

# 跳码/跳频混合扩频系统设计及性能分析

袁帅 朱立东

电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室

**摘 要:** 跳码扩频是利用跳频的原理,对直接序列扩频的一种扩展,兼具了跳频技术以及直接序列扩频技术的部分优点,并且可以有效应用于现有的常规扩频通信系统之中。目前军事通信中为了提高信息传输的隐蔽性,常采用多种扩频方式混合的扩频技术,提高信息传输的抗干扰及抗截获性能。本文设计了一款跳码/跳频混合扩频的系统,通过仿真性能分析,跳码/跳频的混合扩频系统具有不错的抗干扰抗截获性能,在今后的反侦察通信方面将会有很大的应用前景。

**关键词:** 跳码扩频, 跳频扩频, 隐蔽性, 混合扩频

## Design and Performance Analysis of Code-hopping/Frequency-hopping Hybrid Spread Spectrum System

Yuan Shuai, Zhu Lidong

National Key Laboratory of Science and Technology on Communication of UESTC

**ABSTRACT:** Code hopping spread spectrum is an extension of direct sequence spread spectrum based on the principle of frequency hopping. It has some advantages of frequency hopping technology and direct sequence spread spectrum technology, and can be effectively applied to existing conventional spread spectrum communication systems. At present, in order to improve the concealment of information transmission in military communications, the spread spectrum technology with mixed spread spectrum modes is often used to improve the anti-jamming and anti-interception performance of information transmission. In this paper, a code hopping/frequency hopping hybrid spread spectrum system is designed. Through the analysis of simulation performance, the code hopping/frequency hopping hybrid spread spectrum system has good anti-jamming and anti-interception performance. It will have great application prospects in anti-reconnaissance communication in the future.

**Key words:** code hopping spread spectrum, frequency hopping spread spectrum, concealment, hybrid spread spectrum

## 0 引言

在如今电子通信技术高速发展的背景下,军事通信中的信息隐蔽传输成了不可忽略的重要研究问题。将来的战场,电子通信必定占主导作用,制信息权将会成为制海权与制空权之后又一个双方必争的新的制高点。其中,通信技术作为重要的一部分,面临严峻的电磁干扰及侦收威胁,能否具有良好的抗干扰抗截获性能,将对战争的胜利起重要作用。

扩频技术是目前军事通信中一种广泛应用的抗干扰技术手段,常用的扩频方式主要有直接序列扩频,跳频扩频以及跳时扩频。三种扩频方式有着各自的优点和缺陷。直接序列扩频是将信号

与扩频序列相乘,展宽信号频谱,使信号功率谱密度低于噪声,从而达到信号隐蔽传输的目的。同时这种方式可以进行多址通信,有效地抗多径衰落,但远近特性不够好<sup>[1]</sup>。跳频扩频是随机改变载波的频率,使信号通过不同的载频进行传输,如果接收方不知道载频跳变的规律,则无法解跳,从而达到抗截获的目的。跳频扩频具有非常优良的抗截获特性,容易组网并且有较高的频谱利用率<sup>[2]</sup>,但是抵抗宽频带干扰的能力不强。跳时扩频是按一定的规律给信号动态分配时隙,由伪随机码控制在哪个时隙发送信号,同样接收方如果不能获知信号的时隙跳变规律,就无法对信号进行解析。跳时扩频在时分复用系统中应用较多,但在抑制干扰方面的能力有限<sup>[3]</sup>。为了更好地实现信号的隐蔽传输,常将以上几种扩频方式进行组合,充分发挥各自的优点,弥补不同扩频方式之间的不足。

直扩/跳频的混合扩频方式,不仅大大提高抗干扰能力,同时还具有抗衰落(尤其是选择性衰落)、多网工作、兼容性强、能够有效利用连续波段等优势。李国靖、秦国领等人<sup>[4]</sup>针对在航天测控这种复杂的电磁环境下,以直扩/跳频这种混合扩频方式为研究对象,提出了一种基于灰色关联法的抗干扰系统模型,并且通过仿真分析了该模型在抗干扰方面的可行性。韩明<sup>[5]</sup>在GPS抗干扰技术的基础上,结合直扩/跳频混合扩频技术,并将其运用到卫星导航系统抗干扰方案中,通过误码率分析,发现其抗干扰容限比GPS系统有很大提升。宋培培<sup>[6]</sup>将直扩/跳时混合扩频方案运用到现有导航系统中,并进行了仿真分析,发现该方法在抗干扰性能方面比传统导航系统有很大提升。

目前混合扩频的应用非常广泛,优势也非常明显,但是直接序列扩频依旧存在码序列简单,周期性明显这样的缺点。本文在前人研究的混合扩频的基础上,针对直接序列扩频易被侦查的缺陷,提出跳码/跳频的混合扩频技术。

跳码扩频是直接序列扩频的一种延伸技术,保留了直扩通信系统功率谱密度低、抗干扰能力强的同时,在所有直扩码序列中以随机跳变的方式,选择一定数量的伪码序列按跳码图案的顺序进行级联组合<sup>[7]</sup>,合成一组长的伪码序列。这实际上是借用了跳频扩频的思想,通过不同的码序列组合,改变码速率、码类型以及码长等,克服了简单扩频序列周期性较为明显的缺点,进一步提高通信系统的抗截获和隐蔽性能。

## 1 跳码扩频原理

跳码扩频体制是在传统直扩的基础上,在发送端引入了跳码控制器,使扩频序列不再简单唯一,而是随时间在跳变,这就在一定程度上,避免了直扩码序列的周期性,进一步提升了系统的隐蔽性,而相对非合作方而言,在不知道跳码图案的前提下,想要截获有用信息也变得非常困难。跳码直扩系统的信号特征如下图1所示。

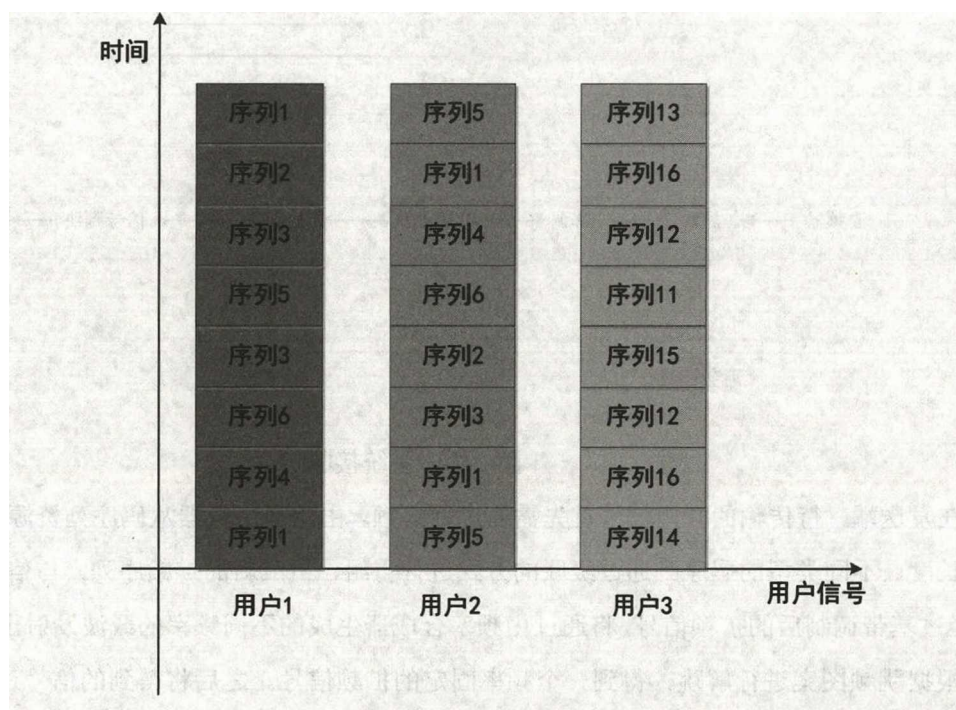


图 1 跳码特征图

跳码系统可以根据随机参数控制跳码序列，改变信号扩频时的扩频码。如上图所示，不同用户可以采用相同的扩频序列进行跳码，也可以采用不同的扩频码进行区分。跳码系统在保留了直接序

## 2 系统方案设计

目前在隐蔽通信技术中，为了保证我方信息的安全性，混合扩频方式的运用较为普遍，但主要集中在直扩/跳频的混合，直扩/跳时或者跳时/跳频的混合，此次系统设计，将采用跳码/跳频技术的结合，取长补短，充分利用直接序列扩频以及跳频扩频的优势，提高系统的抗干扰性能。同时采用跳码扩频技术，只有知道扩频信号中的跳码图案才能完成解扩，大大增加了敌方破解信息的难度。同时，在卫星通信系统中，信息的传送一般用 BPSK、QPSK、8PSK 等载波相位调制方式，本文采用最简单的 BPSK 调制方式对卫星数据传输进行仿真分析。系统的整体设计如下图 2 所示。

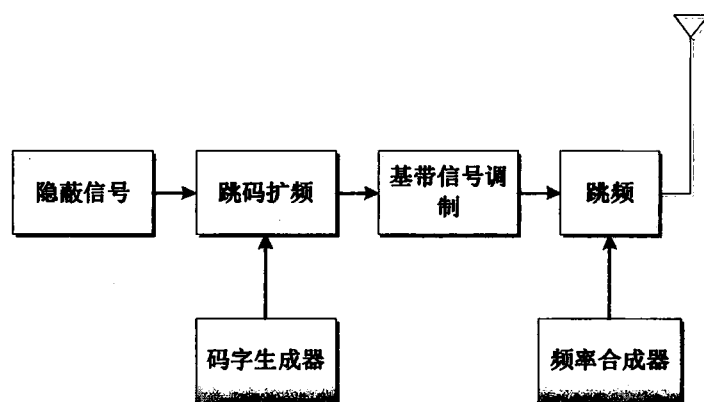


图 2(a) 系统发射端

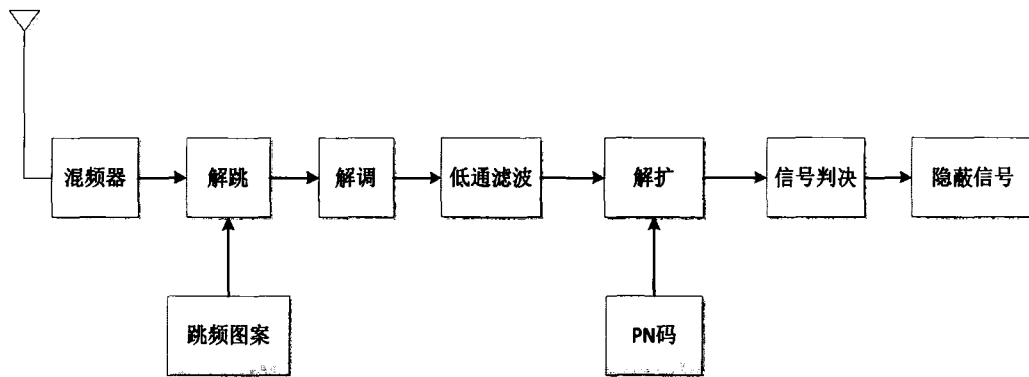


图 2(b) 系统接收端

在发送端，待传输的有用信号首先需要进行扩频。由码字生成器从码序列资源池中选出不同序列长度、不同类型的码序列通过级联的方式进行重组，组成新的扩频序列，与信号进行扩频运算。经过基带调制后的扩频信号，将通过由频率合成器生成的不同频率的载波发射出去。接收端，首先根据跳频图案进行解跳，得到一个频率固定的扩频信号。之后将得到的信号进行解调处理。解调后的信号可能会带有少量载波频率，所以需要进行低通滤波，滤除高频分量。滤波之后的信号根据跳码图案，进行解扩处理，再通过信号判决，即可恢复出原始信息。

从理论上讲，扩频处理增益越大，系统固有的抗干扰能力就越强。假设该跳码系统中有  $M$  个码字，则得到一个固定码字的跳码处理增益即为  $G_c = M$ ，用分贝表示则为  $G_c = \lg M \text{ (dB)}$ 。设直扩码长为  $L$ ，则不论是何种直扩方式，直扩处理增益即为  $G_d = L$ ，用分贝表示则为  $G_d = \lg L \text{ (dB)}$ 。由于跳码扩频兼具了直扩与跳频，所以处理增益为  $G = G_c + G_d$ 。由于该系统又引入了跳频扩频，假设频率表中的可用频率个数为  $N$ ，则跳频处理增益为  $G_f = N$ ，用分贝表示则为  $G_f = \lg N \text{ (dB)}$ 。跳码/跳频通信系统的处理增益是直扩处理增益、跳码处理增益、跳频处理增益之和，则该系统的处理增益可以表示为

$$\lg G = \lg M + \lg L + \lg N \text{ (dB)} \quad (1)$$

由此可见，跳码/跳频通信系统的抗相关干扰性能要优于直扩/跳频混合扩频通信系统。

### 3 仿真分析

根据上述原理，利用 matlab 软件对系统进行仿真，并对得到的仿真结果进行分析。为了让跳码序列有不同码长、码型等，根据跳码图案从码序列资源池中分别抽取不同长度的  $m$  序列和 gold 序列进行级联组合，获得新的扩频序列。部分  $m$  序列的反馈参数以及本原多项式如下表所示。

表 1 部分 m 序列反馈参数及本原多项式

阶数 n	周期 P	反馈系数 $C_i$ (采用八进制)	本原多项式
3	7	13	$x^3+x+1$
4	15	23	$x^4+x+1$
5	31	45, 67, 75	$x^5+x^2+1, x^5+x^2+1, x^5+x^4+x^2+x+1$
6	63	103, 147, 155	$x^6+x+1, x^6+x^5+x^2+x+1,$ $x^6+x^5+x^3+x^2+1$
7	127	203, 211, 217, 235, 277, 313, 325, 345, 367	$x^7+x+1, x^7+x^3+1, x^7+x^3+x^2+x+1$ $x^7+x^4+x^3+x^2+1, x^7+x^6+x^3+x+1,$ $x^7+x^5+x^4+x^3+x^2+x+1,$ $x^7+x^6+x^4+x^2+1, x^7+x^6+x^5+x^2+1,$ $x^7+x^6+x^5+x^4+x^2+x+1$
8	255	435, 453, 537, 543, 545, 551, 703, 747	$x^8+x^4+x^3+x^2+1, x^8+x^5+x^3+x+1,$ $x^8+x^6+x^4+x^3+x^2+x+1,$ $x^8+x^6+x^5+x+1, x^8+x^6+x^5+x^2+1,$ $x^8+x^6+x^5+x^3+1, x^8+x^7+x^6+x+1,$ $x^8+x^7+x^6+x^5+x^2+x+1$
...	...	...	...

m 序列虽然性能优良，但是他们之间的互相关函数值不太理想。同时为了保证扩频码序列的多样性，在码序列资源池中放入 Gold 序列。Gold 序列的生成，是从上面已有的 m 序列中抽取两组周期相同，但码字不同的 m 序列优选对模 2 加后获得的。

跳码图案的生成受一组伪随机序列控制，仿真中获得跳码序列的阶数为 19，其自相关函数如图 3 所示。

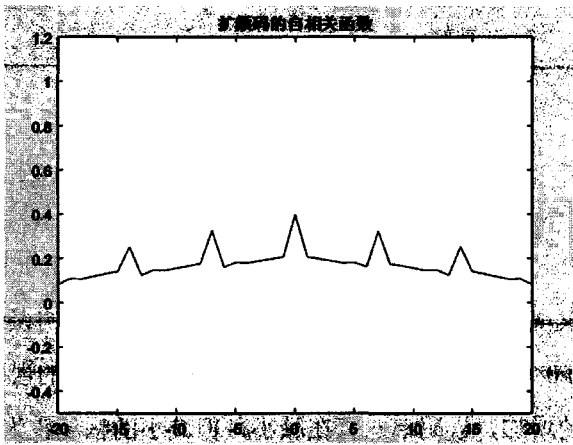


图 3 扩频码自相关函数

扩频码序列虽然是不同伪码序列的级联组合，但是从上图可以看出，自相关函数值比较尖锐，说明其仍然保留了 PN 序列的优势，具有较为良好的自相关特性。

本系统中采用了 10 个可变频点, 分别为 5kHz, 5.5kHz, 6kHz, 6.5kHz, 7kHz, 7.5kHz, 8kHz, 8.5kHz, 9kHz, 9.5kHz, 通过一组伪随机序列控制跳频图案, 让传输信号在不同频点上进行跳变, 结合上文提到的跳码图案, 得到的跳码/跳频后的信号频谱如下图 4 所示。

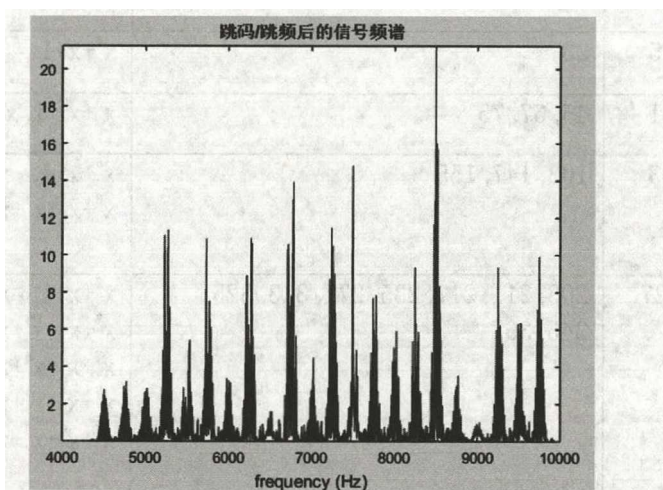


图 4 经跳码/跳频后的信号频谱

由图可知, 经过跳频扩频之后, 信号的中心频率基本在设定好的可变频率点上跳变。并且我们可以看出, 信号的频谱被明显展宽, 而展宽的倍数则取决于扩频码序列的长度。

同时, 系统的抗干扰性能是我们最关注的问题。所以, 通过仿真不同信噪比下的误码率值, 可以判断出系统的抗干扰能力。下图分别是跳码/跳频以及直扩/跳频, 在不同信噪比下的误码率值。

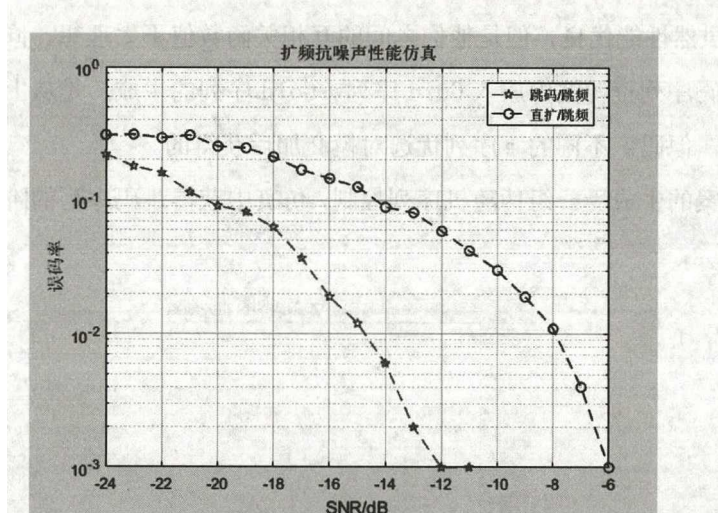


图 5 跳码/跳频及直扩/跳频系统抗干扰性能

通过上图我们发现, 随着信噪比的增加, 跳码/跳频系统的误码率一直在降低。当信噪比为 -11dB 时, 误码率为 0.001, 随着信噪比增加, 跳码/跳频系统的误码率趋近于 0; 反观直扩/跳频系统, 随着信噪比的增加, 误码率一直在减小, 但减小的幅度较为缓慢, 当信噪比约为 -6dB 时, 误码率为 0.001, 随信噪比的增加, 误码率趋近于 0。从误码率曲线我们可以看出, 在相同的信噪比下, 跳码/跳频系统的误码率都要优于直扩/跳频系统的误码率。因此今后在扩频通信系统中, 可以多考虑跳码扩频这一种扩频方式。

## 4 结论

本文设计了一种跳码/跳频结合的扩频方式,通过研究发现,跳码扩频不仅可以在常规的直接序列扩频的基础上降低传输信噪比,降低传输误码率,同时与普通的直扩性能相比,具有更低的误码率,抗干扰性能更为良好,有效提高了扩频系统的传输可靠性。同时,跳码/跳频混合扩频的设计并不复杂,相信这种方式今后会在军事通信中有越来越广泛的应用。

## 参考文献

- [1]陈青松,胡晓飞. 无线通信抗干扰技术性能[J]. 通信技术, 2018.
- [2]杨明,陈静. 超短波跳频通信抗跟踪式干扰性能分析[J]. 无线电工程, 2014, 12(3):32-34.
- [3]纪国强,潘枫春,黄冬,杨爱霞. 扩频技术浅谈[J]. 电信快报, 2005, 4:43-46.
- [4]李国靖,周赤,秦国领. 混合扩频测控系统抗干扰效能评估与优化选择[J]. 现代防御技术, 2018, 46(1):19-26.
- [5]韩明. 基于 DS/FH 混合扩频的卫星导航系统抗干扰技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2009.
- [6]宋培培. 基于混合扩频的导航卫星抗干扰技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010.
- [7]高文奇. 跳码扩频捕获技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010.