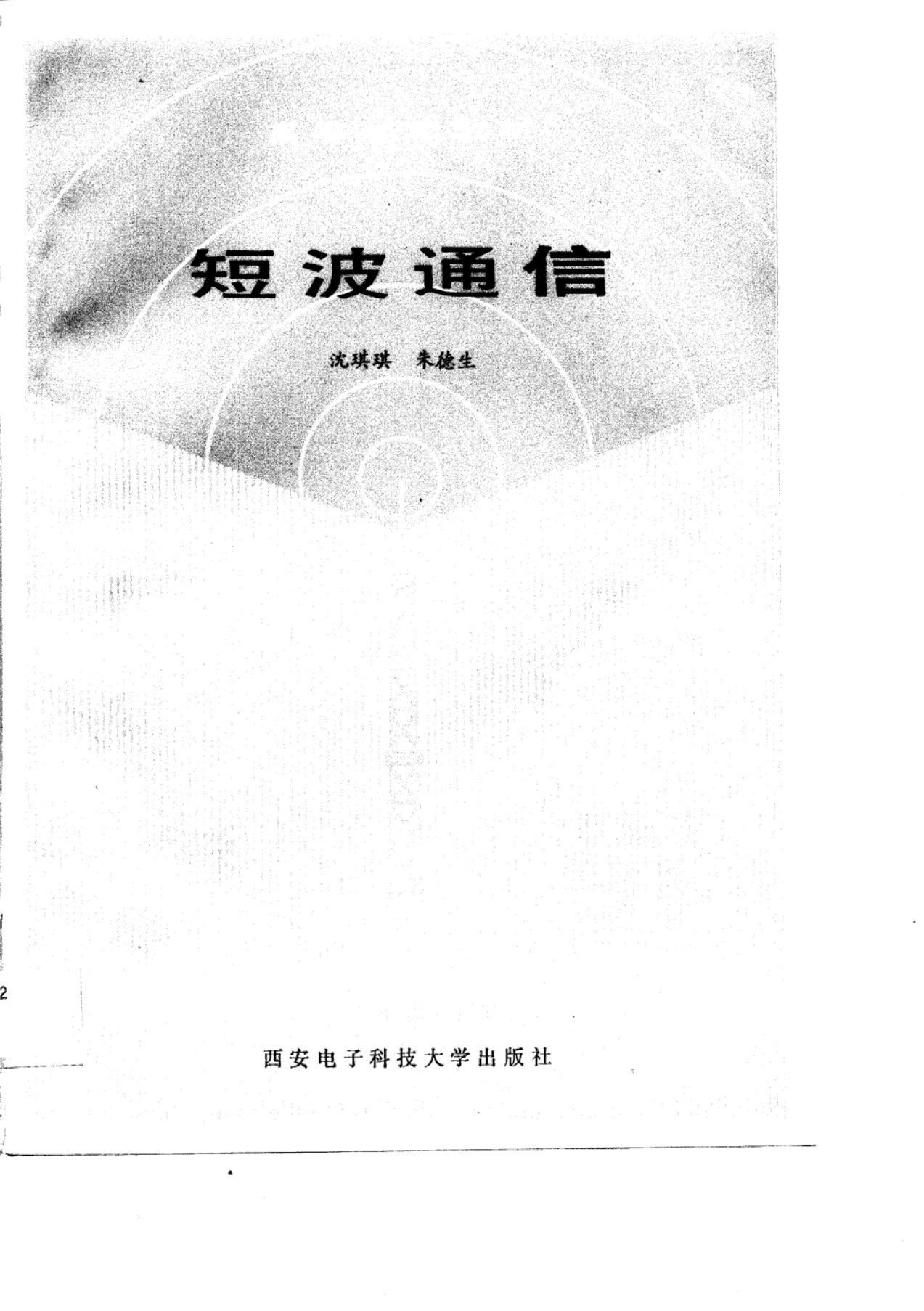


The background of the cover features a series of concentric circles and a spiral pattern, suggesting radio waves or signal propagation. The design is in a grayscale, textured style.

短波通信

沈琪琪 朱德生

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书系按电子工业部工科电子类教材编写大纲编写的高等学校专业课教材。

全书共有五章,内容包括:短波信道的基本知识、短波通信设备、短波信道传输数字信号的特点和技术、频率预测、短波通信系统设计及高频自适应通信系统。全书设备、技术与系统并重,理论联系实际、内容新颖,基本上反映了现代短波通信的概况。本书可作为高等工科电子类通信专业的教材,也可作为通信工程技术人员的参考书。

高等学校教材

短 波 通 信

沈琪琪 朱德生

责任编辑 叶德福

西安电子科技大学出版社出版

西安电子科技大学印刷厂印刷

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 18 字数 429 千字

1989年12月第1版 1989年12月第1次印刷 印数 1-1400

IS3N7-5606-0092-1/TN·0035

定价: 3.60 元



出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”(第三轮)教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会(小组)评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材 1986~1990 年编审出版规划, 由全国电子类统编教材编审委员会无线电技术通信编审小组征稿, 推荐出版, 责任编委俞时乐。

本教材由中国人民解放军通信工程学院担任主编, 天津大学王秉钧担任主审。

本课程的参考时数为 40 学时, 其主要内容为短波通信技术和短波通信系统, 但侧重系统。全书共五章。第一章为短波通信的基础知识。重点讨论了短波电离层传播的一些主要问题和短波电离层信道的表述。第二章为短波单边带通信技术。介绍了有关单边带通信的基本概念、基本原理以及设计中应考虑的问题。第三章为短波信道传输数据信号。重点讨论了短波信道对数据信号传输的影响以及为克服这种影响在短波通信系统中广泛采用的一些技术。第四章为短波通信线路设计。介绍了我国无线电管理委员会建议的频率预测方法和短波通信线路的计算方法。第五章为高频自适应通信。讨论了高频自适应的含义、分类、重点放在频率自适应的基本原理, 对其它类型的自适应技术, 也作了简单介绍。使用本教材时, 可根据不同的教学要求灵活讲授。若偏重于系统可以不讲第二章; 若偏重于技术和设备, 可以不讲第四章。

本教材由沈琪琪编写第一、三、四、五章及第二章的一部分, 第二章的另一部分和本书各章习题由朱德生编写。王金龙、沈越弘编写了第三章的第五节初稿。沈琪琪统编全稿。参加审阅工作的还有乐光新等同志, 他们都为本书提出许多宝贵意见, 这里表示诚挚的感谢。由于编者水平有限, 书中难免还存在一些缺点和错误, 殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1988 年 9 月

目 录

绪论	1	二、单边带信号解调器的失真 分析	75
第一章 短波通信的基础知识		三、单边带接收机线性系统的 失真分析	80
§ 1-1 短波传播的形式	5	四、单边带通信系统的收发不同步所 产生的失真分析	85
一、地波传播形式	5	五、单边带接收机的设计原则	89
二、天波传播形式	5	§ 2-5 单边带通信设备举例	96
§ 1-2 短波电离层传播的基本特性	6	一、某型单边带电台的主要性能指标 ...	96
一、最高可用频率(MUF)	6	二、某型单边带电台的基本组成和 主要电路的工作原理	97
二、传输模式	9	三、电台频率预置和控制	119
三、多径传播	10	§ 2-6 压缩扩张单边带通信系统	120
四、衰落	13	一、话音信号的压缩	121
五、相位起伏(多普勒频移)	16	二、话音信号的扩张	122
§ 1-3 无线电干扰	17	三、采用压缩扩张技术对改善语言 通信质量的分析	122
一、大气噪声	17	四、压缩扩张单边带通信系统的通 信质量和可通率	122
二、人为噪声	18	习题与思考题	123
三、电台干扰	19	参考文献	125
§ 1-4 短波电离层反射信道的数学表述和 统计特性	19	第三章 短波信道传输数据信号	
一、信道表述的基本方法	19	§ 3-1 短波信道对数据传输的影响	127
二、短波信道快乘性干扰的表述	20	一、慢、非选择性瑞利衰落的含义 和条件	127
三、短波信道的统计特性	23	二、慢、非选择性瑞利衰落下各种 常用键控制度误码率的计算	128
习题与思考题	29	三、在短波数据传输系统中抗多径和 抗衰落的主要措施	131
参考文献	30	§ 3-2 时频组合调制	132
第二章 短波单边带通信技术		一、时频调制的定义	132
§ 2-1 短波通信的常用调制方式	32	二、时频调制最佳接收机的结构	134
§ 2-2 单边带通信的基本概念	34	三、二时二频制的性能分析	136
一、带边带通信传输消息的机理	34	四、时频调制的编码原则	142
二、单边带信号的特点	35	§ 3-3 分集接收技术	146
三、单边带调制的分类及其符号表示 ...	41		
§ 2-3 单边带通信系统的组成及其 基本原理	42		
一、单边带发射机的基本原理	42		
二、单边带接收机的基本原理	57		
§ 2-4 单边带通信系统的设计考虑	61		
一、单边带信号功率放大器的 失真分析	62		

一、分集接收的基本概念	146	四、举例	220
二、各种分集方式的基本原理	147	§ 4-5 接收机输入端的最小	
三、各种合并方式的基本原理	153	平均信噪比	220
四、数字分集接收系统的性能分析 ...	158	§ 4-6 天线型式和天线增益	223
§ 3-4 差错控制技术	167	§ 4-7 举例	227
一、在短波通信线路上采用差错控制		习题与思考题	231
的必要性	167	参考文献	231
二、短波通信线路中出现差错的特点			
和编码信道的模型	167	第五章 高频自适应通信	
三、差错控制方式	170	§ 5-1 高频自适应在短波通信中	
四、ARQ 系统	173	应用的必要性	232
五、FEC 系统	178	§ 5-2 高频自适应通信的概念	
六、差错控制系统的编码增益	181	和实现方法	235
§ 3-5 传输高速数据信号的调制技术 ...	183	一、高频自适应通信的概念	235
一、传输高速数据的并行体制	184	二、实现频率自适应的方法	235
二、传输高速数据的串行体制	188	三、频率自适应的分类	236
习题与思考题	191	§ 5-3 实时信道估值(RTCE)的	
参考文献	193	基本原理	236
第四章 短波通信线路的设计		一、实时信道估值的定义和展开	236
§ 4-1 短波通信线路设计的		二、电离层脉冲探测 RTCE	237
任务和步骤	194	三、电离层调啁探测 RTCE	249
§ 4-2 频率预测	196	四、干扰的测量	253
一、短波天波通信的频率		五、切克探测 RTCE	257
为什么要预测	196	§ 5-4 高频自适应通信系统	259
二、 F_2 层最高可用频率的预测	196	一、高频自适应自动无线电的由来 ...	259
三、E 层最高可用频率的预测	203	二、高频自适应自动无线电的概念 ...	260
四、工作频率的选择	207	三、RF-7100 系列自适应通信	
§ 4-3 短波信道的传播损耗	207	系统的介绍	265
一、自由空间传播损耗	208	§ 5-5 其它高频自适应系统的介绍	269
二、电离层吸收损耗	210	一、高频速率自适应通信系统	270
三、地面反射损耗	214	二、时间分集、信道自动切换混合	
四、额外系统损耗	215	自适应系统	272
§ 4-4 接收端的噪声功率	216	三、自适应调零天线阵	273
一、地球上大气噪声的分布图	219	§ 5-6 高频无线电通信的未来	278
二、 F_{om} 的频率分布图	219	习题与思考题	281
三、大气噪声随机变化特征值		参考文献	281
的频率分布图	219		

绪 论

短波通信是指利用波长为 $100 \sim 10 \text{ m}$ (频率为 $3 \sim 30 \text{ MHz}$) 的电磁波进行的无线电通信。实际上, 在许多人的心目中, 也把中波的高频段 ($1.5 \sim 3 \text{ MHz}$) 归到短波波段中去, 所以现有的许多短波通信设备, 其波段范围往往扩展到 $1.5 \sim 30 \text{ MHz}$ 。在许多国家, 也把短波通信称为高频(HF)无线电通信。

短波通信多年来被广泛地用于政府、军事、外交、气象、商业等部门, 用以传送语言、文字、图像、数据等信息。尤其在军事部门, 它始终是军事指挥的重要手段之一。然而, 卫星通信的出现, 由于它较短波通信能为用户提供宽得多的频带以及稳定的高质量通信线路, 从而导致许多人认为短波通信已经过时, 但是过去若干年的情况表明, 事实并非如此。人们发现, 卫星通信也不能满足所有用户的需要。实际上不是所有用户都需要高速传输数据, 何况在许多情况下, 并不能为用户提供卫星通信线路, 尤其对军事通信来说, 卫星易于被敌方摧毁, 已成为一个现实的严重问题。鉴于以上种种原因, 人们已经重新对短波通信发生兴趣。

众所周知, 短波通信之所以能吸引用户, 用它传递消息, 最基本的原因是由于进行远距离通信时, 仅需要不大的发射功率和适中的设备费用。这里需要着重强调的是短波通信具有不易“摧毁”的“中继系统”——电离层, 这一经常被人们忽略的优点。电话线路可以被切断, 地面中继系统和卫星中继系统可能发生故障或被摧毁, 而电离层这个“中继系统”, 除非高空原子弹爆炸才有可能使它中断, 何况高空原子弹爆炸也仅仅是在有限的电离层区域内短时间影响电离密度。当然自然条件也可以使这种“中继系统”中断, 但不是经常出现的, 而且中断的时间也非常短。除极区外, 这种中断通常是在太阳发生耀斑以后, 中断时间一般在半小时左右, 一年内也仅发生几次。这一宝贵的优点, 使得世界各国近年来加紧对短波通信进行研究, 出现了各种新型的短波通信系统。实践证明, 采用现代技术改造过的短波通信, 能为用户提供高质量、高可通率和价格适中的通信线路。

当然, 现有的短波通信系统, 要适应用户的需要, 还存在着相当大的差距, 主要是技术落后, 具体表现在以下两个方面:

1. 不能和低频媒质本身存在的弱点相匹配

高频媒质的弱点综合如下:

① 电离层存在不可预报的骚动。

② 虽然长期预报(中值)具有相当的精度, 但无法预计短期内对中值的偏离, 所以在通信频率的选择上, 很大程度是依靠电台操作员的经验和技巧。

③ 短波波段电台拥挤, 干扰严重, 特别在夜间。

而现有的短波通信设备几乎没有采取任何和媒质相匹配的自适应措施。

2. 无法抵御窃听和各种有意干扰

现有通信设备内几乎没有任何电子反干扰的措施。

这两方面综合起来, 就使现有的短波通信可靠性低、质量差。

近年来, 为了克服现有短波通信存在的上述缺点, 现代的短波通信系统中采用了许多

新技术，例如“实时信道估值”技术(英文缩写为 RTCE 技术)、分集接收技术、现代调制技术、差错控制技术以及各种自适应技术，以求在发射功率不太大的情况下，使系统性能达到高质量水平。

为了对抗窃听和干扰，在许多短波通信系统中，加上相应的附加终端，使系统具有跳频和突发传输的功能。换句话说，系统可以外接电子反干扰终端。由于这些新技术的采用，给短波通信系统的设计带来了新问题，所要考虑的因素大大增加了，即在考虑这些新技术采用后，在给定的质量指标下，如何对短波通信系统进行设计。

一条高质量的短波通信线路，除了采用 RTCE 技术进行实时选频外，通常是通过改进信道性能和插入差错控制系统来实现的。前者包括增大发射功率，采用高增益天线、现代调制技术和分集接收技术等；而后者是在短波通信线路中加入某种类型的差错控制，使接收端具有检测和纠正数据信号错误部分的能力，从而改善系统的输出差错率。

综上所述，可以画出现代短波单向通信系统的组成方框图，如图绪-1 所示。从图中可以看出，除了用于信息传输的各种设备外尚包括实时选频系统。建立一条高质量的短波通信线路，必须明确图绪-1 所示的方框图的具体内容，以便去满足传输信息所规定的一般要求。具体的要求可参考国际无线电通信咨询委员会(CCIR)的建议。对于某些特殊部门，例如军事、气象、航空、国际广播等，常以“工作文件”的形式公布技术要求。为了满

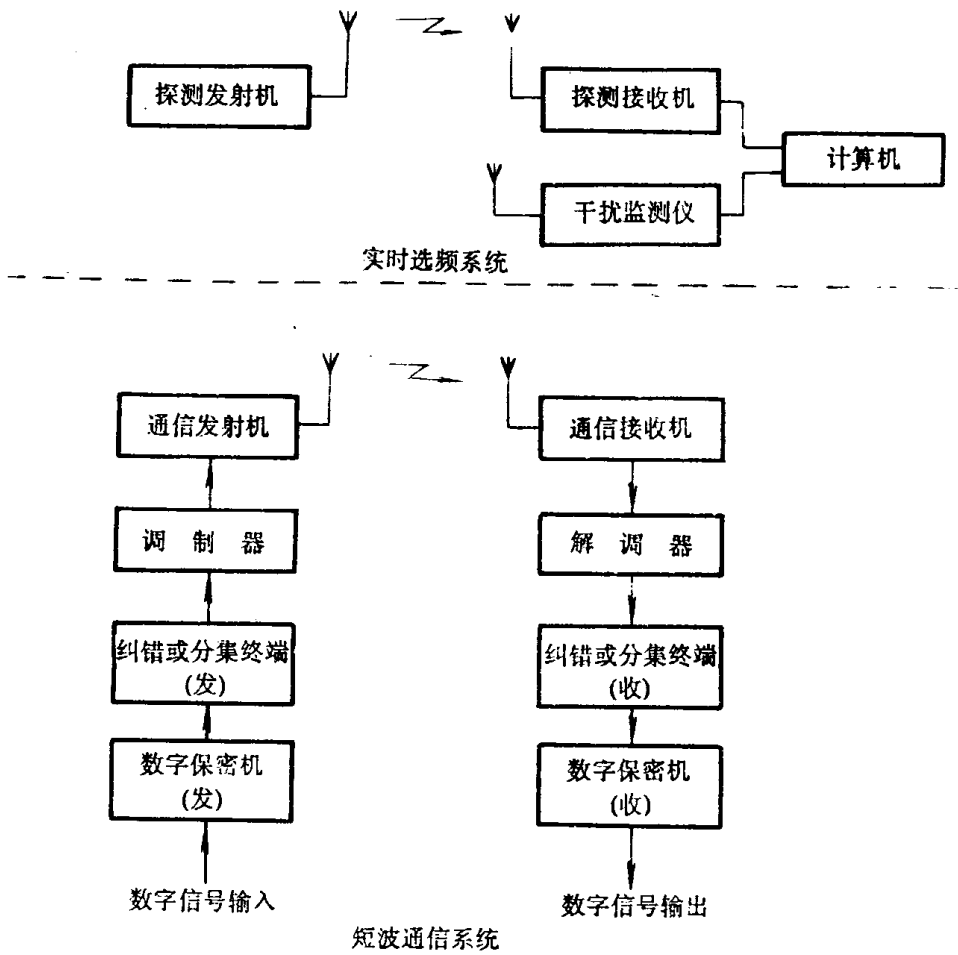


图 绪-1 现代短波单向通信系统的组成方框图

足这些给定的技术要求，通信线路必须进行全面的设计和计算。在线路计算时，必须考虑到全年各季和全天中几个特定时间区间内电波传播的条件。

对于一条短波通信线路，最主要的技术要求有两个：通信质量和可通率(也称线路利用率)。通信质量的指标，对于传输不同消息形式是有区别的。对于传输模拟信号，一般用输出信号噪声功率比来衡量；而对于传输数据信息，通常用输出差错率(误字率或误码率)来表征。可通率是指通信线路的接收端的信噪功率比 γ 高于某个可以接受的最小信噪功率比 $\gamma_{\min}$ 的时间百分比($T\%$)。如可通率为 99%，系指一天内有 1%(14.4 min)的时间，其 $\gamma < \gamma_{\min}$ 。所以这一项技术指标有时也用中断率表示。

由于短波信道为衰落信道，在线路设计时，应同时满足这两个方面的要求。例如对某短波通信线路，用户通常提出这样的要求：可通率 90%，误字率小于 10^{-5} 。在设计时应同时满足，缺一不可。顺便指出，使用部门提指标时也应适当。对于短波衰落信道来讲，指标过高意味着建立通信线路的费用将成倍地增加。

由此可见，现代短波通信线路设计和计算的任务，就是要根据给定的通信质量和可通率的要求，确定下列问题：

- ① 通信线路的最佳工作频率范围；
- ② 采用的调制和键控制度；
- ③ 采用的天线型式；
- ④ 是否需要采用分集接收？采用分集的形式、重数和合并方式；
- ⑤ 是否需要采用差错控制？采用差错控制的方式和差错控制码；
- ⑥ 发射机的最小发射功率。

总之，通过通信线路的设计和计算，使设计者有可能确定该具体通信线路所用设备的主要技术要求，以便选型或自行设计。

必须指出，建立一条具体的通信线路，可以有数种不同的方案来达到预定的指标。所以需要从各方面(经济费用、占地面积、设备体积重量、技术实现的难易程度等)充分比较，最后才能确定一个最佳方案。现代短波通信线路是以具有实时选频功能为特征的，所以在线路设计时，也应充分考虑到这一有利条件。但本书编写时，考虑到我国现在的具体情况，具有实时选频功能的通信线路(也称具有高频自适应功能的线路)在短时间内尚不能普及，所以提供的设计方法，暂不考虑这一有利条件。通信线路工作频率范围仍按长期预测的方法来确定。

根据前面提到的任务，本书在内容选择和安排上共分五章：

第一章为短波通信的基础知识。重点讨论了短波电离层传播中的一些主要问题和短波电离层信道的表述。以上内容是设计短波通信线路必备的基础知识，也是实时测量短波信道参量的必备知识。各种实时选频系统之所以能实时预报频率质量信息，就在于对这些参量的实时分析。

第二章为短波单边带通信技术。单边带通信是短波通信中的重要制式。目前在短波通信线路上不论是传送电话信号还是数据信号，最常用的就是采用各种类型的单边带调制。本章介绍了有关单边带通信系统设计中应特别引起注意的“失真”问题。为了对单边带通信有更具体的了解，本章选用一部代表 70 年代末期水平的单边带电台作为实例，详细地介绍了电台的主要性能、组成和工作方式，并对其主要电路进行了分析。最后简单介绍了近

年来为提高短波单边带通信线路传送电话信号的质量和可通率，而被广泛采用的“压缩扩张单边带调制”。

第三章是短波信道传输数据信号。该章重点讨论了在慢、非选择性衰落信道上传输数据信号时各种常用键控制度的误码率。该章导出的误码率计算公式，将在短波线路设计中以及分集接收、差错控制等分析讨论中用到。此外，还介绍了为克服短波衰落信道对数据传输的影响，目前在短波通信系统中广泛采用的一些技术，如时频组合调制技术、分集接收技术、差错控制技术以及为实现高速数据传输的多路并发技术等。

第四章为短波通信线路的设计。该章介绍了我国无线电管理委员会建议的频率预测的方法。在此基础上，讨论了新建一条短波通信线路需要确定的问题和计算方法，以便设计者提出满足用户要求的各种实施方案。当然，本章提供的方法，也适用于已建立好的短波通信线路，核算该线路所具有的通信质量和可通率。这种工程计算在对现有线路进行技术改造时，是十分必要的。

第五章为高频自适应通信。高频自适应是现代短波通信的主要特征，所以本书用一定的篇幅来讨论高频自适应的含义、分类，重点是讨论频率自适应(即实时预报和选择频率)的基本原理。对其它类型的自适应技术，仅作简单的介绍。最后对高频自适应的发展作了粗略的展望。

第一章 短波通信的基础知识

§ 1-1 短波传播的形式

我们规定 1.5~30 MHz 的频率范围为短波波段。短波主要靠电离层反射(天波)来传播,也可以和长、中波一样靠地波进行短距离传播。每一种传播形式都具有各自的频率范围和传播距离,当采用合适的通信设备时,都可以获得满意的信息传输。下面将分别说明这两种传播形式的特性和影响短波传输的各种现象。

一、地波传播形式

利用地波传播形式的频率范围大约是 1.5~5 MHz。为了适应地波传播,通常采用各种型式的辐射垂直极化波的垂直天线。从图 1-1 中可以清楚看出,由于地波的衰减随着频率的升高而增大,所以即使用 1 000 W 的发射机,陆上传播距离也仅为 100 km 左右,所以这种传播形式,不宜用作无线电广播或远距离通信。此外,传播距离还和传播路径上媒介的电参数密切相关。沿海面传播的距离远远超过沿陆地传播的距离。

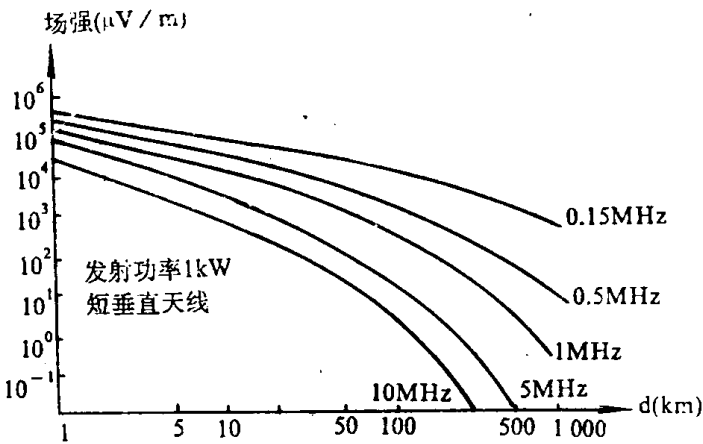


图 1-1 在地波传播时,不同频率的场强—距离曲线

二、天波传播形式

一般情况下,对于短波通信线路来讲,天波传播较地波传播具有更重要的意义。这不仅仅是因为天波可以进行远距离传播,可以超越丘陵地带,而且还因为可以在地波传播宣告无效的很短的距离内建立无线电通信线路。

我们知道,电离层是由围绕地球,处于不同高度的四个导电层组成,这四个导电层分别称为 D 层、E 层、F₁ 层和 F₂ 层,见图 1-2。这些导电层对短波传播具有重要的影响。现分别说明如下:

D 层: D 层是最低层,出现在地球上空 60~90 km 的高度处。最大电子密度发生在 80 km 处。D 层出现在太阳升起时,而消失在太阳降落后,所以在夜间,不再对短波通信产生影响。D 层的电子密度不足以反射短波,所以短波以天波传播时,将穿过 D 层。不过,在穿过 D 层时,电波将遭受严重的衰减,频率越低,衰减越大。而且在 D 层中的衰减量,远大于 E 层、F 层,所以也称 D 层为吸收层。在白天, D 层决定了短波传播的距离,以及为了获得良好的传输所必需的发射机功率和天线增益。不过最近研究表明,在白

天有可能反射频率为 2~5 MHz 的短波。在 1 000 km 距离的信道试验中，通过测量所得到的衰减值和计算值比较一致。

E 层：E 层出现在地球上空 100~120 km 的高度处，最大电子密度发生在 110 km 处，在白天认为基本不变。在今后通信线路设计和计算时，通常都以 110 km 作为 E 层高度。和 D 层一样，E 层出现在太阳升起时，而且在中午电离达最大值，尔后逐渐减小，在太阳降落后，E 层实际上对短波传播已不起作用。在电离开始后，E 层可以反射高于 1.5 MHz 频率的电波。

E_s 层：E_s 层称为偶发 E 层，是偶而发生在地球上空 120 km 高度处的电离层。E_s 层虽然是偶而存在，但是由于它具有很高的电子密度，甚至能将高于短波波段的频率反射回来，因而目前在短波通信中，许多人都希望能选用它来作为反射层。当然 E_s 层的采用，应十分谨慎，否则有可能使通信中断。

F 层：对短波传播，F 层是最重要的。在一般情况下，远距离短波通信都选用 F 层作反射层。这是由于和其它导电层相比它具有最高的高度，因而可以允许传播最远的距离。所以习惯上称 F 层为反射层。

图 1-2 示出了非扰动条件下，电离层各层的高度和电子密度的典型值。从图中可以清楚看出，在白天电离层包含有 D、E、F₁ 和 F₂ 层。也就是说在白天 F 层有两层：F₁ 层位于地球上空 170~220 km 高度处；F₂ 层位于地球上空 225~450 km 高度处。它们的高度在不同季节和在一天内不同的时刻是不同的。对 F₂ 层来讲，其高度在冬季的白天最低，而在夏天的白天最高。F₂ 层和其它层不同，在日落以后并没有完全消失，仍保持有剩余的电离。其原因可能是在夜间由于 F₂ 层的低电子密度，复合的速度减慢，以及粒子辐射仍然存在。虽然夜间 F₂ 层的电子密度较白天降低了一个数量级，但仍足以反射短波某一频段的电波。当然，夜间能反射的频率远低于白天。由此可以粗略看出，若要保持昼夜短波通信，则其工作频率必须昼夜更换，而且一般情况下夜间工作频率远低于白天工作频率。这是因为高的频率能穿过低电子密度的电离层，只在高电子密度的导电层反射。所以若昼夜不改变工作频率(例如夜间仍使用白天的频率)，其结果，有可能使电波穿出电离层，造成通信中断。

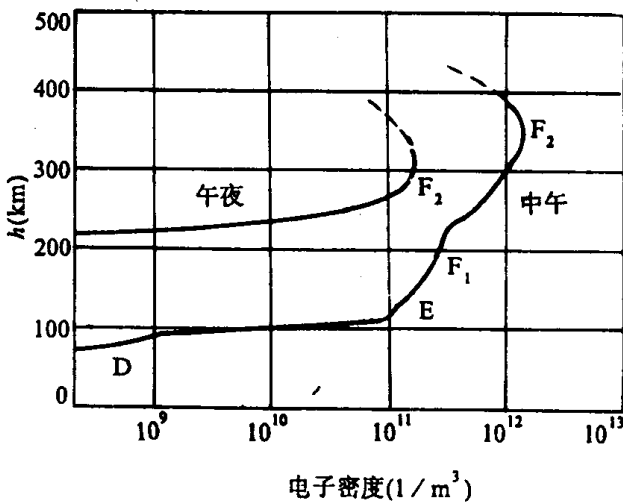


图 1-2 电离层各层高度和电子密度关系曲线

§ 1-2 短波电离层传播的基本特性

一、最高可用频率(MUF)

最高可用频率的英文缩写为 MUF。它是指在实际通信中，能被电离层反射回地面的

电波的最高频率。若选用的工作频率超过它，则电波穿出电离层，不再返回地面。所以确定通信线路的 MUF 是线路设计要确定的重要参数之一，而且是计算其它参数的基础。

远距离通信中，电波都是斜射至电离层的，若令此时最大的反射频率为 f_{ob} ，则在已知通信线路长度和反射点高度的情况下，可以从下式求得 f_{ob} ：

$$f_{ob} = f_v \sec \varphi = f_v \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2h'}\right)^2} \tag{1-1}$$

式中 f_v 是电波垂直投射时的最高反射频率，也称临界频率；

φ 是电波斜射至电离层的人射角；

d 是通信线路的长度；

h' 是电波反射点处电离层的虚高。

若给定通信线路的距离为 2 000 km，在不同的斜射频率下(即以 f_{ob} 为参数)，按照式 (1-1) 计算，就可以得到一组 $f_v \sim h'$ 的曲线(见图 1-3 的实线)。然后在给定的通信线路上测量，可以得到该线路的频高图，即实测的 $f_v \sim h'$ 曲线(见图 1-3 中的虚线)。从图中可以

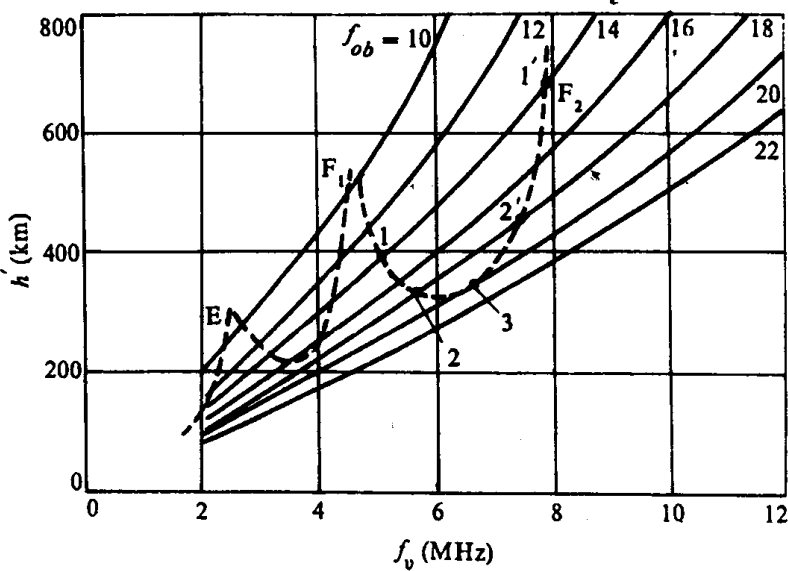


图 1-3 表示在给定的频率上，可能存在的传播路径

看出，这两条曲线有许多交点，所有这些交点表示了在给定的斜射频率上，可能存在的传播路径。例如 f_{ob} 为 14 MHz，对 F_2 层来讲，可能存在着两条传播路径，它们的反射点在图 1-3 上分别标为 1 和 1'。反射点 1 的高度为 380 km，而另一点 1' 的高度为 680 km。通过反射点 1 反射而到达接收端的信号要比反射点 1' 反射来的信号强，这是因为这两条路径所受到的衰减不同。反射点 1' 所通过的路径，除了由于通过 D、E、 F_1 层而遭到衰减外，和反射点 1 的路径相比，在 F_2 层内传播更长的距离，因而多了一定的附加衰减。同样地，若斜射频率改为 18 MHz，仍然存在两个反射点和两条传播路径，反射高度分别为 340 km 和 460 km。和这个斜射频率相应的 $f_v \sim h'$ 曲线，和频高图中 E、 F_1 层曲线不存在交点，这表明 $f_{ob} = 18$ MHz 时，电波已不可能利用 F_1 层和 E 层反射，而只是穿过它们，然后由 F_2 层反射。同样的道理，2 点反射在接收端的信号较 2' 点反射的强，但由于

两者的反射高度相差不太大，所以，其场强的差别将小于 $f_{ob} = 14 \text{ MHz}$ 时的情况。

从图 1-3 中可以清楚地看出，继续升高斜射频率，如当 f_{ob} 为 20 MHz 时，只存在 F_2 层的一个反射点 3，反射高度 $h' = 370 \text{ km}$ 。也就是说，此时，只有一条传播路径。假如继续升高斜射频率，曲线族和实测频高曲线不再存在交点，这说明电波穿出 F_2 层，不再返回地面。由此可见，反射点 3 是斜射电波能否返回地面的临界点，与该点相对应的斜射频率，称为 F_2 层的最高可用频率(MUF)。

总结以上讨论，可以得到以下重要概念：

① MUF 是指给定通信距离下的最高可用频率。若通信距离改变了，计算所得的曲线族和实测的频高图都将发生变化，从而使临界点的位置发生变化，对应的 MUF 值就改变了。显然，MUF 还和反射层的电离密度有关，所以凡影响电离密度的诸因素，都将影响 MUF 的数值。

② 当通信线路选用 MUF 作为工作频率时，由于只有一条传播路径，所以在一般情况下，有可能获得最佳接收。

③ MUF 是电波能返回地面和穿出电离层的临界值。考虑电离层的结构随时间的变化和保证获得长期稳定的接收，在确定线路的工作频率时，不是取预报的 MUF 值，而是取低于 MUF 的频率 FOT，FOT 称为最佳工作频率。一般情况下

$$FOT = 0.85 \text{ MUF} \tag{1-2}$$

选用 FOT 之后，能保证通信线路有 90% 的可通率。由于工作频率较 MUF 下降了 15%，接收点的场强较工作在 MUF 时损失了 $10 \sim 20 \text{ dB}$ ，可见为此付出的代价也是很大的。

④ 图 1-4 画出了全天 MUF 随时间变化的曲线。取 $FOT = 0.85 \text{ MUF}$ ，就可画出 FOT 随时间变化的曲线。实际上一条通信线路不需频繁地改变工作频率，一般情况下，白天选用一个较高的频率，夜间选用 1~2 个较低的频率即可。图 1-4 中也画出了建

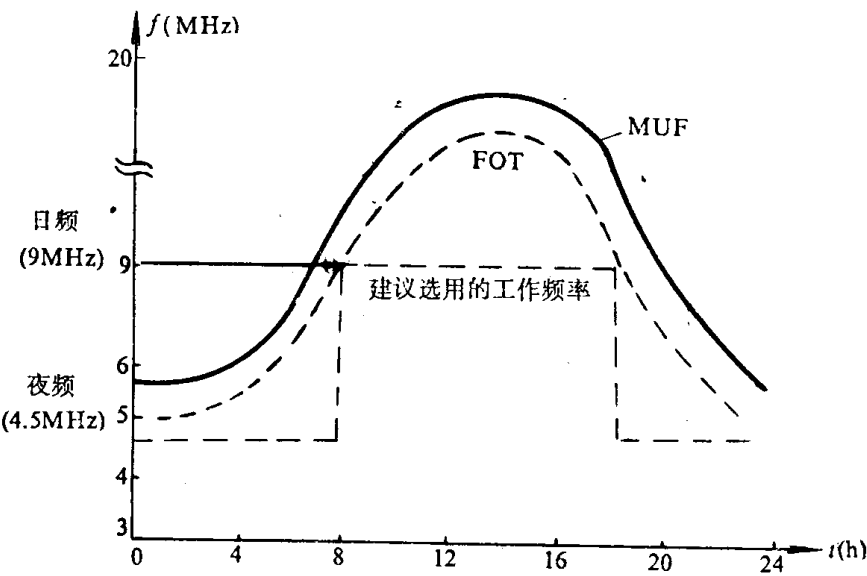


图 1-4 MUF 随时间变化曲线

议日、夜选用的频率曲线。日频选用 9 MHz，夜频选用 4.5 MHz。

必须指出，按照 MUF 日变化曲线来确定工作频率，实际上仍不能保证通信线路处于优质状态下工作。这是由于通过计算得到的 MUF 日变化曲线，实际上适用于电离层参数的月中值，显然这不能适应电离层参数的随机变化，更不能适应电离层的突然骚扰、暴变等异常情况。这就提出了实时选频问题。实时选频将在第五章作专题讨论。

为了更形象地看出斜射频率和传播路径的关系，根据图 1-3，画出可能传播路径的示意图，如图 1-5 所示。从图中可以看出，在某一给定距离的通信线路上，所选用的频率高于 MUF 时，就穿出电离层，不再反回地面，如图中粗黑线所画的射线。所选频率低于 MUF 时，则存在两条传播途径。由于这两条路径所需射线的仰角不同，故分别称为高仰角和低仰角射线。本例中与图 1-3 中的 1'、2' 反射点对应的是高仰角射线，与 1、2 反射点对应的是低仰角射线。随着工作频率逐渐接近 MUF，高仰角和低仰角两条射线越来越接近，当工作频率选用 MUF 时，两条射线重合，出现了单径传输。

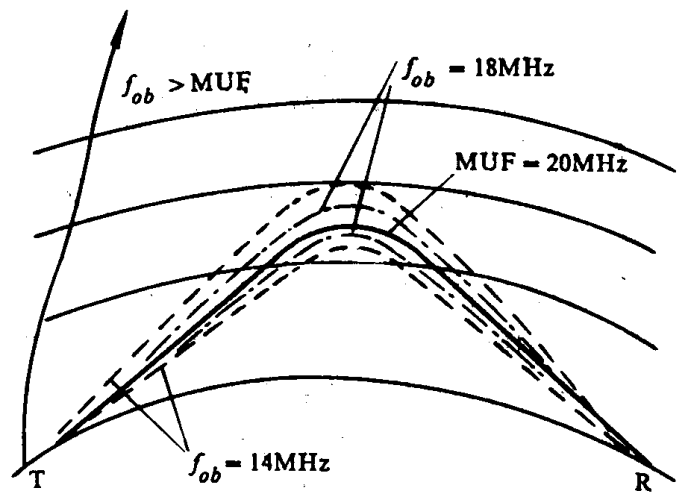


图 1-5 在某一距离为 2 000 km 的通信线路上可能存在的传播路径示意图

随着工作频率逐渐接近 MUF，高仰角和低仰角两条射线越来越接近，当工作频率选用 MUF 时，两条射线重合，出现了单径传输。

二、传输模式

在远距离短波通信线路的设计中，为了获得比较小的传输衰减，或者为了避免仰角太小，以致现有的短波天线无法满足这一设计要求等原因时，都需要精心地选择传输模式。图 1-6 为短波线路的路径图解。若已知反射点高度(h')和传输距离(D)，从该图中就可以确定传输模式。若要求通信距离为 2 200 km，我们可以利用 F_2 层反射，反射点高度为 300 km 时，选用仰角 10° 和单跳模式，就可满足以上要求。这种传输模式，称为 $1F_2$ 传输模式。从图 1-7(a)中可以看出，满足 2 200 km 的传输还可以利用 E 层两次反射。通常称为两跳，即 2E 模式。此时所需仰角约 4° 左右。

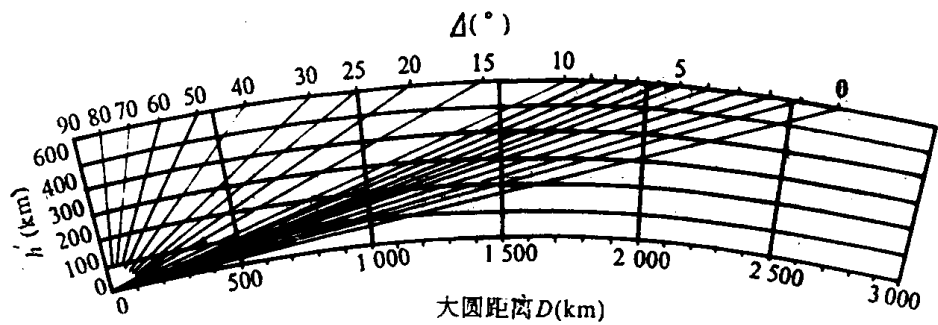


图 1-6 短波线路传播路径图解

当通信距离 $D > 2\,500\text{ km}$ 时，往往采用多跳，以获得较大的仰角。图1-7中画出了几种可能出现的传播模式。例如图1-7(b)中所示的2FE模式，这是一种三跳的模式，线路的两端利用 F_2 层反射而中间一跳利用E层反射。这种传输模式的中间地段反射点可能发生在白天中午，而线路两端地段已是太阳下山或夜间，此时中间地段E层有较强的电离密度，有能力反射所选用工作频率。

要严格设计这种多跳远距离通信线路，就必须分别研究线路中每一地段对应于工作频率的传播特性和所需要的辐射仰角。一般来讲，这种严格的计算是不必要的，实际上在设计中只考虑线路两个终端的电波传播情况，就足以确定短波线路对设备的具体要求。

三、多径传播

在前面两节中已经指出，电波可以通过若干条路径或者不同的传输模式到达接收端。由于这些路径具有不同的长度，所以到达接收端的各条射线，它们经历的传播时间是不一样的。通过美国华盛顿到英格兰(6 000 km)和日本到英格兰(9 600 km)的传真传输的测量表明，不同模式的射线到达接收端的时间是不同的，它们间的差值，在0.5~4.5 ms之间。图1-8示出了短波通信线路多径时延差值的统计值。一般来说，时延差值等于或大于2.4 ms的约占50%；等于或大于0.5 ms的占99.5%；而超过5 ms的仅占0.5%。在采用FSK传输印字电报时，这种时延是引起码元失真的主要原因。若传输印字电报时，认为码元失真 $\leq 10\%$ 时不影响传输，那么，由于不同路径传输到达接收端的多径信号，它们之间的时延差应该不超过表1-1给出的最大允许值。这种多径间的最大时延差(简称多径时延)是指电波在同一方向沿着不同路径传播时，到达接收端同一脉冲的各条射线间最大的允许时延差值。表1-2为一条3 770 km短波线路上不同模式的射线的实测时延数据。从表中可以看出，最低模式为2E，时延为12.73 ms；最高模式为5F，时延为16.26 ms，两者之差即为多径时延差(3.53 ms)。

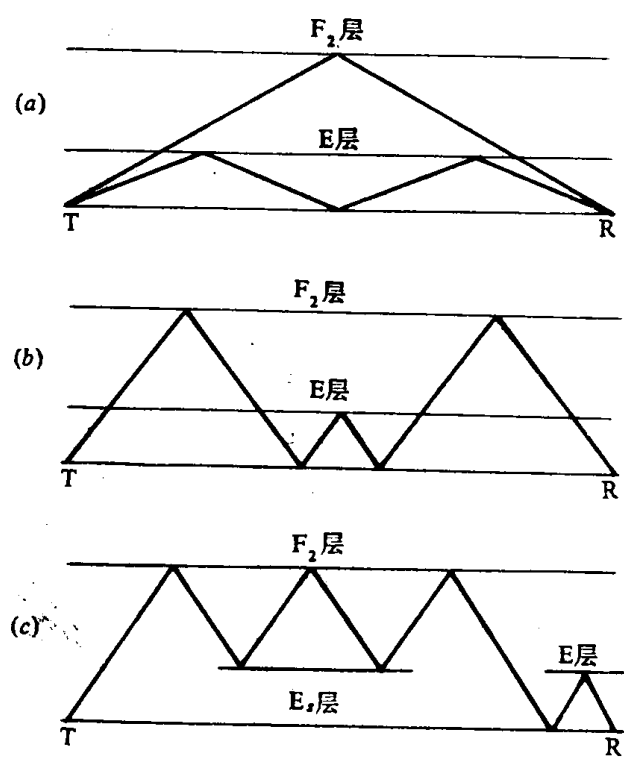


图 1-7 在短波线路上可能出现的传播模式

表 1-1

电报速率(波特)	码元长度(ms)	允许的最大时延差(ms)
50	20	2
100	10	1
200	5	0.5

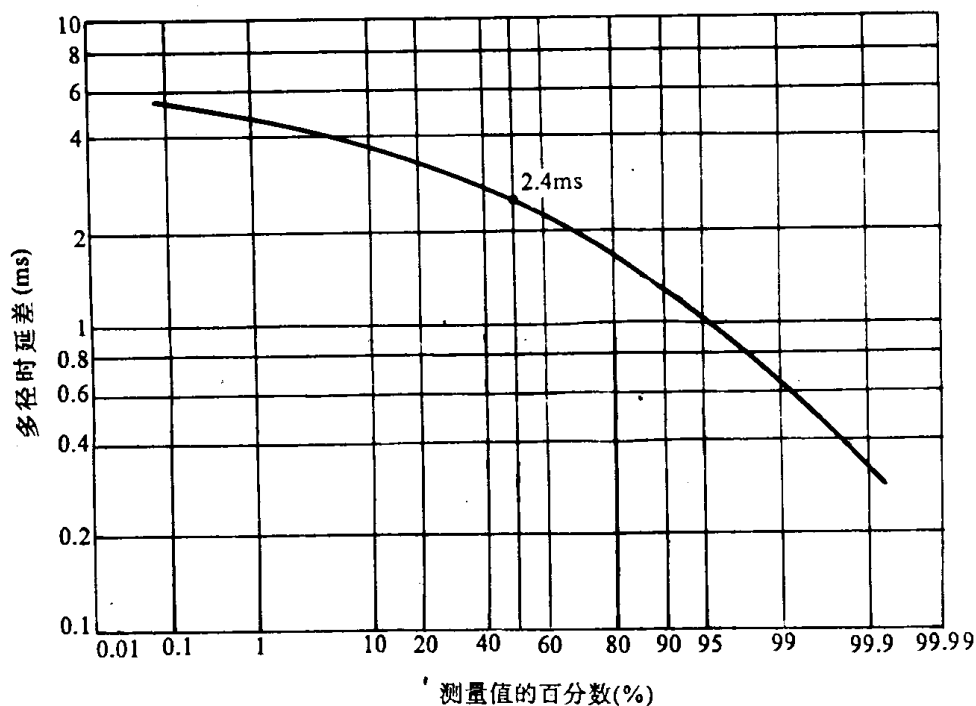


图 1-8 射线间传播时延差的统计分布

表 1-2 路径长度为 3 770 km

模 式	路径时延(ms)	时延差(μs)
1E		
2E	12.73	
3E	12.82	— — — — — 90
4E	12.93	— — — — — 110
1F	12.96	— — — — — 30
N	13.06	— — — — — 100
M	13.41	— — — — — 350
2F	13.45	— — — — — 40
2FE	13.65	— — — — — 200
1FM	13.95	— — — — — 300
3F	14.18	— — — — — 230
2FM	14.8	— — — — — 620
4F	15.13	— — — — — 330
5F	16.26	— — — — — 1130

在短波信道上，多径时延有下列特征：

1. 多径时延随着工作频率偏离 MUF 的增大而增大

其原因可能是 $f = MUF$ 时，将出现单径传输，而且在一定的条件下，也可能出现单模式传输。图 1-9 是 Salaman 发表的实验结果。该曲线的横坐标为通信距离，纵坐标为多径缩减因子，英文缩写为 MRF。定义