

双射频通道抗远近效应技术

韩天柱^{1,2}, 陆明泉¹

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100084;
2. 空军装备研究院通信导航与指挥自动化研究所, 北京 100085)

摘要: 卫星导航系统经伪卫星增强后区域性能得到较大提升,但在近场时,接收机会产生远近效应,这是码分多址体制伪卫星系统实现的难点。首先,介绍现有抗远近效应技术的特点,分析伪码互相关性在满足伪卫星工作区域需求上的不足,研究伪卫星与卫星的组合定位算法。然后,从空域的角度提出利用双射频通道加自适应调零天线来抗远近效应的技术,并搭建半实物仿真平台。最后,通过实验证明这种方法有效地提高了抗远近效应的能力,扩大了伪卫星增强系统的覆盖范围。

关键词: 远近效应; 双射频通道; 半实物仿真; 互相关余量; 自适应调零天线

中图分类号: TN 96

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2012.04.29

Double radio frequency channel-based near-far effect mitigation

HAN Tian-zhu^{1,2}, LU Ming-quan¹

(1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Communication, Navigation and Command Automation Institute,
Air Force Equipment Academy, Beijing 100085, China)

Abstract: The satellite navigation system achieves a higher regional performance when augmented with pseudolites but near-field receivers are faced with the near-far effect considered as a roadblock in implementing pseudolite system under code division multiple access (CDMA). Firstly the existing solutions to near-far effect mitigation and their features are introduced, the insufficiency of pseudo-code correlation in satisfying pseudolite working area requirements is analyzed, and the algorithm of pseudolite-satellite combination positioning is studied, then a technique of near-far effect mitigation by employing a receiver with double radio frequency channels and an adaptive nulling antenna is proposed from the viewpoint of airspace. Finally, through experiment on a hardware-in-the-loop simulation platform established therefor, the effectiveness of such solution in enhancing the capability of near-far effect mitigation and enlarging the coverage of pseudolite argumentation system is proved.

Keywords: near-far effect; double radio frequency channel; hardware-in-the-loop simulation; correlation margin; adaptive nulling antenna

0 引言

伪卫星增强技术可根据实际需要适当增加可见星数量,这在相当程度上改善了系统定位性能,提高了抗干扰能力^[1-4]。天空卫星与地面接收机的距离遥远且相对不变,所以收到的信号电平微弱而稳定,但伪卫星比卫星距离接收机近很多,接收机内部强的伪卫星信号会淹没弱的卫星信号,这样就产生了远近效应问题。如何抑制远近效应是伪卫星增强技术中尚待解决的难题之一^[4-5]。

伪卫星发射的信号功率决定了远近场边界的距离,但是远近距离比却不受伪卫星发射功率的影响,只取决于接收机

对互相关干扰的跟踪余量^[5]。为抑制远近效应以增大伪卫星的正常工作范围,需尽可能地提高伪卫星的远近距离比或互相关余量。基于这一目标,现有伪卫星增强技术的解决方案可主要分为时域、频域、码域、信号处理和特定条件等方法,各方法的特点可概括如表1所示,存在的主要缺点有:时域的脉冲调制采用饱和接收方式无法描述接收机硬件,会累积噪声,造成信噪比下降;频域的带外发射需额外的硬件调谐器,而频率偏移法受跟踪能力和多普勒频移的限制^[5-7];采用不同于天空卫星的新伪码则需增加新的相关器,容易受多普勒频移限制^[5],且算法实现复杂,不具有通用性^[8-9];信号处理领域的实现方法较多,有块处理、干扰抵消、子空间投

影、正交投影等由码分多址 (code division multiple access, CDMA) 系统中多用户检测演变过来的算法,但其设计和处理过程比较复杂^[10-16];一些特定条件下的方法存在使用受限等问题^[5]。而广泛应用在移动通信中的功率控制不适用于单向被动接收的导航系统^[17]。基于这些归纳,本文从空域的角度出发,结合实际应用环境,提出双射频通道的解决方法。与其他几种常见的方法相比,此方法采用现有卫星导航系统体系,不改变信号结构,且无需重构干扰,降低了算法的复杂程度,较显著地提高了互相关余量。

表 1 导航系统中远近效应解决方法

名称	领域	特点	缺点	互相关余量
脉冲调制	时域	低占空比脉冲发射伪卫星信号	饱和产生非线性使不能精确描述接收机硬件	可达到 90 dB 以上
带外发射	频域	卫星导航频段外发射伪卫星信号	需独立射频调谐器;算法复杂	当偏离 20 MHz 时,能产生 60 dB 的隔离
频率偏移	频域	在导航信号频谱零点处频率发射伪卫星信号	受跟踪能力和多普勒频移限制;效果不明显	当偏移 1.023 MHz 时平均为 33 dB
新扩频码	码域	选择与现有卫星伪码互相关最小扩频码	受多普勒频移限制;增加新带宽或新相关器	当选择 P 码为伪卫星码时可达 43 dB
信号处理	信号处理	干扰抵消、空间投影、正交投影等	处理过程复杂,延时较长	较高
轨迹控制	特定条件	用户轨迹保证在允许区域内	使用范围受限	由轨迹与近场的关系确定

1 伪卫星覆盖的问题描述

1.1 伪卫星功率覆盖区域划分

由电波传播理论可知,电波在自由空间的路径损耗与距离的平方成正比,如式(1)所示。

$$L_0 = 32.44 + 20 \lg d + 20 \lg f \quad (1)$$

不失一般性。在要求伪卫星信号覆盖不少于 40 km,近场边界即最小距离为 20 m 的情况下,最远距离和最小距离比为 2 000:1,功率差为

$$\Delta L = 20(\lg d_f - \lg d_n) = 66 \quad (2)$$

则 40 km 距离可设为远边界,伪卫星信号电平最小为 -130 dBm,20 m 的距离可设为近边界,信号电平为 -64 dBm。根据全球定位系统(global positioning system, GPS)卫星信号 C/A(coarse/acquisition)码互相关典型隔离度为 25 dB 计算,则在普通导航接收机情况下,距伪卫星 2.3 km 范围内,卫星信号不能被正常接收,与近边界的要求相比最大高出 41 dB 左右,其功率覆盖范围示意如图 1 所示。

根据上述分析可知,如果要求在区域 2 中正常接收卫星信号,所选用的接收机必须能够提供大于 41 dB 的互相关改善,再考虑实际存在的大气衰减等其他因素,要求接收机能提供至少 45 dB 的改善能力。

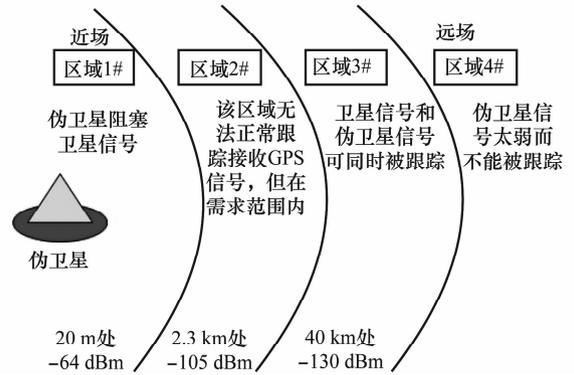


图 1 伪卫星功率区域划分

1.2 伪码互相关特性

在 CDMA 的伪卫星导航增强系统中,用户接收机生成伪卫星(卫星)所发射的伪随机噪声码(pseudo random noise, PRN),并移动这一复现码的相位使其与每颗被跟踪伪卫星(卫星)的 PRN 码发生相关。接收机要求在整个码周期内对任何相位和多普勒频移,自相关要大,所有互相关要尽量小。伪卫星与卫星的互相关为

$$R_{ij}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} PN_i(t) PN_j(t + \tau) dt \quad (3)$$

式中, $PN_i(t)$ 表示伪卫星的 PRN 码; $PN_j(t)$ 表示卫星的 PRN 码。理想情况下这个值应该取零,但实际上这是不可能的。因此为区分伪卫星和卫星,尤其在采用类似 GPS 的 C/A 码这种短周期低码率的 PRN 码时,它们的互相关值必须达到一定低的水平。表 2 为 C/A 码在不同多普勒频差情况下的互相关功率及其发生的累积概率^[18]。

表 2 不同频差情况下的互相关功率 dB

累积概率	互相关				
	1 kHz	2 kHz	3 kHz	4 kHz	5 kHz
0.001	-21.1	-21.1	-21.6	-21.1	-21.9
0.02	-24.2	-24.2	-24.2	-24.2	-24.2
0.1	-26.4	-26.4	-26.4	-26.4	-26.4
0.4	-30.4	-30.4	-30.4	-30.4	-30.4

由此可见,当仅凭借 GPS 的 C/A 码本身的互相关特性时,最恶劣的值为 21.1 dB,典型地可取 25 dB,这限制了伪卫星增强技术中伪卫星的工作覆盖范围,如图 1 所示,在区域 1 和区域 2 中接收机将无法工作。当这种伪码的区分能力不能满足伪卫星的工作覆盖需求时,就需要寻找能增强伪码区分能力的方法。

2 双射频通道远近抑制技术

2.1 组合定位算法

伪卫星与导航星组合定位算法基本思路是将各伪距信息融合到同一个方程组当中,进而联合求出导航解。在伪卫星增强系统中,伪卫星时和导航卫星系统时存在时间同步误差,增加一未知参数表征该项误差。共包括用户三维位置(x_u, y_u, z_u)、用户机与 GPS 系统时的钟差 t_{uG} 以及用户机与伪卫星系统时的钟差 t_{uP} 等 5 个未知数。

若对 n 颗 GPS 卫星和 m 颗伪卫星进行观测,则可以得到 $(n+m)$ 个观测方程。用户真位置(x_u, y_u, z_u, t_u)与近似

位置 $(\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u, \hat{t}_u)$ 之间的偏离可以用偏移量 $(\Delta x_u, \Delta y_u, \Delta z_u, \Delta t_u)$ 来表示。对卫星的伪距观测方程 ρ 进行泰勒级数展开(只取一阶偏导),并线性化后的矩阵形式^[18]为

$$\Delta \rho = H \Delta x \tag{4}$$

式中

$$\Delta \rho = \begin{bmatrix} \Delta \rho_1 \\ \vdots \\ \Delta \rho_n \\ \Delta \rho_{n+1} \\ \vdots \\ \Delta \rho_{n+m} \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} a_{x,1} & a_{y,1} & a_{z,1} & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{x,n} & a_{y,n} & a_{z,n} & 1 & 0 \\ a_{x,n+1} & a_{y,n+1} & a_{z,n+1} & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{x,n+m} & a_{y,n+m} & a_{z,n+m} & 0 & 1 \end{bmatrix}, \Delta x = \begin{bmatrix} \Delta x_u \\ \Delta y_u \\ \Delta z_u \\ -c\Delta t_{uG} \\ -c\Delta t_{uP} \end{bmatrix} \tag{5}$$

a 是方向余弦,则最小二乘解为

$$\Delta x = (H^T H)^{-1} H^T \Delta \rho \tag{6}$$

每次计算出的用户位置和钟差偏移量加到用户概略位置和钟差估计量中,得到修正后的用户位置和钟差,如此迭代,直到满足解算精度要求为止。

观察式(6),当观测不到伪卫星时,即 $m=0$,伪卫星不参加定位时,此时的组合定位算法就相当于在卫星导航系统单独定位时的算法。同理,当 $n=0$,观测不到卫星时,即不用卫星而只用伪卫星系统定位时,上述组合定位算法就会蜕变为伪卫星系统的定位算法。

2.2 双射频通道抗远近效应

为了提高互相关余量,本文从空域的角度出发,采用双射频通道结合自适应调零天线的方法来分离伪卫星信号对卫星信号的影响。为了说明和检验这种思想的抗远近能力,本着简单原则搭建如图 2 所示的伪卫星增强 GPS LIC/A 背景下的系统仿真平台。伪卫星模拟设备在 GPS 基准站的驯服下与天空卫星实现实时同步,同时模拟两颗类 GPS LIC/A 的伪卫星,分别采用 33 号和 34 号的保留伪码。虚线框为双射频通道的接收设备,采用两个独立的射频通道,分别连接普通天线和自适应调零天线,而共用基带处理部分。考察图 1 的伪卫星覆盖需求,当处在区域 2 中时,接收设备的射频通道 1 中,强的伪卫星信号会覆盖掉弱的卫星信号,而射频通道 2 中,自适应调零天线对高于 GPS 卫星信号电平的伪卫星信号当作干扰进行零陷处理。这样就可近似看作伪卫星信号和卫星信号经过独立的天线和射频通道进入接收机,基带接收处理分别获取伪距等原始观测量,进行卫星/伪卫星组合定位模式下的位置、速度和时间解算等处理。

当接收机位于伪卫星的近场时,伪卫星信号功率远大于卫星信号,由于自适应调零抗干扰天线的存在,伪卫星信号对卫星信号的干扰被大幅抑制,相应地,接收机的抗远近

效应能力得到提高。

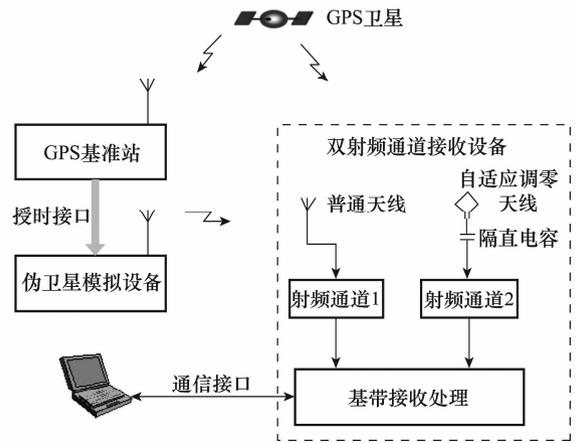


图 2 半实物仿真平台

3 仿真和性能分析

选择增益为 27 dB 的普通 GPS 天线和单方向抗窄带改善度为 40 dB 的自适应调零天线,按照图 2 所示的半实物仿真方案搭建测试平台。为了对比评估这种方法对系统远近效应的抑制能力,用普通天线替换抗干扰天线的模式定义为双射频通道普通天线接收模式,图 2 定义为双射频通道抗干扰天线接收模式,重复测试,比较两种模式下伪卫星信号功率最大调整值,两者之差即为改善能力。

3.1 双射频通道普通天线接收模式

先找到伪卫星信号干扰到接收机正常工作时的功率临界调整值 cv 约是-20 dB,干扰信号功率变化与测试时间的对应关系如表 3 所示。定位误差如图 3 所示。

表 3 普通天线模式伪卫星信号功率调整情况

时间段/min	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
功率调整/dB	$cv-10$	$cv-7$	$cv-3$	$cv-2$	$cv-1$

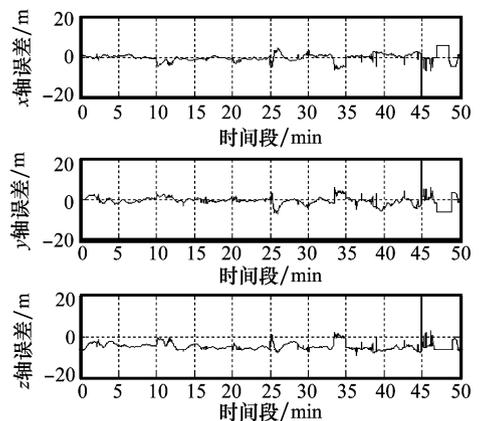


图 3 普通天线模式的定位误差

其中,第一时间段 GPS 卫星为 8 颗,伪卫星为 2 颗,位置精度衰减因子为 1.8,最后一段数据 GPS 卫星 2 颗,伪卫星 2 颗,此时接收机已经无法正常定位。由图可知,伪卫星信号率在临界功率附近(即第 5 段数据)时,出现定位误差较大及接收机无法正常定位的情况,因此可得双射频通道普通天线接收

模式下,伪卫星信号功率调整的上限值为 $cv-1 = -21$ dB。

3.2 双射频通道抗干扰天线接收模式

首先,通过实验找到伪卫星信号功率的临界调整值 cv 约为 26 dB,伪卫星信号功率变化与测试时间的对应关系如表 4 所示。定位误差如图 4 所示。

表 4 抗干扰天线模式伪卫星信号功率调整情况

时间段/min	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
功率调整/dB	$cv-10$	$cv-7$	$cv-3$	$cv-1$	cv

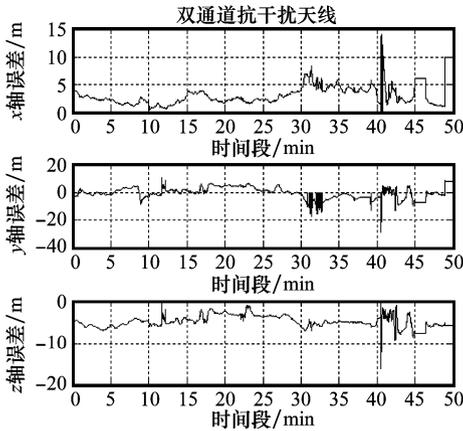


图 4 抗干扰天线模式的定位误差

其中,第一段数据 GPS 卫星为 7 颗,伪卫星为 2 颗,位置精度衰减因子为 2.6,最后一段数据 GPS 卫星 2 颗,伪卫星为 2 颗,此时接收机已经无法正常定位。由图可知,随着伪卫星信号功率的增强,定位误差逐渐增大。第 4 段数据中 Y 轴的定位误差有一小部分超出 10 m,但概率较小,第 5 段数据出现定位误差较大及接收机无法正常定位的情况。因此,双射频通道抗干扰天线干扰信号功率的上限为 $cv=26$ dB。

3.3 双射频通道抗远近效应性能

通过对双射频通道分别使用普通天线和抗干扰天线的定位性能进行比对统计,结果表明,这种双射频通道加自适应调零天线方案的抗远近效应能力比普通接收机性能好 47 dB,对远近效应有明显抑制。符合上述 40 km 远边界 20 m 近边界的需求。

4 结 论

本文针对伪卫星增强系统中的远近效应问题,分析普通伪码对伪卫星的工作覆盖需求的互相关余量不足的性质,研究了伪卫星和卫星组合定位算法,接着从空域角度提出一种双射频通道抗远近效应解决方案。仿真结果表明,与普通接收机相比,在该技术条件的半实物实现中,抗远近效应能力高出 47 dB 左右,有效地抑制了伪卫星增强技术中远近效应的影响,扩大了导航系统的覆盖区域。当然本方案存在需增加独立射频通道的缺点。所以,在实际应用中,需要结合具体环境选择相应的解决方案。如果单从抑制效果而言,也许可以尝试把时域、频域、码域或空域等组合起来的技术。

参考文献:

[1] Konner C, Pope R. Integration of space-based combat systems[J]. *Air & Space Power Journal*, 2006,20(3):5-9.

[2] Wang J, Tsujii T, Rizos C, et al. GPS and pseudo-satellites integration for precise positioning[J]. *Geomatics Research Australasia*, 2001, 74: 103-117.

[3] Masayoshi M, Stephen M R, Maria G B. Autonomous deployment of a self-calibrating pseudolite array for Mars rover navigation, position location and navigation symposium[R]. USA: Stanford University, 2004:733-739.

[4] Vlad B, Rikard E. Indoor navigation with pseudolites[D]. Sweden: Linkopings University, 2005.

[5] Cobb H S. GPS pseudolites: theory design and applications[D]. California: Standford University, 1997.

[6] 王超,张楠,谢松. CGTR 中的伪卫星信号接收机[C]//第一届中国卫星导航学术年会,2010:126-131. (Wang C, Zhang N, Xie S. Pseudolite signal receiver in CGTR[C]// *Proc. of the China Satellite Navigation Conference*, 2010,126-131.)

[7] 张雷,王建宇,戴宁. 基于 TDMA 技术的伪卫星远近效应分析与研究[J]. *计算机技术与发展*, 2007,17(11):167-170. (Zhang L, Wang J Y, Dai N. Analysis and research on near-far effect of pseudolites based on TDMA technology[J]. *Computer Technology and Development*, 2007,17(11):167-170.)

[8] Glennon E P, Dempster A G. A novel GPS cross correlation mitigation technique[C]// *Proc. of the ION Global Navigation Satellite System Conference*, 2005:190-199.

[9] Glennon E P, Dempster A G. Cross correlation mitigation techniques for software GPS C/A code receivers[C]// *Proc. of the International Global Navigation Satellite System Symposium*, 2007:1-15.

[10] Psiaki M L. Block acquisition of weak GPS signals in a software receiver[C]// *Proc. of the 14th International Technical Meeting of Satellite Division of the Institute of Navigation*, 2001: 2838-2850.

[11] 梁敏敏,秦洪磊,李峰. 利用 GPS 实现高轨卫星定位的抗远近效应算法[J]. *空间科学学报*, 2010,30(3):255-262. (Liang M M, Qin H L, Li F. Solving the near-far problem for positioning the high earth orbital satellite with GPS[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2010,30(3):255-262.)

[12] Hou Y G. Design of an anti-jamming GPS receiver based on orthogonal projection method[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2010,21(1):16-19.

[13] 李涛护,刘建胜,黄智刚,等. 一种基于伪卫星信号正交性的远近效应消除技术[J]. *电子与信息学报*, 2010,32(6):1366-1369. (Li T H, Liu J S, Huang Z G, et al. A solution of the near-far effect based on the orthogonality of pseudolite signal[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010,32(6):1366-1369.)

[14] Premal H M, Penina A, Kent K, et al. Application of successive interference cancellation to the GPS pseudolite near-far problem[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2003,39(2):481-488.

[15] Varanasi M K, Aazhang B. Multistage detection in asynchronous code-division multiple-access communications [J]. *IEEE Trans. on Communications*, 1990, 38(4):509-519.

[16] Moshavi S. Multi-user detection for DS-CDMA communication[J]. *IEEE Communications Magazine*, 1996:124-136.

[17] 解梅,张自然. WCDMA 系统功率控制研究[J]. *电子科技大学学报*, 2003,32(4):354-357. (Xie M, Zhang Z R. Analysis of power control in WCDMA[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2003,32(4):354-357.)

[18] Elliott D K, Christopher J H. *Understanding GPS principles and applications*[M]. 2nd ed. London: Artech House Publishers, 2007:142-143,259.