

International Telecommunication Union

ITU-R
Radiocommunication Sector of ITU

Рекомендация МСЭ-Р Р.833-8

(09/2013)

Затухание в растительности

Серия Р

Распространение радиоволн

Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, а также в проведении исследований без ограничения диапазона частот, на основе которых принимаются Рекомендации.

Регулирующие и политические функции Сектора радиосвязи выполняются всемирными и региональными конференциями радиосвязи и ассамблеями радиосвязи при поддержке исследовательских групп.

Политика в отношении прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-Р в отношении прав интеллектуальной собственности описана в Общей патентной политике МСЭ-Т/МСЭ-Р/ИСО/МЭК, ссылка на которую содержится в Приложении 1 Резолюции МСЭ-Р 1. Формы, которые следует использовать для подачи патентных заявлений и лицензионных деклараций патентообладателями, доступны по адресу <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en> где также можно найти Руководящие принципы по реализации общей патентной политики для МСЭ-Т/МСЭ-Р/ИСО/МЭК и базу данных патентной информации МСЭ-Р.

Серия рекомендаций МСЭ-Р

(Также доступно онлайн по адресу <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>)

Ряд

Заголовок

БО	Спутниковая доставка
БР	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; фильм для
БС	телевидения Услуги вещания (звук)
БТ	Вещательная служба (телевидение)
Ф	Фиксированная служба
М	Мобильная, радиолокационная, любительская и связанные с ней спутниковые службы
П	Распространение радиоволн
РА	Радиоастрономия
РС	Системы дистанционного зондирования
С	Фиксированная спутниковая связь
СА	Космические приложения и метеорология
СФ	Совместное использование частот и координация между фиксированными спутниковыми и фиксированными системами обслуживания.
СМ	Управление спектром.
СНГ	Спутниковый сбор новостей
ТФ	Сигналы времени и стандарты частоты
В	излучения Словарь и смежные темы

Примечание: Данная Рекомендация МСЭ-Р была утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, подробно изложенной в Резолюции МСЭ-Р 1.

Электронная публикация
Женева, 2013 г.

-МСЭ 2013

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-Р Р.833-8

Затухание в растительности

(Вопрос МСЭ-Р 202/3)

(1992-1994-1999-2001-2003-2005-2007-2012-2013)

Объем

В этой Рекомендации представлено несколько моделей, позволяющих читателю оценить влияние растительности на радиоволновые сигналы. Представлены модели, применимые к различным типам растительности для различных геометрий пути, подходящих для расчета затухания сигналов, проходящих через растительность. В Рекомендации также содержатся измеренные данные динамики затухания растительности и характеристики распространения задержки.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая

что затухание в растительности может иметь важное значение в ряде практических приложений,

рекомендует

использовать содержание Приложения 1 для оценки затухания через растительность в диапазоне частот от 30 МГц до 60 ГГц.

Приложение 1

1 Введение

Затухание в растительности может быть важным в некоторых обстоятельствах, как для наземных, так и для систем Земля-космос. Однако широкий диапазон условий и типов листы затрудняет разработку обобщенной процедуры прогнозирования. Также наблюдается отсутствие надлежащим образом сопоставленных экспериментальных данных.

Модели, описанные в следующих разделах, применимы к определенным диапазонам частот и для различных типов геометрии трассы.

2 Препятствие лесной растительностью

2.1 Наземный путь с одной конечной точкой в лесу

Для наземной радиотрассы, где один терминал расположен в лесной зоне или аналогичной обширной растительности, дополнительные потери из-за растительности можно охарактеризовать на основе двух параметров:

- удельная скорость затухания (дБ/м), обусловленная в первую очередь рассеиванием энергии за пределами радиотракта, которая измеряется на очень коротком пути;

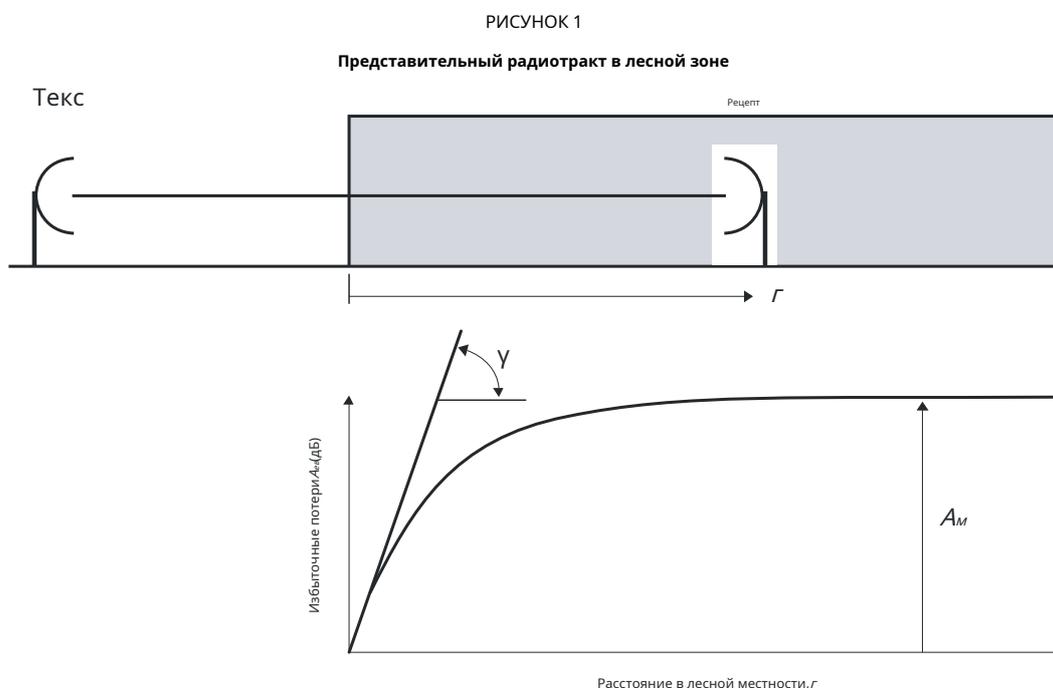
- максимальное суммарное дополнительное затухание из-за растительности на радиотрассе (дБ), ограниченное влиянием других механизмов, включая распространение поверхностных волн над растительной средой и прямое рассеяние внутри нее.

На рис. 1 передатчик находится за пределами леса, а приемник — на определенном расстоянии, $г$, в нем. Избыточное затухание, $A_{ев}$, из-за наличия растительности определяется по формуле:

$$A_{ев} = A_M [1 - \text{ЭКСП}(-\gamma г / A_M)] \quad (1)$$

где:

- $г$: длина тропы в лесу (м)
- γ : удельное затухание для очень коротких растительных путей (дБ/м)
- A_M : максимальное затухание для одного терминала в пределах определенного типа и глубины растительности (дБ).



Р0833-01

Важно отметить, что избыточное затухание, $A_{ев}$, определяется как превышение всех других механизмов, а не только потери свободного пространства. Таким образом, если геометрия радиотракта на рис. 1 была бы такой, что полный зазор Френеля от местности не существовал бы, то $A_{ев}$ будет затухание сверх как свободного пространства, так и дифракционных потерь. Аналогично, если бы частота была достаточно высокой, чтобы сделать газообразное поглощение значительным, $A_{ев}$ будет превышать газообразную абсорбцию.

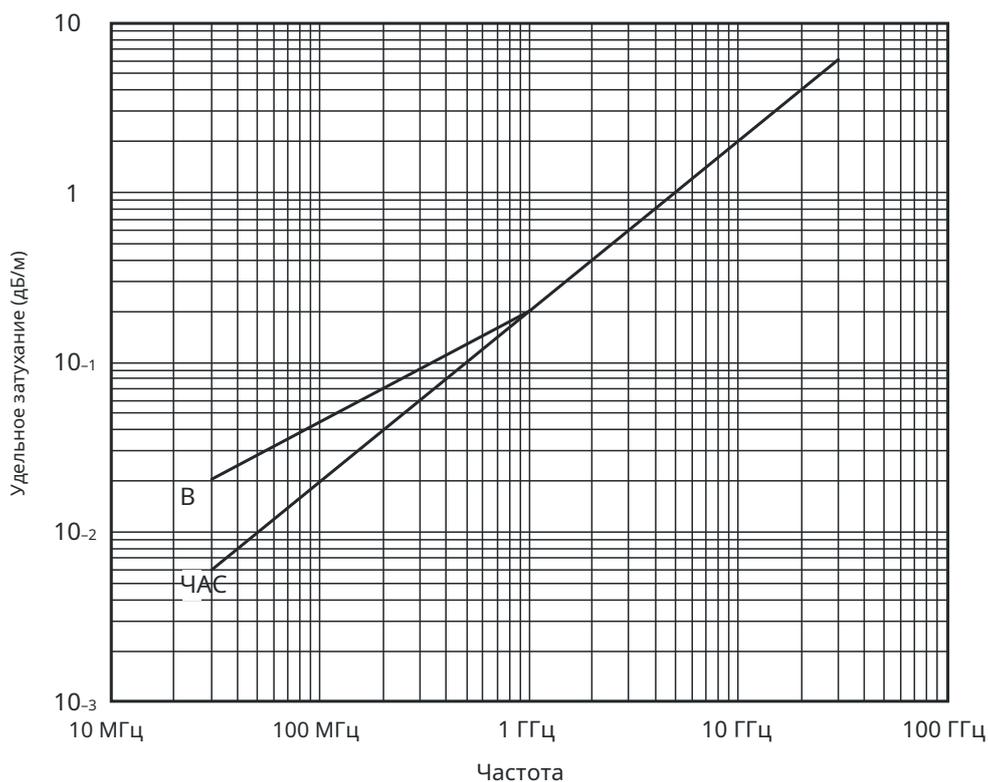
Можно также отметить, что A_M эквивалентно потерям из-за помех, которые часто приводятся для терминала, закрытого каким-либо наземным покрытием или помехами.

Величина удельного затухания за счет растительности γ дБ/м зависит от вида и плотности растительности. Приблизительные значения приведены на рис. 2 в зависимости от частоты.

На рисунке 2 показаны типичные значения удельного затухания, полученные из различных измерений в диапазоне частот от 30 МГц до примерно 30 ГГц в лесной местности. Ниже примерно 1 ГГц наблюдается тенденция к более высокому затуханию вертикально поляризованных сигналов, чем горизонтально, что, как полагают, связано с рассеиванием от стволов деревьев.

РИСУНОК 2

Удельное затухание из-за лесной зоны



V: вертикальная поляризация
H: горизонтальная поляризация

R0833-02

Подчеркивается, что затухание из-за растительности сильно варьируется из-за нерегулярной природы среды и широкого диапазона видов, плотностей и содержания воды, полученных на практике. Значения, показанные на рис. 2, следует рассматривать только как типичные.

На частотах порядка 1 ГГц удельное затухание через деревья с листвой оказывается примерно на 20% больше (дБ/м), чем через деревья без листвы. Также могут быть изменения затухания из-за движения листвы, например, из-за ветра.

Максимальное затухание, A_m , ограниченное рассеянием от поверхностной волны, зависит от вида и плотности растительности, а также от диаграммы направленности антенны терминала внутри растительности и вертикального расстояния между антенной и верхней частью растительности.

Измерения в диапазоне частот 105–2200 МГц проводились в смешанной хвойно-лиственной растительности (смешанный лес) недалеко от Санкт-Петербурга (Россия) на трассах длиной от нескольких сотен метров до 7 км с различными породами деревьев средней высотой 16 м. Было обнаружено, что они в среднем согласуются с уравнением (1) с константами для удельного и максимального затухания, приведенными в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1

Параметр	Частота (МГц) и поляризация				
	105.9 Горизонтальный	466.475 Наклонный	949.0 Наклонный	1852.2 Наклонный	2117.5 Наклонный
χ (дБ/м)	0,04	0,12	0,17	0,30	0,34
A_m (дБ)	9.4	18.0	26.5	29.0	34.1

Частотная зависимость A_m (дБ) вида:

$$A_m = A_1 \phi^\alpha \quad (2)$$

где ϕ частота (МГц) была получена из различных экспериментов:

- Измерения в диапазоне частот 900–1 800 МГц, проведенные в парке с тропическими деревьями в Рио-де-Жанейро (Бразилия) при средней высоте деревьев 15 м, дали следующие результаты: $A_1 = 0,18$ дБ и $\alpha = 0,752$. Высота приемной антенны составляла 2,4 м.
- Измерения в диапазоне частот 900–2200 МГц, проведенные в лесу близ Мюлуза (Франция) на тропах длиной от нескольких сотен метров до 6 км с различными породами деревьев средней высотой 15 м, дали следующие результаты: $A_1 = 1,15$ дБ и $\alpha = 0,43$. Приемная антенна в лесу представляла собой монополь $\lambda/4$, установленный на транспортном средстве на высоте 1,6 м, а передающая антенна представляла собой диполь $\lambda/2$ на высоте 25 м. Среднеквадратичное отклонение измерений составило 8,7 дБ. Наблюдались сезонные колебания в 2 дБ на частоте 900 МГц и 8,5 дБ на частоте 2 200 МГц.
- Измерения в диапазоне частот 105,9–2117,5 МГц проводились в двух лесопарковых зонах с хвойно-лиственной растительностью (смешанный лес) в г. Санкт-Петербурге (Россия) при высоте деревьев от 12 до 16 м и среднем расстоянии между ними примерно от 2 до 3 м, что соответствует плотности 20–10 деревьев/100 м². дали $A_1 = 1,37$ дБ и $\alpha = 0,42$. Для приема сигнала использовалась четвертьволновая дипольная антенна на высоте 1,5 м над уровнем земли. Расстояние между приемной и передающей антеннами составляло от 0,4 до 7 км, а трассы для измерения выбирались таким образом, чтобы между этими антеннами была прямая видимость без каких-либо препятствий, а только измеряемый лесной массив. Различные фазы эксперимента проводились в одинаковых погодных условиях: сухая погода, скорость ветра от 0 до 7 м/с.

2.2

Наклонные траектории спутников

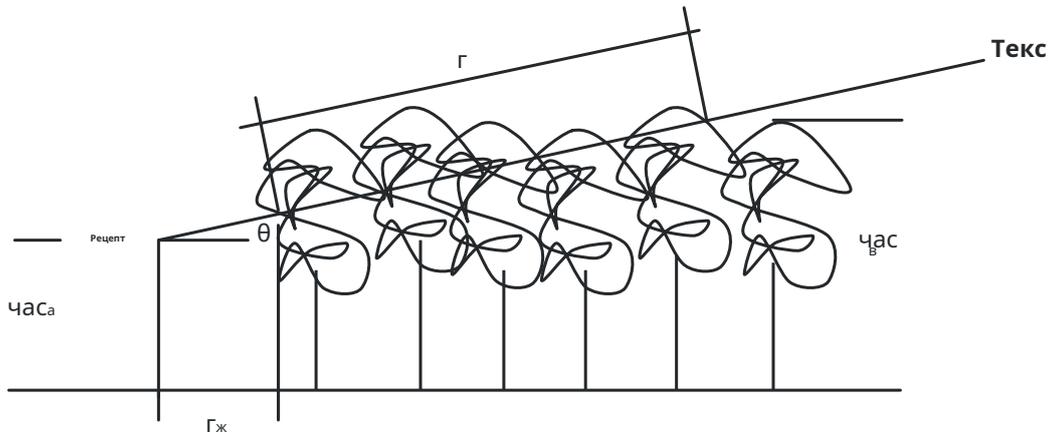
Типичный радиотракт в лесной местности:

На рис. 3, Передатчик (TX) и Приемник (RX) находятся за пределами леса. Соответствующие параметры:

- длина растительной дорожки, l ;
- средняя высота дерева, h ;
- высота антенны Rx над землей, h_a ;
- угол места радиотрассы, θ ;
- расстояние от антенны до придорожного леса, $l_{ж}$.

РИСУНОК 3

Типичный радиотракт в лесу с длиной пути распространения растительности, $г$, средняя высота дерева, $час$, высота антенны Rx над землей, $час_a$, угол места радиотрассы, θ и расстояние антенны к придорожному лесу, $Г_ж$



P.0833-03

Чтобы описать потери затухания, для распространения как горизонтальной, так и наклонной листы предлагается следующая модель:

$$L(\text{дБ}) = A \phi^B \Gamma^C (\theta + \varepsilon) \Gamma \quad (3)$$

где:

ϕ : частота (МГц)

Γ : глубина растительности (м)

θ : высота (градусы)

A, B, C, ε , и Γ : эмпирически найденные параметры.

Подгонка под измерения, проведенные в сосновом лесу в Австрии, дала:

$$L(\text{дБ}) = 0,25 \phi^{0,39} \Gamma^{0,25} \theta^{0,05} \quad (4)$$

3 Одиночная вегетативная обструкция

3.1 На частоте 1 ГГц или ниже

Уравнение (1) не применимо для радиотрассы, перекрытой одним растительным препятствием, где оба терминала находятся вне растительной среды, например, для трассы, проходящей через полог одного дерева. На УКВ и УВЧ, где удельное затухание имеет относительно низкие значения, и особенно там, где растительная часть радиотрассы относительно коротка, эта ситуация может быть смоделирована на приблизительной основе с точки зрения удельного затухания и максимального предела для общей избыточной потери:

$$A_{эт} = \gamma l \quad (5)$$

где:

l : Длина пути в кроне дерева (м)

γ : удельное затухание для очень коротких растительных путей (дБ/м)

и $A_{эт} \leq$: наименьшее избыточное затухание для других путей (дБ).

Ограничение максимального значения для $A_{э}$ необходимо, поскольку, если удельное затухание достаточно велико, вокруг растительности будет существовать путь с меньшими потерями. Приблизительное значение минимального затухания для других путей можно рассчитать, как если бы полог дерева был тонким дифракционным экраном конечной ширины, используя метод Рекомендации МСЭ-Р Р.526.

Подчеркивается, что уравнение (5) с сопутствующим максимальным ограничением на $A_{э}$, является лишь приближением. В целом, он будет склонен переоценивать избыточные потери из-за растительности. Таким образом, он наиболее полезен для приблизительной оценки дополнительных потерь при планировании желаемой услуги. Если он используется для нежелательного сигнала, он может значительно недооценить возникающие помехи.

3.2 Выше 1 ГГц

Для наземных трасс следует применять метод, основанный на RET, описанный в § 3.2.1, для расчета эффекта одного дерева.

Для наклонных траекторий следует применять метод, основанный на теории многократного рассеяния, описанный в § 3.2.2, для расчета эффекта одного дерева.

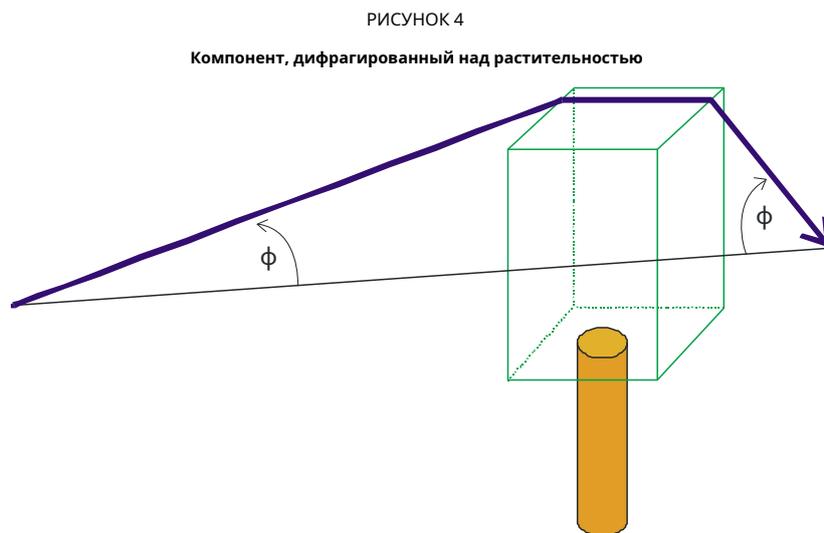
3.2.1 Наземный путь

Для оценки общего поля сначала рассчитываются дифрагированные, отраженные от земли и рассеянные через растительность компоненты, а затем они объединяются.

Дифрагированные компоненты состоят из тех, что находятся над растительностью, и тех, что находятся вокруг ее сторон. Эти компоненты и отраженный от земли компонент рассчитываются с использованием Рекомендаций МСЭ-Р. Сквозной или рассеянный компонент рассчитывается с использованием модели, основанной на теории переноса лучистой энергии (RET).

3.2.1.1 Расчет верхней дифрагированной компоненты

Дифракционные потери, $L_{\text{вершина}}$, испытываемый сигнальным путем, дифрагированным над растительностью, можно рассматривать как двойную изолированную дифракцию на лезвии ножа для геометрии, определенной на рис. 4.



Это рассчитывается следующим образом:

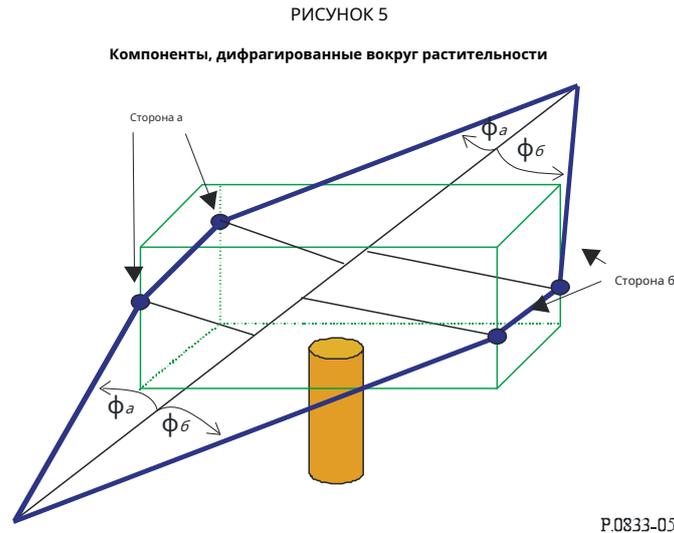
$$L_{\text{вершина}} = L_{\text{вершина_разница}} + \Gamma_{\text{Тек}}(\phi) + \Gamma_{\text{Рецепт}}(\phi)$$

(6)

где $\Gamma_{\text{Текс}}(\varphi)$ и $\Gamma_{\text{Рецепт}}(\varphi)$ — потери, обусловленные углами дифрагированной волны, выходящей из передающей антенны и входящей в приемную антенну соответственно. $L_{\text{Топ_диф}\varphi}$ — общие дифракционные потери, рассчитанные с использованием метода Рекомендации МСЭ-Р Р.526 для двойных изолированных кромок.

3.2.1.2 Расчет боковой дифрагированной составляющей

Дифракционные потери, $L_{\text{Сидеа}}$ и $L_{\text{Сайдб}}$, испытываемый сигналом, дифрагированным вокруг растительности, можно снова рассматривать как двойную изолированную дифракцию на лезвии ножа для геометрии, определенной на рис. 5.



Потери рассчитываются с использованием уравнений (7) и (8).

$$L_{\text{Сидеа}} = L_{\text{Разница_сидеа}} + \Gamma_{\text{Текс}}(\varphi_a) + \Gamma_{\text{Рецепт}}(\varphi_a) \quad (7)$$

и

$$L_{\text{Сайдб}} = L_{\text{Разница_сайдб}} + \Gamma_{\text{Текс}}(\varphi_b) + \Gamma_{\text{Рецепт}}(\varphi_b) \quad (8)$$

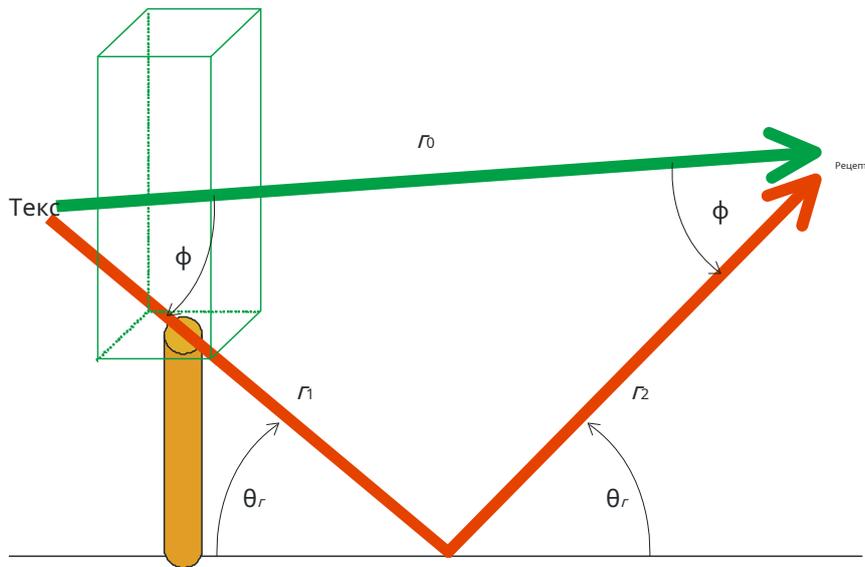
где $\Gamma_{\text{Текс}}(\varphi_{a,b})$ и $\Gamma_{\text{Рецепт}}(\varphi_{a,b})$ — потери, обусловленные углами дифрагированной волны, выходящей из передающей антенны и входящей в приемную антенну, для сторон а и b соответственно. $L_{\text{diff_сидеа}}$ и $L_{\text{diff_сайдб}}$ — общие дифракционные потери вокруг каждой стороны, найденные с использованием метода Рекомендации МСЭ-Р Р.526 для двойных изолированных кромок.

3.2.1.3 Расчет отраженной от земли составляющей

Предполагается, что путь достаточно короткий, чтобы отраженную от земли волну можно было смоделировать с помощью геометрии, показанной на рис. 6.

РИСУНОК 6

Компонент, отраженный от земли



P0833-06

Для расчета потерь, испытываемых волной, отраженной от земли в приемнике, коэффициент отражения, ρ_0 , отраженного от земли сигнала можно рассчитать с заданным углом скольжения θ_r . Это стандартный метод, описанный в Рекомендации МСЭ-Р Р.1238. Значения диэлектрической проницаемости и проводимости получены из Рекомендации МСЭ-Р Р.527.

Потери, испытываемые волной, отраженной от земли, $L_{\text{земля}}$, тогда определяется как:

$$L_{\text{земля}} = 20 \log_{10} \left(\frac{-\Gamma_1 \Gamma_2}{-\Gamma_0} \right) = 20 \log_{10} (\rho_0) + \Gamma_{\text{Текс}}(\phi) + \Gamma_{\text{Рецепт}}(\phi) \quad (9)$$

где $\Gamma_{\text{Рецепт}}(\phi)$ и $\Gamma_{\text{Текс}}(\phi)$ — потери, обусловленные углами отраженной волны, выходящей из передающей антенны и входящей в приемную антенну соответственно.

3.2.1.4 Расчет «сквозной» или рассеянной составляющей

Для того чтобы сделать точные прогнозы избыточного затухания растительности, пользователю необходимо ввести следующие параметры в уравнение RET (уравнение (10)):

- α : отношение мощности прямого рассеяния к полной мощности
- β : рассеяния ширина луча фазовой функции (градусы)
- σ_t : комбинированный коэффициент поглощения и рассеяния
- B_t : альбедо
- $\Delta \varphi$: ширина диаграммы направленности приемной антенны
- Γ : (градусы) расстояние до растительности (м).

Учитывая входные параметры: частоту (ГГц), типичный размер листьев моделируемой растительности и индекс листовой поверхности (LAI) древесной породы, можно получить ближайшее значение α , β , B_t и σ_t из таблиц параметров RET (таблицы 3-6). Если эти параметры недоступны, следует предположить ближайшее соответствие из видов, перечисленных в таблицах.

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

Ослабление из-за рассеивания через растительность, $L_{скат}$, тогда определяется как:

$$L_{скат} = -10 \log_{10} \left\{ e^{-\tau} + \frac{\Delta\gamma^2}{4} \left\{ [e^{-\tau} - e^{-\tau}] \cdot \frac{1}{\Gamma H} \right\} + \frac{\Delta\gamma^2}{2} \left\{ -e^{-\tau} \cdot \frac{1}{\Gamma H} \right\} \right\} \cdot \prod_{k=1}^M \left[A_{ск} \frac{1}{1 - \frac{\mu H}{C_k}} \right] \cdot \frac{1}{M!} (\alpha B \tau)^M \left[\bar{D}_M - \bar{D}_M \right] \quad (10)$$

где:

$\Delta\gamma_{P=0,6} = 0,6 \cdot \Delta\gamma_{3дБ}$: Ширина диаграммы направленности приемной антенны 3 дБ

M : порядок первого члена $A_{ск}$ не изменится существенно для $M > 10$ (следовательно, в большинстве случаев, $M = 10$)

$\tau = (\sigma_a + \sigma_c) \cdot Z$: оптическая плотность τ как функция расстояния.

$$\bar{D}_M = \frac{4}{\Delta\gamma^2 + M\beta^2}$$

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

$$\Gamma_H = \text{грех} \frac{\pi}{2H} \quad (11)$$

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

Коэффициенты затухания, C_k , определяются характеристическим уравнением:

$$\frac{\hat{W}}{2H=0} \cdot \frac{H}{1 - \frac{\mu}{C}} = \frac{\Gamma_H}{1 - \frac{\mu}{C}} = 1$$

где:

$$\Gamma_H = \text{грех} \frac{\pi}{H} = \text{грех} \frac{H\pi}{H}, \quad (H=1, \dots, H-1), \quad \text{и } B\tau = \frac{(1 - \alpha)B\tau}{1 - \alpha B\tau} \quad (12)$$

где H нечетное целое число, выбранное в качестве компромисса для времени вычисления. Большие значения H значительно увеличат время вычислений. Разумные значения были определены как $11 \leq H \leq 21$. Левая часть (10) будет равна 1 для значений C , которые представляют корни этого уравнения. Это даст $H+1$ корни, для которых применимо следующее:

$$C_{0, \dots, \frac{H}{2}} = C, \quad C_{H, \dots, \frac{H+1}{2}}$$

Амплитудные факторы, A_k , определяются системой линейных уравнений, задаваемых формулой:

$$\kappa = \frac{H+1}{2} \frac{A_k}{1 - \frac{\mu_H}{c_k}} = \frac{\delta}{PH} \quad \text{для } H = \frac{H+1}{2} \dots H \quad (13)$$

где:

$$\mu_H = \text{потому что } -\frac{HP}{H}$$

$$\delta_H = 0 \quad \text{для } H \neq H$$

и

$$\delta_H = 1 \quad \text{для } H = H$$

3.2.1.5 Комбинация отдельных компонентов

Общая потеря, *Лобций*, испытываемый сигналом, распространяющимся через деревья, затем определяется комбинацией членов потерь:

$$\text{Лобций} = -10 \text{ журнал} - 10^{-10} \frac{\text{Лсидеа}}{10} + 10^{-10} \frac{\text{Лсайдб}}{10} + 10^{-10} \frac{\text{Лвершина}}{10} + 10^{-10} \frac{\text{Лземля}}{10} + 10^{-10} \frac{\text{Лскаг}}{10} \quad (14)$$

ТАБЛИЦА 2

Параметры растительности

	Лошадь каштан	Клен серебристый		Лондонский самолет		Липа обыкновенная		клен платан	
	В листе	В листе	Из листа	В листе	Из листа	В листе	Из листа	В листе	Из листа
ЛАИ		1.691		1.930		1.475		1.631	0,483
Размер листа (м)	0.300	0.150		0.250		0.100		0.150	

	Гинкго	Вишня, японский	Трезубец клен	корейская сосна	гималайский кедр	Платан, американский	Рассвет-красное дерево
	В листе	В листе	Из листа	В листе	В листе	В листе	В листе
ЛАИ	2.08	1.45	1.95				
Размер листа (м)	0,1 × 0,055	0,05 × 0,08	0,07 × 0,085	0,001 × 0,1	0,001 × 0,046	0,22 × 0,16	0,035 × 0,078

Вишня японская:

Prunus serrulata var.
spontanea Tilia x. Европа

Известь обыкновенная:

Рассветная секвойя:

Метасеквойя глиптостробовидная

Гинкго:

(Ginkgo biloba)

Конский каштан:

Aesculus hippocastanum L

Гималайский кедр:

Cedrus deodara

Лондонский самолет:

Plantanus hispanica muenchh

Корейская сосна:

Pinus Koraiensis

Платан американский:

Платан западный

Клен серебристый:

Клён сахаристый L.

Клен платан:

Клён ложноплатановый L.

Клен трезубый:

Клён бергерийский

ТАБЛИЦА 3

Подобранные значения α с частотой/видом

Частота (Гц)	Лошадь каштан	Клен серебристый		Лондонский самолет		Липа обыкновенная		клен платан	
	В листе	В листе	Из листа	В листе	Из листа	В листе	Из листа	В листе	Из листа
1.3	0,90	0,95	0,90	0,95	0,90	0,90	0,95		0,95
2	0,75		0,95	0,95			0,95		0,95
2.2			0,95	0,50					
11	0,85	0,90		0,70	0,95	0,95	0,95		0,95
37				0,95					
61,5		0,80		0,25				0,90	

Частота (Гц)	Гинкго	Вишня, японский	Трезубец клен	корейская сосна	гималайский кедр	Платан, американский	Рассвет- красное дерево
	В листе	В листе	В листе	В листе	В листе	В листе	В листе
1.5	0,90	0,95	0,95	0,70	0,48	0,95	0,93
2.5	0,90	0,93	0,95	0,82	0,74	0,74	0,82
3.5	0,30	0,90	0,95	0,74	0,92	0,85	0,85
4.5	0,40	0,90	0,90	0,72	0,91	0,75	0,89
5.5	0,40	0,95	0,90	0,73	0,96	0,70	0,82
12.5	0,20	0,16	0,25	0,23	0,27	0,71	0,21

ПРИМЕЧАНИЕ-Размер листа в метрах.

ТАБЛИЦА 4

Подобранные значения β с частотой/видом

Частота (ГГц)	Лошадь каштан	Клен серебристый		Лондонский самолет		Липа обыкновенная		Клен платан	
	В листе	В листе	Из листа	В листе	Из листа	В листе	Из листа	В листе	Из листа
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	

Частота (ГГц)	Гинкго	Вишня, японский	Клен трезубый	корейская сосна	гималайский кедр	Платан, американский	Рассвет- красное дерево
	В листе	В листе	В листе	В листе	В листе	В листе	В листе
1.5	28.65	57.30	18.47	70	51,5	61	44
2.5	36.89	57.30	45.34	55	77,5	23	71
3.5	57.30	114.59	13.43	72	103	105	65
4.5	28.65	114.59	57.30	71	94	65	34
5.5	28.65	229.18	114.59	75	100	77	77
12.5	3.58	3.38	4.25	4.37	3.54	2.36	2.57

ПРИМЕЧАНИЕ. Размер листа в метрах.

ТАБЛИЦА 5

Подогнанных значений альbedo с частотой/видом

Частота (ГГц)	Лошадь каштан	Клен серебристый		Лондонский самолет		Липа обыкновенная		Клен платан	
	В листе	В листе	Из листа	В листе	Из листа	В листе	Из листа	В листе	Из листа
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		0,80		0,50				0,90	

Частота (ГГц)	Гинго	Вишня, японский	Клен трезубый	корейская сосна	гималайский кедр	Платан, американский	Рассвет- красное дерево
	В листе	В листе	В листе	В листе	В листе	В листе	В листе
1.5	0,95	0,95	0,96	0,78	0,43	0,88	0,98
2.5	0,92	0,95	0,95	0,92	0,71	0,71	0,97
3.5	0,10	0,95	0,95	0,71	0,87	0,84	0,93
4.5	0,83	0,30	0,95	0,87	0,92	0,95	0,99
5.5	0,90	0,90	0,95	0,75	0,97	0,96	0,94
12.5	0,97	0,90	0,94	0,98	0,98	0,25	0,99

ПРИМЕЧАНИЕ. Размер листа в метрах.

ТАБЛИЦА 6

Подобранные значения σ_{τ} с частотой/видом

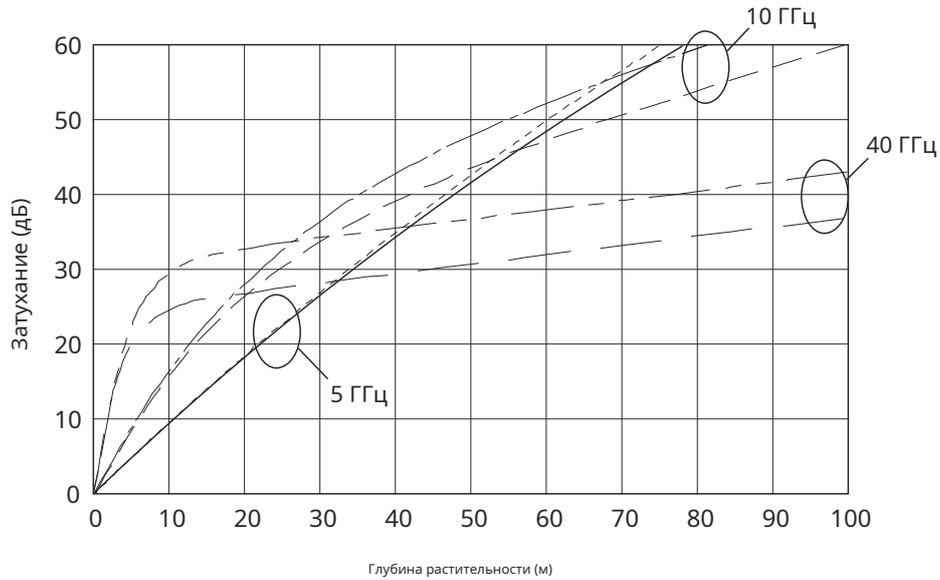
Частота (Гц)	Лошадь каштан	Клен серебристый		Лондонский самолет		Липа обыкновенная		клен платан	
	В листе	В листе	Из листа	В листе	Из листа	В листе	Из листа	В листе	Из листа
1.3	0,772	0,241	0,139	0,147	0,221	0,22	0,591		0.360
2	0,091		0,176	0,203			0,692		0,249
2.2			0,377	0.244					
11	0,124	0,321		0,750	0,459	0,56	0,757		0,179
37				0,441					
61,5		0,567		0,498				0,647	

Частота (Гц)	Гинкго	Вишня, японский	Клен трезубый	корейская сосна	гималайский кедр	Платан, американский	Рассвет- красное дерево
	В листе	В листе	В листе	В листе	В листе	В листе	В листе
1.5	0,40	0.30	0,47	0,215	0,271	0,490	0,261
2.5	1.10	0,49	0,73	0,617	0,402	0,486	0.350
3.5	0.30	0,21	0,73	0.334	0,603	0,513	0.370
4.5	0,46	0.20	0,27	0,545	0,540	0,691	0,266
5.5	0,48	0,24	0,31	0.310	0,502	0,558	0.200
12.5	0,74	0,18	0,47	0.500	0.900	0.170	0,440

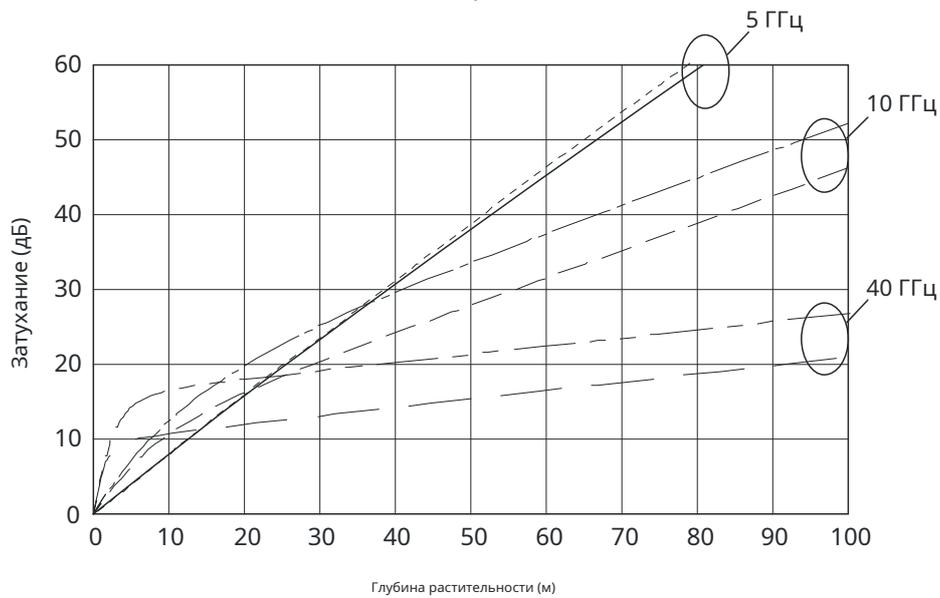
Примечание: Размер листа в метрах.

РИСУНОК 7

Затухание на 0,5 м² и 2 м² площадь освещения, а) в листе, б) вне листа)*



а)



б)

- | | | | |
|---------|----------------------------|-------|----------------------------|
| ----- | 5 ГГц, 0,5 м ² | — — — | 10 ГГц, 2 м ² |
| ———— | 5 ГГц, 2 м ² | — - - | 40 ГГц, 0,5 м ² |
| — - - - | 10 ГГц, 0,5 м ² | ———— | 40 ГГц, 2 м ² |

* Кривые показывают избыточные потери из-за наличия объема листвы, которые будут испытываться сигналом, проходящим через него. В практических ситуациях сигнал за пределами такого объема будет получать вклады из-за распространения как через растительность, так и дифракции вокруг нее. Доминирующий механизм распространения затем ограничит общую потерю растительности.

3.2.2 Наклонная траектория

Для наклонных трасс рекомендуется использовать следующий пошаговый метод для расчета общих потерь из-за дерева, фактора Райса и мелкомасштабного кумулятивного распределения полученной мощности.

Входные параметры модели (см. рис. 8 для определения геометрии):

R : радиус навеса (метры)

$ЧАС$: высота навеса (метры)

$\theta_{я}$: угол возвышения падения на навес (радианы)

$\phi_{я}$: угол азимута падения на навес (радианы)

ϕ_c : Азимутальный угол рассеяния (радианы)

ϕ : частота (ГГц, от 1 до 100 ГГц)

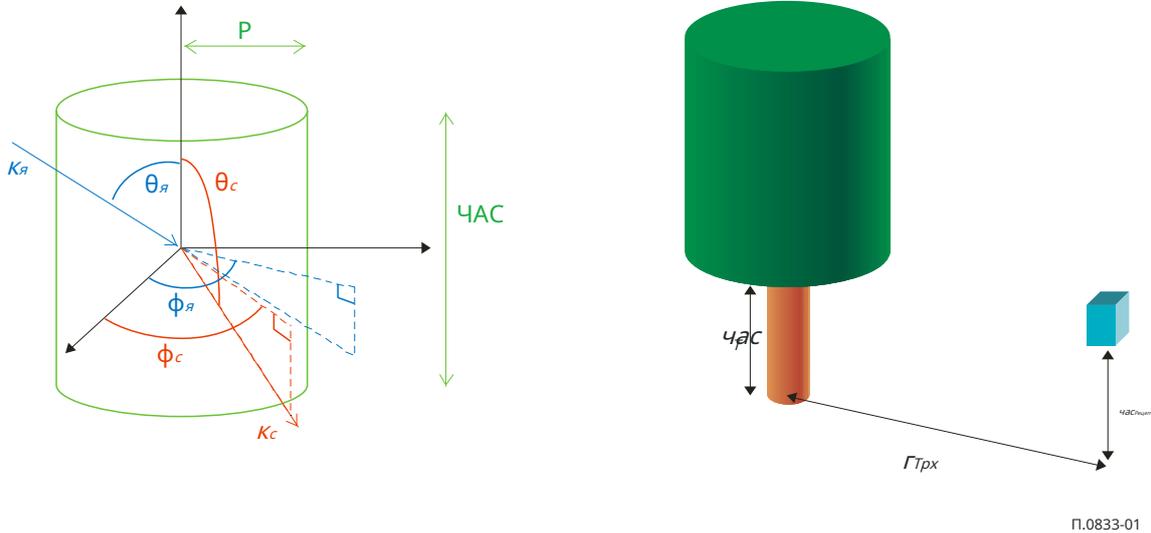
$\Gamma_{Трх}$: горизонтальное расстояние от приемной антенны до дерева

$част$: (метры) высота основания кроны (метры)

$ЧАС_{Рецепт}$: высота приемной антенны (метры, должна быть меньше $част + H/2$)
поляризация связи (B , $ЧАС$, $PXKTM$ или $LHCP$).

РИСУНОК 8

Определение геометрии



Шаг 1 Вычислить θ_c , угол рассеивания по высоте (в радианах):

$$\theta_c = \frac{\pi}{2} - \arctan \left(\frac{ЧАС - ЧАС_{Рецепт}}{част + \frac{\Gamma_{Трх}}{2}} \right) \quad (15)$$

Шаг 2 Определите характеристики ветвей и листьев:

a : радиус (м)

$ЧАС$: длина (м)

ϵ_r : диэлектрическая проницаемость

ρ : плотность (м-3).

Если, *часи* ρ неизвестны, используйте значения, приведенные в таблице 7, соответствующие типичному дубу.

ТАБЛИЦА 7

Измеренный размер и плотность ветвей и листьев дуба в Бокстеле, Нидерланды.

Тип рассеивателя	Радиус (см)	Длина/толщина (см)	Плотность чисел (м-3)
Филиал (1)	11.4	131	0,013
Филиал (2)	6.0	99	0,073
Филиал (3)	2.8	82	0,41
Филиал (4)	0,7	54	5.1
Филиал (5)	0.2	12	56
Лист	3.7	0,02	420

Если диэлектрическая проницаемость ветвей и листьев неизвестна, ее можно вычислить следующим образом:

– листья:

$$\epsilon_{л} = 3.1686 + \frac{28.938}{1 + Дж} \frac{\phi}{18} - \frac{0.5672}{\phi} Дж \quad (16)$$

– филиалы:

$$\epsilon_{б} = \epsilon' (1 + Дж \tan \delta) \quad (17)$$

где ϵ' и тангенс δ вычисляются с частотой ϕ путем линейной интерполяции значений, приведенных в таблице 8.

ТАБЛИЦА 8

Диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь древесины по влаге содержание = 40% и температура = 20°C

Частота (ГГц)	1	2.4	5.8	100
$\epsilon'_{б}$	7.2	6.2	6.0	5.3
тангенс $\delta_{б}$	0,29	0.30	0,37	0,43

Шаг 3 Определим длину волны λ (в метрах):

$$\lambda = \frac{0.3}{\phi} \quad (18)$$

Шаг 4 Для каждой категории ветвей и для категории листьев вычислите тензоры амплитуд рассеяния для следующих значений азимута и угла места ветвей и листьев:

Азимут: $\phi_{подкожно}(\varphi) = \varphi_{\phi} \frac{2\pi}{5}$ с $0 \leq \varphi_{\phi} \leq 5$

Высота: $\theta_{подкожно}(\vartheta) = \vartheta_{\theta} \frac{\beta_{макс}}{5}$ $0 \leq \vartheta_{\theta} \leq 5$ где $\beta_{макс} = \pi/4$ для ветвей категорий (1) и (2) и $\beta_{макс} = \pi/2$ для ветвей категории (3), (4), (5) и листьев.

Шаг 4.1 Вычислить углы падения и выхода в локальной системе координат рассеивателя $\theta_{я,ск}$, $\varphi_{с,ск}$, $\theta_{с,ск}$ и $\varphi_{с,ск}$.

$$\begin{aligned}
 -\theta_{я,ск} &= \arccos(\cos\theta_{я,ск} \cos\theta_{с,ск} - \sin\theta_{я,ск} \sin\theta_{с,ск} \cos(\varphi_{с,ск} - \varphi_{я,ск})) \\
 -\varphi_{с,ск} &= \arctan\left(\frac{\sin\theta_{я,ск} \sin\theta_{с,ск} \sin(\varphi_{с,ск} - \varphi_{я,ск})}{\cos\theta_{я,ск} \cos\theta_{с,ск} - \sin\theta_{я,ск} \sin\theta_{с,ск} \cos(\varphi_{с,ск} - \varphi_{я,ск})}\right) \\
 -\theta_{с,ск} &= \arccos(-\cos\theta_{я,ск} \cos\theta_{с,ск} - \sin\theta_{я,ск} \sin\theta_{с,ск} \cos(\varphi_{с,ск} - \varphi_{я,ск})) \\
 -\varphi_{я,ск} &= \arctan\left(\frac{\sin\theta_{я,ск} \sin\theta_{с,ск} \sin(\varphi_{с,ск} - \varphi_{я,ск})}{\cos\theta_{я,ск} \cos\theta_{с,ск} - \sin\theta_{я,ск} \sin\theta_{с,ск} \cos(\varphi_{с,ск} - \varphi_{я,ск})}\right)
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

Шаг 4.2 Вычислить тензоры рассеяния амплитуды локального кадра ϕ_{VV} , ϕ_{VH} , ϕ_{HV} и ϕ_{HH} для каждой категории ветвей и листьев:

- Филиалы, для которых $\left| \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{\epsilon_r - 1} < 1 \right|$ и оставляет:

$$\begin{aligned}
 -\phi_{VV} &= \frac{-2\pi^2}{\lambda^2} \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \left(a^2 \sin^2\theta_{я,ск} \sin^2\theta_{с,ск} - a^2 \cos^2\theta_{я,ск} \cos^2\theta_{с,ск} \right) \\
 -\phi_{VH} &= \frac{-2\pi^2}{\lambda^2} \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} a^2 \cos\theta_{я,ск} \sin\theta_{я,ск} \sin\theta_{с,ск} \cos\theta_{с,ск} \cos(\varphi_{с,ск} - \varphi_{я,ск}) \\
 -\phi_{HV} &= \frac{-2\pi^2}{\lambda^2} \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} a^2 \sin\theta_{я,ск} \cos\theta_{я,ск} \sin\theta_{с,ск} \cos\theta_{с,ск} \sin(\varphi_{с,ск} - \varphi_{я,ск}) \\
 -\phi_{HH} &= \frac{-2\pi^2}{\lambda^2} \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} a^2 \cos^2\theta_{я,ск} \sin^2\theta_{с,ск} \cos(\varphi_{с,ск} - \varphi_{я,ск}) \\
 -\phi_{VH} &= \frac{-2\pi^2}{\lambda^2} \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} a^2 \cos\theta_{я,ск} \sin\theta_{я,ск} \sin\theta_{с,ск} \cos\theta_{с,ск} \sin(\varphi_{с,ск} - \varphi_{я,ск})
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

с

$$\begin{aligned}
 -a_T &= \frac{1}{(\epsilon_r - 1) \Gamma_T + 1} \\
 -a_H &= \frac{1}{(\epsilon_r - 1) \Gamma_H + 1}
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

где:

- Филиалы:

$$\begin{aligned}
 \beta &= \sqrt{1 - \frac{2a}{\text{час}}^2} \\
 \Gamma_T &= \frac{\beta(\beta - 1)}{2(\beta - 1)} \frac{\beta}{\beta - 1} + \frac{\beta - 1}{2(\beta + 1)} \\
 \Gamma_H &= -(\beta - 1) \frac{\beta - 1}{2(\beta + 1)} + 1
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

Листья:

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{2a}{\text{час}} \\
 \Gamma_T &= \frac{1}{2(M^2 - 1)} \frac{M^2}{\sqrt{M^2 - 1}} \text{грех}^{-1} \frac{\sqrt{M^2 - 1}}{M} - 1 \\
 \Gamma_H &= \frac{M^2}{M^2 - 1} - \frac{1}{\sqrt{M^2 - 1}} \text{грех}^{-1} \frac{\sqrt{M^2 - 1}}{M}
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

$$\begin{aligned}
 \mu &= \frac{a}{\lambda} \frac{2\pi}{\lambda} \frac{a}{50} \text{грех} \theta_{\text{я, подожно}} \frac{a}{\lambda} \frac{2\pi}{\lambda} \frac{a}{50} \text{грех} \theta_{\text{с, подожно}} \\
 &\quad \times \text{ЭКСП} \frac{2\pi}{\lambda} \frac{a}{50} - \frac{1}{2} (\cos \theta_{\text{я, СК}} + \text{потому что } \theta_{\text{с, подожно}}) \frac{a}{50} \frac{\text{час}}{50}
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

Филиалы, для которых $\left| \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{\epsilon_r - 1} \right| > 1$

$$\begin{aligned}
 \phi_{ВВ} &= \frac{2\pi}{\lambda} (\epsilon_r - 1) \text{час} \frac{\mathcal{E}_V(0)(\mathcal{Z}(-1) + \mathcal{Z}(1)) \cos \theta_{\text{я, СК}} \cos \theta_{\text{с, СЦ}}}{2\sqrt{\epsilon_r} \text{потому что } \theta_{\text{я, подожно}}} - \mathcal{Z}(\text{ш}) \theta_{\text{с, подожно}} + \Gamma_{ВВ} \\
 \phi_{ВХ} &= 2 \frac{2\pi}{\lambda} (\epsilon_r - 1) \text{час} \frac{\mathcal{E}_V(\theta)(\mathcal{Z}(\theta) + \mathcal{Z}(\theta)) \cos \theta_{\text{с, подожно}}}{2\sqrt{\epsilon_r} \text{потому что } \theta_{\text{я, подожно}}} - \mathcal{Z}(0) \text{грех} \theta_{\text{с, подожно}} + \Gamma_{ВХ} \\
 \phi_{ЧЧ} &= \frac{2\pi}{\lambda} (\epsilon_r - 1) \text{час} \frac{\text{ЧАС} \text{час}(0)(\mathcal{Z}(-1) + \mathcal{Z}(1))}{2\sqrt{\epsilon_r} \text{потому что } \theta_{\text{я, подожно}}} + \Gamma_{ЧЧ} \\
 \phi_{ВХ} &= \frac{2\pi}{\lambda} (\epsilon_r - 1) \text{час} \Gamma_{ВВ}
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

с:

$$\mu = \frac{\frac{2\pi}{\lambda} \text{грех} \theta_{\text{я, подкжно}} \text{час}(\cos \theta_{\text{я, подкжно}} + \cos \theta_{\text{с, подкжно}})}{\frac{2\pi}{\lambda} \text{час}(\cos \theta_{\text{я, подкжно}} + \cos \theta_{\text{с, подкжно}})} \quad (26)$$

$$\mathcal{Z}(H) = \frac{a^2}{T\theta + Bc} \frac{1}{2} (УДЖ_{H(Bc)} ДЖ_{H+1}(T\theta) - Bc ДЖ_H(T\theta) ДЖ_{H+1}(Bc)) \quad (27)$$

- 20
 - Г_{вв} = 2 - (β(H) Э_в(H) cos θ_{я, подкжно} - ДЖ_α(H) ЧАС_β(H) cos θ_{с, подкжно} - Э(H) Э_в(H) грех θ_{с, подкжно}) потому что (H(φ_{с, подкжно} - φ_{я, подкжно}))
 - H=1
 - 20
 - Г_{вк} = 2 - (β(H) Э_ч(H) cos θ_{я, подкжно} - ДЖ_α(H) ЧАС_ч(H) cos θ_{с, подкжно} - Э(H) Э_в(H) грех θ_{с, подкжно}) грех(H(φ_{с, подкжно} - φ_{я, подкжно}))
 -- H=1
 - 20
 - Г_{чч} = 2 - (β(H) ЧАС_ч(H) + ДЖ_α(H) Э_ч(H) cos θ_{я, подкжно}) потому что (H(φ_{с, подкжно} - φ_{я, подкжно}))
 - H=1
 - 20
 - Г_{вв} = 2 - (β(H) ЧАС_β(H) + ДЖ_α(H) Э_в(H) cos θ_{я, подкжно}) грех(H(φ_{с, подкжно} - φ_{я, подкжно}))
 -- H=1

где:

- Tθ = $\frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{\text{потому что } 2\theta_{\text{я, подкжно}}}$
 - B_я = макс-10-5, $\frac{2\pi}{\lambda} a \text{грех } \theta_{\text{я, подкжно}}$
 - B_с = $\frac{2\pi}{\lambda} a \text{грех } \theta_{\text{с, подкжно}}$

- α_H = $\frac{\mathcal{Z}(H-1) - \mathcal{Z}(H+1)}{2 \sqrt{\text{потому что } 2\theta_{\text{я, подкжно}}}}$
 - β_H = $\frac{\mathcal{Z}(H-1) + \mathcal{Z}(H+1)}{2 \sqrt{\text{потому что } 2\theta_{\text{я, подкжно}}}}$

- Э_в(H) ДЖ грех θ_{я, подкжно} = $\frac{\text{ЧАС}(H)}{P(ДЖ(H))} \frac{ДЖ(H)}{УДЖ(T\theta)}$
 - Э_ч(H) = $\frac{\text{грех } \theta_{\text{я, подкжно}}}{-1(P(ДЖ))} - \frac{1}{-B\text{я}} \text{НСОЗ } \theta_{\text{я, подкжно}}$
 - Ч_в(H) = $\frac{\text{грех } \theta_{\text{я, подкжно}}}{P(ДЖ(T\theta))} - \frac{1}{-B\text{я}} \text{НСОЗ } \theta_{\text{я, подкжно}}$
 - Ч_ч(H) = $\frac{\text{ДЖ грех } \theta_{\text{я, подкжно}} \cdot \Phi(H)}{H(2) H} \frac{ДЖ(H)}{B} - \epsilon \gamma \frac{ДЖ(H)}{H}$

$$\begin{aligned}
 -D_{\lambda}(n) &= \frac{D_{\lambda}(n_{\theta}) - D_{\lambda}(n_{\theta+1})}{2} \\
 -\text{ЧАС}(n) &= \frac{\text{ЧАС}(n_{\theta}) - \text{ЧАС}(n_{\theta+1})}{2}
 \end{aligned}
 \tag{32}$$

$$\begin{aligned}
 -P_{\theta} &= \frac{\pi \text{ВИА}(n_{\theta})}{2} - \frac{\text{ЧАС}(n)}{V_{\theta} H(2)(V_{\theta})} - \frac{D_{\lambda}(n)}{U D_{\lambda}(n)} - \frac{\text{ЧАС}(n)}{V_{\theta} H(2)(V_{\theta})} - \epsilon_r \frac{D_{\lambda}(n)}{U D_{\lambda}(n)} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \text{ из-за подложки}
 \end{aligned}$$

$D_{\lambda}(n)$ – будущий порядок функции Бесселя первого рода

$\text{ЧАС}(n)$ – будущий порядок функции Ганкеля

Шаг 4.3 Рассчитаем коэффициенты поворота кадра:

$$\begin{aligned}
 -T_{\theta} &= -(\sin \theta \cos \theta) \text{ потому что } (\sin \theta - \cos \theta) + \cos \theta \sin \theta \\
 -T_{\theta} &= \sin \theta \cos \theta (\sin \theta - \cos \theta) \\
 -T_{\theta} &= \sin \theta \cos \theta \sin \theta \text{ потому что } (\sin \theta - \cos \theta) - \cos \theta \sin \theta \\
 -T_{\theta} &= \sin \theta \cos \theta (\sin \theta - \cos \theta)
 \end{aligned}
 \tag{33}$$

Шаг 4.4 Вычислить матрицу тензоров рассеяния системы отсчета $\Phi_{VV}, \Phi_{VX}, \Phi_{VVI}, \Phi_{VCI}$ для каждой категории ветвей и листьев:

$$\begin{aligned}
 -\Phi_{VV} &= \frac{1}{\sqrt{(T_{VI} + T_{VI}) (T_{\theta} + T_{\theta})}} [T_{\theta} (\Phi_{VVI} - \Phi_{VVI}) - T_{\theta} (\Phi_{VVI} - \Phi_{VVI})] \\
 -\Phi_{VCI} &= \frac{1}{\sqrt{(T_{VI} + T_{VI}) (T_{\theta} + T_{\theta})}} [T_{\theta} (\Phi_{VVI} + \Phi_{VVI}) + T_{\theta} (\Phi_{VVI} + \Phi_{VVI})] \\
 -\Phi_{VV} &= \frac{1}{\sqrt{(T_{VI} + T_{VI}) (T_{\theta} + T_{\theta})}} [T_{\theta} (\Phi_{VVI} - \Phi_{VVI}) + T_{\theta} (\Phi_{VVI} - \Phi_{VVI})] \\
 -\Phi_{VX} &= \frac{1}{\sqrt{(T_{VI} + T_{VI}) (T_{\theta} + T_{\theta})}} [T_{\theta} (\Phi_{VVI} + \Phi_{VVI}) - T_{\theta} (\Phi_{VVI} + \Phi_{VVI})]
 \end{aligned}
 \tag{34}$$

Шаг 4.5 Вычислить тензор рассеяния амплитуды системы отсчета $\Phi_{\text{скат}}(\theta, \phi)$ для поляризации связей для каждой категории ветвей и листьев:

Вертикальная поляризация	$\Phi_{\text{скат}}(\theta, \phi) = \Phi_{VV}$	
Горизонтальная поляризация	$\Phi_{\text{скат}}(\theta, \phi) = \Phi_{VCI}$	
Правая рука Поляризация	$\Phi_{\text{скат}}(\theta, \phi) = \frac{1}{2} [\Phi_{VV} + \Phi_{VCI} + D_{\lambda}(-\Phi_{VX} + \Phi_{VV})]$	(35)
Левая рука Поляризация	$\Phi_{\text{скат}}(\theta, \phi) = \frac{1}{2} [\Phi_{VV} + \Phi_{VCI} + D_{\lambda}(\Phi_{VX} - \Phi_{VV})]$	

Шаг 5 Для каждой категории ветвей и листьев вычислите первый и второй моменты амплитуды рассеяния:

$$\left. \frac{\partial \Phi_{\text{скат}}}{\partial \theta} \right|_{\theta=0} = \frac{2\pi\beta_{\text{макс}}}{0} \Phi_{\text{скат}}(\theta, \phi) \left. \frac{\partial}{\partial \theta} \right|_{\theta=0} \frac{\sin \theta}{1 - \cos \beta_{\text{макс}}} r \theta r \phi \quad (36)$$

где $\Phi_{\text{скат}}(\theta, \phi) r \theta r \phi$ вычисляется с использованием правила трапеции с учетом:

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{\Delta x}{2} \sum_{k=1}^{N-1} (f(x_{k+1}) + f(x_k))$$

$$\Phi_{\text{скат}}(\theta, \phi) = \Phi_{\text{скат}}(\theta_{\text{я}}, \phi_{\text{я}})$$

$$\Delta \theta = \frac{\beta_{\text{макс}}}{N_{\theta} - 1}$$

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{N_{\phi} - 1}$$

$$N_{\theta} = N_{\phi} = 20$$

Шаг 6 Повторить Шаги 4.1 к 4.5 используя $\theta_c = \pi - \theta_{\text{я}}$ и $\phi_c = \phi_{\text{я}}$ вычислять

$$\left. \frac{\partial \Phi_{\text{скат}}}{\partial \theta} \right|_{\theta=0} = \frac{2\pi\beta_{\text{макс}}}{0} \Phi_{\text{скат}}(\theta, \phi) \frac{\sin \theta}{1 - \cos \beta_{\text{макс}}} r \theta r \phi \quad (37)$$

Шаг 7 Рассчитаем эквивалентную амплитуду рассеяния и эквивалентное сечение рассеяния на единицу объема полога:

$$\Phi_{\text{ЭКВ}} = \int_{\text{ветви \& лисьья}} \left. \frac{\partial \Phi_{\text{скат}}}{\partial \theta} \right|_{\theta=0} \quad (38)$$

$$\sigma^{\text{ЭКВ}} = \int_{\text{ветви \& лисьья}} 4\pi \left. \frac{\partial \Phi_{\text{скат}}}{\partial \theta} \right|_{\theta=0}^2 \quad (39)$$

Шаг 8 Вычислите мнимую часть эффективной постоянной распространения внутри полога, K''_c

$$K''_c = -\frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta_{\text{я}} + \frac{\lambda}{\sin \theta_{\text{я}}} \Phi_{\text{ЭКВ}} \quad (40)$$

Шаг 9 Рассчитайте удельное затухание кроны дерева в децибелах на метр (дБ/м):

$$\alpha_c = 20 K''_c \ln 10 \approx 8.686 K''_c \quad (41)$$

Шаг 10 Рассчитайте мощность диффузного многолучевого распространения относительно уровня прямой видимости, $M_{\text{П}} = 2\sigma_c$:

$$M_{ГТ} = 2\sigma_2 = \frac{\sigma_{ЭКВ} \frac{ЧАС}{2} P P}{4\pi c_2 - \frac{ЧАС}{2} P - P} \exp(-2K^i (d(x,y,z) + c(x,y,z))) dx dy dz \quad (42)$$

где $\int \int \int \phi(x,y,z) dx dy dz$ вычисляется с использованием правила трапеции с учетом:

$$c_{1,0}(x,y,z) = c_{1,0}(x,y,z) \times \min(1, \frac{\frac{ЧАС}{2} z}{c_{1,0}(x,y,z) \cos \theta_{я}}) \quad \text{если } x^2 + y^2 \leq P^2$$

$$c_{1,0}(x,y,z) = 0 \quad \text{если } x^2 + y^2 > P^2 \quad (43)$$

$$c_{1,0}(x,y,z) = \frac{(y \sin \phi_{я} - x \cos \phi_{я}) + \sqrt{(y \sin \phi_{я} - x \cos \phi_{я})^2 - (x^2 + y^2 - P^2)}}{\sin \theta_{я}} \quad (44)$$

$$c_{2,0}(x,y,z) = c_{2,0}(x,y,z) \times \min(1, \frac{\frac{ЧАС}{2} z}{c_{2,0}(x,y,z) \cos \theta_c}) \quad \text{если } x^2 + y^2 \leq P^2$$

$$c_{2,0}(x,y,z) = 0 \quad \text{если } x^2 + y^2 > P^2 \quad (45)$$

$$c_{2,0}(x,y,z) = \frac{(-y \sin \phi_c + x \cos \phi_c) + \sqrt{(y \sin \phi_c - x \cos \phi_c)^2 - (x^2 + y^2 - P^2)}}{\sin \theta_c} \quad (46)$$

$$\Delta x = \Delta y = \Delta z = \frac{\lambda}{4}$$

Шаг 11 Вычислить геометрическую длину пути через дерево, $L_{дерево}$ (м)

Шаг 11.1 Вычислить δ :

$$\delta = P_2 - r_2 \operatorname{Tr} x \operatorname{gr} x^2 (\phi_{я} - \phi_c) \quad (47)$$

Шаг 11.2 Вычислить $L_{дерево}$:

- если $\delta \leq 0$: $L_{дерево} = 0$
- если $\delta > 0$:

$$L_{дерево} = \max(0, \min(\frac{r_1 \operatorname{gr} x (\phi_{я} - \phi_c) + \sqrt{\delta}}{\sin \theta_{я}}, \frac{r_1 \operatorname{gr} x \cos(\phi_{я} - \phi_c) - \sqrt{\delta}}{\cos \theta_{я}})) \quad (48)$$

Шаг 12 Рассчитайте мощность прямого пути относительно уровня прямой видимости, a_2 :

$$a_2 = 10 \frac{-\sigma \times \text{Лдерево}}{10} \quad (49)$$

Шаг 13 Рассчитайте общую мощность пути относительно уровня прямой видимости, Пмалыш:

$$P = a_2 + 2\sigma^2 \quad (50)$$

Шаг 14 Вычислить фактор Райса K(дБ):

$$K = 10 \text{ журнал } 10 \frac{-\sigma}{-2\sigma^2} \quad (51)$$

Шаг 15 Рассчитайте распределение малой кумулятивной мощности с использованием метода Накагами-Райса. распределение определено в Рекомендации МСЭ-Р Р.1057:

$$\text{Вероятность } (X > x) = 2 \text{ опыта} \int_0^{\infty} \frac{a_2}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{x}{\sigma\sqrt{2}}\right) \left(\frac{x}{\sigma\sqrt{2}}\right)^{\frac{a_2}{\sigma^2}} \frac{1}{\sigma\sqrt{2}} dx \quad (52)$$

4 Деполяризация

Предыдущие измерения на частоте 38 ГГц показывают, что деполяризация через растительность может быть большой, т. е. передаваемый кросс-поляризованный сигнал может быть того же порядка, что и кополяризованный сигнал через растительность. Однако для большей глубины растительности, необходимой для этого, затухание будет настолько высоким, что как кополяризованные, так и кросс-поляризованные компоненты будут ниже динамического диапазона приемника.

5 Динамические эффекты

Было замечено, что когда связь проходит через растительность, амплитуда принимаемого сигнала быстро меняется при движении растительности. Основная причина движения — ветер, и измерения на частотах 38 ГГц и 42 ГГц продемонстрировали, что существует сильная корреляция между скоростью изменения амплитуды и скоростью ветра.

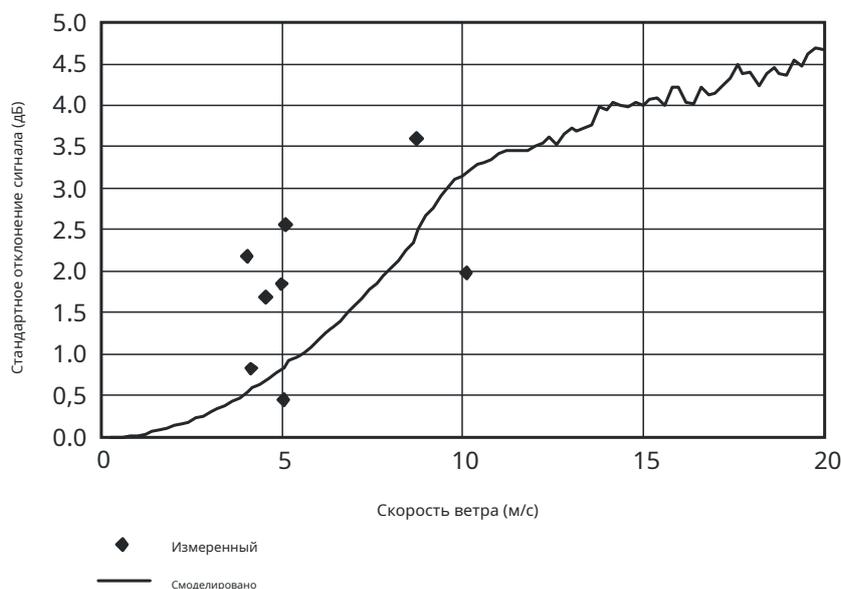
При рассмотрении влияния растительности становится ясно, что окружающая среда не останется статичной. На участке приемника может быть одно или несколько деревьев вдоль пути сигнала, которые не обеспечивают достаточного среднего затухания, чтобы уровень принимаемого сигнала был ниже системного предела. Однако было обнаружено, что по мере перемещения деревьев уровень сигнала динамически изменяется в большом диапазоне, что делает предоставление услуги невозможным. Было проведено несколько измерений уровня сигнала через деревья в зависимости от времени, которые показали среднее снижение уровня сигнала примерно на 20 дБ на дерево. Была обнаружена значительная изменчивость сигнала с частыми выпадениями до 50 дБ затухания, продолжающимися около 10 мс.

Отмечено, что глубокая нулевая структура, наблюдаемая в измерениях временных рядов, может быть получена только путем взаимодействия ряда рассеивающих компонентов в растительности. Для того чтобы смоделировать этот механизм распространения, было рассчитано суммированное поле от ряда рассеивающих источников, случайно расположенных вдоль линии, касательной к пути. Чтобы придать результирующему сигналу подходящую временную изменчивость, положение каждого рассеивателя изменялось синусоидально для имитации движения ветвей деревьев на ветру. Частота и степень изменчивости положения увеличивались с увеличением скорости ветра. Эта модель находилась в разумном согласии с наблюдениями.

Смоделированные временные ряды и стандартные отклонения амплитуды сигнала для скоростей ветра в диапазоне от 0 до 20 м/с представлены на рис. 9 в сравнении с измеренными данными.

РИСУНОК 9

Стандартное отклонение измеренных и смоделированных 40 ГГц
временной ряд как функция скорости ветра



P.0833-08

В простом линейном приближении стандартное отклонение σ моделируется следующим образом:

$$\sigma = v/4 \quad \text{дБ} \quad (53)$$

где v — скорость ветра (м/с).

Следует отметить, что, несмотря на то, что этот тип модели показывает внутреннюю зависимость от частоты, различия в длине пути через деревья невелики, и затухание в типичной полосе пропускания 40 МГц будет выглядеть плоским. Быстрое затухание обусловлено изменчивостью среды во времени.

В таблице 9 представлены типичные данные по среднему значению и стандартному отклонению затухания, измеренные на частоте 38 ГГц для трех типов деревьев в спокойных условиях и при сильном ветре.

ТАБЛИЦА 9

Динамика затухания растительности, измеренная на частоте 38 ГГц

Тип дерева		Куст шиповника (диаметр 2 м)	Яблоня (диаметр 2,8 м)	Сосна (диаметр 1,5 м)
Ветра нет.	Средние потери (дБ)	8.6	17.4	7.7
	Стандарт (дБ)	2.0	2.8	2.2
Сильный ветер	Средние потери (дБ)	11.7	17.8	12.1
	Стандарт (дБ)	4.4	4.2	4.3

6 Характеристики задержки распространения растительности

Принятый сигнал через растительность состоит из многолучевых компонентов из-за рассеивания. Входной сигнал страдает от задержки распространения. Задержка распространения может иметь существенное влияние на широкополосные цифровые системы, и поэтому важно иметь возможность предсказать характеристики задержки распространения из-за распространения через растительность.

Данные в Таблице 10 основаны на данных широкополосных измерений частоты из Республики Корея. Характеристики во временной области были получены для несущего сигнала 3,5 ГГц, модулированного импульсом 1,5 нс. Ширина полосы пропускания по уровню 3 дБ полученного импульсно-модулированного сигнала составляет 0,78 ГГц.

ТАБЛИЦА 10

Характеристики задержки из-за растительности

Параметры	Гинкго	Вишня, японский	Трезубец клен	корейский сосна	Гималайский кедр	Платан, американский	Рассвет- красное дерево
	В листе	В листе	В листе	В листе	В листе	В листе	В листе
Глубина растительности (м)	5.4	6.2	4.3	5.2	4.7	6.5	4.7
Задержка распространения (нс)	7.27	8.23	5.89	6.62	6.39	2.56	6.56