

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.11.003

天基数据链抗干扰问题研究*

赵国艳^{1,2,**}, 周 林³

(1. 西北工业大学, 西安 710072; 2. 解放军 91550 部队 91 分队, 辽宁 大连 116023;
3. 中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

摘要:针对天基数据链的应用需求,对天基数据链的抗干扰特性进行了研究,分析了增强天基数据链系统抗干扰能力涉及的主要技术手段,提出了用户终端在设备研制中应采取的措施,并在应用方式上提出了一些建议,对于抗干扰天基数据链系统及设备的研制具有一定的参考价值。

关键词:中继卫星;天基数据链;用户终端;抗干扰

中图分类号:TN97 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)11-1412-05

Study on Anti-Jamming Issues of Space-based Data Link

ZHAO Guo-yan^{1,2}, ZHOU Lin³

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Unit 91subunit, Unit 91550 of PLA, Dalian 116023, China;
3. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: This paper addresses the anti-jamming characteristics of space-based data link with respect to its application requirements. The main technical means for strengthening anti-jamming ability of space-based data link system are describe. Then anti-jamming measures that user terminals should take during system development are proposed, and some advices on application methods are also suggested, which is of reference value for developing space-based anti-jamming data link system and equipment.

Key words: data relay satellite; space-based data link; user terminal; anti-jamming

1 引言

高效的武器数据链系统在现代战争中起到的作用越来越明显,确保信息链路的安全,是现代信息化战争取得胜利的重要保证。

随着导弹武器作战范围的扩大,采用天基方式进行数据链路的建立是一种理想的方式,具有高覆盖率、通信容量大等许多优点,但其容易受到敌方的截获和干扰,也是不容忽视的问题,如何确保系统的抗干扰能力是设计天基数据链系统的关键^[1-3]。

美国等发达国家的预警卫星、侦察卫星等卫星应用系统,均把系统的抗干扰能力作为主要性能之一,典型应用如美国的 Aerospace,采用了高速率自

适应天线、天线旁瓣对消、扩频调制、切断干扰者反馈等途径提高系统的抗干扰能力;美国的高抗干扰军事卫星系统 Milstar,采用小型 EHF 频段有源调零天线、自适应波束形成技术、分时共用技术以及跳频等技术,实现了良好的抗干扰、抗截获性能。

本文对天基数据链系统抗干扰涉及的主要问题进行了探讨,针对典型应用对抗干扰能力进行了简单分析。

2 导弹武器天基数据链系统的构成

基于天基系统的数据链系统示意图 1 所示。

* 收稿日期:2013-05-28;修回日期:2013-10-28 Received date:2013-05-28;Revised date:2013-10-28

** 通讯作者:lovezgy@163.com Corresponding author:lovezgy@163.com

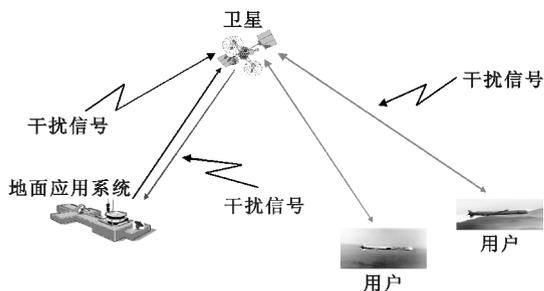


图 1 天基数据链系统的构成

Fig. 1 Architecture of space-based data link system

天基数据链由用户终端、卫星平台和地面系统三部分组成。

(1) 用户终端

用户终端安装在导弹等武器平台上,接收中继卫星转发的信号,实现前向信号的接收解调,并把解调数据送给平台,实现遥控等控制功能;同时,接收平台送来的反向遥测等数据,通过调制、变频和放大后通过天线发送给中继卫星,实现反向数据传输。根据平台和需求的不同,其功能和性能要求也有较大的差别。

(2) 卫星平台

卫星平台可为中继卫星,如性能要求不高时,也可使用通信卫星。

(3) 地面系统

地面系统由地面接收站、指挥控制机构等部分组成,实现遥控命令的发送,以及对反向数据的接收、分析、判断,根据监测情况进行相应处理等功能。

从数据链系统组成上可以看出,受干扰的环节主要包括卫星转发器、前向链路及反向链路三部分。

干扰信号包括来自地面和空中的干扰,地面干扰以大功率干扰站为主,一般功率较大,常用来干扰卫星的转发器,转发器阻塞造成无法正常进行通信;而空中的干扰以飞机、卫星等为平台,干扰距离短,干扰功率较大,可以对上下行链路进行干扰,具有很强的干扰效果,对数据链系统具有较大的破坏作用。

3 抗干扰问题考虑

3.1 工作频段的选用

在卫星转发器支持的情况下,应尽量选用较高频率的工作频段,对提高系统的抗干扰能力具有较大的好处。一方面工作频率越高相同的天线口径时,其波束相对较窄,干扰信号进入波束内的功率较小;另一方面随着工作频段的提高,大功率干扰信号

产生相对较难,增加了敌人干扰的难度。

根据天线波束计算公式 $\theta = \eta \frac{\lambda}{D}$ 可知,波束宽度与波长成正比,Ka 频段的波束宽度只有 S 频段的 10% 左右,此时干扰信号一般是通过天线的旁瓣进入,将大大减小进入接收系统干扰信号的功率,尤其当采用超低旁瓣天线时,改善的效果尤为明显。

目前,中继卫星和许多通信卫星系统均提供 S、Ka 等频段服务,从提高抗干扰性能上考虑,选用 Ka 频段更具优势。

3.2 猝发通信

在要求高抗干扰的数据链系统中,可以考虑采用猝发通信方式,即无线信号只在特定的时间片进行发射,发射时间极短,其余时间处于静默状态,由于猝发通信具有随机性和短暂性,能有效避开敌人的侦察和干扰,发射时采用功率较高的脉冲功率,势必增加干扰的难度。

3.3 扩频等体制的应用

扩频体制是提高抗干扰能力常用的技术手段,其本质是将信号的频谱展宽,扩频信号的频谱越宽,在解扩时落入有用信号带内的干扰功率越小,抗干扰能力也就越强。

对于一个扩频体制的数据链系统,当存在干扰时,系统的输出信噪比可表示为^[4]

$$\frac{C}{R_b(N_0 + N_j)} = \frac{C}{(N_0 + J/W)R_b} \quad (1)$$

式中, C 为信号功率, N_0 为单边噪声谱密度, J 为干扰信号总功率, W 为扩频带宽, R_b 为信息速率。当实际信噪比等于解调门限时,并考虑损耗后可得系统的抗干扰容限为

$$M_j = \frac{W}{R_b} \left[\frac{1}{(E_b/N_0)_{\text{threshold}}} - \frac{C}{(E_b/N_0)} \right] - L_s \quad (2)$$

式中, $(E_b/N_0)_{\text{threshold}}$ 为达到一定性能所需的解调门限信噪比, (E_b/N_0) 为实际信噪比, L_s 为系统处理损失。

由上可知,改善抗干扰性能涉及的环节主要包括增加系统有用信号的信噪比、提高系统处理增益以及降低解调门限等。天基数据链系统的链路余量较小,因此通过增加信噪比提高抗干扰的能力比较有限;处理增益的提高可采用扩跳结合、高的码钟频率等方式;而降低解调门限主要依靠高性能的信道编译码,可采用 Turbo、LDPC 等高效信道编码、结合交织等技术,以获得更高的编码增益。另外,降低解调损失、选用自相关性能优良、周期较长的扩频序列

也可提高系统的抗干扰能力。

3.4 设备实现因素

设备本身的实现也对抗干扰能力起着至关重要的作用,主要体现在以下3个方面。

(1) 终端天线

自适应调零天线是对抗压制式干扰的有效手段,目前应用比较广泛,当发现输入信号存在干扰时,通过自适应算法控制天线波束的形成,在干扰信号的方向获得较深的零点,减小进入接收机干扰信号的功率。

(2) 射频信道

设备信道的设计主要是确保较大的动态范围、防止电路出现饱和及信号阻塞等^[5],具体可包括加强滤波、Smart AGC^[6]、抗脉冲干扰抑制等技术手段。

(3) 信号处理

由于采用了扩频体制,输入信噪比较低,如果电路中仍采取传统的信号总能量检测方式进行增益的控制,可能造成在不同的输入信号电平状态下有用信号电平的大范围变化甚至饱和,同时还会造成噪声功率在有用信号限幅状态下的进一步放大,造成在动态范围内的输出信噪比的变化,导致设备抗干扰能力的下降,因此需进行相干 AGC 的应用,即通过环路提取输入信号的强度,实施相干 AGC 控制,实现信号放大的相干控制,同时保持有用信号始终处于线性状态,使 A/D 的性能达到最佳。

同时,在天基数据链系统中,由于信号较弱,接收时采用相干解调的方式,伪码、载波等信号的捕获跟踪是设备工作的基础,在对有用信号进行解扩的同时,对干扰信号等效为扩频处理,因此比较敏感的环节是低通滤波器及环路带宽的设计,需对工作参数进行优化设计,在保持数据通过的情况下应减小低通滤波器和环路滤波器的带宽,尽可能地降低干扰信号进入后端的解调器,避免造成传输性能的降低。

4 典型应用及性能估计

实际应用中,前向链路的抗干扰性能尤为重要,下面针对典型应用,在用户终端设备层面,对天基数据链前向链路的抗干扰性能进行分析和评估。

假设数据链系统卫星至用户终端的主要技术体制如下:工作频段为 Ka 频段,调制方式为 BPSK,传输速率为 10 kb/s,天线形式为调零天线;信道编码 RS+卷积级联;扩频方式为直接序列扩频,扩频码速率 3 Mchip/s;接收信噪比 $E_b/N_0 = 10.0$ dB;解调性

能为 1×10^{-6} 。

(1) 自适应调零天线

自适应调零天线主要由天线阵元、自适应信号处理器以及调整加权网络等组成,通过自适应算法在干扰方向形成深的零点。采用的自适应算法比较多,有 MUSIC、PI 等多种算法,一般能够带来 30 ~ 40 dB 的抗干扰能力,是提高系统抗干扰能力的主要手段之一。

(2) 设备因素

在设备实现上,采用扩频体制和 FFT 干扰抑制技术^[7],通过仿真对抗干扰性能进行验证,仿真原理如图 2 所示。

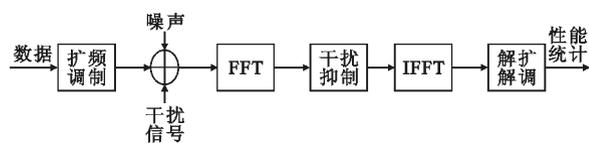


图 2 抗干扰性能仿真原理

Fig. 2 Simulation principle of anti-jamming

首先考虑没有干扰信号存在和有干扰信号存在时的性能,仿真性能曲线分别如图 3 和图 4 所示。

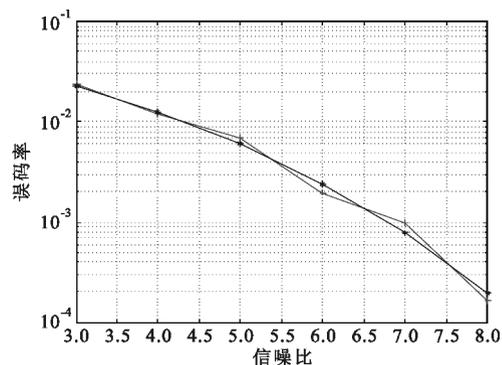


图 3 没有干扰信号时的误比特性能曲线

Fig. 3 BER performance curves without interference signal

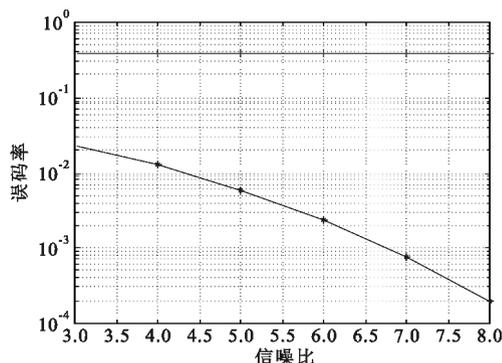


图 4 有干扰信号时的误比特性能曲线 ($J/S=40$ dB)

Fig. 4 BER performance curves with interference signal ($J/S=40$ dB)

从图 3 可以看出,在没有干扰信号时,通过解调后的性能曲线与理论非常吻合。由图 4 可知:存在干扰信号时,不采用抗干扰措施,其性能下降非常快。

在有干扰信号存在时,通过干扰抑制算法对干扰信号进行抑制,提高设备的抗干扰能力,干扰抑制采用 N-Sigma 自适应门限判决算法^[8],其门限设置为 $\mu + M\sigma$,其中 M 为加权系数, μ 和 σ 由下述公式确定:

$$\mu = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{(10\lg(|X(k)|))}{N} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{1}{N} \left[\sum_{k=0}^{N-1} (10\lg(|X(k)|))^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{k=0}^{N-1} (10\lg(|X(k)|)) \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中, $X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)\omega(n)e^{-\frac{j2\pi kn}{N}}$ 为输入信号的 FFT 变换, $x(n)$ 为包括干扰信号在内的输入信号, $\omega(n)$ 为窗函数系数, N 为 FFT 运算的点数。

FFT 运算点数选为 4 096 点,干扰信号带宽为有用信号带宽的 20%,由低通滤波器进行模拟,经过 MATLAB 仿真,其干扰抑制效果如图 5 所示。

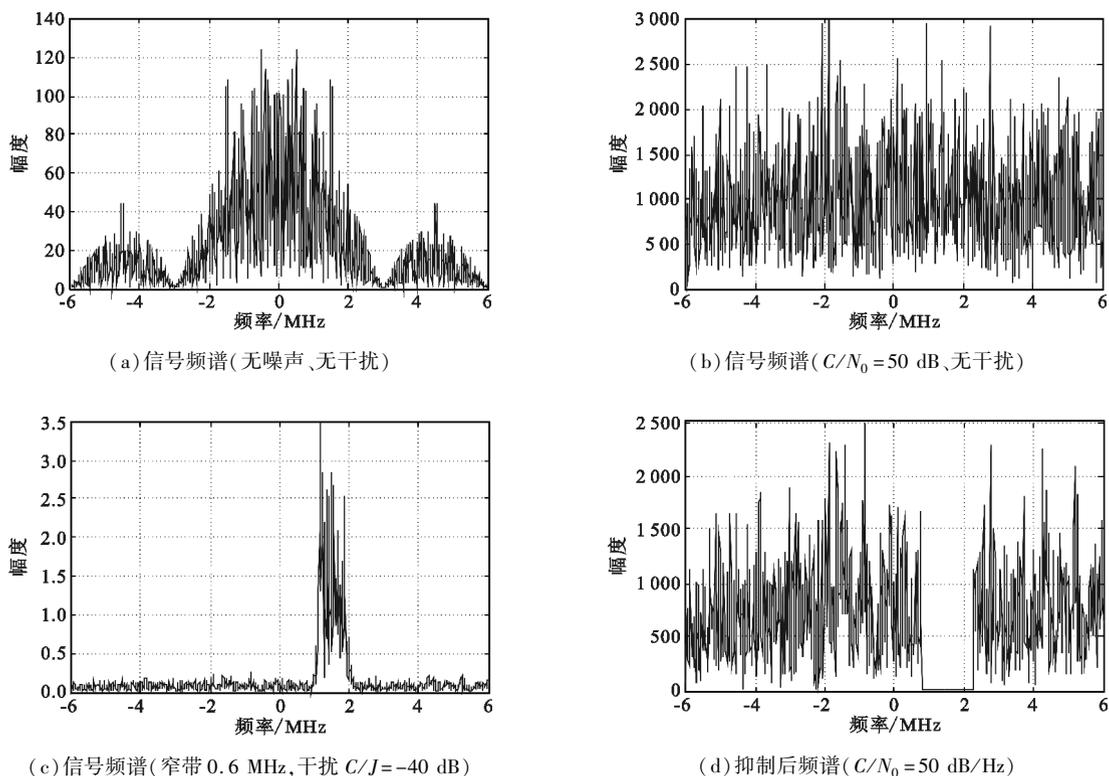


图 5 窄带干扰抑制效果图

Fig. 5 Effect of narrow-band interference suppression

从图 5 可以看出,通过抑制算法,有效地去除了窄带干扰信号,但由于有用信号也被去除了一部分,造成了信噪比的损失,当 J/S 为 20 dB、30 dB、40 dB、50 dB 时,其信噪比损失情况如表 1 所示。

表 1 窄带干扰抑制下的信噪比损失

Table 1 SNR loss under the condition of narrow-band interference suppression

(J/S)/dB	信噪比损失/dB
20	-0.32
30	-0.49
40	-0.59
50	-0.64

由上述分析可知,抗干扰算法能对 50 dB 以上的窄带干扰信号进行有效抑制,结合扩频设备具有较强的抗干扰能力,受 A/D 动态等因素的影响,设备自身的抗干扰能力一般可做到 40 ~ 50 dB 以上,加上天线对干扰的抑制,前向链路的抗窄带干扰容限可达 80 dB 以上。

5 其他抗干扰策略

在实际工程中,也可从应用上采取一些抗干扰策略。

(1) 变速率应用

扩频增益与信息速率密切相关,当系统遭到干扰引起性能大幅降低时,可以按照预定的协议自适应降低信息速率,提高扩频增益,此时只对关键数据进行传输,当系统性能恢复后,则提高传输速率,保证系统在受干扰的情况下,实现基本的数据传输功能。

(2) 采用多天线工作方式

在要求有很高抗干扰的能力时,可以采用安装多副天线的形式,在天线的安装上选择合适的角度,分别对应不同的卫星工作,干扰信号以及接收天线都具有一定的方向性,不会同时对两个天线都造成强的干扰,只要设计合理,可以确保当一个受到干扰时,另一个仍维持正常的工作。

(3) 切换工作频率

通过地面对系统性能的监测,当发现系统性能下降时,可以通过前向的控制指令等方式切换系统的工作频率,避开干扰信号。

(4) 组合应用

与通信卫星系统、地基系统等进行兼容设计,相互作为备份,当出现干扰时,可以在不同系统之间进行切换,避免系统受干扰而出现无法工作的情况。

6 结束语

抗干扰设计是天基数据链系统设计需重点考虑的技术问题之一,本文结合工程实际,对提高抗干扰的技术途径进行了简单分析,说明通过多种抗干扰措施的综合应用,可以实现导弹武器天基数据链系统对抗干扰性能的需求,对实际设计有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 雷厉. 空间信息系统安全与防护技术[J]. 电讯技术, 2003, 43(1): 1-5.
LEI Li. Security and Protection Technology of Space Information System [J]. Telecommunication Engineering, 2003, 43(1): 1-5. (in Chinese)
- [2] 梁文权, 冯书兴. 航天测控对抗在未来战争中的应用[J]. 电讯技术, 2005, 45(2): 23-25.
LIANG Wen-quan, FENG Shu-xing. Application of Confrontation Based Aerospace Measurement and Control in Future Wars[J]. Telecommunication Engineering, 2005,

45(2): 23-25. (in Chinese)

- [3] 张芹, 南建设. 测控链路干扰防护措施[J]. 电讯技术, 2005, 45(5): 11-13.
ZHANG Qin, NAN Jian-she. Anti-jamming Measures for TT&C Links [J]. Telecommunication Engineering, 2005, 45(5): 11-13. (in Chinese)
- [4] Peterson R L, Ziemer R E, Borth D E. 扩频通信导论[M]. 沈丽丽, 侯永宏, 马兰, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006.
Peterson R L, Ziemer R E, Borth D E. Introduction to Spread Spectrum Communications [M]. Translated by SHEN Li-li, HOU Yong-hong, MA Lan, et al. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. (in Chinese)
- [5] Kaplan E D. GPS 原理与应用[M]. 邱致和, 王万义, 译. 北京: 电子工业出版社, 2001.
Kaplan E D. GPS Principle and Application [M]. Translated by QIU Zhi-he, WANG Wan-yi. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001. (in Chinese)
- [6] 张邦宁, 魏安全, 郭道省, 等. 通信抗干扰技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
ZHANG Bang-ning, WEI An-quan, GUO Dao-xing, et al. Communication Anti-jamming Technology [M]. Beijing: Machine Press, 2006. (in Chinese)
- [7] Dipietro R C. An FFT based technique for suppressing narrow-band interference in PN spread-spectrum communication systems [C] // Proceedings of 1989 International Conference on ASSP. Scotland: IEEE, 1989: 1360-1363.
- [8] Capozza P T. A Single-chip narrow band frequency-domain excisor for a Global Positioning System (GPS) receiver [J]. IEEE Journal of Solid State Circuits, 2000, 35(3): 401-411.

作者简介:



赵国艳(1965—),女,辽宁丹东人,高级工程师,主要从事航天遥、外测相关技术研究;

ZHAO Guo-yan was born in Dandong, Liaoning Province, in 1965. She is now a senior engineer. Her research concerns TT&C technology.

Email: lovezgy@163.com

周林(1971—),男,四川蓬安人,高级工程师,主要从事航天外测相关技术研究。

ZHOU Lin was born in Peng'an, Sichuan Province, in 1971. He is now a senior engineer. His research concerns TT&C technology.

Email: zlj_zty_2005@163.com