

毫 米 波 无 綫 电 測 量

Г. Д 布尔頓、Р А 瓦里托夫、Л Н 布良斯基、

В. Д 庫庫施、В И 普罗宁科著

电信工业局編譯所譯

第一机械工业部无綫电計量室校



國防工業出版社

序 言

无綫电技术正向着运用愈益短波的方向发展着。随着厘米波的掌握，毫米波段的无綫电波已开始实际应用。

在毫米波无綫电計量中，广泛运用了厘米波方面所积累的有關測量方法、測量儀器的設計和使用的經驗。但是在小于一厘米的波長範圍中，由于綫路元件和介質內損耗的增大，及機械結構制造的精度要求高，就開始出現了一些附加的困難。

這種情況，就促使人們尋求毫米波无綫电測量技術中一些問題解決的新辦法。首先希望創造一種其極限尺寸不限制波長的測量裝置。因此，光學測量法研究的可能性是合理的。

問題這樣地提出，導致運用毫米波的干涉和繞射現象、馮留斯定律和電磁波有質作用等來進行測量。

本書是使有關毫米波无綫电測量的材料系統化的首次嘗試，它對毫米波无綫电測量技術中的一些主要問題皆作了研究。本書闡述有關波長、頻率、功率、衰減、阻抗、電壓駐波係數、材料的電介質和磁特性的測量方法和儀器。關於毫米波段應用中尚未得到應有發展的一些儀器（如信號發生器、頻譜分析儀等），本書不予以闡述。

作者歡迎所有關於本書的意見。來信請寄至：蘇聯哈爾科夫市大學路 16 號交哈爾科夫國立高爾基大學出版社。

目 录

序言	5
第一章 毫米波振荡器与毫米波指示器波导系统; 实现 和检验波导系统元件匹配方法和仪表	7
第一节 毫米波振荡器	7
第二节 毫米波指示器	10
第三节 波导系统; 波导系统元件匹配程度对测量精度的影响	12
第四节 阻抗和电压驻波系数的测量方法及其仪表	16
第五节 匹配装置	20
第六节 终端匹配负载	21
第二章 波长与频率的测量	23
第一节 谐振式波长表	24
第二节 外差式频率计	29
第三节 原子与分子频率标准	31
第四节 测量波长的干涉法	34
第五节 用绕射分光计法测量波长	43
第三章 功率测量计及其测量方法	48
第一节 功率计的分类	48
第二节 功率热量计	50
第三节 热敏电阻的和电阻辐射热能的测量计	62
第四节 波导功率计	69
第五节 电磁波有质作用在特高频功率测量中的应用	70
第六节 空腔谐振器或同轴线和波导管壁的电磁波压力有质 功率计	74
第七节 反射件、波导管或空腔谐振器内部的电磁波压力有 质功率计	79
第四章 衰减测量和功率分配	89

第一节	衰减器	89
第二节	定向耦合器	99
第三节	作为功率分配器用三通波导管	104
第四节	定向耦合器和衰减器定度的方法	104
第五章	介质的介电常数和磁性常数的测量	108
第一节	波导法测量介质	109
第二节	谐振法测量介质	116
第三节	导磁介质的电性和磁性的测量	118
第四节	测量在自由空间中的电介质	120
第五节	介质有质测量计	131
参考文献		133

毫 米 波 无 繼 电 測 量

Г. Д 布尔頓、Р А 瓦里托夫、Л Н 布良斯基、

В. Д 庫庫施、В И 普罗宁科著

电信工业局編譯所譯

第一机械工业部无綫电計量室校



國防工業出版社

內容提要

本書共分八章，第一章為緒論，第二章至第七章分別介紹了各種常見的數據結構，第八章則介紹了圖的相關知識。本書內容充實，由淺入深，由易到難，既注重理論的闡述，又注重實踐的應用。本書可作為高等院校計算機專業及相关專業本科生的教材，也可供從事計算機工作的工程技術人員參考。

目 录

序言	5
第一章 毫米波振荡器与毫米波指示器波导系统; 实现 和检验波导系统元件匹配方法和仪表	7
第一节 毫米波振荡器	7
第二节 毫米波指示器	10
第三节 波导系统; 波导系统元件匹配程度对测量精度的影响	12
第四节 阻抗和电压驻波系数的测量方法及其仪表	16
第五节 匹配装置	20
第六节 终端匹配负载	21
第二章 波长与频率的测量	23
第一节 谐振式波长表	24
第二节 外差式频率计	29
第三节 原子与分子频率标准	31
第四节 测量波长的干涉法	34
第五节 用绕射分光计法测量波长	43
第三章 功率测量计及其测量方法	48
第一节 功率计的分类	48
第二节 功率热量计	50
第三节 热敏电阻的和电阻辐射热能的测量计	62
第四节 波导功率计	69
第五节 电磁波有质作用在特高频功率测量中的应用	70
第六节 空腔谐振器或同轴线和波导管壁的电磁波压力有质 功率计	74
第七节 反射件、波导管或空腔谐振器内部的电磁波压力有 质功率计	79
第四章 衰减测量和功率分配	89

第一节	衰减器	89
第二节	定向耦合器	99
第三节	作为功率分配器用三通波导管	104
第四节	定向耦合器和衰减器定度的方法	104
第五章	介质的介电常数和磁性常数的测量	108
第一节	波导法测量介质	109
第二节	谐振法测量介质	116
第三节	导磁介质的电性和磁性的测量	118
第四节	测量在自由空间中的电介质	120
第五节	介质有质测量计	131
参考文献		133

序 言

无綫电技术正向着运用愈益短波的方向发展着。随着厘米波的掌握，毫米波段的无綫电波已开始实际应用。

在毫米波无綫电計量中，广泛运用了厘米波方面所积累的有關測量方法、測量儀器的設計和使用的經驗。但是在小于一厘米的波長範圍中，由于綫路元件和介質內損耗的增大，及機械結構制造的精度要求高，就開始出現了一些附加的困難。

這種情況，就促使人們尋求毫米波无綫电測量技術中一些問題解決的新辦法。首先希望創造一種其極限尺寸不限制波長的測量裝置。因此，光學測量法研究的可能性是合理的。

問題這樣地提出，導致運用毫米波的干涉和繞射現象、馮留斯定律和電磁波有質作用等來進行測量。

本書是使有關毫米波无綫电測量的材料系統化的首次嘗試，它對毫米波无綫电測量技術中的一些主要問題皆作了研究。本書闡述有關波長、頻率、功率、衰減、阻抗、電壓駐波係數、材料的電介質和磁特性的測量方法和儀器。關於毫米波段應用中尚未得到應有發展的一些儀器（如信號發生器、頻譜分析儀等），本書不予以闡述。

作者歡迎所有關於本書的意見。來信請寄至：蘇聯哈爾科夫市大學路 16 號交哈爾科夫國立高爾基大學出版社。

第一章 毫米波振荡器与毫米波指示器波导系统；实现和检验波导系统元件匹配方法和仪表

第一节 毫米波振荡器

火花振荡器是毫米波最初来源。1895年俄国著名的科学家，П. Н. 列别捷夫为了研究特高频电介质的电气特性曾采用波长6毫米的电磁波火花振荡器。

于1923年A. A. 格拉柯列娃-阿尔卡吉耶娃建立以电磁波火花激励的大型辐射器，并用该辐射器取得了列别杰夫波（ $\lambda = 6$ 毫米）和鲁边斯红外线（ $\lambda = 340$ 微米）之间波长达0.08毫米的波。

随着特高频电子学的发展，已建立几种毫米波振荡器。其中应用最广的是：速调管振荡器，磁控管振荡器和谐波振荡器。

此外，用行波管，返波管，充气放电杂音发生器和分子束振荡器也能获得毫米波。近来，正在制定利用切连柯夫效应和多普列尔等效应的各种振荡器。

速调管振荡器 在测量振荡器中，经常采用回复速调管作为振荡源，该振荡器的作用原理是利用电子聚束现象。在振荡稳定的状态下，回复速调管的自激机构按照下列方法进行工作。

谐振器上的正电位使阴极放射出的电子流射速加快（图

1)。

电子流在諧振器栅极間高频交变电压 $u = u_m \sin \omega t$ 作用下进行調速。电子飞越栅极后，进入反射极負电位作用的范围内。因此，电子受到阻擋，并开始以反方向往諧振器运动。

电子开始在栅极与反射极間的空隙內聚束。反射极与諧振器間的距离及其电压的大小，应确定得使高频电场阻擋电子时（即电子流将把自己的能量輸送

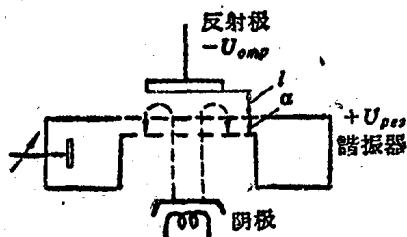


图 1 回复速調管电路图。

給諧振器的电磁場时)，电子流成电子束能重新通过諧振器的栅极。

仅当反射极和諧振器內的电压固定时，回复速調管才能产生自激。

由于回复速調管的最大波长处于毫米波段內，所以振荡系統內的損耗极大，同时在某些情况下，其精密度达零点几微米，这就使制造高精度速調管結構元件时有一定的困难。近年来用造型法制成了用于 4 毫米以內波长的輸出功率为 30 毫瓦的毫米波速調管。

磁控管振荡器 苏联科学家 H. Ф. 阿列克謝耶夫和 Д. Е. 馬里罗夫所設計的多諧振式磁控管振荡，其工作原理是分布于磁控管阳极部分內的諧振磁場与电子流。該电子流是固定磁場和磁控管阴极与阳极間的外加电压（脉冲电压或直流电压）来控制。在固定磁場和电场，以及諧振器高频磁場的作用下，当振荡处于稳定状态时，空間电荷形成許多“車幅”。

多諧振式磁控管內电磁場空間电荷分布特性的图解示于图2。 K 和 A ——磁控管的阴极和阳极， H ——磁場， Q ——空間电荷。

現在于毫米波段中不但制造出脉冲磁控管，而且有連續輻射磁控管。

諧波发生器 大家知道，在頻率 f 高频振荡作用的晶体檢波电路中，由于檢波器具有非

直綫性的特性便出現頻率为 nf 的电流（式中 n ——正整数——諧波号数），諧波号数越大，电流强度就越小。如果能用任何一种电路分出諧波成分，則該諧波成分可用作頻率更高的振荡电源。

在檢波器电路中不同頻率的两种信号作用其上时，便会出现組合頻率 $\pm mf_1 \pm nf_2$ 的电流，式中 m 和 n ——正整数。例如，当（电流）增加一倍时，便可得到約为基頻饋給功率的百分之几信号。組合頻率的振幅比同次諧波振幅能取得較大的数值。

增加和改变較长波段的供电电源頻率是获得毫米波段能量的方法之一。硅檢波器和鉻檢波器都可用来增頻和变頻。这两种檢波器的变换系数大致相同，但鉻檢波器較稳定。

用晶体倍頻器可得到其强度足够供某些测量用的毫米波。将較长波长的二个电源的振荡同时作用到晶体檢波器时，（其中一个为可調的电源）用晶体檢波器电路中的組合頻率便

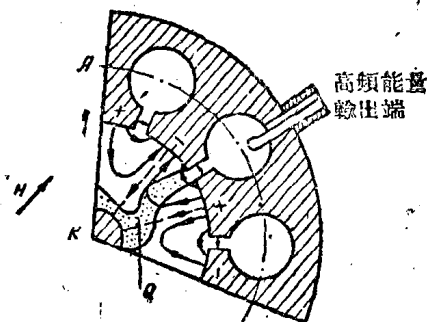


图2 多諧振式磁控管的电磁場与空間电荷的分布。

能实现毫米波段的均匀复盖。

利用晶体检波器分出谐波的方法来增频的原理图示于图3。基频 f_1 输入波导管调谐部分。用上波导管的晶体分出频率为 nf_1 的谐波；该波导管的尺寸相当于此谐波，而且小于基本频率的极限尺寸。

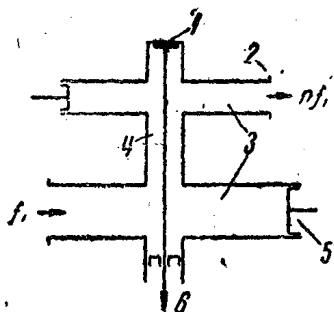


图3 用晶体检波器增大频率的

原理图：

1—晶体的凸缘；2—输出端；3—波导管；4—同轴綫；5—短路活塞；6—位移或调制。

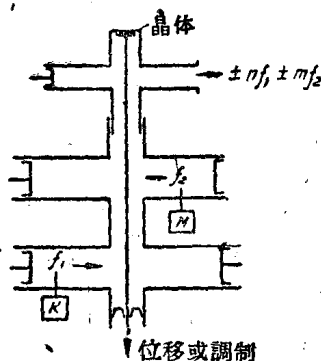


图4 变频的原理图。

图4利用两个振荡器（即频率为 f_1 的振荡器K和频率为 f_2 的振荡器M）同时作用于检波器时，在晶体检波器电路中产生的组合频率的倍频的原理图。

第二节 毫米波指示器

毫米波指示器系用来表达电磁振荡和测定其强度。现有的毫米波指示器，按其工作原理可分为下列几种主要类型：热电偶（温差电偶），热电阻（热能辐射测量计，热敏电阻），非直线性元件（晶体检波器以及其他等）。

作振蕩指示器用的热电偶（溫差电偶）的工作原理是根据电磁振蕩的热效应，因此，由不同材料制成的导线在焊接处会出现可用直流指针式仪表来控制的热电势。

热电偶是电磁振蕩原始指示器的一种，十九世纪末它在物理学上的应用颇为广泛。П. H. 列别杰夫在自己的实验中就用热电偶来记录毫米波段衰减的振蕩。

热电偶可用来指示向空间辐射的电磁能量和传输线路及槽路中的电磁振蕩。接在半波长振子中的非接触式热电偶线路如图 5 所示。如果该振子的位置对于发射机构保持不变的话，热电偶的电流值即可用来指示发射机的输出功率。

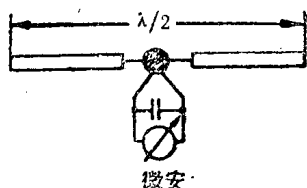


图 5 接在半波长振子中的非接触式热电偶线路图。

热电阻振蕩指示器的工作原理，是在高频能量作用下改变该元件的电阻为基础的。较常用的热电阻是电阻温度系数较大的热能辐射测量计和热敏电阻，它们对电磁波强度的改变具有很高的灵敏度。

目前广泛采用晶体检波器作为毫米波指示器，因为该检波器具有非直线特性，所以可以用来检波或把这种信号变为较低频率，便于用简单器具检验。

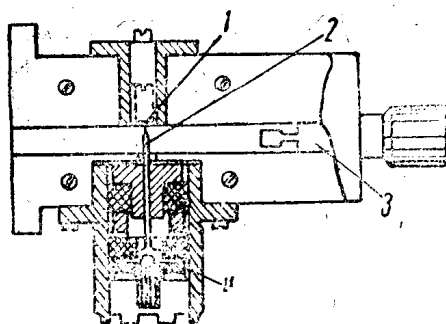


图 6 毫米波段检波头的结构。

1—晶体；2—振子；3—活塞；4—输出探头。

锗检波器和硅检波

器在毫米波段中均可应用。檢波器的灵敏度一般不超过 0.7 微安/微瓦，其灵敏度取决于晶体的质量，接触弹簧的銳度及其压力等等因素。

带有一个調諧元件（能把电压駐波系数匹配到小于 2 的非接触短路活塞）的 4 毫米波段檢波箱的結構如图 6 所示。

由于采用了直徑較大的振子便能和一个調諧机构相匹配。

第三节 波导系統；波导系統元件匹配程度 对測量精度的影响

在毫米波无綫电技术中也像在厘米波技术中一样，广泛利用波导管傳播电磁波。無論在一般毫米波設備中，或者是在測量仪表中都能应用。毫米波振蕩器起始的波导系統包括：波导傳播綫路，异徑管，联接头，各种調整装置，匹配装置和測量装置。現在，对各种毫米波段的波导管都規定有一定的尺寸。

在毫米波的各种測量中，波导系統元件适当的匹配可以得到正确的結果。例如，当測量功率时，其測量結果实际上是根据功率計輸入端和振蕩器輸出端与波导系統的匹配情况而定。用代替法測量衰减时也是如此，其結果实际上是取决于标准衰减器和被定度的衰减器輸入端与輸出端、指示器輸入端与振蕩器輸出端的匹配的情况。因此，带有理想匹配元件的波导系統所获得的測量結果一般认为是正确的。

測量功率和衰减时，失配誤差特別大。为了說明波导系統元件的匹配对功率和衰减測量精度影响的程度，讓我們回忆一下某些已知的关系。

在均匀的波导中,接有效输入电阻(等于波导阻抗 W)为 Z 的负载,则在此仪表中入射电磁波的全部功率将被吸收掉,波导线路中发生行波状态,可以认为这种仪表的输入端是与该波导线路相匹配的(或简称匹配)。

在波导中接不匹配的电阻负载,则在其中除了入射波外还有反射波(多次反射时反射波为 n)。

我们还记得,配匹除了原先已有的概念外,现在还有在波导系统中两个元件复合耦合匹配的概念。这时,每个元件都负载于电阻,阻抗的有功成分等于其输出电阻的有功成分,其无功成分的数值相等,但符号相反。

当振荡器与负载复合耦合匹配时,最大功率由振荡器传输到负载。

如果一个仪表匹配好了,另一个仪表与其复合匹配,那末第二个仪表也认为是匹配好了。在特殊情况,有时,可用这种复合耦合的匹配作为匹配仪表方法之一。

仪表的输入阻抗和输出阻抗是频率的函数。因此,在某一频率匹配的仪表,若采用另一频率就会发生失配。在频带中仪表带有规定精度匹配是该仪表主要特性之一。

反射波强度与入射波强度幅度的比值称为反射系数 ρ 。

$$\rho = \frac{E_{\text{отр}}}{E_{\text{пад}}} = \frac{\tilde{Z} - 1}{\tilde{Z} + 1}, \quad (1.1)$$

式中 $\tilde{Z} = \frac{Z}{W}$ —— 负载的额定电阻。

在一般情况下,反射系数是一个复数,并可写成下面形式:

$$\rho = |\rho| e^{i\varphi}.$$

实际上,任何负载的反射系数,是按无损耗波导线路中