

一种基于伪卫星信号正交性的远近效应消除技术

李涛护 刘建胜 黄智刚 秦红磊

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

摘要: 该文针对导航领域伪卫星应用中的远近效应问题,提出了一种根据伪卫星信号正交性消除远近效应的新思想。在对伪卫星信号之间的正交性进行理论分析的基础上,提出了正交投影算法,该算法从接收信号中提取并减去在强信号分量上的投影,以减轻强信号对弱信号的捕获干扰,且具有无需改动接收机的硬件结构和估计信号分量幅度等优点。通过仿真与传统的滑动相关方法进行了捕获性能比较,结果表明,在捕获概率为 90%的条件下,正交投影算法能将抗远近效应的能力提高约 9 dB。

关键词: 卫星导航; 伪卫星; 远近效应; 正交投影算法

中图分类号: TN967.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)06-1366-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00784

A Solution of the Near-Far Effect Based on the Orthogonality of Pseudolite Signal

Li Tao-hu Liu Jian-sheng Huang Zhi-gang Qin Hong-lei

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The main difficulty in the use of pseudolites is the near-far effect, where the strong signal component prevents a conventional receiver from detecting the weak component. A new solution based on the orthogonality of the pseudolite signal is presented, which constructs the orthogonal projection of the strong component and then cancels out this projection from the received signal to reduce the interference of the strong component on acquiring the weaker. This solution needs neither to modify the receiver's hardware nor to estimate the amplitude of the signal component. Simulation results shows that, at the same acquisition probability of 90%, the performance of near-far resistance of this new method compared with conventional sliding detector is improved about 9 dB.

Key words: Satellite navigation; Pseudolites; Nearfar effect; Orthogonal projection

1 引言

采用伪卫星辅助定位可以增加卫星导航系统可见星的数量,显著改善定位精度因子(DOP),提高系统的定位精度。在无法接收 GPS 信号环境中,如室内、矿井、地下车场等应用场合,通过采用 4 颗以上的伪卫星组成独立的导航定位系统,能够进行小范围的导航定位,因此伪卫星定位具有广阔的应用前景。但与真实 GPS 导航系统相比,伪卫星和接收机之间的距离要近得多,且在运动过程中接收机的相对距离变化较大,因此在整个工作区域内的接收信号强度会产生明显的差异。在某些特定的位置,当来自不同伪卫星的信号强度差异大于某个门限,就会产生远近效应^[1,2],使得信号功率较弱的卫星信

号被遮蔽,无法进行捕获,因此在伪卫星定位系统中,必须对远近效应采取处理措施。

目前,解决远近效应的主要方案有脉冲调制、功率控制、频率偏移、干扰对消等方法^[3-5]。前 3 种方法都需要改变信号结构或增加硬件设备,第 4 种方法无需更改硬件设备,但需要对强信号进行重构,即精确复现接收信号的幅度、载波频率、码相位和载波初始相位,处理过程比较复杂。本文首先分析了伪卫星信号的正交性,提出了根据信号正交性消除远近效应的新思想,并给出了相应的正交投影处理算法。与其它几种常见的算法相比,本方法不用增加硬件设备,不改变信号结构,且无需估计信号分量的幅度,降低了算法的复杂程度。

2 伪卫星信号的正交性分析

伪卫星定位系统是一个类似 GPS 定位系统的区域定位系统,可用 4 颗以上的伪卫星作为信号源模拟 GPS 系统卫星,利用 GPS 接收机接收信号并

2009-05-22 收到, 2009-12-11 改回

空间智能控制技术国防重点实验室资助课题

通信作者: 李涛护 thlee100@126.com

提取伪距等相关信息,进行覆盖范围内的精确定位。目前,大多数伪卫星发射的信号频率选用 GPS 的 L1 载频,信号结构和 GPS 卫星兼容, GPS 接收机可直接接收 GPS 伪卫星信号,不同的是伪卫星一般采用的 PRN 号为 33~37 的保留区段 C/A 码^[6]。

设伪卫星发射的类 GPS 射频信号包括载波、C/A 码以及导航电文,不包含 P(Y)码。射频信号经混频、滤波、采样等处理后,可以表示为

$$S_k(n) = A_k D_k(nT_s - \tau_k) \cdot C_k(nT_s - \tau_k) \cdot \cos(\omega_c nT_s + \phi_k) \quad (1)$$

式中下标 k 表示来自第 k 颗伪卫星的信号, A_k 表示信号的幅度,并假设是非时变的, D_k 表示数据码(导航电文), C_k 表示第 k 颗卫星对应的 C/A 码, τ_k 表示码相位的空间传播延迟, ω_c 表示中频频率, T_s 为采样间隔。

首先分析来自不同伪卫星的中频采样信号的正交性。设 $S_m(n)$, $S_k(n)$ 分别表示不同伪卫星对应的中频采样信号,下面分析在一个 C/A 码周期 T 内信号的正交性, $N = T/T_s$ 。

$$\begin{aligned} & \sum_{n=n_0}^{n_0+N-1} S_m(n) S_k(n) \\ &= \frac{A_m A_k}{2} \sum_{n=n_0}^{n_0+N-1} D_m C_m(nT_s - \tau_m) D_k \cdot C_k(nT_s - \tau_k) \\ & \cdot [\cos(2\omega_c nT_s + \phi_m + \phi_k) + \cos(\Delta\phi)] \quad (2) \end{aligned}$$

由于求和时间为一个 C/A 码周期,且在理论分析中不考虑导航数据跳变的影响,因此 $D_m \cdot D_k$ 的乘积仅影响到结果的符号,无碍于正交性的讨论,因此忽略。同时由于中频频率的倍频信号经累加后近似为零,也可略去,故有

$$\begin{aligned} & \sum_{n=n_0}^{n_0+N-1} S_i(n) S_j(n) = \frac{A_i A_j}{2} \cos(\Delta\phi) \\ & \cdot \sum_{n=n_0}^{n_0+N-1} C_i(nT_s - \tau_i) \cdot C_j(nT_s - \tau_j) \quad (3) \end{aligned}$$

从式(3)可看出,不同伪卫星的中频采样信号的正交性主要取决于 C/A 码序列之间的正交性。

C/A 码采用的是基于 m 序列优选对构成的 GOLD 码序列,根据 GOLD 码性质,当用 k 表示 m 序列的寄存器个数时,其互相关值的可能值为 $[-1, -t(k), t(k) - 2]$, 其中

$$t(n) = \begin{cases} 2^{(n+1)/2}, & n \text{ 为奇数} \\ 2^{(n+2)/2}, & n \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (4)$$

将每个 C/A 码序列视为欧氏空间上的矢量,然后通过计算不同的 C/A 码序列之间的夹角进行正交性分析。对于任意两个不同的 C/A 码而言,无论

其码相位偏移值如何取值,其互相关值只有 $-1, -65, 63$ 等 3 种可能结果,相应的夹角为 90.0560° , 93.6429° 和 86.4693° 。可见 C/A 码向量之间的夹角并不是严格的正交关系。当接收的 GPS 信号分量之间功率强弱差距过大时,这种非严格正交关系会使强弱信号之间的互相关峰值接近甚至大于弱信号的自相关峰值,使弱信号无法完成捕获,从而导致了远近效应的产生。

3 正交投影算法

由上节分析结果可知,数据码 D_k 不影响伪卫星信号之间的正交性,为了简化分析,在捕获过程中不考虑数据周期跳变,则在高斯白噪声条件下,设接收到的中频信号中包括 K 个信号分量,经采样后可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(n) &= \sum_{i=1}^K A_i C_i(nT_s - \tau_i) \\ & \cdot \cos[(\omega_c + \omega_{di})nT_s + \phi_i] + \varepsilon(n) \quad (5) \end{aligned}$$

其中 $n = 1, 2, \dots, M$ 表示一个扩频码周期内的 M 个采样。

定义第 i 颗星的单位信号分量 \mathbf{m}_i 为

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_i(\tau_i, f_{di}) &\equiv \{C_i(n_1 T_s - \tau_i) \cdot \cos[(\omega_c + \omega_{di})n_1 T_s + \phi_i], \\ & C_i(n_2 T_s - \tau_i) \cdot \cos[(\omega_c + \omega_{di})n_2 T_s + \phi_i], \dots, \\ & C_i(n_M T_s - \tau_i) \cdot \cos[(\omega_c + \omega_{di})n_M T_s + \phi_i]\}^T \quad (6) \end{aligned}$$

则接收信号中第 i 颗星的信号分量 \mathbf{s}_i 可表示为

$$\mathbf{s}_i \equiv A_i \cdot \mathbf{m}_i(\tau_i, f_{di}) \quad (7)$$

为了捕获卫星信号,需要确定每个卫星信号的码延时 τ_i 和多普勒频移 ω_{di} , 对于功率较强的信号,可直接用滑动相关法进行捕获,但对于弱信号,由于远近效应的存在,需要先消除强信号的影响。

搜索过程开始后,将最先搜索到的卫星记为第 j 颗卫星,则卫星的 PRN 号、码延时 τ_j 和多普勒频移 ω_{dj} 可在搜索过程中提取,卫星的初始相位由下式进行估计:

$$\phi_i = \arctan \frac{\mathbf{x}(n) \cdot C_i(nT_s - \tau_i) \sin[(\omega_c + \omega_{di})nT_s]}{\mathbf{x}(n) \cdot C_i(nT_s - \tau_i) \cos[(\omega_c + \omega_{di})nT_s]} \quad (8)$$

此时可求出第 j 颗卫星的单位信号分量,此分量与接收信号中的信号分量为同向矢量,仅差幅度因子 A_j 。

设有 $N \times K$ 阶矩阵 \mathbf{B} , 其秩为 K , $\langle \mathbf{B} \rangle$ 表示由 \mathbf{B} 的各列张成的子空间, $\langle \mathbf{B} \rangle^\perp$ 表示 $\langle \mathbf{B} \rangle$ 的正交补子空间。根据正交投影理论,值域为 $\langle \mathbf{B} \rangle$ 的正交投影矩阵构造如下^[7-9]:

$$\mathbf{P}(\mathbf{B}) = \mathbf{B}(\mathbf{B}^H \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^H \quad (9)$$

而值域为 $\langle \mathbf{B} \rangle^\perp$ 的投影矩阵为

$$P_{\perp}(B) = I - P(B) \tag{10}$$

其中 B^H 表示矩阵 B 的共轭转置。因此在信号分量方向上的投影矩阵为

$$P(m_j) = m_j(m_j^H m_j)^{-1} m_j^H \tag{11}$$

$P(m_j)$ 为 M 阶方阵。将信号幅度因子 A_j 代入, 容易验证:

$$P(s_j) = P(A_j \cdot m_j) = P(m_j) \tag{12}$$

由式(12)可见, 对信号分量的投影矩阵只取决于信号矢量的方向, 与其幅度大小没有关系, 因此在捕获过程中无需估计信号分量的幅度。

用 s_j^* 表示接收信号在第 j 颗卫星信号矢量上的正交投影, $x^*(n)$ 表示从接收信号中除去在第 j 颗卫星信号矢量上投影的结果, 则有

$$s_j^* = P(m_j) \cdot x(n) \tag{13}$$

$$x^*(n) = x(n) - s_j^* = P_{\perp}(m_j) \cdot x(n) \tag{14}$$

对 $x^*(n)$ 中其余的信号分量再进行捕获时, 捕获过程不再受第 j 颗卫星信号分量的影响, 可以完成弱信号的捕获。

4 算法性能仿真分析

4.1 捕获性能比较

为了验证正交投影算法的性能, 本文通过仿真对正交投影算法与普通的滑动相关算法的捕获性能进行比较。利用信号模拟器生成伪卫星信号, 信号采样频率为 12 MHz, 中频 3.563 MHz, 噪声为加性高斯白噪声。假设接收机同时接收到的来自 4 颗伪卫星的信号, 各信号的信噪比分别为 -25 dB, -20 dB, -10 dB 和 0 dB。由于伪卫星定位时运动载体的速度相对于卫星运动速度较低, 各星相应多普勒频率设为 -300 Hz, -100 Hz, 100 Hz, 300 Hz, 捕获程序的频率步进为 100 Hz。

对产生的中频模拟数据分别采用了滑动相关法

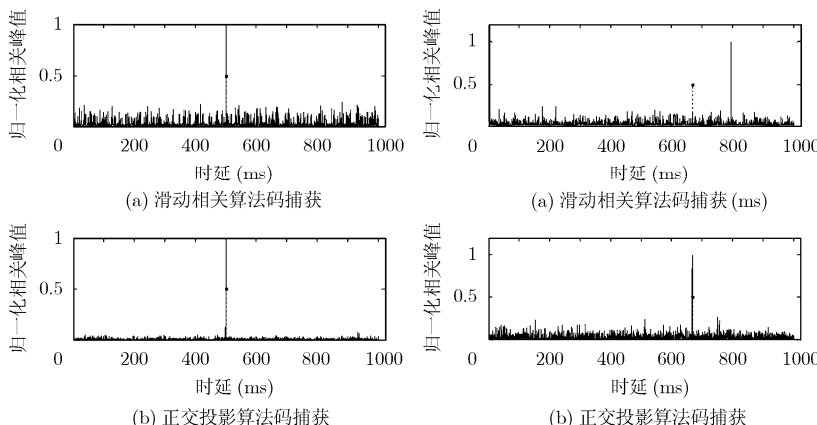


图 1 对 -10 dB 信号捕获的码相位图

图 2 对 -20 dB 信号捕获的码相位图

和正交投影法进行了捕获。为了比较直观地比较, 图 1 和图 2 分别给出了对 -10 dB 和 -20 dB 两个信号分量的码相位捕获情况, 顶点带圆点的虚线表示正确的码相位位置, 图 1(a) 表示滑动相关法捕获所得的码相位, 图 1(b) 表示正交投影法所得的码相位^[10]。

根据捕获结果, 对于信噪比为 -10 dB 的信号分量, 采用两种捕获方法得出的载波频率均为 3.5631 MHz, 同时从图 1 可以看出, 两种方法均搜索到的码相位都处于虚线对应的正确位置, 因此都能完成正确捕获。对 0 dB 的信号分量捕获的码相位图与 -10 dB 类似。

图 2 给出了信噪比为 -20 dB 信号的捕获情况。在相关峰发生的位置, 滑动相关法捕获的载波频率为 3.5627 MHz, 如图 2(a) 所示, 码相位已偏离了真实位置。而经正交投影消除 0 dB 和 -10 dB 信号的影响后, 搜索到的载波频率为 2.5629 MHz, 码相位也处于正确位置(如图 2(b)), 可见能够完成捕获。对 -25 dB 信号的情况与 -20 dB 的情况类似。

4.2 信号分量最大功率差异改善性能比较

为了验证正交投影的对接收信号分量最大功率差异的改善性能, 用含有两颗伪卫星信号分量的接收信号进行了处理。其中 1 号卫星 SNR1=0 dB, 2 号卫星 SNR2 从 -10 dB 到 -30 dB 以 1 dB 的间隔渐变, 共生成 21 组数据。每组数据长 100 s, 采用 1 ms 相关, 分别用正交投影算法与滑动相关的方法对每组信号进行 100000 次捕获, 仿真结果如图 3 所示。可以看出, 在接收机正确捕获概率为 90% 的前提下, 滑动相关法所能容忍的接收信号分量最大功率差值约为 13 dB, 而经正交投影算法则能处理的最大信号能量差为 22 dB, 因此显著改善了系统性能。

4.3 对有效定位覆盖区域的比较

在伪卫星定位系统中, 为了比较工作区域内的信号强度差异, 首先要确定伪卫星的发射功率。在确定伪卫星发射信号功率时, 要求发射功率经空间

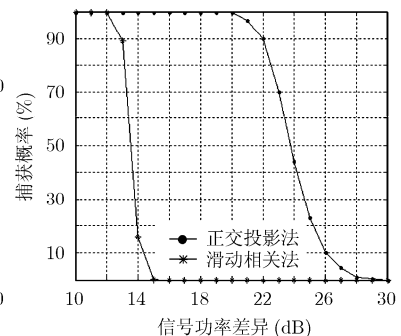


图 3 滑动相关和正交投影正确捕获概率图

传输损耗后能够满足接收机的最低捕获门限。为了降低模型的复杂度,此处忽略了发射天线和接收天线方向性图的不一致性。仿真中设定接收机的捕获门限为 -190 dBW,在 2.046 MHz 带宽内的环境噪声功率为 -200 dBW。根据电波在自由空间内的传播路径损耗公式和传输距离,即可得出捕获门限和发射信号强度之间的约束关系。

为了了解在工作区域内的信号强弱之间的差异,本文按照矩形分布建立了伪卫星的分布坐标,分别位于图 4 的 A, B, C, D 点,发射的信号功率均为 -50 dBW,使得阴影部分表示的工作区域内最弱的接收信号强度也高于接收机的捕获门限。

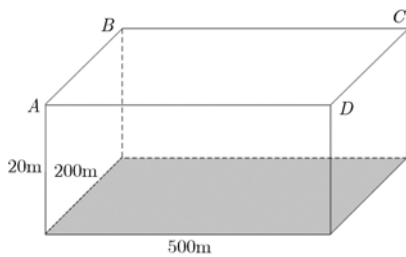


图 4 伪卫星分布及工作区域示意图

图 5 给出了工作区域内信号强度差异的分布图。以捕获概率为 90% 为条件,当接收机采用普通的滑动相关法进行捕获时,信号分量间最大功率差异必须不大于 13 dB 时才不会出现远近效应,其有效工作区域如图 5 中白色区域表示,其面积约占整个定位区域的 68.8%;采用正交投影法后,只要信号分量间的最大功率差异不大于 22 dB,就不会出现远近效应,其有效工作区域为白色区域加灰色区域,其面积约占整个定位区域的 96.1%。可见正交投影法能够将有效定位区域提高约 27.3%。

5 结论

通过对卫星导航信号正交性和正交投影算法进行理论分析,本文提出了基于 GPS 信号正交性来解

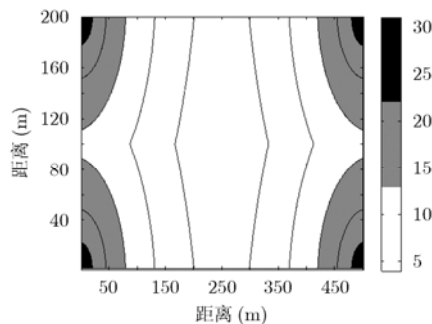


图 5 工作区域最大功率差异分布图

决伪卫星定位过程中的远近效应的思想,仿真结果表明:与滑动相关方法相比,正交投影算法能够提高接收机的捕获性能,在捕获概率为 90% 的条件下,其抗远近效应的能力提高了约 9 dB 左右,有效地克服了伪卫星定位中远近效应的影响,扩大了导航定位覆盖区域。

参考文献

- [1] Wang Hui-hui, Zhai Chuan-run, and Zhan Xing-qun, *et al.* Outdoor navigation system using integrated gps and pseudolite signals: Theoretical analysis and simulation [C]. ICIA 2008, ZhangJiaJie, China, 2008: 1127-1131.
- [2] Madhani P H, Axelrad P, and Krumvieda K, *et al.* Application of successive interference cancellation to the GPS pseudolite near-far problem [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(2): 481-488.
- [3] 武玉琨, 廉保旺. 伪卫星脉冲调制在抗远近效应中的应用[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(1): 473-478.
Wu Yu-kun and Lian Bao-wang. Application of pseudolite pulsing to the near-far effect [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006, 26(1): 473-478.
- [4] 苏杰, 胡爱群, 何振亚. CDMA 系统功率控制的性能分析与改进[J]. 东南大学学报, 1995, 25(4): 1-5.
Su Jie, Hu Ai-qun, and He Zhen-ya. Performance analysis and improving Scheme of power control in CDMA system [J]. *Journal of Southeast University*, 1995, 25(4): 1-5.
- [5] 汪健, 廉保旺, 张志鹏. 基于干扰抵消的 GPS 伪卫星抗远近效应方法研究[J]. 测控技术, 2008, 27(3): 43-48.
Wang Jie, Lian Bao-wang, and Zhang Zhi-peng. Research on near far resistant method based on Interference cancellation to GPS pseudolite[J]. *Measurement & Control Technology*, 2008, 27(3): 43-48.
- [6] Lei Z, Wang J Y, and Dai Ning, *et al.* Pseudolite: Analysis and simulation of the GPS-pseudolite signals [C]. WMSO, Hongkong, 2008: 424-427.
- [7] Huang Biao, Ding S X, and Qin S J, *et al.* Closed-loop subspace identification: An orthogonal projection approach [J]. *Journal of Process Control*, 2005, 15(1): 53-66.
- [8] Chen J, Wang J, and Zhang P, *et al.* An orthogonal projection approach for blind beamforming in multipath CDMA channels [C]. Proc. of IEEE & ACM CNSR 2008, Halifax, Canada, 2008: 496-503.
- [9] 程云鹏. 矩阵论[M]. 2001 年 6 月第 2 版, 西安: 西北工业大学出版社, 2001: 289-293.
Cheng Yu-peng. Matrix theory [M]. Version 2 June 2001, Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2001: 289-293.
- [10] Progni I F, Bromberg M C, and Michalson W R, *et al.* The acquisition process of a maximum likelihood GPS receiver [C]. ION GPS/GNSS 2003, Portland, USA, 2003: 2532-2542.

李涛护: 男, 1976 年生, 博士生, 研究方向为卫星导航。

刘建胜: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为光电信息处理。

黄智刚: 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为卫星导航。