

ITU-R P.1406-1建议书
与VHF和UHF频段内地面陆地移动和
广播业务相关的传播效应
(ITU-R 第203/3号课题)

(1999-2007年)

范围

本建议书提供了传播中可能会影响地面陆地移动和广播业务的各个方面的资料。此类业务的设计和规划要考虑到这些方面。

国际电联无线电通信全会，

考虑到

a) 存在对传播中可能会影响地面陆地移动和广播业务的各方面资料的需求，

建议

1 在此类业务的设计和规划中应考虑附件1中包含的资料。

附件1

引言

本建议书提供了传播中可能会影响地面陆地移动和广播业务的各方面资料。此类业务的设计和规划要考虑这些方面。

2 陆地覆盖造成的衰减

这些损耗对陆地移动业务的关系重大。它们取决于地面的类型、植被的范围以及建筑物的位置、密度和高度。表1总结了各类可用ITU-R建议书的适用性：

表1
讨论陆地覆盖的建议书

ITU-R P.	适用方向
1546	天线高度的修正
452	杂乱回波损耗
833	植被造成的衰减（特别是树木）
1058	地形数据库
1146	天线高度的修正
1812	植被和杂乱回波损耗

3 信号强度的可变性

3.1 总述

接收信号的强度将同时随时间和位置变化。信号可能包含直达、衍射、反射和折射分量。接收的质量将取决于接收环境、频移、时延、调制类型等因素。与此类似，也可能收到与有用信号共用同一频段或相邻频段的其它信源产生的无用发射。评估服务质量时亦应将这些无用发射考虑在内。这些无用发射机可能会远离接收机，以至需对各类非正常传播产生的时变进行量化。这便可能会出现这样一种情况，即各类接收位置在一定比例的时间内须能够承受风险，从而使网络能够工作。

总之，接收的评估和业务区的定义涉及对时域和空域中的有用和无用信号，以及二者间相关程度的分析。

3.2 衰落状态

当接收机在树木、建筑物、地形障碍或其它地物的阴影内时，会发生信号强度减弱。在这些障碍物上方或附近发生衍射，或从其它对象反射回来之后，信号会到达接收机。如果已知障碍物的尺寸和形状，可根据理论试算它们产生的额外路径损耗。否则，如仅有关于环境的一般信息，则可通过类似情况下的测量结果估算路径损耗。无论是哪一种情况，在单位足够小的情况下都无法进行理论估算，此时有必要在测量值的基础上进行估算。此类估算必须是统计性质的。一般情况下它包括某特定地区的中等路径损耗，及对其变化的测量。

由于大气的变化，此信号可能会明显地随时间变化，但在约50公里之内，此类变化相对不太重要。陆地移动业务中更为重要的是空间可变性，移动接收机将其视作时间可变性。

为了方便，我们将空间可变性分为两类，一类是多径效应造成的快速衰落，它在数值范围仅为几个波长，另一类是因阴影变化造成的较慢衰落。在对测量进行分析时，可用下述方法将两类衰落分开：在40个波长的距离内应进行一系列等距测量，且在此距离上应存在中等信号电平或路径损耗。为获得概率为90%时精度在1 dB范围内的测量值，需进行约36次测量。为使相邻测量值不相关，测量间距至少应为0.8个波长。上文给出的条件可以满足这一标准。对其它间隔为40个波长的间距重复应用此程序，直至相关领域被包括在内。经验显示，这些中值将呈对数正态分布，因此其分布特性可用它们的平均值或中值以及标准方差来描述。这便是在不考虑多径变化的情况下，阴影效应造成的信号强度变化分布。

3.2.1 阴影效应

目前已针对阴影效应产生的信号强度分布进行了一系列测量。重要的是确定感兴趣的领域究竟是一个很大的区域，即基极发射机附近的所有特定长度路径或某地理区域内所有特定长度的路径；还是一个小的区域，即直径为几百米的区域，在这一区域内路径特征和接

收机的总体环境不会发生大的变化。大区域中的信号变化要大于小区域内的信号变化。

在乡村地区，对于特定长度的所有路径，可使用下式估算位置可变性分布的标准方差 σ_L 。

$$\begin{aligned} \text{当 } \Delta h/\lambda < 3\ 000 \text{ 时 } \quad \sigma_L &= 6 + 0.69 \left(\frac{\Delta h}{\lambda} \right)^{1/2} - 0.0063 \left(\frac{\Delta h}{\lambda} \right) && \text{dB} \\ \text{当 } \Delta h/\lambda > 3\ 000 \text{ 时 } \quad \sigma_L &= 25 && \text{dB} \end{aligned} \quad (1)$$

式中：

Δh : 十分位高度变化（米）

λ : 波长（米）

$\lambda = 300/f$

f : 频率（MHz）。

在平坦的城市区域，可用下式估算大区域的标准方差：

$$\sigma_L = 5.25 + 0.42 \log(f/100) + 1.01 \log^2(f/100) \quad \text{dB} \quad (2)$$

其有效范围是100 MHz至3000 MHz。

小面积地区的位置可变性标准方差不太明确。人们认为此方差取决于陆地覆盖，但并不清楚它们之间的关系。有些证据显示，标准方差随与发射机间距离的增加而下降，但情况并非总是这样明确。公式(3)粗略总结了50公里内所有类型陆地覆盖的一些测量结果，式中保留了公式(2)中的频率关系：

$$\sigma_L = 2.7 + 0.42 \log(f/100) + 1.01 \log^2(f/100) \quad \text{dB} \quad (3)$$

ITU-R P.1546建议书给出了此类阴影衰落的另一种经验型表达式。

3.2.2 多径衰落

在几个波长的数值范围内，信号的可变性由多径效应决定。预计至少会出现地面反射分量，因此在实践中总会观测到多径效应。此多径效应通常会将信道分为“瑞利”或“莱斯”衰落信道。

在前一种情况中，接收信号是众多独立衰落分量之和，并可用瑞利分布表示（见ITU-R P.1057建议书）。此种信道对在城市杂波环境中工作的窄带蜂窝移动业务而言，是一种典型的频段，它与发射机间不存在视距传播。

莱斯信道的情况是，接收信号的分量之一，例如与发射机视距路径相关的分量，在多径衰落的时间范围内功率保持恒定。在这种情况下，总信号衰落可用Nakagami-Rice分布建模（见ITU-R P.1057建议书）。此分布通常用参数 K （“莱斯因子”）表达，该参数被定义为信号恒定部分的功率与随机部分功率之比。当 $K=0$ 时，为瑞利分布。

3.3 局部反射

到达移动接收机的无线电波可能是从地面和相邻的对象，如建筑物、树木和车辆，反射而来。地面反射波与直达波相干，并会造成接收信号随接收机天线的高度而变化。但是，从附近对象反射回来的波，其振幅和相位是随机的。

直达波和各类反射波间的相长干涉和相消干涉产生的干涉模型最小值间距为半个波长。

城市和森林地区存在众多的反射波，在几十个波长范围距离内测量的瞬时场强大概呈瑞利分布。

干涉模型使移动接收机中出现快速衰落，移动车辆产生的反射甚至会造成静止接收机的衰落。

30 dB或低于平均电平的衰落很普遍。

局部反射在某种程度上亦可产生填充深度阴影区的良好效果。

3.4 信号相关性

不同信源的平均接收功率相关性对评估载干比 (C/I) 至关重要。

将使用平均 C_m 和标准方差 σ_C 的 C 作为所需承载的功率 (dB)，并将使用平均 I_m 和标准方差 σ_I 的 I 作为来自某干扰源的功率，则平均 C/I 比 (C/I) $_m$ 为：

$$(C/I)_m = C_m - I_m \quad \text{dB} \quad (4)$$

此平均值独立于相关性。

C/I 比的标准方差， $\sigma_{C/I}$ ，为：

$$\sigma_{C/I} = \sqrt{\sigma_C^2 + \sigma_I^2 - 2\rho\sigma_C\sigma_I} \quad (5)$$

式中 ρ 为相关性系数。当 $\sigma = \sigma_I = \sigma_C$ 时，公式 (5) 可简化为：

$$\sigma_{C/I} = \sigma \sqrt{2(1-\rho)} \quad (6)$$

从接收功率数据抽样集合中得出的相关性系数指出，相对方向的接收没有明显的相关性。如果移动设备的到达角差很小，则存在明显的相关性。共站信源的典型值 ρ 在农场和树木很多的地区为0.8至0.9。在城市地区相关性通常较低 (ρ 在0.4与0.8之间)。一般山区的相关性很低。但甚至在山区，特殊情况下也会观测到 $\rho > 0.8$ 的情况。

4 延迟扩展

很多种无线电系统，特别是使用数字技术的无线电系统，均对路径特性给信号造成的多径传播很敏感。直达信号到达后，一系列反射信号会随后到达，从而引发这一现象。基于这些信号的振幅和时延，可得出这些信号的信道脉冲响应 (CIR)。可从CIR中提取出一些描述传播信道的参数，见ITU-R P.1407建议书。

一个重要参数是r.m.s.的延迟扩展 S ，如ITU-R P.1407建议书公式（3）和公式（4）所述。时间扩展程度的一项有用测量是多径延迟扩展 T_m ，式中：

$$T_m = 2S \quad (7)$$

上述参数中哪些参数对预测系统性能最为有用取决于使用的特定调制方案。

4.1 对系统性能的影响

根据延迟扩展与符号时长之比，比特误差率会受不同现象的影响。多径信号会在空间和频率上产生快速相位变化。对使用某类角调制的调制方案，例如差分相移键控（DPSK），这些相位变化是造成所谓不可降误差的原因，此种误差甚至在大信噪比的情况下仍然存在。只有延迟扩展小于符号时长时，不可降误差才取决于延迟扩展，而非脉冲响应的准确形态。但是，如果延迟扩展超过了符号时长，则会发生更依赖于CIR形态的符号间干扰。

4.2 因局部散射造成的延迟信号

短延迟信号通常会在局部散射呈均匀分布的区域观测到。此类信号一般出现在城市或郊区，这些地区在长距离大反射物的条件下（山脉、山峰）不存在视距的情况。散射信号的均匀分布会产生均匀的脉冲响应（亦见ITU-R P.1238建议书）。除脉冲响应的均匀部分之外，有时会发现来自大型建筑物的强回声，从而造成不均匀的脉冲响应。此外，在街道交叉口会观测到不均匀的脉冲响应。

城市和郊区观测到的r.m.s.延迟扩展典型值在 $0.8 \mu\text{s}$ 至 $3 \mu\text{s}$ 范围内。对于高数据速率系统，可能有必要更为详细的了解脉冲响应。多径信号相应的详细信号强度计算，在加入光跟踪或光启动技术的同时应用了高清晰度的建筑数据。

4.3 因长距离散射造成的延迟信号

长延迟信号一般出现在山地与平坦地区的交界处附近，例如平原和山谷。此现象在与独立山脉相邻的大面积平坦地区尤为明显，因为独立山脉会降低可能因其它山脉而产生的干扰减轻效应。目前观测到的典型值最多为 $25 \mu\text{s}$ 左右。

直达信号的强度应通过相应的方法来计算，遵守ITU-R P.1144建议书定义的有效性限值。反射信号的强度可使用公式（8）来计算：

$$P_{rs} = \frac{P_t G_t G_r}{32 \pi^3} \left(\frac{\lambda}{r_1 r_2} \right)^2 \Gamma A \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \quad (8)$$

式中：

P_{rs} : 接收信号的功率

P_t : 发射机的功率输出

- G_t : 有效发射天线增益（包括线路和滤波损耗）
 G_r : 有效接收天线增益（包括线路和滤波损耗）
 λ : 与 r_1 和 r_2 单位相同的波长
 r_1, r_2 : 发射机和接收机与散射面（山体表面）间的距离
 Γ : 散射平面的反射率
 A : 与 r_1 和 r_2 单位相同的（平方）散射面区域
 θ_1, θ_2 : 普通平面与反射平面的射线与发射机和接收机形成的锐角。

上述公式（8）并未考虑垂直角，但对陆地移动业务而言已足够精确。另外还应指出的是，如果出现管道和其它折射现象，此公式的准确性会下降。在极端的情况下，此公式可能根本不适用，因为通常会考虑的反射物已不再位于无线电视距之内，或者完全相反，山脉通常不在视距内的一侧被纳入视距之内。

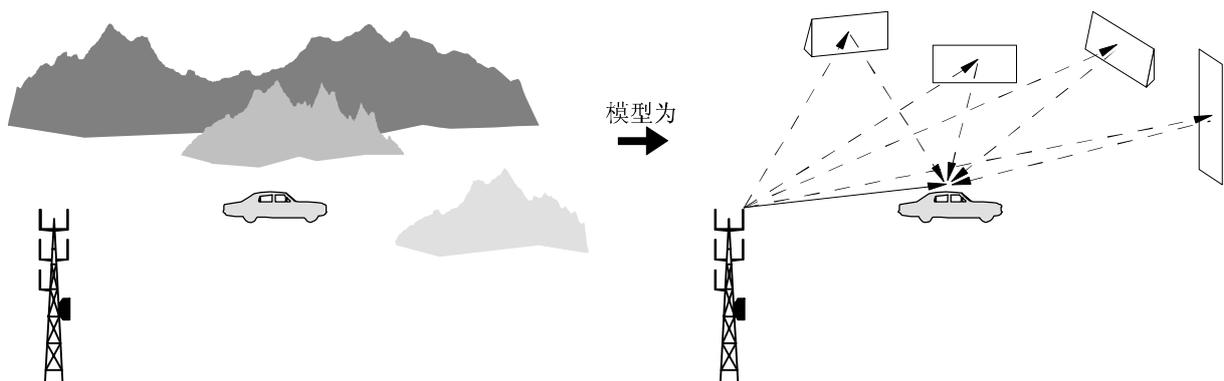
为了计算的简便和快捷，每个山脉都被看作是一个单一的散射面，与该山脉最高峰的方位角方向相同。面积 A 是该山脉在收发天线半功率天线波束宽度范围内的部分，且不在这两类天线的阴影之内。从山脉上述部分的中心计算出参数 r_1 、 r_2 、 θ_1 和 θ_2 。

如果反射山脉的一部分因被更近的山脉遮挡而处于发射和接收站的阴影内，从而使较远山脉的反射区被分为若干部分，则在计算时应将不在阴影内的部分作为独立的山脉考虑。此概念如图1所示。

观测到的反射率 Γ 的值在0.001至0.2（-30 dB至-7 dB）之间。对于有森林覆盖的山体，反射率不可能超过0.05（-13 dB）。对表面无森林的山体，反射率不可能超过0.2（-7 dB）。

适用于直达信号计算的任何乱回波损耗亦适用于反射信号的计算。

图1
直达和反射信号建模



5 天线效应

5.1 极化效应

5.1.1 陆地移动环境中的去极化现象

在陆地移动环境中，部分或全部发射能量可能会因无线电波的衍射和反射散发到原极化方向之外。使用ITU-R P.310建议书中定义的交叉极化鉴别（XPD）因子，可以方便地将此去极化因素考虑在内。

900 MHz的XPD测量显示：

- XPD与距离无关；
- 城市和住宅区的平均XPD范围在5 dB至8 dB，在开放区域为10 dB以上；
- 垂直和水平极化的平均相关性为0。

XPD随频率下降而上升，在35 MHz时达到18 dB左右。

XPD呈对数正态分布，其标准方差在某种程度上取决于频率。10%至90%数值的值差平均值为15 dB左右（在30 MHz至1000 MHz范围内）。观测原极化是垂直还是水平极化对此仅造成了很小的差异。

现已发现了两种类型的去极化效应时变。第一种是因天气条件造成的地面电特性改变而引起的慢时变。这一效应主要在较低频率出现。第二种是因树木运动造成的，在中等风速下，去极化衰落现象达到了几个分贝的振幅。

5.1.2 极化分集

鉴于城市和住宅区存在大量散射，以及因此产生的低XPD值，极化分集可作为一种有用的接收改善技术。最基本的方案是在基站处使用两种正交线性极化。

作为分集之外的另一种方案，基站圆极化和移动终端的线性极化，在造成3 dB极化失配的同时，能够利用散射产生的去极化并在移动环境中提供更为恒定的接收信号电平。

5.2 高度增益：基站和移动终端

高度增益是指天线高度造成的接收信号强度变化。尽管通常它会随天线的高度而增加（正高度增益），但亦可随高度而下降（负高度增益）。在没有局部乱回波的情况下，直达信号可与同一发射机的地面反射光线互动。在垂直方向，因此而产生的场强变化是随路径几何因素产生的，在两信号进入和退出相位时出现的一系列最大和最小值。

实际操作中，特别是对于移动接收机，乱回波和其它反射信号倾向于尽量降低此双射线效应，且在200 MHz以上，可在多数情况下忽略这一现象。相反，通常会发现增加天线高度便可降低引起接收信号随高度而上升的有效乱回波损耗。鉴于天线高度与乱回波的关系如此，此类高度增益可按照ITU-R P.370建议书中所述的地面覆盖类型进行分类。在其它预测方法中，特别是那些使用地形数据库的方法，天线高度经常与乱回波损耗的计算直接相联。

对于在200 MHz频率下开放区域内工作的基站，有时会发现双射线效应，从而可能需要重新调整天线位置来避免负高度增益。由于需要详细了解反射点处的地形特征，因此很难准确地预测这一效应。在200 MHz以上，因波长更短，该问题呈下降趋势且在UHF及以上频段可忽略不计。

5.3 相关性/空间分集

空间分集对互相关最高约为0.7的天线是实用的。一般来讲，这会使可搬移的分集接收和移动分集接收几乎不可能实现。但对于基站，一些技术可用于降低天线间的互相关。垂直和水平分隔是两种最实用的方式。

为将互相关降低至0.7或更低，垂直分布的天线必须用约17个或更多的波长来分隔。根据天线平面与移动终端运动方向的相对角度，水平分隔可能更为有效。如果穿过天线的垂直平面与移动终端运动方向正交，则互相关基本与垂直分隔时的情况一致。在最佳角度时，水平天线最少可用8个波长分隔。必须记住，仅在系统使用扇区天线等特殊情况下，才能保持几乎完美的方向。

5.4 可实现的车载移动天线增益

鉴于车载移动台通常在多径环境中工作，在多数情况下移动天线增益与辐射图范围内的测量值不符便不足为奇了。此外，即使在视距非多径的条件下，垂直到达角并不一定是水平角。事实上，现实中存在垂直到达角超过 10° 的情况。在后一种情况下，垂直到达角很容易落在零或旁瓣上，而不会位于移动天线垂直辐射图的主瓣内。

实际情况下移动天线 $\lambda/4$ 垂直单极的3 dB和5 dB相对增益显示，其实际增益值很少能够满足天线范围内测出的值。在多径或晴朗，并使用高到达角（ $>2^\circ$ ）的情况下，各天线的实际增益，在至少55公里的范围内，相对于 $\lambda/4$ 的垂直单极约为1.5 dB。在晴朗且仰角低的条件下，可实现满增益。

6 移动效应

6.1 进入建筑物造成的损耗

因渗透入建筑物而造成的损耗被定义为，外部街道上测出的信号与在建筑物内测出的信号之差。本节仅针对建筑物结构带来的损耗。进入建筑物后，内部结构和物品可能会造成进一步的损耗，而这一方面将在ITU-R P.1238建议书中讨论。

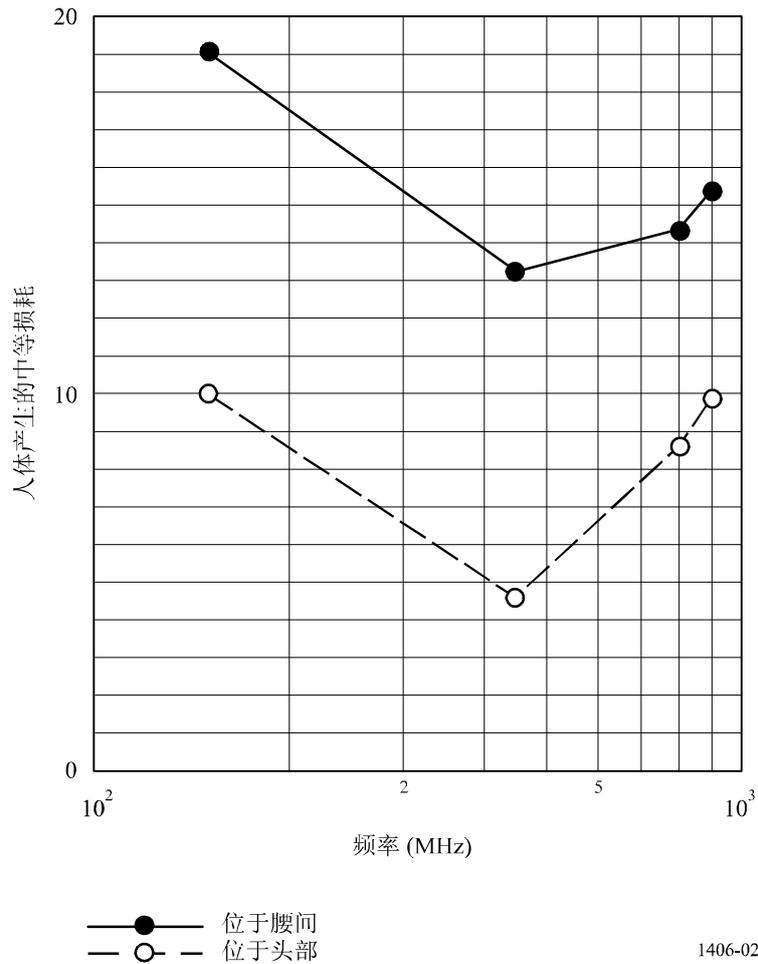
根据建筑物的类型和建材的不同，因进入建筑造成的传播损耗会有很大差异。信号的频率和入射角也会产生影响。因此，损耗值的范围在几分贝至几十分贝之间。

几家组织都在对这些损耗开展详细的调查。最终可能会定义一批建筑物的子类别，且每一类别都具有其代表性的损耗统计数据。

6.2 人体造成的损耗

可移动收发信机、蜂窝电话或寻呼接收机附近的人体能够降低有效天线性能-天线与人体越近性能下降越明显。如图2所示，此效应亦与频率相关。该图是基于近期在四种常用频率上，针对可移动收发信机开展的详细研究。

图2
人体产生的典型损耗-可移动收发信机



对于寻呼接收机，不能仅谈及“人体带来的损耗”，因为寻呼接收机的天线已被集成在接收机内。为此，寻呼接收机的灵敏度通常用场强表示（一般单位为 $\mu\text{V/m}$ ）。但是，了解当寻呼机挂在腰间时典型的集成天线会产生多少天线增益很有用。表2所示为某寻呼机在三个不同频率上的增益值。

表 2

寻呼接收机的增益

频率 (MHz)	天线增益 (dB)
160	-25
460	-22
930	-19

7 定向传播

当波锋不能自由地三维传播时，则可将传播视为“定向”。实例包括对流层管道，“街道峡谷”通信和传播线路技术，特别是波导。

第7.1节讨论沿隧道方向的传播，当无线电信号进入任意一端或由隧道内天线启动时，需考虑这种情况。第7.2节讨论与泄漏馈线密切相关的议题。

7.1 隧道中的传播

公路和铁路隧道通常需使用无线电系统进行广播并提供移动电话业务，此外，矿场及其它地下设施的安全和操作亦要使用无线电系统。

隧道内的传播在一定程度上的规律性可用波导理论来解释。根据频率不同，无线电波将以横向电场（TE）和横向磁场（TM）模式在隧道内传播，其中电或磁分量分别仅与隧道轴呈横向关系。每一模式均有一种临界频率，在此频率下，它将无法传播。临界频率之上，各种模式使用其各自的传播和相位系数进行传播。最低频率模式定义了波导切断频率，在此之下不存在任何传播。对于长方形波导，切断频率等于较长一侧两倍的波长。对于不规则隧道，有用的模拟波长相当于隧道横截面的周长。

对于普通的运输隧道或可居住的隧道，甚高频（VHF）的无线电业务通常会在切断频率之上，并远高于超高频（UHF）。

在切断频率之上很高的频率，隧道内传播亦可用射线理论解释，随着波长与隧道横截面相比变得很小，总的来讲这一方法更加适用。与波长相比具有光滑侧墙的隧道可通过掠射角墙壁反射来支持传播，对此大部分材料都显示出很高的反射系数。由于有大量反射路径可用，其结果具有多径特性（包括瑞利和莱斯衰落）。

隧道中的障碍将引起远高于切断频率的无线电波发生散射，且一般来讲角度很大，并会继而干扰掠入射反射的进程。由于阴影效应，障碍物之外会立即感受到衍射损耗。

隧道传播具体的衰减率变化很大，特别会受到不规则性和隧道方向变化，以及包括运行车辆在内的障碍物的影响。在典型的公路隧道衰减中，0.1至1 dB/m范围内的数值可视为典型数值，但出现此范围之外的数值也不奇怪。由于临界频率之上多模共存，根据情况的不同，衰减率可随频率的上升而上升或下降。

7.2 泄漏馈线

泄漏馈线通常被用于克服隧道传播中的障碍，并且通常是支持中波广播等切断频率以下业务的唯一实用方法。

如果需要承载的无线电业务使用在整个隧道内安装的同轴电缆，且电缆与隧道之间存在一定的距离，如果外导体还有裂缝，部分能量将通过外导体泄漏，成为同轴电缆外缘与隧道墙体间的横向磁场（TEM）波。此过程被称作模转换。同轴/隧道系统的不规则性，包括馈线的安装，亦将引起模转换。为了控制模转换，一些系统使用无泄漏馈线的部分，并零散地配有一些模转换设备。

泄漏馈线系统的设计是一种专门设计。如果馈线的安装靠近隧道两侧，出现的实际问题便是泄漏馈线与移动终端间的耦合损耗很高，而间隙方面的考虑通常会不允许安装距墙面太远。

8 时变

接收到的场强除取决于位置和地形特性之外，还将随时间而变。

表3给出了时变标准方差 σ_t 。

表 3
标准方差 σ_t

频段	d (km)	σ_t (dB)			
		50	100	150	175
VHF	陆地和海洋	3	7	9	11
UHF	陆地	2	5	7	
	海洋	9	14	20	

在某些无线电气象条件下，可能会发生管道现象并可能会引起信号的大幅上升，从而引发潜在干扰（见ITU-R P.452建议书）。这些影响是间歇性的且时间短暂。