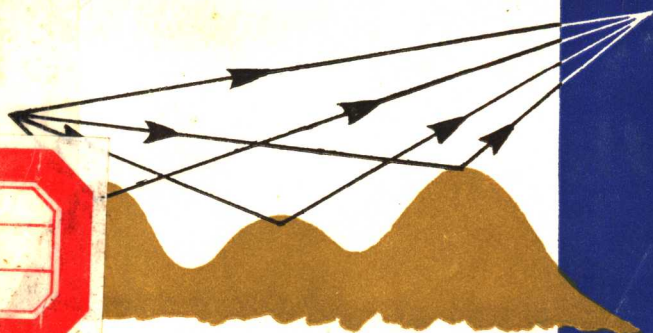


王一平
肖景明 编著

微波传播

(修订本)



人民邮电出版社

微波传播

(修订本)

王一平 肖景明 编著

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书叙述地面微波中继通信系统中无线电波传播、毫米波传播和地面移动通信中的电波传播的基本原理和基本计算方法。内容包括自由空间的传输、地形和低空大气层对电波传播的影响,信号的衰落与分集接收,传播电路的计算和噪声的估计方法等主要内容,并附有基本工程计算图表。

本书是1977年我社出版的《微波传播——地面中继通信的视距传播》一书的修订本。在第一版的基础上,又加入了“卫星通信中的传播问题”、“毫米波传播”和“地面移动通信中的电波传播”等新内容。

本书可供有关专业工程技术人员和大学有关专业的师生参考。

微 波 传 播

(修订本)

王一平 肖景明 编著

责任编辑:赵力耕

人民邮电出版社出版

北京东长安街22号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

开本: 787×1092 1/32 1987年2月第一版
印张: 13 16/32 页数: 216 1987年2月河北第一次印刷
字数: 308千字 印数: 1—3,000 册

统一书号: 15045·总2165—无632

定价: 2.50元

再 版 前 言

自一九七七年十月本书第一版发行以来，在不长的时间内即已售完。许多读者来信索取，均无法得到满足。而正在急剧发展中的我国微波通信事业又向我们提出了新的课题。因此，决定修订再版，对原书的内容作了修改、调整和增加。

首先，我们改正了第一版中一些印刷上和文字上的错误以及理论分析中不够严谨的论述。其次，对一些内容作了删节和调动。其中最主要的变动是将原第五章撤销，将前三节移至第三章，将后五节移至书末作为参考附录。第三，增加了“毫米波传播”和“移动通信中的电波传播”两章（即本版第五章和第六章）。此外，对个别标题也做了文字上的修改。

在修订中除增加两章外，对第一版的基本内容未作更改。因为，我们认为这是一本向微波通信系统的工程技术人员和相应的大学生介绍视距传播的基本概念和基本方法的书。它不讲述微波传播的物理学，所以在理论论证上适可而止。它又不是一本设计手册，所以在方法和图表上也不要求完整。不过，对有些问题我们列出了更多的参考资料以有助于读者举一反三。例如，关于球面地上的反射点位置的计算，就是这样处理的。

第一版内容的修改和调整工作以及本版的最后阅校由王一平负责；新增加的两章由肖景明执笔。此次再版工作得到邮电部第四研究所的部分同志的支持。对此，深表感谢。

书中错误之处，恳请批评指正。

编者

一九八五年一月

目 录

第一章 自由空间的传播	(1)
1.1 电磁波的辐射	(1)
1.2 自由空间的传输	(4)
1.3 电波的干涉和极化	(10)
1.4 惠更斯—费涅尔原理	(20)
1.5 电波传播的费涅尔区	(22)
1.6 费涅尔区半径和费涅尔带面积	(28)
1.7 衰落因子	(31)
第二章 地形对均匀大气中电波传播的影响	(33)
2.1 直视距离	(34)
2.2 反射地段的费涅尔区	(35)
2.3 平面波在光滑平面地上的反射系数	(38)
2.4 球面地上的反射	(46)
2.5 粗糙不平地面上的反射	(49)
2.6 地球凸起高度和传播余隙	(55)
2.7 平面地上的干涉场	(59)
2.8 山脊的刃形绕射	(66)
2.9 光滑球面地的绕射	(74)
2.10 在不规则地形上的传播	(76)
2.11 传播方向的变换	(83)
第三章 在低空计及大气折射时的传播	(87)
3.1 大气的折射率	(87)
3.2 大气层中的微波射线轨迹	(93)

3.3	等效地球半径	(99)
3.4	等效平面地和折合折射指数	(102)
3.5	折射的分类和产生条件简述	(106)
3.6	大气折射对传播路径的影响	(111)
3.7	地形剖面图	(130)
3.8	传播余隙	(141)
3.9	强反射地面上的传播	(153)
第四章	衰落与分集接收	(168)
4.1	大气波导对微波传播的影响	(168)
4.2	大气层对电波的反射和散射	(179)
4.3	低空大气层的温度和水汽变化	(183)
4.4	衰落产生的原因和分类	(190)
4.5	衰落的统计描述	(200)
4.6	深度快衰落的统计分布	(204)
4.7	次强快衰落与慢衰落的统计分布	(214)
4.8	分集接收	(218)
4.9	空间分集接收	(222)
4.10	分集增益	(231)
第五章	毫米波传播	(239)
5.1	大气衰减	(239)
5.2	雨的物理特性	(248)
5.3	介电常数(或折射率)的计算	(255)
5.4	雨滴对毫米波衰减的理论计算	(259)
5.5	实际工程中雨衰减的计算	(277)
5.6	降雨衰减的测量	(291)
5.7	云、雾、雪等对毫米波的影响	(296)
5.8	降水引起的去极化	(309)

5.9	估算去极化的理论方法	(317)
5.10	卫星通信中的传播问题	(326)
第六章	地面移动通信中的电波传播	(345)
6.1	移动通信中传播损耗计算	(347)
6.2	不规则地形对移动通信电波传播的影响 ...	(353)
6.3	城市中移动通信的传播特性	(356)
6.4	郊区与开阔区的传播特性	(371)
6.5	隧道中移动通信的传播问题	(374)
6.6	移动通信中的噪声	(381)
6.7	移动通信系统的电路设计	(387)
附录	地面中继电路噪声性能估计	(390)
A.1	噪声功率与电路指标	(390)
A.2	衰落储备	(396)
A.3	小时平均噪声估计	(400)
A.4	中断概率	(408)
A.5	电路性能的改善	(410)
参考资料		(414)

第一章 自由空间的传播

无线电波总是在实际的介质中传播的。我们常把在真空中进行的所谓“自由空间传播”这种理想情况，作为研究实际传播问题的参考。因为大气和真空的电磁参量非常接近，如果忽略大气的折射，就可将大气视为一种近似于真空的均匀介质。这时，在大气中的传播就等效于自由空间的传播。

在这一章里，我们将介绍无线电波在自由空间传播的一些基本特性和传输功率的基本计算关系。

1.1 电磁波的辐射*

电磁波是由发射天线辐射的。这天线就是波源。波中的电场和磁场在空间随时间而变化，按一定的规律互相激发，结果就把辐射的能量传播至远方。图1.1是这种辐射的一个简单图象。

在距离波源足够远处，波是以天线为中心的球面波，在此球面上各点电场强度（以及磁场强度）的振动相位处处相同。

在球面波的辐射场中，实际上我们只研究一个局部区域。只要这个区域的尺寸比它和波源的距离小得多，那么，我们就可以把此区域内波的等相位面看作平面，因而可以在此区域内用平面波等效地代替球面波。下面介绍这种代替的准则。

如图1.2所示，命 d 表示观察点 P 与天线的距离， l 表示

* 关于电磁场理论和天线原理不在此里详述，请读者参考有关书籍。

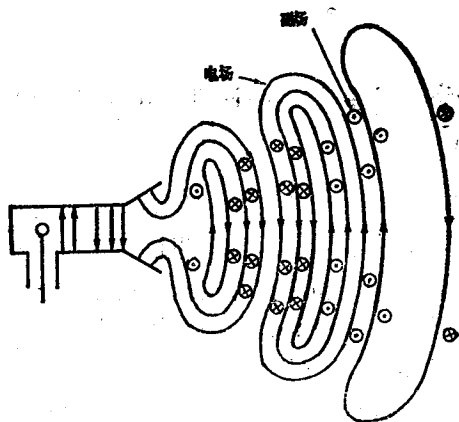


图 1.1 喇叭天线的辐射场

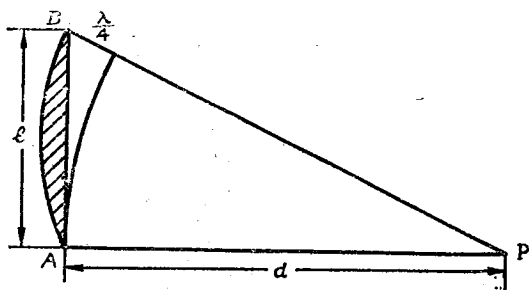


图 1.2 远区场准则

天线口面的尺寸，由口面上的 B 、 A 两点到 P 点的距离差为 $\sqrt{d^2 + l^2} - d$ 。我们说，只要这个距离差小于四分之一波长（即 $\frac{\pi}{2}$ 的相位差），则在观察点可把辐射场视为平面波，即要求：

$$\sqrt{d^2 + l^2} - d \leq \frac{\lambda}{4}$$

式中 λ 表示波长。当 $\frac{l}{d} \ll 1$ 时，把上式左边的根式依二项式定

理展开，略去高阶小项，就得：

$$d \geq \frac{2l^2}{\lambda} \quad (1.1)$$

这个关系通常叫做雷利准则。只要按这一准则来确定最小距离 d ，就可以把远于 P 点处的电磁波视为平面波。这时的辐射场称为远区场。否则，应视为球面波，其辐射场称为近区场。^{*} 例如，对工作于 $cGHz$ 、直径为 $3m$ 的抛物面天线，可算出 $\frac{2 \cdot l^2}{\lambda} = \frac{2 \times 9}{5 \times 10^{-2}} = 360m$ 。这就是说，在距此天线 $360m$ 以外的波可视为平面波。

设有一正弦变化的平面电磁波沿 z 轴正方向传播，它的振荡角频率为 ω ，则电场强度 E 和磁场强度 H 的表示式为，

$$\left. \begin{aligned} E &= E_0 \cos(\omega t - kz) \\ H &= H_0 \cos(\omega t - kz) \end{aligned} \right\} V/m \quad (1.2)$$

式中 E_0 是电场强度的振幅，单位为 V/m ； H_0 是磁场强度的振幅，单位为 A/m 。上式表明，电场和磁场是同相的，在自由空间，它们的振幅之间的关系为：

$$E_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} H_0 = 120\pi H_0 = Z_0 H_0 \quad (1.3)$$

式中， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ ，为真空的导磁率； $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} F/m$ ，为真空的介电常数。 Z_0 又叫做自由空间波阻抗，单位为 Ω 。

在 (1.2) 式中，数值 k 称为传播常数。在各向同性的均匀介质中， k 表示波在传播过程中每单位长度的相移。在自由空间中它和波长 λ_0 、 ϵ_0 、 μ_0 以及真空中的光速 c 的关系为：

^{*} 此处所谓远区、近区，仅是用来区分平面波和球面波的，不是用来区分辐射场（远区）和感应场（近区）的。

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_0} = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = \frac{\omega}{c} \quad (1.4)$$

式中 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

正弦变化的平面电磁波，在传播过程中垂直地通过每单位面积的功率在一个周期内的平均值 S 由下式计算：

$$S = \frac{1}{2} E_0 H_0 = \frac{1}{2} \frac{E_0^2}{Z_0} \quad (1.5)$$

S 称为能流密度，其单位为 W/m^2 。平面波的电磁场图象如图 1.3 所示。

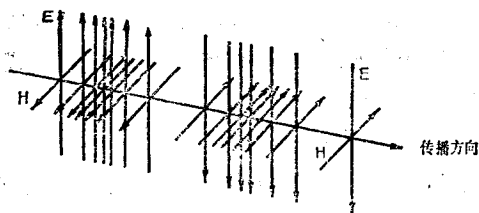


图 1.3 平面电磁波

1.2 自由空间的传输

无线电波在自由空间传播时其能量会因扩散而衰减。这种衰减称为自由空间的传输损耗。当通信距离、工作频率和天线参数确定之后，此损耗值为定值。因此，我们常常把由其它种种原因所引起的损耗或衰落与它来相比较。

为了求得自由空间传输损耗的计算式，我们先介绍几个天线参数。

在确定天线的参数时，常用一个各向同性的天线作为参考标准。它是各个方向上辐射强度都相同的天线。如果以它为中

心作一个球面，在这个球面上，它的电场不仅处处相位相同，而且振幅也一样大。它的磁场也具有这样的性质。相应的能流密度在这个面上也是处处大小相同。

天线的方向系数是在接收点产生相同的场强时，各向同性天线所需的发射功率与定向天线所需的发射功率之比。由图 1.4 可看出要产生相同的场强，使用定向天线所需的发射功率比使用各向同性天线的小。当接收天线处在可用平面波近似的距离 d 时，则由 (1.3) 和 (1.5) 式可得，

$$S = \frac{E_0^2}{240\pi} \quad (1.6)$$

由此可见，只要 S 不变，场强 E_0 也不会变。现在假定各向同性天线辐射的总功率为 P_0 ，那么，它在接收点的平均能流密度为

$$S = \frac{P_0}{4\pi d^2}$$

式中， $4\pi d^2$ 是以发射点为中心的球面面积。如果改用定向天

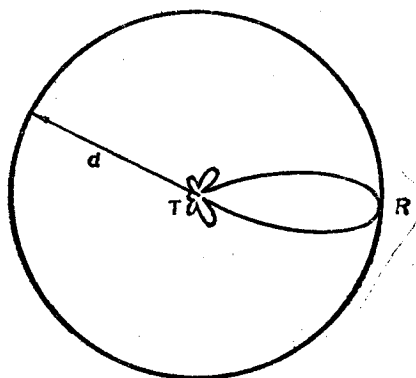


图 1.4 两种天线的方向图

线发射，其辐射功率为 P ，则为了得到同样的 S 所需的功率 P 小于 P_0 。如果令 $P_0 = PD$ ，则

$$D = \frac{P_0}{P}$$

称为天线的方向系数。这个方向系数是对定向天线发射的最大方向而言的。因为天线本身有热损耗，所以定向天线的发射功率 P 小于它的输入端输入功率 $P_{i\alpha}$ 。因而，要从天线输入端的功率中减去天线本身的热损耗之后才是发射功率（假设各向同性理想天线是无损耗的）。我们令 P_0 与 $P_{i\alpha}$ 的比值为 G ，而称 G 为天线的功率增益。由此可知，增益与方向系数之间的关系为，

$$G = \frac{P_0}{P_{i\alpha}} = \frac{P_0}{P} \cdot \frac{P}{P_{i\alpha}} = \eta D \quad (1.7)$$

式中 $D = \frac{P_0}{P}$ 是方向系数， G 是增益， $\eta = \frac{P}{P_{i\alpha}}$ 是天线本身的辐射效率。

如果命 P_R 表示接收天线输出端的功率，可以认为这个功率等于在接收点的能流密度 S 乘以一个面积 A_R ，即 $P_R = SA_R$ 。这个面积叫做天线的有效面积。从天线辐射原理及天线的互易定理可求出有效面积与天线增益的关系为

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_R \quad (1.8)$$

对于微波面天线，不论其形状和结构如何，都可以求得一个“有效面积”，此有效面积，并不就是口面的几何面积。一般说来，如果用 A_0 代表口面的几何面积，则有效面积的变化范围大约为 $A_R = (0.4 \sim 0.7) A_0$ 。 A_0 前面的系数，称为天线的口面利用系数。由于微波面天线的效率 $\eta \approx 1$ ，故 $G = D$ ；因而，口面利用

系数的大小与天线的效率无关，而决定于口面场的振幅和相位分布。对抛物面天线来说，还决定于反射面所截获的照射器辐射能的数量。

图1.5表示圆口面天线的口面利用系数为0.5时，在不同频

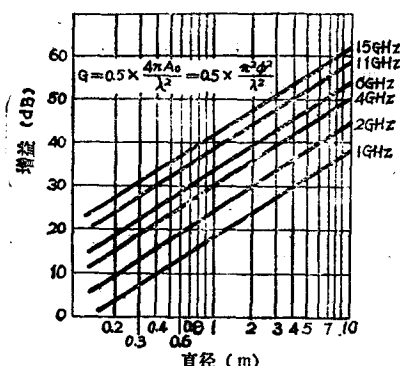


图 1.5 增益与口面直径的关系

率下其直径与增益的关系。如果口面利用系数为其它值，可利用此图查得的结果依一定比例算出相应的增益。一个3米直径的抛物面天线，其 A_0 大约为 $7m^2$ ，当口面利用系数为0.5时，有效面积为 $3.5m^2$ 左右。若改用另一个具有相同直径但口面利用系数为0.6的抛物面天线，则有效面积为，

$$\frac{0.6}{0.5} \times 3.5 = 4.2m^2$$

对于各向同性的理想天线，由于其 $\eta = 1$ ， $D = 1$ ，故其增益 G 等于1；从(1.8)式可知，它的有效面积就是 $\lambda^2/4\pi$ 。

有了这些天线参数，就可以求得表示自由空间传输的重要关系式了。

首先我们来计算场强。利用平均能流 S 和方向系数 D 的表

示式，可以得到电场强度的振幅 E_0 为，

$$E_0 = \frac{\sqrt{60PD}}{d} \quad (1.9)$$

式中 P 的单位为 W ， d 的单位为 m ， E_0 的单位为 V/m 。(1.9)式是计算自由空间场强的基本公式。

其次，设 P_T 表示发射机送到各向同性天线输入端的功率。由于我们假定理想的各向同性天线是无损耗的，故到达接收点单位面积的平均功率是：

$$S_0 = \frac{P_T}{4\pi d^2}$$

如果接收天线也是用理想的各向同性天线，则有

$$P_R = S_0 A_R = S_0 \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) = \frac{P_T}{4\pi d^2} \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right)$$

即：

$$\frac{P_T}{P_R} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (1.10)$$

此比值代表电磁波在发与收两个各向同性天线之间的自由空间的传输损耗。以分贝数表示，则自由空间传输损耗为：

$$L_0 = 10 \log \frac{P_T}{P_R} = 10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (1.11)$$

如距离 d 的单位为 km ，并将波长 λ 改换为相应的频率 f ，则当 f 的单位为兆赫(MHz)时，(1.11)式可写为：

$$L_0 = 32.4 + 20 \log d + 20 \log f \text{ dB} \quad (1.12 a)$$

当 f 的单位为吉赫(GHz)时，(1.11)式可写为：

$$L_0 = 92.4 + 20 \log d + 20 \log f \text{ dB} \quad (1.12 b)$$

利用上式进行计算的列线图如图1.6所示。例如：当 $f = 6 \text{ GHz}$ ， $d = 48 \text{ km}$ 时，从图上可以查出 $L_0 = 141 \text{ dB}$

如果考虑到实际收、发天线的功率增益 G_R 和 G_T ，则对于

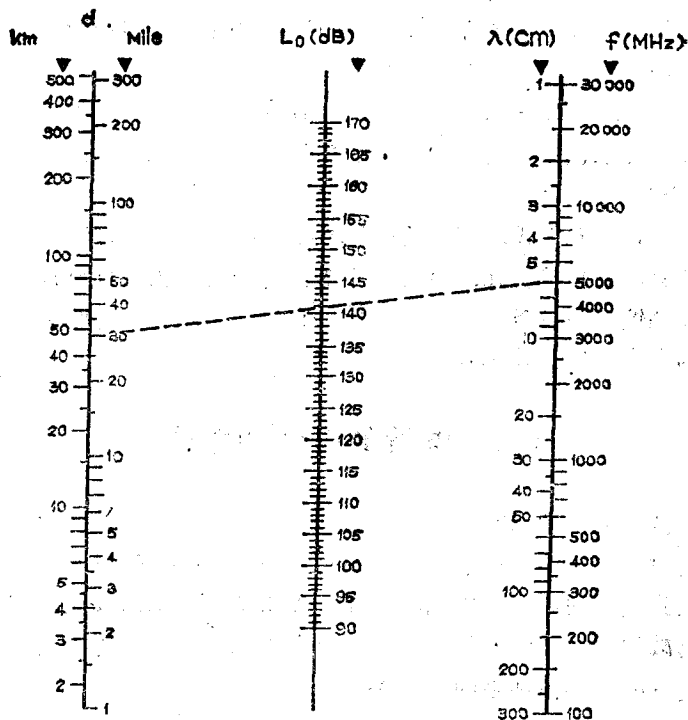


图 1.6 自由空间传输损耗列线图

同样的 P_R ，实际发射天线输入的功率 P_T 可以小 $G_T G_R$ ；
故 (1.10) 式变为

$$\frac{P_T}{P_R} = \frac{1}{G_T G_R} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (1.13)$$

这时以 dB 表示的自由空间传输损耗 L_0' 为，

$$L_0' = L_0 - G_R - G_T \text{ dB} \quad (1.14a)$$

式中各量都以 dB 计。例如，当收发天线都有 45 dB 增益时，上

例的自由空间损耗就会下降到 $L_0' = 142 - 45 - 45 = 52\text{dB}$ 。

如果再计入发射和接收部分的馈线和波道分隔滤波器的损耗 L_{fT} 和 L_{fR} ，则总损耗应写为

$$L_t = L_0 - G_R - G_T + L_{fT} + L_{fR} \text{ dB} \quad (1.14b)$$

例如，在上例中当收、发双方的 L_f 均为 3.6dB 时，则 $L_t = 52 + 3.6 + 3.6 = 59.2\text{dB}$ 。

(1.14b)式所表示的 L_t 是不计及传播过程中的障碍、吸收和衰落的传输损耗，称为无衰落传输损耗。当站址已选定，天线和馈线等设备也已确定之后，它是一个定值。有时也简称它为自由空间传输损耗。

1.3 电波的干涉和极化

两个波源发出的波，在空间会发生干涉。当两波源的频率相同时，此干涉作用最强。如图1.7所示。在观察点P，如果两波到达时同相，则电磁场增强；如果两波到达时反相，则电磁场减弱。设波源（图中以两个黑点表示）到P点的距离分别为 d_1 和 d_2 ，则由两波的行程差

$$d_1 - d_2 = m \frac{\lambda}{2}$$

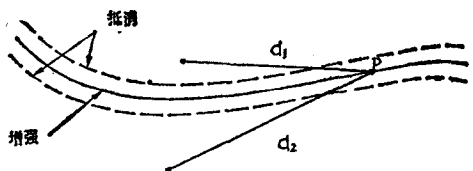


图 1.7 波的干涉

可以决定最强点与最弱点。当 m 为奇数时，则行程差 $d_1 -$