

微波測量

H. M. 巴婁 著
A. L. 柯倫

科學出版社

73.459
139

微 波 測 量

H. M. 巴 斐 著

A. L. 柯 倫

伍 仁 譯

科 學 出 版 社

H. M. BARLOW & A. L. CULLEN
MICROWAVE MEASUREMENTS

Constable & Co.

1950

內 容 簡 介

本书共分十二章結合微波測量的需要，討論了波導中波的基本特性、諧振腔的特性、阻抗轉換、匹配、傳輸的原理及應用等。介紹了波長、頻率、駐波、功率、衰減、Q值、材料的電特性、接收機、發射機、天線等的各種測量基本原理及方法。每章末尾附有英、俄文參考文獻。

本書適合於大專學校作教學參考書，也適合於科學研究工作及從事微波工作的工程技術人員作參考書。

微 波 測 量

H. M. 巴 魯 著
A. L. 柯 倫

伍 仁 譯

*

科學出版社出版 (北京朝陽門大街117號)

北京市書刊出版業營業許可証出字第051號

中國科學院印刷廠印刷 新華書店總經售

*

1961年3月第一版

書號：2311 字數：283,000

1961年3月第一次印刷

開本：850×1168 1/32

(京) 0001-9,000

印張：11

定價：1.60元

譯 序

微波技术是近代无綫电电子学中尖端技术之一。随着我国科学技术的迅速发展，广大无綫电电子学工作者要求学习和掌握这門尖端技术是十分迫切的。微波测量是微波技术的基础和重要組成部分。在微波雷达、微波通訊等重要工作中都要用到微波测量技术。本书是根据 H. M. Barlow & A. L. Cullen: Microwave Measurements 1950 年版本翻譯的，又根据 1952 年 В. Б. Штейншлейгер 的俄譯本：Измерения на сверхвысоких частотах 作了部分修正和补充注解及补充俄文参考文献。由于这本书出版較早，有一些新的测量方法未包括在內，为弥补这一缺点，在本书最后的参考书籍中补充了几本微波测量书籍，其中包括了毫米波测量。对于初学微波测量的讀者來說这仍是一本較好的书。

由于限于時間以及我們的学識水平难免有翻譯得不恰当甚至錯誤的地方，請讀者批評指正。

3450/13

俄 譯 本 序

“微波測量”一書專門討論超高频無線電測量的各種方法，主要着重於各種測量方式的基本原理。本書補充了以前出版的關於高频測量的專論文章。

除去討論阻抗、波長、功率等的測量問題之外，本書還敘述了超高频發射機、接收機和天線等裝置的測量資料。

原書作者默然迴避了對超高频無線電技術做出重大貢獻的蘇聯學者和工程師們的基本著作。

編譯過程中編者在原書的參考文獻中補充了蘇聯作者的著作。

原 序

微波应用的发展不可避免地要和微波测量技术的发展相偕并进。设备的效率和设计的改进，要求对这些设备的工作条件以及它的各种元件所起的作用有更精确的了解。为了适应这种要求，近年来在这方面有了很大的进展，虽然还有许多工作要作，但目前已达到以合理的准确度可进行多种测量的阶段。微波可用的元件与通常无线电所用的大不相同，主要因为在微波研究中，我们的注意力必须集中在由导体所包围的空间的电磁场上。电流和电位差作为单值量存在完全是例外的情况，但是场型的变化是重要的结果，必须仔细的了解。因此把测量导波传播中的不连续和微扰效应作为本书的重点部分。

本书选择材料是以提供广泛应用的测量技术为主。特别着重在工作的原理而不是器件本身的细节上，也不打算描述特殊性能的仪器或装置。在某些场合，包括了一些典型的实验观测来帮助对测量的全面了解，同时对预期结果的数量级作些估计。

在许多实用的仪器中，我们一定会涉及到导波在一段比较短的路程中传播的问题，只要这个系统不谐振，由于导体电阻而引起的衰减是完全可忽略的。因此，对于这类填充空气的波导的全部理论处理就大为简化，只须考虑一相角因数就够了。但同时必须记住，这种简化有它的局限性，有时衰减可能很重要。

因为本书是为通讯工程师而写的，他们已大量采用有理化MKS实用制单位，我们考虑全部用这种单位是适合的。书中所使用的符号是在这方面最常用的，并在必要时给与专门的注释。

符 号

E ——电场空间矢量。

E_x, E_y, E_z ——平行于 x, y 和 z 轴的 E 分量。

E ——波导中 E 的横分量。

\mathcal{E} —— E 的瞬时值, $\mathcal{E} = E e^{j\omega t}$ 的实部。

E^+ —— E 的前向波(入射波)分量。

E^- —— E 的反向波(反射波)分量。

H ——磁场空间矢量。

H_x, H_y, H_z ——平行于 x, y 和 z 轴的 H 分量。

H ——波导中 H 的横分量。

\mathcal{H} —— H 的瞬时值, $\mathcal{H} = H e^{j\omega t}$ 的实部。

H^+ —— H 的前向波(入射波)分量。

H^- —— H 的反向波(反射波)分量。

K ——电流的表面密度。

$Z = R + jX$ ——波导中的波阻抗 $= \frac{E}{H}$ 。

$Z^* = R - jX$ —— Z 的复数共轭。

Z_0 ——特性波阻抗 $= \frac{E^+}{H^+}$ 。

Z_{00} ——空气填充波导的特性波阻抗。

$Y = G + jB$ ——波导纳; $Y = \frac{1}{Z}$ 。

ρ ——烏莫夫-坡印亭矢量(能流密度矢量) $\rho = E \times H$ 。

P ——功率。

$\rho = |\rho| e^{j\phi}$ ——电场的反射系数, $\rho = \frac{E^-}{E^+}$ 。

$\tau = |\tau| e^{j\theta}$ —— 传输系数。

s —— 驻波比(俄译本称为行波比); $s = \frac{|E|_{\max}}{|E|_{\min}}$ 。

κ —— 媒质的电容率(介电常数)。

κ_0 —— 自由空间的介电常数。

$K_r = \frac{\kappa}{\kappa_0}$ —— 相对介电常数。

μ —— 媒质的导磁率。

μ_0 —— 自由空间的导磁率。

$\mu_r = \mu/\mu_0$ —— 相对导磁率。

g —— 导电率。

δ —— 介质损耗角; $\tan \delta = g/\omega\kappa$ 。

Δ —— 金属的集肤深度或穿透深度。

v —— 任意媒质中 T. E. M. 波(横电磁波)的速度。

c —— 真空中 T. E. M. 波的速度。

v_g —— 波导中的相速或波导中波的图形移动的速度。

v_e —— 波导中能量传播的速度。

f —— 频率。

ω —— 角频率 = $2\pi \times$ 频率。

f_c —— 波导中的截止或临界频率。

f_0 —— 谐振腔的谐振频率。

λ_c —— 波导的截止波长。

λ —— 任意媒质中的 T. E. M. 波长。

λ_g —— 波导波长。

λ_{g_0} —— 空气填充波导的波导波长。

$P = \alpha + j\beta$ —— 波导的传播常数。

α —— 衰减常数。

β —— 相角常数; $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g}$ 。

β_0 ——空气填充波导中的相角常数; $\beta_0 = \frac{2\pi}{\lambda_{d0}}$.

β_{0v} ——真空中平面波的相角常数.

η ——传输效率.

η_0 ——线路效率.

Q ——谐振腔的 Q 因子.

$F(\theta, \phi)$ ——天线的辐射图形.

G ——天线的增益.

x, y, z ——直角坐标.

x ——一般选作传播方向.

α ——吸收系数.

目 录

譯序	(i)
俄譯本序	(ii)
原序	(iii)
符号	(iv)
第一章 波导中波的基本特性	(1)
§ 1.1 引言	(1)
§ 1.2 波导中波的传播	(3)
1. 波导波长	(3)
2. 特性波阻抗	(5)
§ 1.3 反射系数	(12)
§ 1.4 駐波图和波阻抗	(15)
§ 1.5 能流	(25)
第二章 波阻抗的轉換	(31)
§ 2.1 波导中的阻抗轉換	(31)
§ 2.2 极坐标圆图	(36)
§ 2.3 直角坐标圆图	(46)
§ 2.4 衰減	(52)
第三章 空腔諧振器	(65)
§ 3.1 引言	(65)
§ 3.2 一般定理	(73)
§ 3.3 波导型諧振腔	(76)
§ 3.4 諧振腔的耦合	(83)
第四章 波长和频率的測量	(88)
§ 4.1 同軸綫波长表	(88)
§ 4.2 諧振腔波长表	(91)
§ 4.3 应用外差法測量频率	(99)
§ 4.4 諧振腔波长表的定标	(101)

第五章 駐波測量	(105)
§ 5.1 駐波測量器的原理	(105)
§ 5.2 極小點的定位	(106)
§ 5.3 駐波比的測量	(108)
§ 5.4 小駐波比的測量法	(109)
§ 5.5 駐波測量器的定標	(111)
§ 5.6 用圓圖求波阻抗	(114)
§ 5.7 駐波測量器的結構	(116)
§ 5.8 駐波測量中誤差的來源	(121)
§ 5.9 波導測試設備	(135)
§ 5.10 直讀式駐波測量器	(138)
第六章 阻抗匹配與傳輸系統	(142)
§ 6.1 匹配原則	(142)
§ 6.2 膜片與調諧螺絲的性質	(151)
§ 6.3 用膜片匹配	(159)
§ 6.4 無損耗介入元件	(161)
§ 6.5 無損耗介入元件參量的測量方法	(166)
§ 6.6 等效變壓器定理	(175)
§ 6.7 T形連接器及波導調配器	(177)
§ 6.8 使用波導調配器匹配	(179)
§ 6.9 共軛匹配	(182)
§ 6.10 匹配技術	(183)
§ 6.11 有損耗介入元件的測量	(183)
第七章 功率測量	(192)
§ 7.1 熱量計法測量高功率	(192)
§ 7.2 小功率的測量	(197)
1. 電阻熱變化	(197)
2. 熱電動勢	(200)
第八章 衰減和 Q 值的測量	(202)
§ 8.1 引言	(202)
§ 8.2 衰減的測量	(202)
1. 駐波比法	(202)

2. 諧振法.....	(203)
3. 用波導衰減器比較法.....	(205)
§ 8.3 Q 值的測量.....	(215)
1. 由頻率特性直接測量.....	(215)
2. Q 值的比較法.....	(215)
3. 由阻抗的測量確定 Q 值.....	(216)
4. 由能量和功率的測量決定 Q 值.....	(229)
第九章 介質電特性的測量	(232)
§ 9.1 引言.....	(232)
§ 9.2 諧振腔法.....	(232)
§ 9.3 波導法.....	(240)
§ 9.4 自由空間波法.....	(252)
§ 9.5 鐵磁材料.....	(254)
第十章 接收機測量	(258)
§10.1 引言.....	(258)
§10.2 訊號發生器.....	(258)
§10.3 頻寬的測量.....	(260)
§10.4 用訊號發生器測量噪聲系數.....	(261)
§10.5 微波噪聲源.....	(263)
§10.6 接收機其他方面的測量.....	(265)
第十一章 發送機測量	(268)
§11.1 引言.....	(268)
§11.2 磁控管負載圖.....	(269)
§11.3 調制包跡的測量.....	(271)
§11.4 微波頻譜分析儀.....	(272)
第十二章 天綫測量	(283)
§12.1 引言.....	(283)
§12.2 微波天綫的原理.....	(288)
§12.3 天綫輻射圖形的測量.....	(295)
§12.4 增益的求法.....	(302)
1. 由輻射圖形計算增益.....	(302)
2. 與已知增益的天綫直接比較求增益.....	(304)

3.	用两个相同天綫进行增益的绝对測量	(304)
4.	“鏡象”法	(305)
§12.5	天綫的輸入阻抗和頻寬	(307)
§12.6	天綫孔面場的分布	(308)
§12.7	天綫的效率	(311)
§12.8	原輻射器	(312)
附录 I	波阻抗轉換的一般理論	(314)
附录 II	圓图的一般理論	(319)
附录 III	活塞式衰減器的直綫性	(326)
附录 IV	傅里叶分析与頻譜	(330)
附录 V	共軛場定理	(335)
参考書籍		(337)

第一章 波导中波的基本特性

§ 1.1. 引 言

大家都知道,均匀导电的、具有任意横截面但是横截面形状固定不变的空金属管都可以作为电磁波的波导管;我們也知道,当电磁場对時間作正弦变化时,波不改变形状而以等速传播。电磁場可能有两类¹⁾不同的形式,它們和通常传输綫上的 T. E. M.* 波不同,其区别在于沿传播方向有电场分量或磁場分量。假定場的縱分量是电场分量,我們称它是 E 波或 T. M. (橫磁)波。另一种情况,假定場的縱向分量是磁場分量,就用 H 或 T. E. (橫电)表示。用单个字母描述波型是以它的縱向場分量为特征的,应用很广泛。下面我們將采用这种表示法。

通常波导的横截面是矩形或者是圓形的。矩形波导中的 H_{01}^{**} 波和圓形波导中的 H_{11} 、 H_{01} 或 E_{01} 波在实际应用中最为广泛, H_{01} 、 H_{11} 等这些符号的下标确定波导横截面上場的空間分布。所有的波型都以一固有的“截止頻率” f_c 来描述;对充滿空气的波导, f_c 的数值只和它的横截面尺寸以及某一波型有关。假定工作頻率低于此临界值 f_c , 則波就迅速地被衰滅掉,我們說它是“消失”。

有趣的是,这种衰滅并不依赖于能量的耗散,因为这种衰滅也会发生在理想导体的波导里。实际上,只要波导壁中的损失不是很大,那末这种衰滅几乎与它无关。假定工作頻率高于截止頻率 f_c , 則衰滅实际上很小,而与波导壁的电导率、波导的尺寸及頻率

1) 还有一种波,同时兼有 E 和 H 的縱向分量,但这里我們不討論。見文献[1]。

* T. E. M. 是橫电磁波 (Transverse electro-magnetic wave) 的縮写 (譯者注)。

** 在这里矩形波导中的 H_{01} 波就是我們現在常說的 H_{10} 波 (譯者注)。

有关。

通常以相应的截止波长*来表示更觉便利,因为这与波导中填充的介质无关。如此,截止波长 λ_c 与截止频率 f_c 的关系可表示为 $\lambda_c = v/f_c$,式中 v 是平面波在有关电介质内的传播速度。

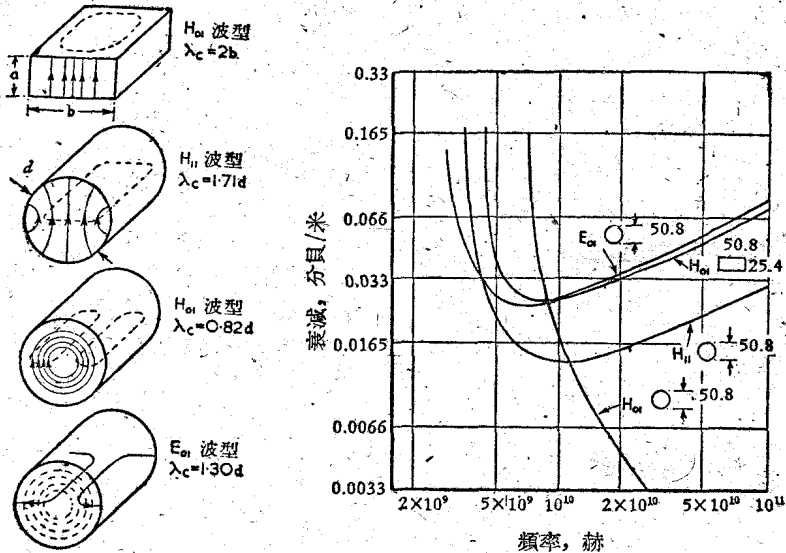


图1 四种最有用的波导波型的特性(电场用实线表示, 磁场用虚线表示)。波导的尺寸用毫米

图1给出矩形和圆形的紫铜波导中几种场形及其截止波长和典型衰减曲线。紫铜的导电率取为 6×10^7 姆/立方米。

进一步的了解见文献(6)和(7)①。

波的最普遍形式可看作是由一组各种频率和波型的单分量波、自左向右前进和同样一组波自右向左前进所合成的。

以下本书所推导的理论将局限于考虑单频率的某个波型,并根据傅里叶理论和正交函数的其他展开理论以保持阐述的普遍性。

* 或称临界波长(译者注)。
 ① 较详细的数据可参考文献[1](俄译本注)。

§ 1.2. 波导中波的传播

1.2.1. 波导波长 关于双导线或是同轴线的特殊情况电波传导理论,已经很详细地研究出来,并利用象圆图一类的工具以简化计算。好在很多情况下,波导方面也可以同样有效地应用这个理论。

在数学上用相似的方法处理是根据这个事实,即两种情况都是一个简谐波,以相角因数 $e^{\pm i\beta x}$ 纵向传播,而波导中同时有一横向驻波分量,但这个分量对于这里的论证是无要紧要的。这样一来,我们被限制在这样的系统,即在系统中波的图形沿纵向以等速度 v_p 前进,同时不改变形状。由此可知,波走过一段距离 x ,要用 x/v_p 秒。对于角频率为每秒 ω 弧度的简谐波,在相距为 x 的两点间,相位差等于 $\omega x/v_p$ 弧度。令 $\beta = \omega/v_p$, 我们得到距离为 x 之内的相角变化 βx 和相应的相角因数 $e^{\pm i\beta x}$ 。

相角因数的周期性表现为,相角 βx 每变化 2π 的话,波的图形就重复一次,这对 x 的相应变化就称为波导波长,以 λ_g 表示。这样,我们有 $\beta\lambda_g = 2\pi$, 或 $\beta = 2\pi/\lambda_g$ 。一般说来,波导中的波长 λ_g 与相同频率的 T. E. M. 波的波长不同。我们现在就要导出任意横截面的波导在空气介质时① λ_g 的表示式。可以证明,电磁场的每一个分量必须满足三度空间的波动方程的同一形式。因此,如果我们考虑波导中的横电场 E , 并假定它以角频率 ω 对时间正弦地变化,那么我们可写出:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{c^2} E = 0,$$

式中 c 是真空中光速, ω/c 是平面 (T. E. M.) 波的相角常数 β_0 。假定 E 对 x 变化的关系是用方程:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = -\beta^2 E$$

① 这里讨论的实际上是真空的情况,因空气介质常数为 1.0006, 而真空为 1, 作者略去了这一点,但有許多测量是不能忽略的(俄译本注)。

代表的,我們得到:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + (\beta_{0p}^2 - \beta^2)E = 0,$$

此方程式的解显然必須要滿足边界条件,即在波导壁附近各处电場必須垂直于表面。要达到这个要求,我們发现量 $\beta_{0p}^2 - \beta^2$ 被限制在某些本征值,譬如 $k_1^2, k_2^2, k_3^2, \dots$ 等等,这些数值均与波导的横截面尺寸有关。如此,对任一給定的本征值 k 我們有:

$$\beta^2 = \beta_{0p}^2 - k^2.$$

当 $\beta_{0p} = k$, 波导的相角常数是零,波就不能传播。这就是“截止”的条件。

我們知道 $\beta = 2\pi/\lambda_g$ 和 $\beta_{0p} = 2\pi/\lambda$, 式中 λ 是 T. E. M. 波长。因此 $k = 2\pi/\lambda_c$, 式中 λ_c 是“截止波长”, 即波导正好不許通过的某一波的波长,我們用波长表示上述的关系如下:

$$\frac{1}{\lambda_g^2} = \frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}.$$

即

$$\frac{1}{\lambda_g^2} = \frac{1}{\lambda^2} \left[1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^2 \right]$$

或

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^2}}. \quad (1)$$

这个关系式是可以普遍应用的。

因此,对所有的波导波型来說,波导中的波长大于同一工作頻率的 T. E. M. 波的波长 λ 。

如果波导中充滿的电介質不是空气,則 λ 必須要認为它是在此种电介質的无限空間内 T. E. M. 波的波长。另一方面, λ_c 是与电介質无关的。假定 λ_0 是自由空間某一个頻率的 T. E. M. 波的波长,設介电常数为 κ_0 , 則在介电常数为 κ 的介質中, T. E. M. 波的波长 λ 由下式决定:

$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{\frac{\kappa_0}{\kappa}}. \quad (2)$$