

全国供用电工人技能培训教材

---

# 电力微波通信

中级工

主编：陆智敏

主审：张庆

参编：赵卫星 李小勇

严国法 马志勇

水为涟 曹晶

中国电力出版社

## 内 容 提 要

本书讲述了数字微波收发信机、调制解调技术、PCM 脉冲编码调制和时分多路复用的基本原理，着重介绍了微波通信系统的维护管理及故障处理，简单介绍了近年来发展起来的一点多址数字微波通信、电力系统其他通信方式、微波站防雷保护。书中内容力求理论联系实际，浅显易懂，避免繁冗的公式推导，使读者了解微波通信的基本原理，掌握微波通信设备的维护测试技能。

本书可作为从事微波通信的维护和管理人员的参考书和培训教材，也可供从事通信专业的技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电力微波通信/中国电力企业家协会电力分会编.  
-北京:中国电力出版社, 1998  
全国供用电工人技能培训教材  
ISBN 7-80125-775-8

I. 电… II. 中… III. 电力系统-微波通信-技术培训-教材 IV. TN925

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 20344 号

### 电力微波通信 (中级工)

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

实验小学印刷厂印刷 各地新华书店经售

\*

1999 年 1 月第一版 1999 年 1 月北京第一次印刷  
787 毫米×1092 毫米 32 开本 8.75 印张 190 千字  
印数 0001—6000 册 全三册定价 48.00 元 (本册 17.00 元)

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)



关于《全国供用电工人技能培训教材》的审定意见

前 言

编者的话

<b>第一章</b>	<b>微波传播</b> .....	1
第一节	地形对电波传播的影响 .....	1
第二节	天线馈线系统的测试 .....	14
复习题	.....	16
<b>第二章</b>	<b>数字微波通信设备</b> .....	17
第一节	数字微波通信的噪声 .....	17
第二节	微波发信通道 .....	24
第三节	微波收信通道 .....	34
第四节	四相 DPSK 的调制解调及八相 PSK 技术 ..	48
第五节	监控系统 .....	59
复习题	.....	65
<b>第三章</b>	<b>PCM 终端复接设备</b> .....	68
第一节	脉冲编码调制基本原理 .....	68
第二节	时分多路复用 .....	103
复习题	.....	135
<b>第四章</b>	<b>微波通信系统的维护管理 及故障处理</b> .....	140
第一节	微波电路与设备运行维护的基本知识 .....	140
第二节	常见故障的判别处理方法 .....	151

第三节	保证电路设备安全运行的有关安全技术措施 .....	155
第四节	微波通信设备专用仪器仪表的技术标准和使用方法 .....	160
第五节	数字微波通信系统主要技术指标的测试 ...	169
复习题	.....	196
<b>第五章</b>	<b>一点多址数字微波通信</b> .....	201
第一节	一点多址数字微波通信的概念 .....	201
第二节	一点多址数字微波通信系统的基本原理 ...	208
第三节	一点多址数字微波通信系统的设备配置 ...	212
第四节	一点多址数字微波通信系统的测试 .....	217
第五节	运行与维护 .....	221
复习题	.....	225
<b>第六章</b>	<b>其他通信方式</b> .....	228
第一节	电力载波通信 .....	228
第二节	全塑市话电缆通信 .....	230
第三节	移动通信系统 .....	240
第四节	电话交换技术 .....	246
复习题	.....	252
<b>第七章</b>	<b>防雷保护</b> .....	254
第一节	雷电特性及避雷针的保护范围 .....	254
第二节	氧化锌避雷器 .....	256
第三节	接地电阻的测量及改善方法 .....	258
复习题	.....	261
参考文献	.....	263

## 第一章 电波传播

### 第一节 地形对电波传播的影响

微波中继通信中的电波都是在地球表面的大气中传播的，所以地球表面和大气的不均匀结构对电波都会产生影响，为了简化讨论，先假定大气是一种均匀的且不吸收电磁波能量的介质。这样，就单纯讨论在平面上的传输情况。

地形对均匀大气中电波传播的影响主要有反射、绕射和散射。反射使电波传播中的一部分能量沿一个确定的方向折回到大气中；绕射使电波传播中的一部分能量沿一个连续弯折的方向绕过障碍物而到达其背后地方；散射是电波传播中一部分能量被不规则的地形分散到各个方向，它相当于乱反射。

实际传播中，这三种现象都存在，只是在不同条件下有主次之分。当天线高架所处地面平滑的范围很大时，电波以反射为主；地面粗糙不规则起伏较大时，电波以散射为主；当天线低架或障碍物的尺寸比波长小得多时，电波则以绕射为主。

由于地形的影响，地面可以把天线发出的一部分信号能量反射到接收天线（光滑地面或水面反射的能量更大一些），与主波信号产生干涉，并与主波信号（直射波）在收信点进行矢量相加，其结果是，收信电平与自由空间传播条件下的收信电平相比，也许是增加，也许是减少。

## 一、费涅耳区的概念

### (一) 惠更斯—费涅耳原理

惠更斯提出了电磁波的波动性学说，费涅耳在这个基础上又提出了“费涅耳区”的概念，进一步解释了电波的反射、绕射等现象，并为实践所证实。

惠更斯原理关于光波或电磁波波动性学说的基本思想是：光和电磁波都是一种振动，其振动源周围的媒质是有弹性的，故一点的振动可通过媒质传递给邻近的质点，并依次向外扩张，而成为在媒质中传播的波。

根据惠更斯原理的基本思想，可认为一个点源的振动传递给邻近的质点后，就形成了二次波源、三次波源等等。若点源发出的是球面波，那么由点源形成的二次波源的波前面也应是球面波，三次、四次……波前面也应是球面波。

在微波通信中，当发信天线的尺寸远小于站间距离的时候，我们可以把发信天线近似看成一个点源，如图 1-1 所示。

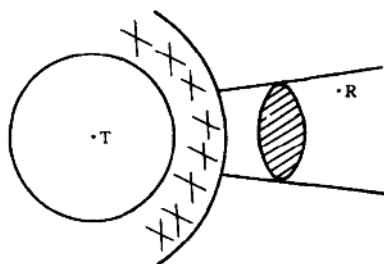


图 1-1 点源发出球面波的波前面

在图 1-1 中，T 为发信点，R 为收信点。当把波前面分成许许多多面积元时，这些面积元都将成为一个新的点源。尽管发信和收信点之间有障碍物，由于它不可能阻挡住所有的面积元，故 R 点仍有一定的场强值，决不会为零。

### (二) 费涅耳椭球面

在讨论费涅耳区之前，先来认识一下费涅耳椭球面，并

用图 1-2 加以说明。

图中发信点为 T, 收信点为 R, 收发之间的距离  $d = TR$ 。在高等数学中讲到: 平面上一个动点到两个定点 (T, R) 的距离之和若为常数, 则此动点的轨迹为一个椭圆, 在空间, 此动点的轨迹为一个旋转椭球面。

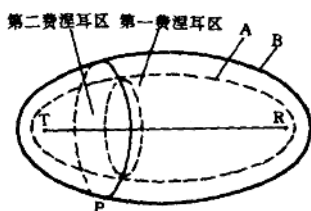


图 1-2 费涅耳椭球面与费涅耳区

在我们所讨论的电波传播中, 当此常数为  $d + \lambda/2$  时, 得到的椭球面称为第一费涅耳椭球面, 此常数为  $d + 2\lambda/2$  时, 得到的椭球面称为第二费涅耳椭球面……, 常数为  $d + n\lambda/2$  时, 得到的椭球面称为第  $n$  费涅耳椭球面, 如图 1-2 所示。图中 A 表示第一费涅耳椭球面, B 表示第二费涅耳椭球面。

### (三) 费涅耳区

如果图 1-2 所定义的一系列费涅耳椭圆球面与图 1-1 中我们要认定的某波前面相交割, 就可在交割界面上得到一系列的圆和圆环, 见图 1-2。中心是一个圆, 称为第一费涅耳区。其外面的圆环 (外圆减内圆得到的环) 称为第二费涅耳区, 再往外面的圆环称为第三费涅耳区、第四费涅耳区……、第  $n$  费涅耳区。这本应该是一些曲面圆和圆环, 但为分析方便, 在以后的分析中, 将把它们近似地看成为铅垂面内的平面圆和圆环。这样近似后, 其计算误差微乎其微。

### (四) 费涅耳区半径

我们把费涅耳区上一点到 TR 连续的垂直距离称为费涅耳区半径, 用  $F$  表示。下面用图 1-3 求第一费涅耳区半径。

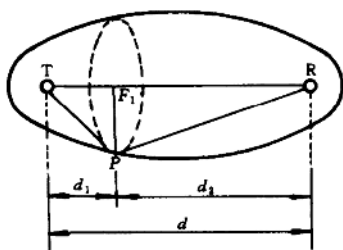


图 1-3 第一费涅耳区半径

在图 1-3 中，P 为第一费涅耳区上一点， $d_1$  为 P 点到发信天线 T 的水平距离， $d_2$  为 P 点收信天线 R 的水平距离，收发站距  $d = d_1 + d_2$ 。

根据费涅耳椭球面及费涅耳区的定义，由图 1-3

可见

$$\sqrt{d_1^2 + F_1^2} + \sqrt{d_2^2 + F_1^2} = d + \frac{\lambda}{2} \quad (1-1)$$

经公式推导又经近似，可得到

$$F_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d}} \quad (1-2)$$

同样可求，第二费涅耳半径为

$$F_2 = \sqrt{\frac{2\lambda d_1 d_2}{d}} = \sqrt{2} F_1$$

第  $n$  费涅耳区半径为

$$F_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d}} = \sqrt{n} F_1 \quad (1-3)$$

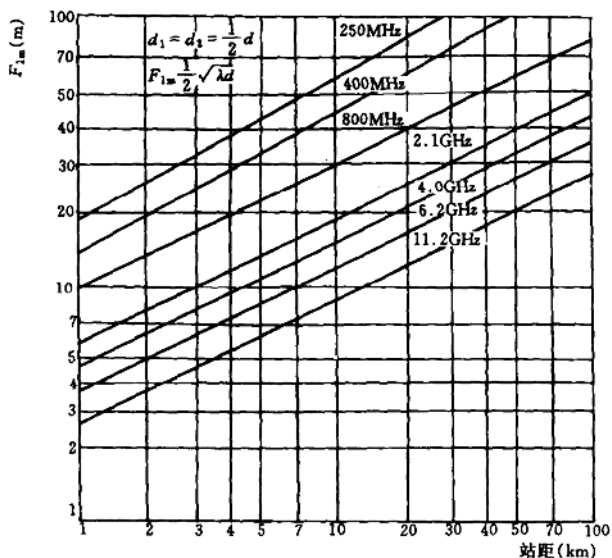
式 (1-2) 中若  $\lambda$  的单位为 m， $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d$  的单位为 km，则

$$F_1 = 31.6 \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d}} \quad (1-4)$$

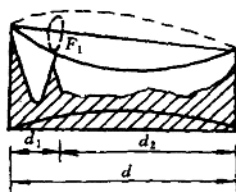
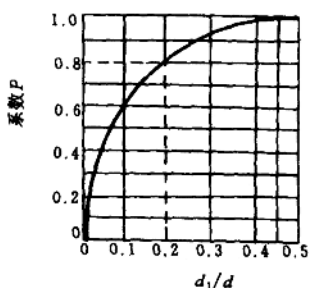
由公式可见，当动点 P 在路径中所处的位置不同时，费涅耳区半径也就不同。P 在路径中点时，以第一费涅耳区半径为例，公式 (1-4) 中  $d_1 = d_2$ ，此时第一费涅耳区半径有最大值，用  $F_{1m}$  表示。在工程设计时，已将站距、微波频率、 $F_{1m}$



三者的关系制成曲线，如图 1-4 (a) 所示。若想求任意一点的  $F_1$  值（不是路径中点的  $F_{1m}$ ）时，参见图 1-4 (b) 的图例。



(a)



任一点  $F_1$  计算公式:  $=PF_{1m}$   
 求出  $d_1/d$  后,再由左图找出  $P$   
 图例  $d: 50\text{km}$   $d_1: 10\text{km}$   $f: 4\text{GHz}$   
 $F_{1m} = 31\text{m}$   $d_1/d = \frac{10}{50} = 0.2$   
 $P = 0.8$   $F_1 = 0.8 \times 31 = 24.8(\text{m})$

(b)

图 1-4 用图解法求第一费涅耳区半径

(a) 站距  $d$  与  $F_{1m}$  曲线; (b) 求任一点第一费涅耳区半径

### (五) 收信点场强与各费涅耳区能量的关系

经分析可以知道，相邻费涅耳区在收信点 R 产生的场强反相（相位相差  $180^\circ$ ）。也就是说，第二费涅耳区在 R 点产生的场强与第一费涅耳区反相；第三费涅耳区在 R 点产生的场强与第二费涅耳区反相，但与第一费涅耳区同相。若以第一区为参考，奇数费涅耳区使收信场强增强，偶数费涅耳区使收信场强减弱。收信点场强则是各费涅耳区在 R 点产生场强的矢量和。由于各区朝向 R 点的倾斜程度不同，故各区相互干涉，进行矢量相加的结果是：收信点 R 在自由空间从所有费涅耳区得到的场强，仅近似等于第一费涅耳区半区空间在该点产生的场强。

## 二、地面反射对收信电平的影响

为了便于说明问题，本节涉及的地面情况均未考虑地球凸起高度。可近似适用于站距很近，地面起伏又不大，忽略地球凸起高度的地形。

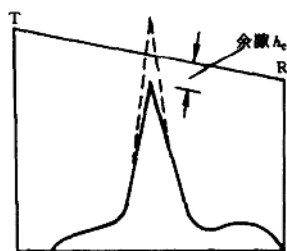


图 1-5 传输路径上的  
刃形障碍物

### (一) 路径上刃形障碍物的 阻挡损耗

在实际的微波线路中，有时会遇到传输路径上的刃形障碍物，如图 1-5 所示。这是因为刃形障碍物不可能遮挡住所有费涅耳区，所以在收信点只要有一定数量的费涅耳区空间不被遮挡，电波就能绕过刃形障

碍物，使收信电平达到一定的数值。

设刃形障碍物顶部到 TR 连线的垂直距离为  $h_c$ ，称为余隙。障碍物顶部在 TR 连线以下时， $h_c$  为正值；障碍物顶部在

TR 连线以上时,  $h_c$  取负值。工程上已根据费涅耳绕射理论绘成障碍物附加衰耗  $V_{dB}$  和相对余隙  $h_c/F_1$  的关系曲线, 从而将障碍点附近电波传播的情况与第一费涅耳区半径联系起来, 如图 1-6 所示。由于刃形障碍物的阻挡, 使电波传播损耗增加, 这个增加的损耗叫做附加损耗, 它将使自由空间条件下的收信点电平降低这一数值。

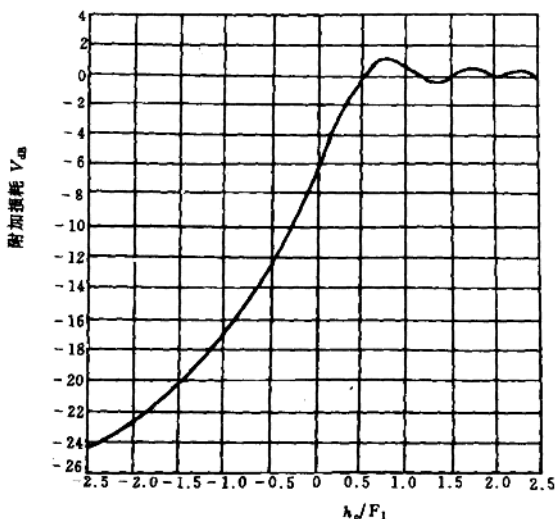


图 1-6 刃形障碍物的阻挡损耗

由图 1-6 可以看出, 在传播路径上有刃形障碍物阻挡时, 如果障碍物的尖峰恰好落在收发天线的连线上 (即  $h_c=0$ ) 时, 附加损耗为 6dB; 当障碍物顶峰超出连线 ( $h_c$  为负), 附加损耗很快增加; 当障碍物尖峰在连线以下, 且相对余隙  $h_c/F$  大于 0.5 时, 则附加损耗将在 0dB 上下少量变动。这时, 实际路径的传播损耗 (或收信电平) 将与自由空间的数值接近。

**【例 1-1】** 已知发信功率  $P_t = 1\text{W}$ ，工作频率  $f = 3800\text{MHz}$ ，两站相距  $45\text{km}$ ，收、发天线增益  $G_t = G_r = 39\text{dB}$ ，收、发馈线系统损耗  $L_{ft} = L_{fr} = 2\text{dB}$ ，收发分路系统损耗  $L_{bt} = L_{br} = 1\text{dB}$ ，若传播路径上有图 1-5 所示的刃形障碍物，余隙  $h_c = 0$ ，求收信电平。

解：(1) 求刃形障碍物的阻挡损耗。由  $h_c = 0$  查图 1-6 得，  
 $V_{dB} = -6\text{dB}$

$$L_s = 32.4 + 20\lg 45 + 20\lg 3800 \approx 137\text{dB}$$

$$P_r = P_t + G_t + G_r - (L_{ft} + L_{fr}) - (L_{bt} + L_{br}) - L_s + V_{dB}$$

$$= 30 + 39 + 39 - (2 + 2) - (1 + 1) - 137 + (-6) = -41\text{dB}$$

## (二) 平坦地形对电波的反射

平坦地形是不考虑地球曲率，认为两站之间的地形为平面的情况。下面研究在真实大气空间（而不再是自由空间）地面对电波的反射。

在实际的通信线路中，总是把收、发天线对准，以使收端收到较强的直射波。但根据惠更斯原理（或因天线方向性所限），总会有一部分电波投射向地面，所以在收信点除收到直射波外，还要收到经地面反射并满足反射条件（入射角等于反射角）的反射波，如图 1-7 所示。

首先推导一下由直射波和反射波在收信点产生的合成电场。

设  $E_0$  为自由空间传播时电场强度的有效值（直射波场强有效值）。则直射波场强的瞬时值为

$$e_1 = \sqrt{2} E_0 \cos \omega t \quad (1-5)$$

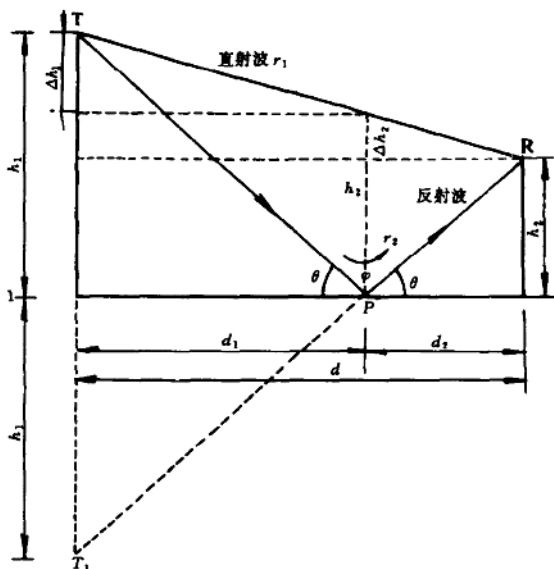


图 1-7 平坦地形对电波的反射

反射波场强的瞬时值为

$$e_2 = \sqrt{2} E_0 \Phi \cos \left[ \omega t - \varphi - \frac{2\pi}{\lambda} (r_2 - r_1) \right] \quad (1-6)$$

式中  $\Phi$ ——反射系数的模；

$\varphi$ ——反射系数的相角。

$r_2 - r_1 = \Delta r$  为反射波与直射波的行程差。经推导(本书略),在收信点R可以用几何的方法求得合成场强的有效值为

$$\begin{aligned} E &= \sqrt{E_0^2 + E_0^2 \Phi^2 + 2E_0^2 \Phi \cos \left( \varphi + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r \right)} \\ &= E_0 \sqrt{1 + \Phi^2 + 2\Phi \cos \left( \varphi + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r \right)} \end{aligned} \quad (1-7)$$

我们把合成场强  $E$  与自由空间场强的比, 称为考虑地面影响时的衰落因子  $V$ , 表示为

$$V = \frac{E}{E_0} = \sqrt{1 + \Phi^2 + 2\Phi \cos\left(\varphi + \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r\right)} \quad (1-8)$$

$$V_{dB} = 20\lg V \quad (1-9)$$

考虑地面影响后, 实际的收信点电平可由下式求出

$$P_r(\text{dBm}) = P_{r_0}(\text{dBm}) + V_{dB} \quad (1-10)$$

式中  $P_{r_0}(\text{dBm})$  ——未考虑地面影响时的自由空间收信电平。

### (三) 用费涅耳区的概念分析地面反射影响

#### 1. $\Delta r$ 与费涅耳区的关系

首先应认定图 1-7 中的反射点  $P$  在我们讨论的那个费涅耳区所在的波前面上。同样,  $TR$  两点为一系列费涅耳椭球面的焦点,  $TR$  连线是波前面的法线, 不管  $\Phi=1$  或  $\Phi<1$ , 都有:

当  $\Delta r = \lambda/2, 3\lambda/2, \dots$  时, 反射点  $P$  相当于第一、第三……各奇数费涅耳区的边缘。此时收信点的合成场强必然是直射波与反射波在该点产生的场强同相相加, 其结果是: 干涉最大, 合成场强最强。图 1-8 示出  $V$  与  $\Delta r$  关系曲线。

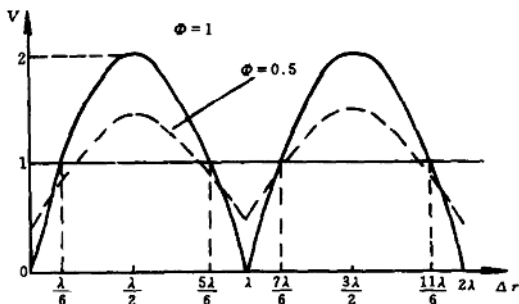


图 1-8  $V$  与  $\Delta r$  关系曲线

当  $\Delta r = \lambda, 2\lambda, \dots$  时, 反射点  $P$  相当位于第二、第四……各偶数费涅耳区的边缘, 此时收信点的合成场强是直射波与反射波在该点产生的场强反相相加, 其结果是: 干涉最小, 合成场强最弱。

当  $\Delta r = \lambda/6, 5\lambda/6, \dots$  时, 反射点  $P$  相当位于第一、第二……费涅耳区内。仅以  $\Delta r = \lambda/6$  时加以说明: 当  $\Delta r = \lambda/6$  时, 反射点  $P$  处于第一费涅耳区之内, 虽然第一费涅耳区的下部面积被地面所阻断, 但因反射波与直射波可同相相加, 得以弥补被阻挡的能量, 故仍能使收信点合成场强与自由空间场强接近。

2. 用相对余隙  $h_c/F_1$  表示衰落因子  $V$

由图 1-7, 可利用几何关系求出 (推导略) 行程差  $\Delta r$  与相对余隙  $h_c/F_1$  的定量关系

$$\Delta r = \frac{\lambda}{2} \left( \frac{h_c}{F_1} \right)^2 \quad (1-11)$$

当图 1-7 中的投射角  $\theta$  很小时 (这符合实际情况),  $\varphi$  接近  $180^\circ$ , 可按  $\varphi = 180^\circ$  计算 (角  $TPR$  为  $\varphi$  角)。

将  $\Delta r$  及  $\varphi$  值代入式 (1-8), 得

$$V = \sqrt{1 + \Psi^2 - 2\Psi \cos \left[ \pi \left( \frac{h_c}{F_1} \right)^2 \right]} \quad (1-12)$$

式 (1-12) 表明了衰落因子  $V$  与相对余隙  $h_c/F_1$  的定量关系。地形使电波反射对收信功率 (或电平) 的影响, 是由  $V$  来表征的, 而对  $V$  的计算, 只要求出相对余隙  $h_c/F_1$ , 问题就解决了。工程已制成  $V_{db} \sim h_c/F_1$  曲线, 可使计算大大简化, 如图 1-9 纵向虚线的右部所示, 其中  $n = 1, 2, 3, \dots$  为费涅耳序号, 横坐标  $h_c/F_1$  恰等于  $n$ , 纵坐标  $V_{db} = 20 \lg V$ 。

$\Psi$  值与地面条件有关, 表 1-1 列出一些经验数据可供参

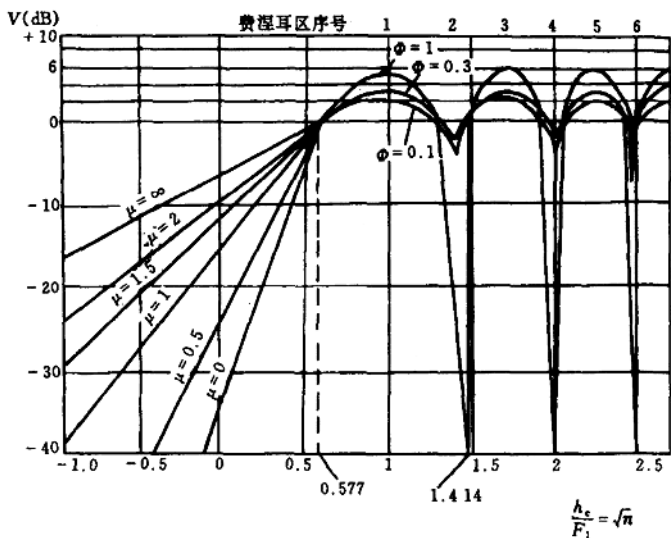


图 1-9  $V_{dB}$ 与  $h_c/F_1$  的关系曲线

考。表中的“反射损耗”为 dB 值，表明与入射波相比，反射波场强减弱的程度等于  $20\lg\Phi$ ，在概念上与衰落因子  $V$  是两回事。

表 1-1 不同地形条件的反射系数及损耗 (dB)

频率	水面(湖面)		稻田		旱田		城市、山区、森林	
	$\Phi$	反射损耗 (dB)	$\Phi$	反射损耗 (dB)	$\Phi$	反射损耗 (dB)	$\Phi$	反射损耗 (dB)
2GHz	1.0	0	0.8	2	0.6	4	0.3	10
4GHz	1.0	0	0.8	2	0.5	6	0.2	14
6GHz	1.0	0	0.8	2	0.5	6	0.2	14
11GHz	1.0	0	0.8	2	0.4	8	0.16	16

在图 1-9 中：

$\Phi=1$  时，考虑地面影响，第一次出现收信电平等于自由



空间传播条件下接收电平时的  $h_c/F_1=0.577$ 。

$\Phi < 1$  时, 第一次出现收信电平等于自由空间传播条件下接收电平时的  $h_c/F_1$ , 为 0.6 左右。

我们把  $h_c/F_1=0.577$  时的余隙称自由空间余隙, 并用  $h_0$  表示, 记为

$$h_0 = 0.577F_1 = \sqrt{\frac{1}{3} \frac{\lambda d_1 d_2}{d}} \quad (1-13)$$

#### (四) 微波线路的分类

间距微波通信常常根据路径余隙  $h_c$  的大小将线路分为三类:

- 1)  $h_c \geq h_0$  称为开路线路;
- 2)  $0 < h_c < h_0$  称为半开路线路;
- 3)  $h_c \leq 0$  称为闭路线路。

对应于三种情况, 衰落因子  $V$  的计算方法是:

(1) 开路线路: 若粗略估算时可用图 1-9; 但因曲线族数量有限, 作精确计算时使用式 (1-9)。

(2) 对刃形障碍物,  $V$  值可由图 1-6 曲线查出。

(3) 对于由较大高地、山岭等障碍物造成的半开路线路和闭路线路, 衰落因子  $V$  应按绕射公式求出 (在《电力系统微波通信》高级工册第一章第一节中讲述), 也可由图 1-9 左半部曲线查出。

在本节的最后应指出, 本节所指的平坦地面是从忽略地球凸起高度的角度去认识的。绝非指地面都是平坦如镜, 才能使用本节的计算方法求衰落因子  $V$ , 比较粗糙的地面及起伏不大的山路, 只要站距很近, 在忽略地球凸起高度影响时都可以用本节所讲的计算方法求出  $V$  值。

但实际的微波通信线路站距不会使很近, 因地球是球形