

高灵敏度 GPS 接收机中的互相关减轻算法研究

梁 坤¹, 王 剑², 施浒立³

(1. 中国计量科学研究院, 北京 100013; 2. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044;
3. 中国科学院国家天文台, 北京 100012)

摘 要: 通过理论分析, 推导出了基于频差因子的互相关计算公式, 提出了两种新的互相关减轻算法——并行互相关减去法和基于频差因子的并行互相关减去法. 通过仿真实验, 在一定多普勒频差下, 1 到 3 个干扰强信号、强度强于弱信号 16dB 到 30dB 时, 两种方法对高灵敏度 GPS 接收机中互相关影响的减轻都有良好的效果和更强的实用性; 基于频差的并行互相关减去法在计算量方面优势更大, 可以加快高灵敏度 GPS 接收机的捕获速度, 使其在接收强度较弱、信噪比很低的 GPS 信号时能正常工作.

关键词: 通信技术; 互相关减轻; 仿真; 码分多址; 高灵敏度; GPS 接收机

中图分类号: V557 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 06-1098-05

Study on GPS Cross Correlation Mitigation Techniques in High Sensitivity GPS Receivers

LIANG Kun¹, WANG Jian², SHI Hu-li³

(1. Institute of Metrology, Beijing 100013, China;
2. School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
3. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: In terms of the theoretical analysis, the cross correlation computation formula based on frequency difference coefficient was deduced, and two new cross correlation mitigation methods, called the parallel cross correlation subtraction and the parallel cross correlation subtraction based on frequency difference coefficient were addressed. By the tests in which one to three strong interference signals with the intensity of 16 to 30dB were simulated, the effects of the two cross correlation mitigation methods in high sensitivity GPS receivers were good and the practicality of them was higher. The parallel cross correlation subtraction method based on frequency difference coefficient had much advantage on computation quantity, and was able to accelerate the signal acquiring speed of high sensitivity receivers and make the receivers work well when receiving signals with much weaker intensity and lower signal noise ratio.

Key words: communication techniques; cross correlation mitigation; simulation; CDMA (code division multiple access); high sensitivity; GPS (global positioning system) receiver

1 引言

GPS 调制/解调的概念是以不同的卫星使用不同的伪随机噪声 (PRN) 码, 但有相同的基码速率和载频为基础的, 这种调制技术被称为码分多址 (CDMA). 为了使 CDMA 鉴别技术生效, 必须在所有使用的 PRN 码之间获得一定水平的互相关信号拒绝性能. 由于 GPS P(Y) 码的码长为 6.1871×10^{12} 个基码, GPS P(Y) 码与任何其他 GPS P(Y) 码的互相关电平相对于最大自相关而言接近

于 $-127\text{dB}^{[1]}$. 因此, 任何 GPS 卫星的 P(Y) 码与其他任何 GPS 卫星的 P(Y) 码在任何相位移都可作不相关对待. 但 GPS C/A 码则不然, 其码长为 1023 基码, 在任何两个码之间有 0 多普勒频差的条件下, C/A 码的互相关函数其峰值电平相对于最大自相关来说可以差到只有 -24dB . 在最坏情况下, 有 1kHz 的频差时, 互相关电平可差到 -21dB , 在一定的天线增益及其他一些条件 (如需要信号较不要信号强度弱得多、仰角低得多及多径效应等) 下, 这有可能造成假捕获^[2].

在目前的高灵敏度 GPS 接收机中,由于要求接收的信号强度较弱、信噪比很低,所以互相关的影响已成为制约其能否捕获和跟踪信号的重要因素。

常用的四种 GPS 互相关抑制的方法为:串行干扰抵消法、并行干扰抵消法、子空间投影法和减去投影法^[3]。串行干扰抵消法在检测到干扰强信号波形后,一次一个地将它们从接收信号中除去。与串行干扰抵消不同的是,并行干扰抵消法同时从接收信号中消除多个干扰强信号。子空间投影法利用已知强信号的载波频率、相位和码相位信息及被期望弱信号的一些信息构建干扰强信号和被期望弱信号的子空间,经过投影,计算出含干扰强信号的部分。减去投影法利用已知强信号的载波频率、相位和码相位信息构成干扰强信号子空间,经过投影,计算出干扰强信号,然后从接收信号中减去。2005 年新南威尔士大学的 Éamonn P. Gannon 改变码周期中 1 和 -1 的个数,使码的特性变的均衡^[4]。还有一些消除互相关影响的策略^[5~7]。

(1) 互相关峰值加宽

(2) 多门限检测

(3) 互相关峰值在码间载波多普勒频差为 0 或 1K 的整数倍时最大,以每个最大值为中心约呈 sinc 函数递减。

(4) 多个互相关峰:互相关峰会有多个,而自相关峰只有一个,利用这个特性在捕获和跟踪过程中可以检测互相关峰。

以上可以看出,文献[3]中提到的四种方法都是直接估计出干扰强信号,然后将干扰强信号从接收信号中减去,但在一般情况下,GPS 接收机接收信号的量化位数不超过 2bit,如果直接从接收信号中减去,精度会很低,难以实现消除干扰强信号的目的;采用子空间的两种方法运算量巨大,需要消耗很多资源,经实际验证只能在工作站上或配置很高的 PC 上运行,且计算所需时间很长,不适合实时进行。文献[4]中的方法需要改变 GPS 系统所使用的 Gold 码的结构特性,相当于重新设计了一种具有均衡特性的伪随机码,这主要与 GPS 系统有关,并不是接收机的发展趋势所在。文献[5~7]中所讲到的策略也只能作为判断当前峰值是否是互相关峰的方法,并不能作为消除互相关的方法,只能在捕获或跟踪中辅助判断。

但是,可以对强信号进行估计以后与被期望弱信号码进行相关,得到强弱信号相关值并存储,并从接收信号与被期望弱信号的相关值中将强弱信号相关值减去,这样就不存在量化位数引起的问题,可以达到消除互相关的目的。如果对干扰强信号与被期望弱信号互相关值进行准确估计,那么在减去互相关值后,将有效消除互相关,得到较好的效果,此即为本文的设计思想。

2 新的互相关减轻算法

2.1 理论分析与推导

如果接收 GPS 信号码之一具有下标 q ,则此信号与对应信号 k 的本地基准码的乘积变为^[8]:

$$A_q m_q \exp(j \phi_q) \cdot \int_0^T P_q(t-d, R_q) \exp(j2 f_q t) P_k(t-s, 0) dt \quad (1)$$

A_q 为信号幅度; m_q 为信号中的导航数据,并假设其在积分周期 T 上不变化; ϕ_q 为信号的载波相位; R_q 为码多普勒; P_q 为信号的伪随机码; d 为信号码片延迟; s 为本地码片延迟; f_q 为残余载波多普勒。

如果忽略码片速率上的多普勒效应,则 F 帧的积分时间产生下列关系:

$$A_q m_q \exp(j \phi_q) \cdot \sum_{u=0}^{F-1} \int_0^{T_f} P_q(t-d, R_q) \exp(j2 f_q(t+uT_f)) P_k(t-s, 0) dt \quad (2)$$

其中 P_q 和 P_k 具有帧周期 T_f 的周期性。

对上式进行进一步推导,得到相干积分累加中互相关的精确计算方法如下:

$$\begin{aligned} & A_q m_q \exp(j \phi_q) \cdot \sum_{u=0}^{F-1} \exp(j2 f_q u T_f) \int_0^{T_f} P_q(t-d, R_q) \\ & \exp(j2 f_q t) P_k(t-s, 0) dt \\ & = A_q m_q \exp(j \phi_q) \cdot \frac{1 - \exp(j2 f_q T_f F)}{1 - \exp(j2 f_q T_f)} \int_0^{T_f} P_q(t-d, R_q) \\ & \exp(j2 f_q t) P_k(t-s, 0) dt \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{令} \quad H = \frac{1 - \exp(j2 f_q T_f F)}{1 - \exp(j2 f_q T_f)} \quad (4)$$

称之为互相关频差因子。

上式可变为

$$A_q m_q \exp(j \phi_q) \cdot H \cdot \int_0^{T_f} P_q(t-d, R_q) \exp(j2 f_q t) P_k(t-s, 0) dt \quad (5)$$

称之为基于频差因子的互相关计算公式。

可以看出,式(5)中去掉了求和符号,只用一帧数据的相关结果就可以计算出若干帧数据累加后的相关结果。如果利用式(5)来计算相干积分累加中的干扰强信号与本地弱信号的互相关值,只需在第一帧数据的相关结果前乘以互相关频差因子即可,可以成倍地减少运算量。

2.2 原理与具体实现

由于干扰强信号与本地弱信号的互相关值可以通过式(5)计算得到,所以可以利用各已知强信号的幅度、载波频率、载波相位和码相位信息构建强信号估计,然后在检测过程中通过式(5)同时计算出各干扰强信号与本地弱信号的互相关值,在判决之前将其从接收信号与本地弱信号的相关值中减去,这样可以从根本上更彻底地消除互相关影响。

为达到此目的, 首先应该利用已知参考信息中提供的可见星信息, 将视野内的可见卫星进行一次遍搜, 搜索出强信号并估计其幅度、码相、载波频率和相位, 利用这些参数在捕获过程中通过式(5)同时对所有干扰强信号与弱信号的互相关值进行并行计算, 并在最后的相关结果中把这些互相关值的都减去, 然后进行检测判决, 在判决时加入一些附加判断(如第1节中所列)以更好地消除干扰强信号互相关的影响, 这种算法称为基于频差因子的并行互相关减去法。

归纳其实现的具体步骤如下

(1) 遍搜

利用可见卫星信息对视野内可见卫星进行遍搜, 遍搜时使用的数据长度可以较短, 以便快速搜索强信号。

(2) 强信号参数估计

对干扰强信号幅度、码相、载波频率和相位参数进行估计。

(3) 强信号与弱信号互相关计算

进行弱信号捕获, 在相关过程中利用式(5)并行计算各干扰强信号与弱信号的互相关值并存存储。

(4) 互相关值减去

将接收信号与弱信号的相关结果同时减去各干扰强信号与弱信号的互相关值。

(5) 检测判决

加入一些附加判断辅助检测判决以更好地消除干扰强信号互相关的影响。

该算法的工作流程如图1。

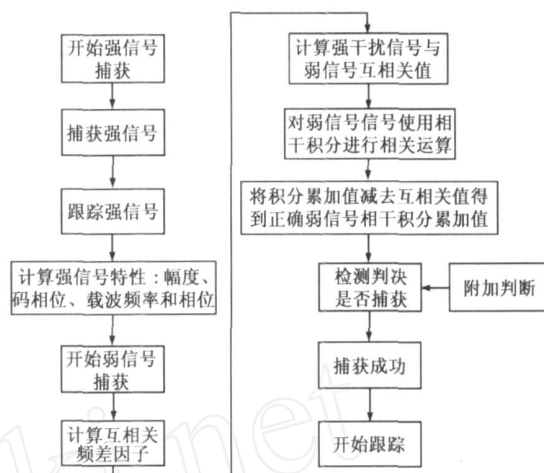


图1 基于频差的并行互相关减去法工作流程

2.3 与并行互相关减去法的对比

当然, 在步骤(3)中也可直接利用未经推导的 F 帧积分时间互相关计算式(2)进行计算, 称为并行互相关减去法, 这种方法同样可以计算出互相关的精确值, 但所耗费的时间和资源都要成倍的增加。如表1所示, 利用 Matlab 对两种算法的运行时间进行了对比, 其中 F 为10, 中频为1.023M, 采样率为4.092M。可以看到采用基于频差因子的并行互相关减去法可以减小运算复杂度, 大大节省运算时间, 这对需要花费大量时间来进行捕获跟踪的高灵敏度接收机很有意义。

表1 两种方法的运算量

	核心计算公式	运算时间(秒)
并行互相关减去法	$A_d m_d \exp(j\phi_d) \cdot \int_0^{T_f} P_q(t-d, R_q) \exp(j2\pi f_q(t+uT_f)) P_k(t-s, 0) dt$	2.4920
基于频差因子的并行互相关减去法	$A_d m_d \exp(j\phi_d) \cdot H \cdot \int_0^{T_f} P_q(t-d, R_q) \exp(j2\pi f_d t) P_k(t-s, 0) dt \quad (\text{其中 } H = \frac{1 - \exp(j2\pi f_d T_f F)}{1 - \exp(j2\pi f_d T_f)})$	0.2300

3 仿真实验

由于在绝大多数高灵敏度应用环境中, 高灵敏度接收机载体的运动都属于低动态情况, 码间多普勒频移非常小, 它对互相关计算影响很小, 可以忽略, 所以在仿真实验中不予考虑。而且, 本文只关心干扰强信号与弱信号的互相关对高灵敏度接收机的影响, 所以不加入噪声。

3.1 并行互相关减去法

仿真参数: 中频1.023M, 采样率4.092M, 相干积分时间10ms, 非相干积分1段。干扰强信号1个, 由GPS的12号星产生, 强度25dB, 载波多普勒频率为5000Hz, 载波相位为 $\frac{4}{7}$; 弱信号1个, 由GPS的1号星产生, 强度0dB, 载波多普勒频率为1000Hz, 载波相位为0, 采样码

片相位为401。仿真假设强信号已经找到, 其参数幅度、码相、载波频率和相位已被估计出来。

未使用互相关减轻方法和使用并行互相关减去法的捕获结果如图2和3。

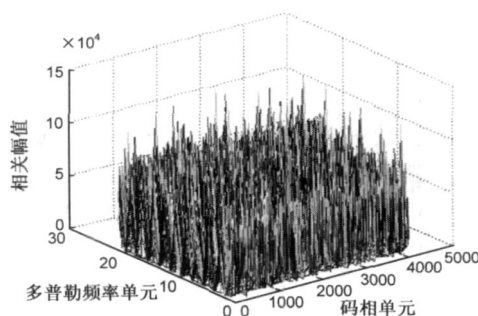


图2 未经过互相关消除捕获结果

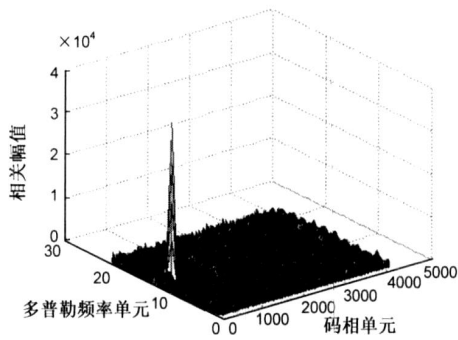


图 3 使用并行互相关减去法的捕获结果

从图 2 和 3 可以看出,在未使用任何方法消除互相关时,真正的相关峰被互相关峰淹没了,这时进行相关峰检测得不到正确结果;使用并行互相关减去法之后,互相关被消除,凸显出自相关峰,这时进行相关峰检测可以得到正确的结果。

3.2 基于频差因子的并行互相关减去法

仿真参数同上。未使用互相关减轻方法和使用基于频差因子的并行互相关减去法的捕获结果如图 4 和 5。

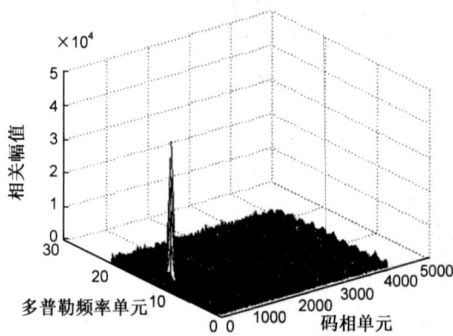


图 4 使用基于频差因子的并行互相关减去法的捕获结果

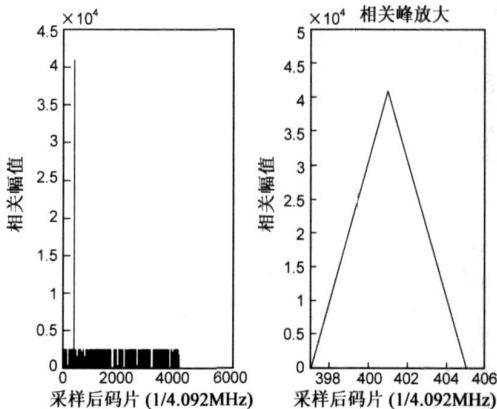


图 5 局部放大图

从图 2~4 可以看出,利用基于频差的并行互相关减去法得到的结果与并行互相关减去法相同。图 5 为图 4 中的自相关峰局部放大图,与设定的真实采样码片相位相吻合。

为进一步说明在更多干扰强信号的情况下两种方法的效果,需要继续做进一步的实验。虽然并行互相关

减去法与基于频差因子的并行互相关减去法所耗费的运算资源和时间是不一样的,在 3.3 中已经得到了证明,但两种算法最终得到的检测效果相同,所以在进一步的实验中仅使用基于频差因子的并行互相关减去法,图 6~9 为仿真实验的结果。图 6 是使用基于频差因子的并行互相关减去法进行互相关消除后接收信号的相关峰幅度与弱信号自相关峰幅度的对比;还分别对使用基于频差因子的并行互相关减去法进行互相关消除前后接收信号的相关峰幅度及弱信号与干扰强信号互相关峰幅度两两进行了对比,效果如图 7、8、9。其中,干扰强信号在 1 到 3 个之间变化,强度从 16dB 变化到 30dB;弱信号 1 个,由 GPS 的 1 号星产生,强度 0dB。三个干扰强信号的载波多普勒频率分别为 5000Hz、500Hz、1300Hz,分别由 GPS 的 12、2、27 号星产生,载波相位分别为 $\frac{4}{7}$ 、 $\frac{8}{5}$ 、 $\frac{1}{2}$;弱信号载波多普勒频率为 1000Hz,载波相位为 0。

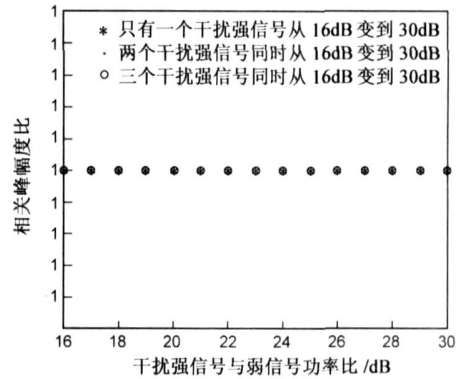


图 6 相关峰幅度比随强信号强度变化图

互相关消除后接收信号的相关峰幅度与弱信号自相关峰幅度比随强信号强度变化、互相关消除后接收信号的相关峰幅度与干扰强信号和弱信号互相关峰幅度比随强信号强度变化、互相关消除后接收信号的相关峰幅度与互相关消除前接收信号的相关峰幅度比随强信号强度变化和互相关消除前接收信号的相关峰幅度与干扰强信号和弱信号互相关峰幅度比随强信号强

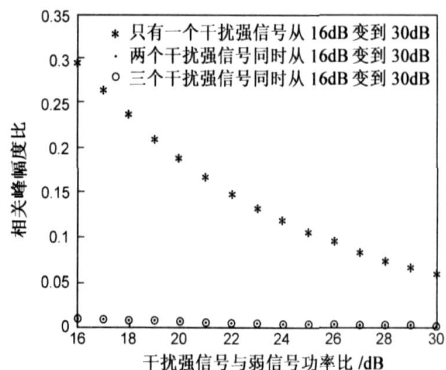


图 7 相关峰幅度比随强信号强度变化图

度变化分别如图 6~9 所示。

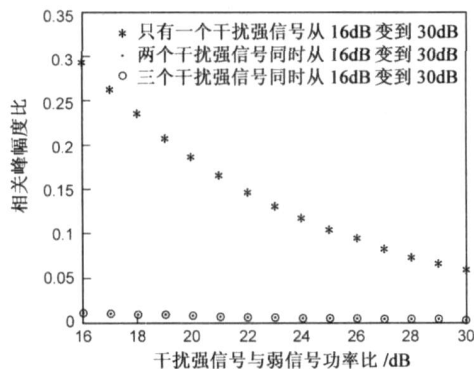


图 8 相关峰幅度比随强信号强度变化图

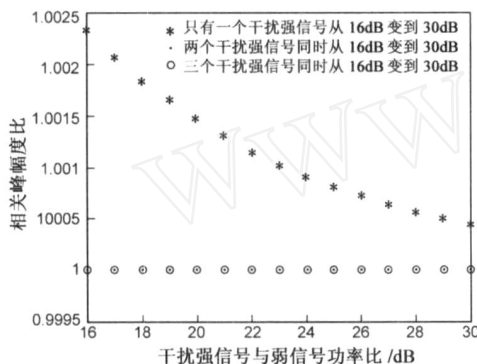


图 9 相关峰幅度比随强信号强度变化图

图 6~8 表明,在使用这种方法后,在干扰强信号强度强于弱信号 16 到 30dB 时,干扰强信号与弱信号的互相关都可以被去除,去除互相关后的相关峰即为弱信号自相关峰,可检测到被期望弱信号,效果很好。

由图 7~9 可知,随着某个干扰强信号强度的增强,此干扰强信号和弱信号互相关峰幅度增大;随着干扰强信号个数的增多,各干扰强信号和弱信号的互相关又进行了叠加,使总的互相关峰幅度变得更大。但这些因素都没有影响基于频差因子的并行互相关减去法的效果。

4 小结

并行互相关减去法和基于频差因子的并行互相关减去法与综述中谈到的前四种方法相比,更加具有实用性,可以实用到硬件 GPS 接收机中,不用考虑量化位数所带来的影响,其他几种方法在量化位数较少的 GPS 接收机中无法使用。第五种方法对 GPS 系统所使用的 Gold 码进行了改造,并不是接收机终端的发展方向。从仿真结果可以看出,两种新方法的效果良好,基于频差因子的并行互相关减去法计算量更小,与并行互相关减去法相比,运算量为其 $\frac{1}{F}$ (F 为相干积分累加帧数),可加快高灵敏度 GPS 接收机捕获信号的速度。所以基于频差因子的互相关减去法可以既快速又准确地计算

出强信号与弱信号的互相关值,消除互相关干扰的影响,可以实用到高灵敏度 GPS 接收机等需要接收弱码分多址信号的接收机中,有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] Bradford W Parkinson, James J Spilker Jr. Global Positioning System: Theory and Applications Volume I [M]. Cambridge, Washington DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996.
- [2] Elliot D Kaplan. Understanding GPS: Principles and Applications [M]. Norwood: Artech House Publisher, 1996.
- [3] E P Glennon, A G Dempster. A review of GPS cross correlation mitigation techniques [A]. The 2004 International Symposium on GNSS/ GPS [C]. Fairfax: The Institute of Navigation, 2004.
- [4] Éamonn P Glennon, Andrew G Dempster. A novel GPS cross correlation mitigation technique [A]. ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division [C]. Fairfax: The Institute of Navigation, 2005. 13 - 16.
- [5] Mattos P. Solutions to the cross correlation and oscillator stability problems for indoor C/A code GPS [A]. Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of the U. S. Inst. Of Navigation [C]. Fairfax: The Institute of Navigation, 2003. 654 - 659.
- [6] Y T Jade Morton. Assessment and handling of CA code self-interference during weak GPS signal acquisition [A]. ION GPS/ GNSS 2003 [C]. Fairfax: The Institute of Navigation, 2003.
- [7] Van Dierendonck A, Erlandson R, McGraw G. Determination of C/A code self interference using cross-correlation simulations and receiver bench tests [A]. Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of the U S Inst of Navigation [C]. Fairfax: The Institute of Navigation, 2002. 630 - 642.
- [8] Mark Roh. Cross-correlation mitigation method and apparatus for use in a global positioning system receiver [P]. United States Patent: 10979918, 2004 - 11 - 01.

作者简介:



梁坤男, 1980 年生于山西大同, 理学博士, 中国计量科学研究院助理研究员。主要研究方向为卫星导航及时间频率传递等。
E-mail: liangk@nim.ac.cn

王剑男, 1978 年生于山西隰县, 工学博士, 北京交通大学电信学院讲师。主要研究方向是多传感器数据融合、卫星导航及其在列车控制系统的应用。E-mail: wangj@bjtu.edu.cn

施浒立男, 1944 年生于浙江余姚, 工学博士, 理学博士, 中科院国家天文台首席研究员, 博士生导师。主要研究方向是天文仪器与天文技术方法、天文导航与被动定位探测、机电一体化等。