

РАДИОЧАСТОТНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ

**Учебно-методическое пособие
по выполнению практической работы
«Исследование режима работы
радиорелейной линии прямой видимости»
для студентов очной формы обучения направления
11.04.02 «Инфокоммуникационные
технологии и системы связи»,
профиль «Инновационные
телекоммуникационные технологии 5G/6G»**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Высшая технологическая школа
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ»

РАДИОЧАСТОТНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ

Учебно-методическое пособие

по выполнению практической работы

«Исследование режима работы радиорелейной линии прямой видимости»
для студентов очной формы обучения направления

11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»,
профиль «Инновационные телекоммуникационные технологии 5G/6G»

Севастополь
СевГУ
2025

УДК 621.396.43(076.5)

ББК 32.889.22я73

Р154

Рецензент:

И. Л. Афонин – д-р техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

Ответственный за выпуск:

И. Л. Афонин – д-р техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

Составители: А. А. Савочкин, Р. Р. Гаспарян

Р154 Радиочастотное планирование : учебно-методическое пособие по выполнению практической работы «Исследование режима работы радиорелейной линии прямой видимости» для студентов очной формы обучения направления 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», профиль «Инновационные телекоммуникационные технологии 5G/6G» / Севастопольский государственный университет ; сост. А. А. Савочкин, Р. Р. Гаспарян. – Севастополь : СевГУ, 2025. – 15 с. – Текст : электронный.

Целью учебно-методического пособия является оказание помощи студентам в подготовке и выполнении практической работы по дисциплине «Радиочастотное планирование», в получении ими теоретических знаний и практических навыков исследования режима работы радиорелейной линии прямой видимости.

УДК 621.396.43(076.5)

ББК 32.889.22я73

Рассмотрено и рекомендовано к изданию на заседании кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации», протокол № 15 от 01 июля 2025 г.

© Савочкин А. А., Гаспарян Р.Р., сост., 2025
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Цель практической работы.....	4
2. Анализ режима работы пролета радиорелейной линии	4
2.1. Теоретическая часть.....	4
2.2. Порядок выполнения исследований	10
3. Контрольные вопросы	12
3.1. Контрольные вопросы для допуска к выполнению практической работы.....	12
3.2. Контрольные вопросы для защиты результатов выполнения практической работы.....	13
Библиографический список	15

ВВЕДЕНИЕ

При выполнении практической работы студенты производят исследование работы пролета радиорелейной линии прямой видимости. Методика выполнения исследований построена на строгой теории распространения радиоволн при наличии препятствий и возможности наличия отражений от подстилающей поверхности. При выполнении работы исследуются особенности работы пролета и анализируется влияние окружающей обстановки на работу радиорелейной линии.

1. ЦЕЛЬ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Целью практической работы является определение режима работы интервала радиорелейной линии (РРЛ) прямой видимости и выполнение исследований.

2. АНАЛИЗ РЕЖИМА РАБОТЫ ПРОЛЕТА РАДИОРЕЛЕЙНОЙ ЛИНИИ

2.1. Теоретическая часть

Задание посвящено расчету интервала радиорелейной линии связи прямой видимости. При выполнении задания необходимо рассчитать статистические характеристики множителя ослабления на интервале РРЛ для заданного климатического района. Геометрия интервала и рабочая длина волны λ определяются по таблице 2.1 исходных данных, где L — протяженность интервала (пролета); L_1 — расстояние от передатчика до препятствия; h_1 — высота расположения передающей антенны над уровнем моря; h_2 — то же для приемной антенны; H_1 — высота препятствия; R — коэффициент отражения от подстилающей поверхности. Среднее значение вертикального градиента диэлектрической проницаемости тропосферы g и его стандартное отклонение σ_g для климатическо-

го района, номер которого n совпадает с последней цифрой номера зачетной книжки, определяется из таблицы 2.2.

Таблица 2.1 — Характеристики пролета РРЛ

n	L , км	L_1 , км	H_1 , м	m	h_1 , м	h_2 , м	l , м	R
1	50	25	200	1	150	250	0,8	0,9
2	55	30	150	2	300	150	0,6	0,8
3	65	35	150	3	100	400	0,14	0,7
4	47	15	100	4	250	100	0,1	0,6
5	45	20	300	5	200	300	0,2	0,7
6	55	30	150	6	100	160	0,15	0,5
7	60	40	400	7	300	500	0,1	0,3
8	70	23	190	8	150	450	0,25	0,7
9	80	50	200	9	200	120	0,1	0,8
0	44	20	100	0	80	160	0,3	0,9

Следует отметить, что при длине пролета L менее 50 км стандартное отклонение σ_E отличается от приведенного в таблице 2.2 значения и должно определяться по формуле

$$\sigma_e(L) = \left(10 \cdot 10^{-8} + \frac{g}{3,1} \right) \left(\frac{1}{y} - 1 \right) + \frac{\sigma_e}{y},$$

где величина y определяется в соответствии с рис. 2.1. или рассчитывается по формуле

$$y \approx a_0 + a_1 L + a_2 L^2 + a_3 L^3 + a_4 L^4,$$

где $a_0 = 0,588$, $a_1 = -0,00179$, $a_2 = 0,000704$, $a_3 = -0,0000143$, $a_4 = 0,0000000831$.

Таблица 2.2 — Параметры статистического распределения вертикального градиента диэлектрической проницаемости тропосферы

n	Климатический район	Среднее значение $\bar{g}$, 1/м	Стандартное отклонение s , 1/м
1	Северо-запад европейской территории России (ЕТР) (Кольский полуостров, Карелия), Северо-запад ЕТР (Коми, Архангельская обл.), Прибалтика, Республика Беларусь	$-9 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-8}$
2	Центральные области ЕТР	$-10 \cdot 10^{-8}$	$8 \cdot 10^{-8}$
3	Юго-запад ЕТР (Курская обл., Воронежская обл.), прилегающая территория Украины	$-9 \cdot 10^{-8}$	$7,5 \cdot 10^{-8}$
4	Степные районы Крыма, Поволжья, Дона, Краснодарского и Ставропольского края	$-8 \cdot 10^{-8}$	$8,5 \cdot 10^{-8}$
5	Восточные районы средней полосы ЕТР (Башкирия, Пермский край)	$-9 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-8}$
6	Оренбургская область и прилегающие районы Юго-востока ЕТР	$-6 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-8}$
7	Район Прикаспийской низменности	$-13 \cdot 10^{-8}$	$10 \cdot 10^{-8}$
8	Степная полоса Южной Сибири и Казахстана	$-7 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^{-8}$
9	Средняя полоса Западно-Сибирской низменности	$-10 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^{-8}$
0	Черноморское побережье Кавказа	$-10 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^{-8}$

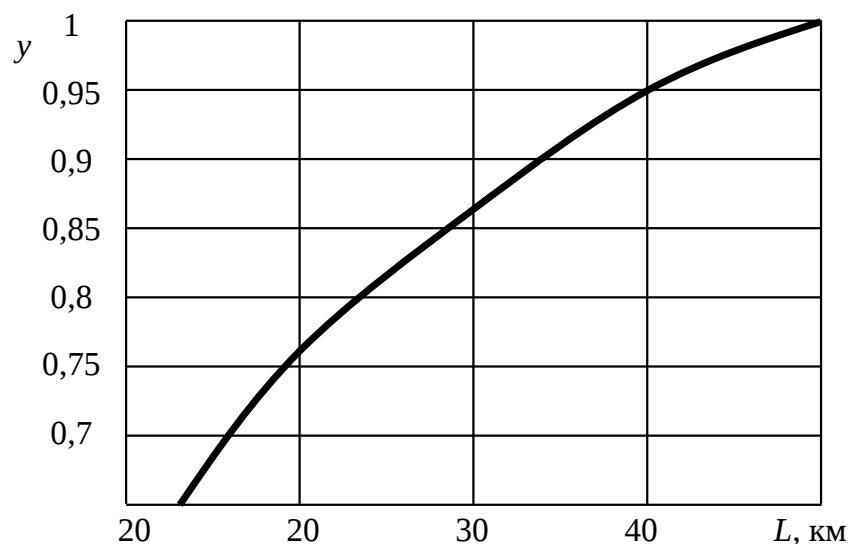


Рис. 2.1 — Зависимость параметра y от протяженности пролета

Профилем пролета называется вертикальный разрез местности между двумя соседними радиорелейными станциями с учетом леса, строений, особенностей рельефа и др. Пример такого профиля показан на рис. 2.2.

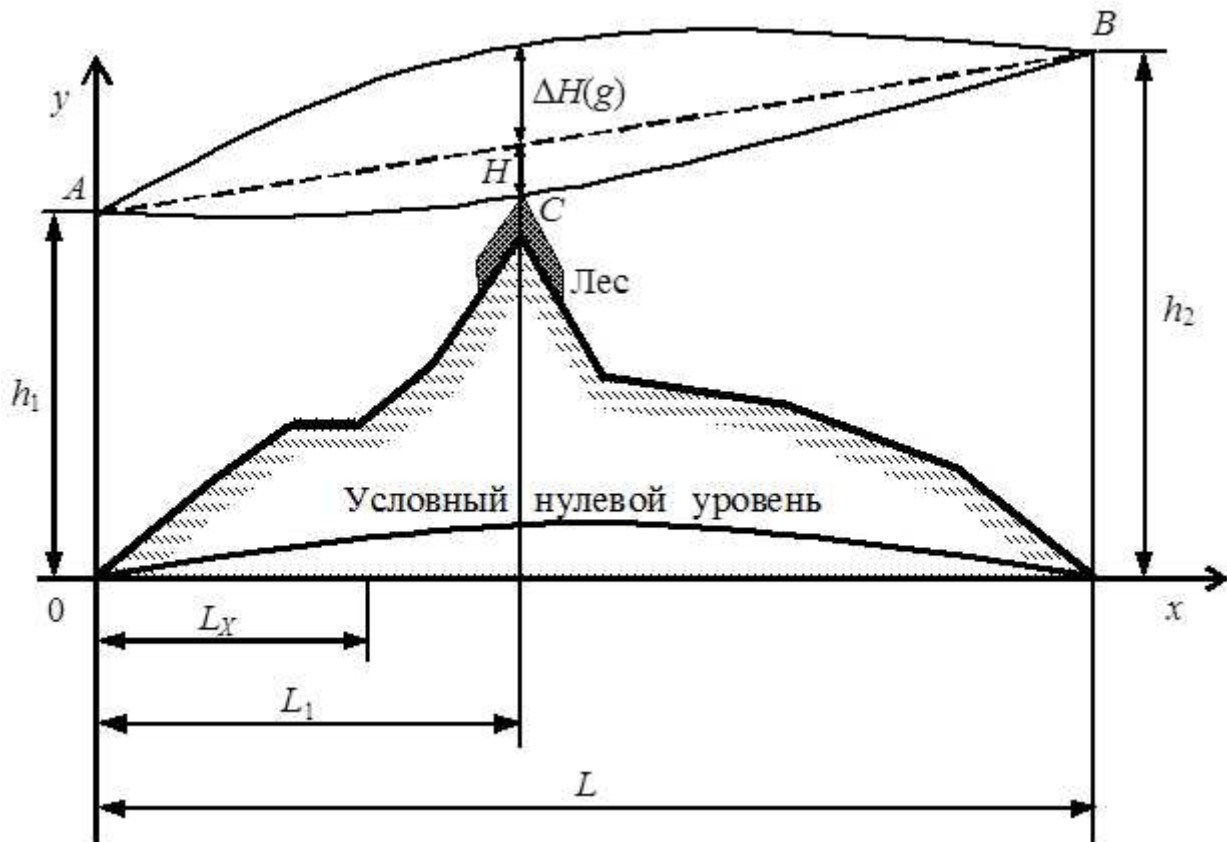


Рис. 2.2 — Пример профиля трассы РРЛ

Строится профиль трассы обычно в прямоугольной системе координат. Сначала вдоль оси абсцисс откладывается отрезок, соответствующий в принятом масштабе длине пролета L . Затем, чтобы учесть общую форму земной поверхности, строится линия, изображающая уровень моря. Она достаточно точно аппроксимируется параболой

$$y = \frac{x(L-x)}{2R_3},$$

где $R_3 = 6370$ км — радиус Земли.

От условного нулевого уровня откладывают по вертикали высотные отметки препятствий. Концы указанных отрезков соединяют ломаной линией.

Механизм распространения радиоволн на участке от передающей антенны (точка A) до приемной (точка B) существенно зависит от величины просвета H между линией «прямой видимости» AB , соединяющей центры антенн, и ближайшей к ней (по вертикали) точкой препятствия C .

При этом можно выделить три основные группы пролетов (для некоторого фиксированного состояния тропосферы):

- 1) открытые, когда $H_0 \leq H$;
- 2) полуоткрытые, когда $0 \leq H < H_0$;
- 3) закрытые, когда $H < 0$.

Через H_0 здесь обозначен просвет, при котором в точке приема векторная сумма напряженности поля прямого и отраженного сигналов равна напряженности поля в свободном пространстве ($V = 1$). Величина H_0 называется оптимальным просветом. В общем случае оптимальный просвет определяется по формуле

$$H_0 = \sqrt{\frac{L \lambda K_1 (1 - K_1)}{3}},$$

где $K_1 = L_1/L$ — относительная координата точки препятствия C .

Профиль пролета позволяет учесть влияние Земли на процесс распространения радиоволн. В частности, с помощью профиля можно получить представление об отражении радиоволн от поверхности Земли. Но в целом характер передачи сигналов на участке AB будет приближенным, если не учесть влияние тропосферы. При этом здесь основную роль играет неоднородность тропосферы в вертикальной плоскости. Рефракцию учитывают тем, что в величину просвета над определяющими точками профиля вносится поправка

$$\Delta H(g) = \frac{-L^2 g K_1 (1 - K_1)}{4},$$

где g — эффективный вертикальный градиент диэлектрической проницаемости воздуха.

При изменении метеорологических условий на пролете изменяется величина $H(g) = H + \Delta H(g)$, что может привести к резким колебаниям множителя ослабления.

На открытых трассах ($H_0 \leq H$) напряженность поля в точке приема определяется в основном интерференцией прямой и отраженных от земной поверхности волн. В случае одной отраженной волны множитель ослабления для реальных условий можно представить в виде

$$V = \sqrt{1 + R^2 - 2 R \cdot \cos\left(p^2(g) \cdot \frac{\pi}{3}\right)},$$

где $p(g) = H(g) / H_0 = (H + \Delta H(g)) / H_0$ — относительный (нормированный) просвет.

Зависимость V от $p(g)$ показана на рис. 2.4. Интерференционные максимумы множителя ослабления имеют место при

$$p(g) = \sqrt{3(2m - 1)},$$

где m — номер максимума, а интерференционные минимумы — при

$$p(g) = \sqrt{6n},$$

где n — номер минимума.

На полуоткрытых и закрытых пролетах, где $p(g) < 1$, уровень поля в точке приема обусловлен главным образом процессом дифракции радиоволн, т.е. сгибанием ими земной поверхности. Множитель ослабления в этом случае рассчитывается на основе приближенных методов, с применением аппроксимации реального препятствия частью сферической поверхности.

Прежде чем найти V , необходимо определить вспомогательный параметр μ , характеризующий радиус кривизны сферы, аппроксимирующей препятствие. Величина хорды препятствия d определяется в соответствии с рис. 2.3 для заданной геометрии пролёта РРЛ.

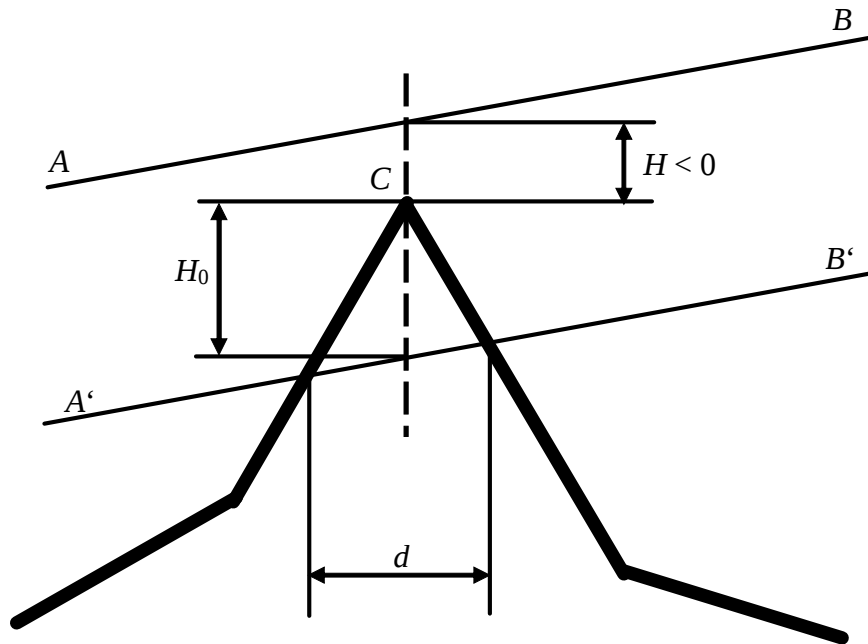


Рис. 2.3 — К определению параметра d

Для пролетов, имеющих среднюю протяженность и одно препятствие, во многих случаях можно руководствоваться приближенным значением V определяемым из графиков рис. 2.4, полагая, что

$$\mu = 2 \sqrt[3]{\frac{K_1^2 (1 - K_1)^2}{S^2}},$$

где $S = d / L$ (см. рис. 2.3).

2.2. Порядок выполнения исследований

Для выполнения задания необходимо предварительно изучить материалы, проведённые в теоретической части пособия (см. п. 2.1). Расчёты рекомендуется выполнять в следующем порядке:

- 1) Построить профиль трассы с учетом кривизны Земли для заданной по варианту геометрии.
- 2) Из профиля определить просвет H при нулевом значении градиента коэффициента преломления g тропосферы.
- 3) Рассчитать величину оптимального просвета H_0 .

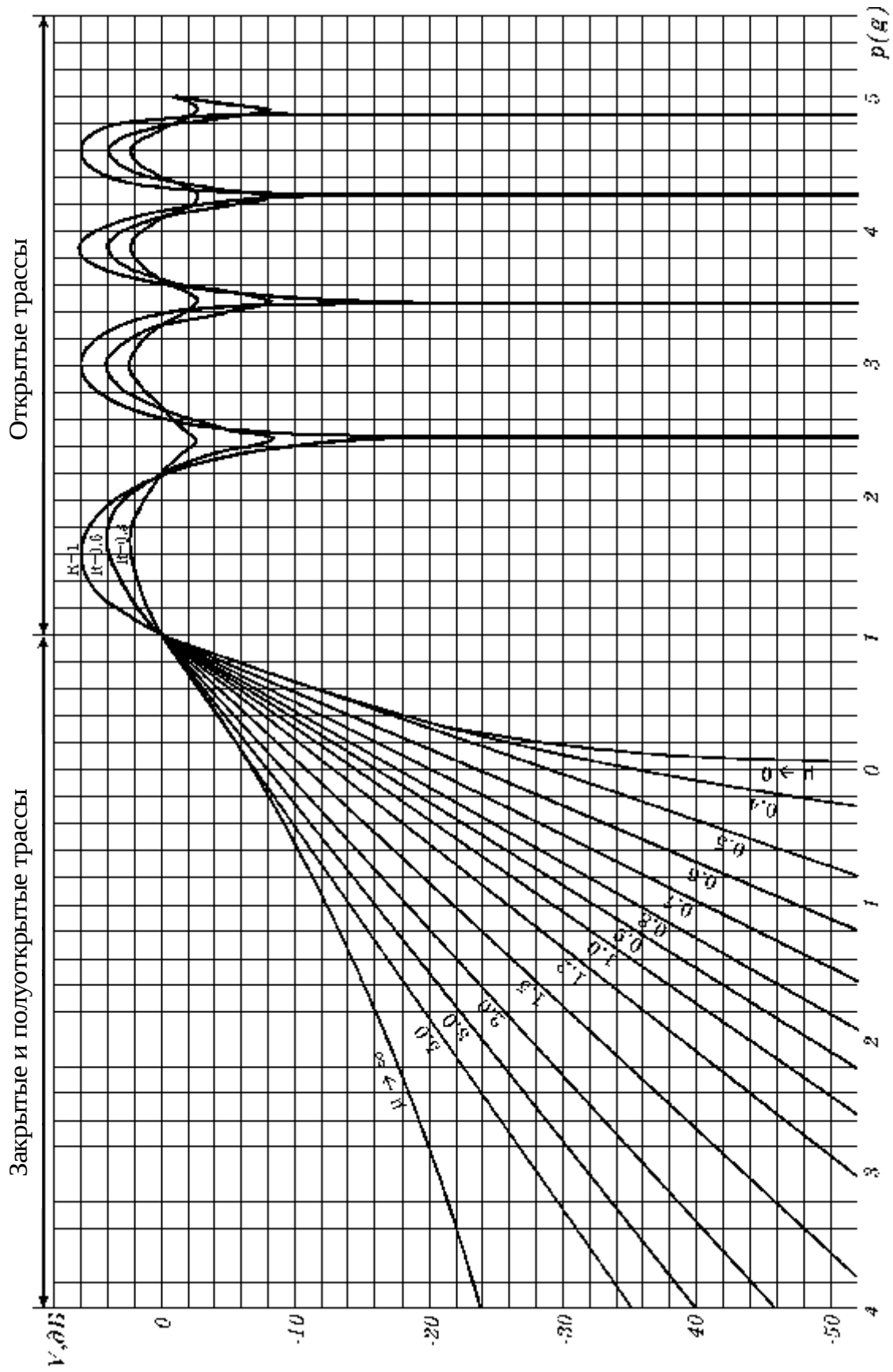


Рис. 2.4 — Зависимость множителя ослабления от относительного просвета

4) Рассчитать зависимость изменения просвета ΔH и относительного просвета $p(g)$ от градиента диэлектрической проницаемости g , задавая значения g от величины превышаемой в течение 99,9 % до 0,1 % времени наблюдения, что соответствует значениям g в пределах $\bar{g} \pm 3,3\sigma$.

5) По результатам расчёта $p(g)$ определить, к какой группе относится рассматриваемая трасса:

- а) при $P(g_\varepsilon) \geq 1$ — трасса открытая;
- б) при $0 \leq P(g_\varepsilon) < 1$ — полуоткрытая;
- в) при $P(g_\varepsilon) < 0$ — закрытая.

Возможны случаи, когда с изменением g меняется характер трассы, например, при алгебраическом увеличении g открытая прежде трасса может стать полуоткрытой или даже закрытой.

6) Рассчитать множитель ослабления $V(g)$ для выбранного ранее ряда значений g . Для случая открытой трассы нужно пользоваться интерференционной формулой, для полуоткрытой и закрытой трасс — использовать приближённые методы, основанные на теории дифракции (см. выше).

7) Построить зависимость $V(g)$ для изменения g в пределах $\bar{g} \pm 3,3\sigma$.

8) Сделать подробные выводы по работе, в которых указать возможные рекомендации по изменению геометрии трассы для улучшения энергетического режима РРЛ.

3. КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ

3.1. Контрольные вопросы для допуска к выполнению практической работы

1) Сформулируйте задачи решаемой при выполнении исследований данной работы.

2) Поясните, как при оценке работы пролета радиорелейной линии учитывается сферичность поверхности Земли.

- 3) Охарактеризуйте, какие основные группы пролетов принято выделять при анализе пролета радиорелейной линии.
- 4) По какой формуле рассчитывается величина оптимального просвета?
- 5) Определите, что такое оптимальный просвет пролета радиорелейной линии.
- 6) По какой формуле рассчитывается множитель ослабления для открытой трассы?
- 7) По какой формуле рассчитывается множитель ослабления для закрытой трассы?
- 8) При каких условиях наблюдается максимальное значение множителя ослабления?
- 9) При каких условиях наблюдается минимальное значение множителя ослабления?
- 10) Как влияет рефракция радиоволн на работу пролета радиорелейной линии.

3.2. Контрольные вопросы для защиты результатов выполнения практической работы

- 1) Поясните, как изменяется характер пролета радиорелейной линии при изменении градиента диэлектрической проницаемости.
- 2) Поясните, какими физическими явлениями определяются минимальное и максимальное значения множителя ослабления для пролета радиорелейной линии.
- 3) Поясните, какое препятствие более выгодно для пролета радиорелейной линии в случае закрытой трассы (острое, или пологое).
- 4) Поясните результаты расчетов с точки зрения практической реализуемости радиорелейной линии.

5) Поясните, какие изменения в геометрию пролета радиорелейной линии следует внести в случае необходимости увеличения мощности сигнала в точке приема.

6) Поясните, что такое множитель ослабления, и в каких единицах измеряется данная величина.

7) Какие задачи решает использование радиорелейных линий?

8) В каких диапазонах частот применяются современные радиорелейные линии?

9) Поясните, из каких соображений выбираются антенны для использования в составе оборудования радиорелейных линий.

10) Поясните, в чем состоят достоинства радиорелейных линий, определяющие их использование в составе мобильных систем связи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 53363–2009. Цифровые радиорелейные линии. Показатели качества. Методы расчета. — М. : Стандартинформ, 2009. — 36 с.
2. Романюк, В.А. Основы радиосвязи: учеб. пособие для вузов / В.А. Романюк. — М.: Юрайт, 2011. — 288 с.
3. Маглицкий, Б. Н. Спутниковые и радиорелейные системы связи : учебное пособие / Б. Н. Маглицкий. — Новосибирск : Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2019. — 184 с. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/102137.html> (дата обращения: 23.10.2025). — Режим доступа: для авторизир. пользователей. — Текст : электронный.
4. Жуковский, А. Г. Спутниковые и радиорелейные системы передачи : учебное пособие / А. Г. Жуковский. — Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2022. — 249 с. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/122226.html> (дата обращения: 23.10.2025). — Режим доступа: для авторизир. пользователей. - DOI: <https://doi.org/10.23682/122226> — ISBN 978-5-4497-1710-8. — Текст : электронный.
5. Беленький, В. Г. Многоканальные телекоммуникационные системы : учебное пособие / В. Г. Беленький, К. А. Куратов. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2022. — 92 с. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/126505.html> (дата обращения: 23.10.2025). — Режим доступа: для авторизир. пользователей. — ISBN 978-5-7782-4639-3. — Текст : электронный.

Учебное издание

РАДИОЧАСТОТНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ

Учебно-методическое пособие

Составители: **Савочкин** Александр Анатольевич,
Гаспарян Роман Романович

В авторской редакции

Изд. № 145/2025. Объем 1 п. л. Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 0,98.
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»