

文章编号:1001-893X(2011)05-0023-05

扩频测控系统的抗干扰能力分析*

张 旭,吴 潜

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:扩频测控系统抗不同形式干扰的性能有较大差异,就此进行了重点研究。通过理论分析和仿真比较了扩频系统对多种干扰信号的抗干扰机理和抗干扰容限,并给出了具有抗干扰能力的扩频接收机的设计思路与建议。研究结果可为扩频系统的设计和抗干扰试验提供参考。

关键词:扩频测控;处理增益;抗干扰能力

中图分类号:TN927 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2011.05.005

Analysis of Anti-jamming Capacity for Direct Spread Spectrum TT&C Systems

ZHANG Xu, WU Qian

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: The anti-jamming performance of direct sequence spread spectrum(DSSS) TT&C system is different under different interferences. The differences are discussed. The anti-jamming principle and capacity of TT&C systems under different interferences is compared through theoretical analysis and simulation, and on this base, the suggestion of designing a spread spectrum TT&C receiver with anti-jamming ability is given. The study result provides reference for spread spectrum TT&C system design and anti-jamming testing.

Key words: spread spectrum TT&C; processing gain; anti-jamming capacity

1 引 言

随着国际形势的发展,航天测控系统在高覆盖率、多目标同时测控、信息安全、防摧毁能力、高抗干扰能力等方面有着新的需求。扩频测控技术因其优越的隐蔽性能、良好的抗干扰性能以及抗衰落^[1,2]等特点,得到了迅速发展。

测控通信系统中干扰的形式是多种的,有单频干扰、窄带干扰、宽带干扰以及白噪声干扰等。在不同的干扰下,扩频系统的抗干扰能力是不同的。研究扩频系统抗干扰能力可用于指导测控系统抗干扰试验,为其提供理论方法与相关测试数据基准,为测

控抗干扰试验系统的改进提供依据。针对扩频系统的抗干扰性能,很多文献都进行了分析,主要集中在对比系统对各类干扰的处理增益^[3,4]或系统面对各类干扰的误码性能^[5,6]。本文基于直接序列扩频系统,侧重分析抗各种干扰的原理及抗干扰能力,对扩频系统和非扩频系统对抗各种干扰的性能进行全面比较,给出了具有抗干扰能力的扩频接收机系统设计思路,最后通过建模仿真验证了理论分析结果。

2 扩频系统抗干扰原理分析与设计建议

在直接序列扩频中,抗干扰的基本原理是在发射端用伪码对信息数据进行扩频调制,在接收端对

* 收稿日期:2011-02-25;修回日期:2011-04-26

基金项目:“十一五”装备预先研究项目(51324070103)

Foundation Item: The Equipment Pre-research Project of The 11th Five-year Plan(No.51324070103)

接收的有用信号用同步伪码进行解扩,此时干扰信号则被扩频。下面以 BPSK 直扩系统为例,分别针对单频干扰、窄带干扰和宽带干扰等进行具体分析。

2.1 单频干扰和窄带干扰

扩频系统对单频干扰和窄带干扰的抗干扰原理相同。经解扩后,被扩频的有用信号与扩频码序列相乘恢复为窄带信号,干扰信号的频谱被扩展,通过窄带滤波器后,滤掉干扰信号的大部分能量,提高了解扩后的信噪比,从而达到抗干扰的目的。

以同频干扰信号为例进行分析。设 $s(t)$ 为解扩系统收到的信号形式^[7]:

$$s(t) = \sqrt{2P}d(t)PN(t)\cos\omega_0t + \sqrt{2P'}\cos(\omega_0t + \theta) \tag{1}$$

式中, $\sqrt{2P}d(t)PN(t)\cos\omega_0t$ 表示经发端 PN 扩展后的调制信号, $\sqrt{2P'}\cos(\omega_0t + \theta)$ 表示干扰信号, P 和 P' 分别表示调制信号和干扰信号的功率。

在收端经解扩后,信号形式为

$$s(t) = \sqrt{2P}d(t)\cos\omega_0t + \sqrt{2P'}\cos(\omega_0t + \theta)PN(t) \tag{2}$$

可以看出,有用的调制信号被恢复成窄带信号,而单频干扰信号则被 PN 码扩展。

2.2 宽带伪随机序列干扰

本文提到的宽带干扰主要指带宽大于等于扩频信号带宽的干扰信号。通常为为使干扰能量集中,宽带干扰信号的带宽等于扩频信号的带宽。

对于伪随机序列的宽带干扰,当伪随机序列与扩频系统伪码时钟同步且码率成整倍数关系时,干扰信号经过解扩系统后,频谱将不会被扩展,相应地,干扰信号功率谱密度不会下降。这时,扩频系统对宽带干扰信号没有更好的抑制作用。当伪随机序列与扩频系统伪码时钟异步时,干扰信号与扩频系统伪码相乘后,频谱会被扩展,其功率谱密度将降低,从而有效抑制了干扰。

在伪随机序列宽带干扰中较为特殊的是相关伪码扩频干扰,指进入接收机的干扰信号与有用信号中心频率相同,具有相同的扩频码型,且两者精确同步。该信号经过解扩系统后,与系统伪码相乘,恢复为窄带信号,干扰功率可完全进入,直扩系统对其处理增益为 0。但采用此种干扰形式需要完全掌握对方扩频系统所使用的扩频码,且需做到完全同步,这是非常困难的。

2.3 白噪声干扰

白噪声干扰属于另一种宽带干扰。当干扰在整个频带均匀分布时,即带宽无限宽,成为白噪声干扰。实际上,理想白噪声是不存在的。当噪声带宽大于或等于接收机带宽时,此宽带噪声即可看作白噪声。图 1 所示为相同白噪声干扰条件下,扩频系统和非扩频系统的比较。白噪声信号与扩频序列不相关,进入解扩系统以后,其频谱不会被扩展,解扩前后干扰信号的功率谱密度不发生改变,经过接收机滤波以后,通过的干扰信号功率是相同的。因此,扩频系统与非扩频系统相比对于抗白噪声干扰没有改善。但在干扰功率一定的条件下,白噪声干扰的功率谱密度更低,比窄带干扰或单频干扰的干扰效果差。

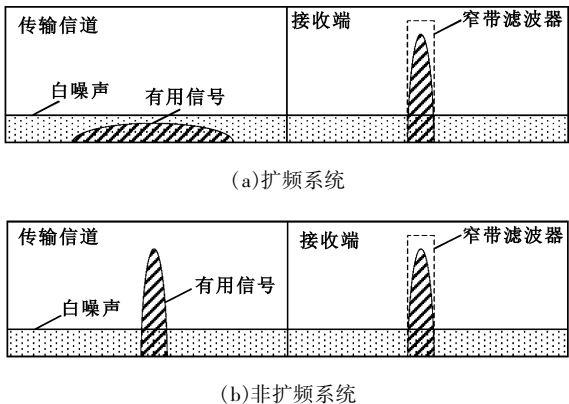


图 1 白噪声干扰下扩频系统和非扩频系统比较
Fig.1 Comparison between DS system and non-DS system under white noise interference

2.4 扩频抗干扰接收机设计建议

在扩频测控中,接收机接收的信号通常具有较大的多普勒,要求接收机在一定多普勒范围内完成扩频码和载波的捕获,进而解调出信息。从上述扩频系统对多种干扰信号的抗干扰机理分析可以看出,扩频系统对干扰信号具有抗干扰能力的前提是建立在扩频接收机首先完成对接收信号的“二次扩频”基础上,“二次扩频”指的是对有用信号的解扩,对干扰信号的扩频。

目前扩频接收机的设计在捕获方式上主要可以分为两类。一类是,首先在时间域和频域同时进行的二维搜索过程完成扩频码捕获和多普勒的估计,再完成载波的同步和信号的解调。另一类是,直接对接收信号平方,去掉扩频码和调制信息,然后 FFT 测频完成多普勒估计,最后在载波同步的基础上辅助完成扩频码的同步,这种思路可以简化接收机的

设计,提高捕获时间,但是从本质上讲在信号的捕获过程中没有对干扰信号扩频,没有最大限度地利用扩频码降低干扰信号功率谱密度的功能。因此,要在扩频接收机中有效实现抗干扰的能力,建议采用第一类捕获方式。

3 扩频系统抗干扰性能比较

抗干扰容限表示系统在某一干扰条件下能够正常工作的能力,以干扰功率与信号功率的比值表示^[3,4,8,9]:

$$M_j = G_p - \alpha - S_0/N_0 \tag{5}$$

式中, α 为系统损耗; S_0/N_0 为要求的接收机信噪比,可根据相应误码率对信噪比的要求来确定; G_p 为处理增益^[6,10]。

在现有文献中,给出的处理增益通常都只与干扰信号的带宽相关,而实际上,同样带宽的干扰信号产生的干扰效果并不完全相同。下面详细分析各类干扰的处理增益。

3.1 单频干扰

单频干扰通过滤波器输出的有效干扰功率与滤波器带宽 B_m 有关。设有用信号功率为 P , 干扰功率为 P' , 扩频系统扩频带宽为 B_s , 经过接收机滤波后的有效干扰功率为 $(P'/B_s) B_m$, 有用信号功率不发生改变仍为 P , 因此其增益应为

$$\begin{aligned} G_p &= 10 \lg \left(\frac{(S/N)_{out}}{(S/N)_{in}} \right) = \\ &10 \lg \left(\frac{P}{(P'/B_s) B_m} \right) - 10 \lg \left(\frac{P}{P'} \right) = \\ &10 \lg \left(\frac{B_s}{B_m} \right) = 10 \lg n = M \end{aligned} \tag{6}$$

式中, $n = B_s/B_m$ 表示干扰信号被扩展的倍数,反映了干扰功率降低的情况。

以同样的干扰对非扩频系统进行干扰, 干扰功率完全进入, 处理增益为 0。

3.2 窄带干扰

窄带干扰经解扩后其频谱被扩展, 扩展后的带宽有两种情况。文献^[3,6]描述, 窄带干扰频谱扩展后的带宽为 $(B_s + B_j)$ 。此时, 处理增益为

$$\begin{aligned} G_p &= 10 \lg \left(\frac{(S/N)_{out}}{(S/N)_{in}} \right) = \\ &10 \lg \left(\frac{B_s + B_j}{B_m} \right) = 10 \lg (n + m) > M \end{aligned} \tag{7}$$

式中, $m = \frac{B_j}{B_m}$ 是干扰带宽与信号带宽之比, B_j 是干扰

信号带宽。

式(7)描述仅为其中一种情况。本文补充描述的另一种情况是, 当窄带干扰是伪随机序列调制信号, 而其伪码时钟与扩频系统伪码时钟同步且码率为整数倍关系时, 干扰频谱扩展后带宽为 B_s 。此时, 处理增益由式(6)给出。

以同样的窄带干扰对非扩频系统进行干扰, 有效干扰功率为 $(P'/B_j) B_m$ 。若 B_j 小于 B_m , 则干扰功率全部进入; 若 B_j 大于 B_m , 则干扰功率进入一部分。

3.3 宽带干扰

在文献^[3,6,8]中, 宽带干扰的处理增益被描述为 $G_p = M + 3$, 这也是通常文献所说的扩频系统中采用宽带干扰会比单频干扰多出一倍的功率代价。本文将宽带干扰的处理增益分以下几种情况分别讨论。

宽带伪随机序列干扰信号的伪随机序列与扩频系统伪码时钟同步且码率为整数倍关系时, 干扰频谱不会被扩展, 保持为 B_j , 经滤波后, 有效干扰功率为 $(P'/B_j) B_m$ 。因此, 处理增益为

$$G_p = 10 \lg \left(\frac{(S/N)_{out}}{(S/N)_{in}} \right) = 10 \lg \left(\frac{B_j}{B_m} \right) \tag{8}$$

当干扰带宽等于 B_s 时, $G_p = M$ 。

大多数时候干扰信号伪随机序列与扩频系统伪码时钟不同步, 干扰频谱将被扩展, 扩频后带宽为 $(B_s + B_j)$, 经过接收机滤波后的有效干扰功率为 $(P'/(B_j + B_s)) B_m$, 其增益为

$$G_p = 10 \lg \left(\frac{(S/N)_{out}}{(S/N)_{in}} \right) = 10 \lg \left(\frac{B_s + B_j}{B_m} \right) \tag{9}$$

当干扰带宽等于 B_s 时, $G_p = M + 3$ 。

对于宽带白噪声干扰, 干扰频谱不被扩展, 其处理增益同式(8)。

以同样的宽带干扰对非扩频系统进行干扰, 能够通过的有效干扰功率为 $(P'/B_j) B_m$, 处理增益与扩频系统相同。

由上述分析, 无论是扩频系统还是非扩频系统, 宽带干扰的有效干扰功率都较单频干扰和窄带干扰低, 其干扰效果更差。而伪随机序列与系统 PN 码相同且同步的宽带调制信号, 其干扰效果非常优越, 被称为最佳干扰形式^[3], 但对于敌意干扰, 要想准确获知系统 PN 码是非常困难的。

文献^[5]指出, 由于扩频系统相对非扩频系统来说, 抗窄带干扰或单频干扰的性能更好, 而抗宽带干扰则无优越性, 因此要对扩频系统实施干扰, 采用宽带干扰比采用单频干扰或窄带干扰更好。但实际上, 在同样功率的干扰下, 宽带干扰即使频谱不能被

PN 码扩展,其功率谱密度比窄带干扰或单频干扰经过 PN 码扩展后的功率谱密度也更低,进入滤波器的有效干扰功率仍是小于窄带干扰或单频干扰的。因此,并不能说明宽带干扰比窄带干扰或单频干扰的效果更佳。文献[11]的结论也说明了这点。

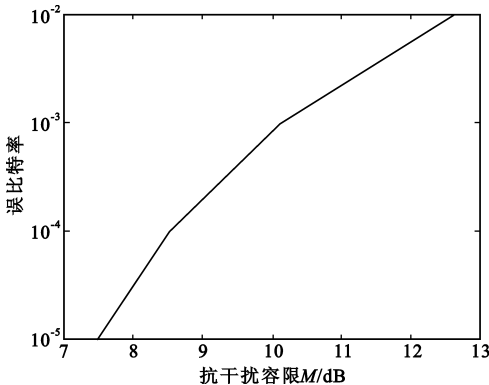
4 抗干扰性能仿真

下面分别针对单频干扰、伪码调制信号干扰(包括窄带和宽带)和白噪声干扰进行仿真。

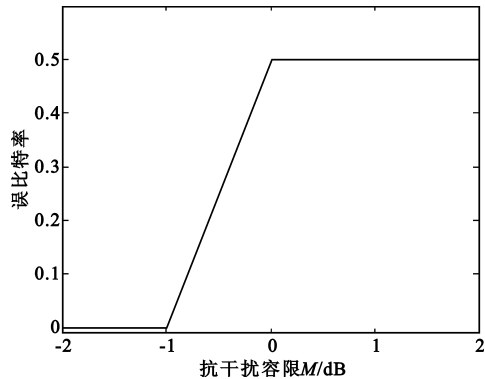
4.1 单频干扰

在扩频系统中加入与中心频率同频、同相的单载波干扰,测试不同干信比下系统的误码性能。将系统损耗为 0 时算出的理论抗干扰容限 M_j 与仿真实测干信比 J/S 相比较,结果如图 2(a)所示。仿真结果进一步验证了对扩频系统抗单频干扰性能的理论分析。

在非扩频系统中,加入上述单频干扰信号。针对不同的干扰功率与信号功率比,测试系统解调后的误码情况,仿真结果如图 2(b)所示。



(a)扩频系统



(b)非扩频系统

图 2 单频干扰对扩频系统及非扩频系统的影响
Fig.2 The influence of single carrier interference on DS and non - DS systems

4.2 伪码调制信号干扰

窄带伪码调制信号干扰与宽带伪码调制信号干扰类似,下面以两种带宽(100 Hz, 10 kHz)的伪码调制信号干扰为例进行仿真。使干扰的伪码时钟与扩频系统码钟不同步。仿真结果如图 3 所示,从图中可以看出,扩频系统抗 10 kHz 干扰信号的能力较抗 100 Hz 干扰信号能力略强。

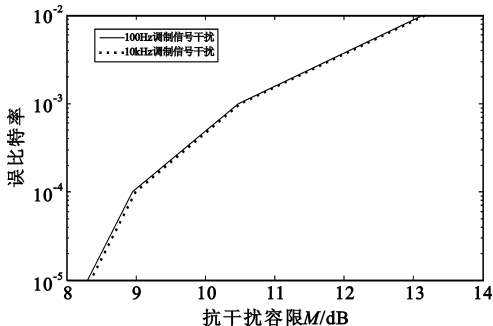
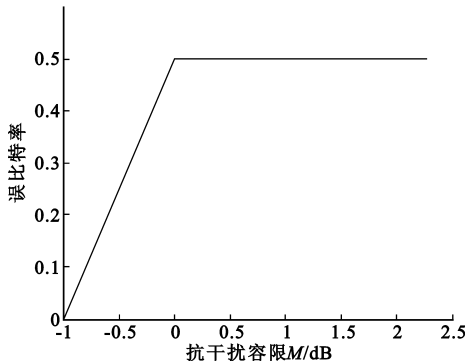
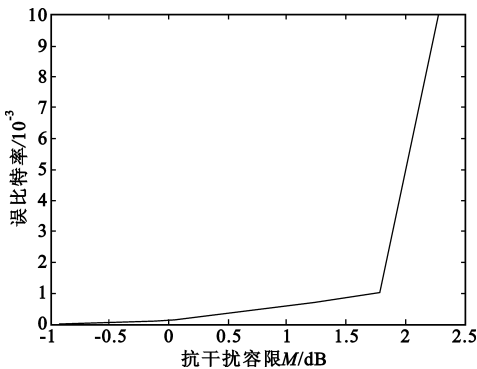


图 3 扩频系统抗伪码调制信号干扰性能
Fig.3 The influence of PN code modulation signal interference on DS system

在非扩频系统中,采用伪码调制信号进行干扰,其性能如图 4 所示。



(a)干扰信号带宽 100 Hz



(b)干扰信号带宽 10 kHz

图 4 伪码调制信号干扰下非扩频系统性能
Fig 4 The influence of PN code modulation signal interference on non - DS system

从图 4 可以看出,干扰带宽小于窄带滤波器带宽 B_m 时,干扰信号功率完全进入,此时当干扰功率大于等于信号功率即会产生误码;干扰带宽大于 B_m 时,干扰信号功率只有一部分进入,其误码性能比前者好。

4.3 白噪声干扰

仿真中,白噪声带宽为 1 MHz。分别在扩频系统和非扩频系统中加入该白噪声干扰,仿真实测结果如图 5 所示。可以看出,对于扩频系统和非扩频系统,受到相同的白噪声干扰,系统误码性能相同。

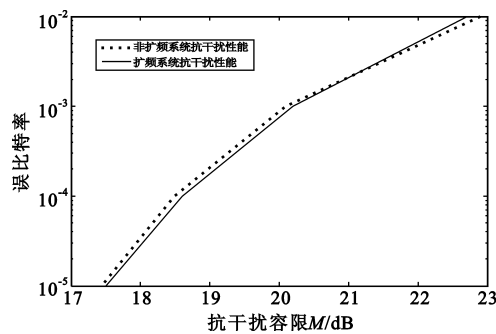


图 5 白噪声干扰下扩频与非扩频系统性能
Fig.5 The influence of white noise interference on DS and non-DS systems

5 结束语

本文针对扩频系统抗干扰机理以及不同形式干扰信号对扩频系统干扰效果和相应的抗干扰容限进行了详尽研究。研究发现与非扩频系统相比,扩频系统对单频干扰的抑制最好,相干伪码干扰信号会极大地干扰扩频系统,对非扩频系统的影响则较小。在扩频测控系统抗干扰接收机的设计中,建议先进行码捕获,再完成载波同步和信号解调。本文的研究结果对于指导扩频测控系统抗干扰实验的开展具有积极意义。

参考文献:

[1] Reza Nikjah, Norman C Beaulieu. Anti-jamming Capacity and Performance Analysis of Multiple Access Spread Spectrum Systems in AWGN and Fading Environments[C]//Proceedings of IEEE ICC 2006. Istanbul, Turkey: ICC Executive Committee, 2006:5153-5159.

[2] BRANIMIR R VOJCIC, RAYMOND L PICKHOLTZ. Performance of Direct Sequence Spread Spectrum in a Fading Dispersive Channel with Jamming[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1989,7(4):561-568.

[3] 朱永松,张海勇.直接序列扩频通信及其军事应用研究[J].舰船科学技术,2005,27(6):79-84.

ZHU Yong-song, ZHANG Hai-yong. Research on the Direct Sequence Spread Spectrum and Its Applications in the military[J]. Ship Science and Technology, 2005, 27(6): 79

-84. (in Chinese)

[4] 吴明捷,谢祖荣,徐丽洁.扩频系统抗干扰性能分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2001(6),20(3):317-320.

WU Ming-jie, XIE Zu-rong, XU Li-jie. Performance Analysis of Interference Immunity of Spread-spectrum System. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2001, 20(3): 317-320. (in Chinese)

[5] 刘杰,李艳斌.直扩通信最佳干扰形式分析[J].无线电通信技术,2001,27(6):27-29.

LIU Jie, LI Yan-bin. Analysis of Best Interference for Direct Spread Spectrum Communication[J]. Radio Communication Technology, 2001, 27(6): 27-29. (in Chinese)

[6] 宋石磊,于振海,赵国庆.直扩通信干扰技术与比较[J].中国电子科学研究院学报,2006,1(5):415-417,421.

SONG Shi-lei, YU Zhen-hai, ZHAO Guo-qing. The analysis and comparison of interference methods of direct sequence spread spectrum system[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2006, 1(5): 415-417, 421. (in Chinese)

[7] 尚晓琥,胡修林,杨灵.直接序列扩展频谱通信系统仿真[J].系统工程与电子技术,2003,25(2):154-159.

SONG Xiao-hu, HU Xiu-lin, YANG Ling. Direct Sequence Spread Spectrum Communication System Simulation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(2): 154-159. (in Chinese)

[8] 张昀. BPSK 直扩通信系统抗干扰余量分析[J].电讯技术, 2009, 49(2): 47-50.

ZHANG Yun. Analysis of Anti-Jamming Margin for DS-BPSK Communication System[J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(2): 47-50. (in Chinese)

[9] 向春林,胡修林.扩频通信的抗干扰能力及其改进[J].舰船电子工程,2004,24(2):59-68.

XIANG Chun-lin, HU Xiu-lin. Capability and Improvement of Anti-Interference in Spread-Spectrum Communication System[J]. Ship Electronic Engineering, 2004, 24(2): 59-68. (in Chinese)

[10] 孙鹏勇.直接序列扩频通信系统处理增益的分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2000(4),19(2):159-161.

SUN Peng-yong. Analysis of processing Gain of Direct-Sequence Spread Spectrum System[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2000, 19(2): 159-161. (in Chinese)

[11] 郝建明.宽带噪声干扰源对直接序列扩频通信的干扰效果分析[J].遥测遥控,2005,26(2):19-27.

HAO Jian-ming. The Analysis of Effect for Wide-Band Noise to Jam DS-SS System[J]. Telemetry and Telecommand, 2005, 26(2): 19-27. (in Chinese)

作者简介:

张旭(1983—),女,四川双流人,2008年获硕士学位,现为助理工程师,主要研究方向为飞行器测控与卫星应用;

ZHANG Xu was born in Shuangliu, Sichuan Province, in 1983. She received the M.S. degree in 2008. She is now an assistant engineer. Her research concerns aircraft TT&C and satellite application.

Email: xuzhang_z@gmail.com

吴潜(1969—),男,湖北监利人,研究员,主要研究方向为飞行器测控、通信系统总体、系统仿真技术等。

WU Qian was born in Jianli, Hubei Province, in 1969. He is now a senior engineer of professor. His research concerns aircraft TT&C, communication system design, system simulation technology.