

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.3.1>

УДК: 654.027

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТЕРЬ В РАДИОКАНАЛЕ УКВ

А.В. Сухов¹, В.И. Филатов², С.Б. Савилкин³, В.В. Осипов³

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4,

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

³НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ,
117218, Москва, Нахимовский просп., 36, к.1

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2025 г.

Аннотация. Рассматривается модель, позволяющая оценивать воздействие растительности на прохождение радиоволн в средней полосе России. Влияние растительности на распространение радиоволн создает дополнительные потери на распространение радиосигнала не только вдоль земной поверхности. Проведенные расчеты с использованием рекомендаций Международного союза электросвязи (Сектор радиосвязи МСЭ) показали, что в зависимости от удаления излучаемых элементов от деревьев, высота которых превышает точку расположения антенны необходимо учитывать дополнительные потери в распространение радиосигнала. При этом значение потерь функционально связано с частотой сигналов. В статье подробно рассмотрено прогнозирование влияния потерь на распространение радиоволн перспективных средств диапазона УКВ, функционирующих на частотах до 80 МГц. Учитывалось, что в исследуемом районе преобладает лесной массив, характерный для центральной части России.
Ключевые слова: распространение радиоволн, потери в радиоканале УКВ, полезный сигнал.

Финансирование: Публикация выполнена в рамках НИР НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ по теме № FNEF-2024-0003 «Методы разработки аппаратно-программных платформ на основе защищенных и устойчивых к сбоям систем на кристалле и сопроцессоров искусственного интеллекта и обработки сигналов»

Автор для переписки: Осипов Владислав Вадимович, kt-mati@mail.ru

Введение

Как правило, антенные устройства передачи УКВ сигналов размещают от лесного массива на удалении порядка 50 м. Причиной данному ограничению являются влияние мощного передаваемого радиосигнала на кроны деревьев, которые в результате излучения будут приобретать характерный пожелтевший вид, характеризующий нанесение ущерба растительности. С другой стороны, данное удаление никак не может повлиять на дополнительные потери в радиоканале, поскольку основные потери от растительности обеспечиваются всей растительностью, расположенной на радионаправлении.

Результаты экспериментов, описанных в МСЭ-Р.833 [1] показали, что для частот от 30 МГц и выше крона деревьев будет вносить дополнительные потери в наклонной трассе при для радиоканала с передатчиком, размещённым на воздушном судне или космическом аппарате и земной станцией.

Ослабление радиоволн за счет растительности при определенных обстоятельствах может быть весьма важным фактором как для наземных систем радиосвязи, так и для систем связи «Земля-Космос». Однако многообразие условий и типов листового покрова затрудняют разработку универсальной процедуры прогнозирования ослабления. Кроме того, для получения точных расчетов отсутствуют необходимые экспериментальные данные [1].

При этом, ослабление сигналов растительностью оказаться важным фактором при прогнозировании бюджета радиоканала, проходящего в том числе через участок растительности.

Для прогнозирования потерь в радиоканале УКВ диапазона необходимо учитывать множество факторов, таких как интерференция в зоне прямой

видимости, влияние естественных или искусственных неровностей, различного рода замираний сигнала и т.д. Все указанные факторы оказывают большое влияние на итоговое значение принимаемой мощности полезного сигнала на входе приемника земной станции.

1. Модель прогнозирования потерь в наклонных трассах

Проведем расчеты оценок потерь в радиолинии земная радиостанция – космический аппарат (КА) в диапазоне УКВ для различных удалений (расположение излучателя) от лесного массива d_{veg} , начиная от 1 до 50 м. Для описания потерь на ослабление L при распространении вдоль горизонтальной или наклонной трассы, покрытой зеленой растительностью на практике используется следующая модель [1]:

$$L = A f^B d^C (\theta + E)^G, \text{ (ДБ)}, \quad (1)$$

где f – частота (МГц); d – глубина растительности (м); θ – угол места (градусы); а A , B , C , E и G – эмпирические параметры, характерные для конкретного типа растительности с учетом сезонности. В частности, в таблице 1 представлены коэффициенты, необходимые для расчета потерь в наклонной трассе с учетом соснового леса.

Таблица 1. Коэффициенты для расчета потерь в сосновом лесу.

Тип деревьев	A	B	C	E	G
Сосна	0,25	0,39	0,25	0	0,05

Тогда, для соснового леса выражение (1) примет вид:

$$L = 0,25 f^{B0,39} d^{C0,25} \theta^{0,05G}, \quad (2)$$

Для более точных расчетов потерь в зависимости от угла места и частоты $L_f(\theta, f)$ необходимо на начальном этапе определить максимальный угол кромки лесного массива θ_{max} :

$$\theta_{max}(d_{veg}) = \arctg\left(\frac{h_f - h_a}{d_{veg}}\right), \quad (3)$$

где нижний индекс veg указывает на принадлежность параметра к трассе с растительностью (vegetation, англ.), h_f, h_a – высоты фазовых центров передающей и приёмной антенн.

Тогда длина трассы с растительностью d можно определить из выражения:

$$d(\theta, d_{veg}) = \frac{h_f - h_a - d_{veg} \times \text{tg}(\theta)}{\sin(\theta)}. \quad (4)$$

Тогда в конечном виде потери (1) можно представить в виде:

$$L_{f[\text{дБ}]}(\theta, d_{veg}) = A \times f^B \times \left(\frac{h_f - h_a - d_{veg} \times \text{tg}(\theta)}{\sin(\theta)} \right) \times \theta^G. \quad (5)$$

Для учета изменения влияния растительности на потери в радиоканале в зависимости от сезона используется модель:

$$L_{veg} = A f^B \log_{10}(d)(\theta + E)^G - 4, \quad (6)$$

где f – частота (МГц), d – глубина растительности (м), θ – угол места (градусы), A, E и G – параметры, определенные эмпирическим путем,

$$B = (0,30281 - 0,003624 \times k) \left(\frac{f}{1000} \right)^{(0,0013118 - 0,026236 \times k)}, \quad k = |M - 6,5|, \quad M - \text{месяц (1, 2, 3, \dots, 12)}.$$

Тогда с учетом (4) и (6) получим:

$$L_f(\theta, d_{veg}) = A \times f^B \times \log_{10} \left(\frac{h_f - h_a - d_{veg} \times \text{tg}(\theta)}{\sin(\theta)} \right) \times (\theta + E)^G - 4. \quad (7)$$

На основании представленных математических расчетов, приведённых в (1-7), был разработан алгоритм, с помощью которого в свою очередь разработана программная модель. На рис. 1 представлен алгоритм определения потерь в радиоканале наклонной линии. Особенностью данного алгоритма

является то, что он позволяет определять потери для углов наклона, значения которых не могут превышать некоторой максимальной величины. При этом данное максимальное значение определяется по заданной удаленности от лесного массива.

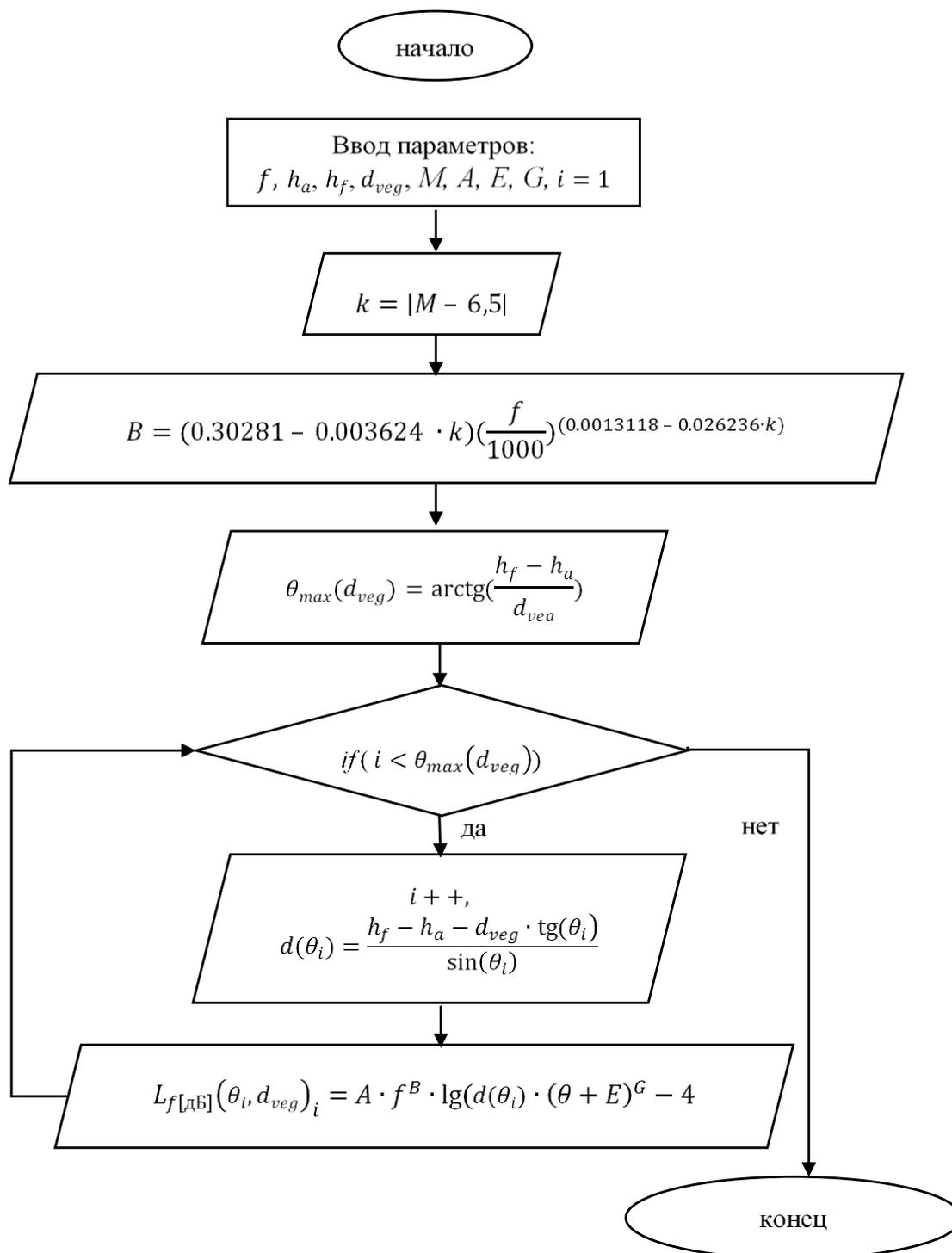


Рис. 1. Алгоритм расчета значения потерь в наклонной дальности.

На рис. 2а и б приведены расчеты поверхностей потерь $L_f(\theta, d_{veg})$ для частот от 30 до 80 МГц типового радиоэлектронного средства (РЭС).

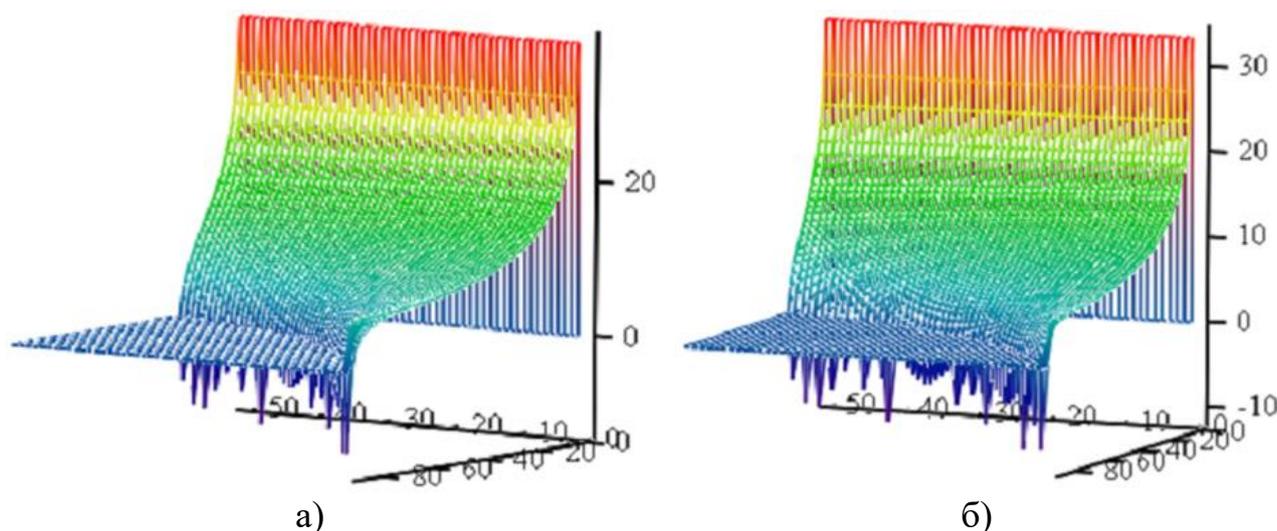


Рис. 2. Рассчитанные значения потерь для 80 и 30 МГц для различных удалений типовой РЭС от лесного массива.

Из рис. 2 видно, что на кромке лесного массива получены отрицательные значения потерь, что соответствует интерференционным явлениям усиления сигнала на кромке леса. В частности, при $f = 30$ МГц и дистанция до лесного массива, равной 50 м были получены результаты, приведенные в табл.2

Таблица 2. Результаты расчета потерь по углам при $f = 30$ МГц (дистанция до растительности 50 м).

0	0	4	20.9	8	15.32	12	11.89	16	9.02	20	5.89
1	33.25	5	19.09	9	14.35	13	11.15	17	8.3	21	4.9
2	26.78	6	17.63	10	13.47	14	10.43	18	7.55	22	3.72
3	23.28	7	16.39	11	12.66	15	9.73	19	6.75	23	2.19

Типичная радиотрасса в лесистой местности характеризуют следующие параметры: длина трассы с растительностью d , средняя высота деревьев h_v , высота антенны над землей h_a , угол места радиотрассы θ , и расстояние от антенны до придорожной лесистой местности d_w . Значения коэффициентов для хвойной растительности составляют:

$$A = 1.5 \dots 1.87,$$

$$E = 0.01,$$

$$G = -0.12.$$

2. Общая модель потерь для произвольной местности

В качестве общей модели для произвольной местности можно использовать следующую статистическую модель:

$$L_f = A \times f^B \times \log_{10}(d) \times (\theta + E)^G - \frac{4p}{100} + 0,4. \quad (8)$$

В отличие от (7) в данном выражении $d = 243(p/100)(\theta + 1)^{-0,93047} + 1$, p – процент растительности.

Тогда:

$$L(\text{дБ}) = A \times f^B \times \lg \left[\left(243 \left(\frac{p}{100} \right) (\theta + 1)^{-0,93047} + 1 \right) \right] \times (\theta + E)^G - 4 \times \left(\frac{p}{100} \right) + 0,4. \quad (9)$$

График поверхности для различных углов наклона и удалений от кедрового массива от 1 до 50 м с учетом 90 % растительности (первая половина лета) представлен на рис. 3.

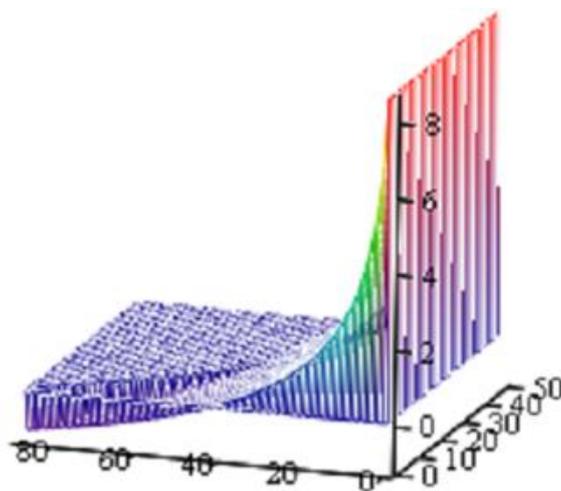


Рис. 3. Поверхность, описывающая зависимость потерь в растительности от угла места.

Для тех же условий ($p = 90\%$ растительность) для различных углов θ в кедровом лесном массиве график будет иметь вид, представленный на рис. 4:

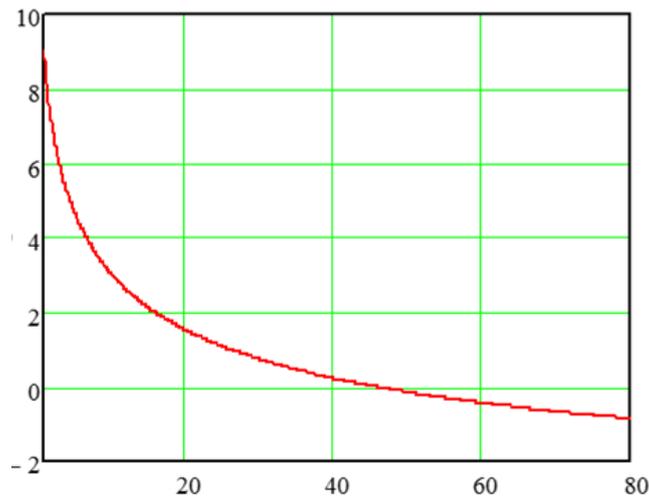


Рис. 4. График зависимости потерь в кедровом лесном массиве в зависимости от угла θ .

Как видно из графиков, максимальные значения потерь логично определяются для малых углов наклона и не превышают 10 дБ. При этом, для углов возможного ведения космического обнаружения возникают дополнительные потери от прохождения радиоволн через лесной массив, что будет характеризоваться в снижении мощности сигнала на космическом аппарате на 2-6 дБ.

3. Методика прогнозирования общих потерь в радиоканале УКВ диапазона на частотах до 80 МГц в среде с растительностью

Общие потери в радиоканале составляют:

$$L_{\Sigma} = L_{fs}(d) + L_{\text{раст}}(d), \quad (10)$$

где $L_{fs}(d)$ – потери без учёта растительности в радиоканале, $L_{\text{раст}}(d)$ – потери за счёт растительности.

По сценарию распространения радиоволн передатчик находится вне леса, а приемник – на некотором расстоянии d в лесу. Дополнительное ослабление $L_{\text{раст}}$ за счет растительности можно определить следующим образом [1]:

$$L_{\text{раст}}(d) = L_{\text{max}} \left(1 - e^{-\frac{d \times \gamma}{L_{\text{max}}}} \right), \quad (11)$$

где d – длина участка трассы, проходящего по лесу (м), γ – погонное ослабление для очень коротких трасс, проходящих через растительный массив (дБ/м), L_{max} – максимальное ослабление для одного средства при определенном типе и глубине растительности (дБ). Типичная радиотрасса, проходящая по лесистой местности представлена на рис. 5.

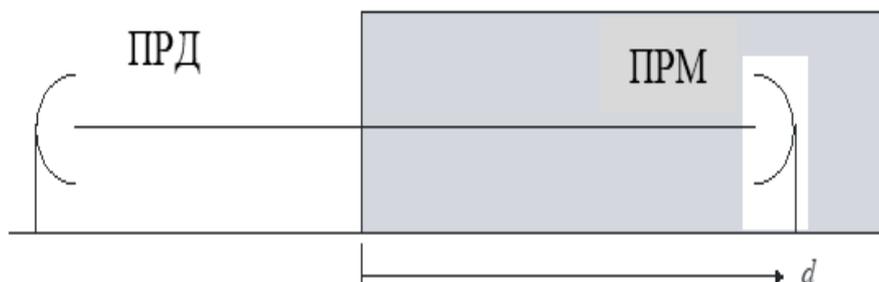


Рис. 5. Типичная радиотрасса, проходящая по лесистой местности.

На частотах ниже 1 ГГц вертикально поляризованные сигналы имеют тенденцию испытывать более сильное ослабление, чем сигналы с горизонтальной поляризацией, что объясняется рассеянием от стволов деревьев (табл. 3)

Таблица 3. Характеристики погонного затухания для различных частот.

f , МГц	30	40	50	60	70	80
γ_v (вертикальная поляризация)	0,02	0,025	0,027	0,0315	0,035	0,038
γ_r (горизонтальная поляризация)	0,006	0,008	0,01	0,013	0,015	0,017

Из таблицы видно, что в зависимости от f показатель γ_v может быть легко определен при помощи линейной экстраполяции вида $\gamma_v(f) = 3,75 \times 10^{-4} \times f + 0,01$, а для $\gamma_r(f) = 2,25 \times 10^{-4} \times f$.

Ослабление за счет растительности сильно меняется из-за изменчивости самого растительного массива и большого разнообразия пород деревьев, густоты и содержания влаги. Значения, приведенные на рис. 6, являются наиболее типичными.

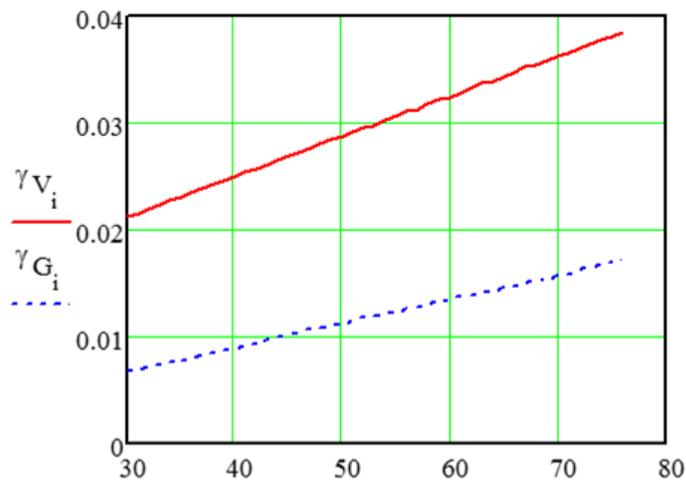


Рис. 6. Графики изменений погонного затухания для горизонтальной и вертикальной поляризаций.

На частотах порядка 1 ГГц погонное ослабление за счет листьев деревьев оказывается на 20 % выше (дБ/м), чем в случае деревьев без листвы. Величина ослабления может меняться и в результате движения листвы деревьев, например при ветре.

Величина максимального ослабления L_{max} ограничена рассеянием земной волны и зависит от типа и плотности растительности [2,3], а также от диаграммы направленности антенны РЭС УКВ диапазона, расположенного в пределах растительного массива и расстояния по вертикали между антенной и верхней частью растительного массива (табл. 4).

Таблица 4. Постоянные погонного и максимального ослабления.

Параметр	Частота (МГц) и поляризация				
	105,9, горизонтальная	466,475, наклонная	949,0, наклонная	1852,2, наклонная	2117,5, наклонная
γ , (дБ/м)	0,04	0,12	0,17	0,30	0,34
L_{max} , дБ	9,4	18,0	26,5	29,0	34,1

Зависимость $L_{max}(f)$ (дБ) от частоты имеет вид:

$$L_{max}(f) = L_1 \times f^\alpha, \tag{12}$$

где f – частота (МГц), определенная по результатам различных экспериментов. Из результатов эксперимента в смешанных лесах под Санкт-Петербургом было установлено, что для широт России $\alpha \approx 0,42$, $L_1 \approx 1,37$ дБ.

Тогда график зависимости $L_{max}(f)$ в интервале частот РЭС будет иметь вид, представленный на рис. 7.

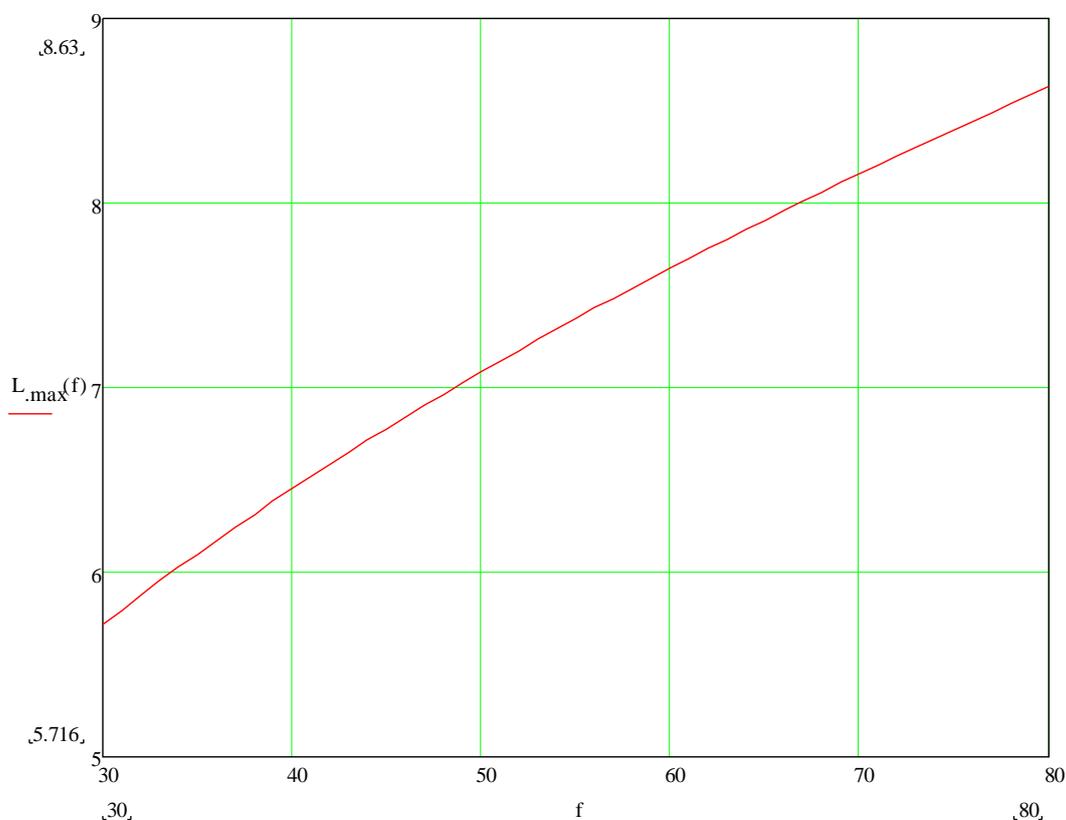


Рис. 7. График зависимости потерь $L_{max}(f)$ в интервале частот РЭС.

Для РЭС радиосвязи диапазона 30-40 МГц получим значения, приведенные в таблице 5.

Таблица 5. Результаты расчетов потерь в растительности в зависимости от частоты сигнала.

МГц	дБ								
30	5,71	39	6,38	48	6,96	57	7,48	66	7,9
31	5,79	40	6,45	49	7,02	58	7,53	67	8,01
32	5,87	41	6,51	50	7,08	59	7,59	68	8,06
33	5,94	42	6,58	51	7,14	60	7,64	69	8,11
34	6,02	43	6,64	52	7,2	61	7,7	70	8,25
35	6,09	44	6,71	53	7,25	62	7,75	71	8,3
36	6,17	45	6,77	54	7,31	63	7,8	72	8,35
37	6,24	46	6,84	55	7,37	64	7,8	73	8,39
38	6,31	47	6,90	56	7,42	65	7,9	74	8,44

Тогда с учетом дальности:

$$L_{\text{раст}_{B,\Gamma}}(d, f) = L_1 \times f^\alpha \left(1 - e^{-\frac{d \times \gamma_{B,\Gamma}(f)}{L_1 \times f^\alpha}} \right). \quad (13)$$

Потери за счёт растительности с учётом поляризации представлены в таблице 6.

Таблица 6. Потери в растительности при 30 и 76 МГц.

	Дистанция, км	5	10	20	30	40	50	60	70
Потери, дБ (30 МГц)	Поляризация вертикальная	0.1965	0.386	0.746	1.082	1.395	1.68	1.959	2.214
Потери, дБ (76 МГц)		0.198	0.391	0.763	1.119	1.458	1.78	2.089	2.383
Потери, дБ (30 МГц)	Поляризация горизонтальная	0.034	0.067	0.133	0.199	0.264	0.328	0.391	0.453
Потери, дБ (76 МГц)		0.085	0.169	0.335	0.498	0.657	0.813	0.966	1.116

Проведем порядок расчета для радиотрассы в условиях сплошного леса, 50 % леса и в условиях 10 % леса. Поскольку в этом диапазоне частот преимущественно используются биконические антенны с наклонной поляризацией значения для потерь примут вид:

$$L_{\text{раст}_B}(7 \times 10^4 \text{ м}, 30 \text{ МГц}) = L_{\text{max}} \left(1 - e^{-\frac{7 \times 10^4 \times \gamma_B(f)}{L_{\text{max}}}} \right), \quad (14)$$

$$L_{\text{раст}_\Gamma}(7 \times 10^4 \text{ м}, 30 \text{ МГц}) = L_{\text{max}} \left(1 - e^{-\frac{7 \times 10^4 \times \gamma_\Gamma}{L_{\text{max}}}} \right). \quad (15)$$

Результаты расчетов показали, что для дистанций более 1 км разница в потерях между горизонтальной и вертикальной поляризацией практически исчезает.

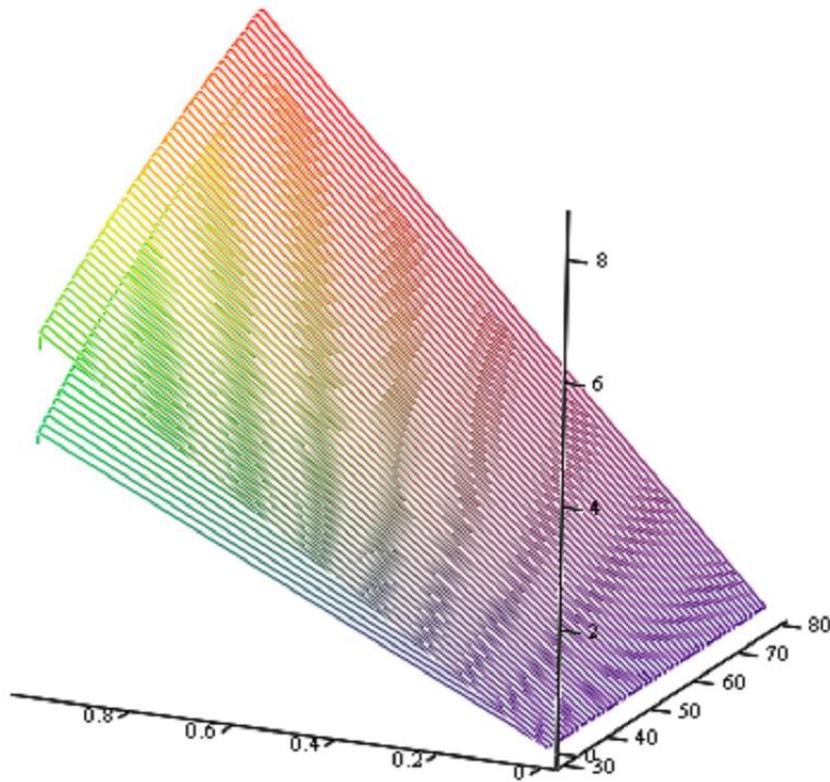


Рис. 8. График зависимости $L_{\text{раст}}(d, f)$ для случая вертикальной (радужный) и горизонтальной поляризации (синий).

Исходя из требований к перспективным УКВ радиоканалам, устойчивая передача сигналов и команд должна обеспечиваться для расстояний до 70 км. Тогда произведем расчет для наихудших условий, когда поляризация радиоволн будет вертикальной для параметров нижней $f_1 = 30$ МГц ($\gamma_1 = 0,02$) и верхней $f_2 = 76$ МГц ($\gamma_2 = 0,036$) частот для хвойно-лиственной растительности (смешанный лес) [3].

В целом зависимость потерь в растительности для случая вертикальной и горизонтальной поляризации для дальности до 1 км представлены на рис. 8. Выражение для расчёта потерь примет вид:

$$L_{\text{раст_в,г}}(d, f) = \begin{cases} L_1 \times f^\alpha \left(1 - e^{-\frac{d \times \gamma_{\text{в,г}}(f)}{L_1 \times f^\alpha}} \right), \text{дБ} \\ d \in (0; 7 \times 10^3), \text{ м} \\ f \in (30; 76), \text{ МГц} \end{cases} \quad (16)$$

Для радиотрасс при $f = 30$ и 76 МГц горизонтальной и вертикальной поляризации были получены расчетные значения, представленные на рис. 9, 10.

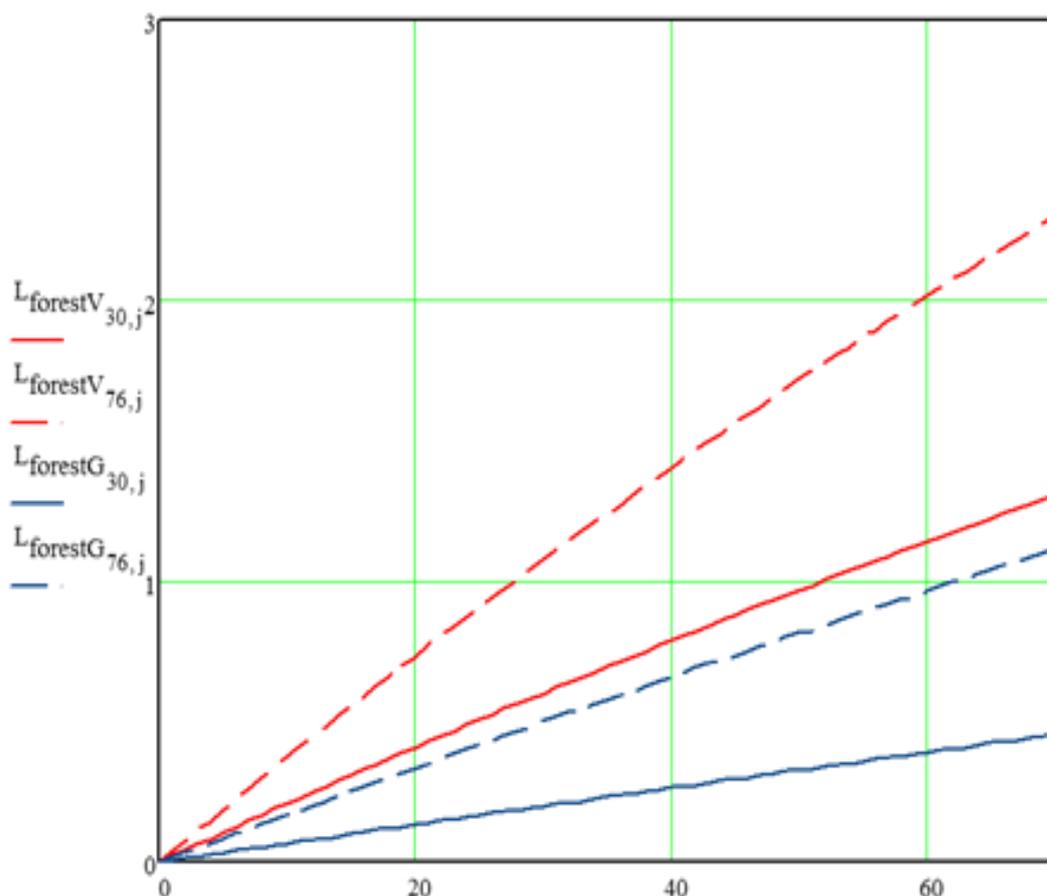


Рис. 9. Графики потерь для радиотрасс при вертикальной (красный) и горизонтальной (синий) поляризации для частот $f = 30$ и 76 МГц.

При этом общие потери в растительности для дистанции 50 км при 30 МГц составляет 5.716 дБ, а для 76 МГц – 8.446 дБ, что означает падение мощности сигнала в 3.8 и 7 раз соответственно. Причем данные потери будут зависеть только от типа растительности, выражаемой в показателе L_1 , частоте передаваемого сигнала f , и практически не будут зависеть ни от расстояния d , ни от типа поляризации радиосигнала. В зависимости от частоты и дальности график потерь для горизонтальной и вертикальной поляризации имеет вид, представленный на рис. 11.

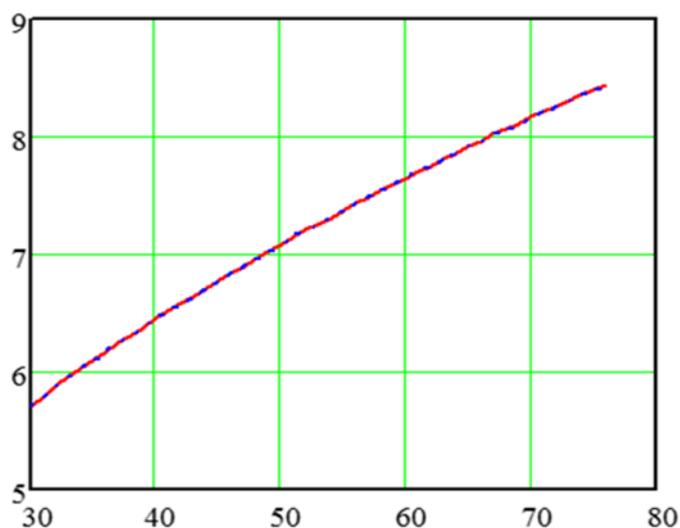


Рис. 10. Графики зависимости потерь для горизонтальной и вертикальной поляризаций для частот от 30 до 76 МГц при дальности 50 км.

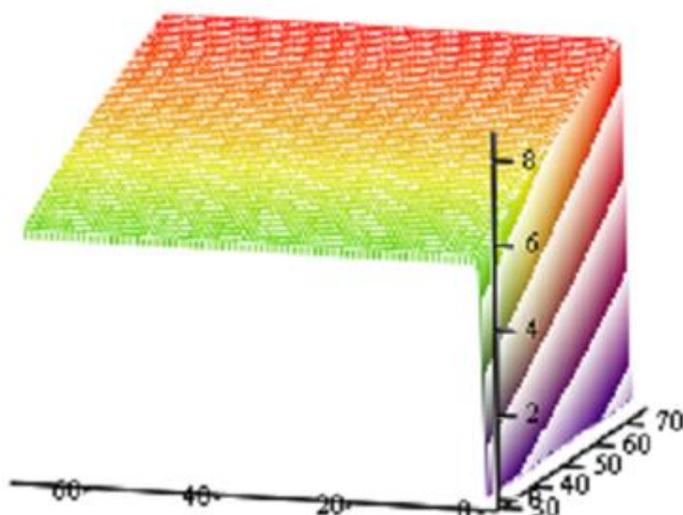


Рис. 11. График зависимости $L_{\text{расп}}(d, f)$ потерь от дальности распространения сигнала и частоты.

При более детальном исследовании верхней и нижней границ диапазона 30-76 МГц было установлено, что после увеличения d (более 2 км) величины потерь практически асимптотично приближаются к значениям 5.716 дБ и 8.446 дБ соответственно, что показано на рис. 12.

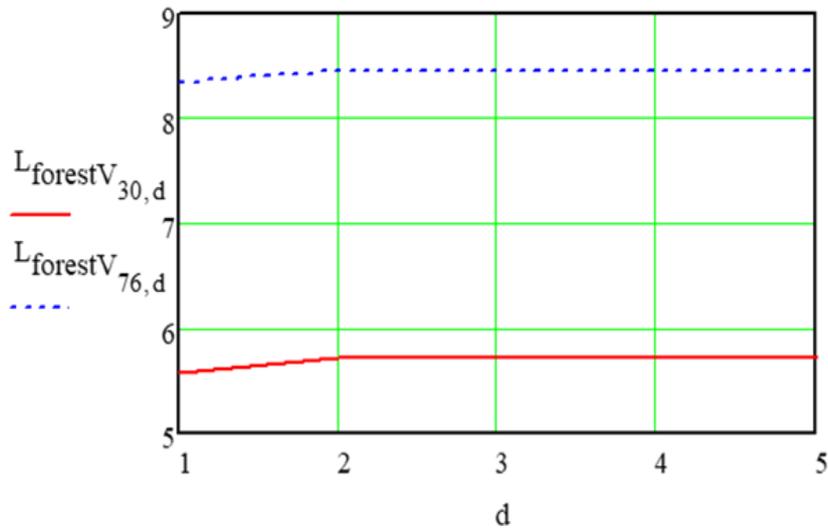


Рис. 12. Графики зависимости $L_{\text{расг}}(d, f)$ потерь для частот 30 и 76 МГц.

4. Распространение в свободном пространстве

Для линии связи пункта с пунктом ослабление в свободном пространстве между изотропными антеннами, называемое также основными потерями передачи в свободном пространстве (обозначения L_{bf} или A_{bf}), целесообразно рассчитывать следующим образом (см. Рекомендацию МСЭ-R P.341):

$$L_{bf} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right), \quad (17)$$

где L_{bf} – основные потери передачи в свободном пространстве (дБ);

d – расстояние;

λ – длина волны;

и d и λ выражены в одинаковых единицах.

Уравнение (17) можно также записать, используя вместо длины волны частоту:

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log f + 20 \log d \text{ дБ}, \quad (18)$$

где f – частота (МГц);

d – расстояние (км).

Потери в свободном пространстве на дистанции 50 км при 30 МГц составляют 98.844 дБ, а для 76 МГц – 107.633 дБ.

Тогда общие потери для этой дистанции при 30 МГц и 76 МГц составляют:

$$L_{\Sigma 30\text{МГц}} = 98,844\text{дБ} + 5,716\text{дБ} = 104,56\text{дБ},$$

$$L_{\Sigma 76\text{МГц}} = 107,633\text{дБ} + 8,446\text{дБ} = 116,079\text{дБ}.$$

Расчеты показывают, что общие потери при распространении в лесной поверхности будут в интервале от 99 до 105 дБ при 30 МГц, и от 108 до 117 при 76 МГц.

Заключение

Результаты компьютерных расчётов по полученным расчётам прохождения радиоволн через участки местности с растительностью показали уровни потерь для частот от 30 МГц как дополнительные потери от крон деревьев в наклонной трассе при для радиоканала с передатчиком, размещённым на воздушном судне или космическом аппарате и земной станцией.

Ослабление радиоволн за счет растительности при определенных обстоятельствах оказалось фактором, необходимым для учёта как для наземных систем радиосвязи, так и для систем связи «Земля-Космос». Оценено многообразие условий и типов лиственного покрова, позволившие разработать универсальную процедуры прогнозирования ослабления.

Для прогнозирования потерь в радиоканале УКВ диапазона необходимо учитывать множество факторов, таких как интерференция в зоне прямой видимости, влияние естественных или искусственных неровностей, различного рода замираний сигнала и т.д. Все указанные факторы оказывают большое влияние на итоговое значение принимаемой мощности полезного сигнала на входе приемника земной станции. В ходе проведения расчетов были получены прогнозируемые оценки потерь при распространении радиосигналов в условиях растительности, характерной для умеренных широт в диапазоне частот функционирования средств УКВ диапазона. Для подтверждения приведенных

расчетов необходимо провести полевые измерения для растительности в интервале 50-60 с.ш. с целью уточнения полученных оценок.

Финансирование: Публикация выполнена в рамках НИР НИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ по теме № FNEF-2024-0003 «Методы разработки аппаратно-программных платформ на основе защищенных и устойчивых к сбоям систем на кристалле и сопроцессоров искусственного интеллекта и обработки сигналов»

Литература

1. Рекомендация МСЭ-R P.833-9. Ослабление сигналов растительностью. 2016.
2. Ипатов В.П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения. - М.: Техносфера. 2007. - 488 с.
3. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. — М.: Радио и связь, 1985. - 384 с.
4. Torrieri D. Principles of spread-spectrum communication systems, Springer, 2015, 641 p.

Для цитирования:

Сухов А.В., Филатов В.И., Савилкин С.Б., Осипов В.В. Методика прогнозирования потерь в радиоканале УКВ. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.3.1>