

互相关干扰下微弱 GPS 信号检测方法

段华华 巴晓辉 陈杰

(中国科学院微电子研究所, 北京, 100029)

摘要: 互相关干扰由 C/A 码相关特性造成, 是 GPS 系统不可避免的问题, 已成为制约接收机灵敏度的因素之一。文中提出了一种新的互相关干扰下自相关检测方法——多组数据比较法 (Multi-groups data comparison, MDC)。该方法比较多组数据下捕获结果的多普勒频率和码相位, 确定自相关峰的多普勒频率与码相位。对比基于均方比 (Mean square ratio, MSR) 和峰值相差 (Peak difference, PD) 检测两种方法, 该方法在互相关干扰下有效提高弱信号发现概率。仿真结果表明, 强信号为 -124 dBm 时, 该方法对 -145 dBm 弱信号的检测概率为 83%。该方法对 GPS 接收机弱信号捕获研究有实际意义。

关键词: GPS; 弱信号捕获; 互相关干扰

中图分类号: TN967.1 **文献标志码:** A

Detection Method for Weak GPS Signal Under Cross-Correlation Effect

Duan Huahua, Ba Xiaohui, Chen Jie

(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029, China)

Abstract: Cross-correlation interference is caused by C/A code correlation properties. It is an inevitable problem for GPS systems. And it has been one of the problems affecting the sensitivity of GPS receivers. To solve the problem, a novel auto-correlation detection method based on multi-groups data comparison (MDC) is presented. In this method, the Doppler frequency and code phase within several groups of data are compared to find the auto-correlation peak. In contrast to the mean square ratio method and peak difference method, the proposed method can improve the detection probability of weak signals effectively in the presence of cross-correlation interference. The simulation results show that in the presence of one strong signal with -124 dBm power level, the method can achieve an 83% detection probability for the weak signal with -145 dBm power level. Therefore, it is useful for the acquisition of weak GPS signal.

Key words: GPS; weak signal acquisition; cross-correlation effect

引 言

全球定位系统 (Global position system, GPS) 从根本上来讲是一个基于码分多址 (Code division multiple access, CDMA) 的扩频 (Spread spectrum, SS) 通信系统^[1], 即不同卫星有不同的伪随机噪声 (Pseudo random noise, PRN) 码, 有相同的码速率, 调制在相同的载波频率上。互相关干扰由 C/A 码相关特性^[2]

造成,是 GPS 系统不可避免的问题。对 GPS 弱信号,要通过较长时间的积分处理来获得信噪比增益^[3],同时探寻合适的方法,解决弱信号捕获的互相关干扰问题。

对于 GPS 弱信号处理中存在的互相关干扰问题,常用的处理方法有干扰消除法、子空间投影法以及利用互相关特性的一系列检测法。干扰消除法^[4-7]主要思路是先捕获跟踪强信号,获得强信号信息如码相位、多普勒频移、幅度值等,重构强信号,并从接收信号中除去,再进行弱信号的捕获跟踪处理。干扰消除法优点是能够彻底消除互相关干扰;缺点是强信号信息特别是幅度值难以严格准确获得,重构过程存在比特精度问题和时间延迟,实现较困难。子空间投影法^[4,8]利用干扰强信号的载波频率、载波相位和码相位来构建干扰强信号的子空间,并将待检测弱信号分解为其在强信号空间的正交投影 V_1 和垂直于强信号空间投影 V_2 两部分,然后在 V_2 空间中进行弱信号检测,从而达到消除强信号干扰的目的,其优点是不需要重构强信号,在捕获过程中可以实时完成;缺点是对码相位和多普勒频率误差敏感,运算量巨大,需要消耗大量时间和硬件资源。检测法主要是利用接收机只要正确接收到 4 个以上卫星信号就可定位的特点,接收强信号,检测出互相关干扰,抛弃受互相关干扰的弱信号。文献[9,10]中峰值相差法以最大峰值减次峰值为检测统计量,文献[11]基于均方比方法以最大峰值与前 K 个峰值平均值的比值为检测统计量,两种方法均有良好的互相关检测性能,可以有效降低弱信号的捕获错误概率,缺点是只能检测出互相关干扰信号,必须后续进行互相关消除才能进行弱信号处理。文献[12]中提出了构造新伪随机码的方法,通过改变本地 C/A 码中 1 和 -1 个数,增强其与强信号的正交性,使互相关影响减弱,其缺点是算法复杂,不具有通用性。

1 信号模型

输入 GPS 接收机的中频卫星信号可表达成 $r(t) = \sum_{j=1}^W A_j D_j(t + \tau_{dj}) c_j(t + \tau_j) \cos(2\pi(f_{IF} + f_{dj})t + \varphi_j)$

式中:假定有 W 颗可见卫星;下标 j 代表卫星编号; A_j 为卫星信号幅度; D_j 为数据码; c_j 为 C/A 码;C/A 码 c_j 和数据码 D_j 的电平值为 ± 1 ; τ_j 为信号的传播延时; f_{IF} 为中频载波频率; f_{dj} 为多普勒频移; φ_j 为载波初始相位。

捕获第 i 颗卫星, $r(t)$ 与本地复制载波混频,再与本地复制 C/A 码相关,相干积分后得到的信号为

$$\begin{aligned} I + jQ = & \int_0^{T_{int}} r(t) c_i(t + \tau_{il}) \exp[j(2\pi f_{IF} t + \varphi_{il})] dt = \\ & A_i D_i(t + \tau_{di}) R_i(\Delta\tau) \text{sinc}(\pi f_{di} T_{coh}) \exp(j\Delta\varphi) + \\ & \sum_{j=1, j \neq i}^W A_j D_j(t + \tau_{dj}) \int_0^{T_{int}} c_j(t + \tau_j) c_i(t + \tau_{il}) \cdot \\ & \cos(2\pi f_j t + \varphi_j) \exp[j(2\pi f_{IF} t + \varphi_{il})] dt + (n_1 + jn_Q) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: φ_{il} 为本地复制载波频率与相位, $\Delta\varphi$ 为本地复现信号与接收信号载波相位差, $\Delta\tau$ 为本地复现码与接收码之间的相位延时, $\Delta\tau = \tau_i - \tau_{il}$ 。第 1 项为自相关结果,第 2 项为互相关结果,第 3 项为零均值高斯白噪声。卫星 i 与最强卫星信号强度差值越大,互相关影响越大,会造成假捕获,捕获到的结果可能是互相关峰。

忽略下标 i , 非相干累加后捕获结果可表示为

$$S(\tau, f_d) = \sum_{k=1}^L (I_k^2 + Q_k^2) \quad (2)$$

式中: L 为非相干累加次数; I_k, Q_k 由式(1)计算得到。

2 多组数据比较的自相关判决方法

该方法的捕获过程如图 1 所示,先捕获强星并保持跟踪,弱星处理有别于常规的一次捕获,而是对

同颗弱星,捕获 R 次,每次捕获对应时间为 $T(i) (i=1, \dots, R)$,两次捕获时间间隔不小于 1 s 。

$$S'(\tau, f_d) = S(\tau, f_d), \quad |f_d - f_s| \neq n \times 1\,000 \quad n=0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

$S'(\tau, f_d)$ 表示剔除与强星频差为 1 kHz 整数倍的捕获结果, f_s 为强星多普勒频移。

$$SS(\tau, f_d) = \max(S(\tau, f_d), M) \quad (4)$$

式中: $\max'(X, k)$ 表示取 X 的前 k 个最大值。

每次捕获按式(3-4)记录 $SS(\tau, f_d)$ 对应的多普勒频率与码相位, R 次捕获完成后得到多普勒频率矩阵 $F_{R \times M}$ 、码相位矩阵 $C_{R \times M}$ 。设定统计量 SD ,其门限为 th 。按下述步骤完成多普勒频率和码相位的二维比较过程。

(1)以 $F_{R \times M}$ 中第 1 个值为比较对象,记为 $F(m_0, n_0)$ 按照式(5)确定码相位比较集合 V ,其中 $C(i, j)$ 表示矩阵 $C_{R \times M}$ 中对应第 i 行第 j 列的值。

$$(i, j) = \{(i, j) \mid |F(i, j) - F(m_0, n_0)| < f_{th}\}, i \in (1, M), j \in (1, R), V = \{C(i, j)\} \quad (5)$$

(2)取 V 中第一个值为比较对象,记为 $C(i_0, j_0)$,与 V 中其他值一一比较,此以第 2 个值 $C(i_1, j_1)$ 为例分析比较过程。 $C(i_0, j_0), C(i_1, j_1)$ 对应捕获时间分别为 $T(i_0), T(i_1)$ 。 $T(i_0)$ 和 $T(i_1)$ 时间间隔内弱星走过的理论码片数为

$$\Delta c_w' = (f_{code} + F(m_0, n_0) \cdot f_{code} / f_{L1}) \cdot (T(i_1) - T(i_0)) \quad (6)$$

式中: $f_{code} = 2.046 \text{ MHz}, f_{L1} = 1\,575.42 \text{ MHz}$ 。

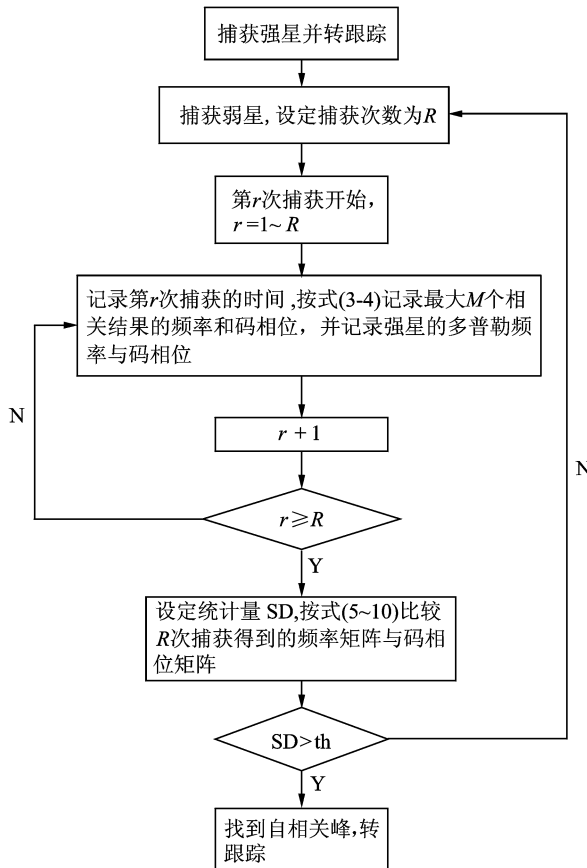


图 1 多组数据比较捕获流程

Fig. 1 Flow chart of multi-groups data comparison method

(3) 计算 $T(i_0)$ 和 $T(i_1)$ 时间间隔内弱星走过的实际码片数为

$$\Delta c_w = (C(i_1, j_1) - C(i_0, j_0))_N \quad (7)$$

式中: $N=2046$, $(x)_N$ 表示 x 对 N 的求模操作。

(4) 计算 $T(i_0)$ 和 $T(i_1)$ 时间间隔内强星走过的理论码片数为

$$\Delta c'_s = [(f_{\text{code}} + f_s \cdot f_{\text{code}} / f_{L1}) \cdot (T(i_1) - T(i_0))]_N \quad (8)$$

式中: f_s 为 $T(i_0)$ 时刻强星的多普勒频率。

(5) 计算 $T(i_1)$ 时刻的理论码相位为

$$C'(i, j) = (\Delta c'_w + C(i_0, j_0))_N \quad (9)$$

(6) 一次比较完成后, 判决量 SD 按下列表达式变化

$$SD = \begin{cases} SD++ & |C(i, j) - C'(i, j)| \leq 1 \\ SD-- & |C(i, j) - C'(i, j)| > 1, |\Delta c_w - \Delta c'_s| \leq 1 \\ SD & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

按式(6~10)完成 V 中所有值与 $C(i_0, j_0)$ 比较, 记录最后的 SD。

若 $SD > \text{th}$, 则 $(F(m_0, n_0), C(i_0, j_0))$ 为自相关峰对应多普勒与码相位; 否则, 依次取 V 中第 2 个值、第 3 个值, ... 为比较对象, 重复步骤(2-6)。若 V 中所有值为比较对象都比较完, 均不满足 $SD > \text{th}$, 则回归步骤(1), 取 $F_{R \times M}$ 中下一个频率值为比较对象, 记为 $F(m_0, n_0)$, 重复上述比较过程。若 $F_{R \times M}$ 中所有值为比较对象比较完均不满足 $SD > \text{th}$, 则本轮捕获失败, 开始下一轮 R 次捕获。

3 仿真及结果分析

仿真参数: 中频 4.123 MHz, 采样率 16.367 667 MHz, 采用 2 比特数据量化, 强信号 -124 dBm, 弱信号有 6 个, 对应卫星号为 SV2~SV7, 强度分别为 -143, -144, -145, -146, -147, -148, 单位均为 dBm。-124 dBm 强星干扰下, -145 dBm 弱星捕获结果如图 2 所示。从图 2 可以看出, 真正的自相关峰淹没在互相关峰中, 常规的最大值门限检测法得不到正确的捕获结果。

对同颗弱星进行 5 次捕获, 每次 0.5 s 数据。每次记录相关结果的前 20 个值, 即 $R=5, M=20$ 。本文对常规最大值检测法 MP, 基于均方比的检测法 MSR, 峰值检测法 PD 和多组数据比较法 MDC 均进行了仿真。在仿真过程中, 使用 0.5 s 的数据对所有方法进行测试验证, 结果如图 3 所示。干扰强信号强度分别为 -126, -124, -122 dBm 时, 多组数据比较法对弱星的检测情况如图 4 所示。

从图 3 可以看出, 强星干扰情况下, 对弱星的捕获, 最大值门限检测法性能最差, 弱星为 -145 dBm 时, 该方法检测概率为零。基于均方比和峰值相差两种检测方法性能差不多, 对 -145 dBm 弱星的检测

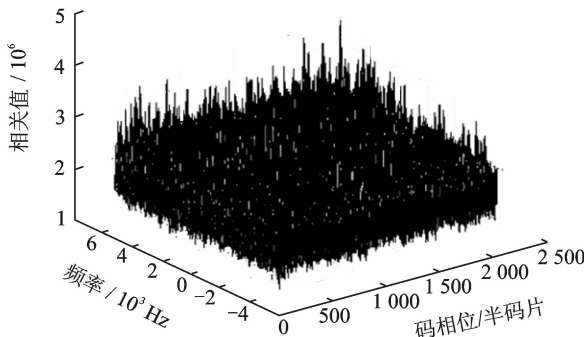


图 2 强星干扰下弱星捕获结果

Fig. 2 Acquisition result with strong signal interference

概率小于 2%。本文提出的多组数据比较法对 -145 dBm 弱星的检测概率为 83%。此方法中,必须选取合适的 R 和 M , R 和 M 增大,自相关峰发现概率会提高,同时也会加大运算量。

从图 4 可各知,强星为 -122 dBm 时,该方法对 -143 dBm 弱星检测概率为 93%,强星为 -124 dBm 时,对 -144 dBm 弱星检测概率为 98%,强星为 -126 dBm 时,对 -146 dBm 弱星检测概率为 97%。本文提出的多组数据比较自相关峰判定法对于强星能量大于 -126 dBm,且强弱信号能量差小于 20 dB 的弱星检测概率可达 93%以上,可以有效地解决自相关峰淹没在互相关峰中难以正确捕获的问题。

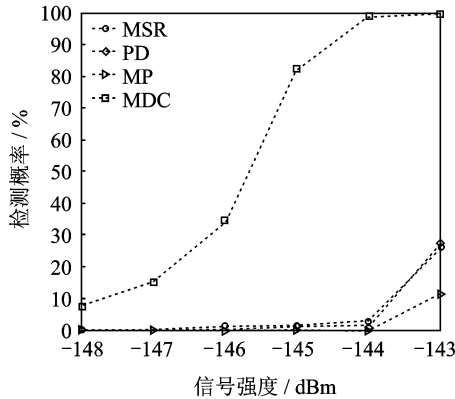


图 3 互相关干扰下不同弱信号检测方法

Fig. 3 Results of different acquisition detection methods with cross-correlation interference

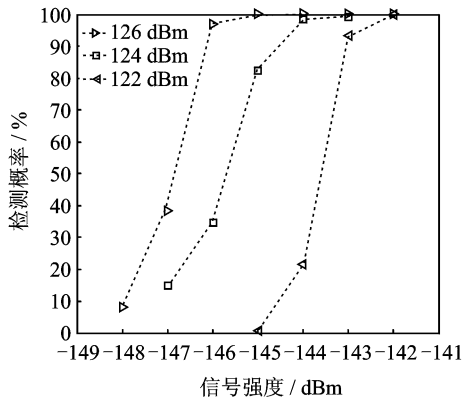


图 4 不同强信号干扰下弱信号检测情况

Fig. 4 MDC results of different cross-correlation interference

4 结束语

由于互相关干扰影响,自相关峰可能淹没在互相关峰中,难以正确捕获。本文提出的多组数据比较法不需要重构强信号,对比基于均方比和峰值相差检测两种方法,能够有效提高互相关干扰下弱星捕获成功概率,仿真结果表明,强星为 -124 dBm 时,该方法对 -145 dBm 弱星的检测概率为 83%,对 GPS 接收机弱信号捕获研究有实际意义。本文提出的多组数据比较法只考虑了单一强信号干扰,并且强、弱信号多普勒频率差异不为 1 000 Hz 整数倍的情况,对于存在多个强信号干扰和强、弱信号多普勒频差为 1 000 Hz 整数倍的互相关干扰问题还应继续研究。

参考文献:

- [1] 谢钢. GPS原理与接收机设计[M]. 北京:电子工业出版社,2009:17-26.
Xie Gang. Principles of GPS and receiver design [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009:17-26.
- [2] Tsui J B Y. Fundamentals of global positioning system receivers: A software approach [M]. 2nd Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2005:83-84.
- [3] 张文,饶谷音,韩松来,等. 不同相干积分方法对 GPS 弱信号捕获的影响[J]. 数据采集与处理,2012,27(1):38-44.
Zhang Wen, Rao Guyin, Han Songlai, et al. Effect of different noncoherent integration alternatives on weak GPS signal acquisition[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2012,27(1):38-44.
- [4] Glennon E P, Dempster A G. A review of GPS cross correlation mitigation techniques[C]// The 2004 International Symposium on GNSS/GPS. Sydney, Australia:[s. n.], 2004.
- [5] 宋新刚,雷珺琳,路卫军. 一种 C/A 码互相关干扰消除算法[J]. 计算机技术与发展,2011,21(1):1-4.
Song Xinjun, Lei Junlin, Lu Weijun. A C/A code cross-correlation interference cancellation algorithm[J]. Computer Technology and Development, 2011,21(1):1-4.
- [6] 梁坤,王剑,施浒立. 高灵敏度 GPS 接收中的互相关减轻算法研究[J]. 电子学报,2008,36(6):1098-1102.
Liang Kun, Wang Jian, Shi Huli. Study on GPS cross correlation mitigation techniques in high sensitivity GPS receivers[J]. Acta Electronica Sinica, 2008,36(6):1098-1102.
- [7] 刘杨,秦红磊,金天. 考虑互相关干扰的 GPS 信号捕获门限设定方法[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(3):268-273.
Liu Yang, Qin Honglei, Jin Tian. Threshold setting method for GPS signal acquisition under cross-correlation effect[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011,37(3):268-273.
- [8] 刘杨,金天,李华军. 微弱 GPS 信号捕获中的远近效应消除方法[J]. 系统工程与电子技术,2011,33(5):1079-1084.
Liu Yang, Jin Tian, Li Huajun. Near-far effect cancellation in weak GPS acquisition[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011,33(5):1079-1084.
- [9] 曾丹丹,何文涛,徐建华. GPS 信号并行捕获中互相关干扰的消除[J]. 微电子学与计算机,2010,27(11):113-116.
Zeng Dandan, He Wentao, Xu Jianhua. Mitigation of GPS cross correlation in parallel acquisition phase [J]. Microelectronics and Computer, 2010,27(11):113-116.
- [10] Gustavo L R, Gonzalo S G. Detection and mitigation of cross-correlation interference in high-sensitivity GNSS receivers[C]// The 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. [S. l.]:IEEE, 2007.
- [11] 侯维玮. 高灵敏度 GNSS 捕获技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2010.
Hou Weiwei. Research on acquisition techniques of high sensitivity GNSS[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [12] Glennon E P, Dempster A G. A novel GPS cross correlation mitigation technique[C]// ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division. Long Beach, CA, 2005.

作者简介:



段华华(1988-),女,硕士研究生,研究方向:GPS 卫星信号处理算法研究, E-mail: duanhuahua@ime.ac.cn.



巴晓辉(1980-),男,副研究员,研究方向:卫星导航信号处理。



陈杰(1963-),男,研究员,研究方向:通信、多媒体信号处理、片上系统设计。

