

电信高技术普及丛书

扩展频谱通信

李承恕 赵荣黎 编著



人民邮电出版社

TN914.4
L20

368396

电信高技术普及丛书

扩展频谱通信

李承恕 赵荣黎 编著

人民邮电出版社

登记证号(京)143号

内 容 提 要

本书介绍了扩展频谱通信的基本概念和原理、它的特点和应用。书中说明了什么是扩展频谱通信、直接序列扩频系统是怎样工作的、跳频系统是怎样工作的、什么是混合式扩频系统、扩频通信有哪些应用、扩频通信的发展概况与前景等。本书能使读者对扩频通信有一个全面的、系统的和基本的了解。

电信高技术普及丛书

扩展频谱通信

李承恕 赵荣黎 编著

*

人民邮电出版社出版发行

北京东长安街27号

顺义振华胶印厂印刷

新华书店总店科技发行所经销

*

开本:787×1092 1/32 1993年5月 第一版

印张:4 24/32 页数:76 1993年5月 北京第1次印刷

字数:103千字 印数:1—3 000册

ISBN7-115-04917-3/TN·619

定价:3.40元

丛书前言

当今世界正在经历着波澜壮阔的科学技术的巨大变革。通信技术是最活跃的领域之一。通信的发展,在很大程度上取决于通信技术手段的先进性。通信高技术的采用正在迅速的改变着我国通信的面貌。

为了大力加强电信高技术的普及教育,我社组织编写了这套“电信高技术普及丛书”,向广大电信管理干部、技术人员介绍正在使用和即将使用的电信高技术,使读者能对某一高技术的概貌、关键问题、发展现状及发展趋势有一个基本了解。

这套丛书内容涉及个人通信、数字移动通信、光纤通信、程控交换、通信网、综合业务数字网、扩展频谱通信、宽带交换、移动卫星通信、智能终端等方面。为了跟踪世界通信高技术的发展,满足读者多方面的需求,我们欢迎广大读者提出宝贵意见,以便出好这套丛书。

前 言

扩展频谱通信(Spread Spectrum Communications)简称“扩频通信”。它的基本特点是传输信息所用信号的带宽远远大于信息本身的带宽。因为扩展了信号频谱,使扩频通信具有一系列独特的优点。国外自40年代末期就开始了这方面的研究工作。但其后一个很长的时期,由于技术复杂和造价昂贵,进展不大。随着通信技术的发展和新型器件的出现,特别是最近几次战争中电子战十分激烈,促使各国军方加速这种具有强抗干扰能力的新的通信方式的研究。到80年代它已广泛应用于各种战略和战术通信中,成为电子战中通信反对抗的一种必不可少的十分重要的手段。除军事通信外,扩频通信技术也广泛应用于跟踪、导航、测距、雷达、遥控等各个领域。不仅如此,近年来,世界各国都已进入信息时代。在民用通信方面,无线通信、移动通信、卫星通信、微波通信等都获得了飞速的发展。为了满足日益增长的通信容量的需求和有效地利用频谱资源,各国学者都纷纷提出利用扩频通信技术可以容易地实现码分多址,在数字蜂窝移动通信、卫星移动通信、室内无线通信和未来的个人通信中广泛采用扩频通信,从而可使通信容量增加20倍。扩频通信在军用和民用上的应用前景引起人们极大的兴趣和高度的重视。我国自70年代初期就开始了这方面的研究。今后必将有更大的发展。我们编写这本读物的目的就是适应这种形势发展的需要,给读者介绍扩展频谱通信的基本概念和原理、以及它的特点和应用。书中将说明以下一些主要问题:什么是扩展频谱通信?直接序列扩频

系统是怎样工作的？跳频系统是怎样工作的？什么是混合式扩频系统？扩频通信有哪些应用？扩频通信的发展概况与前景如何？希望通过上述问题的介绍，能在有限的篇幅内使读者对扩频通信有一个全面的、系统的和基本的了解。也希望这本读物能有助于促进我国扩频通信技术的进一步发展。

本书的编写是为了已具有通信技术方面基本知识，但希望了解扩展频谱通信的原理和应用的大专院校师生和工程技术人员阅读的。同时也供从事通信业务的领导和管理工作人员参考。编写中力求简明扼要、通俗易懂、深入浅出，重视物理概念的阐述、避免繁琐的数学分析。本书第一、二、六章由李承恕编写，第三、四、五章由赵荣黎编写。蒋同泽教授审阅了本书初稿，提出了许多宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。由于作者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，希广大读者不咎批评指正。

李承恕 赵荣黎

于北方交通大学现代通信研究所

一九九二年十月

目 录

一、什么是扩展频谱通信	(1)
1. 扩展频谱通信的基本概念	(1)
(1) 扩频通信的定义	(1)
(2) 扩频通信的理论基础	(2)
(3) 处理增益与抗干扰容限	(4)
2. 扩展频谱通信的主要特点	(5)
(1) 抗干扰性强	(5)
(2) 隐蔽性好	(6)
(3) 可以实现码分多址	(6)
(4) 抗多径干扰	(7)
(5) 能精确地定时和测距	(7)
3. 扩展频谱通信的几种方式	(8)
(1) 直接序列(DS)扩频	(9)
(2) 跳频(FH)	(10)
(3) 跳时(TH)	(11)
(4) 线性调频(Chirp)	(12)
(5) 各种混合方式	(13)
4. 扩展频谱通信的应用概况	(14)
二、直接序列扩频系统是怎样工作的	(18)
1. 直扩系统的特点	(18)
(1) 直扩系统的组成与原理	(18)

(2)直扩信号的波形与频谱.....	(21)
2. 扩频码序列.....	(23)
(1)码序列的相关性.....	(24)
(2) m 序列.....	(27)
(3)Gold 码序列.....	(31)
3. 直扩信号的发送与接收.....	(33)
(1)扩频调制.....	(34)
(2)相关解扩.....	(36)
(3)射频系统.....	(42)
4. 直扩系统的同步.....	(45)
(1)同步原理.....	(45)
(2)起始同步:搜捕.....	(46)
(3)保持同步:跟踪.....	(52)
5. 直扩系统的性能.....	(56)
(1)直扩系统的抗干扰性.....	(56)
(2)直扩信号的抗截获性.....	(59)
(3)直扩码分多址通信系统.....	(59)
(4)直扩系统的抗多径干扰性能.....	(60)
(5)直扩测距定时系统.....	(61)
三、跳频系统是怎样工作的.....	(62)
1. 跳频系统的特点.....	(62)
(1)为什么要跳频.....	(62)
(2)什么是跳频图案.....	(63)
(3)跳频是怎样抗干扰的.....	(65)
(4)跳频技术指标与抗干扰的关系.....	(68)
(5)跳频系统的主要特点.....	(70)
2. 跳频信号的发送与接收.....	(74)

(1)怎样产生跳频信号	(74)
(2)怎样接收跳频信号	(76)
(3)正确接收跳频信号的条件	(76)
(4)跳频信号的波形	(77)
3. 跳频系统的同步	(79)
(1)跳频同步信息的基本传递方法	(79)
(2)几种实用的同步方法	(81)
(3)跳频同步系统性能及抗干扰性	(83)
4. 跳频图案的产生	(85)
(1)跳频图案与跳频频率表	(85)
(2)跳频图案的选择	(86)
(3)几种常用的伪随机序列	(86)
四、什么是混合式扩频系统	(90)
1. 提出混合式扩频系统的原因	(90)
(1)直接序列扩展频谱系统的优点与局限	(90)
(2)跳频系统的优点与局限	(92)
(3)直接序列扩频与跳频扩频的互补性	(93)
(4)跳时系统的特点	(93)
(5)混合式扩频系统的好处	(94)
2. 几种主要的混合式扩展频谱系统	(95)
(1)直接序列与跳频混合式扩频系统	(95)
(2)直扩/跳时(DS/TH)系统	(97)
(3)直扩/跳频/跳时(DS/FH/TH)系统	(98)
3. 混合式扩展频谱系统的适用性	(99)
(1)严重干扰环境	(99)
(2)移动通信环境	(100)
(3)多径传播环境	(101)

(4)多网工作环境	(102)
五、扩频通信有哪些应用	(103)
1. 扩展频谱技术的应用领域	(103)
2. 军事通信中的应用	(104)
(1)地面战术通信	(104)
(2)海、空战术通信	(106)
(3)三军联合战术通信	(107)
3. 移动通信中的应用	(112)
(1)扩频技术能解决什么难题	(112)
(2)几种应用扩频技术的系统	(113)
4. 卫星通信中的应用	(115)
(1)跟踪与数据中继卫星系统(TDRSS)	(115)
(2)码分多址卫星通信系统	(116)
5. 测距定位中的应用	(118)
(1)全球定位系统(GPS)	(118)
(2)定位报告系统	(121)
(3)静止星定位系统(Geostar)	(121)
6. 其它应用	(123)
(1)扩频码分个人通信网	(123)
(2)室内通信	(124)
(3)扩频分组通信	(124)
六、扩展频谱通信的发展前景如何	(125)
1. 扩频通信在军事通信中的应用与发展	(125)
(1)通信的电子对抗与电子反对抗	(125)
(2)直接序列扩频通信的电子对抗与电子反对抗 ...	(127)
(3)跳频通信的电子对抗与电子反对抗	(129)
2. 扩频通信在民用通信中的应用与发展	(133)

(1)数字蜂窝移动通信	(133)
(2)个人通信网	(135)
(3)有线通信网备用系统与无线城市	(136)
(4)烟火匪情等报警及公安隐蔽通信	(136)
(5)体育竞赛通信与证券交易所通信	(137)
(6)数字立体声广播与业余无线电通信	(137)
3. 扩频通信发展的趋势与限制	(138)

一、什么是扩展频谱通信

1. 扩展频谱通信的基本概念

(1) 扩频通信的定义

所谓扩展频谱通信,可简单表述如下:扩频通信技术是一种信息传输方式,其信号所占有的频带宽度远大于所传信息必需的最小带宽;频带的展宽是通过编码及调制的方法来实现的,并与所传信息数据无关;在接收端则用相同的扩频码进行相关解调来解扩及恢复所传信息数据。这一定义包含了以下三方面的意思:

首先,信号的频谱被展宽了。我们知道,传输任何信息都需要一定的带宽,称为信息带宽。例如人类的语声的信息带宽为 $300\text{Hz}\sim 3400\text{Hz}$,电视图像信息带宽为数 MHz。为了充分利用频率资源,通常都是尽量采用大体相当的带宽的信号来传输信息。在无线电通信中射频信号的带宽与所传信息的带宽是相比拟的。如用调幅信号来传送语声信息,其带宽为语声信息带宽的两倍;电视广播射频信号带宽也只是其视频信号带宽的一倍多。这些都属于窄带通信。一般的调频信号,或脉冲编码调制信号,它们的带宽与信息带宽之比也只有几到十几。扩展频谱通信信号带宽与信息带宽之比则高达 $100\sim 1000$,属于宽带通信。为什么要用这样宽的频带的信号来传输信息呢?这样岂不太浪费宝贵的频率资源了吗?我们将在下面用信息论和抗干扰理论来回 答这个问题。

其次,采用扩频码序列调制的方式来展宽信号频谱。我们知道,在时间上有限的信号,其频谱是无限的。例如很窄的脉冲信号,其频谱则很宽。信号的频带宽度与其持续时间近似成反比。1 微秒的脉冲的带宽约为 1MHz。因此,如果用很窄的脉冲序列被所传信息调制,则可产生很宽频带的信号。下面要介绍的直接序列扩频系统就是采用这种方法获得扩频信号。这种很窄的脉冲码序列,其码速率是很高的,称为扩频码序列。其他的扩频系统,也都是采用这种或那种扩频码调制的方式来实现信号频谱的扩展的。这里需要说明的一点是所采用的扩频码序列与所传信息数据是无关的,也就是说它与一般的正弦载波信号一样,丝毫不影响信息传输的透明性。扩频码序列仅仅起扩展信号频谱的作用。

第三,在接收端用相关解调来解扩。正如在一般的窄带通信中,已调信号在接收端都要进行解调来恢复所传的信息。在扩频通信中接收端则用与发送端相同的扩频码序列与收到的扩频信号进行相关解调,恢复所传的信息。换句话说,这种相关解调起到解扩的作用,即把扩展以后的信号又恢复成原来所传的信息。这种在发端把窄带信息扩展成宽带信号,而在收端又将其解扩成窄带信息的处理过程,会带来一系列好处,其原理我们将在以后进一步阐明。弄清楚扩频和解扩处理过程的机制,是理解扩频通信本质的关键所在,这一点我们应特别注意。

(2) 扩频通信的理论基础

长期以来,人们总是想法使信号所占频谱尽可能的窄,以充分利用十分宝贵的频谱资源。为什么要用这样宽频带的信号来传送信息呢?简单的回答就是主要为了通信的安全可靠。这可以用信息论和抗干扰理论的基本观点来加以说明。

仙农(Shannon)在其信息论中得到如下有关信道容量的有

各公式：

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{P}{N} \right) \quad (1)$$

这个公式原意是说：在给定信号功率 P 和白噪声功率 N 的情况下，只要采用某种编码系统，我们就能以任意小的差错概率，以接近于 C 的传输信息的速率来传送信息。式中 W 为频带宽度， C 称为信道容量。这个公式暗示出：在保持信息传输速率 C 不变的条件下，我们可以用不同频带宽度 W 和信噪功率比 P/N 来传输信息。换句话说，频带 W 和信噪比 P/N 是可以互换的。如果增加频带宽度，就可以在较低的信噪比的情况下用相同的信息率以任意小的差错概率来传输信息。甚至在信号被噪声淹没的情况下，只要相应地增加信号带宽，也能保持可靠地通信。这一公式指明了采用扩展频谱信号进行通信的优越性，即用扩展频谱的方法以换取信噪比上的好处。

柯捷尔尼可夫 (Котельников) 在其潜在抗干扰性理论中得到如下关于信息传输差错概率的公式：

$$P_{\text{ош}} \simeq f \left(\frac{E}{N_0} \right) \quad (2)$$

这个公式指出：差错概率 $P_{\text{ош}}$ 是信号能量 E 与噪声功率谱密度 N_0 之比的函数。设信号频带宽度为 W ，信息持续时间为 T ，信号功率为 $P = E/T$ ，噪声功率为 $N = WN_0$ ，信息带宽为 $\Delta F = 1/T$ ，则(2)式可化为：

$$P_{\text{ош}} \simeq f \left(\frac{P}{N} \cdot TW \right) = f \left(\frac{P}{N} \cdot \frac{W}{\Delta F} \right) \quad (3)$$

从上式可知：差错概率 $P_{\text{ош}}$ 是输入信号与噪声功率比 P/N 和信号带宽与信息带宽比 $W/\Delta F$ 二者乘积的函数。也就是说，对于传输一定带宽 ΔF 的信息来说，信噪比与带宽是可以互换的。它同样指出了用增加带宽的方法可以换取信噪比上的好处这一客

观规律。

总之,我们用信息带宽的 100 倍,甚至 1000 倍以上的宽带信号来传输信息,就是为了提高通信的抗干扰能力,即在强干扰条件下保证可靠安全地通信。这就是扩展频谱通信的基本思想和理论依据。

(3) 处理增益与抗干扰容限

扩频通信系统由于在发端扩展了信号频谱,在收端解扩后恢复了所传信息,这一处理过程带来了信噪比上的好处,即接收机输出的信噪比相对于输入的信噪比大有改善,从而提高了系统的抗干扰能力。因此,我们可以用系统输出信噪比与输入信噪比二者之比来表征扩频通信系统的抗干扰能力。理论分析表明,各种扩频系统的抗干扰性能都大体上与扩频信号的带宽与所传信息带宽之比成正比。一般把扩频信号带宽 W 与信息带宽 ΔF 之比称为处理增益 G_P ,即

$$G_P = \frac{W}{\Delta F} \quad (4)$$

它表示了扩频系统信噪比改善的程度。除此之外,扩频系统其他一些性能也大都与 G_P 有关。因此,处理增益是扩频系统一个重要的性能指标。

仅仅知道了扩频系统的处理增益,还不能充分地说明系统在干扰环境下的工作性能。因为系统的正常工作还需要保证输出端一定的信噪比,并需扣除系统其他一些损耗。我们引入抗干扰容限 M_I ,其定义如下:

$$M_I = G_P - \left[\left(\frac{S}{N} \right)_o + L_s \right] \quad (5)$$

式中 $\left(\frac{S}{N} \right)_o$ = 输出端的信噪比,

L_s = 系统损耗

例如,一个系统的 G_p 为 30dB,最小 $(\frac{S}{N})_o$ 为 10dB, L_s 为 2dB,则 M_j 为 18dB。它表明干扰功率超过信号功率 18dB 时系统就不能正常工作;而在二者之差不大于 18dB 时,系统仍能正常工作,即信号在一定的噪声湮没下也能正常通信。

2. 扩展频谱通信的主要特点

由于扩频通信大大扩展了信号的频谱,发端用扩频码序列进行扩频调制,以及在收端用相关解调技术,它就具有了一系列优良的性能,而为其他通信方式所不及。现简述如下:

(1) 抗干扰性强

扩频通信系统扩展的频谱越宽,处理增益越高,抗干扰性能越强。对于前述例子中,处理增益为 30dB 时,其抗干扰容限为 18dB。从理论上讲它可在信噪比为 -18dB 时也能把信号从噪声湮没中提取出来。当然,在接收端一般应采用相关检测或匹配滤波的方法来提取信号。这一点将在以后再作介绍。此外,对于单频及多频载波信号的干扰、其他伪随机调制信号的干扰,以及脉冲正弦信号的干扰等,扩频系统都有抑制干扰提高输出信噪比的作用。特别是对抗敌方人为干扰方面,效果很突出。简单地说来,如果信号频带展宽 10 倍,干扰方面需要在更宽的频带上去进行干扰,分散了干扰功率。在总功率不变的条件下,其干扰强度只有原来的 1/10。而要保持原有的干扰强度,则必需加大 10 倍总的功率,这在实际的战场条件下,有时是难以实现的。另外,由于在接收端采用了扩频码序列进行相关检测,即使采用同类型信号进行干扰,如果不能检测出有用信号的码序列,由于不同码序列之间不同的相关性,干扰也是起不了太大的作用。抗干扰性能强是扩频通信的最突出的优点。

(2) 隐蔽性好

由于扩频信号在很宽的频带上被扩展了,单位频带内的功率就很小,即信号的功率谱密度很低。所以应用扩频码序列扩展频谱的直接序列扩频系统,可在信道噪声和热噪声的背景下,在很低的信号功率谱密度上进行通信。信号既然被湮没在噪声里,敌方就很不容易发现有信号存在。而想进一步检测出信号参数就更困难了。因此,扩频信号具有很低的被截获概率。这在军事通信上十分有用,可以进行隐蔽通信。再者,由于扩频信号具有很低的功率谱密度,它对目前使用的各种窄带通信系统的干扰就很小。近年来在民用通信上,各国都在研究和试验在原有窄带通信的频带内同时进行扩频通信,这可大大提高频带的利用率。特别是对于一些新的通信服务,如个人通信服务,采用扩频码分多址方式时,理论和实验证明,不需要分配另外的频段,即可实现,因而引起了广泛的重视。

(3) 可以实现码分多址

扩频通信提高了抗干扰性能,但付出了占用频带宽的代价。如果让许多用户共用这一宽频带,则可大为提高频带的利用率。由于在扩频通信中存在扩频码序列的扩频调制,充分利用各种不同码型的扩频码序列之间优良的自相关特性和互相关特性,在接收端利用相关检测技术进行解扩,则在分配给不同用户不同码型的情况下可以区分不同用户的信号,提取出有用信号。其原理将在以后详加介绍。这样一来,在一宽频带上许多对用户可以同时通话而互不干扰。它与利用频带分割或时间分割的方法实现多址通信的概念类似,即利用不同的码型进行分割,所以称为码分多址。这种码分多址方式,虽然要占用较宽的频带,但平均到每个用户占用的频带来计算,其频带利用率是很高的。最近的研究表明,在数字蜂窝移动通信中,采用扩频码分多址技术,