ITU-R P.1623-1建议书*

地 – 空路径衰落动态范围的预测方法

（ITU-R 201/3号研究课题）

(2003-2005)

国际电联无线电通信全会，

考虑到

a) 对于很多无线电通信业务，设计目标必须满足动态中断事件的所需信息；

b) 为了评估失败风险参数，提供具有一定质量和可靠性的服务，必须知道某一时间段内衰落发生的概率；

c) 为了评估抗衰落技术控制环路（用于改善服务质量和可靠性）的内部参数，必须知道对应某一衰减门限的衰落斜率发生的概率；

d) 有必要为衰落持续时间统计、衰落间隔时间统计、衰落斜率统计的计算提供工程信息，

建议

1 采用附件1第2.2节描述的方法计算由地 – 空路径上的衰减（大气、云和降雨）和闪烁组合效应所引起的衰落持续时间统计；

2 采用附件1第3.2节描述的方法计算由地 – 空路径上的衰减引起的衰落斜率统计。

附件1

1 引言

在许多无线电通信系统的设计中，大气传播引起衰落的动态特性对于优化系统容量、满足质量和可靠性标准非常有意义。相关例子为包括一个空间段和应用抗衰落或资源共享技术系统的固定网络。

可以定义几个时间标量，获得某一给定衰减电平的衰落斜率、衰落持续时间和衰落间隔时间的统计信息是非常有益的（图1）。

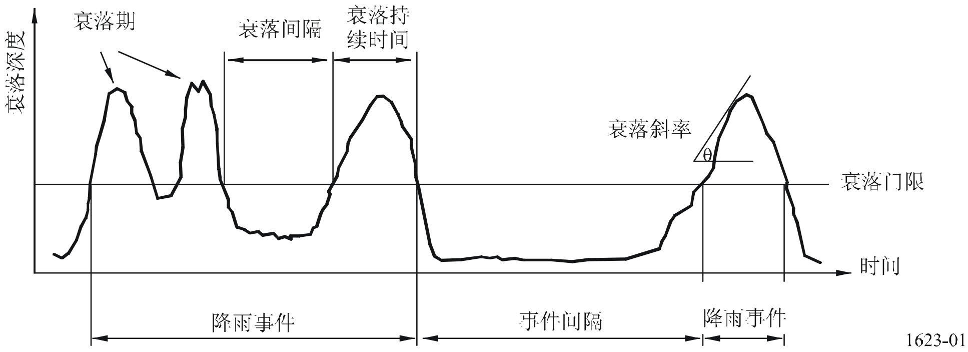
衰落持续时间定义为两个交叉点之间的超过相同衰减门限的时间间隔，而衰落间隔时间定义为两个交叉点之间的低于相同衰减门限的时间间隔。衰落斜率定义为衰落随时间变化的速率。

---

* 无线电通信局秘书处的说明 – 2008年9月对英文版中的第(20)公式进行了编辑性修订。

图 1

衰落事件的动态特征



可用性标准中尤其令人感兴趣的是持续时间大于和小于10秒的衰落的区别。衰落持续时间的分布是衰落深度的函数，它也是在提供无线电通信业务中应用风险机制的先决条件。

另外，预期的衰落斜率信息是评估抗衰落系统所需的最小跟踪速率所必需的。

2 衰落持续时间和衰落间隔时间

2.1 衰落持续时间信息的需求

衰落持续时间是在系统设计中需要考虑的一项重要参数，这是因为：

– 系统中断和不可用：衰落持续时间统计提供了由于在特定链路的传播和业务造成的系统中断和不可用的次数和持续时间信息；

– 系统资源的共享：从操作者的观点来看，为了为其他用户分配资源，了解事件的持续时间统计是重要的；

– 抗衰落技术：衰落持续时间对于定义系统恢复标称模式前处于补偿配置状态的统计持续时间是非常必要的；

– 系统编码和调制：衰落持续时间在选择前向纠错编码和最好的调制类型过程中是一个关键因素；卫星通信系统，传播信道不产生独立差错而是产生块差错。衰落持续时间直接影响编码方案的选择（分组码中码字的大小，链接码的交织方式等）。

2.2 衰落持续时间的预测方法

衰落持续时间可以用两个不同的累积分布函数来描述：

1 $P(d > D|a > A)$，假定衰减a大于A (dB)，持续时间d大于D (s)的衰落发生概率。假定门限A被超过，可用持续时间大于D的衰落次数与所有观测到的衰落次数的比值来估计该概率。

2 $F(d > D|a > A)$，累积超过概率，或等效地说，假定衰减a大于A (dB)，衰落时间中持续时间d大于D (s)的部分的总和（在0和1之间）。假定门限A被超过，可用持续时间大于D的衰落时间与超过门限的总时间的比值来估计该概率。

对于特定的参考期间，持续时间大于D的衰落的次数用发生概率$P(d > D|a > A)$与超过门限$N_{tot}(A)$的所有衰落的次数的乘积来估计。同样，持续时间大于D的衰落事件超过门限的总时间的估计值可以通过累积超过概率$F(d > D|a > A)$与超过门限$T_{tot}(A)$的总时间的乘积获得。

这里所提出的两段模型由长期衰落的对数正态分布函数和短期衰落的指数律函数组成。长期衰落和短期衰落的分界由模型中计算出的持续时间门限D_t确定。指数律函数对持续时间大于1秒的衰落有效。更短持续时间的衰落对于总的中断时间影响很小。

下面提供了模型需要的参数的估计，并最终定义了两个分布函数的两段模型，即发生概率P和超过概率（或时间分数）F。

该模型对持续时间大于1秒的衰落有效。

下面为模型需要的输入参数：

f： 频率(GHz)： 10-50 GHz

φ： 仰角（度）：5-60°

A： 衰减门限(dB)。

衰落持续时间分布的计算步骤如下：

步骤1：假定衰减大于A，根据下式，计算长期衰落的衰落时间部分的对数正态分布的平均持续时间D_0：

$$D_0 = 80\,\varphi^{-0.4}\, f^{1.4}\, A^{-0.39} \qquad \text{s} \tag{1}$$

步骤2：根据下式，计算长期衰落的衰落时间部分的对数正态分布的标准偏差σ：

$$\sigma = 1.85\, f^{-0.05}\, A^{-0.027} \tag{2}$$

步骤3：根据下式，计算短期衰落的衰落时间部分的指数律分布的指数γ：

$$\gamma = 0.055\, f^{0.65}\, A^{-0.003} \tag{3}$$

步骤4：根据下式，计算长期衰落和短期衰落的持续时间分界D_t：

$$D_t = D_0\, \mathrm{e}^{p_1\sigma^2 + p_2\sigma - 0.39} \qquad \text{s} \tag{4}$$

其中：

$$p_1 = 0.885\gamma - 0.814 \tag{5}$$

$$p_2 = -1.05\gamma^2 + 2.23\gamma - 1.61 \tag{6}$$

步骤5：根据下式，计算长期衰落事件发生概率的对数正态分布的平均持续时间D_2：

$$D_2 = D_0 \cdot e^{-\sigma^2} \qquad \text{s} \tag{7}$$

步骤6：根据下式，计算持续时间小于D_t的衰落的时间部分k：

$$k = \left[1 + \frac{\sqrt{D_0 D_2}\,(1-\gamma)\,Q\left(\dfrac{\ln(D_t) - \ln(D_0)}{\sigma}\right)}{D_t \gamma\, Q\left(\dfrac{\ln(D_t) - \ln(D_2)}{\sigma}\right)} \right]^{-1} \tag{8}$$

其中：

Q：正态分布变量的标准累积分布函数

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-\frac{1}{2}x^2}\, dx \tag{9}$$

步骤7：假定衰减a大于A，根据下式，计算持续时间d大于D的衰落事件发生的概率：

对于$1 \le D \le D_t$
$$P(d > D | a > A) = D^{-\gamma} \tag{10}$$

对于$D > D_t$
$$P(d > D | a > A) = D_t^{-\gamma} \cdot \frac{Q\left(\dfrac{\ln(D) - \ln(D_2)}{\sigma}\right)}{Q\left(\dfrac{\ln(D_t) - \ln(D_2)}{\sigma}\right)} \tag{11}$$

步骤8：根据下式，计算累积超过概率，即衰落时间中持续时间d大于D的衰落部分：

对于$1 \le D \le D_t$
$$F(d > D | a > A) = \left[1 - k \left(\frac{D}{D_t} \right)^{1-\gamma} \right] \tag{12}$$

对于$D > D_t$
$$F(d > D | a > A) = (1-k) \cdot \frac{Q\left(\dfrac{\ln(D) - \ln(D_0)}{\sigma}\right)}{Q\left(\dfrac{\ln(D_t) - \ln(D_0)}{\sigma}\right)} \tag{13}$$

步骤9：如果需要，根据下式计算，对于给定门限A，持续时间d大于D的衰落的总次数：

$$N(D, A) = P(d > D | a > A) \times N_{tot}(A) \tag{14}$$

同样，根据下式计算，对于门限A，持续时间d大于D的衰落的总衰落时间：

$$T(d > D|a > A) = F(d > D|a > A) \times T_{tot}(A) \qquad \text{s} \tag{15}$$

对于感兴趣的参考期间，$T_{tot}(A)$为门限A被超过的总衰落时间，$N_{tot}(A)$为超过1秒最小持续时间的衰落总次数。这些参数可以通过下面的方法获得：

$T_{tot}(A)$应该从本地数据获得。如果不能获得长期统计值，可以根据ITU-R P.618建议书计算其估计值。假如这样的话，计算程序为：计算总衰减的累积分布函数，得到参考期间内超过衰减门限A的时间百分比，然后得到相关的总的超过时间$T_{tot}(A)$。

一旦获得$T_{tot}(A)$，就能够根据下式计算$N_{tot}(A)$：

$$N_{tot}(A) = T_{tot}(A) \cdot \frac{k}{\gamma} \cdot \frac{1-\gamma}{D_t^{1-\gamma}} \tag{16}$$

上面的方法经过无线电通信第3研究组在11至50 GHz频带和6°-60°仰角范围的衰落持续时间数据库的测试。发现，对于持续时间小于10秒的衰落，对数误差的算术平均值（对同一概率，衰落持续时间的预测值与测量值的比值）为30%，对于持续时间大于10秒的衰落，对数误差的算术平均值在–25%和–80%之间。就标准偏差而言，发现其误差范围为80%-150%，证明了该参数的高固有可变性。

2.3 衰落间隔时间

除衰落持续时间统计之外，两次衰落之间的时间间隔即衰落间隔时间也是非常有用的。从操作者的观点来看，中断事件后，接收信号的电平一旦低于门限余量，必须知道下一次中断事件发生前的统计间隔持续时间。

实验结果表明，衰落间隔时间统计可能是对数正态分布的；然而，由对流层闪烁造成的短时间的衰落间隔被认为与短期衰落持续时间统计一样服从指数律形式。

3 衰落斜率

3.1 衰落斜率信息的需求

能够将衰落斜率量化对于卫星通信系统实现抗衰落技术非常重要。了解接收信号的衰落斜率对于设计跟踪信号变化的控制环路或对传播条件进行更好的短期预测都是有用的。在这两种情况下，相关信息都是滤除闪烁和雨衰的迅速变化后的信号中慢变化成份的斜率。

3.2 衰落斜率预测方法

衰落斜率概率分布取决于气候参数、雨滴大小分布，因此由降雨的类型决定。与路径垂直的水平风速是影响它的另一个气候参数，其影响取决于水平雨廓线穿过传播路径的速度。而且，对于某一特定衰减电平，预期的衰落斜率很可能会随着路径长度的增加而减小，这是由于不同的降雨作用总平滑影响所引起的，因此，它将会随地 – 空路径仰角的增加而增加。

此外，测量的衰落斜率受接收系统的动态参数或时间常量的影响。具有较长积分时间的接收机会减小衰落的瞬时变化，并使其分布到较长的时间段内。

衰落斜率的预测分布由衰减电平$A(t)$和时间间隔长度Δt决定。也决定于低通滤波器的3 dB截止频率，该滤波器用于从信号中滤除对流层闪烁和雨衰的迅速变化。实验结果表明3 dB截止频率为0.02 Hz时，能够充分的滤除闪烁和雨衰的迅速变化。如果不滤除闪烁和雨衰的迅速变化，信号就会表现出较强的波动，而且该模型只能预测由雨衰形成的衰落的斜率。如果是那样的话，需要作为输入的截止频率是采样频率。

在该模型中，经过滤波后，在某一时间点上的衰落斜率ζ定义为：

$$\zeta(t) = \frac{A\left(t + \frac{1}{2}\Delta t\right) - A\left(t - \frac{1}{2}\Delta t\right)}{\Delta t} \qquad \text{dB/s} \qquad (17)$$

该模型对下列参数范围有效：

– 频率从10至30 GHz

– 仰角从10°至50°。

下面是模型要求的输入参数：

A: 衰减电平（dB）：0-20 dB

f_B: 低通滤波器的3 dB截止频率（Hz）：0.001-1 Hz

Δt: 计算衰落斜率的时间间隔长度（s）：2-200 s。

衰落斜率分布的计算步骤如下：

步骤1：计算函数F，它由时间间隔长度Δt和低通滤波器的3 dB截止频率f_B决定：

$$F(f_B, \Delta t) = \sqrt{\frac{2\pi^2}{\left(1/f_B^b + (2\Delta t)^b\right)^{1/b}}} \qquad (18)$$

其中$b = 2.3$。

步骤2：计算在某一特定衰减电平时的条件衰落斜率的标准偏差σ_ζ：

$$\sigma_\zeta = s\,F(f_B, \Delta t)A \qquad \text{dB/s} \qquad (19)$$

其中s是由气候和仰角决定的参数；仰角在10°和50°之间时，s在欧洲和美国的总平均值为0.01。

步骤3a：计算衰减值为A时衰落斜率等于ζ的条件概率（概率密度函数）$P(|\zeta\,|\,A)$：

$$p(\zeta\,|\,A) = \frac{2}{\pi\sigma_\zeta(1 + (\zeta/\sigma_\zeta)^2)^2} \qquad (20)$$

步骤3b：如果需要，计算衰减值为A时，衰落斜率大于ζ的条件概率（互补累积分布函数）$p(\zeta\,|\,A)$：

$$P\,(\zeta\,|\,A) = \frac{1}{2} - \frac{(\zeta/\sigma_\zeta)}{\pi(1+(\zeta/\sigma_\zeta)^2)} - \frac{\arctan(\zeta/\sigma_\zeta)}{\pi} \tag{21}$$

或计算衰减值为A时，衰落斜率大于ζ的绝对值的条件概率$p(\zeta\,|\,A)$：

$$P(|\zeta|\,|\,A) = \int_{-\infty}^{-\zeta} p(x\,|\,A)\,\mathrm{d}x + \int_{\zeta}^{\infty} p(x\,|\,A)\,\mathrm{d}x = 1 - \frac{2(|\zeta|/\sigma_\zeta)}{\pi(1+(|\zeta|/\sigma_\zeta)^2)} - \frac{2\arctan(|\zeta|/\sigma_\zeta)}{\pi} \tag{22}$$

公式（22）给出的模型经过了在12.5 GHz和50 GHz之间频带数据的测试。结果符合衰落斜率累积分布函数的形状，以及它随衰减门限A、间隔长度Δt和低通滤波器的3 dB截止频率f_B的变化。