

短波数字通信 自适应选频技术

戴耀森

浙江科学技术出版社

短波数字通信自适应选频技术

戴 耀 森

浙江科学技术出版社

(浙)新登字第3号

责任编辑:周伟元

封面设计:詹良善

短波数字通信自适应选频技术

戴耀森

*

浙江科学技术出版社出版

浙江新华印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

开本850×1168 1/32 印张10.25 字数249,000

1992年8月第一版

1992年8月第一次印刷

ISBN 7-5341-0449-1/TN·8

定 价: 9.50 元

DV06/13

内 容 提 要

本书系统地叙述了短波通信频率预报技术的原理、方法、计算公式、通信效果及国内外最新的进展情况。全书由短波电离层传播的基本特性和几种频率预报方法、短波信道的时延、频率、空间选择性衰落的统计特性和极化衰落实验研究成果、实时信道估计技术、短波自适应通信系统的设计问题和应用实例、短波通信技术的发展趋势等内容组成。

本书可供从事短波通信、广播、授时、超视距雷达、遥测遥感、电离层电波传播以及无线电频率管理等专业的管理、工程技术和电台值班人员使用，也可以作为上述专业高年级学生、研究生或教师的选修课教材。

前 言

1988年4月在英国伦敦举行的第四届国际高频无线电系统与学术会议给人以深刻印象,它有力地表明,曾经在70年代遭受过冷落的短波通信技术又开始受到人们的重视,并在全球范围内呈现出复苏与振兴的势头。这种技术不断推进、产品经常更新、市场需求活跃的局面,90年代还将继续下去。80年代后期,我国陆续出版了一些有关短波通信技术的教材、译著和专著。但是,与蓬勃兴旺的技术发展浪潮和迅速扩大的用户队伍对知识的渴求相比,系统地介绍短波通信技术进展的著作,目前还是太少了。正因如此,从1988年开始,在搜集整理有关文献资料,总结多年来从事这方面研究成果的基础上,着手撰写此书。

短波通信是一项涉及面广、技术复杂、需要进行综合设计的系统工程,除单边带电台之类的主要设备以外,它还要求掌握电波传播、信号处理、天线、空间物理、计算机与控制、频率预报和分集接收技术等范围比较广泛的知识。短波数字通信自适应选频技术是当前短波通信理论发展和技术应用中的热点和难点。这是因为:一、在众多的短波通信新技术中,实时信道估算和自适应选频技术是最重要的课题,它对短波通信事业的发展有着举足轻重的影响;二、相对来说,经过20余年的努力,短波通信的这项技术已基本成熟,国际无线电咨询委员会有关文件中介绍的若干种系统已在短波数字通信网上获得成功的应用;三、自60年代以来,我国投入了大量人力物力,对短波信道特性这项重要的基础研究开展了长时间的范围广泛的测试,积累了丰富的实验数据。这些科研成果为设计新一代短波数字通信自适应选频系统提供了

可靠的依据，也为著书创造了条件。

全书共四章，由三个相对独立的主要部分组成。第一章概要地介绍短波电离层传播的基本特性和几种频率预报方法，如短波通信工作频率的长期预测和短期预报，短波通信电路的估算，电离层骚扰的预报等。第二章详细地叙述了短波信道的实验成果，包括时间和频率选择性衰落的统计特性、空间选择性衰落和极化衰落等，这是实时信道估算、自适应选频技术和开发短波高速数字通信系统的实验基础和依据。第三章讨论了实时信道估算技术和短波自适应选频系统的设计问题，并给出了一些典型的应用实例，如窄脉冲斜入射探测实时选频系统，干扰重心频率无源实时选频技术，导频探测实时选频系统等。第四章对特定场合下的短波通信问题和90年代短波通信技术的发展趋势进行了探讨。

本书可供从事短波通信、广播、授时、超视距雷达、遥测遥感、电离层电波传播以及无线电频率管理等专业的管理、工程技术和电台值班人员使用，也可以作为上述专业高年级学生、研究生或教师的选修课教材。

第二章中介绍的短波信道实验研究结果，除参考文献注明的以外，参加测试的主要研究人员，还有罗可文、刘选谋、张长青、苏星以及作者等多人。

陆建勋研究员和毛恒光研究员详细审阅了书稿，并提出了修改意见。中国科学院学部委员吕保维研究员，以及沙踪研究员、韩文俊研究员曾对有关的研究工作进行过指导。沈伊林副教授、朱祖华副教授和刘再林硕士对本书给予热情的支持与协助。借此机会，谨向以上诸位表示诚挚的谢意。

限于水平，书中错误缺点在所难免，恳请读者批评指正。

戴耀森

1990年8月于杭州

目 录

第一章 短波通信的频率管理	1
§ 1.1 短波通信技术的进展	1
§ 1.2 电离层和短波传播的基本特性	4
1.2.1 电离层的结构特点和变化规律	4
1.2.2 短波传播的场强计算	6
1.2.3 短波的电波射线轨迹	6
1.2.4 传播模式和可用频率	7
§ 1.3 短波通信工作频率的长期预测	8
1.3.1 电离层传播预测	9
1.3.2 选择工作频率的原则	10
1.3.3 MUF 及 LUF 的预报和计算	12
§ 1.4 短波通信电路的估算	29
1.4.1 论证步骤与计算方法	30
1.4.2 估算实例	32
§ 1.5 短波通信工作频率的短期预报	60
1.5.1 预报原理	61
1.5.2 参数计算	62
1.5.3 实施方法	65
1.5.4 E 层及 E _s 层的预报	67
1.5.5 应用举例	70
§ 1.6 电离层骚扰预报	75
1.6.1 电离层扰动的类型	75
1.6.2 骚扰形态的分析研究	78

1.6.3	骚扰与耀斑及磁暴的关系	82
1.6.4	电离层骚扰的预报	84
1.6.5	耀斑事件对短波通信影响的实例	86
1.6.6	扰动电离层对短波通信的影响	90
第二章	短波信道的实验研究	92
§ 2.1	影响信道质量的因素	92
§ 2.2	试验电路和测量技术概述	98
2.2.1	测量时间和试验电路	99
2.2.2	测试项目	100
2.2.3	探测信号形式和测试系统方框	100
§ 2.3	时间选择性衰落的统计特性	103
2.3.1	幅度衰落的累积分布曲线	103
2.3.2	信噪比和路径损耗	111
2.3.3	衰落率	113
2.3.4	信号幅度衰落的自相关特性	118
2.3.5	多普勒展宽	121
2.3.6	相位起伏	123
2.3.7	其他	130
§ 2.4	频率选择性衰落的统计特性	136
2.4.1	最大多径延迟时间	136
2.4.2	各多径分量的相对时延和传播模式	154
2.4.3	最大多径延迟时间的自相关分析	165
2.4.4	各多径分量的幅度衰落特性	170
2.4.5	各多径分量幅度变化的相关分析	187
2.4.6	多径延迟与工作频率的关系	192
2.4.7	多径延迟现象对快速通信的影响	195
2.4.8	多径展宽	199
§ 2.5	空间选择性衰落与极化衰落	215
第三章	短波自适应选频系统的设计	219
§ 3.1	实时信道估算技术	219

3.1.1	远距离发射信号预处理系统	221
3.1.2	基地发射信号预处理系统	226
3.1.3	远方接收信号处理系统	229
3.1.4	评价和进一步的考虑	231
§ 3.2	窄脉冲斜入射探测实时选频系统	232
3.2.1	CURTTS 自动选频系统	233
3.2.2	CRTSF-1 系统及其应用	242
§ 3.3	干扰重心频率无源实时选频技术	249
3.3.1	干扰重心频率的定义	250
3.3.2	ICF 测试结果的分析	253
3.3.3	在实时选频技术中的应用	259
§ 3.4	导频探测实时选频系统设计	261
3.4.1	两种包络法技术	261
3.4.2	重要系统设计参数的选择	266
第四章	短波通信技术展望	292
§ 4.1	特定场合下的短波通信问题	292
4.1.1	军事短波通信	292
4.1.2	海上短波通信	295
4.1.3	机载短波通信	297
4.1.4	极区短波通信	299
§ 4.2	短波通信的技术发展趋势	304
4.2.1	自适应通信技术	305
4.2.2	电子反对抗技术	309
4.2.3	计算机组网技术	311
4.2.4	结束语	312
主要参考文献		

第一章 短波通信的频率管理

§ 1.1 短波通信技术的进展

跨入80年代以来,过去由于卫星通信技术的迅速发展而一度被冷落的短波通信,又作为重要的通信手段之一而受到人们的重视。出现这种变化的主要原因,可归纳为:

(1) 在计算机技术发展的带动下,短波通信在实时信道估算、自适应收发信机、自适应调制解调器、自适应均衡及检测、自适应天线阵等一系列技术上获得了进展,使短波通信有可能克服高干扰电平、衰落和多径传播等信道时变色散特性方面的困难,向实现数字化、低误码率、高速率(达到2400比特/秒、4800比特/秒、乃至9600比特/秒)和通信自动化的目标迈进。

(2) 一旦战争爆发,通信卫星是极易被摧毁的主要军事目标之一,且损坏后难以紧急修复。而短波通信目标小,不易被摧毁,即使遭受破坏也容易修复。因此,在战争状态下,短波通信的安全可靠度要高于卫星通信。鉴于这一点,使人们对短波通信的军事价值有了新的认识。

(3) 卫星通信技术要求高,造价昂贵,且使用这种技术要受到核大国的控制。相反,短波通信由于技术相对简单,造价低,故一般国家都能部署使用。

(4) 短波通信设备体积小,便于移动,灵活机动,更适合于军事上使用,如车载、舰载、机载等。相应地,作为小容量的

商业电台、业余电台、驻外使馆电台以及极区科学考察电台，它也是一种合适的通信手段。

(5) 在使用范围上，短波通信和卫星通信一样，可以实现全球通信。特别在低纬度地区，短波通信的可用频段变宽，最高可用频率较高，受到粒子沉降事件和地磁暴事件的影响较小。而卫星通信在低纬度地区受电离层或对流层的闪烁影响较大，加以发展中国家在低纬地区占多数，短波通信对它们更实用。

在短波通信设备和系统的全面技术改造进程中，最引人关注的核心技术是各种形式的自适应。其中，自适应通信的关键又是短波信道的质量分析，即电离层无线电路的实时信道估算技术(Real-Time Channel Evaluation, 简记为 RTCE)。国际无线电咨询委员会(International Radio Consultative Committee, 简称为 CCIR) 第389号报告书指出^[1]，可以大致上将实时信道估算系统分成三类，即Ⅰ. 远距离发射信号预处理技术，Ⅱ. 基地发射信号预处理技术，Ⅲ. 远方接收信号处理技术。其中，美国研制的著名的公共用户无线电传输探测系统(Common User Radio Transmission Sounding System, 简记为 CURTS)和加拿大研制的 Chec 系统均属于第Ⅰ类，垂直探测、后向散射探测和频率监听技术属于第Ⅱ类，而近年来发展迅速的导频探测技术和误码计算实时信道估算则属于第Ⅲ类。

早在60年代后期，就有电路试验的实测数据表明，在采用 CURTS 实时选频技术后，短波数字通信将产生以下四个方面的改进^[2]：

(1) 电路质量方面。在维护2400波特移相制通信系统的运转中，传递信息的精确度提高了100倍，有90%的时间可保证 10^{-5} 量级的误码率，在传播情况良好时（在有限带宽范围内的）电路质量近似于卫星通信。

(2) 频率资源方面。由于采用实时频率分配和调用，使现

有的频率资源不仅可以支持所有用户在高质量的电路上工作，而且可以扩大19倍的用户，这就为组网提供了保证。

(3) 干线的利用率方面。使高质量的短波通信干线的利用率增加了45~65%，从而使数据通过率增大了25%。此外，电路的中断（即有效停机时间）减少了20~40%。

(4) 备用性方面。可在任何电离层或干扰的情况下，总可以为每个用户、每条电路提供可资利用的频率。因而，在电缆、卫星通信中断时，短波通信能够担负起紧急的通信任务。而且，由于误码率已达到 10^{-5} 或更低的量级，这种替补的质量也不会降低很多。

尽管 CURTS 系统明显地具有如此众多的优点，但是，像这样一种脉冲探测体制的基本上独立于通信设备的 RTCE 系统，其庞大的设备，高昂的造价，显然是不利于在短波通信电路上普遍推广应用的。一种更为合适的选择，是以早年 Bello 提出过的某些算法作为基础^[3]，设计能与通信设备兼容的连续波体制的轻型 RTCE 系统。事实上，进入80年代以来，世界各国所提出和研制的实时短波信道参数估算装置，基本上都属于这一类型。

在很长的一段时间内，短波单边带通信沿用约定频率、约定时间、不微调、不寻找的通信方式。很明显，这种固定程式的通信方式，是与短波信道复杂的时变特性和衰落色散特性不相匹配的。由此而来的后果，就是使短波通信的误码率长期难以改善，短波通信的速率久久无法提高，并使短波信道一直处于拥挤不堪的状态。短波通信采用自动估算信道参数、自动选取最佳工作频率、自动选用无线电信道以及自适应传输数据等一系列自适应技术后，短波通信的上述弱点就得到了明显的克服，使短波通信增添了新的活力。因而，如果将调幅系统和单边带通信系统分别称为第一代和第二代短波通信系统的话，则以2400比特/秒的速率传输数据和保密话的自适应通信系统，就能够叫做第三代短波通信

系统或近代短波通信系统。为了介绍短波数字通信的自适应选频技术，我们首先对电离层和短波传播的基本特性作一概要陈述。

§ 1.2 电离层和短波传播的基本特性

波长从10米到200米（相应频率为30~1.5兆赫）范围内的无线电波传播，称为短波传播。而借助于短波传播方式来传输信息的通信形式，就叫做短波通信。短波可以沿地表面以地波方式传播，也可以通过电离层反射以天波方式传播。短波用地波传播时。由于地波的衰减随着频率的升高而增加，就常用的发射功率来说，传播距离仅几十公里至几百公里，故这种传播方式在短波通信中不起主要作用。短波用天波传播时，由于电离层的吸收随着频率的升高而减小，对短波的吸收不大，故可通过电离层对短波的一次或多次反射实现远距离传播。通常，一次反射传输的最大地面距离可达4000km，多次反射可传输上万公里甚至作环球传播。因而，短波电离层反射传播是短波通信的主要传播方式。

1.2.1 电离层的结构特点和变化规律

电离层是地球高层大气空域的一部分，从离地面约50km开始一直延伸到约1000km的高度。在大气空域的这一范围内，由于存在着相当多的自由电子和离子，以及能使电波改变传播速度，发生折射、反射和散射，产生极化面的旋转并受到吸收。因而，电离层的介质特性对短波通信产生了重要和复杂的影响。

大气的电离主要由太阳辐射中的紫外线和X射线所引起，太阳高能带电粒子和银河宇宙射线也产生重要影响。通过测量证实，由于太阳辐射穿透大气层不同区域的能力不同以及太阳辐射的昼夜变化，使电离层按电子密度分布的不同存在着明显的空间结构（高度和经纬度分布）和随时间（昼夜、季节与太阳活动周期）的变化。按照电子密度峰值区域出现的高度，整个电离层可

分成称之为D、E、F的几个层。其中，F层在白天又分成 F_1 层和 F_2 层。D层分布在离地面约50—90km高度处，它使短波传播受到较大的吸收。白天，D层峰值电子密度 N_{mD} 和相应离地高度 h_{mD} 的典型值分别为 10^3cm^{-3} 与85km左右，夜间，D层的电离基本消失。E层分布在离地面约90~130km处，它的峰值电子密度 N_{mE} 和相应离地高度 h_{mE} 的典型值在白天分别为 10^5cm^{-3} 与115km，夜间，E层的 N_{mE} 下降，近似等于 $5 \times 10^3\text{cm}^{-3}$ 。它的 h_{mE} 上升，变化幅度不超过20km。F层分布在离地面约130km以上处，其中， F_1 层只在白天存在，它离地面约130—210km，峰值电子密度 N_{mF_1} 和相应离地高度 h_{mF_1} 的典型值分别为 $2 \times 10^5\text{cm}^{-3}$ 与180km，而 F_2 层离地面约210km以上，它是反射无线电

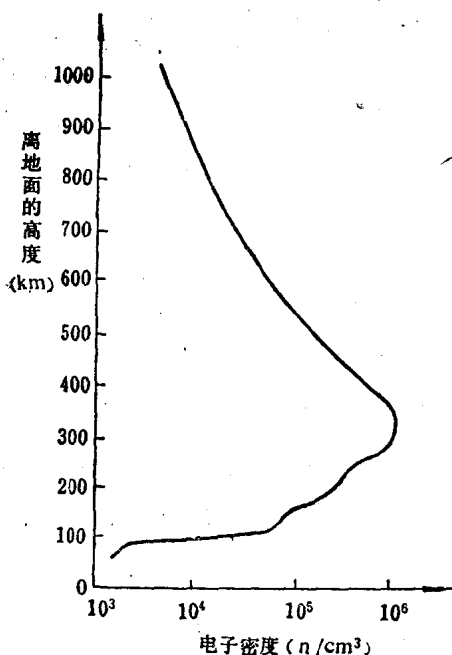


图1—1 电离层电子密度随高度的分布情况

信号及影响无线电传播条件的主要区域。白天， F_2 层峰值电子密度 N_{mF_2} 和相应离地高度 h_{mF_2} 的典型值分别为 10^6cm^{-3} 和280km；夜间，它的峰值电子密度 N_{mF_2} 一般仍达 $5 \times 10^4\text{cm}^{-3}$ 。除上述各均匀厚层外，电离层还存在着两种较常出现的不均匀结构，即突发E层（亦称 E_s 层）和扩展F层。图1—1所示为电离层电子密度随高度的分布情况。

电离层是一种随机

的时空变化的半导电介质，它的变化可分为较规则的变化和随机的不规则的变化两种。电离层的规则变化主要有电离层临界频率和虚高的日变化、季节变化、随太阳黑子11年周期变化和随地理位置的变化等，不规则变化则有突发E层。电离层暴和电离层突然骚扰等。此外，还存在着众多的电离层扰动现象。例如，台风、雷暴、地震和火山喷发可激发中尺度大气重力波扰动，地面核试验激发的重力波可影响几千公里外的电离层，高空核试验的各种电离辐射会显著地破坏电离层，大功率短波雷达加热等人工手段和空间飞行的释放物，也能引起电离层扰动。不论是规则变化还是非规则变化，不论是自然因素引起的变化还是人为因素造成的变化，它们都对短波通信的信息传输和工作频率选择产生影响。

1.2.2 短波传播的场强计算

在工程应用上，短波场强计算是人们最为关心的传播特性之一。国际无线电咨询委员会第252号报告书推荐的短波场强 E (分贝)的计算公式是^{[4]、[5]、[6]、[7]}

$$E = 107.2 + 20 \lg f + P_t - L - G_r \quad (1.2-1)$$

式中， E 为均方根场强（1微伏/米=0分贝）； P_t 是发射机供给天线输入端的功率（分贝瓦）； f 为工作频率（兆赫）； G_r 是接收天线增益（分贝）； L 为路径损耗，由关系式

$$L = L_b - G_t - G_r \quad (\text{dB}) \quad (1.2-2)$$

确定。其中， L_b 是基本传输损耗，

$$L_b = L_{bf} + L_a + L_g + Y_p \quad (\text{dB}) \quad (1.2-3)$$

G_t 为发射天线增益， L_{bf} 是电离层传播路径的自由空间传播损耗， L_a 为电离层吸收， L_g 是地面反射损耗， Y_p 为与路径长度有关的额外系统损耗，都以分贝为单位。

1.2.3 短波的电波射线轨迹

在无方向性天线辐射的电波频率大于电离层临界频率时，其能量会沿不同传播路径向远处传播，形成不同的电波射线轨迹

(图 1—2)。有些波束沿地面传播,因绕射作用而能到达离

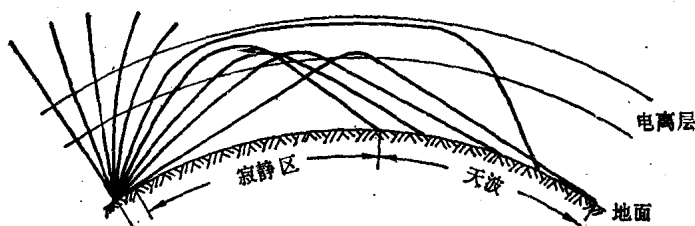


图 1—2 短波电离层传播的射线轨迹

发射点数十至数百公里的地区,称作地波。垂直入射或略微倾斜的一些波束,因频率大于临界频率而穿透电离层不折回地面。其余仰角合适的波束,进入电离层后又能在不同的远处折回地面。天波和地波都不能到达的地面区域,称为寂静区。天波能够到达的地面区域和寂静区的交界位置,其相应的离发射点的地面距离称为跳距。由于聚焦效应,跳距附近的电波能量是比较集中的。受到地球曲率和电离层高度的限制,当波束的仰角接近地面切线方向时,电波可到达4000公里左右的远方。在电离层发生变化时,确定频率的电波其传播距离、跳距和寂静区都会产生相应的变化。

1.2.4 传播模式和可用频率

短波在电离层传播中,由于电离层是分层介质,它使同一辐射信号可以通过不同的传播路径,以不同的传输时间到达同一收信点,这就是多径传播或多模式传播现象。通常,地波传播属于绕射传播模式,而天波传播模式比较复杂,常以 $mXnY$ 形式加以标记。 X 、 Y 代表反射电波的电离层, m 、 n 代表不同层的反射次数。例如,1F表示F层一跳模式,1E2F表示E层一跳、E层二跳的混合模式。此外,还有高、低波模式和不经地面反射而经E层反射的M模式等。对于跨极区和跨赤道传播的,还有其它特

殊传播模式。

由电离层电波传播理论可知，不是所有短波都能从电离层反射而折回地面的。频率较高的短波要从较高电子密度分布的电离层才能反射折回地面。对于一定电子密度分布的电离层和一定的收、发距离，能反射折回地面的电波有一个频率最大值，称为最高可用频率，记作 MUF，它随收、发间距离的缩短而变低。因而，当收、发在同一点时，所能反射折回地面的电波的最高频率是这一电子密度分布的电离层所对应的 MUF 中最低的，叫做电离层临界频率。如果收、发间距离一定，发射频率较低，接收点可以收到有一定延差的高、低角波；随着频率变高，高低角波的时延差减小并渐变到零，高低角波重合；若频率再升高，则接收点落入跳距以内，完全收不到发射信号。因此，确定距离的电路能传播的频率必有一个上限，它称为该电路的最高可用频率。由于电离层吸收的大小与频率平方成反比，故当信号电平降低到刚能满足最低接收信噪比要求时，所用的频率称为该电路的最低可用频率，记为 LUF。此外，通常将 0.85MUF 的频率称为最佳可用频率。之所以冠以最佳两字，是因为用这个频率工作时，一方面不会因电离层的小变化而使电波穿透电离层，另一方面可使电离层的吸收降低到相当小的程度。

除上述基本传播特性以外，信号衰落、相位起伏、多普勒频移等短波电离层传播特性，对短波通信也有重要的影响。这些，将在本书的有关章节作较详细的讨论。

§ 1.3 短波通信工作频率的长期预测

在规划和设计短波通信电路时，必须首先了解电路的可用频率、满足通信要求所必需的最小发射功率以及收、发天线的仰角范围等重要参数。从电离层对短波的反射和吸收规律来看，要建