

国 际 电 信 联 盟

**ITU-R**  
国际电联无线电通信部门

**ITU-R P.833-10 建议书**  
(09/2021)

**植被引起的衰减**

**P 系列**  
**无线电波传播**



国际电信联盟

## 前言

无线电通信部门的职责是确保卫星业务等所有无线电通信业务合理、平等、有效、经济地使用无线电频谱，不受频率范围限制地开展研究并在此基础上通过建议书。

无线电通信部门的规则和政策职能由世界或区域无线电通信大会以及无线电通信全会在研究组的支持下履行。

## 知识产权政策（IPR）

ITU-R的IPR政策述于ITU-R第1号决议的附件1中所参引的《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策》。专利持有人用于提交专利声明和许可声明的表格可从<http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/zh>获得，在此处也可获取《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策实施指南》和ITU-R专利信息数据库。

## ITU-R 系列建议书

（也可在线查询 <http://www.itu.int/publ/R-REC/zh>）

系列	标题
<b>BO</b>	卫星传送
<b>BR</b>	用于制作、存档和播出的录制；电视电影
<b>BS</b>	广播业务（声音）
<b>BT</b>	广播业务（电视）
<b>F</b>	固定业务
<b>M</b>	移动、无线电定位、业余和相关卫星业务
<b>P</b>	<b>无线电波传播</b>
<b>RA</b>	射电天文
<b>RS</b>	遥感系统
<b>S</b>	卫星固定业务
<b>SA</b>	空间应用和气象
<b>SF</b>	卫星固定业务和固定业务系统间的频率共用和协调
<b>SM</b>	频谱管理
<b>SNG</b>	卫星新闻采集
<b>TF</b>	时间信号和频率标准发射
<b>V</b>	词汇和相关问题

**说明：** 该ITU-R建议书的英文版本根据ITU-R第1号决议详述的程序予以批准。

电子出版  
2022年，日内瓦

## ITU-R P.833-10 建议书

## 植被引起的衰减

(ITU-R第202/3号研究课题)

(1992-1994-1999-2001-2003-2005-2007-2012-2013-2016年-2021年)

**范围**

本建议书介绍了几种模型，使读者能够对植被对无线电波信号产生的影响进行评估。介绍的模型适用于各种路径几何学情况下的多种植被类型，用来计算信号通过此类植被类型时所产生的衰减。本建议书中亦包含有关植被衰减变化和时延扩展特性的测量数据。

**关键词**

植被、衰减、衰落动态、时延扩展、地面系统、地对空系统

国际电联无线电通信全会，

考虑到

在一些实际应用场合，植被引起的衰减至关重要，

建议

附件1的内容用于评估30 MHz至100 GHz频率范围内由各种形式的植被引起的衰减。

**附件1****1 引言**

对于地面系统和地球-空间系统两者，某些环境下植被引起的衰减至关重要。然而，叶片簇的状态和类型范围很广，以致很难开发通用的衰减预测程序。另外，缺乏合适地整理的经验数据。

下面几节内说明的模型适合于特定的频率范围和不同类型的路径几何学。

**2 林地阻挡****2.1 具有一个林地内终端的地面路径**

对具有一个位于林地内或类似的广阔植被内终端的地面无线电路径来说，因植被引起的附加损耗可于两个参数的基础上加以表征：

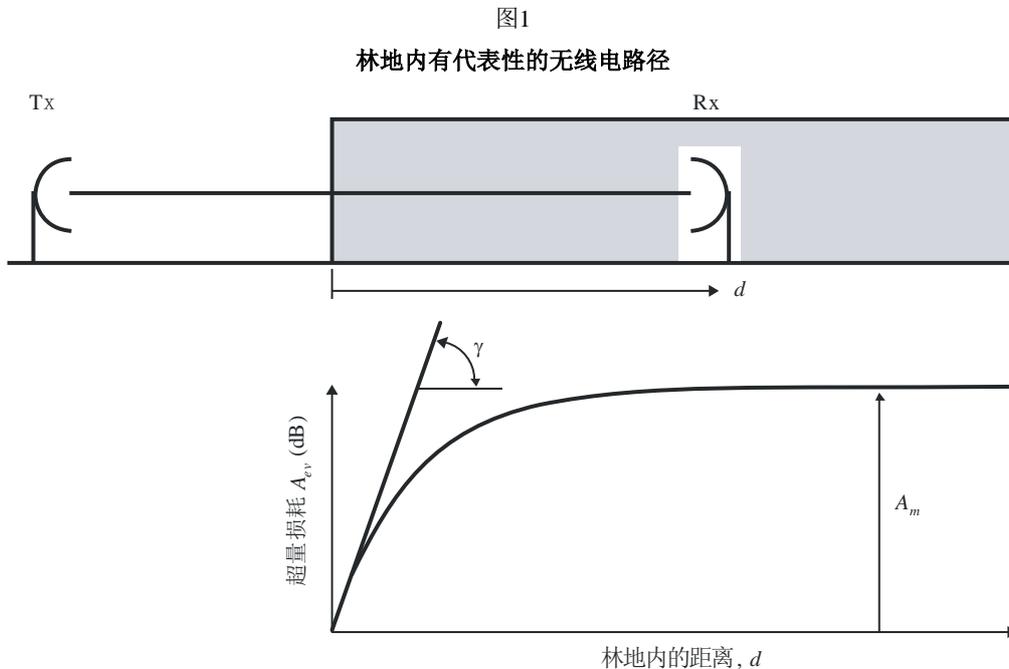
- 对于很短的路径上的测量，主要在于能量散射出无线电路径引起的特有衰减率（dB/m）；
- 限定于其他传播机理效应而言，包括植被介质顶部的表面波传播和植被介质内部的前向散射，由此因植被引起的无线电路径中的最大总附加衰减（dB）。

图1中，发射机处于林地之外，接收机在林地内的一定距离 $d$ 处。因存在植被引起的超量衰减 $A_{ev}$ 由下式给出：

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

式中，

- $d$ : 林地内无线电路径长度（m）；
- $\gamma$ : 很短植被路径引起的特有衰减率（dB/m）；
- $A_m$ : 特定的植被类型和深度引起的终端处最大衰减（dB）。



必需指出，超量衰减 $A_{ev}$ 定义为所有其他不属于自由空间损耗之外的衰减。因此，如果图1中的无线电路径几何学上，地形方面不存在完全的菲涅耳地带，则 $A_{ev}$ 是自由空间损耗和绕射损耗两者之外的衰减。类似地，如果频率足够高而产生显著的气体吸收，则 $A_{ev}$ 是气体吸收之外的衰减。

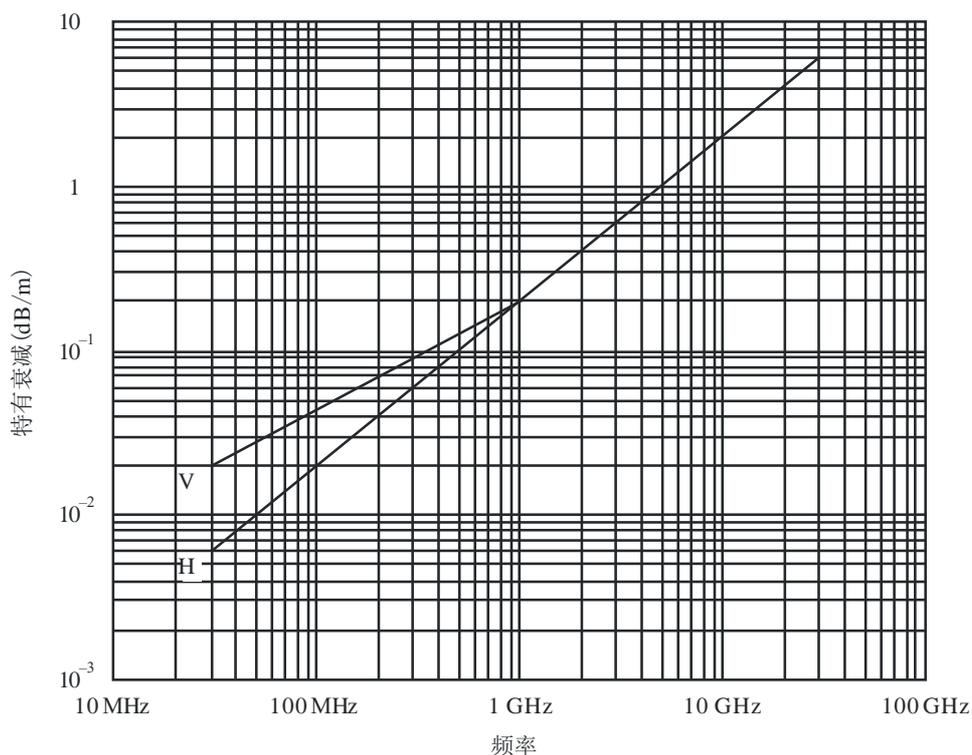
又需指出，最大衰减 $A_m$ 往往指受某种形式的大地被覆或杂乱散射使终端受障碍的等效散乱损耗。

因植被引起的特有衰减率 $\gamma$ （dB/m）取决于植被的种类和密度，相对于频率的近似关系曲线给出于图2。

图2示明在林地内对频率范围30 MHz至大约30 GHz进行的各种测量中得出的特定衰减典型值。约1 GHz频率之下，曲线趋势上垂直极化信号比之水平极化信号受到更大的衰减，这可以设想是树干的散射导致的。

图2

林地造成的特有衰减



V: 垂直极化  
H: 水平极化

P.0833-02

需要强调，因植被引起的衰减会随介质的不规则性质、植被种类和密度的宽广范围以及实际中包含的水容量而变化很大。图2上示明的数值只应看作是典型情况的值。

在1 GHz频率的量级上，带有叶子树木引入的衰减比之无叶子树木大约高出20% (dB/m)。这里，由于风的原因使叶片簇移动还会使衰减变化。

局限于表面波散射的最大衰减 $A_m$ 取决于植被的种类和密度以及植被内终端的天线方向图和天线与植被顶部之间的垂直距离。

在圣彼得堡（俄罗斯）附近的针阔混交林（混交林）中，对路径长度从几百米到7公里不等且树木平均高度16米路径上的105-2 200 MHz频率范围进行了测量。其平均结果与具有表1给出的具体和最大衰减常数的方程(1)相吻合。

表 1

参数	频率 (MHz) 和极化				
	105.9 水平	466.475 倾斜	949.0 倾斜	1852.2 倾斜	2117.5 倾斜
$\gamma$ (dB/m)	0.04	0.12	0.17	0.30	0.34
$A_m$ (dB)	9.4	18.0	26.5	29.0	34.1

$A_m$ (dB)的频率依赖关系有如下形式:

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

式中,  $f$ 的单位为MHz, 已从各种实验中得出如下:

- 频率范围900-1 800 MHz内, 在巴西里约热内卢—热带树公园内进行的测量中, 平均树高15 m时得到 $A_1=0.18$  dB,  $\alpha=0.752$ 。接收天线高度2.4 m。
- 频率范围900-2 200 MHz内, 法国靠近米卢斯市森林内进行的测量中, 路径长度从几百米至6公里, 对于平均高度15 m的多种多样树木, 得到 $A_1=1.15$  dB,  $\alpha=0.43$ 。林地内接收机的天线为安装于汽车上、高度1.6 m的 $\lambda/4$ 单极天线, 发射天线为高度25 m的 $\lambda/2$ 偶极天线。测量值标准偏差为8.7 dB。随季节的变化量在900 MHz上为2 dB, 在2 200 MHz上为8.5 dB。
- 在圣彼得堡(俄罗斯)附近的树高12至16米且平均间距约2至3米(相当于20-10棵树/100平方米)两个森林公园地区的针阔混交林(混交林)中, 进行了105.9-2 117.5 MHz频率范围的测量, 所得的结果为 $A_1=1.37$  dB和 $\alpha=0.42$ 。接收信号采用了高出地面1.5米的四分之一波长偶极天线。接收机与发射天线的间距为0.4至7公里, 而选择测量路径上的天线之间的视距均毫无障碍, 只有须测量的林地。在天气干燥和风速为0至7米/秒的相同条件下, 进行了不同阶段的测量。
- 在英格兰南部的针阔混交林深至200米, 进行了3 605 MHz频率的测量, 得到的 $A_m$ 值为46 dB。测量采用了高出地面2米和10米的定向天线。多径效应是在五条路径进行的数百次单独测量基础上获得的平均值。测量在冬夏两季进行, 但没有发现显著的季节性变化。

## 2.2 地球表面上方卫星、飞机或其他平台的倾斜路径

### 2.2.1 现场特定模型

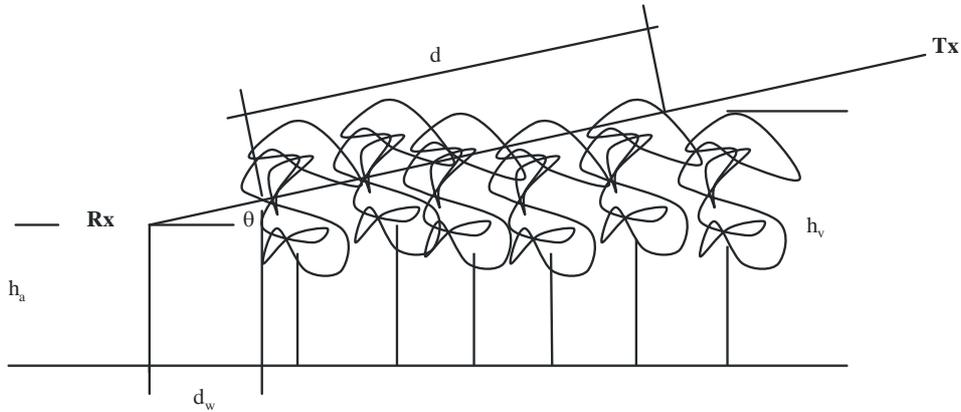
有代表性的林地路径:

图3中的发射机(Tx)和接收机(Rx)处于林地之外。相关参数为:

- 植被路径长度,  $d$ ;
- 平均树高,  $h_v$ ;
- 接收机天线离地高度,  $h_a$ ;
- 无线电路径仰角,  $\theta$ ;
- 天线与路边林地间的距离,  $d_w$ 。

图 3

植被路径长度为  $d$ 、平均树高为  $h_v$ 、接收机天线离地高度为  $h_a$ 、  
无线电路径仰角为  $\theta$  和天线与路边林地间的距离  
为  $d_w$  的有代表性的林地路径



P.0833-03

为说明沿水平和倾斜落叶路径传播的衰减损耗  $L$ ，建议采用以下模型：

$$L(\text{dB}) = A f^B d^C (\theta + E)^G \quad (3)$$

其中：

- $f$ : 频率 (MHz)
- $d$ : 植被深度 (米)
- $\theta$ : 仰角 (度)

$A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $E$  和  $G$ : 经验发现参数。

在奥地利的松树林地进行的拟合测量得出的结果为：

$$L(\text{dB}) = 0.25 f^{0.39} d^{0.25} \theta^{0.05} \quad (4)$$

表2

树木的类型	A	B	C	E	G
奥地利松树	0.25	0.39	0.25	0	0.05

植被因季节而异。以下模型是考虑季节特性的植被损耗。

$$L_{\text{veg}}(\text{dB}) = A f^B \log_{10}(d) (\theta + E)^G - 4 \quad (5)$$

其中：

- $f$ : 频率 (MHz)
- $d$ : 植被深度 (米)
- $\theta$ : 仰角 (度)
- $kh$ :  $|月 - 6.5|$  (在南半球, 使用  $kh = 6 - |月 - 6.5|$  而不是左公式。)
- 月份: 月 (1, 2, 3, ..., 12)
- $B$ :  $(0.30281 - 0.003624kh)(f / 1000)^{(0.0013118 - 0.026236kh)}$

$A$ 、 $E$  和  $G$ : 经验发现参数。

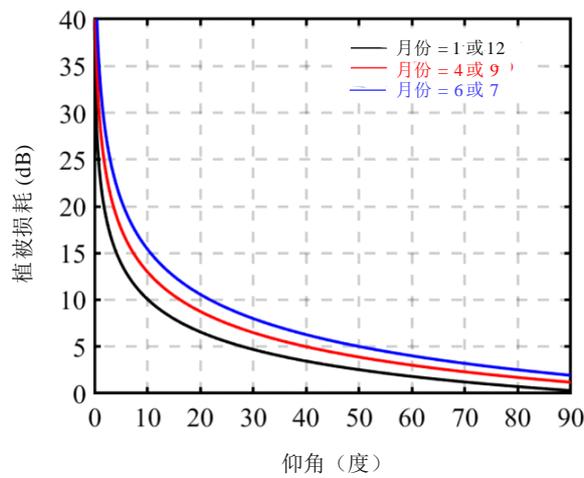
表3

树木的类型	A	E	G
日本雪松	1.87	0.01	-0.12
肯尼亚杜松	1.5	0.01	-0.12

图4显示了一个针对2 GHz、考虑不同月份的季节特性的植被损耗例子。

图4

针对2 GHz、考虑季节特性的植被损耗



P.0833-04

### 2.2.2 现场通用模型

以下统计模型可用作现场通用模型：

$$L(\text{dB}) = A \cdot f^B \cdot \log_{10}(d) \cdot (\theta + E)^G - 4 \cdot (p / 100) + 0.4 \quad (6)$$

其中：

$f$ : 频率 (MHz)

$\theta$ : 仰角 (度)

$d$ :  $243(p / 100)(\theta + 1)^{-0.93047} + 1$

$kh$ :  $5.5 - 5p / 100$  [注：函数由落叶阔叶林等植被类型决定。]

$B$ :  $(0.30281 - 0.003624kh)(f / 1000)^{(0.0013118 - 0.026236kh)}$

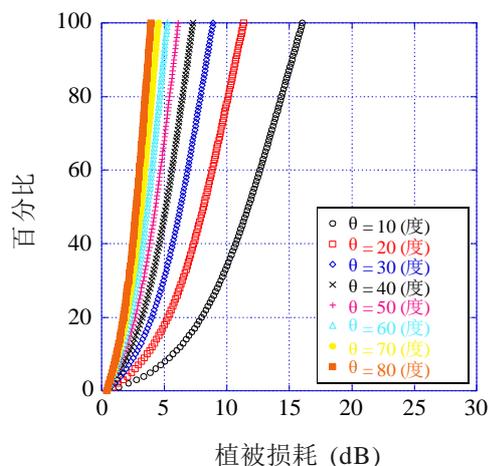
$A$ 、 $E$ 和 $G$ : 经验参数。

为每个区域确定 $A$ 、 $E$ 和 $G$ 。例如，表3中的日本雪松的值可以用于日本的落叶阔叶林等。

图5显示了一个针对2 GHz、在不同仰角、由统计模型计算得到的植被损耗例子。

图5

针对2 GHz、由统计模型计算得到的植被损耗



P.0833-05

### 3 单个植物带障碍

#### 3.1 1 GHz或小于1 GHz

公式(1)并不适合于两个终端均在植被介质之外和无线电路径受到单个植物障碍物阻挡的场合，诸如无线电路径通过单颗大树冠盖的场合。VHF和UHF频带内，特有衰减值比较小，以及尤其是无线电路径中植被部分比较短的场合，对该状态能依照特有衰减及总超量损耗的最大界限值，在近似式基础上建模：

$$A_{et} = d \gamma \quad (7)$$

式中，

$d$ : 大树冠盖内的路径长度 (m)

$\gamma$ : 很短植被路径的特有衰减率 (dB/m)

$A_{et} \leq$ : 其他路径内的最低超量衰减 (dB)。

有必要限制 $A_{et}$ 的最大值，因为特有衰减足够高时，在植被周围会存在损耗较低的路径。应用ITU-R P.526建议书中的方法能够计算其他路径中最小衰减的近似值，将大树冠盖看作为薄的有限宽度的绕射屏蔽。

需要强调，公式(7)连同伴随的 $A_{et}$ 最大界限，只是一种近似。通常，对植被造成的超量损耗有过高估计的倾向。因此，在规划所需业务时，它对于近似估值附加损耗最为有用。如果应用于非所需信号，则可能显著地过低估计产生的干扰。

#### 3.2 1 GHz之上

对地面路径而言，应采用第3.2.1节描述的基于RET的方法计算单棵树的效应。

对斜路径而言，应采用第3.2.2节描述的基于多散射理论的方法计算单棵树的效应。

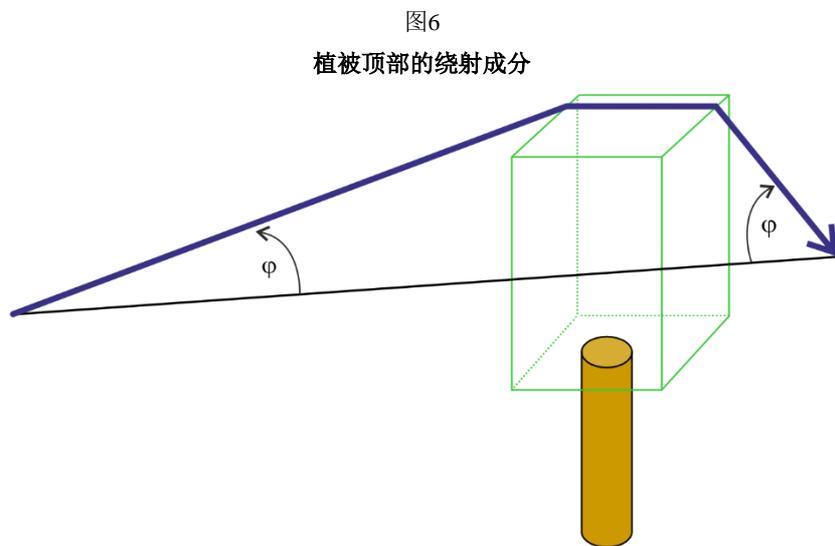
### 3.2.1 地面路径

为了估值总场强，首先计算绕射的成分、大地反射的成分和通过植被散射的成分，然后将它们组合。

绕射成分由植被顶部上的绕射成分和围绕植被边侧的绕射成分构成。这些成分和大地反射的成分可应用ITU-R的建议书进行计算。通过植被的成分或散射的成分，可用基于再辐射能量传递（RET）原理的模型进行计算。

#### 3.2.1.1 植被顶部绕射成分的计算

由植被上方绕射的信号路径引入的绕射损耗 $L_{top}$ ，可处理成图6中定义的几何学内双重孤立的刀背形绕射。



P.0833-06

计算公式如下：

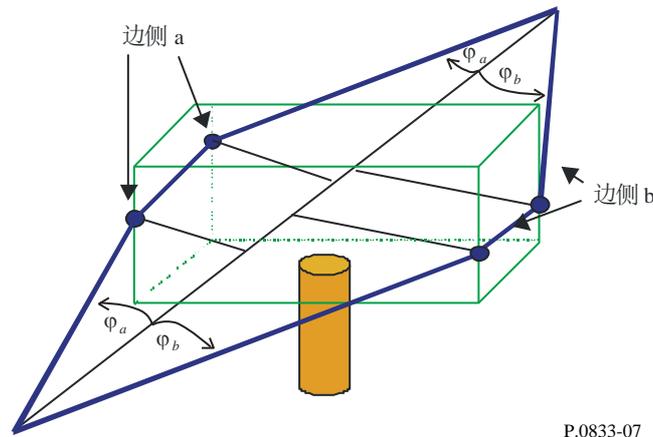
$$L_{top} = L_{top\_diff} + G_{Tx}(\varphi) + G_{Rx}(\varphi) \quad (8)$$

其中， $G_{Tx}(\varphi)$ 和 $G_{Rx}(\varphi)$ 分别是绕射波离开发送天线的角度和到达接收天线的角度引起的损耗。 $L_{top\_diff}$ 是对双重孤立的刀背形障碍应用ITU-R P.526建议书的方法计算出的总绕射损耗。

#### 3.2.1.2 边侧绕射成分的计算

由围绕植被绕射的信号引入的绕射损耗 $L_{sidea}$ 和 $L_{sideb}$ ，同样可处理成图7中定义的几何学内双重孤立的刀背形绕射。

图7  
围绕植被的绕射成分



P.0833-07

应用下面的公式(9)和公式(10)计算边侧绕射损耗:

$$L_{sidea} = L_{diff\_sidea} + G_{Tx}(\varphi_a) + G_{Rx}(\varphi_a) \quad (9)$$

或

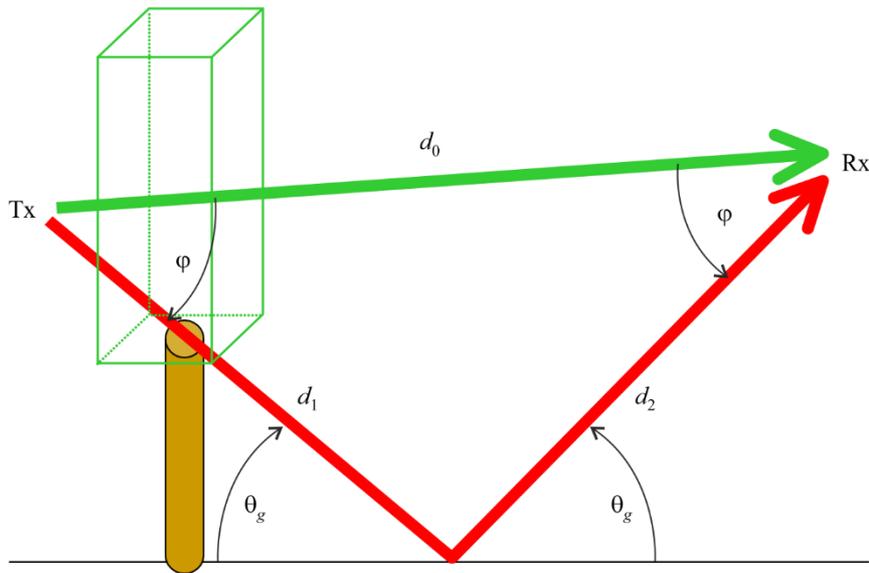
$$L_{sideb} = L_{diff\_sideb} + G_{Tx}(\varphi_b) + G_{Rx}(\varphi_b) \quad (10)$$

其中,  $G_{Tx}(\varphi_{a,b})$ 和 $G_{Rx}(\varphi_{a,b})$ 分别是边侧 $a$ 和边侧 $b$ 上绕射波离开发射天线和到达接收天线的角度引起的损耗。 $L_{diff\_sidea}$ 和 $L_{diff\_sideb}$ 是对双重孤立的刀背形障碍应用ITU-R P.526建议书的方法求出的围绕每个边侧的总绕射损耗。

### 3.2.1.3 大地反射成分的计算

假定反射路径足够短,因而大地反射波可由图8上示明的几何学建模。

图8  
大地反射的成分



P.0833-08

为了计算接收机上由大地反射波引入的损耗，可以在给定的掠射角 $\theta_g$ 下计算大地反射信号的反射系数 $R_0$ 。这是一个标准方法，说明于ITU-R P.1238建议书中。介电常数和电导的数值可从ITU-R P.527建议书中得到。

于是，由大地反射波引入的损耗 $L_{ground}$ 由下式给出：

$$L_{ground} = 20 \log_{10} \left( \frac{d_1 + d_2}{d_0} \right) - 20 \log_{10} (R_0) + G_{Tx}(\varphi) + G_{Rx}(\varphi), \quad (11)$$

其中， $G_{Rx}(\varphi)$ 和 $G_{Tx}(\varphi)$ 分别是反射波离开发射天线和到达接收天线的角度引起的损耗。

#### 3.2.1.4 植被上穿透或散射成分的计算

为了准确预测植被造成的超量衰减，用户需要将下面的参数输入RET公式（式(12)）中：

- $\alpha$ : 前向散射功率与总散射功率之比
- $\beta$ : 波束宽度的相位函数（度）
- $\sigma_\tau$ : 组合的吸收和散射系数
- $W$ : 漫反射系数
- $\Delta\gamma_R$ : 接收天线波束宽度（度）
- $d$ : 进入植被的距离（m）。

给定下面的输入参数：频率（GHz）；需建模植被典型的叶片大小；以及树木种类的叶片面积指数（LAI）。从RET参数表（表5-8）中可得到 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $W$ 和 $\sigma_\tau$ 的最接近值。如果得不到这些参数，应采用表中所列树种内最接近的匹配值。

然后，将4张表中的参数连同频率和接收天线3 dB波束宽度 $\Delta\gamma_{3dB}$ 应用于RET模型中。

于是，因植被散射造成的衰减 $L_{scat}$ 由下式给出：

$$L_{scat} = -10 \log_{10} \left( \begin{aligned} & e^{-\tau} + \frac{\Delta\gamma_R^2}{4} \cdot \{ [e^{-\hat{\tau}} - e^{-\tau}] \cdot \bar{q}_M + e^{-\tau} \cdot \sum_{m=1}^M \frac{1}{m!} (\alpha W \tau)^m [\bar{q}_m - \bar{q}_M] \} \\ & + \frac{\Delta\gamma_R^2}{2} \cdot \{ -e^{-\hat{\tau}} \cdot \frac{1}{P_N} + \sum_{k=\frac{N+1}{2}}^N [A_k e^{-\frac{\hat{\tau}}{s_k}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{\mu_N}{s_k}}] \} \end{aligned} \right) \quad (12)$$

其中：

$\Delta\gamma_R = 0.6 \cdot \Delta\gamma_{3dB}$ ：接收天线3 dB波束宽度；

$m$ ：第一项 $I_1$ 的阶在 $m > 10$ 时不会明显变化（因此，大多数场合下 $M = 10$ ）；

$\tau = (\sigma_a + \sigma_s) \cdot z$ ：光学密度 $\tau$ ，距离 $z$ 的函数；

$$\begin{aligned} \bar{q}_m &= \frac{4}{\Delta\gamma_R^2 + m\beta_S^2} \\ \beta_S &= 0.6 \cdot \beta \\ P_N &= \sin^2 \left( \frac{\pi}{2N} \right) \\ \hat{\tau} &= (1 - \alpha W)\tau \end{aligned} \quad (13)$$

衰减系数 $s_k$ 由下列特征方程确定：

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

其中：

$$P_n = \sin \left( \frac{\pi}{N} \right) \sin \left( \frac{n\pi}{N} \right), (n = 1, \dots, N-1), \text{ 和 } \hat{W} = \frac{(1 - \alpha)W}{1 - \alpha W} \quad (14)$$

对计算时间做出折衷考虑， $N$ 选奇数。 $N$ 取大的值将显著增加计算时间，合理的值确定为 $11 \leq N \leq 21$ 。在一些 $s$ 值下，式(12)的左侧将等于1，这表示它们是方程的根，可产生 $N+1$ 个根，它们符合下式：

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

幅度系数 $A_k$ 由下面的线性方程组给出：

$$\sum_{k=\frac{N+1}{2}}^N \frac{A_k}{1 - \frac{\mu_n}{s_k}} = \frac{\delta_n}{P_N} \quad \text{对于 } n = \frac{N+1}{2} \dots N \quad (15)$$

其中：

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

$$\delta_n = 0 \quad \text{对于 } n \neq N$$

且

$$\delta_n = 1 \quad \text{对于 } n = N$$

### 3.2.1.5 各成分的组合计算

于是，信号传播经过树丛时引起的总损耗 $L_{total}$ 由下面的损耗项组合给出：

$$L_{total} = -10 \log_{10} \left\{ 10^{\left(\frac{-L_{sidea}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{sideb}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{top}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{ground}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{scat}}{10}\right)} \right\} \quad (16)$$

表 4  
植被参数

	七叶树	银枫树		伦敦梧桐		欧椴		美国梧桐	
	叶内	叶内	叶外	叶内	叶外	叶内	叶外	叶内	叶外
叶片面积指数		1.691		1.93		1.475		1.631	0.483
叶片大小(m)	0.300	0.15		0.250		0.100		0.15	

	银杏	日本樱桃	三叉戟枫树	韩国松	喜马拉雅雪松	美国梧桐	水杉
	叶内	叶内	叶外	叶内	叶内	叶内	叶内
叶片面积指数	2.08	1.45	1.95				
叶片大小(m)	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

- 日本樱桃: *Prunus serrulata* var. *spontanea*
- 欧椴: *Tilia x. Europaea*
- 水杉: *Metasequoia glyptostroboides*
- 银杏: *Ginkgo biloba*
- 七叶树: *Aesculus hippocastanum* L
- 喜马拉雅雪松: *Cedrus deodara*
- 伦敦梧桐: *Plantanus hispanica muenchh*
- 韩国松: *Pinus koraiensis*
- 梧桐: *Platanus occidentalis*
- 银枫树: *Acer saccharinum* L
- 美国梧桐: *Acer pseudoplatanus* L
- 三叉戟枫树: *Acer buergerianum*

表 5  
不同频率/树种的适用 $\alpha$ 值

频率 GHz	七叶树	银枫树		伦敦梧桐		欧椴		美国梧桐	
	叶内	叶内	叶外	叶内	叶外	叶内	叶外	叶内	叶外
1.3	0.9	0.95	0.9	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	0.9		0.70	0.95	0.95	0.95		0.95
37				0.95					
61.5		0.8		0.25				0.90	

频率 GHz	银杏	日本樱桃	三叉戟枫树	韩国松	喜马拉雅雪松	美国梧桐	水杉
	叶内	叶内	叶内	叶内	叶内	叶内	叶内
1.5	0.90	0.95	0.95	0.7	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	0.9	0.72	0.91	0.75	0.89
5.5	0.40	0.95	0.9	0.73	0.96	0.70	0.82
12.5	0.20	0.16	0.25	0.23	0.27	0.71	0.21

注：树叶尺寸单位为米。

表 6  
不同频率/树种的适用 $\beta$ 值

频率 GHz	七叶树	银枫树		伦敦梧桐		欧椴		美国梧桐	
	叶内	叶内	叶外	叶内	叶外	叶内	叶外	叶内	叶外
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	

频率 GHz	银杏	日本樱桃	三叉戟枫树	韩国松	喜马拉雅雪松	美国梧桐	水杉
	叶内	叶内	叶内	叶内	叶内	叶内	叶内
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

注：树叶尺寸单位为米。

表 7

## 不同频率/树种的适用返照率 (albedo) 值

频率 GHz	七叶树	银枫树		伦敦梧桐		欧椴		美国梧桐	
	叶内	叶内	叶外	叶内	叶外	叶内	叶外	叶内	叶外
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	

频率 GHz	银杏	日本樱桃	三叉戟枫树	韩国松	喜马拉雅雪松	美国梧桐	水杉
	叶内	叶内	叶内	叶内	叶内	叶内	叶内
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

注：树叶尺寸单位为米。

表 8  
不同频率/树种的适用 $\sigma_r$ 值

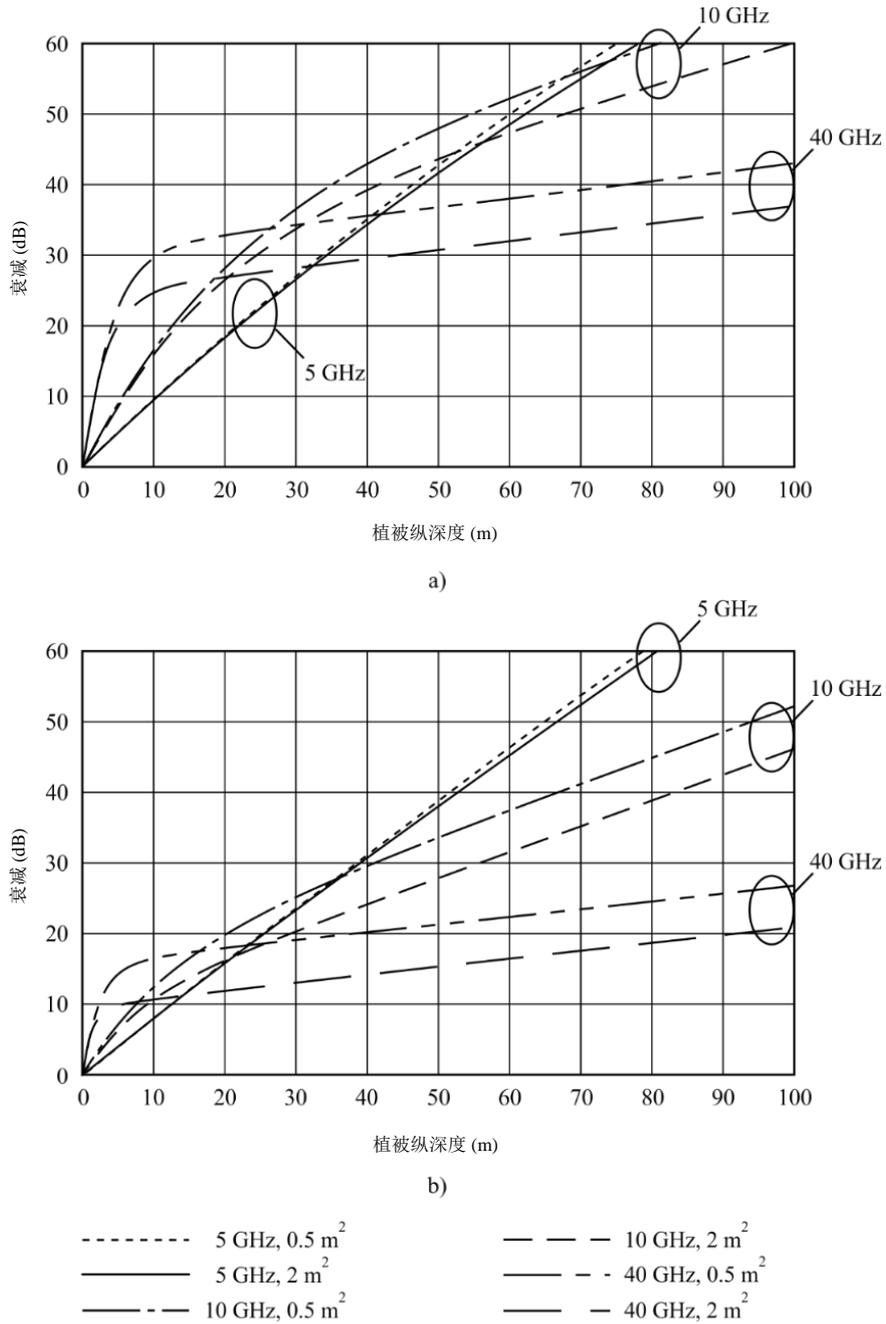
频率 GHz	七叶树	银枫树		伦敦梧桐		欧椴		美国梧桐	
	叶内	叶内	叶外	叶内	叶外	叶内	叶外	叶内	叶外
1.3	0.772	0.241	0.139	0.147	0.221	0.22	0.591		0.36
2	0.091		0.176	0.203			0.692		0.249
2.2			0.377	0.244					
11	0.124	0.321		0.75	0.459	0.56	0.757		0.179
37				0.441					
61.5		0.567		0.498				0.647	

频率 GHz	银杏	日本樱桃	三叉戟枫树	韩国松	喜马拉雅雪松	美国梧桐	水杉
	叶内	叶内	叶内	叶内	叶内	叶内	叶内
1.5	0.40	0.30	0.47	0.215	0.271	0.49	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	0.50	0.90	0.17	0.44

注：树叶尺寸单位为米。

图9

0.5 m<sup>2</sup>和2 m<sup>2</sup>辐射面积的衰减: a) 叶内; b) 叶外\*



P.0833-09

图9的说明：曲线表明存在大容积叶片簇下信号通过时将受到的超量损耗，实际情况中，在此容积之外的信号，由于既有通过植被的传播，又有围绕植被的绕射，将接收此两者。因此，占优的传播理念将限制总的植被造成的损耗。

### 3.2.2 斜路径

对于穿过单颗大树冠盖的斜路径，视频率低于还是高于30 GHz，推荐两种方法。

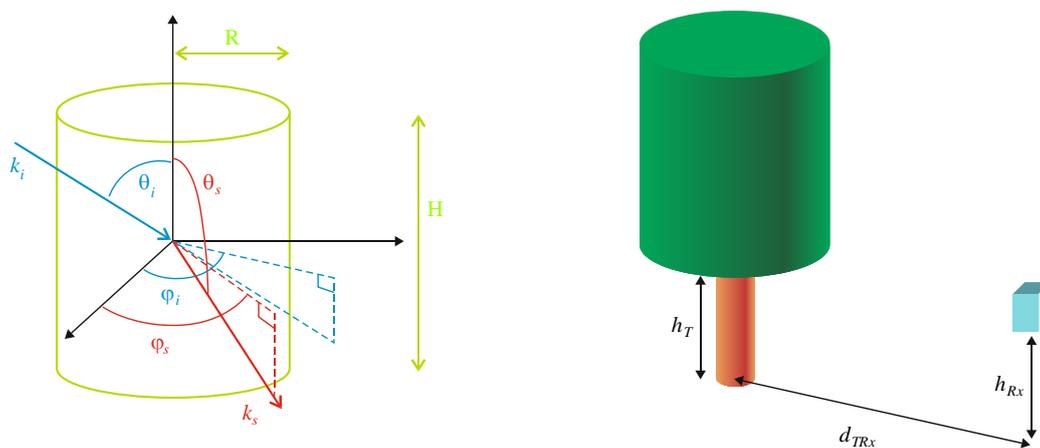
### 3.2.2.1 1至30 GHz

对低于30 GHz（不含）的频率，推荐采用以下分步骤方法计算由树木、莱斯因子和小规模接收功率累计分布造成的总损耗。

模型输入参数为（几何定义见图10）：

- $R$ : 树冠半径（米）
- $H$ : 树冠高度（米）
- $\theta_i$ : 至树冠的倾角（弧度）
- $\varphi_i$ : 至树冠的倾斜方位角（弧度）
- $\varphi_s$ : 方位散射角（弧度）
- $f$ : 频率（GHz, 1至30 GHz）
- $d_{TRx}$ : 接收天线至树木的横向距离（米）
- $h_T$ : 树冠基高度（米）
- $h_{Rx}$ : 接收天线高度（米，必须小于 $h_T + H/2$ ）；  
链路极化（V、H、RHCP或LHCP）。

图10  
几何定义



P.0833-10

步骤1 计算散射仰角 $\theta_s$ （弧度）：

$$\theta_s = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left( h_{Rx} - \left( h_T + \frac{H}{2} \right), d_{TRx} \right) \quad (17)$$

步骤2 确定树叉和树叶的特性：

- $a$ : 半径 (m)
- $h$ : 长度 (m)
- $\epsilon_r$ : 介电常数
- $\rho$ : 密度 ( $m^{-3}$ )

如已知 $a$ 、 $h$ 和 $\rho$ ，使用表9中对典型橡树相对应的数值。

表9

在荷兰Boxtel测得的橡树树叉和树叶的尺寸和密度

散射类型	半径 (cm)	长度/厚度 (cm)	数密度 ( $\text{m}^{-3}$ )
树叉 (1)	11.4	131	0.013
树叉 (2)	6.0	99	0.073
树叉 (3)	2.8	82	0.41
树叉 (4)	0.7	54	5.1
树叉 (5)	0.2	12	56
树叶	3.7	0.02	420

如未知树叉和树叶的电介常数，则可通过以下方法计算得出：

– 树叶：

$$\varepsilon_l = 3.1686 + \frac{28.938}{1 + j \frac{f}{18}} - j \frac{0.5672}{f} \quad (18)$$

– 树叉：

$$\varepsilon_b = \varepsilon'_b (1 + j \tan \delta_b) \quad (19)$$

其中 $\varepsilon'_b$ 和 $\tan \delta_b$ 是在频率 $f$ 上通过表10给出的数值和线性内插计算得出的。

表10

湿度为40%和温度为20°C时的树林电介常数和损耗正切

频率 (GHz)	1	2.4	5.8	30
$\varepsilon'_b$	7.2	6.2	6.0	5.3
$\tan \delta_b$	0.29	0.30	0.37	0.43

步骤3 确定波长 $\lambda$  (米)：

$$\lambda = \frac{0.3}{f} \quad (20)$$

步骤4 为每类树叉和树叶，计算其下列方位和仰角取向值的散射幅度强度：

方位角： $\varphi_{sc}(i_\varphi) = i_\varphi \frac{2\pi}{5}$  且  $0 \leq i_\varphi \leq 5$

仰角： $\theta_{sc}(i_\theta) = i_\theta \frac{\beta_{\max}}{5}$  且  $0 \leq i_\theta \leq 5$ ，其中树叉类(1)和(2)为 $\beta_{\max} = \pi/4$ ，树叉类(3)、(4)、(5)和树叶为 $\beta_{\max} = \pi/2$ 。

步骤4.1 计算散射局部帧  $\theta_{i,sc}$ ,  $\varphi_{s,sc}$ ,  $\theta_{s,sc}$  和  $\varphi_{i,sc}$  的入射角和离去角:

$$\begin{cases} \theta_{i,sc} = \cos^{-1}(\cos\theta_{sc} \cos\theta_i - \sin\theta_{sc} \cos(\varphi_{sc} - \varphi_i)\sin\theta_i) \\ \varphi_{i,sc} = \tan^{-1}(\sin\theta_i \sin(\varphi_i - \varphi_{sc}), \sin\theta_i \cos\theta_{sc} \cos(\varphi_{sc} - \varphi_i) + \sin\theta_{sc} \cos\theta_i) \\ \theta_{s,sc} = \pi - \cos^{-1}(-\cos\theta_{sc} \cos\theta_s - \sin\theta_{sc} \cos(\varphi_{sc} - \varphi_s)\sin\theta_s) \\ \varphi_{s,sc} = \tan^{-1}(\sin\theta_s \sin(\varphi_s - \varphi_{sc}), \sin\theta_s \cos\theta_{sc} \cos(\varphi_{sc} - \varphi_s) + \sin\theta_{sc} \cos\theta_s) \end{cases} \quad (21)$$

步骤4.2 计算每类树叉和树叶的局部帧幅度散射强度  $f_{vv}$ ,  $f_{vh}$ ,  $f_{hv}$  和  $f_{hh}$  :

-  $\left| \frac{2\pi}{\lambda} a\sqrt{\varepsilon_r} - 1 \right| < 1$  的树叉和树叶:

$$\begin{cases} f_{vv} = \frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (\varepsilon_r - 1)}{2} (a_N \sin\theta_{i,sc} \sin\theta_{s,sc} - a_T \cos\theta_{i,sc} \cos\theta_{s,sc} \cos(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc}))\mu \\ f_{hv} = \frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (\varepsilon_r - 1)}{2} a_T \cos\theta_{i,sc} \sin(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc})\mu \\ f_{hh} = \frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (\varepsilon_r - 1)}{2} a_T \cos(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc})\mu \\ f_{vh} = \frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (\varepsilon_r - 1)}{2} a_T \cos\theta_{s,sc} \sin(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc})\mu \end{cases} \quad (22)$$

且

$$\begin{cases} a_T = \frac{1}{(\varepsilon_r - 1)g_t + 1} \\ a_N = \frac{1}{(\varepsilon_r - 1)g_n + 1} \end{cases} \quad (23)$$

其中:

- 树叉:

$$\begin{cases} b = \sqrt{1 - \left(\frac{2a}{h}\right)^2} \\ g_t = \frac{b(b^2 - 1)}{2} \left( \frac{b}{b^2 - 1} + \frac{\log_{10} \frac{b-1}{b+1}}{2} \right) \\ g_n = -(b^2 - 1) \left( \frac{b \log_{10} \frac{b-1}{b+1}}{2} + 1 \right) \end{cases} \quad (24)$$

- 树叶:

$$\begin{cases} m = \frac{2a}{h} \\ g_t = \frac{1}{2(m^2 - 1)} \left( \frac{m^2}{\sqrt{m^2 - 1}} \sin^{-1} \left( \frac{\sqrt{m^2 - 1}}{m} \right) - 1 \right) \\ g_n = \frac{m^2}{m^2 - 1} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{m^2 - 1}} \sin^{-1} \left( \frac{\sqrt{m^2 - 1}}{m} \right) \right) \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \mu = \sum_{n=5}^5 \sum_{l=0}^{50} \sum_{p=0}^{50} \left[ l \frac{a}{50} J_n \left( \frac{2\pi}{\lambda} l \frac{a}{50} \sin \theta_{i,sc} \right) J_n \left( \frac{2\pi}{\lambda} l \frac{a}{50} \sin \theta_{s,sc} \right) \right. \\ \left. \times \exp \left( j \frac{2\pi}{\lambda} h \left( \frac{l}{50} - \frac{1}{2} \right) \right) (\cos \theta_{i,sc} + \cos \theta_{s,sc}) \frac{a}{50} \frac{h}{50} \right] \end{aligned} \quad (26)$$

-  $\left| \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{\epsilon_r} - 1 \right| > 1$  的树叉

$$\begin{cases} f_{vv} = \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 (\epsilon_r - 1) h \mu \left( \frac{E_v(0)(Z(-1) + Z(1)) \cos \theta_{i,sc} \cos \theta_{s,sc}}{2\sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_{i,sc}}} - Z(0) \sin \theta_{s,sc} + G_{vv} \right) \\ f_{vh} = 2j \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 (\epsilon_r - 1) h \mu \left( \frac{E_v(0)(Z(-1) + Z(1)) \cos \theta_{i,sc} \cos \theta_{s,sc}}{2\sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_{i,sc}}} - Z(0) \sin \theta_{s,sc} + G_{vh} \right) \\ f_{hh} = \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 (\epsilon_r - 1) h \mu \left( \frac{H_h(0)(Z(-1) + Z(1))}{2\sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_{i,sc}}} + G_{hh} \right) \\ f_{vh} = j \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 (\epsilon_r - 1) h \mu G_{hv} \end{cases} \quad (27)$$

且:

$$\mu = \frac{\sin \frac{2\pi}{\lambda} h(\cos \theta_{i,sc} + \cos \theta_{s,sc})}{\frac{2\pi}{\lambda} h(\cos \theta_{i,sc} + \cos \theta_{s,sc})} \quad (28)$$

$$Z(n) = \frac{a^2}{u^2 - v_s^2} (uJ_n(v_s)J_{n+1}(u) - v_s J_n(u)J_{n+1}(v_s)) \quad (29)$$

$$\begin{cases} G_{vv} = 2 \sum_{n=1}^{20} (\beta(n)E_v(n)\cos\theta_{i,sc} - j\alpha(n)H_v(n)\cos\theta_{s,sc} - Z(n)E_v(n)\sin\theta_{s,sc})\cos(n(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc})) \\ G_{vh} = 2 \sum_{n=1}^{20} (\beta(n)E_h(n)\cos\theta_{i,sc} - j\alpha(n)H_h(n)\cos\theta_{s,sc} - Z(n)E_v(n)\sin\theta_{s,sc})\sin(n(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc})) \\ G_{hh} = 2 \sum_{n=1}^{20} (\beta(n)H_h(n) + j\alpha(n)E_h(n)\cos\theta_{i,sc})\cos(n(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc})) \\ G_{vv} = 2 \sum_{n=1}^{20} (\beta(n)H_v(n) + j\alpha(n)E_v(n)\cos\theta_{i,sc})\sin(n(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc})) \end{cases} \quad (30)$$

其中:

$$\begin{cases} u = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \theta_{i,sc}} \\ v_i = \max\left(10^{-5}, \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta_{i,sc}\right) \\ v_s = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta_{s,sc} \end{cases} \quad (31)$$

$$\begin{cases} \alpha(n) = \frac{Z(n-1) - Z(n+1)}{2\sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \theta_{i,sc}}} \\ \beta(n) = \frac{Z(n-1) + Z(n+1)}{2\sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \theta_{i,sc}}} \end{cases} \quad (32)$$

$$\begin{cases} E_v(n) = \frac{j \sin \theta_{i,sc}}{R(n)J_n(u)} \left( \frac{H'(n)}{v_i H_n^{(2)}(v_i)} - \frac{J'(n)}{u J_n(u)} \right) \\ E_h(n) = \frac{-\sin \theta_{i,sc}}{R(n)J_n(u)} \left( \frac{1}{v_i^2} - \frac{1}{u^2} \right) n \cos \theta_{i,sc} \\ H_v(n) = \frac{\sin \theta_{i,sc}}{R(n)J_n(u)} \left( \frac{1}{v_i^2} - \frac{1}{u^2} \right) n \cos \theta_{i,sc} \\ H_h(n) = \frac{j \sin \theta_{i,sc}}{R(n)J_n(u)} \left( \frac{H'(n)}{v_i H_n^{(2)}(v_i)} - \epsilon_r \frac{J'(n)}{u J_n(u)} \right) \end{cases} \quad (33)$$

$$\begin{cases} J'(n) = \frac{J_{n-1}(u) - J_{n+1}(u)}{2} \\ H'(n) = \frac{H_{n-1}^{(2)}(v_i) - H_{n+1}^{(2)}(v_i)}{2} \\ R(n) = \frac{\pi v_i^2 H_n^{(2)}(v_i)}{2} \left( \left( \frac{H'(n)}{v_i H_n^{(2)}(v_i)} - \frac{J'(n)}{u J_n(u)} \right) \left( \frac{H'(n)}{v_i H_n^{(2)}(v_i)} - \epsilon_r \frac{J'(n)}{u J_n(u)} \right) - \left( \frac{1}{u^2} - \frac{1}{v_i^2} \right) n \cos \theta_{i,sc} \right) \end{cases} \quad (34)$$

$J_n(\cdot)$  是第一类的 $n^{\text{th}}$ 阶Bessel函数

$H_n^{(2)}(\cdot)$  是 $n^{\text{th}}$ 阶Hankel函数

步骤4.3 计算帧旋转因素:

$$\begin{cases} t_{vi} = -(\sin \theta_{sc} \cos \theta_i \cos(\varphi_{sc} - \varphi_i) + \cos \theta_{sc} \sin \theta_i) \\ t_{hi} = \sin \theta_{sc} \sin(\varphi_{sc} - \varphi_i) \\ t_{vs} = \sin \theta_{sc} \cos \theta_s \cos(\varphi_{sc} - \varphi_s) - \cos \theta_{sc} \sin \theta_s \\ t_{hs} = \sin \theta_{sc} \sin(\varphi_{sc} - \varphi_s) \end{cases} \quad (35)$$

步骤4.4 计算每类树叉和树叶的参考帧散射强度矩阵 $F_{VV}$ ,  $F_{VH}$ ,  $F_{HV}$  和 $F_{HH}$  :

$$\begin{cases} F_{VV} = \frac{1}{\sqrt{(t_{vi}^2 + t_{hi}^2)(t_{vs}^2 + t_{hs}^2)}} [t_{vs}(f_{vv}t_{vi} - f_{vh}t_{hi}) - t_{hs}(f_{hv}t_{vi} - f_{hh}t_{hi})] \\ F_{HH} = \frac{1}{\sqrt{(t_{vi}^2 + t_{hi}^2)(t_{vs}^2 + t_{hs}^2)}} [t_{hs}(f_{vv}t_{hi} + f_{vh}t_{vi}) + t_{vs}(f_{hv}t_{hi} + f_{hh}t_{vi})] \\ F_{HV} = \frac{1}{\sqrt{(t_{vi}^2 + t_{hi}^2)(t_{vs}^2 + t_{hs}^2)}} [t_{hs}(f_{vv}t_{vi} - f_{vh}t_{hi}) + t_{vs}(f_{hv}t_{vi} - f_{hh}t_{hi})] \\ F_{VH} = \frac{1}{\sqrt{(t_{vi}^2 + t_{hi}^2)(t_{vs}^2 + t_{hs}^2)}} [t_{vs}(f_{vv}t_{hi} + f_{vh}t_{vi}) - t_{hs}(f_{hv}t_{hi} + f_{hh}t_{vi})] \end{cases} \quad (36)$$

步骤4.5 计算每类树叉和树叶链路极化的参考帧幅度散射强度 $F_{scat}(i_\theta, i_\varphi)$ :

垂直极化

$$F_{scat}(i_\theta, i_\varphi) = F_{VV} \quad (37)$$

水平极化

$$F_{scat}(i_\theta, i_\varphi) = F_{HH}$$

右旋极化

$$F_{scat}(i_\theta, i_\varphi) = \frac{1}{2}[F_{VV} + F_{HH} + j(-F_{VH} + F_{HV})]$$

左旋极化

$$F_{scat}(i_\theta, i_\varphi) = \frac{1}{2}[F_{VV} + F_{HH} + j(F_{VH} - F_{HV})]$$

步骤5 计算每类树叉和树叶散射幅度的第一次和第二次运动:

$$E\left[|F_{scat}|^2\right]_{b,l} = \int_0^{2\pi\beta_{\max}} \int_0^{\beta_{\max}} |F_{scat}(\theta, \varphi)|^2 \frac{\sin \theta}{1 - \cos \beta_{\max}} d\theta d\varphi \quad (38)$$

其中  $\int_0^{2\pi\beta_{\max}} \int_0^{\beta_{\max}} f(\theta, \varphi) d\theta d\varphi$  利用梯型法则计算得出, 其中考虑到:

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

$$F_{scat}(\theta, \varphi) = F_{scat}(i_\theta, i_\varphi)$$

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

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

$$N_\theta = N_\varphi = 20$$

步骤6 重复步骤4.1至4.5, 使用  $\theta_s = \pi - \theta_i$  和  $\varphi_s = \varphi_i$  来计算

$$E[F_{scat}]_{b,l} = \int_0^{2\pi\beta_{\max}} \int_0^{\beta_{\max}} F_{scat}(\theta, \varphi) \frac{\sin \theta}{1 - \cos \beta_{\max}} d\theta d\varphi \quad (39)$$

步骤7 计算树冠每单位容量的等效散射幅度和等效散射横截面:

$$F^{eq} = \sum_{\text{branches \& leaves}} \rho_{b,l} E[F_{scat}]_{b,l} \quad (40)$$

$$\sigma^{eq} = \sum_{\text{branches \& leaves}} 4\pi \rho_{b,l} E\left[|F_{scat}|^2\right]_{b,l} \quad (41)$$

步骤8 计算树冠  $K_c''$  内有效传播常数的相像部分

$$K_c'' = -imag\left(\frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta_i + \frac{\lambda}{\sin \theta_i} F^{eq}\right) \quad (42)$$

步骤9 计算每米树冠的分贝计 (dB/m)的具体衰减:

$$\alpha_c = 20 K_c'' \log_{10} e = 8.686 K_c'' \quad (43)$$

步骤10 计算相对于 $mp = 2\sigma^2$ 的视距水平的漫射多径功率:

$$mp = 2\sigma^2 = \frac{\sigma^{eq}}{4\pi s^2} \int_{-H/2}^{H/2} \int_{-R}^R \int_{-R}^R \exp(-2K_c''(s_1(x, y, z) + s_2(x, y, z))) dx dy dz \quad (44)$$

其中  $\int_{-H/2}^{H/2} \int_{-R}^R \int_{-R}^R f(x, y, z) dx dy dz$  利用梯型法则计算得出, 其中考虑到:

$$\begin{cases} s_1(x, y, z) = s_{1,0}(x, y, z) \times \min\left(1, \frac{\frac{H}{2} - z}{s_{1,0}(x, y, z) \cos \theta_i}\right) & \text{if } x^2 + y^2 \leq R^2 \\ s_1(x, y, z) = 0 & \text{if } x^2 + y^2 > R^2 \end{cases} \quad (45)$$

$$\text{且 } s_{1,0}(x, y, z) = \frac{(y \sin \varphi_i - x \cos \varphi_i) + \sqrt{(y \sin \varphi_i - x \cos \varphi_i)^2 - (x^2 + y^2 - R^2)}}{\sin \theta_i} \quad (46)$$

$$\begin{cases} s_2(x, y, z) = s_{2,0}(x, y, z) \times \min\left(1, \frac{-\left(\frac{H}{2} + z\right)}{s_{2,0}(x, y, z) \cos \theta_s}\right) & \text{if } x^2 + y^2 \leq R^2 \\ s_2(x, y, z) = 0 & \text{if } x^2 + y^2 > R^2 \end{cases} \quad (47)$$

$$\text{并 } s_{2,0}(x, y, z) = \frac{(-y \sin \varphi_s + x \cos \varphi_s) + \sqrt{(y \sin \varphi_s - x \cos \varphi_s)^2 - (x^2 + y^2 - R^2)}}{\sin \theta_s} \quad (48)$$

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

步骤11 计算通过 $l_{tree}$  (m)树的几何路径长度

步骤11.1 计算 $\delta$ :

$$\delta = R^2 - d_{TRx}^2 \sin^2(\varphi_i - \varphi_s) \quad (49)$$

步骤11.2 计算 $l_{tree}$ :

- 如果  $\delta \leq 0$ :  $l_{tree} = 0$
- 如果  $\delta > 0$ :

$$l_{tree} = \max\left(0, \min\left(\frac{d_{TRx} \cos(\varphi_i - \varphi_s) + \sqrt{\delta}}{\sin \theta_i}, \frac{h_T - h_{Rx} + H}{\cos \theta_i}\right) - \max\left(\frac{d_{TRx} \cos(\varphi_i - \varphi_s) - \sqrt{\delta}}{\sin \theta_i}, \frac{h_T - h_{Rx}}{\cos \theta_i}\right)\right) \quad (50)$$

步骤12 计算相对于视距水平  $a^2$  的直接路径功率:

$$a^2 = 10^{\frac{-\alpha_c \times l_{tree}}{10}} \quad (51)$$

步骤13 计算相对于视距水平  $p_{tot}$  的总路径功率:

$$p_{tot} = a^2 + 2\sigma^2 \quad (52)$$

步骤14 计算莱斯因子  $K$  (dB):

$$K = 10 \log_{10} \left( \frac{a^2}{2\sigma^2} \right) \quad (53)$$

步骤15 使用ITU-R P.1057建议书中确定的Nakagami-Rice分布计算小规模功率累计分布:

$$\text{Prob}(X > x) = 2 \exp \left( -\frac{a^2}{2\sigma^2} \right) \int_{x/\sigma\sqrt{2}}^{\infty} v \exp(-v^2) I_0 \left( \frac{2va}{\sigma\sqrt{2}} \right) dv \quad (54)$$

### 3.2.2.2 30 GHz至100 GHz

对于30 GHz至100 GHz, 推荐采用以下使用准光学建模方法:

步骤1 根据表9对树进行明确建模, 包括所有半径大于 $\lambda/2$  (其中 $\lambda$ 是波长) 的部分 (树枝和树叶)。

步骤2 对于小于 $\lambda/2$ 的部分, 使用1-30 GHz的方法计算冠层参数。

步骤3 确定步骤1中与射线相交的建模部分,

步骤4:

- 如果没有与射线相交的部分, 则使用步骤2中计算的冠层参数;
- 否则, 应在自由空间衰减上增加40 dB的衰减。

### 3.2.3 60.5 GHz时单一树种的季节性影响

植被的衰减是季节性的。由于树叶枯萎, 夏季丰富植被的衰减高于冬季的衰减。

图11显示了60.5 GHz时同一树种在夏季植被丰富时 (没有符号的线) 和在冬季植被贫乏时 (有符号的线) 造成之衰减的累积分布函数: 短划线表示测得的数据, 点虚线表示模拟的数据。

图11

60.5 GHz时同一种树在夏季和冬季造成的衰减

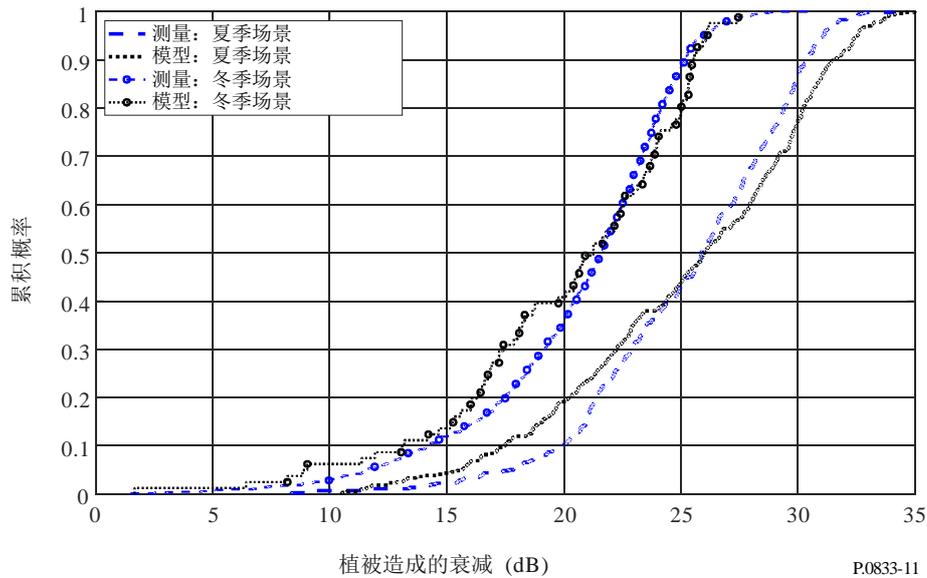


表11给出了威布尔分布的系数 $a$ 和 $b$ ，表征了夏季植被丰富时七种树木和冬季树叶枯萎后植被贫乏时三种树木子集在60.5 GHz上测得的植被造成的衰减。

表11

60.5 GHz时夏季和冬季场景下植被造成的衰减

场景	树木的类型	直径 (m)	衰减洗漱	
			$a$	$b$
夏季	欧洲荨麻	4.5	27.05	7.13
	桦树	5.5	27.53	7.16
	英国橡木	12	27.92	14.91
	广玉兰	5	27.34	7.92
	红厚壳木	6	28.37	6.54
	美国白蜡树	8	24	4.66
	塞尔维亚云杉	5	35.31	11.8
冬季	欧洲荨麻	4.5	22.23	5.9
	桦树	5.5	22.11	3.41
	英国橡木	12	25.77	5.78

威布尔分布的累积分布函数表示为：

$$F(x|a, b) = \int_0^x b a^{-b} t^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b} dt = 1 - e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b} \quad (55)$$

威布尔分布参数 $a$ 和 $b$ 分别代表形状和尺度。

据观察，散射到达角也随季节变化。没有叶子会导致分布中的角展度变窄。

表12给出了正态分布的系数 $\mu$ 和 $\sigma$ ，表征了夏季植被丰富时七种树木和冬季树叶枯萎后植被贫乏时三种树木子集在60.5 GHz上测得的植被造成的散射到达角。

表12  
60.5 GHz时夏季和冬季场景下散射到达角系数

场景	树木的类型	直径 (m)	散射到达角系数 (度)	
			$\mu$	$\sigma$
夏季	欧洲荨麻	4.5	0.45	4.91
	桦树	5.5	0.32	4.05
	英国橡木	12	1.31	4.37
	广玉兰	5	0.45	3.98
	红厚壳木	6	-1.18	4.31
	美国白蜡树	8	-1.89	3.18
	塞尔维亚云杉	5	-0.24	3.7
冬季	欧洲荨麻	4.5	-3.03	3.49
	桦树	5.5	-1.02	3.91
	英国橡木	12	-2.61	4.43

正态分布的累积分布函数表示为：

$$F(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt, \text{ for } x \in \mathbb{R}. \quad (56)$$

正态分布参数 $\mu$ 和 $\sigma$ 分别代表均值和标准差。

#### 4 去极化

先前在38 GHz上的测量表明，通过植被后，去极化效应可能相当大；也就是，发射的交叉极化信号通过植被会成为一种类似阶次的同极化信号。然而，对于较大的植被纵深度，发生这种情况的衰减如此地高，以致同极化成分和交叉极化成分两者都在接收机的动态范围之下。

#### 5 动态效应

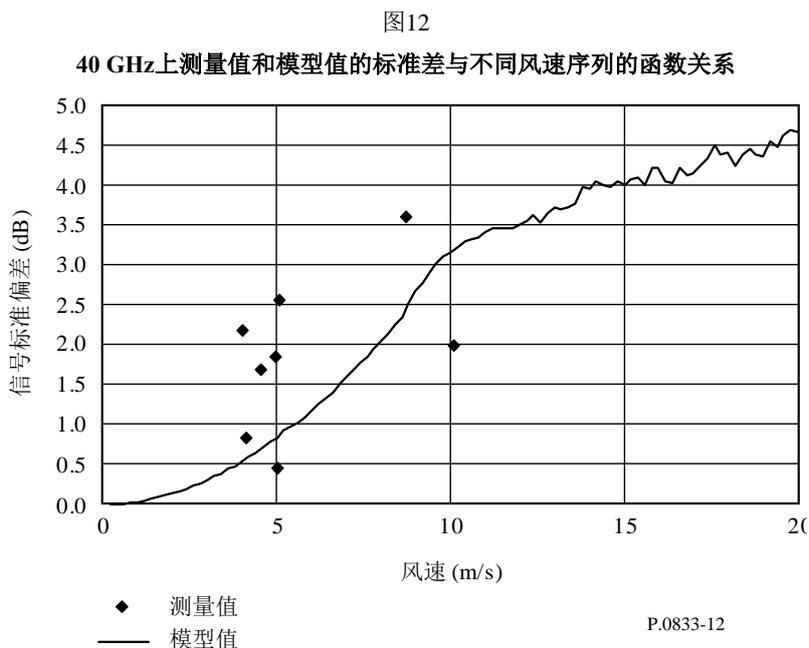
已经观察到，无线电路径通过植被时，植被运动会使接收信号幅度快速变化。植被运动的主要原因在于刮风。38 GHz与42 GHz范围内的测量表明，在幅度起伏率与风速之间存在强关联性。

考虑植被的作用时，显然，环境不会保持静止状态。接收机地点的信号路径中可能有一颗或多颗大树，它们不致给出足够大的平均衰减使接收信号电平低于系统余量。然而，已经发现，当树体运动时，信号电平会在大的范围内动态地变化，使业务的提供实际不可能。无

线电信号经树丛后的测量表明。信号电平是时间的函数，每颗树使信号电平平均下降大约 20 dB。可见到明显的信号电平变动，往往在持续 10 ms 左右的时间里下跌高达 50 dB。

需要指出，在时间序列的测量中，出现深度的零值信号只可能发生于植被内许多散射成分间相互作用时。为了仿真这种传播机理，已经计算沿传播路径切线方向多个随机位置上散射源的场强相加。为得到合成信号，使每个散射源的位置适当地随时间变动，按正弦规律变化以模仿刮风时树枝的运动。随着风速的增大，使频率和位置变动程度增加。该模型与观察的结果相当一致。

图12给出了可与测得的数据进行比较的0到20米/秒范围内的风速信号振幅的时间序列和标准偏差模型。



为了达到简单的线性近似，标准差 $\sigma$ 值的模型如下式：

$$\sigma = v/4 \quad \text{dB} \quad (57)$$

其中， $v$ 为风速（m/s）。

应当指出，尽管事实上这种类型的模型显示出固有的频率依赖性，但通过树丛时路径长度引起的差异很小。在典型的 40 MHz 带宽上，衰落特性呈现平坦形式。快速的衰落是因介质特性随时间变动造成的。

表13示明在无风状态和强风下于 38 GHz 上测量得到的三种树木类型所引起衰减的均值和标准差的典型数据。

表13

38 GHz上测量得的植被引起的动态衰落

树木类型		玫瑰树 (直径2 m)	苹果树 (直径2.8 m)	松树 (直径1.5 m)
无风	平均损耗 (dB)	8.6	17.4	7.7
	标准 (dB)	2.0	2.8	2.2
强风	平均损耗 (dB)	11.7	17.8	12.1
	标准 (dB)	4.4	4.2	4.3

## 6 植被的时延扩展特性

由于散射，穿过植被的接收信号中包含多径成分。输入信号受到了时延扩展的影响。时延扩展可能会对宽带数字系统产生很大影响，因此能够预测因传播通过植被所产生的时延扩展特性至关重要。

表14中的数据是基于大韩民国宽带频率测量数据。通过3.5 GHz载波信号与1.5 ns脉冲的调制得出了时域特性。结果脉冲调制信号的3 dB带宽为0.78 GHz。

表 14

穿越植被时延的特性

参数	银杏	日本 樱桃	三叉戟 枫树	韩国松	喜玛拉雅 雪松	美国 梧桐	水杉
	叶内	叶内	叶内	叶内	叶内	叶内	叶内
植被深度 (m)	5.4	6.2	4.3	5.2	4.7	6.5	4.7
时延扩展 (ns)	7.27	8.23	5.89	6.62	6.39	2.56	6.56