

557007

[美] M. P. 赫蒙 尔 著

对流层传播与无线电通信

蔡寿民 宣恩治 译 涂 蔚 校

国防工业出版社

557007

TN926/02

对流层传播与无线电通信

〔英〕 M. P. M. 霍尔 著

梁卓英 张忠治 译

沙 踪 校

41724/10



C0168116

國 1- 4 0 11-4

内 容 简 介

本书系统地阐述无线电通信业务中各种对流层传播问题及其对通信系统的影响，是一本从工程实用观点撰写的书，同时也涉及一般的电波传播理论知识，可用于各种微波电路的设计。

本书供从事无线电通信总体设计和电路操作人员阅读，也可供无线电通信和电波传播等专业研究人员、高等院校有关专业师生参考。

Effects of the troposphere on radio communication

M. P. M. Hall

Peter Peregrinus Ltd. 1979

对流层传播与无线电通信

〔英〕 M. P. M. 霍尔 著

梁卓英 张忠治 译

沙 踪 校

责任编辑 耿新暖

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

850 × 1168 ¹/₃₂ 印张 6¹/₄ 156 千字

1984年9月第一版 1984年9月第一次印刷 印数：0,001—4,000册

统一书号：15034·2694 定价：0.81元

序 言

要开展各种无线电通信业务，无疑必须具备无线电波传播的知识。虽然根据对传播特性广泛的测量获得的较为全面的经验资料，在管理和设计这些业务时能解决许多问题，但是要深入掌握阐明各种传播现象的科学原理，那么得到的裨益就更大。就本书涉及的内容而言，作者正是试图为读者掌握这些科学原理提供一个基础。

如果忽略某些例外的情况，一般说来，无线电通信的历史是不断开发利用越来越高的频率的历史。与此相适应的，就是从理论上和实验上发展无线电传播的研究工作。一开始，这些研究工作是围绕着地球表面对电波传播的影响来进行的，不久，人们又开展了有关电离层及其对传播的影响的研究。在二十世纪三十年代，随着甚高频传输研究工作的开展，关于对流层对传播的影响（这是本书的主要议题），实验人员已逐渐有所了解。在二次世界大战期间和战后，因为在特高频、超高频和极高频这些更高的频率上（即短至几毫米的波长）无线电的应用已经相当广泛，对流层的影响就变得十分明显了。

随着发射和接收技术的发展以及无线电波传播知识的不断丰富，已经开发出越来越多的有效的无线电频谱供地面和空间的各種无线电业务使用，因而对于频率分配的要求也日益增加。尽管在将来人们在合适的场合将充分利用波导、光纤以弥补明线和电缆的不足，但目前仍很少有迹象表明上述的要求会不再扩展。只要缺乏足够的信道来满足频谱中任一部分无线电通信的要求，而人们又力图满足这种要求，那就很明显，他们不得不求助于重复进行频率分配。这样做的困难也许是目前摆在世界各国无线电通信设计人员面前最棘手的一个课题。

系统设计人员的目标是要实现可靠度为 100%、不受其它通信业务干扰的通信业务。当所有其它系统参数都作了最佳选择之后，在确定两种通信业务之间（业务内部）能否实现频率共用这一问题上，起决定性作用的正是传播特性。但是，这些传播特性随变化不定的大气条件而剧烈变化。所以，无线电工程师必须努力设计出可靠度接近 100% 而又几乎不受干扰的业务。在通盘考虑时当然不能不涉及经济问题，有时仅仅由于造价过高就会妨碍最终完善目标的实现，尽管这一目标在技术上是可达到的。于是，人们只好规定出可接受的性能的限度，这些限度按所涉及的业务种类不同而稍有差异。

显然，要实现无线电频谱的最佳利用，必须在国际范围和国家范围内对各种业务的频率分配作精细的设计。国际性设计主要由国际电信联盟（ITU）的无线电行政大会在世界范围和某些必要的区域范围内进行，有时则针对某种特殊业务来制订。行政大会所需要的技术依据主要由国际无线电谘询委员会（CCIR）开展的研究工作来提供。无线电谘询委员会是国际电信联盟许多技术委员会中的一个。无线电谘询委员会由一系列研究组进行研究，它们的研究课题涉及各种无线电业务，另外一些研究组则更带有基础性质，其研究内容与一种或多种无线电业务研究组有关。从事无线电波传播研究的几个组就是属于这些基础性的研究组。

本书主要叙述对流层和地面对频率约高于 30 兆赫的无线电波传播的影响。在必要的地方，也涉及一些电离层现象。对流层效应与天气和气候条件直接有关，所以本书的作者必须用相当的篇幅来描述涉及对流层无线电波传播研究的许多气象学方面的问题，这无疑是正确的。由于本书的作者在阿普尔顿研究所（the Appleton Laboratory）从事的工作，使他对这一专业的基础研究内容能有透彻的了解。此外，作者还参加无线电谘询委员会第 5 研究组的活动，有机会接触无线电谘询委员会研究报告的许多参考资料，因此他对那些必须应用传播知识的无线电通信业务的实际问题十分了解。所以，读者将会发现，本书对于了解甚高

频和更高频率上无线电波传播特性是很有帮助的，并将知道在这些频率上设计无线电通信业务时考虑这些特性的重要意义。

英国无线电技术总理事会顾问

阿普尔顿研究所前任所长

无线电谘询委员会第5组主席

J. A. 萨克斯顿 (J. A. Saxton) 博士

目 录

第一章 绪论	1
1.1 对流层传播机理	1
1.2 无线电业务	3
1.3 传播特性的定量描述	8
第二章 大气折射指数	13
2.1 引言	13
2.2 折射指数的测量	17
2.3 折射指数随高度的变化	20
2.4 折射	22
2.5 波导	27
2.6 折射指数边界上的反射	34
2.7 折射指数起伏引起的散射	38
第三章 降水、云和大气气体	43
3.1 引言	43
3.2 降水和云的特性	44
3.3 降雨率的测量和统计	53
3.4 衰减	59
3.5 散射	64
3.6 热噪声辐射	69
第四章 地面视距电路	73
4.1 引言	73
4.2 地面反射损耗	74
4.2.1 视距电路的地形余隙	74
4.2.2 镜反射和漫反射	77
4.2.3 平滑地球面的反射	83
4.3 其它的多径传播损耗	92
4.4 降水、雾和大气气体引起的损耗	94
4.5 折射性衰落	96
4.6 分集接收的使用	100

4.7 正交极化的利用	105
第五章 地-空电路	109
5.1 引言	109
5.2 折射	109
5.3 衰减和衰落	111
5.3.1 降水、雾和大气气体引起的损耗	111
5.3.2 折射衰落	117
5.3.3 电离层效应	118
5.4 分集的使用	120
5.5 正交极化的使用	123
5.6 传播延迟	125
第六章 超视距电路	127
6.1 引言	127
6.2 传输损耗长期中值的预报	128
6.3 信号慢变化	132
6.4 快衰落及其伴随的效应	134
6.5 分集接收的使用	138
第七章 区域覆盖	140
7.1 引言	140
7.2 不同地形上的绕射	142
7.3 业务覆盖区域预报	148
7.3.1 计算机法	148
7.3.2 场强预报曲线	150
7.3.3 杂散因子法	158
7.4 陆上移动通信的若干特殊问题	161
第八章 无线电干扰	164
8.1 引言	164
8.2 噪声干扰	165
8.3 同频通信业务间的干扰	168
8.3.1 一般原理	168
8.3.2 晴空效应	169
8.3.3 水汽凝结体的散射	172
8.3.4 电离层传播	174
参考文献	176

第一章 绪 论

1.1 对流层传播机理

对流层位于大气层的下部，它的温度通常随高度而减小。在地球的两极，对流层从地面延伸到大约 9 公里的高度，在赤道区，它延伸到大约 17 公里的高度。对流层的上边界高度还随大气条件不同而改变：例如，在中纬区，在高气压时它可到达 13 公里左右，在低气压时它可小于 7 公里。在对流层中，温度、压力、湿度的变化以及云和雨都会影响无线电波从一点到另一点的传播方式。对流层中的大气气体的电离可以忽略，但在 60~1000 公里高度范围（即电离层内），电离却十分明显。电离层对于频率低于 30 兆赫的无线电波有相当的影响，但对于更高的频率，却影响不大。一旦出现这种影响时，会引起地面无线电路终端站之间相互干扰或地-空无线电路上的衰落。

在高于 30 兆赫的频率上，（a）对流层的局部折射指数起伏会**散射**无线电能量，（b）折射指数的水平层状的突变会产生**反射**，（c）大面积的负梯度会产生**波导**。

上述所有机制都会将能量传送到远超过正常视距范围的地方，从而引起一条无线电路径同另一条之间的相互干扰。反射效应主要影响大约 30~1000 兆赫之间的频率，波导效应主要影响大约 1000 兆赫以上的频率。虽然波导效应在海上经常发生，但它在陆地上却不常出现。然而无线电能量的前向散射是相当可靠的，它可以用于远距离通信，特别是在 0.3~10 千兆赫频率上。此外，折射指数随高度的大尺度变化引起无线电波**折射**（射线弯曲），这一效应在低仰角对于所有频率都十分显著，特别是它使无线电视距大大超过光学视距。除了这些折射指数引起的效应外，频率高于 3 千兆赫的无线电波会受到大雨的严重影响，频率

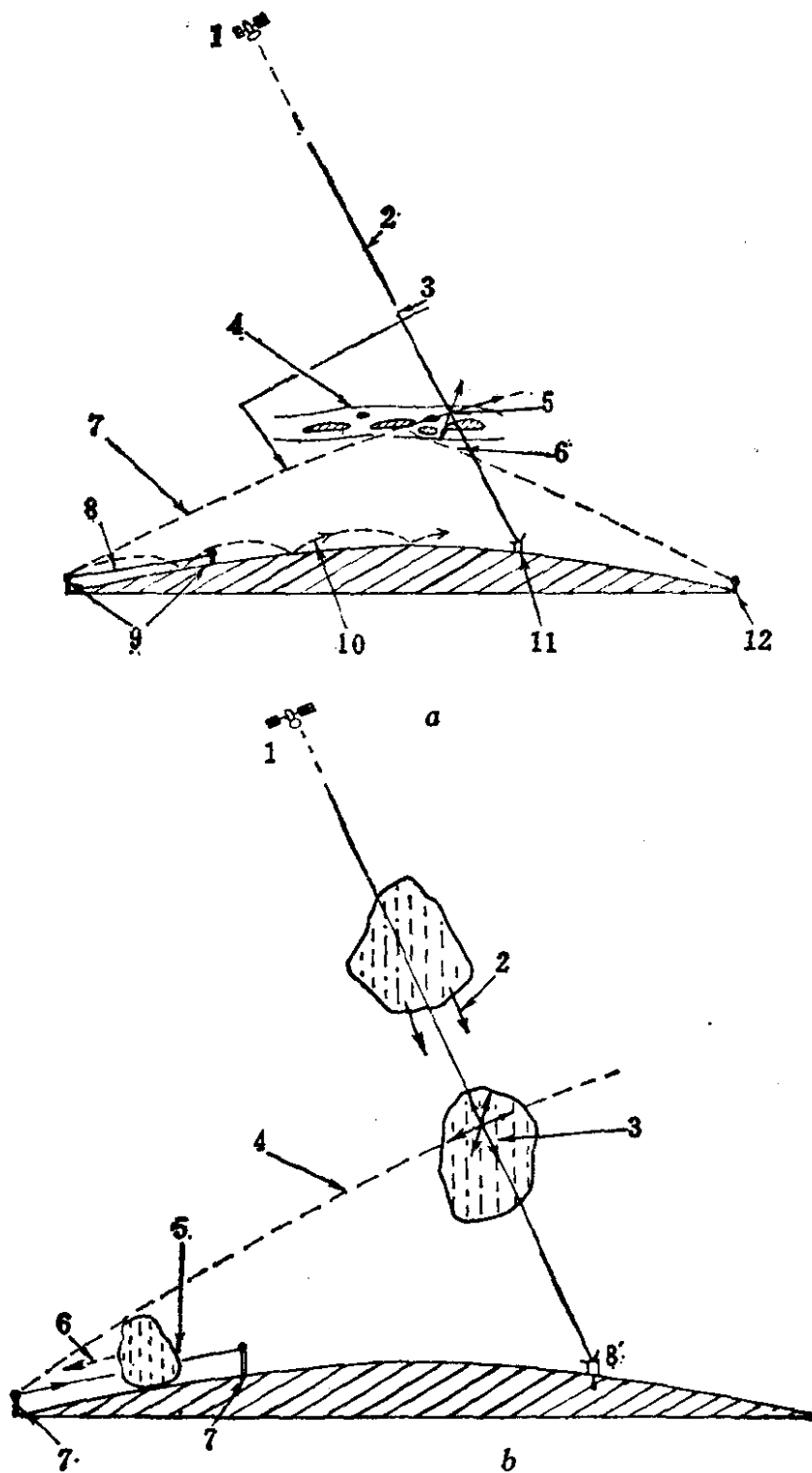


图1.1 对流层对于无线电波传播的一些影响

a 大气气体效应(晴空)和折射指数变化引起的效应: 1—卫星; 2—吸收和噪声辐射, 幅度和相位闪烁, $f \geq 15$ 千兆赫; 3—射线弯曲; 4—折射指数小尺度变化和成层边界; 5—卫星和地面电路之间的散射; 6— $30 \text{ 兆赫} \lesssim f \lesssim 1 \text{ 千兆赫}$ 的超视距反射。 $0.3 \text{ 千兆赫} \lesssim f \lesssim 10 \text{ 千兆赫}$ 的超视距散射 ($f \gtrsim 0.5 \text{ 千兆赫}$ 的某些波导); 7—旁瓣(或主瓣); 8— $f \gtrsim 3 \text{ 千兆赫}$ 的多径衰落; 9—地面视距电路终端站; 10— $f \gtrsim 0.5 \text{ 千兆赫}$ 的波导; 11—地面站; 12—远距离地面电路终端站。

b 云和降水效应(频率 $\gtrsim 3 \text{ 千兆赫}$): 1—卫星; 2—损耗, 交叉极化和噪声辐射; 3—卫星和地面电路之间的散射; 4—旁瓣(或主瓣); 5—损耗; 6—雷达回波; 7—地面视距电路终端站; 8—地面站。

高于 15 千兆赫时，空气中的**氧和水汽**引起的衰减可能变得重要，这要看使用情况而定。另外，降雨和大气气体引起的吸收还伴随有热噪声辐射。所有这些效应都示于图 1.1 a 和图 1.1 b。至于地形的影响常常也同样重要。频率高于 30 兆赫时，山丘及其形状对于视距以外的电场强度有重要影响。频率更高，当波长短至可与障碍物的尺寸相比时，由于绕射、散射和镜面反射的作用，建筑物和其它障碍物有明显的影响

各种对流层传播方式和地形特征对于无线电通信的主要限制及益处列于表 1.1 的第二栏中。该表的第三栏列出某些系统特点，第四栏列出各种频段所用（或建议使用）的业务，它受传播和系统特点所制约。由于在较高频率上带宽增加、天线增益提高，故使得在较低频率上不能采用的业务（例如需要高数据率的那些业务）得以实现。不仅如此，由于增加了带宽，使得几条或多条信息通道（例如电话和电视信道）能够组合在一个传输通道来传送，而在较低的频率则需要好几个传输通道才能传送同样多的信道。

1.2 无线电业务

从原则上来说 只有在没有其它更为经济的手段可供使用或出于其它某些特殊的理由，才采用无线电传输。陆上、海上和航空移动通信业务以及导航设备属于第一类。随着汽车收音机和手提式收音机（甚至还有电视机）的广泛使用，广播也可列入第一类。对于终端站固定的点对点通信干线，如果两个终端站之间距离太远或中间地形恶劣，则使用无线电方式是适宜的。下面这种情况很快就要出现：对无线电频谱的要求是如此之高，以至不得不将某种类型的电缆应用到那些对使用无线电不是那么迫切的业务上去。在考察无线电通信业务时，有必要简要提一下，在低于 30 兆赫的频率上利用电离层传播可以实现远距离的通信。

陆上移动业务工作于从几公里一直到全球范围的距离。远距离业务需要由卫星（尤其在特高频）或传统的短波电路来实现。

表1.1.1 在甚高频和更高频率上无线电频谱的传播特性、业务分配和系统特点

波长, 频率	频带 ①	传播特性	系统特点	业务 ②
10米, 30兆赫	米波 甚高频(VHF) 频带 8	由稍为超过视距的地波提供业务覆盖区; 利用山丘可防止一些来自远距离站的干扰; 有一些来自电离层的干扰; 有一些来自对流层的干扰。	简单的(造价低)天线可提供可观的增益, 每条通道有几千兆赫带宽; 接收机比较简单(造价低)。	广播(电视和高品质语音); 固定业务; 陆上移动业务; (航空移动业务); (航空导航)。
1米, 300兆赫	分米波 特高频(UHF) 频带 9	业务覆盖区只稍微超过视距; 利用山丘防止远距离站的干扰要比甚高频好; 可使用“对流层散射”模式; 电离层不产生干扰; 对流层层结和波导在频带上端产生一些干扰。	在同样尺寸和成本的情况下, 天线增益比甚高频要高; 每路载波的带宽更宽; 接收机比较简单(造价低)。	除上列业务外, 还有: [雷达(无线电定位)]、(无线电导航)。
10厘米, 3千兆赫	厘米波 超高频(SHF) 频带 10	绕射损耗使系统限制在视距或“对流层散射”电路, 障碍物产生的屏蔽和散射作用显著; 波导和降水散射会产生干扰; 降雨衰减变得严重。	可应用更高增益的抛物面天线(但较复杂); 每路载波有几百兆赫带宽。	卫星通信; 雷达(无线电定位); 固定业务; 高速数据或“对流层散射”; 陆上移动业务;

				(无线电导航); (广播); (卫星广播)。
1 厘米, 30 千兆赫	毫米波 极高频(EHF) 频带11	雨衰减严重; 大气气体吸收变得严重。	用较小的天线可得到能与 超高频相当的增益; 每路载波的带宽更宽	除上列外, 还有: (卫星之间通信); (航空和海事卫星业务); (高数据率的地方固定业 务)。
1 毫米, 300 千兆赫	亚毫米波 频带12	雨衰减严重; 除了衰减较低的“窗口” 外, 气体吸收严重。	同样高的增益而天线更小 (但制造困难); 发射机和接收机制造较 难。	275 千兆赫用于卫星; 40 千兆赫用于地面业务; 更高的频率尚未分配。
0.1 毫米, 3000 千兆赫				

- ① 频带号“n”是国际电信联盟的无线电规则中使用的频带编号⁽¹⁾。在“n”号频带内, 频率为10ⁿ赫。
- ② 除极高频外, 所有分配的频带都包括业余无线电、射电天文和空间研究业务。括号内表示使用较少的业务。

短距离业务（通常在视距以内）最好安排在甚高频和特高频低端，因为在这些频段上，沿局部障碍物的绕射并稍为超过视距的传播都是很有效的，并且还可以采用较小的天线。

在海上移动业务中，中频（MF）和 高频（HF）分配给电报、电话和电传打字之用。由于存在电离层传播问题、其它业务的干扰以及目前的频率分配未能满足这方面通信量的要求，所以这些业务的质量远未令人满意。在甚高频的三个窄波段上安排有多种业务，例如公共通信、船对船呼叫、港口作业、船舶调动等。在特高频上有 6 个频率分配给“船上”使用。在 1.6 千兆赫频率上有两个频率是用于卫星通信的，最初是电话和电传打字业务，但随着这些卫星业务的宽频带和低干扰技术的发展，有可能在今后十年或二十年内改变海上通信和导航的状况。

航空移动业务分散在整个高频频带，目前它是与飞机作远距离通信的唯一手段。这些业务也同样存在传播问题和来自其它用户的干扰问题。同飞机的地对空视距通信主要是由甚高频和特高频电路提供的。在 1.6 千兆赫上用卫星进行对飞机的通信和导航可望能提供质量更好的通信业务。

无线电导航和无线电定位系统在整个频谱上工作。对于导航设备来说：

（a）甚低频（VLF）、低频（LF）和中频（MF），用于大覆盖区的定位系统；

（b）高频（HF）和甚高频（VHF），用于大量的海上和航空信标、无线电测向、距离测量和制导系统；

（c）微波频率，用于大部分比较复杂的装置和计划中的大面积卫星导航业务。大部分雷达工作至 200 兆赫和 35 千兆赫之间。

广播业务差不多占用直至 1 千兆赫的频谱的 60% 左右。低频带适宜于作远距离地波传播，但只限于世界上大气噪声较低的那些地区。在中频带有成千上万个广播发射机，但由于它们之间相互干扰，在夜间的覆盖区很少超过一个甚高频发射台的覆盖区。

在热带地区，使用高频低端作广播业务比用中频更有优越性，因为大气噪声比较低，因而可以获得较好的大面积覆盖。高频带上端则用于远距离的对外广播。对甚高频/特高频广播频带作如下的分配（在不同的地区稍有不同），

频带 I	41~68 兆赫
频带 II	87.5~100 兆赫
频带 III	174~216 兆赫
频带 IV	470~582 兆赫
频带 V	614~960 兆赫

频带 I 用作电视广播，与特高频相比其覆盖区域较大，但只能安排 5 条带宽为 5 兆赫的通道，而且，由于夏季 E_s 层传播使远距离台站的干扰变得严重。频带 II 用作语音广播要比较低频率优越，因为带宽较宽，可作调频广播（信噪比较高，动态范围较大）和立体声及四声道立体声广播。频带 III 用作电视广播，可使用较小型的定向天线，但绕射损耗产生的阴影区必须用多个中继站来弥补，在特高的 IV 和 V 频带上情况更是如此。按国际协议，频带 IV 和 V 容纳 44 条通道，每条带宽 8 兆赫，按统一系统顺序编号。许多国家在 11.7~12.5 千兆赫设置通过卫星的和地面的广播站的计划进展顺利。

直到几年以前，高频带几乎提供了全部洲际终端站固定的点对点业务和许多短距离电路的小容量通信。在那些还没有更为可靠的海底电缆、卫星和无线电中继系统的地区，这种业务目前仍广为应用。在发达国家，已大量采用由若干条几百公里长的电路组成的频率约为 1 或 2 千兆赫的对流层散射系统。这种系统特别适用于传输带宽为几百千赫的要求高可靠性的信息。与此相反，视距微波中继系统担负作为传送公共电话和电视网主干线的大部分容量，大约 1800 路电话信道（每路 4 千赫）占 1 条电视信道的带宽。微波中继系统还用以组成大容量的专用数字数据网。在许多国家，这些系统大量地占用 2 和 10 千兆赫之间的频段，甚至在频率更高的一些频带上，也正准备用于这些系统。国际通信卫

星系统已采用 4/6 千兆赫（下行线路/上行线路）频段，该频段是与地面点对点通信共用的。因为在比较繁忙的同步卫星轨道部分这些频段逐渐变得饱和，目前正在发展 11/14 千兆赫频段，在不久的将来还会把卫星业务扩展到 20/30 千兆赫频段。这些系统主要用于远距离电话通信，但也有用于活动的或多终端的宽带业务（如数据网或电视分布网）。

由于对无线电设备的需要不断增加，无线电业务之间的**频谱分配**必须要作周密的计划并定期加以检查。在本书的序言中已经介绍过这一项工作在国际电信联盟召开的无线电行政大会上是如何进行的。这些会议绝大部分是讨论一些专门性问题，如空间技术（1971）、海上移动业务（1974）、卫星广播（1977）、航空移动业务（1978），但有时（如 1979）则讨论整个国际频率分配表的修订和关于无线电频谱使用的国际规则的其它方面。此外，某些地区性会议则讨论地区性的特殊问题。国际电信联盟拥有 150 个会员国，他们共同负责制订各种无线电系统和业务都应遵守的无线电规则^[1]、各种业务的频率使用规定和内容广泛的技术标准。国际无线电咨询委员会在国际电信联盟内部提出有关无线电通信各个领域中最新知识的报告以及解决专门技术问题应该采取的方法的建议。这些权威性文件中的一些内容是与本书议题有关的，在下文中，有许多地方将要参考这些文件。

1.3 传播特性的定量描述

要设计出可靠的无线电系统，重要的是能够预报无线电路径上系统损耗/时间概率的统计特性。这可使整个系统设计得合理，而对发射机和接收机性能或天线性能的要求既不会过高也不会过低。同理，还必须能够预报电路与其它站之间的同频干扰的统计特性。

在定量地考虑穿过对流层的无线电路径在各种条件下的衰减时，必须采用一种简单的**参考标准**。通常采用的标准是：在两个已知参数的假想天线间的自由空间传播的电波损耗理论计算值。

这种假想天线通常采用各向同性天线，因为它是最基本的天线，这种天线均匀地向（从）所有方向上发射（接收）无线电能量。实际天线的“方向增益”可以相对于这一理论上的理想值来计算。所谓方向性增益，就是辐射一给定功率的天线在某一距离上产生的单位面积功率通量与辐射同样功率的各向同性天线在同一距离上应该产生的单位面积功率通量之比。通常提及的天线增益 G 就是指“方向性增益”，即最大方向性增益。但是为了计算偏离主轴方向来的同波道干扰或多径效应，还需要知道方向性增益如何随天线偏离最佳方向而减小（即天线方向图）。

计算通过大气层的无线电路径上电波传播损耗时，采用的标准（理论的）参考量是自由空间基本传输损耗 L_{bf} ，实际的传输损耗可以用相对于 L_{bf} 的一个比值来表示。 L_{bf} 指的是一理想无损耗各向同性发射天线（ $G=1$ ）向自由空间辐射的射频功率与一理想无损耗各向同性接收天线接收功率之比^[301]。因为发射机由各向同性无损耗天线辐射功率 P_t （瓦）在距离 d （米）处产生的单位面积功率通量 P_a （瓦/米²）是

$$P_a = P_t / 4\pi d^2 \quad (1.1)$$

同时，无损耗接收天线接收的功率 P_r 是 P_a 和有效孔径 A_e 的乘积，这里 A_e 与天线增益有如下关系

$$A_e = G\lambda^2 / 4\pi \quad (1.2)$$

所以，根据式（1.1）和式（1.2），自由空间基本传输损耗为

$$L_{bf} = P_t / P_r = (4\pi d / \lambda)^2 \quad (1.3)$$

式中， d 和 λ 的单位相同。上式有时也用对数项表示为

$$L_{bf} = 32.4 + 20\log_{10} d + 20\log_{10} f \text{ 分贝} \quad (1.4)$$

我们注意到，如果距离 d （公里）或频率 f （兆赫）增加一倍，损耗就增加 6 分贝；还有，对于抛物面天线， A_e 小于 $\pi D^2 / 4$ ，因为天线馈源的照射或收集在直径 D 上并不完全均匀，而且天线的形状也不是完全的抛物面。天线有效孔径与真实孔径之比称为天线的“效率”，天线增益比理想增益小同样的系数。

对于大气层中的无线电路，假定天线只有与辐射电阻相联