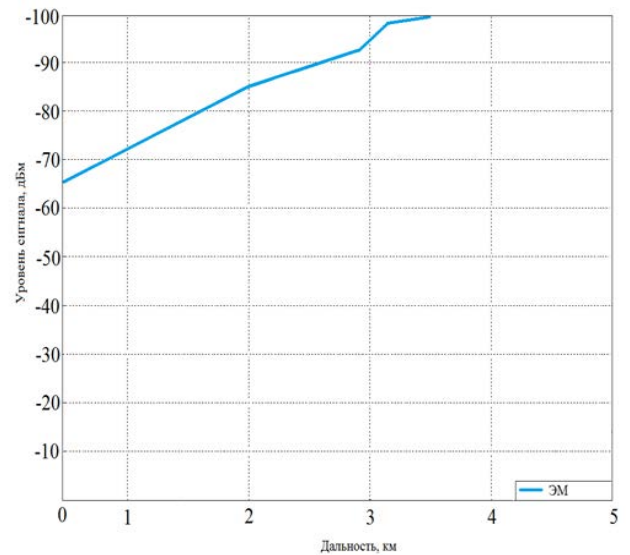


Рис. 16. Прогнозирование уровня сигнала на частоте 1800 МГц для сектора 2 рассчитанное эмпирическим методом

В классической теории распространения радиоволн при расчётах уровня принимаемого сигнала на трассе между передающим приёмным пунктом используется квадратичная формула Введенского.

$$E = \frac{2,18\sqrt{PG}h_1h_2}{r^2\lambda}, \quad (17)$$

где  $r$  – расстояние между передающей и приёмной антеннами, км.;  $h_1$  – высота подвеса передающей антенны, м.;  $h_2$  – высота подвеса приёмной антенны, м.;  $P$  – мощность передатчика, кВт.;  $\lambda$  – длина волны, м.;  $E$  – напряженность поля в месте приема дБмкВ/м;  $G$  – коэффициент усиления передающей антенны, дБ. В стандарте GSM-900 используется длина волны  $\lambda=0,333$ м, а в стандарте GSM-1800  $\lambda=0,167$ м.

Сопротивление входной цепи приемника принимается  $R_H = 50$  Ом; на антенне наводится напряжение:

$$U = \frac{E\lambda}{\pi}, \quad (18)$$

где  $E$  – напряженность поля радиосигнала, В/м.

При согласовании сопротивлений антенны и входной цепи приемника мощность сигнала на входе приемника:

$$P_C = \frac{U^2}{4R_H} \quad (19)$$

Уровень мощности сигнала на входе приемника, выраженный в децибелах по отношению к 1 мВт :

$$P_C = 20\lg E' + 10\lg\left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 + 10\lg\left(\frac{1}{4R_H}\right) + 30 - 120, \quad (20)$$

где  $E$  – напряженность поля радиосигнала, мкВ/м.

окончательно:

$$P_c = 20 \lg E' + 10 \lg \left( \frac{\lambda}{\pi} \right)^2 - 113, \quad (21)$$

где  $\lambda = 3 \cdot 10^8 / f$ ;  $f$  – несущая частота, МГц.

Подставляя в последнее выражение для напряженности поля из формулы Введенского, получается:

$$P(r) = 20 \lg \left( \frac{2,18 \sqrt{PG} h_1 h_2}{r^2 \lambda} \right) - 113 + 10 \lg \left[ \left( \frac{\lambda}{\pi} \right)^2 \right]. \quad (22)$$

Результаты расчетов методом Введенского уровня радиосигнала на частоте 1800 МГц для сектора 1 представлены на рис. 17, а для сектора 2 на рис. 18.

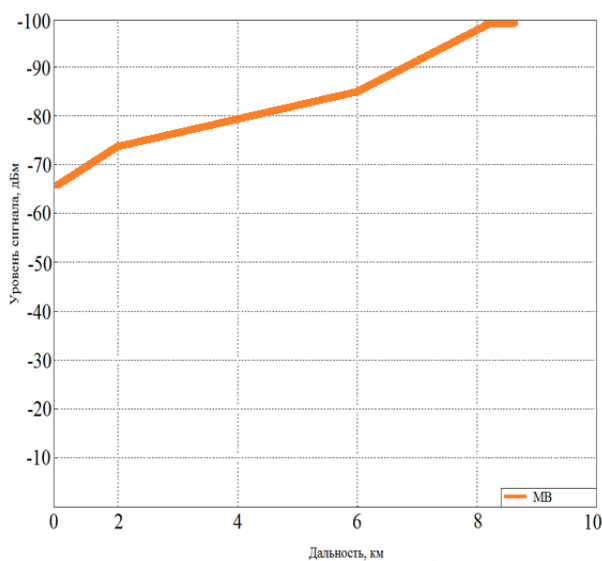


Рис. 17. Уровень радиосигнала на частоте 1800 МГц для сектора 1 рассчитанный методом Введенского

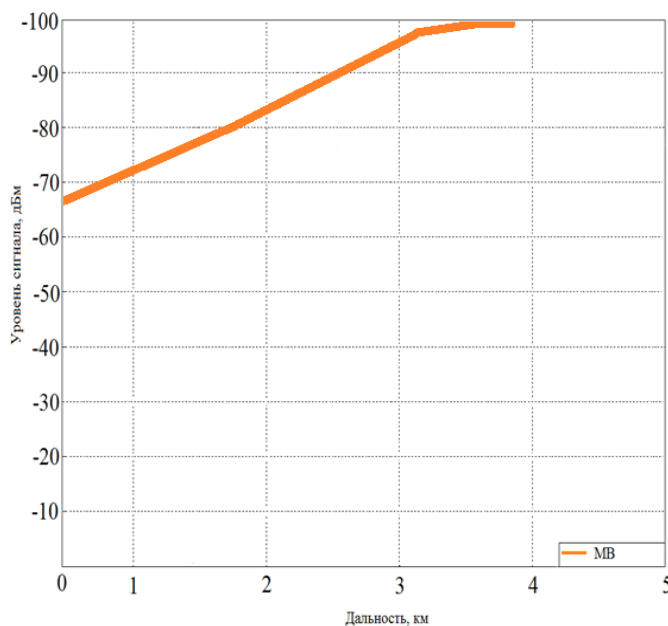


Рис. 18. Уровень радиосигнала на частоте 1800 МГц для сектора 2 рассчитанный методом Введенского

Результаты распространения сигнала GSM-1800 в зависимости от модели для хвойного леса, полученные с помощью моделирования и экспериментальным путем, показаны в таблице 2. Так как на пути в секторе 2 встречается помеха в виде большой сопки, расчеты для этого сектора при выборе модели не учитываются, поскольку с изменением частоты зона покрытия не изменится.

Таблица 2 – Результаты распространения сигнала в зависимости от модели для хвойного леса

Модель	Дальность распространения сигнала GSM-1800	
	Теория, км	Практика, км
Метод Попова (МП)	8,2	7,9
Метод параболического уравнения	8,5	
Эмпирический метод	8,5	
Метод Введенского	8,7	

На основе полученных данных, можно сделать следующие выводы, модель Введенского позволяет определить зависимость уровня принимаемого сигнала от расстояния, длины волны и высоты антенн. Однако данная модель не позволяет учитывать наличие искривления траектории радиоволн, которая хотя и слабо выражена, но все же имеет место, особенно в мобильной связи. На больших расстояниях показывает наиболее благоприятный прогноз, что на практике, может оказаться не правдой. Метод Попова, в отличие от метода параболического уравнения и эмпирического, прогнозирует наиболее точные результаты, но несмотря на это, позволяет учитывать не все сложности возникающие на пути распространения сигнала, что тоже важно при планировании новых базовых станций.

Основываясь на практических показаниях, для дальнейшего анализа на территории загородных трасс Хабаровского края стандарта GSM рекомендуется использовать эмпирическую модель и метод параболического уравнения.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатами данной работы явились исследование и моделирование процессов распространения электромагнитных волн на сложных по рельефу загородных трассах в условиях лесистой местности и их влияние на характеристики сигнала GSM.

Анализ рассмотренных методов показывает, что учесть всех факторов, возникающих при распространении радиоволн в лесном массиве на большие расстояния невозможно. Но, основываясь на полученных результатах, для дальнейшего использования при размещении БС на территории загородных трасс Хабаровского края стандарта GSM рекомендуется использовать эмпирическую модель и



метод параболического уравнения.

Полученные в работе результаты подтверждаются экспериментально. Предложенные методы, модели и технические решения позволяют учесть распространение радиоволн еще на этапе проектирования радиосистем и устройств связи для практической реализации современной инфраструктуры передачи голоса и данных на сложных по рельефу загородных трассах.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Маковеева М.М., Шинаков Ю.С. Системы связи с подвижными объектами: Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 2002. – 440 с.
- [2] T.Tamir, On radio wave propagation in forest environments. IEEE Tr. AP, vol. AP-15, No. 6, pp. 806-817, Nov. 1967
- [3] D. Dence, T.Tamir. Radio loss of lateral waves in forest environments. Radio Sci. Vol.4, No.4, pp. 307-318, April 1969.
- [4] T. Tamir, Radio wave propagation along mixed paths in forest environments. IEEE Tr. AP, vol. AP-25, No. 4, pp. 471-477, July 1977.
- [5] Y.S.Meng, Y.H. Lee, B.C. Ng. Study of propagation loss prediction in forest environment. PIER B, vol.17, 117-133, 2009.
- [6] Li L.W., Yeo T.S., Kooi P.S., Leong M.S. Radio wave propagation along mixed paths through a four – layered model of rain forest: an analytical approach./ IEEE Trans. Antennas and Propagat., Vol. 46, No. 7, 1098-1111, 1998.
- [7] Koh J.H., Li L.W., Kooi P.S., Yeo T.S., Leong M.S. Dominant lateral waves in canopy layer of a four – layered forest. /Radio Sci., Vol. 34, No.3, 681—691, 1999.
- [8] Analysis of LTE Signal Propagation Models in Wooded Areas for Khabarovsk Highways G.V. Zhiba;V.P. Pisarenko;D.V. Vegera В сборнике: 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. 2020. С. 9271104.
- [9] Improve noise immunity of transfer messages by radio channel in cellular systems Zhiba G.V., Pisarenko V.P., Shevtsov A.N. В сборнике: 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018 2019. С. 8602932.
- [10] Мельников Ю.Н. Достоверность информации в сложных системах. Книга. М.: Сов. радио, 1973. - стр. 192.
- [11] Мидлтон Д. Введение в статистическую теорию связи: Пер. с англ./ Под ред. Б.Р. Левина. Т.1. М.: Сов. радио. 1961. 782 с.
- [12] Пирс У. Построение надежных вычислительных машин – М. Мир, 1968 г.
- [13] Исследование повышения скорости LTE-A с помощью агрегации частот Жиба Г.В., Захаров И.С., Смоляков А.А., Писаренко В.П., Шевцов А.Н. В сборнике: Информационные технологии XXI века сборник научных трудов. Хабаровск, 2017. С. 451-460.
- [14] Исследование возможностей применимости стандарта LTE CAT.9 Жиба Г.В., Захаров И.С., Смоляков А.А., Писаренко В.П. Ученые заметки ТОГУ. 2017. Т. 8. № 2. С. 155-163.
- [15] Анализ помехоустойчивости каналов связи LTE и WIMAX Жиба Г.В., Писаренко В.П., Захаров И.С., Шевцов А.Н. Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2017. № 3 (12). С. 17-21.
- [16] Шастова, Г.А. Кодирование и помехоустойчивость передачи телемеханической информации / Г.А. Шастова. — М. : Энергия, 1966.
- [17] Использование альтернативной энергетики в системах энергоснабжения телекоммуникационного оборудования Вегера Д.В., Власов В.Н., Писаренко В.П., Терещенко В.Д. Наука и технологии. 2018. № 1 (34). С. 77-81.
- [18] Permyakov V. A., Mikhailov M. S., Malevich E. S. Calculation of the radar station field in 3D space in the presence of forest and other obstacles by the method of parabolic equation // 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS), St. Petersburg, Russia, 2017. – Pp. 3754-3757.
- [19] Sazonov D.M. The Matrix Theory of Antenna Arrays. –Taganrog: YuFU, 2013, 98 p.
- [20] Михайлов М.С., Пермяков В.А., Малевич Е.С. Расчет поля методом параболического уравнения в трехмерном пространстве с препятствиями // Известия высших учебных заведений. Физика, 2016, Т. 59, No.12-3 – с. 144–148.
- [21] Ozgun, O. Recursive two-way parabolic equation approach for modeling terrain effects in tropospheric propagation / O. Ozgun // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. — 2009. — Т. 57, № 9. — С. 2706.
- [22] Akhmyarov V.V. The parabolic equation method in the theory of diffraction // Advances in modern radioelectronics. – 2010. – № 9. – p. 72 – 80.
- [23] Barclay L.W. Propagation of Radio Waves. – London, Institution of Engineering and Technology, 2008. – 460 p.
- [24] 24. Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM. М.: Эко-Трендз. 2005. – 296 с.
- [25] Попов, В.И. Распространение радиоволн в лесах / В.И. Попов. - М.: Горячая линия -Телеком , 2015. - 392 с.
- [26] Рекомендация МСЭ-R P.833-5. Ослабление сигналов растительностью. 2005. 13 с.
- [27] Методы расчета покрытия URL:[http://studbooks.net/2364837/tehnika/metody\\_rascheta\\_pokrytiya](http://studbooks.net/2364837/tehnika/metody_rascheta_pokrytiya)
- [28] Чернов Л.А. Волны в случайно-неоднородных средах. – М.: Наука, 1977. – 172 с.
- [29] Sevgi L., Uluisik C., Akleman F. A MATLAB-based two-dimensional parabolic equation radiowave propagation package. – IEEE Antennas and Propagation magazine, 2005, vol. 47, no.4, pp.164-175.
- [30] Исмару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т.2 М.: Мир, 1981.

# GSM signal propagation estimation on a track with difficult terrain and coniferous forest

D. Vejera, G. Zhiba, V. Pisarenko

**Abstract**—There are a huge number of different technological solutions that allow the reception and transmission of various kinds of information through the free propagation of radio waves in the environment. Despite the development of telecommunications, there are still hard-to-reach areas that do not allow for high-quality reception and transmission of voice and data. Radio waves propagating in the forest have high path loss compared to other media. When building new base stations, it is necessary to take into account the signal attenuation due to forests.

Therefore, based on the example of an existing communication object, methods for calculating the attenuation and propagation range of a radio signal for GSM technology, taking into account forest areas, are considered and compared with actual indicators. A brief description of the GSM technology, the developed program, the methods used and the results of the attenuation and propagation range of the radio signal are given. The proposed methods, models and technical solutions make it possible to take into account the propagation of radio waves even at the design stage of radio systems and communication devices for the practical implementation of a modern infrastructure for voice and data transmission on suburban routes difficult in relief. To solve the set tasks, methods of mathematical modeling, computational mathematics, system analysis, programming methods and field experimental research are used.

**Keywords**—GSM, parabolic equation method, Vvedensky formula, radio wave propagation, EMM 1

## REFERENCES

- [1] Makoveeva M.M., Shinakov Yu.S. Communication systems with mobile objects: Textbook for universities. – M.: Radio and communication, 2002. – 440 p.
- [2] T.Tamir, On radio wave propagation in forest environments. IEEE Tr. AP, vol. AP-15, No. 6, pp. 806-817, Nov. 1967
- [3] D. Dence, T.Tamir. Radio loss of lateral waves in forest environments. Radio Sci. Vol.4, No.4, pp. 307-318, April 1969.
- [4] T. Tamir, Radio wave propagation along mixed paths in forest environments. IEEE Tr. AP, vol. AP-25, No. 4, pp. 471-477, July 1977.
- [5] Y.S.Meng, Y.H. Lee, B.C. Ng. Study of propagation loss prediction in forest environment. PIER B, vol.17, 117-133, 2009.
- [6] Li L.W., Yeo T.S., Kooi P.S., Leong M.S. Radio wave propagation along mixed paths through a four – layered model of rain forest: an analytical approach./ IEEE Trans. Antennas and Propagat., Vol. 46, No. 7, 1098-1111, 1998.
- [7] Koh J.H., Li L.W., Kooi P.S., Yeo T.S., Leong M.S. Dominant lateral waves in canopy layer of a four – layered forest. /Radio Sci., Vol. 34, No.3, 681—691, 1999.
- [8] Analysis of LTE Signal Propagation Models in Wooded Areas for Khabarovsk Highways G.V. Zhiba;V.P. Pisarenko;D.V. Vejera In the collection:: 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. 2020. C. 9271104.
- [9] Improve noise immunity of transfer messages by radio channel in cellular systems Zhiba G.V., Pisarenko V.P., Shevtsov A.N. In the collection: 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018 2019. C. 8602932.
- [10] Melnikov Yu.N.. Reliability of information in complex systems. Book. M.: Sov. radio, 1973. - p. 192.
- [11] Middleton D. Introduction to Statistical Communication Theory: Trans. from Eng./ edited by B.R. Levina. T.I. M.: Sov. radio. 1961. 782 p.
- [12] Pirs U. Building Reliable Computing Machines – M. World, 1968 y.
- [13] Investigation of increasing the speed of LTE-A using frequency aggregation Zhiba G.V., Zaharov I.S., Smolyakov A. A., Pisarenko V.P., Shevtsov A.N. In the collection: Information technologies of the XXI century collection of scientific papers. Khabarovsk, 2017. p. 451-460.
- [14] Study of the applicability of the LTE CAT.9 standard Zhiba G.V., Zaharov I.S., Smolyakov A. A., Pisarenko V.P. Academic Notes PSU. 2017. T. 8. № 2. p. 155-163.
- [15] Analysis of noise immunity of LTE and WIMAX communication channels Zhiba G.V, Pisarenko V.P., Zaharov I.S., Shevtsov A.N. Transport of the Asia-Pacific region. 2017. № 3 (12). p. 17-21.
- [16] Shastova, G.A. Coding and noise immunity of telemechanical information transmission / G.A. Shastova. — M. : Energy, 1966.
- [17] Use of alternative energy in power supply systems for telecommunications equipment Vejera D.V., Vlasov V.N., Pisarenko V.P., Tereshchenko V.D. Science and technology. 2018. № 1 (34). P. 77-81.
- [18] Permyakov V. A., Mikhailov M. S., Malevich E. S. Calculation of the radar station field in 3D space in the presence of forest and other obstacles by the method of parabolic equation // 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS), St. Petersburg, Russia, 2017. – Pp. 3754-3757.
- [19] Sazonov D.M. The Matrix Theory of Antenna Arrays. –Taganrog: YuFU, 2013, 98 p.
- [20] Mikhailov M.S., Permyakov V.A., Malevich E.S. Calculation by the method of parabolic equation in three-dimensional space with obstacles // Russian Physics Journal, 2016, Vol. 59, No.12-3 – Pp. 144–148.
- [21] Ozgun, O. Recursive two-way parabolic equation approach for modeling terrain effects in tropospheric propagation / O. Ozgun // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. — 2009. — T. 57, № 9. — C. 2706.
- [22] Akhiyarov V.V. The parabolic equation method in the theory of diffraction // Advances in modern radioelectronics. – 2010. – № 9. – p. 72 – 80.
- [23] Barclay L.W. Propagation of Radio Waves. – London, Institution of Engineering and Technology, 2008. – 460 p.
- [24] Popov V.I. GSM Cellular Basics. M.: Eco-Trends. 2005. – 296 p.
- [25] Popov, V.I. Propagation of radio waves in forests / V.I. Popov. - M.: Hotline - Telecom, 2015. - 392 p.
- [26] Recommendation ITU-R P.833-5. Attenuation in vegetation. 2005. 13 p.
- [27] Coverage calculation methods URL:[http://studbooks.net/2364837/tehnika/metody\\_rascheta\\_pokrytiya](http://studbooks.net/2364837/tehnika/metody_rascheta_pokrytiya)
- [28] Chernov L.A. Waves in randomly inhomogeneous media. – M.: The science, 1977. – 172 p.
- [29] Sevgi L., Uluisik C., Akleman F. A MATLAB-based two-dimensional parabolic equation radiowave propagation package. – IEEE Antennas and Propagation magazine, 2005, vol. 47, no.4, pp.164-175.
- [30] Ishimaru A. Wave propagation and scattering in randomly inhomogeneous media. T.2 M.: World, 1981.