

文章编号:1007-5321(2017)03-0072-04

DOI:10.13190/j.jbupt.2017.03.010

双天线对消技术对宽带干扰的抑制性能

刘胤廷, 李秀萍, 高攸纲

(北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876)

摘要: 提出了一种应用在卫星导航系统中的干扰对消技术. 通过理论推导,详细分析了干扰对消系统对宽带干扰抑制能力的极限值,揭示了带宽延时积与干扰对消比的内在关系,量化了幅度误差和相位误差对宽带干扰对消比的恶化程度. 通过仿真和实验验证了理论分析的正确性. 实验验证了双天线对消系统可使卫星导航接收机的抗干扰能力提高 29 dB.

关键词: 宽带干扰对消; 干扰对消比; 带宽延时积

中图分类号: TN975

文献标志码: A

Suppression of Wideband Interference Through the Cancellation Technology of Dual Antennas

LIU Yin-ting, LI Xiu-ping, GAO You-gang

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: The application of the interference cancellation technology in satellite navigation system was presented. The limit value of the suppression ability of the interference cancellation system was analyzed. The interrelation between the bandwidth-delay product and the interference cancellation ratio was disclosed. The deterioration degree in the wideband interference cancellation ratio due to the amplitude error and phase error was quantified. Analysis was verified through simulation and experiment. It is verified that the dual antenna cancellation system can improve the interference suppression of the satellite navigation receiver by 29 dB.

Key words: wideband interference cancellation; interference cancellation ratio; bandwidth-delay product

我国自主研发的第二代北斗卫星导航系统已广泛应用于民用和军事领域. 由于卫星信号到达地面的信号强度相当微弱,在复杂电磁环境下很容易被其他的电磁信号干扰. 常用的抗干扰手段有基于时域滤波的卡尔曼滤波器和基于频域滤波的陷波器^[1]. 蒋云昊等^[2]通过实验验证了在时延失配情况下干扰对消系统的干扰对消比恶化规律,但未给出延时失配与干扰对消比恶化的内在联系.

笔者详细分析了基于二元天线阵的宽带干扰对消性能,推导得到带宽延时积和宽带干扰对消比的

理论联系,并研究了干扰对消中权值幅度估计误差和相位估计误差对宽带干扰对消比的影响. 通过仿真和实验,验证了对消理论的正确性和双天线对消系统对卫星导航接收机抗干扰能力的提升效果.

1 双天线对消系统

双天线对消技术属于空域滤波的一种. 空域滤波根据不同天线接收信号之间的相关性,调整每个天线接收信号的加权系数,在干扰来波方向实现零陷,实现抗干扰. 双天线对消技术适用于无法预

知干扰时域特征,且干扰所占频段与信号有用频段重合的情况。

双天线干扰对消系统实物图如图1所示。系统包含3个主要部分,分别为卫星接收天线、干扰接收天线和射频对消模块。卫星接收天线采用扼流圈天线,其方向图覆盖上半空域,用于接收导航卫星信号。干扰接收天线采用螺旋定向天线,其天线增益约为13 dBi。干扰接收天线指向干扰来向,用于接收干扰信号。射频对消模块实现卫星信号的放大滤波以及干扰信号的对消功能。



图1 双天线干扰对消系统实物图

双天线干扰对消系统框图如图2所示。干扰接收天线接收的干扰信号经过延时匹配、幅度加权和相位加权,与卫星接收天线接收的信号进行合成对消。通过调整延时匹配和幅度、相位加权重系数,实现干扰信号的相互抵消。

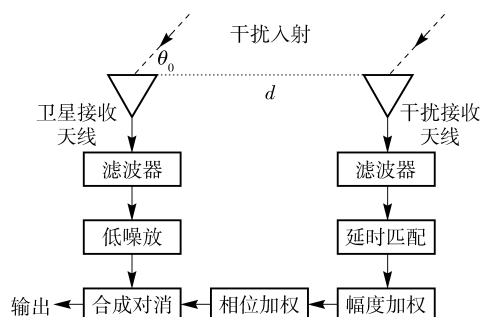


图2 双天线干扰对消系统框图

2 宽带干扰对消性能分析

2.1 延时匹配与干扰对消性能

设定卫星接收天线与定向天线的间距为 d , 干扰来向与天线连线夹角为 θ_0 。

两天线接收到的干扰信号延时差 τ_0 为

$$\tau_0 = \frac{d \cos \theta_0}{c} \quad (1)$$

其中 c 为光速。

假设干扰信号是带宽为 B_i 的均匀白噪声干扰 $J(f)$, 其功率谱密度为 P_J 。定向天线接收干扰信号进行幅度加权和相位加权, 权系数定义为 ω 。

两天线合成的信号^[3]可表达为

$$O(f) = J(f) [1 + A e^{j(2\pi f \tau + \varphi)} \omega] \quad (2)$$

其中: $A = D_i(\theta_0) - D_s(\theta_0) + A_{id}$, $D_s(\theta_0)$ 为卫星接收天线在 θ_0 方向增益, $D_i(\theta_0)$ 为干扰定向天线在 θ_0 方向增益, A_{id} 为定向接收通道与卫星接收通道的增益差; $\tau = \tau_0 + \tau_{id}$, τ_0 为两天线间距引入的接收干扰信号的延时差, τ_{id} 为接收通道的延时差; φ 为两接收通道的相位差。

合成信号的功率可表达为

$$P_{\text{res}} = \int_{-\infty}^{+\infty} P_J |1 + A e^{j(2\pi f \tau + \varphi)} \omega|^2 df \quad (3)$$

其中

$$P_J(f) = \begin{cases} P_J, & |f| < \frac{B_i}{2} \\ 0, & |f| > \frac{B_i}{2} \end{cases}$$

合成信号功率对干扰信号功率进行归一化处理, 得到干扰对消比:

$$\frac{P_{\text{res}}}{P_J B_i} = 1 + A^2 |\omega|^2 + A(\omega e^{j\varphi} + \omega^* e^{-j\varphi}) \text{sinc}(\pi B_i \tau) \quad (4)$$

其中 ω^* 为权系数 ω 的共轭。令 $\omega e^{j\varphi} = a + jb$, 则

$$P_R = \frac{P_{\text{res}}}{P_J B_i} = 1 + A^2(a^2 + b^2) + 2Aa \text{sinc}(\pi B_i \tau) \quad (5)$$

对 P_R 求一阶偏导和二阶偏导:

$$\begin{cases} \frac{\partial P_R}{\partial a} = 2A^2 a + 2A \text{sinc}(\pi B_i \tau) \\ \frac{\partial P_R}{\partial b} = 2A^2 b \end{cases}, \begin{cases} \frac{\partial^2 P_R}{\partial a^2} = 2A^2 \\ \frac{\partial^2 P_R}{\partial b^2} = 2A^2 \\ \frac{\partial^2 P_R}{\partial a \partial b} = 0 \end{cases}$$

故当

$$\omega = -\frac{1}{A} e^{-j\varphi} \text{sinc}(\pi B_i \tau) \quad (6)$$

可以推导得到

$$\frac{\partial P_R}{\partial a} = \frac{\partial P_R}{\partial b} = 0 \quad (7)$$

此时,残留干扰信号功率存在极小值:

$$P_{\text{opt}} = 1 - \text{sinc}^2(\pi B_i \tau) \quad (8)$$

由式(8)可知,双天线对消系统对宽带干扰的对消能力受到干扰带宽延时积的限制.

2.2 估计误差对干扰对消的影响

权系数估计误差会对干扰对消能力产生影响,下面分别分析幅度估计偏差和相位估计偏差与干扰对消比恶化的内在联系.

设幅度估计值为 A' ,且满足 $A = \alpha A'$,则加权的权值为

$$\omega = -\frac{1}{A'} e^{-j\varphi} \text{sinc}(\pi B_i \tau) \quad (9)$$

代入式(4),得到

$$\frac{P_{\text{res}}}{P_j B_i} = P_{\text{opt}} + (\alpha - 1)^2 \text{sinc}^2(\pi B_i \tau) \quad (10)$$

设相位估计值为 φ' ,且满足 $\Delta\varphi = \varphi - \varphi'$,则加权的权值为

$$\omega = -\frac{1}{A} e^{-j\varphi'} \text{sinc}(\pi B_i \tau) \quad (11)$$

代入式(4),得到

$$\frac{P_{\text{res}}}{P_j B_i} = P_{\text{opt}} + 2 \text{sinc}^2(\pi B_i \tau) (1 - \cos \Delta\varphi) \quad (12)$$

由式(10)和式(12)可知,幅度估计偏差和相位估计偏差会引入额外的残留干扰信号功率,导致干扰对消比的恶化.

3 仿真与实验结果

3.1 干扰对消实验

实验链路按照图3连接,Agilent公司信号源E4438C产生频率调制(FM, frequency modulation)信号作为干扰.干扰载波频率为1268 MHz;频偏以0.5 MHz为步进,从0.5 MHz逐步增加到10 MHz.干扰由功分器一分为二,一路直通,另一路经过衰减和延时失配到对消模块.对消模块输出信号至频谱仪,检测干扰对消的效果.

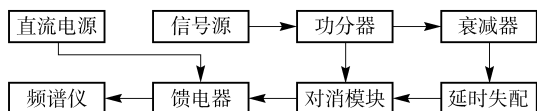


图3 干扰对消实验框图

通过矢量网络分析仪标定输入对消模块的两路信号通道延时失配情况.通过仿真和实测在不同延时失配情况下,对消模块对不同带宽干扰信号的抑制能力.测试数据如图4所示,横轴为干扰带宽,纵

轴为干扰对消比.图中延时失配分别为190、440、680和840 ps.对于同一带宽干扰信号,随着延时失配的加剧,干扰对消能力剧烈的下降.由图可知,对于10 MHz宽带干扰,延时失配190、440、680、840 ps,对应干扰对消比分别为39、33、28和26 dB.

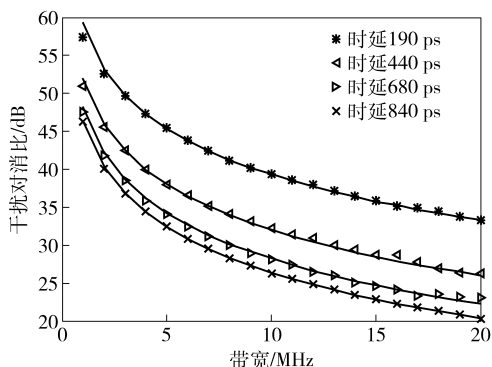


图4 干扰带宽与对消比曲线

调整权系数幅度和相位,使其分别产生幅度估计偏差和相位估计偏差.图5和图6分别给出了幅度失配和相位失配与干扰对消比的关系.由图示可知,实验数据和仿真曲线完全吻合.幅度估计偏差5%,会导致干扰对消比下降22 dB;相位估计偏差3°,会引起干扰对消比下降24 dB.

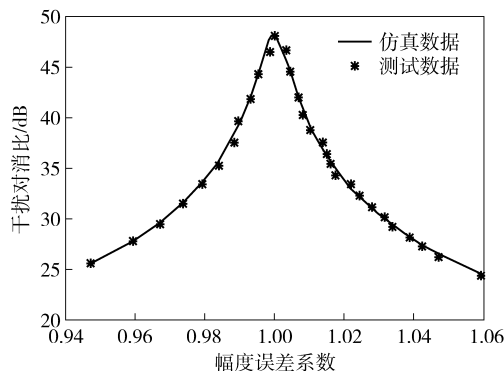


图5 幅度失配对干扰对消比的影响

因此,双天线干扰对消系统中天线要求具有足够的增益带宽和高精度的相位稳定性.扼流圈天线采用四馈点平衡馈电方式的微带结构和具有轴对称性的反射底板,具有高精度的相位中心和足够的增益带宽^[4].同时,螺旋天线具有结构轴对称特性和宽带谐振的特点^[5].两者能够满足双天线对消系统的天线需求.

3.2 导航接收机抗干扰实验

在存在带内干扰的开阔场环境中,测试双天线对消技术对卫星导航接收机抗干扰能力的提升效

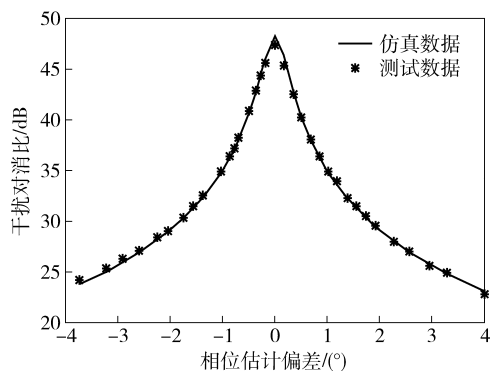


图 6 相位失配对于干扰对消比的影响

果。实验链路如图 1 和图 2 所示,干扰发射天线与扼流圈天线间距 3.5 m,两天线距地高度约 2 m。干扰接收天线接入一段同轴电缆用于补偿延时差异,约 5.5 ns。干扰发射天线与扼流圈天线之间空间衰减为 56 dB,与干扰接收天线衰减为 30 dB。信号源产生 FM 信号作为干扰。FM 信号载波频率为 1 268.52 MHz,频偏为 10 MHz,调制速率为 50 kHz。逐步增大干扰信号功率,观测卫星导航接收机解调卫星载噪比的变化。

测试数据如图 7 所示,横轴为干扰发射功率,纵轴为当前时刻某一同步卫星的载噪比;星点为干扰对消之前卫星载噪比,加点为干扰对消后卫星载噪比。卫星载噪比低于 30 dB 时,不能参与定位。对比图中曲线,干扰对消前干扰发射功率增强到 -42 dBm,干扰对消后干扰发射功率增强到 -13 dBm,卫星解调的载噪比过低。因此,双天线对消技术使

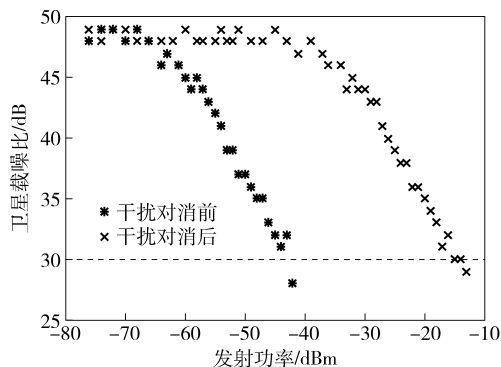


图 7 干扰对消前后卫星载噪比

得卫星导航接收机的抗干扰能力提升约 29 dB。

4 结束语

设计了一种双天线干扰对消系统,包含扼流圈卫星接收天线、轴向螺旋接收天线和射频对消模块。通过理论推导,详细分析了干扰对消系统对宽带干扰信号的抑制能力,揭示了带宽延时积和干扰对消比的内在联系;同时,详细分析了幅度估计误差和相位估计误差对于干扰对消比的恶化程度。通过仿真分析和实验测试,验证了干扰抑制能力推导的正确性,并验证了双天线对消系统提升了卫星导航接收机 29 dB 抗干扰能力。

参考文献:

- [1] 储昭碧,张崇巍,冯小英. 基于自适应陷波滤波器的频率和幅值估计[J]. 自动化学报, 2010, 36(1): 60-66.
 - [2] 蒋云昊,马伟明,赵治华,等. 自适应干扰对消系统中的时延匹配[J]. 电子学报, 2011, 39(8): 1927-1931.
 - [3] Jiang Yunhao, Ma Weiming, Zhao Zhihua, et al. Delay matching in adaptive interference cancellation system[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(8): 1927-1931.
 - [4] Francesca S S, Makarov S N. A low-multipath wideband GPS antenna with cutoff or non-cutoff corrugated ground plane[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(1): 33-45.
 - [5] 应志农,杨渊. 分段均匀螺旋天线的研究[J]. 北京邮电大学学报, 1987(1): 58-66.
- Ying Zhinong, Yang Yuan. Investigation on sectional-uniform helical antennas[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 1987(1): 58-66.