

ITU-R F.1093-2 建议书***多径传播对视距数字固定无线系统的设计和运行的影响**

(ITU-R 第 122-4/9 号课题)

(1994-1997-2006 年)

范围

根据无线电通信第 3 研究组的文件内容以及各主管部门所做测量的结果，本建议书介绍了与传播相关的数字无线电接力系统的设计和运行。附件针对在 10GHz 以下频率工作的数字无线电接力系统，将多径衰落作为主要传播因素给出了解释。更多的资料讨论了分集技术和自适应均衡在降低信道劣化中的作用。

ITU 无线电通信全会，

考虑到

- a) 多径传播引起的衰落可能使视距路径上接收到的信号产生失真和受到衰减并且因此使固定无线系统 (FWS) 的性能受到损伤；
- b) ITU-R P.530 建议书为 FWS 传播预测和路径规划提供了数据和方法；
- c) 为了减少多径衰落对系统性能的影响，可以使用诸如分集接收和自适应均衡一类应对措施；
- d) 为了将供选择的设计方案进行比较，需要有分析多径衰落对 FWS 差错性能影响的方法，

建议

- 1** 为了改善差错性能，应该按需要在无线电系统设计中纳入多径衰落应对措施；
- 2** 应采用附件 1 介绍的方法作为无线电链路规划工作中的指导；

* 应提请无线电通信第 3 研究组注意本建议书。

附件 1

多径传播对视距数字固定无线系统的设计和运行的影响

1 引言

本附件的目的是根据无线电通信第 3 研究组文件提供的资料和各主管部门得到的测试结果，介绍数字无线电接力系统的设计和运行中与传播有关的问题。本附件的第一部分说明了多径衰落的作用。对工作于约 10 GHz 以下频率的数字无线电接力系统而言，多径衰落是主要的传播因素。下一部分讨论分集技术和自适应均衡在减小信道劣化方面的作用。最后，附件论述根据上述因素对系统性能进行预测的方法。

有关本建议书中的指导原则的应用的更详细的资料可以参阅“数字无线电接力系统手册”。

2 传播方面的考虑

无线电通信第 3 研究组制定的许多文件中包含大量有关无线电接力系统的设计和运行中需要考虑的传播现象的资料。特别是，ITU-R P.530 建议书着重讨论了“视距无线电接力系统所需要的传播数据和预测方法”。在该建议书中，资料是根据必须考虑的传播效应来编排的。涉及传播机理的有关气象资料在 P 系列其他建议中，特别是 ITU-R P.834 建议书和 ITU-R P.676 建议书中给出。

传播条件逐年逐月都在变化，而且这些传播条件的发生概率的变化范围可能达几个量级。所以，根据传播实验结果得出正确的结论以前，可能要花费 3 到 5 年时间。但是，对系统应用要求来说，经常没有这么长的时间可以用，而且某些参数的变化模型已经在 ITU-R P.841 建议书中得到验证。

根据传播数据可以得出结论，在 10 GHz 以下，对于设计良好的路径、即对没有绕射衰落或表面反射的路径而言，多径传播是主要的因素。在 10 GHz 以上，降水的效应越来越增加，它通过系统可用性指标来决定允许的路径长度。路径长度必须随频率提高而缩短，通常会使得多径衰落的严重性下降。衰落的这两个主要因素通常是互不相容的。若把指标分为可用性和差错性能指标两大项，降水效应主要影响不可用性，而多径传播主要影响差错性能。降水的其他效应如雨的背向散射可能对射频波道配置的选择有影响。

由各种形式的降水引起的传播效应不是频率色散型的，而对流层产生的多径传播可能是频率色散型的，所以，这可能造成承载信息的信号产生严重的失真。数字无线电通信系统的快速发展已经要求对这些效应有更好的了解，并需要有克服这些效应的手段。

3 对传播效应的对抗措施

对传播失真常用的有两个对抗措施：分集技术和自适应信道均衡器，它们用来对付用传播媒质产生的衰减和失真。一般，用改善系数来表示衰落对抗措施的效果。在一个试验路径上，改善系数是没有对抗措施时一系统观察到的中断时间与对抗措施工作时观察到的中断时间的比值（见注 1）。改善系数与选定的中断门限有关。

注 1 — 中断时间是一通用术语，它表示系统超过一选定的比特差错率（BER）门限的时间。

3.1 分集技术

最常用的分集技术是频率分集和空间分集。关于其他分集技术，请参阅 ITU-R F.752 和 ITU-R P.530 建议书和有关数字无线电接力系统的 ITU-R 手册（1996 年版）。

3.1.1 空间分集

空间分集是对抗多径衰落最有效的方法之一。对于数字无线电系统，由于多径衰落所产生的波形失真，性能指标可能难以满足，系统设计必须经常基于使用空间分集。

在空间分集系统中，发生深衰落时，两个在垂直方向上有距离的接收天线所收到的信号极少同时发生衰落。用这两个信号，系统可以达到的改善系数与传播因子和微波系统的装备两个因素有关，即它对信号的功率损耗和多径失真的脆弱性以及它处理功率损耗和多径失真的能力。在估计空间分集可能达到的改善时，公认的作法是利用 ITU-R P.530 建议书中的单频衰落改善系数的公式或利用类似的地区应用中已得到验证的公式，特别是在计算中断概率过程中热噪声的影响经常这样做（见第 4 段）。

由于空间分集降低了深衰落的有效发生率，它可以降低各种干扰的影响。尤其是它可以降低从相同的或相邻的波道频率上的交叉极化波道来的短期干扰效应，以及减少从其他系统和从同一系统内来的干扰。

线性幅度色散（LAD）是波形失真和正交串扰效应的重要组成部分，并且用空间分集可以降低线性幅度色散。专门设计用来减小 LAD（见 ITU-R F.752 建议书）的分集成是众多方法中对付这种失真特别有效的方法。

由空间分集得到的改善将与接收机端如何处理这两个信号有关。这类技术的两个例子是“无冲击”倒换和可变相位合成（见 ITU-R F.752 建议书）。“无冲击”倒换选择眼图开启度比较大和差错率比较低的接收机，而合成器或者利用同相或各种类型的最小色散控制算法。“无冲击”倒换和同相合成的改善系数很相似。

3.1.2 频率分集

有 1 + 1 结构的数字无线电接力段的频率分集改善取决于两个射频 (RF) 波道中劣化 (例如衰落深度、振幅和群时延色散) 的相关性。实验结果发现在间隔 60 MHz 的两个 30 MHz 宽的波道之间的振幅色散的相关性不大。通常, 用交叉频带频率分集可以得到最大的频率分集改善。

在 $N + 1$ 系统中, 一工作波道可以得到的频率分集改善随工作波道数的增加而减小。在研究使用有多接力段倒换段的频率分集时, 必须要考虑到频率分集改善既取决于在一接力段内射频波道之间劣化的相关性, 同时还取决于同一倒换段的其他接力段。

在数字无线电系统中, 为了达到预测的频率分集改善, 倒换系统必须以“无冲击”模式工作, 而且整个倒换程序必须在业务波道显著劣化出现以前完成。响应时间约 10 ms 或更少一些可适合于这个目的。

3.2 自适应信道均衡

在微波波道中, 一般需要某些形式的接收机均衡。为了传输特性能按照传播条件变化而变化, 均衡器必须自适应控制。根据均衡器的工作方式在频域描述还是在时域描述更自然, 可以将使用的均衡技术分为两组: “频域均衡”和“时域均衡”。

3.2.1 频域均衡

这种均衡器由一个或多个线性网络组成, 将这些线性网络设计或产生振幅和群时延响应, 以补偿多径衰落期间最可能产生系统性能劣化的传输损伤。

3.2.2 时域均衡

对于数字系统, 可以把时域信号处理看作最自然的均衡技术, 因为它试图直接消除符号间干扰。通过将判决瞬间出现的干扰与产生干扰的各相邻符号作相关处理的方法得到控制信息, 并且用控制信息调节带抽头的延时线网络, 以提供适当的抵消干扰的信号。这类均衡器有同时处理和分开处理由衰落信道中的振幅和群时延偏差产生的各种失真的能力, 所以, 它既可对最小相位特性、也可对非最小相位特性提供补偿。

[众所周知, 在采用正交调制的系统中, 最有害的衰落效应是与信道特性不对称而产生的串扰联系在一起。因此, 时域均衡器必须能够提供补偿正交失真的手段才真正具有价值。]

3.2.3 性能改善系数

三种主要性能劣化因素, 即干扰、热噪声和波形失真结合起来会使微波系统产生中断。通常, 均衡仅对波形失真有改善效果。因此, 在考虑使用自适应均衡器有联系的性能改善时, 显然, 在知道信号失真是系统失效最主要原因的接力段上, 中断时间的减少将最多。

3.3 自适应均衡与空间分集合成相结合

当自适应信道均衡与空间分集结合起来时可以使多径中断的发生率大大减少。所测得的总中断时间的改善一般超过相应的由分集和均衡单独得到的改善的乘积，这表明发生了重要的协合效应。

空间分集和均衡一起的改善近似等于空间分集的改善和均衡器改善的平方的乘积，这似乎对开关分集更准确一些。

3.4 在存在传播管道效应时，系统设计考虑的事项

众所周知，在海拔达到和超过 1000 m 的某些地区，存在管道传播现象。在知道存在管道的和数字无线电接力系统准备工作的地点，在系统设计中，对以下因素应给予注意：

- 天线的指向和位置，
- 天线的射束宽度，要求减小朝反射层和地面辐射的能量或减小从反射层或地面接收的能量，
- 为了增加符号持续期，用适当的调制方案，
- 为使有害反射的概率减至最小所要求的路径几何关系。

4 中断概率的计算

在数字系统中，由频率选择性衰落、干扰和热噪声造成的波形失真产生中断时间。本节将简要地讨论计算数字系统中中断时间的各种方法。这些方法中典型的输入参数如下：

- 路径长度，
- 工作频率，
- 天线辐射图，
- 分集参数，
- 表面粗糙度，
- 路径余隙，
- 气候区。

计算模拟系统中中断时间的惯用方法是以单频衰落的概念为基础的，所以，它不能直接用于大容量数字无线电接力系统。在模拟系统中，增加衰落储备将会减少热噪声的效应；但在数字系统中，若多径衰落早已使眼图的幅度压缩到零、则增加衰落储备不会改善数字系统的性能。这样可得出结论，不能用增加发射机功率的方法作为使数字无线电系统满足其中断要求的唯一方法。

在研究中中断预测时已经使用三种通用的途径：衰落储备法、特征曲线法和使用线性振幅色散（LAD）的方法。至今为止，没有足够的证据能证明这些方法之一明显地优越于其他方法。尽管如此，ITU-R P.530 建议以一步一步的形式给出了一套方法，这些方法可用于无保护的系统和有保护的系统（空间、频率和角度分集），包括双极化同波道系统。用特征曲线这一方法来估计由于失真引起的性能下降。除了对一个地区可以使用的其他方法（认为这些方法更精确）外，建议采用 ITU-R P.530 建议的方法。

为了阐明通用的方法和全世界不同国家和地区可以使用的许多该方法的变型，以下各小节将对它们进行介绍。

4.1 衰落储备法

应用衰落储备作为系统特性是从众所周知的单频处多径衰落的衰落定律推导出来的。在严重衰落月份，接收到的电压电平等于或小于 L （以自由空间的值为 1）的时间 T 为 $T = AL^2$ 。这里， A 是比例常数，它由一个月中的秒数和路径特性所决定。

数字无线电系统的性能不完全由热衰落储备所决定，对数字无线电系统必须使用“净”或“有效”衰落储备的概念。用净衰落储备代替热衰落储备，就可以根据 ITU-R P.530 建议书近似求得一个接力段的中断时间。“净”衰落储备的定义是超过与选定的 BER 门限如 1×10^{-3} 相同秒数的单频衰落深度（dB）。

4.2 特征曲线法

可以用特征曲线来计算中断，比较不同的数字无线电系统对频率选择性衰落效应的相对敏感性。

4.2.1 特征曲线测量

用两射线模拟器来近似实际衰落，就可以测量特征曲线。简化三射线模型的传递函数如下式：

$$H(\omega) = a [1 - b \exp(-j(\omega - \omega_0) \tau)] \quad (1)$$

式中假定一个单位幅度的直接射线和一幅度为 b 、延迟 τ 的射线，而 a 为换算系数。这一衰落的“凹口”点偏离信道中心频率 f_0 ，而凹口深度 $B = -20 \log \lambda$ ， $\lambda = 1 - b$ 。则特征曲线是中断差错率下临界凹口深度 B_c 与频率 f_0 的函数关系的图。虽然有几个主管部门已经用了 6.3 ns 的 τ 值，而且从大量的衰落事件的研究中，已经确定了 b 和 f_0 的相关统计分布，但是有时在其他 τ 值下测量特征曲线。方程(3)中时延 τ 取负值，就可以研究非最小相位衰落。

有些中断计算方法假定 τ 是连续随机变量。所以，在这些情况下，为了估计 $b_c(\tau)$ 随 τ 的变化，需要换算法则。已经提出了许多不同的 $b_c(\tau)$ 换算法则。仅可用于时延小的情况下的线性换算法则认为以波长(λ)表示的高度与 τ 成比例。也可以用更精确的换算法则。

除了时延趋近于零的情况下，时延减半，特征曲线宽度 $W(f_0)$ 加倍外，特征曲线宽度与时延的关系实际上保持不变。

4.2.2 归一化的系统参数 (K_n)

设备特性的影响通过归一化系统参数 K_n 的数值来表示，而 K_n 是从测得的系统特征曲线计算出来的。因而，我们可以把归一化系统参数作为从“归一化系统特征曲线”计算出的值。若我们将系统特征曲线换算到特定的波特周期 (1 ns) 和相对回波时延 (1 ns)，则经这样换算后的特征曲线称为“归一化特征曲线”它是调制方式、滚降系数和均衡器类型等系统参数的表征。利用矩形来近似特征曲线，由下式求出 K_n ：

$$K_n = (T^2 \cdot W \cdot \lambda_\alpha) / \tau_r \quad (2)$$

式中：

- T : 系统波特周期 (ns)
 W : 特征曲线宽度 (GHz)
 λ_α : 特征曲线 $\lambda_c(f) = 1 - bc(f)$ 的 (直线) 平均值
 τ_r : λ_α 的参考时延 (ns)

表 1 所示为无自适应均衡的接收机的 K_n 的数值。应用自适应基带横向均衡器改善了系统性能，所以，通常归一化特征曲线面积 K_n 的数值减小到表 1 中列出的数值的 1/10 左右。

表 1
不用均衡器的条件下，不同调制方法的 K_n 值

调制方法	K_n
64 QAM	15.4
16 QAM	5.5
8 PSK	7.0
4 PSK	1.0