

Анализ зависимости уровня затухания сигнала от расстояния с использованием логарифмической модели

С.В. Мартынов, А.В. Осовский, Д.В. Кутузов

Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

Аннотация - В работе представлены результаты комплексного исследования зависимости уровня затухания радиосигнала от расстояния между передатчиком и приёмником в диапазоне УКВ с использованием логарифмической модели. Эксперименты проводились с применением портативных УКВ-радиостанций Quansheng UV-K5 на открытой ровной местности при контролируемых условиях. Для обеспечения точности измерений выходная мощность и коэффициент стоячей волны (КСВ) антенно-фидерного тракта контролировались с помощью измерителя Nissei RS-40. Предложена математическая модель, описывающая закономерность изменения уровня сигнала в зависимости от расстояния. В ней для определения параметров регрессионного уравнения использовался метод наименьших квадратов. Проведённый статистический анализ, включая расчёт коэффициента детерминации, дисперсионный анализ (ANOVA) и оценку значимости коэффициентов регрессии, подтвердил высокую степень адекватности разработанной модели. Полученные результаты показали, что разработанная логарифмическая модель объясняет 89,3 % вариации уровня затухания сигнала, что свидетельствует о её практической применимости. Значимость регрессионной модели подтверждена высоким значением F-статистики ($F = 116,22$), что позволяет использовать данную модель для инженерных расчётов при планировании зон покрытия беспроводных систем связи. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации размещения оборудования, проектирования эффективных систем радиосвязи, а также в образовательных целях при изучении вопросов распространения радиоволн.

Ключевые слова - УКВ-радиосвязь, затухание сигнала, логарифмическая модель, планирование зоны покрытия, ANOVA

1. ВВЕДЕНИЕ

В современных системах беспроводной связи точное прогнозирование уровня затухания сигнала является ключевым аспектом для оптимизации размещения базовых станций, проектирования зон

покрытия и минимизации "мёртвых зон" [1]. Эмпирическое моделирование затухания сигнала в пространстве позволяет создать предсказательные инструменты, которые могут быть адаптированы к конкретным условиям среды.

С развитием технологий мобильной связи, интернета вещей и беспроводных сетей возрастает потребность в точных моделях распространения радиоволн, учитывающих как теоретические основы, так и практические особенности реальных условий эксплуатации.

В условиях ограниченного бюджета и необходимости максимизации эффективности использования радиочастотного спектра, инженеры сталкиваются с необходимостью точного определения параметров зоны покрытия передающего оборудования. Это особенно актуально для систем профессиональной радиосвязи, используемых в системах безопасности, экстренного реагирования и промышленной связи, где недостаточное покрытие может привести к критическим последствиям [2].

Существующие теоретические модели, такие как модель Фрииса для свободного пространства [3], модель Окумура-Хата и COST 231 [4], предоставляют общие подходы к расчёту затухания сигнала. Однако их практическая применимость часто ограничена необходимостью учёта множества факторов, включая рельеф местности, наличие препятствий, метеорологические условия, характеристики антенно-фидерных трактов и другие параметры. Поэтому эмпирическое моделирование с использованием реальных измерений становится важным инструментом для адаптации теоретических моделей к конкретным условиям применения.

Цель данного исследования - разработать, верифицировать и статистически обосновать логарифмическую модель зависимости уровня затухания сигнала от расстояния между передатчиком и приёмником для конкретного оборудования в условиях проведённого эксперимента. Дополнительными задачами являются: анализ точности разработанной модели, определение её практической применимости, а также

выработка рекомендаций по использованию полученных результатов в инженерной практике.

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания точных и надёжных моделей для прогнозирования зон покрытия радиооборудования, что имеет важное значение как для коммерческих, так и для специализированных систем связи. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании сетей радиосвязи, оптимизации параметров передающего оборудования, а также в образовательном процессе при подготовке специалистов в области телекоммуникаций.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

A. Цели работы

1. Провести серию натурных экспериментов по измерению уровня сигнала на различных расстояниях в контролируемых условиях.

2. Обосновать выбор логарифмической модели распространения радиоволн как наиболее подходящей для описания экспериментальных данных.

3. Методом наименьших квадратов рассчитать коэффициенты регрессии для построения математической модели зависимости уровня затухания сигнала от расстояния.

4. Провести всесторонний статистический анализ полученной модели, включая оценку коэффициента детерминации, дисперсионный анализ и проверку значимости коэффициентов.

5. Визуализировать результаты и интерпретировать их с практической точки зрения для дальнейшего применения в инженерной практике.

6. Оценить точность модели и определить границы её применимости.

B. Описание экспериментальной установки и методики измерений

Экспериментальная установка была спроектирована с учётом необходимости минимизации влияния внешних факторов на результаты измерений. В качестве передающего и приёмного оборудования использовались идентичные портативные УКВ-радиостанции “Quansheng UV-K5”, обладающие стабильными характеристиками и высокой точностью измерения уровня сигнала. Одна станция работала в режиме непрерывной передачи (передатчик), вторая – в режиме приёма с фиксацией уровня сигнала (приёмник).

Для обеспечения точности и воспроизводимости эксперимента перед началом и после каждого цикла измерений проводилась верификация выходной мощности передатчика и коэффициента стоячей волны (КСВ) с помощью профессионального прибора Nissei RS-40, предназначенного для измерения мощности и КСВ в диапазоне УКВ.

Измеренная выходная мощность на выходе передатчика составляла стабильно 2 Вт. КСВ антенно-фидерного тракта не превышал 1,1 на частоте измерений, что свидетельствует о хорошем согласовании и минимальных потерях в тракте. Технические характеристики оборудования приведены в Табл. I

ТАБЛИЦА I
ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ

Параметр	Передающая сторона	Приёмная сторона
Выходная мощность передатчика	2 Вт (33 dBm)	—
Рабочая частота	435,120 МГц (UHF диапазон)	435,120 МГц (UHF диапазон)
Тип антенны	Автомобильная штыверная, $\frac{1}{4} \lambda$	Портативная штыверная, $\frac{1}{4} \lambda$
Коэффициент усиления антенны	2,5 dBi	2,5 dBi
Фидер	Коаксиальный кабель RG-58, длина 3 м	—

Это позволило исключить влияние нестабильности мощности и рассогласования антенны на результаты эксперимента.

Эксперимент проводился на открытой ровной местности в г. Астрахань, ул. Энергетическая (схема расположения экспериментальной трассы представлена на Рис.1).



Рис. 1. Схема расположения экспериментальной трассы

C. Условия проведения измерений

Местность характеризуется минимальным перепадом высот (не более 1 м на всей трассе) и отсутствием крупных препятствий, зданий или объектов в зоне прямой видимости между антеннами. Такой выбор позволил минимизировать влияние рельефа, отражений и дифракции, обеспечив условия, максимально приближенные к идеальным для открытой местности.

Погодные условия на момент проведения измерений: температура +25...+27°C, влажность 50–60 %, без осадков, слабый ветер (до 3 м/с).

D. Методика измерений

Передатчик и приёмник устанавливались на одинаковой высоте (1,5–2 м от земли) для обеспечения прямой видимости и минимизации

многолучевого распространения. Измерения проводились на расстояниях от 50 до 800 м с шагом 50 м. На каждом расстоянии выполнялось не менее 5 замеров с интервалом 30 секунд для усреднения и снижения влияния кратковременных помех. Фиксировалось установившееся значение уровня сигнала (в дБм), стабилизировавшееся в течение 10–15 секунд после установления связи. Все измерения проводились в условиях прямой видимости между антеннами.

III. ТЕОРИЯ

А. Обоснование выбора логарифмической модели

Затухание радиосигнала в пространстве – это фундаментальный процесс, определяющий эффективность любой беспроводной системы связи. В идеализированной модели свободного пространства, предложенной Г. Фриисом [3], мощность сигнала на приёмнике убывает пропорционально квадрату расстояния:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2, \quad (1)$$

где P_r - мощность сигнала на приёмнике; P_t - мощность передатчика; G_t, G_r - коэффициенты усиления антенн; r - расстояние между антеннами, λ - длина волны.

Переходя к логарифмическому масштабу (децибелы), получаем линейную зависимость потерь от логарифма расстояния:

$$L_{path} = 20 \lg(r) + 20 \lg(f) + 20 \lg\left(\frac{4\pi}{c}\right), \quad (2)$$

где f - частота; c - скорость света.

Таким образом, в теоретической модели затухание растёт пропорционально $20 \lg(r)$, что соответствует потере 20 дБ на декаду расстояния. Однако в реальных условиях, особенно при распространении сигнала вблизи поверхности Земли, влияние отражений, дифракции, поглощения и интерференции приводит к более крутому спаду сигнала – часто 30–50 дБ/дек [4].

В нашем случае, поскольку эксперимент проводился на открытой местности, но с антеннами на малой высоте (~1.5–2 м), сигнал распространялся в условиях, близких к так называемой “двухлучевой модели” (ground-reflected wave) [5], где основной вклад в суммарное поле вносят прямая и отражённая от земли волны. В таких условиях затухание может достигать 35–45 дБ/дек в зависимости от высоты антенн, частоты и характера подстилающей поверхности. Это позволяет предположить, что в нашем эксперименте – с антеннами на высоте ~1,5–2

м и на открытой местности – значение коэффициента a в формуле (4) будет находиться в указанном диапазоне.

Кроме того, логарифмическая модель выбрана не только по физическим соображениям, но и по эмпирическим: она обеспечивает простоту интерпретации, линейность в лог-линейных координатах, и хорошо согласуется с данными натурных измерений. Её параметры легко определяются методом наименьших квадратов, а статистическая проверка гипотез позволяет оценить адекватность модели [6–8].

В данной работе уровень затухания рассчитывался по формуле:

$$L_{rasch} = P_t + G_t + G_r - L_{coax} - L_{conn} - RSSI, \quad (3)$$

где $P_t = 33 \text{ dBm}$ - выходная мощность передатчика;

$G_t = G_r = 2,5 \text{ dBi}$ - коэффициенты усиления приемной и передающей антенн; $L_{coax} = 7,5 \text{ dB}$ - потери в коаксиальном кабеле марки RG58 длиной 3 м ($2,5 \text{ dB/m}$); $L_{conn} = 1,0 \text{ dB}$ - суммарные потери на соединениях (по $0,5 \text{ dB}$ на каждый разъем); $RSSI$ - измеренный уровень сигнала на приемнике, dBm . Подставляя численные значения в формулу (3), получаем:

$$L_{rasch} = 33 + 2,5 + 2,5 - 7,5 - 1,0 - RSSI = 29,5 - RSSI$$

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

А. Исходные данные

Полученные данные измерения заносим в Табл. II

ТАБЛИЦА II
ИЗМЕРЕННЫЕ ДАННЫЕ

Расстояние (x), м	Уровень сигнала RSSI (y), дБм
50	-42
100	-46
150	-46
200	-52
250	-65
300	-66
350	-61
400	-71
450	-70
500	-73
550	-77
600	-81
650	-84
700	-76
750	-75
800	-80

В. Расчёт уровня затухания сигнала

Для каждого значения уровня сигнала рассчитываем затухание по формуле (3) и полученные данные сводим в Табл. III:

ТАБЛИЦА III
РАСЧЁТНЫЕ ДАННЫЕ

Расстояние (х), м	Уровень затухания сигнала L_{rasch} (у), дБ
50	71,5
100	75,5
150	75,5
200	81,5
250	94,5
300	95,5
350	90,5
400	100,5
450	99,5
500	102,5
550	106,5
600	110,5
650	113,5
700	105,5
750	104,5
800	109,5

С. Расчёт коэффициентов регрессии методом наименьших квадратов

Для построения логарифмической модели вида (4) необходимо выразить расстояние r через десятичный логарифм:

$$L = a \cdot \lg(r) + b. \quad (4)$$

Преобразование расстояния сведено в Табл. IV

ТАБЛИЦА IV
ПРЕОБРАЗОВАНИЕ РАССТОЯНИЯ

Номер измерения	Расстояние r , м	$z = \lg(r_i)$	L_{rasch} (у), дБ
1	50	1,6990	71,5
2	100	2,0000	75,5
3	150	2,1761	75,5
4	200	2,3010	81,5
5	250	2,3979	94,5
6	300	2,4771	95,5
7	350	2,5441	90,5
8	400	2,6021	100,5
9	450	2,6532	99,5
10	500	2,6990	102,5
11	550	2,7404	106,5
12	600	2,7782	110,5
13	650	2,8129	113,5
14	700	2,8451	105,5
15	750	2,8751	104,5
16	800	2,9031	109,5
Суммарные значения переменных		$\sum z = 40,504$	$\sum L = 1537,0$
		$\sum z^2 = 103,4$	$\sum z \cdot L = 3956,45$

Расчёт коэффициентов, выполним по формулам (5) и (6) соответственно:

$$a = \frac{n \cdot \sum(z \cdot L) - \sum z \cdot \sum L}{n \cdot \sum z^2 - (\sum z)^2}, \quad (5)$$

где n – номер измерения; $\sum(z \cdot L)$, $\sum z$, $\sum L$, $\sum z^2$, $(\sum z)^2$ – суммарные значения переменных, см.

Табл. IV

$$a = \frac{16 \cdot 3956,45 - 40,504 \cdot 1537,0}{16 \cdot 103,4 - (40,504)^2} = \frac{1048,522}{28,226} = 37,187$$

$$b = \frac{\sum L - \sum z \cdot \sum L}{n}, \quad (6)$$

$$b = \frac{1537 - 37,187 \cdot 40,504}{16} = 1,924$$

Итоговая модель, представлена формулой (7):

$$L_{rasch} = 37,187 \cdot \lg(r) + 1,924 \quad (7)$$

Качество подгонки модели оценивалось с помощью коэффициента детерминации, рассчитанного по формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{total}}, \quad (8)$$

где R^2 – коэффициент детерминации; SS_{res} – сумма квадратов остатков (разница между наблюдаемыми значениями и значениями, предсказанными моделью), определяется по формуле (9); SS_{total} – общая сумма квадратов (разница между наблюдаемыми значениями и их средним), определяется по формуле (10).

$$SS_{res} = \sum_{i=1}^n (L_i - \hat{L}_i)^2, \quad (9)$$

где n – количество измерений; L_i – i -е наблюдаемое значение уровня; $\hat{L}_i$ – i -е значение, предсказанное моделью.

$$SS_{total} = \sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2, \quad (10)$$

где $\bar{L}$ – выборочное среднее значение зависимой переменной.

Вычислим по формуле (9) сумму квадратов остатков: $SS_{res} = 293,41$, а по формуле (10) общую сумму квадратов: $SS_{total} = 2729,94$

Вычислим коэффициент детерминации по формуле (8):

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{total}} = 1 - \frac{293,41}{2729,94} = 0,893.$$

Полученное значение $R^2 \approx 0,893$ означает, что 89,3 % изменчивости уровня затухания сигнала объясняется расстоянием в рамках предложенной логарифмической модели. Это свидетельствует о высоком качестве аппроксимации данных моделью и подтверждает её практическую пригодность для прогнозирования в заданном диапазоне расстояний.

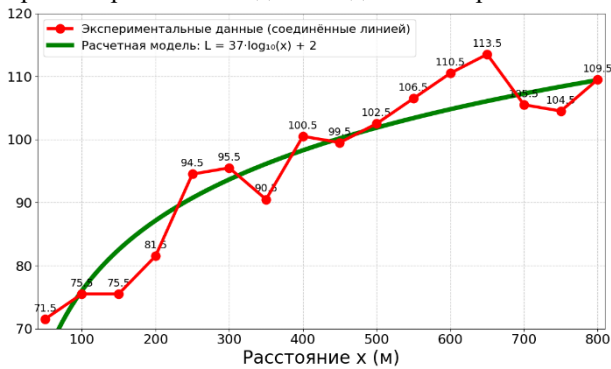


Рис. 2. График зависимости затухания радиосигнала от расстояния

D. Оценка статистической значимости модели методом дисперсионного анализа (ANOVA)

Для проверки общей статистической значимости построенной регрессионной модели был применён дисперсионный анализ (ANOVA) [8]. Этот метод позволяет оценить, объясняет ли модель существенную часть изменчивости зависимой переменной, или же наблюдаемая связь между расстоянием и уровнем затухания может быть обусловлена случайными колебаниями данных.

Статистические гипотезы:

- Нулевая гипотеза (H_0): Нулевая гипотеза утверждает, что все регрессионные коэффициенты (кроме свободного члена) статистически незначимы и равны нулю.

- Альтернативная гипотеза (H_1): Модель является статистически значимой – хотя бы один из регрессионных коэффициентов (в нашем случае – коэффициент при $\lg(r)$) существенно отличается от нуля.

В основе ANOVA лежит разложение общей суммы квадратов отклонений (SS_{total}) на две составляющие.

Регрессивная сумма квадратов ($SS_{regression}$) – характеризует ту часть изменчивости, которая обусловлена влиянием независимой переменной (логарифма расстояния):

$$SS_{regression} = \sum (L_i - \bar{L})^2 \quad (11)$$

Остаточная сумма квадратов ($SS_{residual}$) – отражает случайную вариацию, не учтённую моделью:

$$SS_{residual} = \sum (L_i - \hat{L}_i)^2 \quad (12)$$

Для проверки гипотез рассчитывается F-статистика – отношение регрессивной дисперсии к остаточной с учётом степеней свободы:

$$F = \frac{MS_{regression}}{MS_{residual}} = \frac{\frac{SS_{regression}}{df_{reg}}}{\frac{SS_{residual}}{df_{res}}} \quad (13)$$

где F – значение F-критерия; $MS_{regression}$ – средний квадрат регрессии; $MS_{residual}$ – средний квадрат остатков; df_{reg} – число регрессоров (в модели – один: $\lg(r)$); df_{res} – степени свободы остатка.

Расчёты для построенной модели дали следующие значения:

1. Число регрессоров в модели (4) – один: $\lg(r)$

$$df_{reg} = k = 1$$

2. Степени свободы остатка

$$df_{res} = n - k - 1 = 16 - 1 - 1 = 14$$

3. Регрессивная сумма квадратов

$$SS_{regression} = 2436,53$$

4. Остаточная сумма квадратов $SS_{residual} = 293,41$

5. F-статистика –

$$F = \frac{\frac{SS_{regression}}{df_{reg}}}{\frac{SS_{residual}}{df_{res}}} = \frac{\frac{2436,53}{1}}{\frac{293,41}{14}} = \frac{2436,53}{20,9586} = 116,22$$

Критическое значение F-распределения при уровне значимости $\alpha=0,05$ и степенях свободы $df_{reg} = 1$,

$df_{res} = 14$ составляет $F_{крит} \approx 4,60$.

Поскольку полученное значение $F = 116,22$ значительно превышает критическое $F > F_{крит}$, нулевая гипотеза отвергается на любом разумном уровне значимости ($p < 0,00001$).

Модель статистически значима – включённый фактор $\lg(r)$ достоверно объясняет изменчивость уровня затухания. Значение F-статистики превышает критическое более чем в 25 раз ($116,22 / 4,60$), что дополнительно подчёркивает высокую надёжность вывода о значимости модели.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Модель вида $L = a \cdot \lg(r) + b$ была выбрана на основе физических соображений (логарифмический характер затухания в пространстве) и подтверждена эмпирически – данные хорошо сводятся к линейной зависимости в лог-линейных координатах.

Коэффициенты $a = 37,187$ и $b = 1,924$ получены строго математически – методом наименьших квадратов, с прозрачными промежуточными расчётами (раздел С).

Актуальность модели подтверждена двумя независимыми статистическими тестами:

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,893$ модели объясняет почти 90 % изменчивости данных.

Полученное значение F-критерия (116,22) существенно превышает критическое значение (4,60), что свидетельствует о статистически значимых различиях между группами на высоком уровне значимости - $F = 116,22$ при $F_{крит} \approx 4,60$, следовательно, модель статистически значима с вероятностью $p < 0,00001$ [8].

Модель прошла статистическую проверку и может использоваться для прогнозов.

Погрешность $\pm 4,6$ дБ – оценка точности модели, полученная из остаточной дисперсии. Она позволяет понять границы применимости: для инженерных расчётов – приемлемо, для научных измерений – может потребоваться уточнение.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлена и количественно описана логарифмическая зависимость уровня затухания от расстояния для УКВ-радиосвязи на открытой местности.

2. Методом наименьших квадратов получена модель: $L_{расч} = 37,187 \cdot \lg(r) + 1,924$.

3. Статистически подтверждена адекватность модели: коэффициент детерминации $R^2 = 0,893$ свидетельствует о высоком качестве аппроксимации данных моделью, и подтверждает её практическую пригодность для прогнозирования в заданном диапазоне расстояний; критерий $F = 116,22$ означает, что значимость подтверждена с $p < 0,00001$.

4. Коэффициент 37,2 дБ/дек соответствует теории приземной радиолинии – модель физически обоснована.

5. Модель позволяет прогнозировать зоны покрытия с погрешностью $\pm 4,6$ дБ (~1,5 раза по расстоянию); она может легко адаптироваться под другие условия: для этого достаточно пересчитать коэффициенты по той же методике.

Но существуют и ограничения данной модели. Модель валидна для открытой местности в диапазоне

50–800 м. Для городских условий или иных высот антенн требуется калибровка.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сети 5G/6G: архитектура, технологии, методы анализа и расчета: монография / Д. А. Молчанов, В. О. Бегишев, К. Е. Самуилов, Е. А. Кучерявый. – Москва : РУДН, 2022. – 516 с.: ил
- [2] Мовчан А. К., Рогожников Е. В., Дмитриев Э. М. и др. Расчет ослабления сигнала сетей сотовой связи 5G для частот диапазона FR1 // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2022. – Т. 25, № 1. – С. 17-23. – DOI 10.21293/1818-0442-2021-25-1-17-23. – EDN NGEEBF.
- [3] Фриис Г. Передача информации по радиоканалам: замирания и шумы. – М.: Связь, 1970.
- [4] Мамченко М.В., Зорин В.А., Романова М.А. Эмпирическая модель расчета затухания сигнала с учетом коэффициента застройки местности для беспилотных транспортных средств // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН, 2022.
- [5] Ю. В. Андреев, М. М. Петросян Двухлучевая модель распространения сверхширокополосного радиосигнала // Всероссийские открытые Армавирские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. 2022. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dvuhluchevaya-model-rasprostraneniya-sverhshirokopolosnogo-radiosignala> (дата обращения: 24.09.2025).
- [6] Старовиков, М. И. Введение в экспериментальную физику : учебное пособие для вузов / М. И. Старовиков. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2025. – 236 с. – ISBN 978-5-507-52606-2. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/455750> (дата обращения: 24.09.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
- [7] Орлов А.И. Прикладной статистический анализ: учебник / Орлов А.И. – Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2022. – 812 с. – ISBN 978-5-4497-1480-0. – Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/117038.html> (дата обращения: 14.09.2025).
- [8] Подживотов Н.Ю. Оценка результатов испытаний с помощью однофакторного дисперсионного анализа // Труды ВИАМ. 2022. № 8 (114). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-141-152.

Информация об авторах

Мартынов Сергей Владимирович – магистрант 1-го курса обучения специальности «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, ул. Татищева, 16. Email: sergeytm@mail.ru

Осовский Алексей Викторович – кандидат технических наук, доцент «Связь» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, ул. Татищева, 16. Email: a_osovskiy@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3174-9765

Кутузов Денис Валерьевич – кандидат технических наук, доцент «Связь» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, ул. Татищева, 16. Email: d_kutuzov@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7963-1259

Analysis of the dependence of the signal attenuation level on distance using a logarithmic model

S.V. Martynov, A.V. Osovsky, D.V. Kutuzov

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

Abstract - This paper presents the results of a comprehensive study of the relationship between radio signal attenuation and the distance between the transmitter and receiver in the VHF band using a logarithmic model. The experiments were conducted using portable Quansheng UV-K5 VHF radio transceivers on open, flat terrain under controlled conditions. To ensure measurement accuracy, the output power and the standing wave ratio (SWR) of the antenna-feeder system were monitored using an Nissei RS-40 meter. A mathematical model describing the pattern of signal level change with distance is proposed. The least squares method was used to determine the parameters of the regression equation. The conducted statistical analysis, including the calculation of the coefficient of determination, analysis of variance (ANOVA), and assessment of the significance of the regression coefficients, confirmed the high degree of adequacy of the developed model. The obtained results showed that the developed logarithmic model explains 89,3 % of the variation in the signal attenuation level, which indicates its practical applicability. The significance of the regression model is confirmed by a high F-statistic value ($F = 116,22$), allowing this model to be used for engineering calculations in planning coverage areas for wireless communication systems. The research results can be applied to optimize equipment placement, design efficient radio communication systems, and for educational purposes in the study of radio wave propagation.

Keywords - VHF radio communication, signal attenuation, logarithmic model, coverage area planning, ANOVA

References

- [1] D. A. Molchanov, V. O. Begishev, K. E. Samuylov, and E. A. Kuchevyy, "5G/6G Networks: Architecture, Technologies, Methods of Analysis and Calculation: Monograph". Moscow, Russia: RUDN University, 2022, 516 p.
- [2] A. K. Movchan, E. V. Rogozhnikov, E. M. Dmitriev et al., "Calculation of 5G cellular network signal attenuation for FR1 band frequencies," Rep. Tomsk State Univ. Control Syst. Radioelectron., vol. 25, no. 1, pp. 17–23, 2022. doi: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-17-23.
- [3] H. T. Friis, Information Transmission by Radio Waves: Fading and Noise. Moscow, USSR: Svyaz Publishing, 1970.
- [4] M. V. Mamchenko, V. A. Zorin, and M. A. Romanova, "An empirical model for calculating signal attenuation taking into account the building density factor for unmanned vehicles," Izvestiya Kabardino-Balkarian Sci. Center RAS, 2022.
- [5] Yu. V. Andreev and M. M. Petrosyan, "Two-ray model of ultra-wideband radio signal propagation," in All-Russian Open Armandov Readings: Modern Problems of Remote Sensing, Radar, Wave Propagation and Diffraction, 2022, no. 1. [Online]. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/dvuhluchevaya-model-rasprostraneniya-sverhshirokopolosnogo-radiosignala> (accessed Sep. 24, 2025).
- [6] M. I. Starovikov, Introduction to Experimental Physics: Textbook for Universities, 2nd ed. St. Petersburg, Russia: Lan Publishing House, 2025. [Online]. Available: <https://e.lanbook.com/book/455750> (accessed Sep. 24, 2025).
- [7] A. I. Orlov, Applied Statistical Analysis: Textbook. Moscow, Russia: IPR MEDIA Publishing House, 2022. [Online]. Available: <https://www.iprbookshop.ru/117038.html> (accessed Sep. 14, 2025).
- [8] N. Yu. Podzhivotov, "Evaluation of test results using one-way analysis of variance," Trudy VIAM, no. 8, Art. 12, 2022. doi: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-141-152.