ISSN: 3030-3346

АЛГОРИТМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ПОТЕРИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Кадиров Анвар Абдугапурович

Первый заместитель директора "Центр электромагнитной совместимости"
E-mail: kadirov@cemc.uz

K E Y W O R D S

распространение радиоволн; подстилающая поверхность; потери распространения; показатель потерь; экспериментальные данные; статистическая обработка; остаточные отклонения; параметрический учет; алгоритм; сотовая связь

A B S T R A C T

Точность определения потерь распространения радиоволн ограничивается тем, что эмпирические модели описывают среду усредненной категорией местности и не различают открытую территорию, растительный покров и водную поверхность. Переход от разнородных натурных измерений к набору параметров, пригодных для дальнейшего моделирования, формализован недостаточно. Целью работы является разработка и экспериментально-статистическое обоснование алгоритма параметрического учета влияния типа подстилающей поверхности на потери распространения радиоволн по данным натурных измерений. Использованы первичные численные ряды измерений уровня сигнала в диапазонах 900 и 1800 МГц на семи трассах (открытая местность — 175 и 130 точек; сельская одноэтажная застройка — 215, 108 и 78 точек; пресноводная поверхность — 103 и 94 точки) и массив из 893 и 359 измерений в растительном покрове. Алгоритм включает предварительную обработку данных, классификацию трасс по типу подстилающей поверхности, статистическую обработку выборок с регрессионной аппроксимацией и расчетом остатков, определение количественных параметров распространения, проверку их статистической значимости с возможным уточнением и формирование выходного набора параметров. Установлено, что показатель потерь составляет 2,32 и 2,33 для открытой местности, 1,45–2,05 для одноэтажной застройки и 3,22 и 3,23 для пресноводной поверхности при среднеквадратическом отклонении остатков 3,25–9,50 дБ. Результатом работы алгоритма является дифференцированный по типам поверхности набор параметров, пригодный для последующего построения поверхностно-обусловленной коррекции потерь.

1. ВВЕДЕНИЕ

Определение потерь распространения радиоволн является исходной задачей при проектировании и оптимизации сетей подвижной связи: именно значение потерь на трассе определяет уровень сигнала в точке приема и, следовательно, границы обслуживаемой территории. Точность такого определения непосредственно влияет на выбор мест размещения базовых станций, их энергетических параметров и на стоимость развертывания сети [1, 2].

Потери распространения формируются совокупностью механизмов отражения, дифракции и рассеяния, характеристики которых зависят от свойств подстилающей поверхности вдоль трассы. Растительный покров вносит дополнительное затухание, зависящее от частоты, плотности и глубины проникновения в массив [3, 4]; водная поверхность, напротив, характеризуется высоким коэффициентом отражения и практически полным отсутствием затенения, вследствие чего распространение над ней описывается иными зависимостями, чем над сушей [5, 6, 7]. Тип земного покрова используется в современных исследованиях как самостоятельный признак при прогнозировании потерь [8, 9].

(cc) BY

Широко применяемые эмпирические модели — Окумуры–Хаты [10], COST-231 [11] и их модификации — описывают среду категорией местности (город, пригород, открытое пространство). Такое представление удобно для инженерных расчетов, однако при его использовании открытая территория, растительный покров и водоем оказываются отнесенными к одной категории, а точность прогноза вне условий, для которых модель получена, существенно снижается [1, 12, 13]. Обзорные исследования показывают, что априорные модели независимо от их сложности обеспечивают ограниченную точность, а ее повышение достигается калибровкой по натурным измерениям на целевой территории [2, 14].

Калибровка по измерениям предполагает наличие упорядоченного набора экспериментальных параметров, характеризующих условия распространения. При этом натурные ряды, полученные на трассах различных типов подстилающей поверхности, неоднородны: они различаются геометрией измерений, протяженностью, частотой и характером изменения уровня с расстоянием. Обработка таких рядов по единой схеме требует предварительной классификации трасс и согласованного набора вычисляемых характеристик.

Анализ опубликованных работ показывает, что процедуры статистической обработки измерений распространения (регрессия по логарифму расстояния, оценка показателя потерь, анализ остатков) описаны достаточно подробно [2, 12, 15], тогда как переход от неоднородных экспериментальных рядов к дифференцированному по типам подстилающей поверхности набору параметров, пригодному для последующего моделирования, представлен ограниченно и требует дальнейшей формализации.

Целью настоящего исследования является разработка и экспериментально-статистическое обоснование алгоритма параметрического учета влияния типа подстилающей поверхности на потери распространения радиоволн на основе обработки натурных данных. Вклад работы состоит в формализации последовательности обработки, обеспечивающей получение сопоставимых количественных параметров для четырех типов условий распространения, и в экспериментальном определении этих параметров в диапазонах 900 и 1800 МГц. Построение модели потерь и расчет зоны покрытия выходят за рамки настоящей статьи; сформированный набор параметров рассматривается как результат работы алгоритма.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Экспериментальные данные и условия исследований

Экспериментальные массивы, использованные в настоящем исследовании, сформированы в ходе ранее выполненных натурных измерений уровня сигнала действующих базовых станций сотовой связи в диапазонах 900 и 1800 МГц и в настоящей работе подвергнуты статистической обработке для разработки алгоритма параметрического учета влияния типа подстилающей поверхности. Измерения выполнены при единой высоте приемной антенны 1,5 м с координатной привязкой точек; регистрируемой величиной являлась мощность сигнала на входе приемника P_2, дБм, а для трасс над водной поверхностью дополнительно использовалась напряженность поля E, дБ(мкВ/м), получаемая пересчетом измеренной мощности в соответствии с рекомендацией ITU-R P.525 [16].

Состав экспериментальных выборок приведен в таблице 1. Выборки различных трасс не объединялись, поскольку относятся к разным базовым станциям и условиям распространения. Массив измерений в растительном покрове получен при перемещении по территории с регистрацией уровня от нескольких обслуживающих секторов и не имеет единой радиальной геометрии, вследствие чего для него используются распределение уровней и зависимость уровня от расстояния вдоль маршрута измерений.

(cc) BY

Таблица 1.

Экспериментальные выборки и условия исследований

Тип подстилающей поверхности	Частота, МГц	Объем выборки N	Диапазон расстояний, км
Открытая местность	900	175	0,14–11,55
Открытая местность	1800	130	0,14–10,25
Сельская одноэтажная застройка, трасса I	900	215	0,66–12,91
Сельская одноэтажная застройка, трасса II	900	108	0,08–14,97
Сельская одноэтажная застройка, трасса II	1800	78	0,08–12,10
Пресноводная поверхность	938,6	103	0,32–6,22
Пресноводная поверхность	1873,4	94	0,39–6,17
Растительный покров	900	893	маршрут ≈ 5,3 км
Растительный покров	1800	359	маршрут ≈ 5,3 км

2.2. Характеристика исследуемых типов подстилающей поверхности

В работе рассматриваются четыре типа условий распространения, различающихся характером подстилающей поверхности. Открытая местность представляет собой относительно ровную территорию без плотной застройки; она принимается в качестве опорных условий, поскольку влияние дополнительных механизмов здесь минимально. Сельская одноэтажная застройка отличается наличием регулярного затенения строениями при сохранении открытого характера местности в целом. Растительный покров образует объемно распределенную поглощающую и рассеивающую среду, для которой характерны дополнительные потери и повышенная изменчивость уровня [3, 4]. Пресноводная поверхность характеризуется высоким коэффициентом отражения и отсутствием затенения, что определяет интерференционный характер изменения уровня сигнала вдоль трассы [5, 6].

Выделение именно этих четырех типов обусловлено составом имеющихся экспериментальных данных и соответствует разделению условий распространения, принятому при классификации трасс в алгоритме (раздел 2.4). Численные характеристики каждого типа определяются в результате работы алгоритма и приведены в разделе 3.

2.3. Методы статистической обработки экспериментальных данных

Измеренный в отдельной точке уровень сигнала рассматривается как реализация случайной величины, формируемой суперпозицией волн с неучитываемыми фазами, поэтому совокупность измерений вдоль трассы обрабатывается как экспериментальная выборка. Для каждой выборки определяются объем, диапазон расстояний, минимальное и максимальное значения, среднее, медиана, дисперсия, среднеквадратическое отклонение и полуширина доверительного интервала среднего при доверительной вероятности $\beta = 0{,}95$ с использованием распределения Стьюдента при $N - 1$ степенях свободы.

Средний закон убывания уровня сигнала с расстоянием описывается нормированной логарифмической зависимостью

$$P_2(r) = P_0 - 10nlg(\frac{r}{R_0}) \qquad (1)$$

где $P_2(r)$ — измеренная мощность на входе приемника, дБм; P_0 — уровень,

(cc) BY

отнесенный к опорному расстоянию R_0 = 1 км, дБм; n — показатель (экспонента) потерь; r — расстояние до базовой станции, км. Оценка показателя потерь выполняется методом наименьших квадратов по парам ($x_i = \lg(r_i/R_0)$; p_i):

$$n = -\frac{N\sum x_i p_i - \sum x_i \sum p_i}{10[N\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2]} \qquad (2)$$

где N — объем выборки; p_i — измеренная мощность в i-й точке, дБм. Для трасс над водной поверхностью дополнительно выделяется квадратичный тренд напряженности поля

$$E_{trend}(r) = a_2 r^2 + a_1 r + a_0 \qquad (3)$$

где E_{trend} — сглаженное значение напряженности поля, дБ(мкВ/м); r — расстояние, m; a_2, a_1, a_0— коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов. Квадратичная аппроксимация используется как средство статистического выделения среднего пространственного изменения уровня и не рассматривается как физическая модель распространения.

Качество аппроксимации оценивается коэффициентом детерминации и среднеквадратической ошибкой

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \qquad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum(y_i - \hat{y}_i)^2} \qquad (5)$$

где y_i — измеренное значение (P_2 или E); $\hat{y}_i$ — значение, полученное по аппроксимирующей зависимости; $\bar{y}$ — среднее по выборке. Остаточные отклонения относительно среднего тренда определяются как

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \qquad (6)$$

Их среднее равно нулю по построению, а среднеквадратическое отклонение σ_e характеризует интенсивность локальных вариаций уровня. Экспериментальные потери на опорном расстоянии вычисляются из энергетического баланса радиолинии:

$$K = P_b + P_b + G_m - L_f - P_0 \qquad (7)$$

где K — экспериментальные потери на опорном расстоянии, дБ; P_b — мощность передатчика базовой станции, дБм; G_b— коэффициент усиления передающей антенны, дБи; G_m— коэффициент усиления приемной антенны, дБи; L_f— потери антенно-фидерного тракта, дБ. Расчет выполнен при конфигурации P_b= 43 дБм, P_b = 16–18 дБи, G_m= 3 дБ, L_f= 0,5–1,5 дБ; показатель n от этой конфигурации не зависит.

2.4. Алгоритм параметрического учета влияния подстилающей поверхности

Назначение алгоритма состоит в получении из разнородных натурных данных упорядоченного набора количественных параметров, характеризующих потери распространения при различных типах подстилающей поверхности, в форме, обеспечивающей сопоставимость параметров между типами поверхности. Структура алгоритма приведена на рисунке 1.

(cc) BY

ISSN: 3030-3346

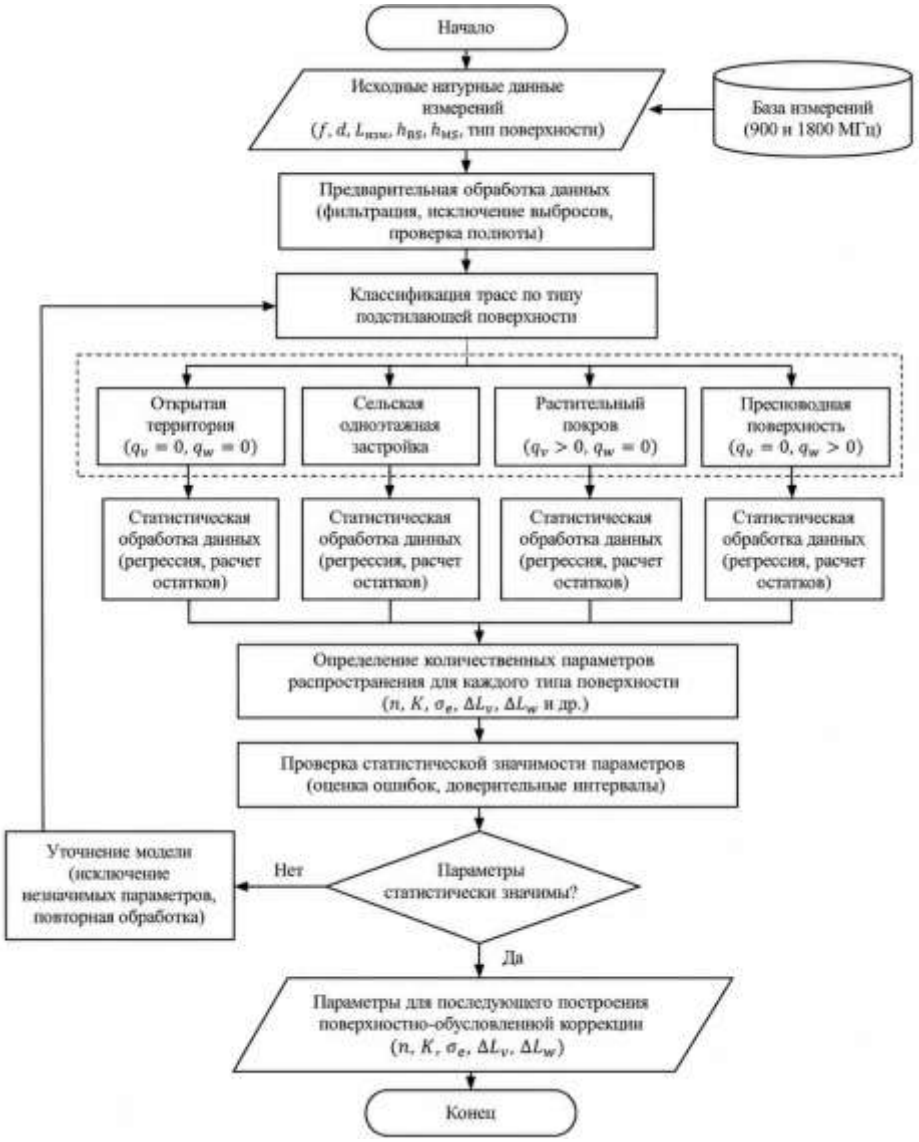


Рис. 1 – Алгоритм параметрического учета влияния подстилающей поверхности на потери распространения радиоволн по экспериментальным данным

На вход алгоритма поступают исходные натурные данные измерений, содержащие частоту f, расстояние d, измеренный уровень сигнала L_{meas}, высоты антенн базовой и мобильной станций h_{BS} и h_{MS}, а также сведения о типе поверхности вдоль исследуемой трассы; источником данных является база измерений диапазонов 900 и 1800 МГц. Предварительная обработка обеспечивает подготовку исходных данных к последующему статистическому анализу и включает проверку полноты рядов. В предоставленных исходных материалах критерии фильтрации и исключения выбросов не конкретизированы, поэтому в настоящей работе соответствующий этап описывается в объеме, соответствующем исходному алгоритму.

Следующим этапом является классификация измерительных трасс в соответствии с характером подстилающей поверхности с выделением четырех групп: открытая территория, сельская одноэтажная застройка, растительный покров и пресноводная поверхность. Классификация выполняется до статистической обработки, что принципиально: она обеспечивает раздельное определение параметров для условий, различающихся механизмами формирования поля, и исключает усреднение характеристик по разнородным трассам.

Для каждой выделенной группы трасс выполняется статистическая обработка экспериментальных данных, включающая регрессионную аппроксимацию и расчет

(cc) BY

остаточных отклонений. Регрессионная аппроксимация проводится по зависимости (1) с оценкой показателя потерь по (2); для трасс над водной поверхностью дополнительно определяется квадратичный тренд (3). Качество аппроксимации оценивается по (4) и (5), остаточные отклонения — по (6). Параллельная организация этого этапа для четырех групп трасс обеспечивает применение единой схемы обработки при различных формах описания среднего поведения уровня.

Результаты обработки по группам сводятся на этапе определения количественных параметров распространения для каждого типа поверхности. К числу определяемых параметров относятся показатель потерь n, коэффициент K, среднеквадратическое отклонение остаточных вариаций σ_e, а также дополнительные составляющие потерь, обусловленные растительным покровом и водной поверхностью, ΔL_v и ΔL_w. Значение K определяется по (7) при заданной конфигурации радиолинии.

После определения параметров выполняется оценка их статистической значимости с учетом погрешностей и доверительных интервалов. При выявлении статистически незначимых параметров алгоритм предусматривает уточнение модели — исключение таких параметров и повторную обработку соответствующей выборки, для чего предусмотрен возврат к этапу классификации трасс. Итерационный характер этого этапа позволяет сформировать согласованный набор характеристик, каждая из которых имеет статистическое подтверждение. При подтверждении статистической значимости полученные параметры принимаются в качестве выходных.

Выходом алгоритма является набор параметров n, K, σ_e, ΔL_v и ΔL_w, сформированный дифференцированно для исследованных типов подстилающей поверхности. Этот набор представляет собой параметрическое описание условий распространения, полученное непосредственно из натурных данных; его использование на последующих этапах моделирования выходит за рамки настоящей работы.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Статистические характеристики экспериментальных выборок

Результаты выполнения этапа статистической обработки приведены в таблице 2. Средние уровни сигнала составляют −69,48 и −69,99 дБм для открытой местности, −80,86; −76,71 и −79,29 дБм для одноэтажной застройки и −67,85 и −69,09 дБм для пресноводной поверхности; для растительного покрова средние уровни равны −73,5 и −76,2 дБм при среднеквадратическом отклонении 9,69 и 9,85 дБ и полуширине доверительного интервала среднего ±0,64 и ±1,02 дБ. Поскольку трассы относятся к разным радиолиниям, различия средних уровней отражают одновременно условия распространения и энергетические параметры, поэтому предметом дальнейшего сравнения служат закон убывания уровня и характеристики вариаций.

Общий разброс уровней по длине трассы составляет 10,73–13,28 дБ и для водных выборок практически одинаков в двух диапазонах (10,75 и 10,73 дБ), что при последующем анализе позволяет отнести различия между диапазонами к вариациям относительно среднего тренда, а не к общей изменчивости выборки.

(cc) BY

Таблица 2.

Статистические характеристики экспериментальных выборок

Показатель	Открытая, 900	Открытая, 1800	Застройка I, 900	Застройка II, 900	Застройка II, 1800	Вода, 938,6	Вода, 1873,4
Среднее $\bar{P}_2$, дБм	−69,48	−69,99	−80,86	−76,71	−79,29	−67,85	−69,09
Медиана, дБм	−71,20	−76,44	−83,52	−78,28	−80,52	−71,76	−71,16
СКО s, дБ	11,15	13,28	11,49	11,79	12,02	10,75	10,73
Размах, дБ	47,20	54,00	54,94	59,20	50,40	44,68	48,80
Полуширина ДИ среднего (β = 0,95), дБ	1,66	2,30	1,54	2,25	2,71	2,10	2,20

3.2. Параметры экспериментальных зависимостей

Параметры аппроксимации, полученные на следующем этапе алгоритма, приведены в таблице 3. Экспериментальные зависимости уровня сигнала от расстояния для открытой местности показаны на рисунке 2, для пресноводной поверхности — на рисунке 3.

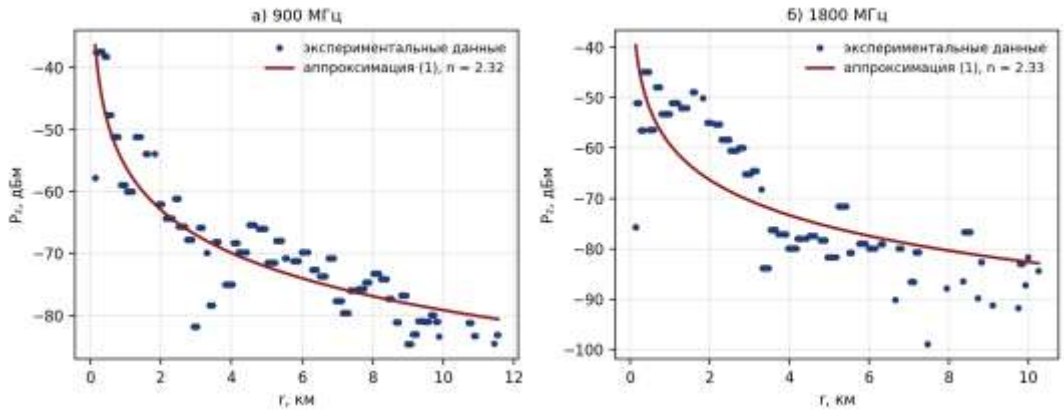


Рис. 2 – Экспериментальные зависимости уровня сигнала от расстояния для открытой местности и аппроксимация (1): а) 900 МГц; б) 1800 МГц

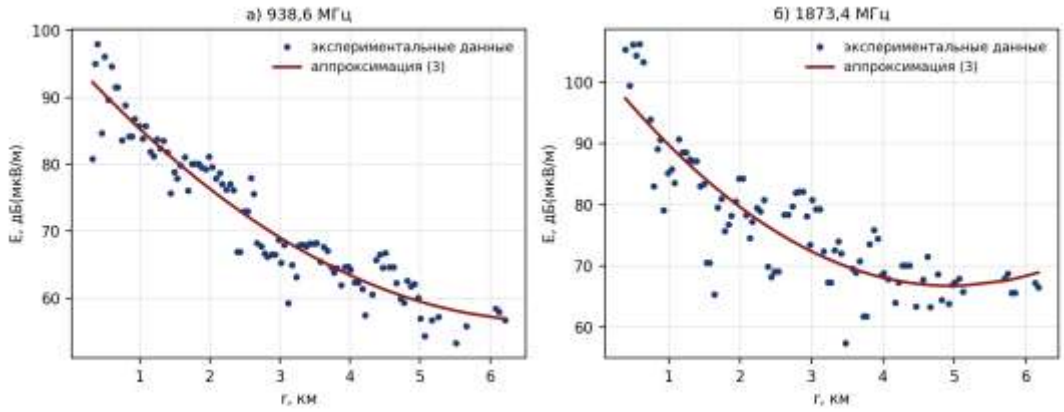


Рис. 3 – Экспериментальные зависимости напряженности поля от расстояния над пресноводной поверхностью и квадратичная аппроксимация (3): а) 938,6 МГц; б) 1873,4 МГц

Для открытой местности показатель потерь составляет n = 2,32 (900 МГц; R^2 = 0,816; RMSE = 4,77 дБ) и n = 2,33 (1800 МГц; R^2 = 0,597; RMSE = 8,40 дБ). Практическое совпадение показателей в двух диапазонах на одной трассе указывает на общий

(cc) BY

геометрический механизм убывания уровня, тогда как различие коэффициентов детерминации отражает большую интенсивность вариаций в верхнем диапазоне. Для одноэтажной застройки показатели ниже — 2,05 на трассе I и 1,45 и 1,55 на трассе II при R^2 = 0,363–0,461; такие значения показывают, что убывание с расстоянием объясняет менее половины дисперсии выборки, а преобладающим фактором является затенение строениями.

Для пресноводной поверхности получено n = 3,22 (938,6 МГц; P_0 = −55,97 дБм; R^2 = 0,872; RMSE = 3,82 дБ) и n = 3,23 (1873,4 МГц; P_0 = −56,87 дБм; R^2 = 0,765; RMSE = 5,17 дБ). Показатели практически совпадают, а средний закон убывания оказывается более крутым, чем над открытой сушей. Квадратичный тренд напряженности поля описывает 90,9 % дисперсии на 938,6 МГц (RMSE = 3,23 дБ) и 73,6 % на 1873,4 МГц (RMSE = 5,49 дБ) при коэффициентах a_2 = 8,3167·10⁻⁷ и 1,4690·10⁻⁶ дБ/м², a_1 = −1,1432·10⁻² и −1,4567·10⁻² дБ/м, a_0 = 95,859 и 102,876 дБ(мкВ/м).

Экспериментальные потери на опорном расстоянии, вычисленные по (7) при центральных значениях конфигурации, составляют К = 117,9 и 121,3 дБ для открытой местности, 132,1; 132,3 и 135,5 дБ для одноэтажной застройки и 118,0 и 118,9 дБ для пресноводной поверхности. Вариация коэффициента усиления антенны в пределах 16–18 дБи и потерь тракта в пределах 0,5–1,5 дБ смещает К на ±1,5 дБ, что учитывается при интерпретации абсолютных значений.

Таблица 3.

Параметры экспериментальных зависимостей

Показатель	**Открытая, 900**	**Открытая, 1800**	**Застройка I, 900**	**Застройка II, 900**	**Застройка II, 1800**	**Вода, 938,6**	**Вода, 1873,4**
Показатель потерь n по (2)	2,32	2,33	2,05	1,45	1,55	3,22	3,23
$\square_0$ (R_0 = 1 км), дБм	−55,94	−59,29	−70,11	−70,35	−73,49	−55,97	−56,87
R^2 по (4)	0,816	0,597	0,461	0,363	0,375	0,872	0,765
RMSE по (5), дБ	4,77	8,40	8,42	9,36	9,44	3,82	5,17
a_2 по (3), дБ/м²	—	—	—	—	—	8,3167·10⁻⁷	1,4690·10⁻⁶
a_1 по (3), дБ/м	—	—	—	—	—	−1,1432·10⁻²	−1,4567·10⁻²
a_0 по (3), дБ(мкВ/м)	—	—	—	—	—	95,859	102,876
R^2 / RMSE квадратичной аппроксимации	—	—	—	—	—	0,909 / 3,23 дБ	0,736 / 5,49 дБ

3.3. Анализ остаточных отклонений

Характеристики остаточных отклонений, полученные по (6), приведены в таблице 4, а сами отклонения показаны на рисунке 4.

(cc) BY

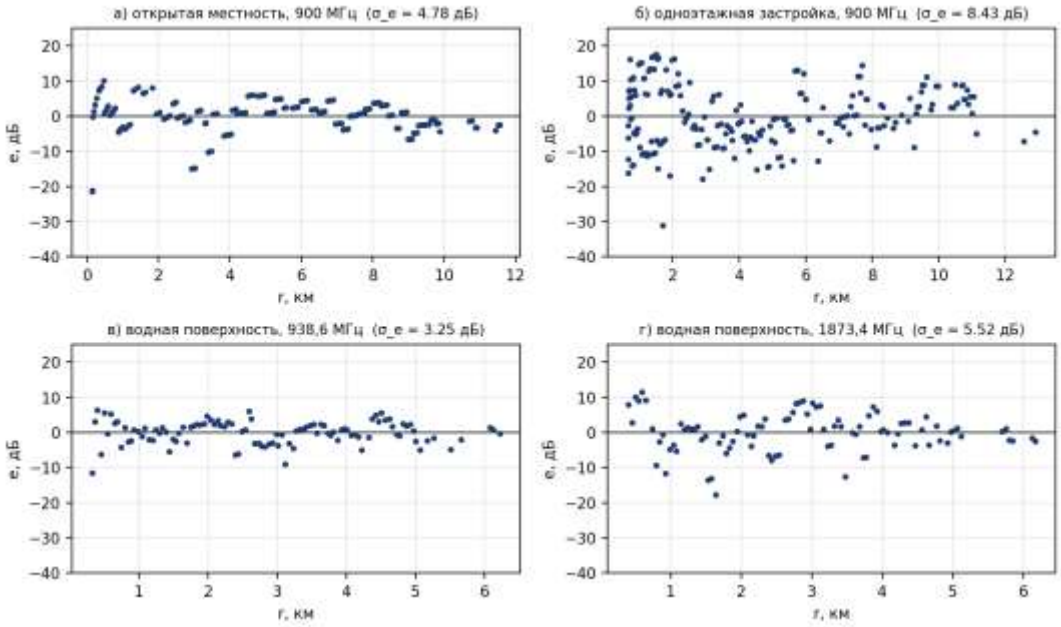


Рис. 4 – Остаточные отклонения экспериментальных значений от аппроксимирующих зависимостей: а) открытая местность, 900 МГц; б) одноэтажная застройка, 900 МГц; в) водная поверхность, 938,6 МГц; г) водная поверхность, 1873,4 МГц

Для пресноводной поверхности среднеквадратическое отклонение остатков относительно квадратичного тренда составляет 3,25 дБ (938,6 МГц) и 5,52 дБ (1873,4 МГц) при доле точек с $|e_i| > 5$ дБ, равной 11,7 и 30,9 %. При практически одинаковом общем разбросе выборок вариации относительно тренда в верхнем диапазоне интенсивнее в 1,7 раза, что соответствует интерференционному характеру изменения уровня над отражающей поверхностью. Вариации ослабевают с удалением от базовой станции: σ_e снижается с 3,58 до 2,85 дБ и с 6,48 до 4,17 дБ при переходе от участка до 3 км к участку 3–6 км.

Для открытой местности σ_e составляет 4,78 дБ (900 МГц) и 8,43 дБ (1800 МГц); наибольшие отклонения наблюдаются вблизи базовой станции, а за пределами 6 км значения снижаются до 2,93 и 5,23 дБ. Наличие протяженных знакопостоянных участков остатков указывает на отклонение реального закона убывания от единственной логарифмической зависимости. Для одноэтажной застройки σ_e составляет 8,43–9,50 дБ при доле точек с $|e_i| > 10$ дБ от 25,1 до 27,8 %, что соответствует известному логарифмически нормальному описанию затенения с σ порядка 8 дБ [2, 12].

Таблица 4.

Характеристики остаточных отклонений

Показатель	**Открытая, 900**	**Открытая, 1800**	**Застройка I, 900**	**Застройка II, 900**	**Застройка II, 1800**	**Вода, 938,6**	**Вода, 1873,4**
База расчета остатков	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(3)	(3)
σ_e, дБ	4,78	8,43	8,43	9,41	9,50	3,25	5,52
$e_{min\,/\,max}$, дБ	−21,4 / +10,0	−36,0 / +15,3	−31,1 / +17,5	−23,9 / +21,7	−22,5 / +20,1	−11,5 / +6,5	−17,6 / +11,4
Доля $\|\sigma_e\| > 5$ дБ, %	20,6	52,3	57,2	58,3	60,3	11,7	30,9

(cc) BY *dtai.uz*

Показатель	Открытая, 900	Открытая, 1800	Застройка I, 900	Застройка II, 900	Застройка II, 1800	Вода, 938,6	Вода, 1873,4
Доля $\|\sigma_e\| > 10$ дБ, %	4,6	16,2	25,1	27,8	26,9	1,0	7,4
σ_e при $r \leq 1$ км, дБ	8,11	12,70	8,65	14,52	14,43	—	—
σ_e при 1–3 км, дБ	5,47	2,52	11,22	10,24	6,78	3,58 (≤ 3 км)	6,48 (≤ 3 км)
σ_e при 3–6 км, дБ	4,90	4,82	7,05	6,15	8,61	2,85	4,17
σ_e при $r > 6$ км, дБ	2,93	5,23	5,48	5,37	5,97	—	—

3.4. Сформированный набор параметров алгоритма

Итоговый набор параметров, полученный в результате работы алгоритма, приведен в таблице 5. Для каждого типа подстилающей поверхности определены показатель потерь n, экспериментальные потери на опорном расстоянии K и среднеквадратическое отклонение остаточных вариаций σ_e; для пресноводной поверхности дополнительно определены коэффициенты квадратичного тренда напряженности поля. Для растительного покрова показатель n и коэффициент K не определяются ввиду отсутствия единой радиальной геометрии измерений, и характеристикой этого типа поверхности служат распределение уровней и дополнительные потери ΔL_v.

Сопоставление нормированных экспериментальных зависимостей для трех типов поверхности в диапазоне 900 МГц приведено на рисунке 5. Три группы условий различаются положением относительно закона свободного пространства (n = 2): открытая местность (2,32) незначительно превышает его, застройка (2,05 и 1,45) формально лежит ниже вследствие доминирования затенения при слабой связи уровня с расстоянием, а пресноводная поверхность (3,22) характеризуется существенно более крутым убыванием.

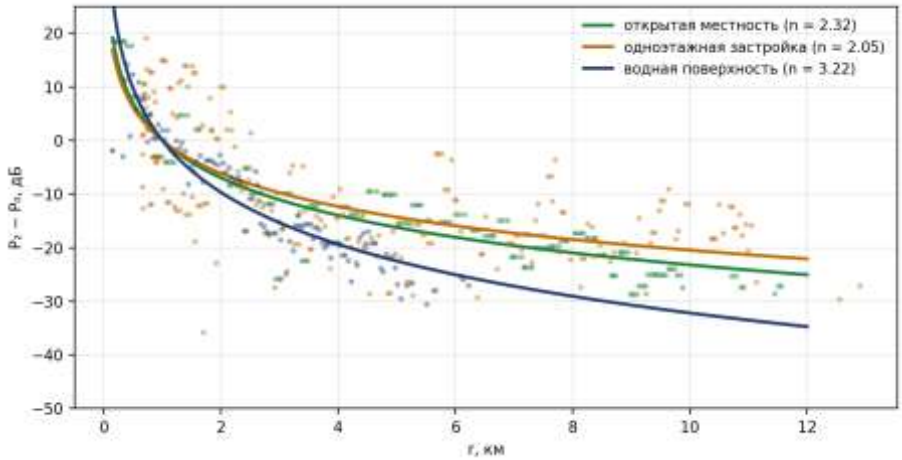


Рис. 5 – Сравнение нормированных экспериментальных зависимостей уровня сигнала от расстояния для различных типов подстилающей поверхности, диапазон 900 МГц

Дополнительные потери в растительном покрове, включенные в выходной набор, составляют ΔL_v = 6,85 дБ (900 МГц) и 12,37 дБ (1800 МГц); они получены в ходе предшествующих исследований и в настоящей работе используются как характеристика

(cc) BY

соответствующего типа поверхности. Численное значение ΔL_w для пресноводной поверхности в исходных экспериментальных материалах отсутствует; в выходном наборе алгоритма эта величина указана как элемент, определяемый при наличии соответствующих данных.

Таблица 5.

Сформированный набор параметров алгоритма по типам подстилающей поверхности

Тип подстилающей поверхности	Частота, МГц	n	K, дБ	σ_e, дБ	Дополнительные параметры
Открытая местность	900 / 1800	2,32 / 2,33	117,9 / 121,3	4,78 / 8,43	—
Сельская одноэтажная застройка	900 (трасса I)	2,05	132,1	8,43	—
Сельская одноэтажная застройка	900 / 1800 (трасса II)	1,45 / 1,55	132,3 / 135,5	9,41 / 9,50	—
Растительный покров	900 / 1800	не определяется	не определяется	9,69 / 9,85 (разброс уровней)	ΔL_v= 6,85 / 12,37 дБ (получено ранее)
Пресноводная поверхность	938,6 / 1873,4	3,22 / 3,23	118,0 / 118,9	3,25 / 5,52	a_2, a_1, a_0 по (3); ΔL_w— при наличии данных

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что обработка натурных данных по единой схеме с предварительной классификацией трасс по типу подстилающей поверхности приводит к количественно различающимся наборам параметров. Различие показателей потерь — от 1,45–2,05 для одноэтажной застройки и 2,32–2,33 для открытой местности до 3,22–3,23 для пресноводной поверхности — превышает разброс значений внутри каждой группы, что подтверждает необходимость раздельного определения параметров и, следовательно, целесообразность классификации как самостоятельного этапа алгоритма.

Необходимость учета типа подстилающей поверхности при обработке экспериментальных данных следует и из характера остатков. При близком общем разбросе выборок над водой в двух диапазонах интенсивность вариаций относительно тренда различается в 1,7 раза, тогда как для застройки преобладает затенение с □□ около 8–9,5 дБ. Если объединить такие ряды в одну выборку, полученные оценки утратят физическую интерпретацию: усредненный показатель потерь не будет соответствовать ни одному из реальных типов условий.

Наиболее информативными параметрами выходного набора являются показатель потерь n и среднеквадратическое отклонение остатков σ_e. Первый устойчив к изменению энергетической конфигурации радиолинии и характеризует форму зависимости уровня от расстояния; второй характеризует интенсивность локальных вариаций и различается как между типами поверхности, так и между диапазонами. Коэффициент K, напротив, зависит от принятой конфигурации (±1,5 дБ при вариации усиления и потерь тракта), что необходимо учитывать при его использовании.

Совпадение показателей потерь в двух диапазонах над водой (3,22 и 3,23) при существенном различии интенсивности вариаций (3,25 и 5,52 дБ) согласуется с представлениями о формировании поля над отражающей поверхностью, где средний закон

(cc) BY

убывания определяется геометрией трассы, а частотная зависимость проявляется в интерференционной структуре поля [5, 6, 7]. Значения показателя потерь для открытой местности, лежащие между законом свободного пространства и типичными значениями эмпирических моделей, также соответствуют опубликованным результатам измерений в сельских условиях [13, 15].

Ограничения алгоритма определяются составом исходных данных. Во-первых, параметры получены для двух частотных диапазонов и для конкретных трасс, поэтому их перенос на другие территории требует проверки. Во-вторых, для растительного покрова отсутствие радиальной геометрии измерений не позволяет определить n и K, вследствие чего состав выходного набора для этого типа поверхности отличается от остальных. В-третьих, в исходных материалах не конкретизированы критерии фильтрации и исключения выбросов на этапе предварительной обработки, а результаты проверки статистической значимости представлены доверительными интервалами средних, тогда как случаи фактического исключения незначимых параметров не документированы; соответствующие этапы алгоритма изложены в объеме, подтвержденном исходными данными.

Следует разделять результаты, полученные непосредственно в ходе настоящей обработки, и характеристики, относящиеся к предшествующим исследованиям. К первым относятся статистические характеристики выборок, показатели потерь n, коэффициенты K, параметры трендов и характеристики остаточных вариаций; ко вторым — дополнительные потери в растительном покрове ΔL_v и калибровочные параметры эмпирических моделей, полученные ранее и в настоящей работе как самостоятельный результат не заявляемые.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан алгоритм параметрического учета влияния подстилающей поверхности на потери распространения радиоволн по экспериментальным данным, включающий предварительную обработку исходных натурных данных, классификацию трасс по типу подстилающей поверхности, статистическую обработку выделенных групп с регрессионной аппроксимацией и расчетом остаточных отклонений, определение количественных параметров распространения, проверку их статистической значимости с возможным уточнением и формирование выходного набора параметров.

По данным измерений в диапазонах 900 и 1800 МГц на семи трассах и в массиве измерений в растительном покрове получены количественные параметры, характеризующие четыре типа условий распространения: показатель потерь 2,32 и 2,33 для открытой местности, 2,05; 1,45 и 1,55 для сельской одноэтажной застройки, 3,22 и 3,23 для пресноводной поверхности; экспериментальные потери на опорном расстоянии 117,9–135,5 дБ; среднеквадратическое отклонение остаточных вариаций 3,25–9,50 дБ с уменьшением при удалении от базовой станции; коэффициенты квадратичного тренда напряженности поля для водной трассы.

Установлено, что раздельная обработка трасс по типам подстилающей поверхности приводит к количественно различающимся наборам параметров, причем различия между типами превышают разброс внутри каждой группы, а наиболее информативными характеристиками выходного набора являются показатель потерь и среднеквадратическое отклонение остаточных вариаций.

Сформированный набор параметров представляет собой параметрическое описание условий распространения, полученное непосредственно из натурных измерений, и может использоваться на последующих этапах моделирования потерь распространения при неоднородном составе подстилающей поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sarkar T.K., Ji Z., Kim K., Medouri A., Salazar-Palma M. A survey of various propagation models for mobile communication // IEEE Antennas and

(cc) BY

Propagation Magazine. 2003. Vol. 45, No. 3. P. 51–82. DOI: 10.1109/MAP.2003.1232163.
2. Phillips C., Sicker D., Grunwald D. A survey of wireless path loss prediction and coverage mapping methods // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2013. Vol. 15, No. 1. P. 255–270. DOI: 10.1109/SURV.2012.022412.00172.
3. Recommendation ITU-R P.833-10. Attenuation in vegetation. Geneva: ITU, 2021.
4. Ma Y., Li W., Han D., He Y., Li Q., Bai X., Xu D. Wireless wave attenuation in forests: an overview of models // Forests. 2024. Vol. 15, No. 9. Art. 1587. DOI: 10.3390/f15091587.
5. Habib A., Moh S. Wireless channel models for over-the-sea communication: a comparative study // Applied Sciences. 2019. Vol. 9, No. 3. Art. 443. DOI: 10.3390/app9030443.
6. Li C., Yu J., Xue J., Chen W., Wang S., Yang K. Maritime broadband communication: wireless channel measurement and characteristic analysis for offshore waters // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9, No. 7. Art. 783. DOI: 10.3390/jmse9070783.
7. Yu J., Chen W., Yang K., Li C., Li F., Shui Y. Path loss channel model for inland river radio propagation at 1.4 GHz // International Journal of Antennas and Propagation. 2017. Vol. 2017. Art. 5853724. DOI: 10.1155/2017/5853724.
8. Zhang J., Gentile C., Garey W. On the cross-application of calibrated pathloss models using area features // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2019. Vol. 61, No. 6. P. 40–50. DOI: 10.1109/MAP.2019.2943272.
9. Perihanoglu G.M., Karaman H. Performance evaluation of GeoAI-based approach for path loss prediction in cellular communication networks // Wireless Personal Communications. 2024. Vol. 138. P. 1211–1246. DOI: 10.1007/s11277-024-11554-w.
10. Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 1980. Vol. 29, No. 3. P. 317–325. DOI: 10.1109/T-VT.1980.23859.
11. COST Action 231. Digital mobile radio towards future generation systems: final report. Brussels: European Commission, 1999. 474 p.
12. Popoola S.I., Atayero A.A., Faruk N., Calafate C.T., Olawoyin L.A., Matthews V.O. Standard propagation model tuning for path loss predictions in built-up environments // Computational Science and Its Applications – ICCSA 2017. LNCS, vol. 10409. Cham: Springer, 2017. P. 363–375. DOI: 10.1007/978-3-319-62407-5_26.
13. Moraitis N., Vouyioukas D., Gkioni A., Louvros S. Measurements and path loss models for a TD-LTE network at 3.7 GHz in rural areas // Wireless Networks. 2020. Vol. 26. P. 2891–2904. DOI: 10.1007/s11276-019-02243-9.
14. Recommendation ITU-R P.1546-6. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4 000 MHz. Geneva: ITU, 2019.
15. Popoola S.I., Atayero A.A., Faruk N. Received signal strength and local terrain profile data for radio network planning and optimization at GSM frequency bands // Data in Brief. 2018. Vol. 16. P. 972–981. DOI: 10.1016/j.dib.2017.12.036.
16. Recommendation ITU-R P.525-4. Calculation of free-space attenuation. Geneva: ITU, 2019.

(cc) BY