

# 扩频选址通信

李振玉 卢玉民 编著

国防工业出版社

---

## 内 容 简 介

本书介绍现代扩频选址通信系统。详细地讨论了选址通信、保密通信、数字通信、双工通信，以及相关接收技术。重点研究直接扩频和跳频的通信原理、电路及其应用实例。

该书共十章，内容包括：扩频通信系统的现状与发展、现代无线通信、无线选址通信、扩频通信类型、扩频通信的理论基础、地址编码原理、直接扩频通信、跳频扩频通信、扩频调制技术以及扩频通信技术的应用。

本书是作者近几年来从事这方面科研、教学工作的总结。取材新颖、理论联系实际。可供从事通信、雷达、电子对抗、测速及自动控制等方面的工程技术人员阅读，也可作为大专院校有关专业师生的参考教材。

### 扩 频 选 址 通 信

李毓玉 卢玉民 编著

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售  
国防工业出版社印刷厂印装

787×1092 1/16 印张25 582千字

1988年9月第一版 1988年9月第一次印刷 印数：0,001—2,480册

ISBN 7-118-00014-0/TN2 定价：8.20元

## 前 言

扩频选址通信是应用频谱展宽技术,实现加密、选址通信的一门新学科。它是具有多功能、抗干扰能力强的一种通信方式,其优点是传统通信方式无法比拟的。可以说,扩频选址通信是传统通信方式的重突破和飞跃。

扩频通信之所以得到迅速发展并且自成体系,其基本原因有以下两个:一是社会需要,特别是军事上的迫切需要;二是电子器件的发展,尤其是大规模、超大规模集成电路的研制成功,为扩频通信进入实用阶段奠定了物质基础。因此,扩频技术的研究不仅具有理论意义,而且更具有重大的实际意义。

本书的理论基础是:用信号分割理论讨论选址通信;用加密理论研究保密通信;用伪噪声编码理论探讨扩频多址和码分多址通信;用最佳接收理论论述相关接收;用锁相原理讨论扩频系统的同步;用频率合成原理研究码控跳频;用数字通信原理说明扩频信道高频调制及宽带线性放大问题。

本书有关微处理机语言程序设计和上机、附录等章节由卢玉民编写,其余章节均由李振玉编写。

作者在扩频通信的科研中,得到北方交通大学李承恕教授的具体指导和有关同志的大力支持,他们为此项科研工作都付出了辛勤的劳动。本书还得到了叶杭、张树京两位教授的热情支持和帮助,尤其是总参62所蒋同祥总工程师,对全书的内容进行了全面审校。在此,一并深表感谢。

由于作者水平有限,书中难免会有不妥之处,恳请广大读者批评指正。

作者于北京

## 目 录

第一章 扩频通信系统的现状与发展	1	一、时-频矩阵多址通信的概念	67
§ 1-1 通信系统模型及其性能指标	1	二、时-频矩阵的组成原理	68
§ 1-2 无线通信的新问题	4	§ 3-5 码分多址通信	74
§ 1-3 什么是扩频通信	6	一、基本概念	74
§ 1-4 扩频通信的特点	7	二、码分多址通信组成原理	76
§ 1-5 扩频通信的动态与发展	9	三、码分多址的特点	77
本章小结	11	四、码分多址通信典型电台	78
习题	11	§ 3-6 扩展频谱多址通信	79
参考资料	12	一、扩展频谱多址通信	79
第二章 现代通信系统	13	二、多址性能分析	81
§ 2-1 现代无线通信的特点	13	§ 3-7 各种多址通信方式的比较	83
§ 2-2 数字通信	17	本章小结	85
§ 2-3 保密通信	23	习题	85
一、保密通信的基本概念	23	参考资料	85
二、保密通信的基本理论	24	第四章 扩频通信的基本概念	86
三、保密通信的基本类型	29	§ 4-1 扩频系统	86
四、语音加密方法	28	一、扩频通信原理	86
五、伪随机码加密技术	33	二、扩频系统的重要指标	88
§ 2-4 无线双工通信	37	§ 4-2 扩频通信的特点	88
一、双工通信的概念	37	§ 4-3 扩频通信的类型	90
二、双工器的原理	40	一、直接序列系统(DS系统)	92
三、几种双工器的比较	55	二、跳频系统(FH系统)	94
本章小结	55	三、线性调频系统(CS系统)	97
习题	56	四、时分系统(TD系统)	102
参考资料	56	五、混合系统	103
第三章 无线选址通信	57	六、三种主要扩频类型的比较	106
§ 3-1 选址通信的理论基础	58	§ 4-4 扩频技术的频谱利用与分配	
一、信号设计	58	原理	107
二、信号正交分割原理	59	本章小结	108
三、信号分割的严格条件	61	习题	109
§ 3-2 频分多址通信	63	参考资料	110
一、频分多址的概念	63	第五章 扩频通信的理论基础	111
二、频分多址性能分析	64	§ 5-1 信息传输引论	111
§ 3-3 时分多址通信	65	§ 5-2 扩频技术的理论基础	116
一、时分多址的概念	65	一、香农理论	116
二、时分多址的特点	67	二、理想通信系统带宽和信/噪比的互换关系	116
§ 3-4 时-频编码多址通信	67	三、非编码系统输出信/噪比与带宽的	

互换关系 .....	118	§ 7-6 时钟调频模拟直扩系统 .....	262
四、编码调制信道系统信/噪比与带宽的 互换关系 .....	126	§ 7-7 宽带线性放大 .....	265
五、潜在干扰理论 .....	128	本章小结 .....	268
§ 5-3 扩频通信系统的数学物理模型 .....	129	习题 .....	269
§ 5-4 扩频通信技术抗干扰能力的 分析 .....	132	参考资料 .....	269
一、一般通信抗干扰技术 .....	133	第八章 直扩系统相关接收原理 .....	270
二、扩频系统抗干扰的定性分析 .....	133	§ 8-1 直接序列接收机的组成 .....	270
三、直扩系统潜在抗干扰性 .....	135	§ 8-2 相关检测的基本概念 .....	271
四、跳频扩频通信的抗干扰能力分析 .....	143	一、互相关运算 .....	271
本章小结 .....	144	二、扩频信号相关处理的分析 .....	272
习题 .....	144	§ 8-3 同步锁相环 .....	274
参考资料 .....	145	§ 8-4 直扩接收机的同步系统 .....	275
第六章 扩频通信地址编码理论 .....	146	一、捕获 .....	275
§ 6-1 伪随机码的概念 .....	146	二、对伪码的限制 .....	278
§ 6-2 $m$ 序列码的产生原理 .....	149	三、包络相关延迟锁定同步 .....	280
§ 6-3 编码技术 .....	159	§ 8-5 直扩系统的信息解调 .....	288
一、反馈方式 .....	159	一、积分电路 .....	289
二、编码器状态转移图 .....	164	二、放大电路 .....	289
三、编码器反馈结构 .....	166	三、取样电路 .....	290
四、设计编码器的步骤 .....	171	四、判决电路 .....	291
五、微处理器实现码序列发生器 .....	172	五、单速解调 .....	291
§ 6-4 $m$ 码相关函数与功率谱 .....	174	六、全码电路 .....	293
一、 $m$ 序列相关函数的计算 .....	174	七、信息解调支路的各点波形 .....	293
二、用微处理器计算两个 $m$ 序列相关函数值 .....	180	§ 8-6 声表面波器件的非相干解调 .....	296
三、 $m$ 序列的功率谱 .....	181	一、声表面波的特性 .....	296
四、用计算机计算 $m$ 序列频谱 .....	187	二、声表面波的接收相关器和解码调制器 .....	297
五、码率谱的测量 .....	190	三、声表面波器件的优点 .....	298
§ 6-5 $m$ 序列码的性质 .....	191	本章小结 .....	298
§ 6-6 扩频通信的地址码 .....	197	习题 .....	299
一、地址码的选择 .....	197	参考资料 .....	299
二、Gold 码性能分析 .....	199	第九章 跳频扩频通信系统 .....	300
三、Gold 码的产生 .....	207	§ 9-1 跳频通信系统的基本概念 .....	300
本章小结 .....	215	一、跳频通信的物理模型 .....	300
习题 .....	215	二、跳频通信的数学模型 .....	302
参考资料 .....	216	三、跳频通信的性能 .....	304
第七章 直接扩频调制与放大技术 .....	217	§ 9-2 跳频通信组成原理 .....	305
§ 7-1 数字直扩通信系统的组成原理 .....	217	一、跳频通信机的组成 .....	305
§ 7-2 扩频通信的高频数字调制 .....	218	二、跳频通信机结构的特点 .....	306
§ 7-3 脉冲幅度键控调制 .....	222	§ 9-3 跳频器的组成原理 .....	308
§ 7-4 脉冲编码相位调制 .....	237	§ 9-4 跳频图案、跳频数及跳频速 率选择 .....	319
§ 7-5 脉冲数字频率调制 .....	256	§ 9-5 跳频通信的同步 .....	323
		§ 9-6 跳频通信系统的优点 .....	328

§ 9-7 几种典型跳频电台的分析 .....	330	附录 .....	348
本章小结 .....	333	附录1 SSRG结构的 $m$ 序列发生 .....	348
习题 .....	333	附录2 MSRG结构的 $m$ 序列发生 .....	348
参考资料 .....	334	附录3 SSRG结构 $m$ 码的状态序列 .....	349
第十章 扩频通信技术的应用 .....	335	附录4 MSRG结构 $m$ 码的状态序列 .....	353
§ 10-1 扩频通信在战术移动通信中 的应用 .....	335	附录5 SSRG结构 $m$ 序列相关值 .....	357
§ 10-2 扩频通信在铁路无线通信中 的应用 .....	337	附录6 MSRG结构 $m$ 序列相关值 .....	362
§ 10-3 扩频通信在控制、测距系统 中的应用 .....	338	附录7 $m$ 序列频谱计算 .....	366
§ 10-4 扩频通信在卫星通信中的应用 .....	343	附录8 SSRG结构Gold码频谱 .....	375
本章小结 .....	346	附录9 MSRG结构Gold码频谱 .....	383
参考资料 .....	347	附录10 SSRG结构Gold码优选对码的 发生 .....	391
		附录11 MSRG结构Gold码优选对码的 发生 .....	392

# 第一章 扩频通信系统的现状与发展

扩频通信是现代通信系统中的一门新兴学科。它的出现和发展，必将引起现代通信系统的重大革新，进一步推动现代通信系统的向前发展。什么是扩频通信？为什么要研究扩频通信？它又有什么独特的优点？为了弄清这些问题，首先叙述通信的基本概念和通信系统的性能指标。

## § 1-1 通信系统模型及其性能指标

### 一、通信系统

所谓通信，就是指消息的传递和交换，即互通信息。在近代通信中，要传送的信息有文字、语音、图像、数据及符号等各种类型。如果这些类型的信息，是信源产生的基带信号直接传输，那么将会产生信道利用率不高、使用场合受到限制等问题。所以，要实现远距离多种通信，就必须对原信息进行加工和处理，即对信息进行变换和反变换，通常称为调制与解调。其变换方式的基本过程是：发送端首先把基带信号变换为适合信道传输的信号，即调制，然后把它送到信道进行传输；而接收端要得到原始消息，就必须进行反变换，即解调。这个过程就组成了通信系统的基本模型，如图1-1所示。

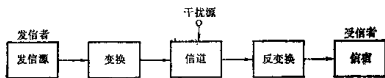


图1-1 通信系统基本模型

由于信息通过不同媒质的信道进行传输，因此分为无线通信和有线通信。所谓信道，就是信息传递的路由，又是连接信源与信宿的桥梁。为了使信号适合于某种信道传输，就必须进行信号频谱的搬移。例如，使用无线信道就必须进行信息的高频调制，即把信息的参量变化“注入”到载波信号中去。现代通信机就是把信息“注入”到载波振幅或频率参量上，这种通信机通常称之为调幅或调频通信机。

由于对通信方式要求不同，通信技术的不断发展，产生了各种变换方式。除了调制解调的变换方式之外，编码也是一种变换方式，这就出现了现代通信的新型通信体制，而扩频通信就是编码和译码调制新技术的产物。

按照信道传输信号参量的取值和反映消息的方式，信号分为模拟信号与数字信号。

由于通信系统所传递的信息类型不同，近代又分成了模拟通信系统和数字通信系统。在传输过程中，由于信源变换方式的不同，两种通信系统的组成也就不同。

如果信道中传输的是模拟信号，就称为模拟通信系统（见图1-2）。

当传输信号为时间的连续函数时，称之为连续信号，也称为模拟信号。如把声音变

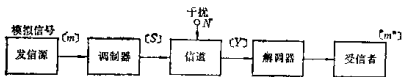


图1-2 模拟通信系统模型

换成电信号，这种信号的参量对应于模拟信息，是连续取值，也是对原始信息的逼真摹写，故称为连续信号或模拟信号。普通电话机输出的信号就是一种模拟信号。

如果信道中传送的是数字信号，则称为数字通信系统，如图 1-3 所示。

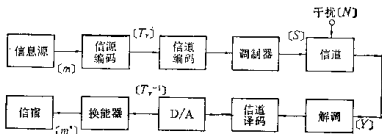


图1-3 数字通信系统模型

在图1-2和图1-3中，函数

$$[Y] \approx [S]$$

所以  $[m^*]$  与  $[m]$  不一致，即无论在模拟和数字信号系统中，均有

$$[Y] = [S] + [N]$$

式中  $[Y]$ ——信道输出信号；

$[S]$ ——调制输出信号；

$[N]$ ——干扰信号。

所谓数字信号，是指信号的振幅、频率、相位的改变，在时间上是离散的，而且取值也是离散的。通常用二进制“1”和“0”两种状态表示信号的“有”、“无”，如早期的莫尔斯电报信号，就是数字脉冲信号。一般数字信号是离散的，但并非所有的数字信号都是离散的。

图1-4(a)或(b)分别示出了模拟和数字两种不同形式的信号。

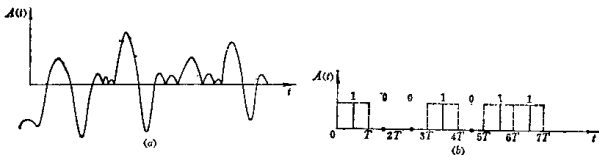


图1-4 两种信号形式

(a) 模拟信号；(b) 数字信号。



其中,图(b)表示的是一种常见的二进制数字信号,其取值只能是“1”或“0”。可以表示为“1”、“0”序列,即…1011011…。

模拟信号与数字信号是可以相互转换的。数字语音通信就是在发送端先把模拟语音的电信号,变换为数字信号后再进行传输的,这种变换可提高通信可靠性,也便于加密。在接收端,再把数字信号还原为模拟信号。前后两次变换,叫做模拟信号数字变换和数字信号模拟变换。通常用符号A/D和D/A变换来表示。

## 二、通信系统性能指标

要实现有效、可靠的通信,对通信系统就必须有一定的通信质量要求。所谓通信质量,就是指整个通信系统的性能。这是设计和评定某一个通信系统好与坏的技术标准。通信系统质量指标通常包括电气性能、工艺结构及操作维修等方面。但从信号传输的角度看,通信系统的性能指标最主要的是其有效性及可靠性。所谓信号传输的有效性,是指在给定的信道内,能够传输更多的信息内容。所谓信号传输的可靠性,是指在给定的信道内接收到的信息的准确程度。通信的可靠性与有效性两者之间,往往是互相矛盾的。通常只能要求在满足一定可靠性的指标下,尽量提高通信系统的有效性。

不同的通信系统,其具体的质量指标也不同。

对模拟通信来说,信号传输的有效性,通常可用有效传输频带来衡量,即在指定信道内容许同时传输的最大通路数。这个通路数日等于给定信道的传输频带除以每路信号的有效带宽。这就是多路频率复用。很明显,信道复用程度越高,其信号传输的有效性就越好,所以有效性与传输媒质有关。另外,信号的有效传输带宽还与调制方式有关,调频波频带比调幅波宽,在同一通信信道中,传递调频波的有效性就不如调幅波的有效性好。

模拟通信系统另一个重要性能指标是,传输可靠性。通常,造成收发信号误差有三种因素:一是传输中外界噪声叠加产生的,叫加性干扰误差,这种干扰不管信号有无,它是始终存在的;二是由信道传输特性的非线性所产生的,一般叫乘法干扰误差,这种干扰是随信号的存在而存在;三是物理系统内部产生的起伏噪声叠加干扰,即收发信机系统内部引起的信号误差。通常用更具体的性能指标表示,如语音通信系统用保真度、可懂度及清晰度。而对于通信系统必须要研究的主要是加性干扰。系统传输的可靠性,取决于接收机输出的信号平均功率与噪声功率之比,简称输出信噪比。模拟通信系统的传输可靠性,常常采用输出信噪比 $\left(\frac{S}{N}\right)$ 来衡量。在相同条件下,系统的输出信噪比

越高,其通信质量就越高,通信性能就越好,信息内容的准确度也就越高。如一般民用电话通信要求输出信噪比为40dB,其语音清晰度达95%以上,如果输出信噪比大于40dB,则讲话内容就听得更清楚了。输出信噪比不但与信道噪声的大小及信号功率有关,而且还与调制方式有关。不同的调制方式对处理噪声的能力也不同,如调频信号的输出信噪比就比调幅包络检波高得多,所以调频传输的可靠性比调幅系统好。扩频通信就更好了。扩频接收端对噪声频谱进行扩散处理,使干扰能量密度及幅度迅速降低,而有用信号能量最大集中,所以扩频通信的可靠性比现有传统的通信系统都高。这就是为什么要研究扩频通信的重要原因之一。当然扩频通信系统还有其它独特的性能和优点,

在后述章节中将详细的进行分析讨论。

对于数字通信来说，由于传输的是离散数字信号，所以传输的有效性用信号的传输速率来衡量。在数字通信中，每个二进制信号都占有相等的时间间隔，这个间隔叫码元长度。传输速率常用码元传输速率来衡量，即每秒钟传送码元的数目。

数字通信系统的传输可靠性用差错率来测量。差错率有两种表示方法：误码率和误信率。误码率代表收到的数字信号出现错误的程度，确切地说，误码率是码元在传输系统中被传错的概率。误信率又称误比特率，是指错误接收的信息量在传送信息总量中所占的比例，即为码元的信息量在传输中被丢失的概率。误码率越低，说明数字信号传输的可靠性越高，通信质量就越好。例如，对于有线信道来说，其误码率一般要求小于  $10^{-6}$ ，即表示在传输  $10^6$  个数字信号时，只容许出现一个差错信号。

## § 1-2 无线通信的新问题

1896年意大利的马可尼和俄国的波波夫发明了第一代无线通信装置，从而开创了无线通信发展的新时代。由于社会的迅速发展，人类对无线通信的要求也越来越高，现有通信制式已远远不能满足时代的要求，传统的通信系统出现了一些新问题。

### 一、通信干扰和抗干扰

#### (一) 电子战中的干扰和抗干扰

在现代战争中，电子对抗已成为重要的军事手段，这就是现代通信对抗。先进的侦察和干扰技术，可以迅速地截获信息以破坏对方的通信。其主要手段如下：

##### 1. 施放强无线电干扰

根据侦察到的对方通信电台的频率、信号方式及信号强弱，通过干扰发射机施放干扰，以压制对方信号，破坏对方通信。七十年代国外的新型通信干扰机的工作频段已经扩展到  $1.5\sim 80\text{MHz}$  (美 AN/TLQ-17A 型) 及  $20\sim 230\text{MHz}$  (AN/GLQ-3A)，甚至  $2\sim 500\text{MHz}$  (TA-CJAM)。干扰发射机的功率已可达  $2\text{kW}$ 。还采用了微处理机来进行测定、识别、自动分配功率电平、选择合适的干扰制式、控制干扰的施放和停止，以及自动检查干扰效果等等。现代的对抗设备，已经是侦察测向、信号分析处理、施放干扰三者一体的综合系统。

一般空战中的通信干扰为典型的电子对抗干扰，大致分三种情况，一是敌方以用于电子战的飞机、坦克及通信车作近距离支援干扰，掩护其攻击装备以袭击对方重要目标。例如，AN/ALQ-33 型的干扰机，发射功率为  $200\text{W}$ ，专门用于施放干扰，破坏对方通信；二是敌方作战机、坦克等自身装有干扰机，一方面作战，一方面施放电子干扰；三是敌人在地面或舰艇上设置干扰机对准对方作战机、部队通信指挥中心进行干扰。

##### 2. 制造假无线电信号

敌方窃获了无线电信号，根据频率、制式来复制一组假情报向对方发送，致使对方网内的被叫电台接收到假信号，而作出错误判决和行动，造成重大损失。

##### 3. 窃取信息、摧毁指挥中心

敌方用无线电测定设备，测量出对方电台方位以及信息，判定指挥中心所在地，然后控制摧毁设备进行瞄准袭击。如飞机轰炸、大炮射击等手段，使对方指挥系统全部

瘫痪。

由此可见，抗干扰性能差的通信电台，在未来的战术通信中，愈来愈难以保证正常的通信联络。未来的电子战，无论是那一方，如果不能通信或不能及时通信，或者失去正确的电子控制，那就不能获胜。现有的固定频率的无线通信网，其信息是很容易被窃取的。这种电台的方位只要用简单的测向器就可测出，而对施放的同频强信号瞄准式干扰，那就更没有抵抗的能力了。因此，这就迫使人们寻求新型的通信系统。

### (二) 无线电台的干扰

随着工农业生产的迅速发展，现代化的无线通信设备已被广泛地应用在国民经济的各个领域。除军事通信外，民用通信设备也迅速增长。这样一来，社会上使用的电台数急剧上升，造成空间密集着无数的无线电信号，这就形成频域上的频谱拥挤，时域中的时隙重叠，从而产生了无线通信的交调和互调的严重干扰。尤其调频广播和电视伴音信道的信号，对于传统的调频超短波电台来说，又增加了一个很强的干扰源，这种干扰往往是难以克服的。

### (三) 工业干扰

由于现代工业的发展，城市上空的工业电器噪声干扰电平急剧上升。这种电器噪声的频谱很宽，对于固定频率的传统电台来说，干扰是很大的。因此，这就要求现有的通信方式必须进行技术革新。

## 二、通信泄密问题

一般没有采取保密措施的各种调制方式的无线通信，其安全度和可靠性都较差，存在着泄密和被破坏的危险。这是由于调频电台运载信号能量集中，通信不隐蔽，容易被发觉和窃取信号；调频方式简单，使用一般的解调电路就可以从接收的信号中提取信号；现有调频通信体制抗干扰能力差，很容易受人人为的电子干扰和通信网内无线电信号干扰，以至造成无法进行通信的缘故。

## 三、多台组网个别呼叫问题

现有的调频电台要实现多台组网工作，必须采用频率分割的办法，即对各信道分配固定的频率。欲使信道数增加，则频道间隔就要缩小，例如，从100kHz缩小到50kHz，最近又缩小到25kHz。信道数增加了，对滤波器的要求就越来越高，这又使电台的调谐系统变得非常复杂。最严重的问题是系统自身带来交调、互调及频带利用率不高等问题，这是难以克服的。同一频段内多台进行工作，如何选呼，这是目前无线通信中又一个未能解决的问题。现有的移动通信网，大部分是采用一呼百应（称之为群呼叫）的办法。铁路列车调度无线电话就是这种方式，一个电台呼叫其它机车电台时，通信网内所有电台都能收到，这就造成了相互影响。要做到像自动电话一样的选号，就必须对现有无线通信体制进行一些改造。

## 四、与其它系统组网问题

现代通信中，传输的信息不只是模拟语言信号，还有数据、数字、图像信号等多种信源。通信网也是多种多样的，有卫星通信网、有线和无线通信网，以及计算机通信网

等。一个模拟通信系统，如果不经变换就无法与其它数字系统连接，当然也就不能构成机动灵活、多功能的全局性通信网。

因此，国内外一些要求抗干扰能力强、通信安全、可靠性高的通信系统，如战术通信、国家部门的保密通信等，已逐步采用“扩频通信”的新体制，这将有利于解决现代通信中出现的一些新问题。

### § 1-3 什么是扩频通信

传统的无线通信系统的射频信号带宽与信息本身带宽是可以相比拟的，如调幅信号所传送的语音信息，其信号带宽为语音信息带宽的二倍，电视的图像信息带宽虽然是几兆赫，但传输射频信号带宽也只是信息带宽的一倍多，这些称之为窄带通信。

调频信号的频谱包含有载波分量及无穷多的边频分量。边频分量以间隔为 $\omega_c$ 对称分布在载频的两侧，具有一定带宽。从已学过的贝塞尔函数可以发现：当调制指数 $m_f = \frac{\Delta\omega}{\omega_m} \ll 1$ 时，调频信号为窄带；当调制指数 $m_f \gg 1$ 时，调频信号为宽带。

所谓扩频通信，是指系统所传输的信号被扩展至一个很宽的频带。扩频通信所传递信息的信号带宽，远远大于原始信息本身的带宽。例如，一个宽带为几千赫的语音信号，用扩频技术来传输，其传输语音信息的信号带宽为几兆赫，是语言信息带宽的几百倍，甚至几千倍。

通常规定：如果信息持续时间为 $T$ ，则信息带宽为 $\Delta F = \frac{1}{T}$ ，射频信号带宽设为 $B_{RF}$ ，则信号带宽与信息带宽之比为

$$\frac{B_{RF}}{\Delta F} = B_{RF} \cdot T \quad (1-1)$$

如 $B_{RF} = B_c$ ， $\Delta F = B_m$ ，则

$$\frac{B_{RF}}{\Delta F} = \frac{B_c}{B_m} \quad (1-2)$$

式中  $B_c$ ——信号带宽；

$B_m$ ——信息带宽。

当  $\frac{B_{RF}}{\Delta F} = \frac{B_c}{B_m} = 1 \sim 2$ ，为窄带通信；

当  $\frac{B_{RF}}{\Delta F} = 50$ 以上，为宽带通信；

当  $\frac{B_{RF}}{\Delta F} = 100$ 以上，为扩频通信。

显然，扩频通信是属于宽带通信，即信号带宽为信息带宽的100倍，乃至1000倍等。

例如，设调频信号最大频偏 $\Delta f = 75\text{kHz}$ ，则调频系统的带宽为

$$B_{RF} = 2\Delta f = 150\text{kHz}$$

信息基带信号带宽为

$$\Delta F = (3 \sim 4)\text{kHz}$$

则

$$\frac{B_{RF}}{\Delta F} = \frac{150\text{kHz}}{3\text{kHz}} = 50$$

所以，调频通信也是一种扩展频谱的调制，但它与这里所要讨论的扩频通信是不同的。我们所讨论的扩频通信是用高速码信号调制载波，把信号频谱扩展到更宽的频带，使被传输的信号幅度低于噪声电平，这就大大提高了通信的隐蔽性和抗干扰能力。例如，高速码的钟源为 5MHz，则  $B_c=10\text{MHz}$ ；而信息基带为  $B_m=10\text{kHz}$ ，则

$$\frac{B_c}{B_m} = \frac{10\text{MHz}}{10\text{kHz}} = 1 \times 10^3 = 1000$$

也可以用各种码序列来控制产生载波的频率合成器的频率变化，使电台工作频率在一个较宽频带内随机跳变。由此可见，扩频通信是经过两次调制、解调的通信系统，除了必要的传统信息调制外，在高频信道中增加一次码控调制。这样做是使信息被嵌在控制码中，其目的是：一、使电台传输的信息除语音信号外，也可以传输数字信息；二、用数字码调制信息就可以进行信息加密；三、使传输信息的信号能量分散，这就大大提高了系统的抗干扰能力，增强了通信的隐蔽性；四、码控二次调制解调过程可以利用各种码型来进行选址通信，实现个别选叫用户。

### § 1-4 扩频通信的特点

扩频通信所以得到应用和发展，成为近代通信发展的方向，就是因为它具有独特的性能，其主要特性如下：

#### 一、抗干扰能力强

由于扩频系统利用了扩展频谱技术，在接收端对于干扰频谱能量加以扩散，对信号频谱能量压缩集中，因此，在输出端就得到了信噪比的增益，这样的扩频通信机，可以在很小的信噪比情况下进行通信，甚至可在信号比干扰信号（噪声、人为干扰、它台干扰）低得多的条件下实现可靠地通信。这种“去掉干扰”能力的功能，是扩频通信的主要优点之一，现分析如下：

1. 当接收机本地解扩码与收到的信号码完全一致时，所需要的信号恢复到未扩频前的原始带宽，而其它任何不匹配的干扰信号被接收机扩散到更宽的频带，从而使落入到信息带宽范围的干扰强度被大大降低了，当通过窄带滤波器（带宽为信息带宽）时，就全部抑制了滤波器的带外干扰信号。

2. 扩频系统的抗干扰性能，决定于系统对信号与噪声功率的压缩和扩展处理的比值，该处理增益越大，则系统抗干扰能力就越强。例如，处理增益为 30dB，则接收机可在 -15dB ~ -20dB 的信噪比下提取信号，除去内部损耗约 2dB 外，接收机还能在干扰信号比有用信号强 18dB 的条件下，仍有不小于 10dB 的工作信噪比，即有 10dB 的冗余作信号解调，进行正常通信。

3. 系统对高斯白噪声干扰、正弦波干扰（瞄准式干扰）、邻码干扰，以及脉冲干扰均有较强的抗干扰能力，对多径效应的影响不敏感，这在本书第五章、第七章将分别详细讨论。扩频系统对瞄准式干扰有独特的抵抗效能，这对于电子对抗是很有利的。

#### 二、可随机接入、任意选址

扩频通信所以能够迅速的得到发展，其另一个主要特点就是可以进行选址通信，组

和方便，适合机动灵活的战术通信。

1. 用扩展频谱技术与正交编码方法结合起来，可以构成码分选址通信。为了区别不同用户，使用不同的正交地址码，在同一载频、同一时间内，容许多对电台同时工作。或者用数码控制跳频器，随机的变换信号载频，不同的用户，可用不同的载频跳变规律（称为跳频码）相互区分，故在同一频带内，可容许多不同地址号码的电台。各电台号码可以随机改变，还可以用微处理机软件程序进行控制，若想变更电台号码，只要给电台内微处理器送入相应的程序即可。程序也可事先录入磁带内，随身携带，以便随时变更电台地址码，即变化电台的号码。所以，扩频通信是一个多地址通信系统，而且地址号码可以随机变动。

2. 具有共用信道自动选呼能力。每个用户有自己的号码，每个用户可以自由选呼其它各个用户，呼叫中自动接续，不需人工交换，如同自动电话一样，使用方便。在同一信道内，若几十对电台同时通话，可以做到互不影响。目前实际上已达到了60~70个用户同时通话。

3. 由于组成多址通信时，网内并不需要各电台严格同步，因此，网内可随机接入电台，增加用户数，随时随地可增减电台号码。整个通信系统也便于用微处理机进行信息处理与自动交换控制。

4. 如果单纯的从窄带信息被扩展为宽带信号来看，扩频通信似乎是频带利用率很低，但实际上，由于扩频码实现了码分多址，地址数可以由几百增加到几千个，虽然每个用户占用的时间是有限的，但是用户对可以同时占用同一频带，这就有效的利用了频带，大大提高了频带的利用率。

### 三、安全通信

扩频通信是一个比较安全、可靠的通信系统，其原因如下：

#### 1. 信号功率密度低

扩频发送端对要传送的信息进行了频谱扩展，其频谱分量的能量被扩散，使信号功率密度降低，近似于噪声性能。这个系统可在信噪比低于-15~-20dB下进行通信，从而使信号具有低幅度、隐蔽性好的优点。

#### 2. 数字信息易加密

由于扩频通信可以传送数字信号，当把模拟信号变换成数字信号时，数字信号不但加密很方便，而且数字加密的密级也较高，保密性能好。

#### 3. 通信信息不易被窃取

扩频通信电台地址采用伪随机编码，可以进行数字加密，在收端如不掌握发端信号随机码的规律，是接收不到信号的，而收到的只是一片噪声。即便是知道了地址码，解出了加密的发射信息信号，如果不了解密钥，不采取相应的解密措施，也还是听不懂对方的讲话，解不出正确的数字、文字符号，所以扩频系统通信安全性好。

#### 4. 通信不易被破坏

扩频通信体制具有很高的抗干扰能力，尤其对瞄准式干扰具有特别有效的抵制功能，在电子战对抗中就有很强的抗干扰能力，要企图封锁和压制这个系统的通信是比较困难的，所以扩频通信的可靠性好。

#### 四、信息传输可数模兼容

扩频通信系统所传输的信息，可以是模拟信号，也可以是数字信号，这就使系统应用方便，且多功能。

##### 1. 模拟信息

当所传送的信息是模拟信息时，对扩频的跳频电台，可以直接调制传输，也可以将模拟信号经  $A/D$  变换（一次调制）成数字信号，然后送到扩频跳频系统或码分直扩系统传送。利用这样的系统就能够完成通信、自动控制和遥测。

##### 2. 数字信息

扩频通信系统基本上是一个数字通信系统，电路大部分采用数字电路，可以实现集成化。集成电路体积小、功耗低、电气性能稳定可靠，用集成电路模块组成的电台，适宜于移动通信的要求。由于电台传送的是数字信号，系统的终端便于与微处理机相连接，可以直接进行人-机对话，实现现代通信，因此，也就增加了电台使用的功能。

##### 3. 具有编码通信的特点

扩频通信采用不同的正交编码来区分收发信号，实现双工，在数字间控空隙可接收信号。若在通信系统中有转接中心时，可采用收发不同频率的异频双工，一般电台要实现同频双工都是很困难的，而对异频双工组网多址通信那就更难了。

##### 4. 具有移动通信的特点

扩频系统不但具有数字通信的特性，而且还具有抗衰落能力。这是因为，扩频通信系统所传送的信号频谱已扩展很宽，频谱密度很小，如在传输中小部分频谱衰落，不会使信号造成严重畸变。这一点，在移动通信的短波通信，是非常重要的。扩频信号的功率、谱密度远比普通信号小，这样在任一窄的频率范围内，发送的功率都很低，如果信号在传播中局部频谱损耗，也不会严重影响整个信号的传输。

以上是扩频通信的特点。但是，并不是在同一系统内必须同时利用上述的所有特点，而是可以只利用其中的某一个特点。例如，同一系统中在低功率传输时就能隐蔽信号，而在高功率传输时就能达到较高的抗干扰能力。

### § 1-5 扩频通信的动态与发展

现代战争和工农业生产对通信提出了新课题，对现代无线通信的标准及性能的要求也愈来愈高，由于扩频通信具有抗干扰性强、信息信号隐蔽、便于加密、任意选址，以及易于组网等独特的优点，所以，近几年来世界各国对扩频技术的研究已形成高潮，特别是大规模集成电路的发展，微处理机的广泛应用，以及声表面波技术器件的研制成功，使扩频通信迅速达到了实用阶段。扩频系统具有体积小、性能可靠、功耗小的特点，所以目前国内外已用于导航、跟踪、测距、遥控、空间通信、电子对抗，以及移动通信等各方面，尤其在战术通信方面得到了高度的重视。

#### 一、扩频通信的发展

扩频通信是一种伪噪声编码通信，这种通信体制的理论研究，是从四十年代末《信

息论》形成开始的，《信息论》的奠基人香农早就指出<sup>①</sup>：“实现有效通信的最佳信号乃是白噪声形成的信号的传递”。<sup>②</sup>这就为扩频通信的发展指明了方向，奠定了理论基础。五十年代，伍德华特（P. M. Woodward）发现，在雷达测距与测速中，采用白噪声信号，其测量误差最小，这就为扩频技术的应用开辟了道路。由于大规模集成电路的发展，到了六十年代中期，人们发现伪随机序列编码很容易产生，而伪码发生器可以做得很小，从此，采用伪随机码调制的通信就迅速发展起来了。1962年美国开始应用于军用卫星，1964年马格纳沃克斯（Magnavox）公司研制成频谱展宽话音调制解调器 MX-170C（详见第四章），用于 VRC-12 型超短波电台，其频率为 30~76MHz。电台加装这个扩频终端，大大提高了抗干扰能力，这种电台可以在敌方干扰信号比所传输的伪噪声调制信号高 10 倍（10dB）的条件下，在 2 秒钟内能捕获到有用信号，一旦捕获到信号以后，系统可在干扰信号比传输信号高 20 倍（13dB）的情况下进行通信。

扩频技术调制解调的发展，也是从简单的直接伪码调制（叫直接序列）到复杂的跳频制式，跳频速率由每秒十几次的慢跳，发展到每秒上千次的快跳，目前又采用直接调制（DS）和跳频（FH）的混合系统，称为 FH/DS 系统，这种系统具有上述两种制式的优点。

扩频通信的设备，六十年代初已基本上实现了，当时器件大都采用晶体管，电台体积相当大。七十年代大规模集成电路的出现，再加上微处理器广泛的使用，扩频系统的很多功能都可以用微处理器来实现，这样，就使电台体积大大缩小。1980年英国 Jaguar-V 中速跳频电台只有 230×90×340mm 大小。现在国际扩频电台可以做到只有 1/2 in<sup>3</sup> 那么大，未来的扩频系统将是由十多块大规模集成电路和少数几个用于高频的混合电路及晶体管组成。其调制方式不只是采用单一形式，而是采用混合调制技术。扩频通信的应用，将是八十年代在军事通信及某些特殊通信中的主要设备，也是移动通信的发展方向。

## 二、扩频通信技术的现状

自从六十年代美国在军用卫星应用扩展频谱调制技术以来，先后又应用于短波、超短波（又称超高频 UHF）电台。日本警察局也签订了购买双路频谱展宽通信设备的合同，这种设备将用于干扰较强的区域，是一种超高频 400MHz 的通信机，采用直接序列调制方式，可用来做车载移动电台，体积只有 30×400×430mm，重量为 13.6kg。发射机功率为 25W，接收信号可在 -30dB 以上解出。

英国的马可尼公司与其它四家公司合作研制扩频通信系统。英国的瑞克尔（Racal）公司 1980 年展出了甚高频（VHF）战术跳频电台，用于抗干扰或反窃听方面，这种电台与单信道通信机相比，其抗干扰能力已提高了几百倍，电台使用了大量的先进的大规模集成电路，有便携式、背负式、还有加装放大器的车载式电台。英国的甚高频干扰防护电台，是扩频跳频式，频率跳变速度为每秒 50 次~500 次，这样，既克服了慢跳变易受一般频谱分析所破获和快跳成本又高的缺点，又可用较长同步码，使通信可靠，能抗击

① C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of communication", B.S.T.J. 27(1948)No. 3, 379-423; No. 4, 623-656.

② C. E. Shannon, "Communication in the presence of Noise," PIRE, 37, 1 (1949), 10.



(躲避式)现有的跟踪式干扰。这种扩频电台是小型背负式的,其工作频段为 30~80MHz,输出功率为 3W,加装功率放大器可达 50W,信道间隔为 25kHz。

随着扩频通信设备的研制和试用成功,扩频技术的理论研究也逐步深入。七十年代初,国际上相继发表了许多论文、研究报告,出版了有关扩频技术的书刊和会议录。理论的研究又促进了设备的研制工作的广泛开展,设备使用的成功又进一步引起了各国的重视。如美国1978年透露了“美全球军事指挥和控制系统”计划中的第一项,就是研制抗干扰的保密通信设备。而实际上,在1977年的《EASCON-77》会议上,就介绍了一种展宽频谱的调制器和解调器,其工作方式是频谱展宽/多址方式/数字调制的。最近美哈瑞斯(HARRIS)公司又展出了 RF-3090型扩频跳频电台。

我国通信部门的研究院、所及有关的高等院校工厂,也已开始了这方面的理论研究和实际设备的研制,目前已研制成超高频直接序列的扩频电台,其发射功率为 30W,有几百个地址。整个通信系统进行了干扰模拟试验:用三路同一系统的地址码无线电信号和另一路同载频的等幅信号(即为瞄准式干扰)及一路宽带白噪声信号同时加入接收机,这五种干扰信号幅度是有用信号的六倍,就在这种情况下接收机仍能正常工作,正确选叫电台地址码,保持与其中任一电台通话。这种情况,相当于扩频电台接收机在信噪比为 -15dB 条件下,仍能正确提取有用信号。在电台传输的语言信号中也可以进行数字加密<sup>(2)</sup>。近几年来,已开始了跳频系统的研制。不久的将来,在我国战术通信、工矿企业的移动通信,以及自动控制等系统中,将会广泛地应用这种技术,组成新型的通信系统。

## 本章小结

本章讨论了无线通信系统和扩频通信的基本概念,重点介绍了扩频技术的产生及其特点。

扩频通信技术的出现,是“信息论”建立和发展的结果。现代通信出现的新问题,又进一步促进了扩频技术的发展。

信号传输的有效性和可靠性,是衡量通信质量的标准,根据不同的系统,分别对模拟和数字信道提出了具体要求。模拟和数字信道系统的质量指标是有效传输频带(复用程度)和输出信噪比;而数字通信系统的质量指标是传输速率和误码率。

扩频通信具有较强的抗干扰能力,保密性强,通信可靠性高,故成为战术通信的重要发展方向,而扩频技术又是通信技术的革新。

## 习 题

1-1 现假定 500~1600kHz 频段为调幅波电台,如每个电台占用 10kHz 的带宽,试问在该频段内最多能容纳多少个电台信道?

1-2 现用 150~160MHz 频段作为调频电台通信网,每个电台频道占 25kHz 带宽,问最多能有多少个频道?

1-3 现有 400~412MHz FM制的超短波电台,每台需要占用 6MHz,问在此波段内最多能容纳多少用户?

1-4 试将 50Hz、1600kHz、150MHz、3000MHz 信号换成在自由空间的波长?