

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.833-5

Ослабление сигналов растительностью

(Вопрос МСЭ-R 202/3)

(1992-1994-1999-2001-2003-2005)

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

а) что ослабление сигналов растительностью может оказаться важным фактором в некоторых практических ситуациях,

рекомендует,

1 чтобы при оценке ослабления сигналов, распространяющихся над лесистой местностью, в полосе частот от 30 МГц до 60 ГГц использовалась информация, представленная в Приложении 1.

Приложение 1**1 Введение**

Ослабление за счет растительности при определенных обстоятельствах может быть весьма важным фактором как для наземных систем, так и для систем связи Земля–космос. Однако многообразие условий и типов листового покрова затрудняют разработку универсальной процедуры прогнозирования ослабления. Кроме того, недостает сопоставимых экспериментальных данных.

Модели, описываемые в последующих разделах, применимы в конкретных частотных диапазонах для различных типов геометрии трассы.

2 Наземные трассы с одним терминалом, расположенным в лесистой местности

На наземных радиотрассах с одним терминалом, расположенным в лесу или в другом месте с обильной растительностью, дополнительные потери за счет растительности можно описать с помощью двух основных параметров:

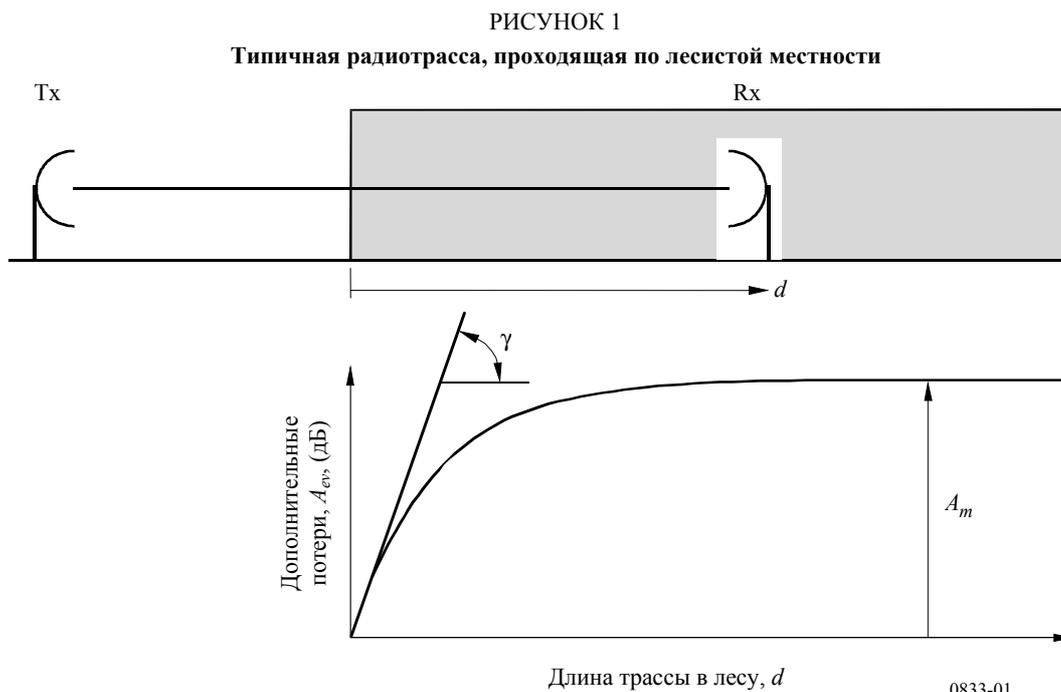
- коэффициента погонного ослабления (дБ/м), обусловленного, прежде всего, рассеянием энергии за пределами радиотрассы, который измеряется на очень коротких трассах;
- общего максимального дополнительного ослабления на радиотрассе за счет растительности (дБ), учитывающего влияние других механизмов, включая распространение земной волны над верхней частью растительного массива и прямое рассеяние в пределах этого массива.

На рисунке 1 передатчик находится вне леса, а приемник – на некотором расстоянии, d , в лесу. Дополнительное ослабление, A_{ev} , за счет растительности можно определить как:

$$A_{ev} = A_m [1 - \exp(-d \gamma / A_m)], \quad (1)$$

где:

- d : длина участка трассы, проходящего по лесу (м);
- γ : погонное ослабление для очень коротких трасс, проходящих через растительный массив (дБ/м);
- A_m : максимальное ослабление для одного терминала при определенном типе и дальности распространения в растительности (дБ).



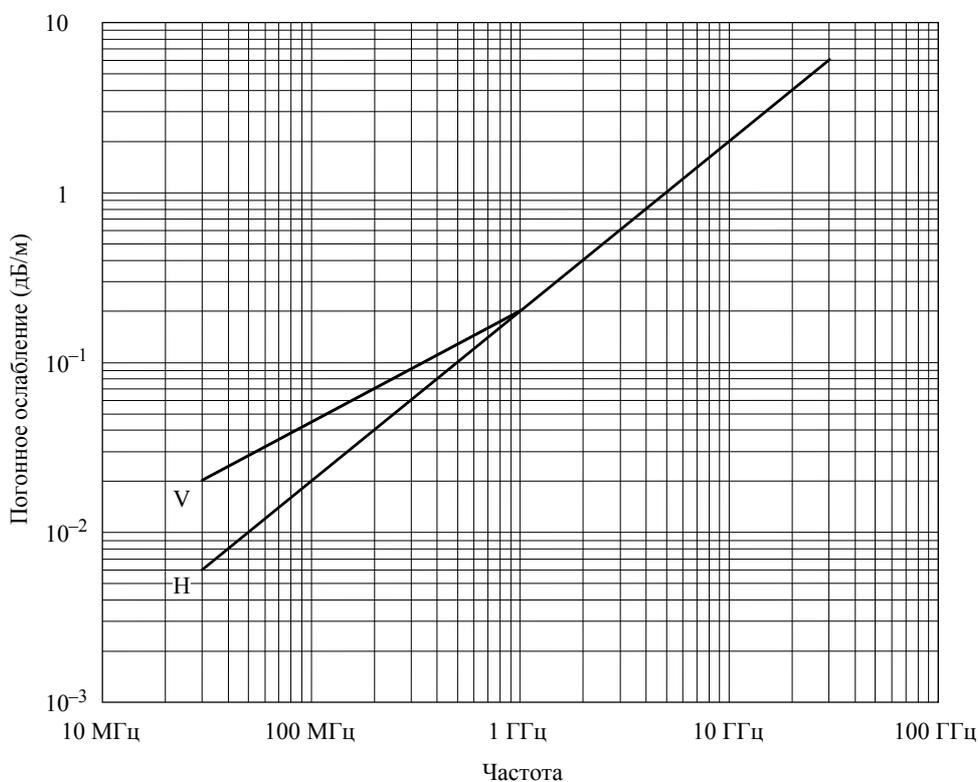
Важно заметить, что за дополнительное ослабление, A_{ev} , принимаются не потери в свободном пространстве, а ослабление, обусловленное всеми остальными механизмами. Таким образом, если бы геометрия трассы, изображенной на рисунке 1, была такой, что полного просвета Френеля не существовало бы, то за A_{ev} принималось бы дополнительное ослабление по отношению к свободному пространству и дифракционными потерями. Аналогичным образом, если бы частота была достаточно высокой, чтобы сделать поглощение в газах ощутимым, то A_{ev} выражалось бы в дополнительном поглощении в газах.

Следует также отметить, что A_m эквивалентно потерям за счет местных помех, которые характерны для терминала, испытывающего затенение от некоторых форм земной поверхности или местных отражающих предметов.

Величина погонного ослабления, γ (дБ/м), обусловленного растительностью, зависит от типа и от плотности растительности. На рисунке 2 даны примерные значения ослабления в зависимости от частоты.

На рисунке 2 показаны типичные значения погонного ослабления, полученные в результате разнообразных измерений на трассах, проходящих в лесу, в диапазоне частот от 30 МГц до примерно 30 ГГц. Ниже примерно 1 ГГц вертикально поляризованные сигналы имеют тенденцию испытывать более сильное ослабление, чем сигналы с горизонтальной поляризацией, что объясняется рассеянием от стволов деревьев.

РИСУНОК 2
Погонное ослабление, обусловленное лесистой местностью



V: вертикальная поляризация
H: горизонтальная поляризация

0833-02

Подчеркнем, что ослабление за счет растительности сильно меняется из-за изменчивости самого растительного массива и широкого диапазона видов деревьев, густоты и содержания влаги, полученного на практике. Значения, приведенные на рисунке 2, следует считать просто наиболее типичными.

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

Величина максимального ослабления, A_m , ограничена рассеянием земной волны и зависит от типа и плотности растительности, а также диаграммы направленности антенны терминала, расположенного в пределах растительного массива и расстояния по вертикали между антенной и верхней частью растительного массива.

Зависимость A_m (дБ) от частоты имеет вид:

$$A_m = A_1 f^\alpha, \quad (2)$$

где f — частота (МГц), определенная из различных экспериментов:

- Измерения в частотном диапазоне 900–1800 МГц, выполненные в парке с тропическими деревьями в Рио-де-Жанейро (Бразилия) при средней высоте деревьев 15 м, привели к значениям $A_1 = 0,18$ дБ и $\alpha = 0,752$. Высота приемной антенны составляла 2,4 м.
- Измерения в частотном диапазоне 900–2200 МГц, выполненные в лесу вблизи Мулхауза (Франция) на трассах, изменяющихся по длине от нескольких сотен метров до 6 км, с

различными видами деревьев со средней высотой 15 м, привели к значениям $A_1 = 1,15$ дБ и $\alpha = 0,43$. Приемная антенна в лесу представляла собой несимметричный вибратор $\lambda/4$, установленный на автомобиле на высоте 1,6 м, а передающей антенной служил симметричный вибратор $\lambda/2$ на высоте 25 м. Стандартное отклонение результатов измерений составляло 8,7 дБ. Наблюдались сезонные изменения величиной 2 дБ на 900 МГц и 8,5 дБ на 2200 МГц.

3 Затенение от одного дерева

3.1 На частоте 1 ГГц или ниже

Уравнение (1) неприменимо, если радиотрасса испытывает затенение от одного дерева, а оба терминала находятся вне растительного массива, как, например, в случае, если трасса пересекает крону одного дерева. На ОВЧ и УВЧ, где погонное ослабление сравнительно невелико, и особенно в тех случаях, когда участок трассы, пересекающий растительность, короток, подобную ситуацию можно приближенно описать с помощью погонного ослабления и максимально допустимого значения общих дополнительных потерь:

$$A_{et} = d \gamma, \quad (3)$$

где:

d : длина участка трассы, пересекающего крону дерева (м);

γ : погонное ослабление для очень коротких трасс, проходящих через растительность (дБ/м),

а $A_{et} \leq$ наименьшего значения дополнительного ослабления для других трасс (дБ).

Ограничение на максимальную величину A_{et} необходимо из-за того, что когда погонное ослабление достаточно велико, то вокруг покрытого растительностью участка существует трасса с меньшим ослаблением. Примерную величину минимального ослабления для других трасс можно рассчитать, исходя из предположения, что крона дерева представляет собой тонкий дифракционный экран конечной ширины, и используя метод, описанный в Рекомендации МСЭ-R P.526.

Подчеркнем, что уравнение (3) вместе с максимально допустимым значением A_{et} является всего лишь аппроксимацией. Как правило, оно дает завышенные результаты при расчете дополнительных потерь, обусловленных растительностью. Поэтому оно наиболее полезно для приближенных оценок дополнительных потерь в процессе планирования служб. Если же его использовать для оценки затухания мешающего сигнала, то оно может дать сильно заниженные результаты помех.

3.2 Выше 1 ГГц

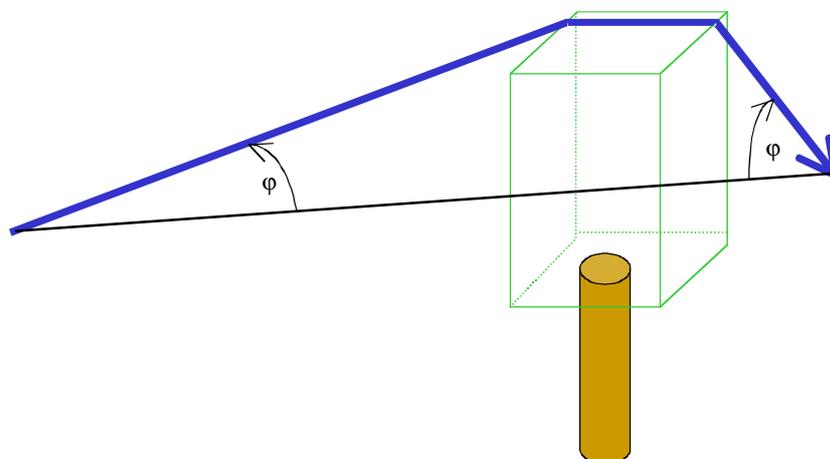
Для того чтобы оценить общее поле, вначале вычисляются, а затем объединяются дифрагированные, отраженные от земли составляющие и составляющие рассеяния при прохождении через растительность.

Дифрагированные составляющие состоят из составляющих над верхней частью растительности, а также составляющих, которые огибают края растительного массива. Эти, а также отраженные от земли составляющие вычисляются с использованием Рекомендаций МСЭ-R. Проходящая через растительность или рассеянная составляющая вычисляется с использованием модели, основанной на теории переноса энергии излучения (RET).

3.2.1 Расчет составляющей, дифрагируемой над верхней частью растительного массива

Дифракционные потери, L_{top} , испытываемые на трассе сигнала, дифрагируемого над растительностью, могут рассматриваться как дифракция над двойным изолированным клиновидным препятствием для геометрии, определенной на рисунке 3.

РИСУНОК 3
Составляющая, дифрагируемая над верхней частью растительного массива



0833-03

Указанные потери вычисляются следующим образом:

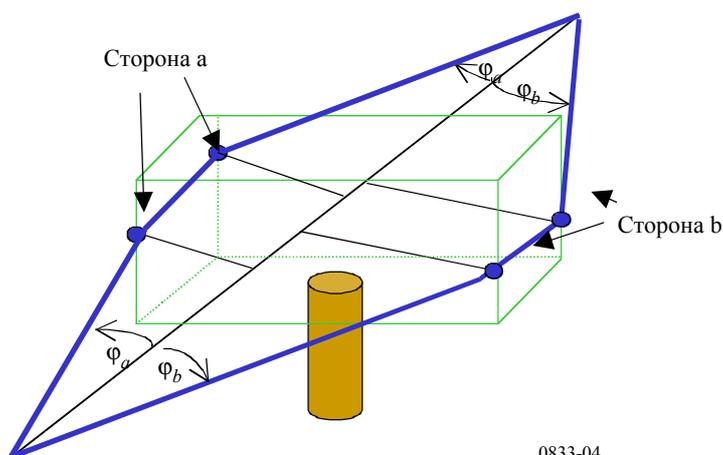
$$L_{top} = L_{top_diff} + G_{Tx}(\varphi) + G_{Rx}(\varphi), \quad (4)$$

где $G_{Tx}(\varphi)$ и $G_{Rx}(\varphi)$ – потери, определяемые углами, под которыми дифрагируемая волна покидает передающую антенну и поступает на приемную антенну, соответственно. L_{top_diff} – это общие дифракционные потери, вычисленные с использованием метода Рекомендации МСЭ-R P.526 для двойных изолированных кромок препятствий.

3.2.2 Вычисление составляющих, которые огибают края растительного массива

Дифракционные потери, L_{sidea} и L_{sideb} , испытываемые сигналом, дифрагируемым вокруг растительного массива, могут опять же рассматриваться как дифракция над двойным изолированным клиновидным препятствием для геометрии, определенной на рисунке 4.

РИСУНОК 4
Составляющие, дифрагируемые вокруг растительного массива



0833-04

Потери вычисляются с использованием уравнений (5) и (6).

$$L_{sidea} = L_{diff_sidea} + G_{Tx}(\varphi_a) + G_{Rx}(\varphi_a) \quad (5)$$

и

$$L_{sideb} = L_{diff_sideb} + G_{Tx}(\varphi_b) + G_{Rx}(\varphi_b), \quad (6)$$

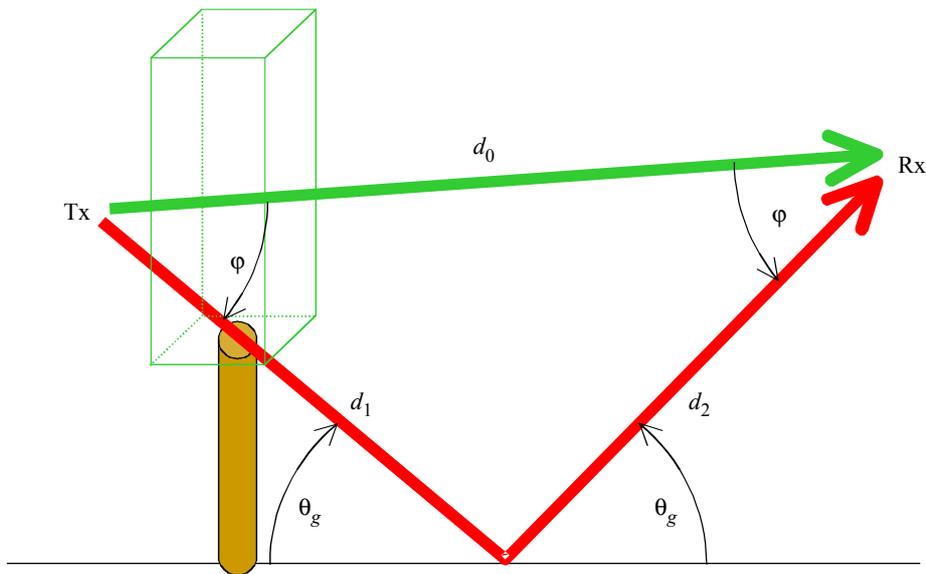
где $G_{Tx}(\varphi_{a,b})$ и $G_{Rx}(\varphi_{a,b})$ – потери, определяемые углами, под которыми дифрагируемая волна покидает передающую антенну и поступает на приемную антенну, для сторон a и b, соответственно. L_{diff_sidea} и L_{diff_sideb} – это общие дифракционные потери вокруг каждой стороны, вычисленные с использованием метода Рекомендации МСЭ-R P.526 для двойных изолированных кромок препятствий.

3.2.3 Вычисление составляющей, отраженной от земли

Предполагается, что рассматриваемая трасса достаточно коротка для того, чтобы отраженная от

РИСУНОК 5

Составляющая, отраженная от земли



0833-05

земли волна могла моделироваться с помощью геометрии, показанной на рисунке 5.

Для вычисления потерь, испытываемых отраженной от земли волной на входе приемника, можно произвести расчет коэффициента отражения, R_0 , отраженного от земли сигнала при заданном угле скольжения, θ_g . Это – стандартный метод, который описывается в Рекомендации МСЭ-R P.1238. Значения диэлектрической проницаемости и проводимости взяты из Рекомендации МСЭ-R P.527.

Потери, испытываемые отраженной от земли волной, L_{ground} , далее определяются как:

$$L_{ground} = 20 \log_{10} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_0} \right) - 20 \log_{10}(R_0) + G_{Tx}(\varphi) + G_{Rx}(\varphi), \quad (7)$$

где $G_{Rx}(\varphi)$ и $G_{Tx}(\varphi)$ – потери, определяемые углами, под которыми отраженная волна покидает передающую антенну и поступает на приемную антенну, соответственно.

3.2.4 Вычисление проходящей через растительность или рассеянной составляющей

Для составления точных прогнозов дополнительного ослабления растительностью, пользователь должен ввести в уравнение RET (уравнение (8)) следующие параметры:

- α : отношение мощности, рассеянной в прямом направлении, к общей рассеянной мощности;
- β : ширина луча фазовой функции (градусы);
- σ_τ : объединенный коэффициент поглощения и рассеяния;
- W : альбедо;
- $\Delta\gamma_R$: ширина луча приемной антенны (градусы);
- d : расстояние, проходимое волной в растительном массиве (м).

При заданных входных параметрах: частоты (ГГц), типичного размера листьев моделируемой растительности и индекса площади листьев (LAI) различных видов деревьев, из таблиц параметров RET (таблицы 1–4) можно получить ближайшие значения α , β , W и σ_τ . Если эти параметры недоступны, то следует принять ближайшее подходящее значение из видов деревьев, указанных в таблицах.

Эти четыре табличных параметра, наряду с частотой и значением $\Delta\gamma_{3\text{дБ}}$, шириной луча приемной антенны по уровню 3 дБ, затем используются в модели RET.

Ослабление, вызванное рассеянием при прохождении сигнала через растительность, L_{scat} , далее определяется как:

$$L_{scat} = -10 \log_{10} \left(\begin{array}{l} e^{-\tau} + \frac{\Delta\gamma_R^2}{4} \cdot \{ [e^{-\hat{\tau}} - e^{-\tau}] \cdot \bar{q}_M + e^{-\tau} \cdot \sum_{m=1}^M \frac{1}{m!} (\alpha W \tau)^m [\bar{q}_m - \bar{q}_M] \} \\ + \frac{\Delta\gamma_R^2}{2} \cdot \{ -e^{-\tau} \cdot \frac{1}{P_N} + \sum_{k=\frac{N+1}{2}}^N [A_k e^{-\frac{\hat{\tau}}{s_k}} \cdot \sum_{n=0}^N \frac{1}{1 - \frac{\mu_n}{s_k}}] \} \end{array} \right), \quad (8)$$

где:

$\Delta\gamma_R = 0,6 \cdot \Delta\gamma_{3\text{дБ}}$: (ширина луча приемной антенны по уровню 3 дБ);

m : порядок первого члена I_1 не будет существенно меняться для $m > 10$ (поэтому для большинства случаев, $M = 10$);

$\tau = (\sigma_a + \sigma_s) \cdot z$: оптическая плотность τ в функции расстояния z

$$\bar{q}_m = \frac{4}{\Delta\gamma_R^2 + m\beta_S^2}$$

$$\beta_S = 0,6 \cdot \beta$$

$$\mu_n = -\cos\left(\frac{n\pi}{N}\right) \quad (9)$$

$$P_n = \sin^2\left(\frac{\pi}{2N}\right)$$

$$\hat{\tau} = (1 - \alpha W)\tau.$$

Коэффициенты ослабления, s_k , определяются согласно характеристическому уравнению:

$$\frac{\hat{W}}{2} \cdot \sum_{n=0}^N \frac{P_n}{1 - \frac{\mu_n}{s}} = 1,$$

где:

$$P_n = \sin\left(\frac{\pi}{N}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{N}\right) \text{ и } \hat{W} = \frac{(1-\alpha)W}{1-\alpha W}, \quad (10)$$

где N – нечетное целое число, выбираемое в качестве компромисса для времени вычисления. Большие значения N приведут к резкому увеличению времени вычисления. Приемлемые значения определены как $11 \leq N \leq 21$. Левая сторона уравнения (10) будет равна 1 для значений s , которые представляют собой корни этого уравнения. Это даст $N + 1$ корней, для которых применяется следующее соотношение:

$$S_{0, \dots, \frac{N}{2}} = -S_{N, \dots, \frac{N+1}{2}}.$$

Коэффициенты амплитуды, A_k , определяются системой линейных уравнений, заданных в виде:

$$\sum_{k=\frac{N+1}{2}}^N \frac{A_k}{1 - \frac{\mu_n}{s_k}} = \frac{\delta_n}{P_N} \quad \text{для} \quad n = \frac{N+1}{2} \dots N, \quad (11)$$

где:

$$\delta_n = 0 \quad \text{для} \quad n \neq N \quad \text{и} \quad \delta_n = 1 \quad \text{для} \quad n = N.$$

3.2.5 Комбинация отдельных составляющих

Общие потери, L_{total} , испытываемые сигналом, распространяющимся через деревья, в этом случае определяются комбинацией отдельных составляющих потерь:

$$L_{total} = -10 \log_{10} \left\{ 10^{\left(\frac{-L_{sidea}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{sideb}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{top}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{ground}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{scat}}{10}\right)} \right\}. \quad (12)$$

ТАБЛИЦА 1

Подобранные значения α в зависимости от частоты/видов деревьев

	Конский каштан	Серебристый клен	Серебристый клен	Лондонский платан	Лондонский платан	Липа обыкновенная	Липа обыкновенная	Сикамор	Сикамор
	С лиственной	С лиственной	Без лиственной	С лиственной	Без лиственной	С лиственной	Без лиственной	С лиственной	Без лиственной
LAI		1,691		1,93		1,475		1,631	0,483
Размер лиственной	0,300	0,15		0,250		0,100		0,15	
Частота (Гц)	α								
1,3	0,9	0,95	0,9	0,95	0,9	0,9	0,95		0,95
2	0,75		0,95	0,95			0,95		0,95
2,2			0,95	0,5					
11	0,85	0,9		0,7	0,95	0,95	0,95		0,95
37				0,95					
61,5		0,8		0,25				0,9	

ТАБЛИЦА 2

Подобранные значения β в зависимости от частоты/видов деревьев

	Конский каштан	Серебристый клен	Серебристый клен	Лондонский платан	Лондонский платан	Липа обыкновенная	Липа обыкновенная	Сикамор	Сикамор
	С лиственной	С лиственной	Без лиственной	С лиственной	Без лиственной	С лиственной	Без лиственной	С лиственной	Без лиственной
LAI		1,691		1,93		1,475		1,631	0,483
Размер лиственной	0,300	0,15		0,250		0,100		0,15	
Частота (Гц)	β								
1,3	21	14	43	42	16	76	50		70
2	80		31	49			60		62
2,2			25	13					
11	69	58		100	19	78	48		44
37				18					
61,5		48		2				59	

ТАБЛИЦА 3

Подобранные значения альбедо в зависимости от частоты/видов деревьев

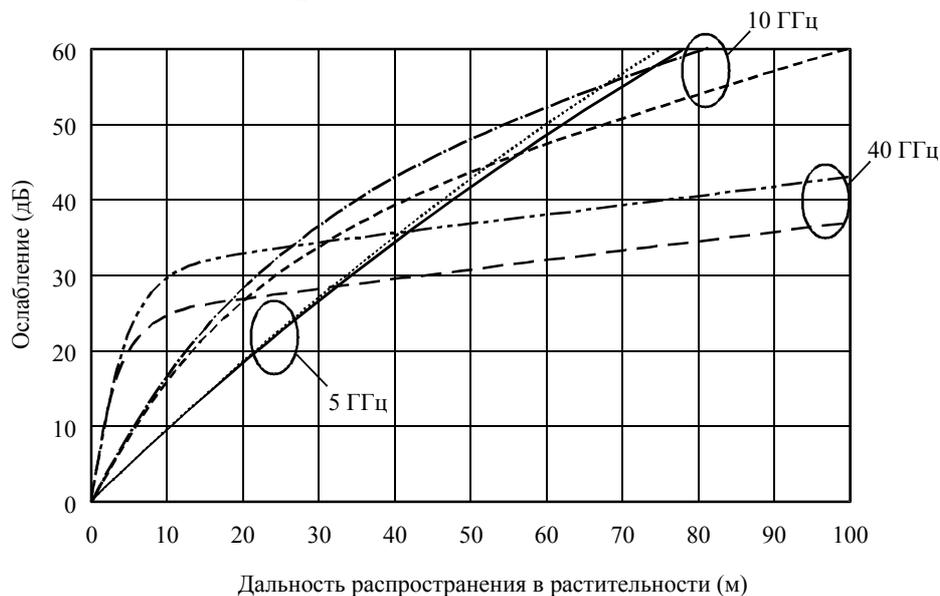
	Конский каштан	Серебристый клен	Серебристый клен	Лондонский платан	Лондонский платан	Липа обыкновенная	Липа обыкновенная	Сикамор	Сикамор
	С лиственной	С лиственной	Без лиственной	С лиственной	Без лиственной	С лиственной	Без лиственной	С лиственной	Без лиственной
LAI		1,691		1,93		1,475		1,631	0,483
Размер лиственной	0,300	0,15		0,250		0,100		0,15	
Частота (Гц)					<i>W</i>				
1,3	0,25	0,95	0,25	0,95	0,95	0,95	0,95		0,85
2	0,55		0,95	0,95			0,95		0,95
2,2			0,95	0,45					
11	0,95	0,95		0,95	0,95	0,75	0,95		0,95
37				0,95					
61,5		0,8		0,5				0,9	

ТАБЛИЦА 4

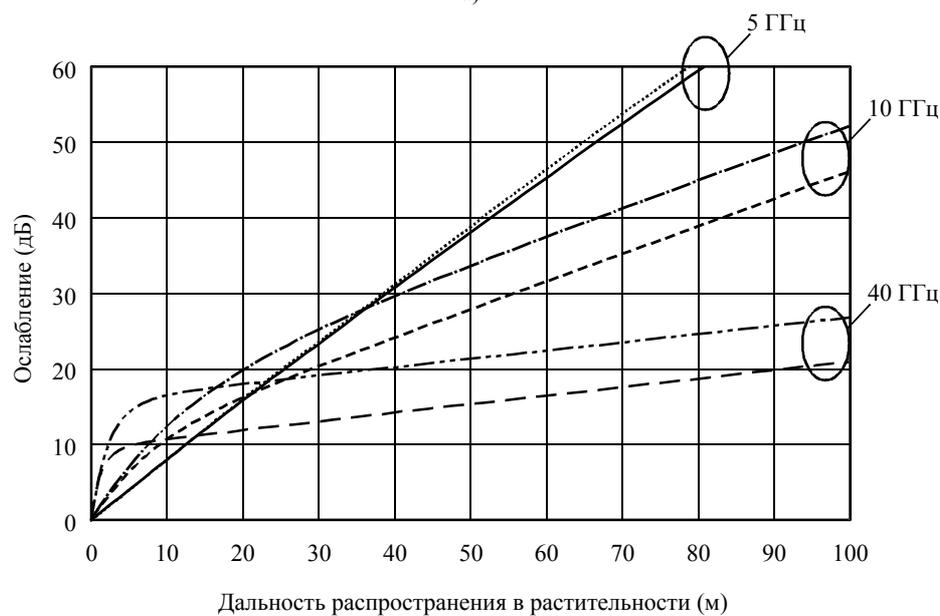
Подобранные значения σ_t в зависимости от частоты/видов деревьев

	Конский каштан	Серебристый клен	Серебристый клен	Лондонский платан	Лондонский платан	Липа обыкновенная	Липа обыкновенная	Сикамор	Сикамор
	С лиственной	С лиственной	Без лиственной	С лиственной	Без лиственной	С лиственной	Без лиственной	С лиственной	Без лиственной
LAI		1,691		1,93		1,475		1,631	0,483
Размер лиственной	0,300	0,15		0,250		0,100		0,15	
Частота (Гц)					σ_t				
1,3	0,772	0,241	0,139	0,147	0,221	0,22	0,591		0,36
2	0,091		0,176	0,203			0,692		0,249
2,2			0,377	0,244					
11	0,124	0,321		0,75	0,459	0,56	0,757		0,179
37				0,441					
61,5		0,567		0,498				0,647	

РИСУНОК 6
Ослабление для площади облучения $0,5 \text{ м}^2$ и 2 м^2 ,
а) при наличии листвы, б) без листвы*



а)



б)



* Кривые показывают дополнительные потери за счет наличия листвы, испытываемые сигналом, проходящим через нее. В практических ситуациях на сигнал, распространяющийся за пределами этого массива листвы, будут воздействовать составляющие потерь, обусловленные прохождением сигнала как через растительность, так и дифракцией над ней. В таком случае преобладающий тип из этих двух механизмов распространения будет ограничивающим фактором в отношении общих потерь за счет растительности.

4 Деполяризация

Результаты предыдущих измерений на частоте 38 ГГц позволили сделать предположение, что деполяризация за счет растительности может быть достаточно велика, то есть передаваемый кроссполяризованный сигнал может быть того же порядка, что и сигнал основной поляризации, распространяющийся через растительный массив. Однако при больших дальностях проникновения, что как раз и необходимо для возникновения такой ситуации, ослабление будет так велико, что оба сигнала, как кроссполяризованный, так и с основной поляризацией, окажутся ниже динамического диапазона приемника.

5 Динамические эффекты

Было отмечено, что когда линия связи проходит через растительность, амплитуда принимаемого сигнала претерпевает быстрые изменения при перемещениях растительности. Основной причиной такого перемещения является ветер, и измерения на частотах 38 и 42 ГГц показали, что между частотой амплитудных флуктуаций и скоростью ветра наблюдается сильная корреляция.

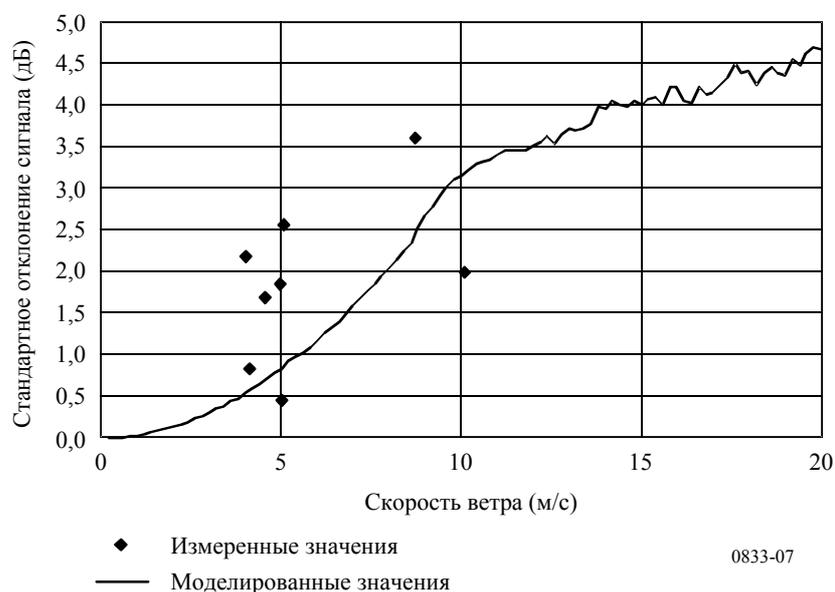
При рассмотрении эффектов влияния растительности очевидно, что окружающая обстановка не будет находиться в статическом состоянии. Вдоль трассы сигнала в направлении местоположения приемника могут находиться одно или несколько деревьев, которые не дадут среднего ослабления, достаточного для уменьшения уровня принимаемого сигнала ниже системного предела. Однако было обнаружено, что когда деревья находятся в движении, уровень сигнала меняется в динамическом режиме в большом диапазоне значений, создавая условия невозможности обслуживания. Был проведен ряд измерений уровня сигнала, проходящего через деревья, в функции времени, и результаты измерений показали среднее снижение уровня сигнала примерно 20 дБ на одно дерево. Была отмечена значительная изменчивость сигнала с частыми пропадающими сигнала при его ослаблении до 50 дБ, продолжающимися в течение примерно 10 мс.

Было отмечено, что глубокая нулевая структура, наблюдаемая во время серии измерений, может создаваться только за счет взаимодействия ряда составляющих рассеяния при прохождении через растительность. Для имитации этого механизма распространения было рассчитано суммарное поле от ряда источников рассеяния, расположенных произвольным образом вдоль линии, касательной к трассе. Чтобы получить результирующий сигнал с соответствующей изменчивостью во времени, расположение каждого источника рассеяния было изменено согласно синусоиде, чтобы имитировать движение веток деревьев при воздействии ветра. Частота и степень изменчивости мест расположения источников рассеяния возрастали при увеличении скорости ветра. Данная модель приемлемым образом соответствовала наблюдениям.

Моделированные временные ряды и значения стандартных отклонений амплитуды сигналов в зависимости от скоростей ветра, изменяющихся в диапазоне от 0 до 20 м/с, представлены на рисунке 7 в сравнении с данными измерений.

РИСУНОК 7

Стандартное отклонение измеренных и моделированных временных рядов на частоте 40 ГГц в функции скорости ветра



Для получения простого линейного приближения стандартное отклонение σ моделируется следующим образом:

$$\sigma = v/4 \quad \text{дБ}, \quad (13)$$

где v – скорость ветра (м/с).

Следует отметить, что несмотря на тот факт, что этот тип модели демонстрирует присущую ей зависимость от частоты, различия в длинах трасс при прохождении сигналов сквозь деревья невелики, и в типовой полосе пропускания 40 МГц появятся плавные (амплитудные) замирания. Быстрые замирания обусловлены изменчивостью среды распространения во времени.

В таблице 5 представлены типичные данные для средних значений и стандартных отклонений уровней ослабления, измеренных на частоте 38 ГГц для трех типов деревьев в условиях безветрия и при сильном ветре.

ТАБЛИЦА 5

Динамика замираний в растительности, измеренная на частоте 38 ГГц

Тип дерева		Куст шиповника (диаметр 2 м)	Яблоня (диаметр 2,8 м)	Сосна (диаметр 1,5 м)
Безветрие	Средние потери (дБ)	8,6	17,4	7,7
	Стандартное отклонение (дБ)	2,0	2,8	2,2
Сильный ветер	Средние потери (дБ)	11,7	17,8	12,1
	Стандартное отклонение (дБ)	4,4	4,2	4,3