

序 言

多年以来,短波通信因其具有以较低的功率实现远距离无线电信息传输的特点,成为通信领域中不可缺少的一门重要技术,曾广泛地应用在军事、气象、商业、外交等场合。虽然自 20 世纪 60 年代初,由于卫星通信的兴起,短波通信一度受到“冷落”,但从 20 世纪 80 年代以来,随着计算机数字信号处理、扩频通信、自适应通信等现代电子信息技术的发展及其在短波通信中的广泛应用,极大地改善了短波通信系统的性能,尤其是在提高短波数据通信速率,增强传输可靠性,建立自适应通信链路,实现短波通信业务多样化等方面取得了很大的发展:例如,在传统的基于并行体制的调制解调技术之外,单音串行体制在一个话路带宽内,串行发送高速数据信号。发送端采用 8PSK 调制,接收端采用高速自适应均衡,序列检测和信道估值综合技术,消除了多径传播和信道畸变引起的码间串扰,成功地解决了并行体制的功率分散问题,在相同传输速率下,误码率比并行体制改善 1~2 个数量级,数据传输速率高达 9.6kb/s;在常规短波定频的基础上,目前不仅发展了以频率自适应为主的自适应通信系统,还引入了跳频技术,形成了短波自适应跳频通信系统,对于提高抗跟踪式、瞄准式和阻塞式干扰的能力具有十分重要的意义;基于软件无线电设计思想,以 ADC/DAC、DSP 和 CPU 为硬件基础,使用统一的硬件平台,逐步实现短波电台的数字化、软件化和模块化,在短波电台中频(甚至射频)部分对信号进行数字化处理,用软件编程灵活地实现宽带数字滤波、直接数字频率合成、数字上/下变频、调制解调、纠错编码、信道均衡、信令控制、信源编码、加密/解密等。

上述短波通信新技术、新体制,都是针对解决短波通信存在的问题而产生和发展起来的。其中有的已经在短波通信中发挥积极作用,有的即将进入实用阶段,有力地促进了短波通信技术和设备的更新换代。短波通信作为现代信息系统的技术手段之一,一方面在装备体制上正逐步实现由模拟向数字、台站向网系、模拟低速跳频向数字高速跳频抗干扰体制的转变。另一方面不断地融入电子信息技术领域里的新技术、新器件、新工艺,改造短波通信信道和终端设备,提高信息传输可靠性与有效性,提升技术水平,增强系统与设备的自动化、智能化,以及综合业务能力。

关于短波通信的经典教材大都是上世纪八十年代左右编写的,许多在那时还处于构想和展望之中的技术,如今皆已成现实。国内外相关通信著作对短波通信的论述,已不能完全满足现代短波通信研究、教学和工程的需要。

中国人民解放军重庆通信学院的胡中豫同志等一批专家教授在多年从事短波通信教

IV

学和科研工作的基础上,经过充分的论证和研讨编写了此书。本书深入浅出,语言流畅,全面系统介绍了现代短波通信基础理论、应用技术和发展趋势,经过本校本科生和研究生教学的使用,效果良好;适合于具有一定通信理论基础的工程技术人员及相关专业本科生、研究生阅读。我相信对于从事短波通信相关工作的读者来说,这将是一本开卷有益的参考书。

中国工程院院士

陳太一

前 言

短波是人类最早开发利用的无线电频段,短波通信是历史最为悠久的现代通信手段之一。当人们为了追求通信容量和多种业务,不断地开发超短波、微波等更高的无线电频段时,传统的长波、中波通信因为失去原有的优势,只能在特殊的场合找到应用。而短波通信由于设备简单、开设方便、成本低,特别是具有远距离通信的优点,始终在通信领域中占有不可或缺的一席之地。进入20世纪80年代以来,随着微电子、计算机、数字信号处理、自适应与扩频通信等现代电子信息技术的发展及其在短波通信中的广泛应用,大大改善了短波通信的性能,克服了短波信道固有的缺点,提高了数字通信的可靠性和数传速率,增强了自动化和新业务能力,促进了短波通信技术和装备的更新换代,形成了现代短波通信新技术和新体制。短波通信在人类社会信息化的进程中,又焕发出勃勃生机。

《现代短波通信》是作者根据多年的教学与科研工作实践,结合阅读国内外专家、学者发表或出版的相关领域论文和著作,在此基础上,经过研讨、分析和综合后撰写的。本书试图以新为主题,比较全面、系统地反映现代短波通信领域的新理论、新技术和新成就,为从事短波通信理论教学、科研的教师和工程技术人员提供一本现代短波通信技术综合参考书,为本专业本科生和研究生在学习完短波通信的一般原理(短波单边带原理、频率合成技术、电波传播与天线)之后,进一步扩大知识面,深入学习和研究短波通信,提供一本理论指导书。

全书共分为7章:第1章现代短波通信概论,主要介绍短波通信发展历史,现代短波通信新技术和新体制,以及短波通信发展趋势;第2章短波信道,主要介绍短波信道的基本概念,短波信道的物理特性,以及短波信道的统计特性和计算机仿真;第3章短波自适应通信,主要介绍短波自适应通信的关键技术、重要协议以及自适应通信系统;第4章短波扩频通信,主要介绍短波直接序列扩频和跳频的基本原理和性能分析;第5章短波通信终端,主要介绍短波数据传输的信源处理、调制解调、编译码等基本技术;第6章短波天线及自动调谐,主要介绍常用短波天线、天线自动调谐、自适应天线技术以及天线型式的选择;第7章短波通信系统数字化,主要介绍短波软件无线电、短波中频数字化及典型的短波数字化系统;第8章短波通信网,主要介绍短波自适应通信网和跳频网的网络结构拓扑、关键技术及性能,以及第三代短波通信网。

本书由胡中豫教授主编,第1章由胡中豫教授编写,第2章由葛利嘉教授编写,第3章由汤晓丹教授编写,第4章和第8章由陈正荣教授编写,第5章和第7章由马大玮副教

授编写,第6章由杜国新、胡中豫教授编写。本书在编写过程中,得到了总参通信部陈太一院士的关怀和指导,陈太一院士审阅了本书并作了序,总参61所赵志法高工对书稿提出了许多修改意见,在此一并表示感谢。

和其他信息技术一样,短波通信技术的发展日新月异。本书追求的新,也是相对而言的,很难包容所有现代短波通信新技术,加之作者水平有限,难免有错误、遗漏和不妥之处,敬请读者不吝指正。

编者

2003年5月

目 录

第 1 章 现代短波通信概述	1
1.1 短波通信的发展历程	1
1.2 现代短波通信新技术与新体制	3
1.3 短波通信发展趋势	6
第 2 章 短波信道	8
2.1 短波信道的基本概念	8
2.2 短波信道的物理特性	9
2.2.1 地波传播	9
2.2.2 电离层.....	10
2.2.3 短波在电离层中的传播特性.....	14
2.2.4 短波信道的噪声和干扰.....	18
2.3 短波信道的统计特性和计算机仿真.....	19
2.3.1 短波信道的统计特性.....	19
2.3.2 短波信道的计算机仿真.....	24
第 3 章 短波自适应通信	28
3.1 短波自适应通信的基本概念	28
3.2 短波频率自适应的分类	29
3.3 短波自适应通信技术	30
3.3.1 实时信道估值(RTCE)技术	30
3.3.2 自适应信号处理技术.....	41
3.3.3 自适应控制技术.....	42
3.3.4 全自动频率管理技术.....	44
3.4 短波自适应通信系统	44
3.4.1 短波自适应通信系统的基本功能.....	44
3.4.2 自适应控制器基本原理.....	46
3.4.3 自适应通信系统介绍.....	59
3.5 短波自适应通信的发展	65
3.5.1 ALQA 技术	65
3.5.2 第三代短波自动链路建立系统.....	66
3.5.3 短波自适应通信设备数字化.....	69
3.5.4 全自适应短波通信系统.....	69
第 4 章 短波扩频通信	71

4.1	扩频通信基本概念	71
4.1.1	扩频通信的定义	71
4.1.2	扩频通信的理论基础	71
4.1.3	处理增益与干扰容限	72
4.1.4	扩频通信的种类	73
4.1.5	扩频通信的主要特点	73
4.2	短波直接序列扩频通信技术	75
4.2.1	DSSS 通信系统模型	75
4.2.2	DSSS 通信系统的抗干扰性能分析	76
4.2.3	短波窄带扩频技术	81
4.3	短波跳频通信技术	82
4.3.1	短波通信常规跳频技术体制	82
4.3.2	短波自适应跳频体制	87
4.3.3	短波高速跳频技术	88
4.3.4	短波跳频系统抗干扰性能分析	98
4.4	短波扩频通信的应用与发展	103
第5章	短波通信终端	105
5.1	短波信道中数据传输的基本特性	105
5.1.1	短波信道具有慢速、平坦衰落的特点	105
5.1.2	慢速、平坦衰落信道中数字调制的性能	107
5.1.3	短波信道数据传输的仿真研究	108
5.1.4	短波信道数据可靠性传输的措施	110
5.2	语音编码技术	110
5.2.1	语音编码技术的分类	110
5.2.2	语音信号数字化及特性	112
5.2.3	语音量化过程	113
5.2.4	语音波形编码技术	115
5.2.5	语音参数编码技术	116
5.2.6	语音混合编码技术	118
5.2.7	短波通信中语音编码器的选择	119
5.3	数字调制技术	120
5.3.1	功率效率与带宽效率	120
5.3.2	脉冲成形技术	121
5.3.3	线性调制技术	123
5.3.4	恒包络调制技术	127
5.3.5	时频调制技术	130
5.3.6	正交频分复用(OFDM)技术在短波数据通信中的应用	132
5.4	差错控制技术	133
5.4.1	适用于短波信道特点的几种编码模型	133

5.4.2	ARQ 方式	134
5.4.3	FEC 方式	138
5.4.4	混合 ARQ 方式	141
5.4.5	分集接收技术	142
5.4.6	TCM 技术及其在短波通信中的应用	144
5.5	短波调制解调器技术	146
5.5.1	短波并行调制解调器技术	147
5.5.2	短波串行调制解调器技术	149
5.5.3	其他短波数据传输应用	154
第 6 章	短波天线及自动调谐	158
6.1	常用短波天线	158
6.1.1	短波天线的主要电参数	158
6.1.2	水平对称天线	161
6.1.3	鞭状天线	166
6.1.4	环形天线	168
6.1.5	菱形天线和对数周期天线	173
6.2	天线自动调谐	177
6.2.1	天线自动调谐基本概念	177
6.2.2	天线阻抗	178
6.2.3	匹配网络与调谐程序	179
6.2.4	调谐元件与检测器	182
6.2.5	典型的天线自动调谐装置	188
6.3	自适应天线技术	190
6.3.1	自适应天线一般知识	190
6.3.2	天线的方向特性	191
6.3.3	自适应天线的基本原理	193
6.3.4	主波束自适应控制	195
6.3.5	方向图零点自适应控制	197
6.4	天线型式的选择	198
6.4.1	天线及馈线主要技术指标	198
6.4.2	固定通信天线选择	199
6.4.3	其他环境下天线选择	201
第 7 章	短波通信系统数字化	203
7.1	短波软件无线电	203
7.1.1	传统短波系统结构的缺陷	203
7.1.2	软件无线电技术的特点	203
7.1.3	短波软件无线电系统的基本结构	204
7.1.4	短波软件无线电的关键技术	205
7.2	短波通信系统中频数字化	208

7.2.1	基于数字化中频的软件无线电	208
7.2.2	数字化中频方案	209
7.2.3	数字化中频的模/数转换方案	210
7.3	几种典型的短波数字化系统	213
7.3.1	短波中频数字化的接收机	213
7.3.2	基于 DSP 的短波分集合成接收机	215
7.3.3	短波三信道接收机中 DSP 技术的应用	218
第 8 章	短波通信网	222
8.1	短波自适应通信网	222
8.1.1	网络拓扑结构	222
8.1.2	第三代短波通信网	226
8.1.3	自组织网	234
8.2	短波跳频通信网	241
8.2.1	同步组网	241
8.2.2	异步组网	242
8.2.3	跳频组网过程	243
8.3	短波通信网的安全性	246
8.3.1	影响通信网络安全性的主要因素	246
8.3.2	通信网络可靠性的主要指标	247
8.3.3	短波通信网的可靠性分析	248
8.4	几种 HF 网络介绍	249
8.4.1	美国海军的 HF ITF 网络和 HF 舰/岸网络(HFSS)	250
8.4.2	澳大利亚的 LONGFISH 网络	251
8.4.3	Collins 公司的 HF MESSENGER 网络	252
参考文献	253

第 1 章 现代短波通信概述

短波按照国际无线电咨询委员会(CCIR)的划分是指波长在 100m ~ 10m, 频率为 3MHz ~ 30MHz 的电磁波。利用短波进行的无线电通信称为短波通信, 又称高频(HF)通信。实际上, 为了充分利用短波近距离通信的优点, 短波通信实际使用的频率范围为 1.5MHz ~ 30MHz。

1.1 短波通信的发展历程

自从 1921 年发生在意大利罗马的一次意外事故, 短波被发现可实现远距离通信以来, 短波通信迅速发展, 成为了世界各国中、远程通信的主要手段, 被广泛地用于政府、军事、外交、气象、商业等部门, 用以传送电报、电话、传真、低速数据和图像、语音广播等信息。在卫星通信出现以前, 短波在国际通信、防汛救灾、海难救援以及军事通信等方面发挥了独特的重要作用。

短波通信可以利用地波传播, 但主要是利用天波传播。地波传播的衰耗随工作频率的升高而递增, 在同样的地面条件下, 频率越高, 衰耗越大。利用地波只适用于近距离通信, 其工作频率一般选在 5MHz 以下。地波传播受天气影响小, 比较稳定, 信道参数基本不随时间变化, 故地波传播信道可视为恒参信道。天波是无线电波经电离层反射回地面的部分, 倾斜投射的电磁波经电离层反射后, 可以传到几千千米外的地面。天波的传播损耗比地波小得多, 经地面与电离层之间多次反射(多跳传播)之后, 可以达到极远的地方, 因此, 利用天波可以进行环球通信。天波传播因受电离层变化和多径传播的严重影响极不稳定, 其信道参数随时间而急剧变化, 因此称为变参信道。天波不仅可以用于远距离通信, 而且还可以用于近距离通信。在地形复杂, 短波地波或视距微波受阻挡而无法到达的地区, 利用高仰角投射的天波可以实现通信。

短波通信有着许多显著的优点, 与卫星通信、地面微波、同轴电缆、光缆等通信手段相比, 短波通信不需要建立中继站即可实现远距离通信, 因而建设和维护费用低, 建设周期短; 设备简单, 可以根据使用要求固定设置, 进行定点固定通信。也可以背负或装入车辆、舰船、飞行器中进行移动通信; 电路调度容易, 临时组网方便、迅速, 具有很大的使用灵活性; 对自然灾害或战争的抗毁能力强。通信设备体积小, 容易隐蔽, 便于改变工作频率以躲避敌人干扰和窃听, 破坏后容易恢复。这些是短波通信被长期保留, 至今仍然被广泛使用的主要原因。短波通信也存在着一些明显的缺点:

(1) 可供使用的频段窄, 通信容量小。按照国际规定, 每个短波电台占用 3.7kHz 的频率宽度, 而整个短波频段可利用的频率范围只有 28.5MHz。为了避免相互间的干扰, 全球只能容纳 7700 多个可通信道, 通信空间十分拥挤。并且 3kHz 通信频带宽度, 在很

大程度上限制了通信的容量和数据传输的速率。

(2) 短波的天波信道是变参信道,信号传输稳定性差。短波无线电通信主要是依赖电离层进行远距离信号传输的,电离层作为信号反射媒质的弱点是参量的可变性很大。它的特点是路径损耗、延时散布、噪声和干扰,都随昼夜、频率、地点而不断变化着。一方面电离层的变化使信号产生衰落,衰落的幅度和频次不断变化。另一方面天波信道存在着严重的多径效应,造成频率选择性衰落和多径延时。选择性衰落使信号失真,多径延时使接收信号在时间上扩散,成为短波链路数据传输的主要限制。

(3) 大气和工业无线电噪声干扰严重。随着工业电器化的发展,短波频段工业电器辐射的无线电噪声干扰平均强度很高,加上大气无线电噪声和无线电台间干扰,在过去,几瓦、十几瓦发射功率就能实现的远距离短波无线电通信,而在今天,10倍、几十倍于这样的功率也不一定能够保证可靠的通信。大气和工业无线电噪声主要集中在无线电频谱的低端,随着频率的升高,强度逐渐降低。虽然,在短波频段这类噪声干扰比中长波段低,但强度仍很高,影响着短波通信的可靠性,尤其是脉冲型突发噪声,经常会使数据传输出现突发错误,严重影响通信质量。这些问题的存在,不仅限制了短波通信的发展,而且也不能很好地适应人们日益增长的对数据通信,特别是对高速数据通信业务的需求。当20世纪60年代卫星通信兴起时,由于卫星通信与短波通信相比具有信道稳定、可靠性高、通信质量好、通信容量大等优点,短波通信受到严重挑战。许多原属短波通信的一些重要业务,被卫星通信所取代;对短波通信的投入急剧减少,短波通信的地位大为降低。至70年代后期,有人甚至怀疑短波通信存在的价值。

然而,实践证明卫星通信的初建费用高,灵活性有限。曾被设想为可能取代短波通信的卫星通信,并不能满足所有情况下的用户需要。事实上也不是所有用户都需要宽带线路。此外,在战争时期,卫星通信容易遭受敌方攻击,信道不易抵御敌方的电磁干扰。与此相比,短波通信不仅成本低廉,容易实现,更重要的是具有天然的不易被“摧毁”的“中继系统”——电离层。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可能使它中断,何况高空原子弹爆炸也仅仅是有限的电离层区域内短时间影响电离密度。1980年2月,美国国防部核武器局(Defense Nuclear Agency)在一份报告中提出:“一个国家,在遭受原子袭击后,恢复通信联络最有希望的解决办法是采用价格不高,能够自动寻找信道的高频通信系统”。事实上,从20世纪70年代末,80年代初开始,短波通信又重新受到重视。许多国家加速了对短波通信技术的研究与开发,陆续推出了一些性能优良的新型设备和系统。美军在1979年修改的综合战术通信计划中,又突出了短波通信的地位,把它列为第一线指挥控制通信手段之一;80年代初开始,美军实施了遍及三军的一系列短波通信改进计划;在海湾战争中,美、法等国军队大量运用短波通信,取得了突出的效果。近年来,其他一些国家的军队,也把短波通信列为重要的通信手段之一。此外,在民用通信的某些领域,短波通信的应用也有发展的趋势。特别是近十几年来,由于多种新技术的应用,短波通信技术及装备取得了很大进展,短波通信原有的缺点,已有不少得到了克服,短波通信链路的质量大大提高,无论是电话传输还是数据传输的质量可以与卫星通信相比。短波通信又重新焕发了青春。

1.2 现代短波通信新技术与新体制

20世纪80年代以来,计算机、移动通信和微电子技术的迅猛发展,促进了短波通信技术和装备的更新换代。特别是随着微处理器技术、数字信号处理(DSP)技术、自适应技术、扩频通信技术等现代信息技术的应用,大大提高了短波通信的质量和数据传输速率,增强了自动化、新业务能力,提高了自适应与抗干扰能力,形成了现代短波通信新技术、新体制。这些新技术与新体制概括起来是:现代短波信道技术、现代短波通信终端技术、短波通信装备数字化与网络技术等。

1. 现代短波信道技术

现代短波信道技术主要分为两大类:一类是针对短波变参信道的特点,为了克服短波空间信道的不稳定性对通信质量的影响,提高短波通信,特别是短波数据通信的可靠性和有效性而发展起来的,称之为信道自适应技术。这一类技术以短波实时选频与频率自适应技术为主体。它使短波通信系统能实时地或近实时地选用最佳工作频率,以适应电离层的种种变化,同时克服多径衰落影响和回避邻近电台干扰及其他干扰的作用。可以说,这方面技术对于提高短波通信的可靠性与有效性具有关键的意义。事实上,近些年来短波通信技术最重要、最显著的发展进步正是在这个方面。尽管自适应技术在短波通信中得到了多方面的应用,除频率自适应外,还有自适应均衡、自适应调制解调、传输速率自适应等等,但在很多场合所说的短波自适应通信或短波自适应技术,实际上就是指短波频率自适应通信或短波频率自适应技术。

另一类是针对短波通信存在的保密(或隐蔽)性不强、抗干扰能力差的弱点,以及电磁斗争的特点和规律,为了提高短波通信在电子战环境中的生存能力,以及抗测向、抗侦察、抗截获、抗干扰等防御能力而发展起来的,称之为短波通信电子防御技术。这一类技术以短波扩频通信技术为主体,包括短波跳频和自适应跳频技术,以及短波直接序列扩频技术等。

短波跳频通信(FH)是在收发双方约定的情况下不断地改变工作频率而进行的通信。由于工作频率受伪随机码的控制,因此跳频通信具有很强的抗截获、抗窃听及抗干扰能力。与其他频段的跳频通信不同,短波跳频通信由于受到天波信道特性、天调阻抗匹配时间、信道切换时间等限制,跳频带宽一般小于短波频段宽度,在几十千赫到几兆赫。只有地波传播低速跳频才能做到全频段跳频。常规的短波跳频速率一般在几十到几百跳每秒。

短波自适应跳频通信是在短波跳频通信技术基础上发展起来的。由于构建两地间的短波通信,受电离层信道和电磁干扰的影响,并不是任意一组频率都能够建立起通信链路实现通信的。短波自适应跳频通信把频率自适应技术与跳频技术结合起来,通过频率自适应功能选出可通的“好频率”作为跳频频率表,从而避免了盲目性,提高了可通率。与常规跳频通信体制相比,自适应跳频体制的抗干扰性能大大增强。目前,短波跳频技术体制正逐步实现由窄带模拟跳频向宽带数字跳频,慢速跳频向中高速跳频体制转变,并重点发展自适应跳频体制,以提高抗跟踪式、瞄准式和阻塞式干扰的能力。新一代短波宽带高速数字跳频通信系统,由于在高速跳频频率合成器、宽带天线、宽带功放,以及快速信道探测等关键技术上取得了突破,跳速可达 2560 跳/s 甚至 5000 跳/s。如美国 Lockheed

Samders公司开发的CHESS系统,跳频带宽2.56MHz,跳速为5000跳/s,其中200跳用于信道探测,4800跳用于传输数据,若每跳发送2bit数据,则可获得9.6kb/s数据传输速率。改变每跳发送比特数,可获得4.8kb/s~19.2kb/s标准系列数据率。

短波直接序列扩频(DS),通过伪噪声序列(PN)对发送信息数据进行调制,接收端将所接收到的信号与本地PN序列进行互相关运算,将DS信号解扩,恢复原始信息数据。短波直接序列扩频通信具有比较高的抗截获、抗多径干扰和抗窄带干扰能力。由于短波信道时变特性,频率存在“窗口效应”,天波传播的每条路径有自由空间损耗、电离层损耗、地面反射损耗,三者均与频率有关,在一段时间内,单跳传播2MHz带宽内幅度起伏约1dB~2dB。短波频率的“窗口效应”,限制了扩频带宽,一般在2MHz左右。如美国SICOM公司研制的短波直接序列扩频电台,扩频带宽为1.5MHz,信息速率达到56kb/s。

当然,无论是短波跳频通信技术,还是短波直接序列扩频通信技术,不仅对提高短波通信电子防御能力具有重要的作用,而且对于改善短波信道性能,提高通信特别是数据通信的可靠性和有效性也具有良好的作用,从一定意义上讲,短波扩频通信技术是实现短波高速数据传输的主要选择之一。除此之外,现代短波通信信道技术还包括短波自适应天线、高仰角天线,以及分集接收技术等。

2. 现代短波通信终端技术

狭义地讲,在通信系统中,作为信息发送和接收的硬件设备称之为通信终端。传统的短波通信终端包括电传机、电键、电子键、送话器等。广义地讲,通信终端作为人们享用通信业务的直接工具,承担着为用户提供良好的界面,完成所需业务功能和接入通信网络等多方面任务。例如,在数字通信系统中,要实现信源与信宿间的数据通信,除了必要的信源编译码设备和差错控制设备以外,为了适应不同信道的传输特性,还必须采用适当的传输技术对数据进行必要的变换,以达到最佳的传输性能。因此,调制解调器便成为数据通信业务中最为常用的终端设备之一。

现代短波通信终端技术,主要是针对短波通信存在着严重的电磁干扰的特点,为了满足人们对数据业务,特别是高速数据业务的需求,围绕着提高数据传输的可靠性和数据传输速率而发展起来的。它主要包括短波调制解调器技术,差错控制技术。调制解调器是实现短波数据通信的关键部件,按调制方式分为多音并行和单音串行两种体制。

1) 多音并行体制

在话音通带内,把高速串行信道分裂成多个低速并行信道,以若干个副载波在基带有效带宽内并行传输信息,接收机输出的多路数据信息,分路后分别进行数据解调,得到多路低速数据信号,经过重新组合恢复成高速数据流。每个副载波承载的数据率相当低,码元长度相对于多径延时已足够大,能抗多径衰落影响。常用的多音有16音、39音、52音,每个单音受QPSK/8PSK调制。目前最高数据速率为2.4kb/s。新型多音并行调制解调器采用FEC、分集、多普勒频移校正和DSP技术。

2) 单音串行体制

在一个话路带宽内,串行发送高速数据信号。发送端采用8PSK调制,接收端采用高效自适应均衡,序列检测和信道估值综合技术,消除了多径传播和信道畸变引起的码间串扰。串行体制不存在功率分散问题,在相同传输速率下,误码率比并行制改善1个~2个数量级,大大提高了传输质量,数据传输速率高达9.6kb/s。

3) 格状编码调制(TCM)

TCM 是一种不牺牲带宽有效性,而提供功率有效性,并与信道编码相结合的调制技术。编码器和调制器级联后产生的编码序列,具有最大的欧几里德自由距离,使编码对系统性能的改善达到最大。充分利用接收到的信道信息,在解调时,对接收信号进行软判决最大似然译码,从而得到系统的总体最佳性能。采用 TCM 技术的并行或串行调制解调器,明显优于纠错编码与调制各自独立的并行/串行解调器。

4) 多载波正交频分复用(OFDM)调制

OFDM 是一种并行数据传输系统,采用频率上等间隔的 N 个子载波分别调制一路独立的数据信息,调制后的 N 个载波信号相加同时发送。通过选择载波间隔,使这些子载波在整个符号周期上保存频谱的正交特性,各子载波上的信号在频谱上重叠。收端利用载波之间的正交特性,可无失真地恢复发送信息。OFDM 技术在短波信道可实现 $16\text{kb/s} \sim 64\text{kb/s}$ 的数据传输速率,即利用 1024 个正交副载波,每载波的波形速率为 125Baud,信道带宽为 125kHz,纠错码用大冗余度的 RS 码或 Turbo 码。与单载波相比,在相同速率时,符号周期延长 N 倍,远大于信道延时扩展,码间串扰消除。副载频之间正交特性,使信号频谱可重叠,提高频谱利用率,并有良好的频率分集效果,能抗严重多径和强窄带干扰。

5) 差错控制技术

短波信道中,随机噪声会导致随机差错,衰落、脉冲干扰会导致突发差错,严重影响数据通信,通常字符差错率在 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 数量级。采用差错控制技术,可以改善 2 个~3 个数量级,达到 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 。短波通信通常采用两种差错控制技术,一是自动请求重发 (ARQ),即收端检错,通知发端重发错误,因而也称反馈纠错,对随机差错和突发差错都有良好的效果,但频繁重发,信号延时增大;二是前向纠错(FEC),即利用纠错码,收端自动纠错,需要大量冗余码,占码元总数的 25%~50%。采用交织码/扩散卷积码,可把突发差错分离成随机差错。FEC 不需反馈信道,但造价较高。

3. 短波通信装备数字化与网络技术

微电子技术的发展,促进大规模集成电路,微处理机在短波通信设备中的广泛应用,短波通信装备集成化、小型化、通用化程度大大加强,技术性能显著提高。高精度数字频率合成器使短波收发信机在 $1.5\text{MHz} \sim 30\text{MHz}$ 频段内,可得到 10Hz、1Hz 的频率步进,稳定度达到 $10^{-10}/\text{d}$,相位抖动小于 $3^\circ/10\text{ms}$;全固态大功率宽带放大器,简化了发射机调谐;运用先进的电子开关和快速算法,实现的全电子化、低驻波比快速自动天线调谐器,调谐时间达到发 $< 0.5\text{s}$,收 $< 10\text{ms}$;基于软件无线电设计思想,以 ADC/DAC、DSP 和 CPU 为硬件基础,使用统一的硬件平台,实现短波电台的数字化、软件化、模块化。在短波电台中频(甚至射频)部分对信号进行数字化处理,用软件编程灵活地实现宽带数字滤波、直接数字频率合成、数字上/下变频、调制/解调、纠错编码、信道均衡、信令控制、信源编码、加密/解密等。软件无线电台的高度可编程性,对于引入新业务、新技术非常方便,通过更换软件版本或个别硬件模块,电台容易升级换代,并大大缩短研制周期,降低产品开发成本。

现代短波通信网络技术主要包括短波跳频电台组网技术和短波数据通信网络技术等。短波跳频电台组网有其特殊性,跳频网络是一个复杂的随机时序系统,实现跳频互通,技术体制和系统所有参数要完全相同,还要进行管理和授权。短波跳频电台有同步组网和异步组网两种方式。一般短波跳频跳速慢,同步保持时间长,大多采用同步保持法组

网,由一部电台发出同步信号完成初始同步,在通信过程中随机地补发一些同步校正信号,以消除各台之间时钟误差。理论上组网数等于跳频频率数,经优化设计实际可达到频率数的 80%~85%,同步频率数越多,组网效率越高,但同步时间和组网时间加长。同步网一定是正交的,适用于电台密集的场所。异步组网容易,使用方便,各网建立时间不分先后,但组网效率低,频率碰撞概率与组网数按指数规律增加。组网效率为 30%时,频率碰撞概率亦为 30%左右,一般实际组网效率小于 30%。

全自动短波数据通信网实质上是一种无线分组交换网,采用 OSI 的 7 层结构模型。网络的主要设备是高频网络控制器(HFNC),其主要功能有自动路由选择与自动链路选择、自动信息交换与信息存储转发、接续跟踪、接续交换、间接呼叫、路由查询和中继管理等。网内所有设备都接受网络管理设备(嵌入式计算机)的管理和控制,这些设备包括电台、自动链路建立(ALE)控制器与 ALE 调制解调器、数据控制器与数据 Modem、HFNC 等。可实现快速链路建立,能处理上百个电台和更大的信息量,支持 IP 及其应用等。

上述短波通信新技术、新体制,都是针对解决短波通信存在的问题而产生和发展起来的。其中有的已经在短波通信中发挥积极作用,有的即将进入实用阶段。它们会进一步发掘短波通信潜力,使短波通信在信息社会和信息战中发挥出更大的作用。

1.3 短波通信发展趋势

随着人类社会向信息化的不断演进,通信数字化、通信系统网络化、通信业务综合化成为通信装备发展的必然趋势,系统兼容、网络互通,以及高可靠性、有效性,强抗毁性,成为通信系统建设的基本要求。短波通信作为现代信息系统主要技术手段,一方面在装备体制上正逐步实现由模拟向数字、台站向网系、模拟低速跳频向数字高速跳频抗干扰体制的转变。另一方面不断地融入电子、信息技术领域里的新技术、新器件、新工艺,改造短波通信信道和终端设备,提高信息传输的可靠性与有效性;提升技术水平,增强系统与设备的自动化、智能化,以及综合业务能力。短波通信正经历由第二代通信装备向第三代通信装备的过渡。

第三代短波通信的主要技术特征是数字化、网络化,其主体或关键技术包括:第三代自动链路建立技术(3G-ALE)、新型高速短波跳频技术,以及短波组网通信技术等。3G-ALE 技术是针对 2G-ALE 技术存在的协议无法提供有效的信道接入机制;ALE 与数据链接标准(例如 FED-STD-1045 和 FID-STD-1052)采用不同的调制方式,由此引起的链接建立子系统与信息分发子系统之间性能失配;以及旧的自动重发请求(ARQ)协议实现波形或数据率与信道之间的匹配所采用的方法相对复杂等问题,为了满足人们不断增长的对 HF 话音和数据信息系统的高可靠性及大量的需求,特别是满足更多的军事用户将互联网扩展到战场上,以及在 HF 信道上使用标准的互联网应用(如电子邮件)的需求而提出来的。3G-ALE 以第三代短波通信标准(如 MIL-STD-188-141B)为基础,在技术上与 2G-ALE 的显著区别是系统可工作在同步方式。由于采用了呼叫信道同步搜索,驻留组结构,载波监听访问协议,以及 8PSK 突发波形传输等先进技术,在改善自动链路沟通性能方面取得了重大进展。3G-ALE 可有效地支持由数以百计的台站组成的大型通信网络中的突发信息传输(最多可容纳 1920 个站点),从而大大提高电路沟

通速度,改善高频网络的自动连接、网络容量,以及数据流通量等性能,增强系统的自适应能力。

组网通信技术、自适应技术是现代短波通信系统的重要特征之一。随着对短波通信网的网络容量、传输速度、抗干扰能力要求的不断提高,世界各国进入了第三代数字化短波通信系统网的研究阶段。目前,国外正在向 HF 全自适应网络的实用化努力。建立在第三代短波通信基础上的 HF 网是一种远程综合业务数据网,它能作为各级指挥系统的重要手段,可将军用 TCP/IP 网络和军用程控电话网拓展到战场的纵深地,使各移动平台上的综合业务通过短波信道安全无缝地接入军用数据网、军用电话网和军用 TCP/IP 网络。新一代短波组网通信技术以 3G - ALE 技术为基础,包括 HF 网络管理、自适应网络控制,以及 HF 网络接入技术等。

扩频通信技术是无线电通信电子防御的主要手段。跳频通信技术是短波抗干扰技术的主要选择。为了提高短波通信抗干扰性能,以及抗多径效应,抗衰落的能力,提高跳频速率是一种有效途径。此外,宽带跳频可有效地增加通信信号的隐蔽性和抗干扰性。而实时频率自适应跳频,由于采用频谱分析处理技术与跳频信号处理技术相结合的方法,通过实时频率自适应算法,在跳频通信过程中自动探测和删除干扰频率点,使其在无干扰或弱干扰频率点上跳频,从而有效地对付阻塞干扰和点频干扰,改善通信质量,是未来短波电台通信抗干扰的优选体制。其中,快速跳频同步技术、快速信道测量技术、快速响应信道机技术、快速频率合成技术,以及宽带天线、宽带功放、宽带调谐技术等,是实现短波宽带高速跳频通信的关键技术。

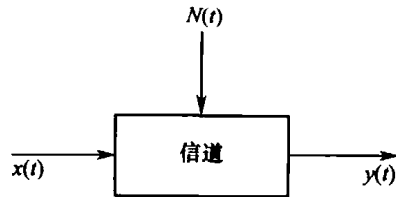
短波通信数字化主要包括两个方面的内容:一是语音数字化通信;二是数据通信业务,特别是高速数据业务。因此,在短波信道条件下的高速率的可靠数字信号传输,低码率的语音编码,以及数字信号处理等技术,是实现短波数字化的关键技术。为了有效地利用短波频率资源,提高 HF 频谱利用率,欧美等国采用 MIL - STD - 110B 标准(数据调制解调器互通性和性能标准),在 3kHz 带宽的信道上,实现 9.6kb/S 数传速率;在 6kHz 带宽的信道上,实现 19.2kb/s 数传速率;在两个 3kHz 的独立边带的信道上,通过信道捆绑技术,支持在 56kb/s 范围内数据吞吐量。

本书是系统介绍现代短波通信综合技术与知识的教科书,内容上力图突出一个“新”字,尽可能反映当前短波通信的新技术、新体制、新理论和新发展。全书按照知识结构分为 8 章,第 1 章现代短波通信概述,主要从总体上简要介绍短波通信的历史、发展状况和发展趋势,现代短波通信的新技术和新体制等;考虑到知识的完整性和为后续内容提供基础。第 2 章短波信道,主要介绍短波通信的基础知识,重点是介绍短波信道知识,以及短波信道的特点与特性,短波信道的描述方法等。第 3 章至第 8 章主要介绍短波通信各个领域的新技术与新成果等。

第2章 短波信道

2.1 短波信道的基本概念

本章所称短波信道,是指实现 A、B 两地间短波通信,从发方天线至收方天线之间的电波传输信道。最简单的表示如图 2-1 所示。令 $x(t)$ 表示信道的输入、 $N(t)$ 代表信道的



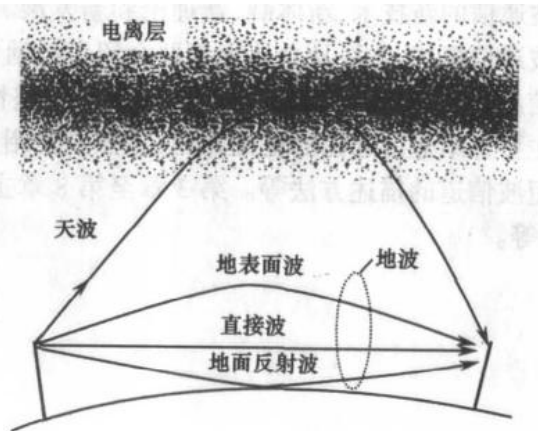
的加性噪声(包括加性干扰),则信道的输出 $y(t)$ 可表示为

$$y(t) = k(t)x(t) + N(t) \quad (2-1)$$

式中, $k(t)$ 以乘的方式作用于被传输的信号,它包含了信道的传输特性。相对于加性干扰 $N(t)$ 而言,有时称 $k(t)$ 为乘性干扰。对于短波信道,乘性干扰可分成描述长期变化(慢衰落)的分量 $k_L(t)$ 和描述短期变化(快衰落)的分量 $k_S(t)$,即

$$k(t) = k_L(t) \times k_S(t) \quad (2-2)$$

短波频段的电波传播有两种形式:一种是地波传播;另一种是天波传播,如图 2-2 所示。地波又由地表面波、直接波和地面反射波三种分量构成。地表面波沿地球表面传播,直接波为视距传输,地面反射波是经地面反射传播。天波传播是指电波经高空电离层反



射而达到地面接收点的一种传播方式,其距离可达数百 km 或上千 km。可见,短波通信可以依靠天波传播实现远距离通信,也可以依靠地波传播进行短距离通信。

天波传播是短波信道较之其他无线通信信道最重要的特点。对于天波传播,信道的慢衰落、快衰落和加性噪声都与电离层的特性密切相关。因此,本章主要以电离层的特性为基础,首先描述短波信道的物理特性,在此基础上,讨论短波信道的统计特性和计算机仿真。

2.2 短波信道的物理特性

2.2.1 地波传播

1. 地波传播形式

当天线架设较低,且其最大辐射方向沿地面时,主要是地波传播。其特点是信号比较稳定,基本上不受气象条件的影响,但随着电波频率的增高,传输损耗迅速增大。因此这种方式特别适用于短波的低端频率。在讨论地面波传播问题时,电离层的影响不予考虑,而主要考虑地球表面对电波传播的影响。

地波传播情况主要取决于地面条件。地面条件的影响主要表现在两个方面:一是地面的不平坦性,二是地面的地质情况。前者对电波的影响视电波的波长而不同,对长波来说,除了高山都可将地面看成平坦的;而对于分米波、厘米波来说,即使是水面上的波浪或田野上丛生的植物,也应看成是地面有严重的不平度,对电波传播起着不同程度的障碍作用。而后者是从土壤的电气性质来研究对电波传播的影响。就地面波传播情况而言,与地面的电参数有着更密切的关系。描述大地电磁性质的电参数有介电系数 ϵ (或相对介电常数 ϵ_r)、电导率 σ 和磁导率 μ 。根据实际测量,不同土壤的电参数见表 2-1。

表 2-1 不同土壤的电参数

地质	相对介电常数		电导率 $\sigma/(S/m)$	
	范围	平均	范围	平均
海水	80	80	0.66 ~ 0.6	4
淡水	80	80	$0.66 \sim 0.6 \times 10^{-3} \sim 2.4 \times 10^{-2}$	10^{-3}
湿土	10 ~ 30	20	$3 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-2}$	10^{-2}
干土	2 ~ 6	4	$1.1 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-3}$	10^{-3}

2. 地波传播的基本特性

对地面波传播的理论分析是相当复杂的,这里只给出一些基本的结论,并加以定性的说明和分析。地波传播具有以下基本特性。

1) 受到大地的吸收

当电波沿地面传播时,它在地面要产生感应电流。由于大地不是理想导体,所以感应电流在地面流动要消耗能量,这个能量是由电磁波供给的。这样,电波在传播过程中,就有一部分能量被大地所吸收。