

寬頻帶远程波导通讯

Ю. И. 卡茲納切也夫 著

科学出版社

73.4571
K1

寬頻帶远程波导通讯

Ю. И. 卡茲納切也夫 著

王文涛、刘广建 等譯

科 学 出 版 社

Ю. И. КАЗНАЧЕЕВ
ШИРОКОПОЛОСНАЯ
ДАЛЬНЯЯ СВЯЗЬ ПО ВОЛНОВОДАМ

Издательство АН СССР, 1959

內 容 簡 介

这本小册子,阐述了准备应用的一种新的、极有效的远程波导(管子)通讯形式的研究成果。指出了实现通讯能力比目前应用的最完善的远程通讯系统大千百倍的波导通讯线的原则可能性。远程波导通讯线,能够保证沿一根管子,远距离传输几百路电视节目和任意路的电话,指出了在波导通讯领域中的复杂的科学任务。目前,苏联科学家正为解决这些任务而劳动。

寬 頻 帶 遠 程 波 導 通 訊

Ю. И. 卡茲納切也夫 著
王文涛、刘广建 等譯

*

科学出版社出版 (北京朝阳门大街 117 号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

*

1960 年 4 月第 一 版

书号: 2135 字数: 51,000

1960 年 4 月第一次印刷

开本: 787×1092 1/27

(京) 0001—11,000

印张: 2 14/27

定价: 0.34 元

譯 序

本書介紹一種最新的，被喻為共產主義的通訊方式——寬頻帶遠程波導通訊。這種通訊方式的最大優點是：通訊容量極大（可以同時傳輸幾百路電視，幾十萬路電話）；信號不失真（採用脈碼調制）；不受外界干擾；保密性強以及經濟耐用等。

在黨的社會主義建設總路線的光輝照耀下，這門世界上最新的尖端科學技術，在最近一、二年內，在我國得到了飛躍的發展。愈來愈多的科學工作者，開始從事這方面的研究工作。

本書通俗而扼要地對這門學科中的基本問題，做了較全面的闡述。作者對理論和實驗並重，並使二者密切結合。內容深入淺出，適於一般初始從事這方面工作的同志及業餘愛好者學習之用。同時，對這方面的專業科學工作者，也有很大的參考價值。相信，由於本書譯本在我國的出版，會對我國波導通訊事業的發展帶來好處。

本書是由許多同志合譯，由王文濤同志總校，並經黃宏嘉同志審查。由於我們水平有限，譯文中謬誤之處，在所難免，望讀者指正。

譯 者

1959年12月於北京

原 序

近年来,苏联、美国和許多其他国家,为了解决远距离波导通訊問題,开展了广泛的科学研究工作。研究工作的基础,是力图利用某些类型电磁波的特殊传播条件,这些电磁波能在圓金属管内远程传播,而其衰减极小。波的传播条件的这种特点,为建立新的十分有效的特寬頻带远距离通訊系統,揭示了前景。它可以传送几百路电视节目和几十万路电话,并且实际上沒有距离的限制。

采用波导通訊,意味着整个电訊領域內的技术革命。这說明了,为什么目前許多国家对远距离波导通訊的研究工作予以极大的注意。

在苏联,苏联科学院无綫电电子学研究所、苏联邮电部邮电科学研究所,以及一些其他研究所的全体科学工作者,目前都在为解决这方面存在着的一系列科学問題而努力。

本书簡述了苏联和外国在远距离波导通訊方面的工作成果。实际材料主要是以苏联科学院无綫电电子学研究所波导實驗室,在作者领导下所进行的研究工作为基础,同时也反映了苏联邮电部的許多研究所和其他研究单位所完成的卓有成效的研究工作成果。

有很多科学工作者和工程师参加了这一研究工作。他們在努力克服面临的困难和解决远距离波导通訊問題中,表現了高度的創造性和主动性。由于科学工作者和生产者的共同努力,目前已經克服了許多困难,但是在远距离波导傳輸問題完全解决以前,还要进行巨大的工作。

目 录

譯序.....	i
原序.....	ii
电訊的发展.....	1
波导.....	4
波导中介質对无綫电波的吸收.....	11
波导的非理想形状引起的附加損耗.....	12
自滤波导.....	19
伴流.....	23
調制方法的选择.....	24
調幅	25
調頻	26
脉冲編碼調制	27
毫米波的发生和放大.....	31
圓截面波导綫元件, 波导和測試方法.....	34
实验研究結果.....	52
波导通訊綫的应用前途.....	58
参考文献.....	61

电 訊 的 发 展

自古以来，通訊便在人民的生活中起着重要的作用。人們利用自然中可以支配的各种工具，来越距发送和接收消息。从在古代战争时已知的最简单的篝火和火炬的火光信号开始，通訊事业不断地发展、改善，而今天达到了现代化的高度水平，以致能够保証千百路电话和若干路电视节目同时远距离传输。

通訊技术最蓬勃发展的时期，也正是社会生产力迅速增长的时期，工业生产方式获得发展的时期，在新的知識领域中科学探索繁荣的时期，在十九世紀和二十世紀丰富了社会历史的巨大发明出現的时期。

远在 1794 年俄罗斯学者、天才的发明家 И. П. 庫里宾 (Кулибин) 詳細地研制了光报机和特殊光碼，用来从一个塔传送光报信号到另一塔。但是他的发明，当时未能实现。以后在 1806—1812 年俄土战争时期，A. 布达科夫 (Бутаков) 的光报系統，曾被成功地用来指揮黑海上的俄国舰队。然而，在改善越距传递消息的方法方面，真正的进步是开始于对电現象科学研究第一批成果的出现。1832 年，俄国学者 П. Л. 什林格 (Шиллинг) 創制了第一个电报机。1837 年，美国人 S. 莫尔斯 (Morse) 发明了电磁电报机。由于这种发报机简单可靠，从而促进了电报通訊的迅速发展。在很多国家内这种机器一直应用了一百多年。1876 年苏格兰人 A. G. 貝耳 (Bell) 在美国发明了电话机，从而在通訊的发展中开辟了新的紀元。随着电话机的发明，便有可能远距离传送真正的語言。在这以前及以后很长时期内，金属导綫是唯一用来传送电报和电话信号的媒介物。

在 1831—1855 年間英国学者 M. 法拉第 (Faraday) 对电力和磁力的性質及其相互作用进行了极重要的研究。他的工作引起了

很多学者的注意，并大大促进了这个新领域内科学研究的发展。所有这些研究工作，在另一英国学者 J. C. 麦克斯韦(Maxwell)的著作中得到了天才的总结。他建立了严密的电磁场理论（发表于1873年），并确定了光的电磁性质。1887—1888年，德国学者 H. R. 赫兹(Hertz)进行了一系列的实验，证实了麦克斯韦关于存在有以光速传播的电磁波的预言。而于1895年俄国学者 П. Н. 列别捷夫(Лебедев)在精密的实验中，发现了光压。这样就证实了 J. C. 麦克斯韦关于光的电磁性质的原理。

同年，1895年，另一俄国学者 A. C. 波波夫(Попов)第一次实现了不用导线越距传送消息，从而开辟了电讯发展中新的纪元。从此，在现今人类社会生活中起着重要作用的无线电技术，开始发展起来了。

A. C. 波波夫最初的无线电传输是在分米波波段进行的。后来人们开始采用越来越长的波。随着电子管发明，情况开始有了改变。在米波、分米波而到1940年达到在厘米波等波段上产生连续振荡成为可能。无线电技术经过了辩证发展的循环后，又重新回到短波方面来了。但它已达到更高的技术水平。

由于对新的电讯通路的需要日益增长，要求缩短越距传输信号所用的无线电波的波长。在长波和中波波段内（波长100米以上），能够传输500路电话。在短波波段内（从10到100米），通话数量增到5000路。在从1—10米的波长内，通话数量还可能增加10倍。在这个波段内，可以传输几个需要宽频带通路的电视节目。由于多路电话和电视节目传输系统的应用和发展，对波道宽度提出了更高的要求。近20—25年来，这些系统获得了广泛的应用。现在，无线电技术的发展进入了新的时期——掌握无线电波毫米波波段。它包含着发展一切现代化通讯方式的无限可能性。

目前在经济发达的国家中，电气通讯工具的发展，在于扩大基层电话网，特别是市内电话网，在于电话通讯日益自动化及城市间电话通讯向自动化过渡，并为将全国自动电话局联结为一个统一的网路进行准备工作，以及在于发展多种节目的电视广播。所有

这些趋向，是和对高质量的长途电话和电视通路迅速增长的需要分不开的。

为了解决这些任务，需要建立新的容量大的长途通讯干线。举例说明对这种干线通讯能力的要求。如果我们要把莫斯科和列宁格勒的自动电话站联结起来，即使在目前存在的有限的基层通讯网的情况下，也需要 3000 个电话通路。当莫斯科和列宁格勒市内电话网进一步发展时，这些要求将更加增加。为了合理组织我国（指苏联）的多种节目电视广播，为了和一些城市交换电视节目，必须要有 20 个或者更多的长途电视通路。

可以指出，现代的远距离通讯技术方式是不能完全满足对宽频带通路提出的要求。数千路电话和一路电视节目的远程传输，现在仅能在同轴电缆和无线电中继线路上进行。最新的同轴电缆通讯系统，可以保证沿同轴线路传输 1800 路电话，或者一路电视节目和 600 路电话。在一路无线电中继线上，可以传输 600 路电话，或一路电视节目。增加无线电中继线的通路数目，或者电缆线路中的同轴线对数，可以有力地增大这些线路的通讯能力。但是这不仅在技术上有很大的困难，而且需要耗费大量财力物力。这个办法很少采用，还因为上述二种远程通讯系统，由于在传输线里传送信号失真的积累，传输长度受到了限制之故。在大于 2000 公里长的距离上，其效率是越来越低。当然，这并不是说这种远距离通讯形式已经失去意义。在目前，同轴电缆和无线电中继线对发展远程宽频带通讯系统，起着很重要的作用。近几年来，进行了巨大的科学研究工作，从而可以从根本上改善这些线路的质量指标，并且增大其通路宽度。毫无疑问，必须继续广泛开展这些工作，发展和改善这种远距离通讯形式。但是由于传输线失真的积累对通讯线长度的限制，是一个原则性的特点，因此有必要寻求新的更有效的远距离通讯技术工具。

经济问题也是很重要的。如果考虑到，随着自动电话网和电视广播的发展，对远距离通讯系统的要求将愈来愈高。很明显，这需要付出庞大的费用。有理由设想，波导通讯线路，在经济方面的

競賽中，也會把無線電中繼線路和電纜線路拋在后面。

波 导

十九世紀末，英國學者瑞利(Rayleigh)得出結論：在金屬管里，可以激發沿軸綫傳輸而且能量消耗較小的電磁波。由瑞利所發展起來的理論，許多年來並沒有得到應用。直到1936年，由於無線電厘米波技術，特別是厘米波真空技術發展的巨大成就，瑞利的想法才被美國的蘇斯沃爾司(Southworth)所實現。他在內徑12.5厘米的管內將波長9厘米的無線電波發送到260米遠的距離。試驗表明，管內電波衰減很小。這個試驗，引起了許多研究組織和學者們的注意。空心波導的傳輸理論在蘇聯得到了多方面的研討〔特別在A. Н. 吉洪諾夫(Тихонов)，A. А. 薩馬爾斯基(Самарский)，Г. В. 基孫柯(Кисунько)，A. А. 皮斯托勒柯爾斯(Пистольковский)，Н. Н. 馬洛夫(Малов)，Я. Н. 費勒德(Фельд)，Л. А. 瓦因什琴(Вайнштейн)等人的著作中]。1946年出版的B. А. 維建斯基(Введенский)和A. Г. 阿林別爾格(Аренберг)合著的“無線電波導”一書*，大大促進了蘇聯波導研究工作的開展。由於許多學者，其中包括蘇聯作者^[1]，對波導進行了廣泛的研究，從而解決了波導內有效地激勵電磁振盪的問題。1948年H. А. 庫茲明(Кузьмин)成功地實現了波導內激勵低衰減波的第一批實驗。研討了波導內無線電波的傳播條件，測量了波的衰減，確立了波導的技術標準，研製了成套測試設備與波導元件。所有這些成就，使得建立複雜的波導系統，以解決多種多樣的實際問題，成為可能。由於進行了這許多準備工作，空心金屬波導管在最近10—15年來獲得了廣泛的實際應用。

在波導中傳輸的電磁波，通常按其結構，可設想分成“電波”和“磁波”。電波(E 波)的特點，是具有電場的縱向分量(沿着波導軸)。而磁波(H 波)相應地具有磁場縱向分量。當波導橫截面相

* 中譯本科學出版社1959年出版。

当大时,能够同时传播大量不同型式的 E 波和 H 波。被激励和传输的波的数目,决定于波导横断面的大小和形状以及波长。特别重要的是决定于波长。在波导里传播的波,有一极限波长。在一给定截面的波导内,只能传输一定类型的波,其波长小于这个极限值。这一情况,表明在图1上。图上曲线表明相速和群速¹⁾与 λ_0/λ 值,即临界波长与波导内所传输波的波长之比的关系。从这些曲线可知,当接近临界波长时,相速 v 无限增大,而群速 u 减小到零。于是,沿波导管的能量传输就终止了。在波导中每个类型的波,都有自己的极限波长。

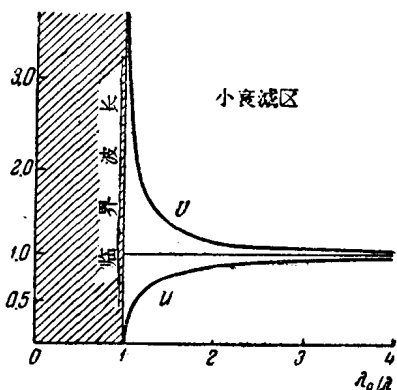


图1 波导管内波的相速与群速

图2表示矩形截面和圆形截面波导内电磁场分布的一些典型情况。图2中绘出的场,表示矩形截面波导内的 H_{10} 波,圆形截面波导内的 H_{01} 波, E_{11} 波和 H_{11} 波的场。这说明在矩形截面波导中,电场在横截面的宽边方向上有一个极大值,而窄边方向是不变的。相应的,例如圆波导中, H_{01} 波的电场,在半径方向上有一个极大值,而沿圆周方向不变。在一般情况下,可以用 H_{mn} 来表示波型。这就是说这种波型的电波在半径方向,有 n 个最大值,而沿圆周方向,有 m 个最大值。但是,具有大指数 mn 的波型,没有得到实际应用。因为它们较不稳定,且在波导内激发极为复杂,和简单的波比较,它们在传送能量方面也没有优点。

由于不同波型在波导中临界波长的不同,可能实现传播一种或极有限数目不同类型波的波导。这些形式最简单的波导,获得最广泛的实际应用。其中如矩形波导,当正确选择管的大小时,在管

1) 相速即振荡的某相位,例如,最大值的传播速度。群速是已调振荡的包络传播的速度,相等于能量传播的速度。

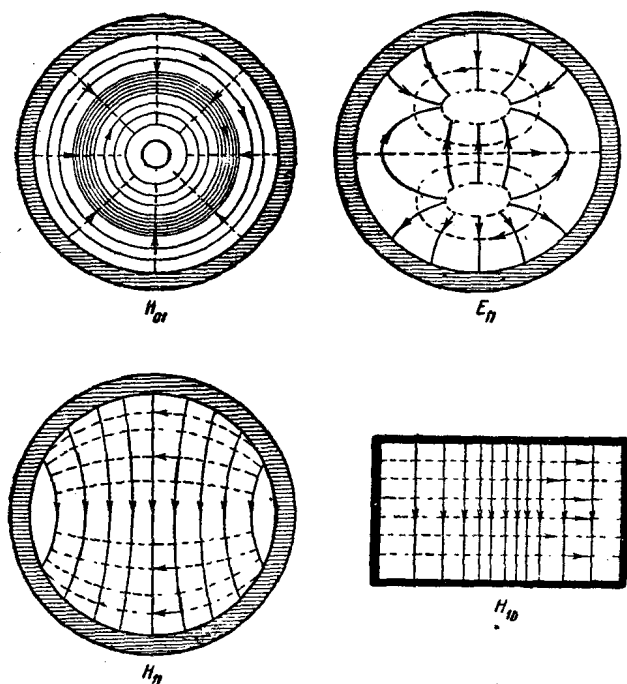


图 2 在矩形波导和圆形波导管内波的场结构

实线——电场； 虚线——磁场。

内只能传播基本波型 H_{10} 。由于 H_{10} 波场形结构简单，矩形波导很适合厘米波段的无线电台，并且在雷达技术中也得到了广泛的应用。

电磁波在空心金属波导管内传输时，在管壁上激发出电流。电流的分布与大小，决定于波型与波长。如果管壁内电导率为无穷大（电阻等于零），则波长短于临界值的任何波，在波导管内便无损耗地传播。

但是金属的电导率，在常温下是一个有限值。所以电磁波的部分能量，便消耗于波导壁的加热上，而波本身也就有了衰减。衰减值的大小决定于壁的电导率、波型及波长。这时，所谓的“趋肤效应”便有了决定性的意义。高频电流仅仅在金属表面传播。这

样,在厘米波与毫米波波段上传播时,壁内电流只集中在厚十分之几微米的薄层内。在实际应用波导的一切情况下,波导线上的衰减具有重大意义。因为它决定着沿波导传输的能量损耗,而波导通讯线的衰减更有特殊的意义。线内衰减愈小,则增音段愈长,而通讯线也就更加有效¹⁾。图3是直径10厘米圆波导内 H_{01} , H_{11} 和 E_{01} 波以及周长相等的矩形波导内, H_{10} 波的衰减曲线。 E_{01} 和 H_{11} 波的衰减特性表明,这些波在具有巨大实际意义的频带内,有一最小衰减区域。矩形波导内 H_{10} 波的衰减特性,也相类似。当在最小范围以外传输这三种波型时,不论加长波长或减短波长,波导内的损耗都会增大。一切其他波型的衰减曲线,都具有这样的特性。

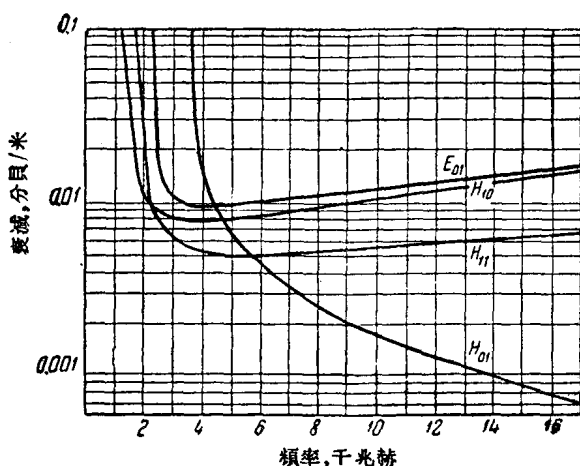


图3 周长相等的波导内波的衰减特性

唯一例外的是 H_{01} 波。由图3的曲线很容易看出,与所有其他波型不同,随着波长的缩短, H_{01} 波的衰减降低,且最后趋于零。这是由于 H_{01} 波在波导内传播时管壁内只有环形电流。电流的大

1) 与宽频带通讯的其他情况一样,沿波导传输时,电磁波的衰减,可用放大器来补偿。在波导传输线上,每隔50—60公里,便接入这样的放大器。

小与纵向磁场分量成正比。随着频率的增大, 这个场分量趋近于零。与此同时, 壁内环形电流也减小, 而电磁波的衰减也就减小, 随着频率增加, H_{01} 波好象离开了管壁而变成横的。正是由于 H_{01} 波的这个特性, 就为采用圆波导远距离通讯开辟了途径。

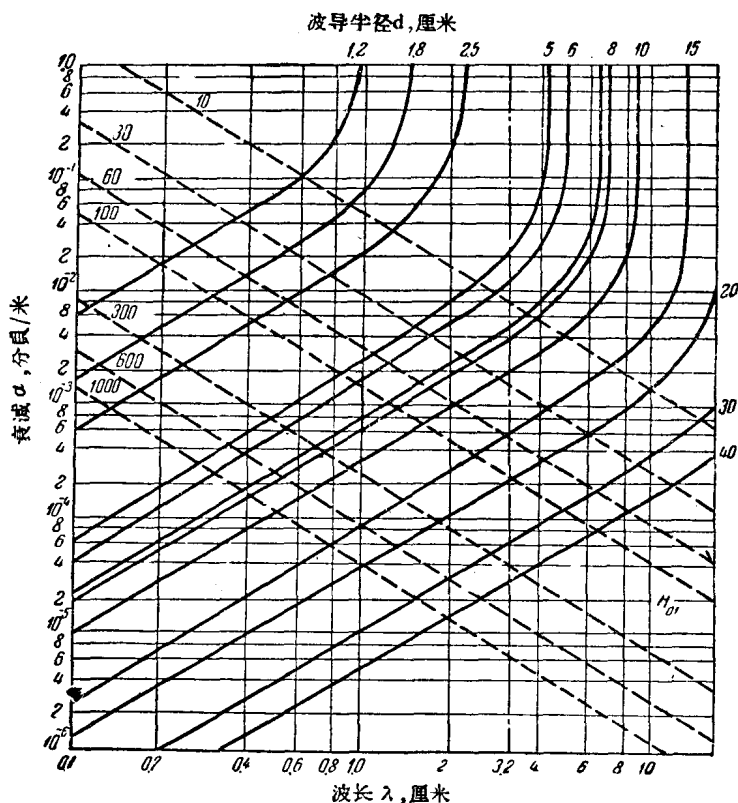


图 4 H_{01} 波的衰减特性

图 4 列出一系列曲线, 表示直径不同的圆形截面铜波导 H_{01} 波的衰减特性 (实线)。由这些曲线看出, 降低波导内 H_{01} 波衰减有两个方法: 缩短波长或增大波导直径。如果同时缩短波长或增大波导管直径, 则可以将波导内无线电波的衰减, 降低到微不足道的数值。为了说明这个可能性, 可以研究表 1。表内列出了波导

表 1

直径, 厘米	波长, 厘米	衰 減, 分貝/公里	增 音 段 长, 公 里		
			l_1 (90分貝)	$l_2(\Delta f_1=10^3\text{赫})$	$l_3(\Delta f_2=10^7\text{赫})$
12.5	3	0.8	112	1.5	150
	2	0.4	224	5.7	570
	1	0.16	560	43.7	4370
	0.8	0.1	900	87	—
	0.6	0.07	1280	210	—
8	3	3.5	26	0.53	53
	2	1.8	50	2.1	210
	1	0.6	150	17	1700
	0.8	0.41	220	38	—
	0.6	0.28	320	90	—
6	3	10	9	0.25	25
	2	4	22.5	1.07	107
	1	1.5	60	10.5	1050
	0.8	1	90	21.2	—
	0.6	0.6	150	48	—
5	3	20	4.5	0.15	15
	2	8	11.2	0.61	61
	1	2.5	36	5.8	580
	0.8	1.8	50	10	1000
	0.6	1.1	82	33	—
2.5	0.4	0.6	150	120	—
	0.8	15	6	2.7	270
	0.6	8	11	8.1	810
	0.4	3.5	26	28	—

每公里衰減的数值¹⁾和增音段上衰減为 90 分貝时, 增音段可能的长度 (l_1 列)。这里也引出一些数据来说明由于色散失真使得通

1) 在实际的无线电工程中, 无线电波的衰減或放大, 习惯上常用分貝表示。它等于 $1/10$ 貝耳。貝耳由功率 P_1 和 P_2 的比值决定—— $N = 10 \lg P_1/P_2$ 。在实际线路传输中, 衰耗是以单位长度的分貝来表示。例如, 可简写为分貝/米或分貝/公里。衰減为 20 分貝/公里, 表示在 1 公里的线路上电磁振荡功率减少到百分之一。

訊綫路的长度(l_2 和 l_3 列)所受到的限制¹⁾。由这些表中看出, 波长为 6—8 毫米的 H_{01} 波, 在截面直径为 12.5 厘米的波导内传输时, 能够保证距离在 1000 公里以上的直达通讯。下面我们将详细讨论, 目前限制实现这样长距离直达通讯的可能性的因素。但是无论如何, 以极小衰耗传播 H_{01} 波, 在原则上是可能的。这一事实, 仍然引起了人们的巨大兴趣, 而其实现方法将会被进一步仔细地研究。

表 1 内的由色散失真所引起的增音段长度限制的数据 (l_2 和 l_3) 说明了, 在调制信号频率宽度为 $\Delta f = 10^7$ 赫的情况下, 由色散失真的容许值所限定的增音段的可能长度, 较之由衰减所限定的长度要大得多。我们知道, 10^7 赫的频谱, 约相当于传送调幅或调频的一路高质量电视节目或多路电话 (2400 路) 的传输情况²⁾。采用更先进的调制方法, 信号的频带将增加到 10^8 赫或者更大一些。由表 1 可以看出, 色散失真大大地限制了增音段的长度。因此, 为了进行宽频带波导通讯, 必须补偿色散失真。这种补偿, 原则上是可能实现的。

如果根据无线电波的衰减, 或者, 同样的, 根据波导内壁电磁能的热损耗来确定增音段的长度, 那末依据表 1 的数据, 在波导线路衰减为 90 分贝的情况下, 利用 6—8 毫米长的波, 及直径为 50—60 毫米的波导, 可能传送的距离约为 50—150 公里。可是表 1 内的波导内无线电波衰减和增音段可能的长度是对具有理想的几何形状和直线轴的波导而言。电波在实际波导内传播时, 不仅受到波导管壁的吸收, 而且还受管内气体介质的吸收。此外弯曲、接头和其他形状的不均匀性, 波导载流表面导电率的改变, 在其面上的氧化物及其他沉积薄膜的形成等, 都会导致无线电波的衰减剧烈增加, 导致 H_{01} 波转换为其他波型, 以及波导内总的能量的损耗

-
- 1) 由于波导内信号的各个频率分量的相速不同而引起的传输信号失真, 称为色散失真。
 - 2) 调幅时, 进行传输的无线电波的幅度, 随着被传送信号的大小而改变。调频时, 则是高频或波长改变。调频的特征是具有最大的偏移。或者, 象通常在技术领域中所称的最大频移。为了有效地传输调频信号, 需要要比调幅法传送同样信号时更宽的频谱。

增加。

下面将要指出, H_{01} 波轉变为其他波型, 不仅引起 H_{01} 波的損耗, 而且也是引起傳輸信号附加畸变的原因。波导直径与傳輸波长的比值越大, 則波导內可以同时傳播的不同波型的数目越多, 而 H_{01} 波越容易轉变为白白消耗能量的所謂寄生波。图 4 的曲線表示随着波长或波导直径的改变, 波导內可以傳播的不同波型的数量的变化情况(虛綫)。为了判断实现各种波导綫的复杂性, 首先應該考虑, 在波导中同时能傳播的波型数目是多少? 波导內(在傳輸波段里)可傳輸的波型越多, 对管的精确度、軸的直綫性、波导綫接头及其他参数的要求也就越高。为了說明这点, 我們指出, 如果波导內傳播的波的数目大于 100, 則这些要求是相当的高, 以致在目前, 只有在實驗室条件下才可能滿足。

这样, 在圓波导內傳輸 H_{01} 波时, 其損耗是由热損耗、波型轉換的附加損耗, 波导內媒介質的吸收損耗等所迭加的結果。为了計算波导綫路而准备資料时, 对用在波型轉換的附加損耗的研究, 是整个工作中最重要的一部分。

波导中介質对无綫电波的吸收

填充波导最簡單的方法是, 在过剩大气压約为 $+0.5$ 的情况下(为了除去其中的潮湿), 在管內装入空气。

图 5 上的曲線說明了大气中无綫电波的吸收情况。从这些曲綫可以看出, 对于将来实现小損耗波导綫最有前途的毫米波, 在某些波段上, 由于在空气中的氧和水蒸气中所产生的諧振現象, 而遭到相当大的吸收。如在从 20 到 1 毫米的波段內, 在水蒸气中有两个无綫电波的吸收区域, 其极大值发生在 1.8 和 14 毫米上。同一波段內, 氧气有两个吸收区, 其极大值在 2.6 和 5 毫米处。在波导中, 由于含水蒸气和氧气成分正常的空气所引起的附加衰減, 在上述毫米波段的区域中, 可能达到每公里 10 分貝或者更多, 即大大地超过了波导中的热損耗。但是, 正如图 5 的曲綫所示, 最大吸