

# 一种基于 P 码的频域直接捕获算法的研究

田明浩<sup>1,2</sup>,冯永新<sup>2</sup>,潘成胜<sup>1,2</sup>

(1. 南京理工大学自动化系,江苏南京 210094; 2. 沈阳理工大学通信与网络工程中心,辽宁沈阳 110168)

**摘要:** GPS(Global Positioning System)系统采用典型的 CDMA(Code Division Multiple Access)体制,目前扩频 PRN 码主要是用于标准定位服务的 C/A 码和用于精确定位服务的 P 码。P 码信号具有很强的抗干扰和保密能力,而 P 码的捕获通常是利用 C/A 码来完成的,因此,实现 P 码的直接捕获对我国未来发展自己的卫星定位系统具有重要意义。本文从研究信号直接捕获算法角度出发,提出了一种新的 P 码快速直接捕获算法,并通过仿真实验验证了算法的有效性。仿真结果表明,该算法有效地提高了捕获效率。

**关键词:** GPS(Global Positioning System); P 码; XFAST(Extended Replica Folding Acquisition Search Technique); 均值法; 相关

**中图分类号:** TN96 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2007)03-0549-04

## Research of a Method of Direct Acquisition Based on P Code in Frequency Domain

TIAN Ming-hao<sup>1,2</sup>, FENG Yong-xin<sup>2</sup>, PAN Cheng-sheng<sup>1,2</sup>

(1. Department of Automatization, Nanjing University of Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

2. Communication and Network Institute, Shenyang Ligong University, Shenyang, Liaoning 110168, China)

**Abstract:** As the typical CDMA application, the spread spectrum PRN codes in GPS are C/A code applied to standard positioning service and P code applied to precise positioning service presently. P code has a higher tolerance to jamming and spoofing compared with the C/A code, but P code is usually acquired depending on C/A code, so P code direct acquisition should be implemented which is meaningful for the development of our own satellite positioning system in the future. A new P code direct acquisition algorithm is proposed by studying signal direction acquisition algorithms and its validity is shown by a simulation experiment. The Results show that the new algorithm improves the acquisition efficiency.

**Key words:** GPS(Global Positioning System); P code; XFAST(Extended Replica Folding Acquisition Search Technique); average method; correlation

## 1 引言

全球定位系统 GPS(Global Positioning System)<sup>[1]</sup>采用典型的 CDMA 体制,系统以码分多址形式区分各卫星信号,采用的伪随机序列 PRN 码主要有 C/A 码、P 码、Y 码以及 GPS 现代化中提出的 M 码, Y 码是 P 码经 AS 政策实施的加密码。目前, GPS 信号的扩频伪随机码主要是用于标准定位服务的 C/A 码和用于精确定位服务的 P 码。作为用户接收机,则利用伪随机序列的良好自相关性和互相关性,对信号进行相关接收,分离和接收所需的不同卫星信号,进而完成测距和定位。

影响 P 码直接捕获时间的因素<sup>[2]</sup>主要包括接收机时间和频率精度、硬件的并行规模和速度、捕获算法以及接收机前端的信噪比等等。因此,通过改进捕获算法来提高 P 码捕获效率是行之有效的办法之一。

对于 C/A 码,由于周期长度为 1023,可以采用逐元搜索的方法和使用基于 FFT<sup>[2]</sup>的相关处理实现捕获。然而,对于 P 码,即使是截距 P 码,仍具有  $6.187 \times 10^{12}$  个码元,根本不能用逐元搜索的方法去捕获它,也难以象 C/A 码那样把基于 FFT 的相关处理直接用于 P 码的捕获。本文从信号直接捕获算法研究的角度出发,提出一种新的捕获算法来提高 P 码的捕获效率。

## 2 P 码的直接相关捕获

对 P 码的捕获包括两个方面:一方面是时间上的不确定性引起的码元搜索,另一方面是卫星相对于接收机移动产生的多普勒频移引起的频率搜索。

### 2.1 码元搜索

就直接序列扩频通信而言,其伪码序列的搜捕通常采用基于 FFT<sup>[3]</sup>的相关方法来提高计算速度。然而,就 P

收稿日期:2006-03-17;修回日期:2006-11-01

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划(No. 2004AA712060);武器装备重点基金(No. 6140431)

码的长周期而言,仅仅直接使用基于 FFT 的相关处理实现捕获难以更好地提高捕获算法的效率. P 码的复杂性,为有效的码捕获算法提出了挑战. 因此,针对 P 码的直接捕获,需与其他方法相结合. 目前,较好的方法主要有扩展复制重叠 XFAST(Extended Replica Folding Acquisition Search Technique)<sup>[4,5]</sup>算法和均值法<sup>[6]</sup>.

XFAST 算法是建立在被捕获伪码的优良自相关特性基础上,码的自相关性能越好,则处理效率越高. XFAST 算法利用了码的子序列的互相关特性,它的原理是,根据接收信号的伪码序列长度(设为  $L$ ),在扩展  $M$  段的情况下,需要产生长度为  $M \times L$  的本地伪码序列,将其分成  $M$  个长度为  $L$  的子码序列,并将  $M$  个子码序列进行叠加处理,进一步将此叠加处理的序列与接收信号进行循环相关处理,当出现高于判决门限的相关峰值时,分别将  $M$  个子码序列与接收信号进行循环相关处理,进而判断出接收信号中的码元所在的具体子码序列及其确切位置. 这样,利用  $M$  个子码序列,FFT 计算量可以减小  $M$  倍,同时还将时间不确定范围扩大到  $M$  倍. 由于接收信号中的码元和那些从其它区段重叠过来的码元互相关性很小,因此产生很小的背景噪声,在轻微降低信噪比和产生峰值多值性的代价下,使用码重叠可以加快计算. 然而,这个倍数不能无限制地增加,因为这会影响互相关特性.

均值法是以循环相关的理论为基础而提出的一种快速 P 码直接捕获算法. 它的原理是,将接收信号伪码序列中的每  $i$  个点依次进行均值处理构成新的序列,本地伪码序列也进行同样的处理构成新的序列,进而两个新的序列进行循环相关处理,当出现高于判决门限的相关峰值时,就可以判断出接收信号中的码元所在的具体均值码段进而确定其确切位置. 因此,在同样的 FFT 计算量下,可将时间不确定范围扩大到  $i$  倍. 但是,如果均值的点数越多,它所引入的噪声就会越大,峰值检索的性能越差. 因此,为了满足信噪比要求和进行有效计算,均值的点数不能过多,也就限制了时域的检索范围.

## 2.2 频率搜索

完成多普勒频移的搜索,最简单的方法就是在不同的本地载波偏移下分别进行捕获验证. 这种方法是在时域中按顺序来完成的,属于时域多普勒搜索技术. 很显然,此法增加了伪码捕获的搜索量,而且在高动态环境下,将使电路捕获速度变得非常慢.

对于多普勒频移,还可以通过 FFT 进行频域多普勒搜索. 基本原理是,时域复指数相乘等效于频域偏移,式(1)所示.

$$g(t) \exp(j2\pi f_d t) \stackrel{\text{FFT}}{\Leftrightarrow} G[j(f - f_d)] \quad (1)$$

该方法只需对接收信号数据进行一次 FFT 变换,然后根据时域复指数相乘等效于频域偏移的原理,通过移动其频域数据序列产生各多普勒补偿序列. 多普勒补偿的精度由 FFT 变化的频率分辨率决定. 对于采样频率为  $f_s$ 、采样点数为  $N$  的情况,多普勒补偿的精度为  $f_s/N$  (Hz). 可见,该方法不需要在各个本地载波频率偏移下分别进行接收信号数据和本地信号数据的 FFT 变换,从而简化了计算过程,而且节省了域变换处理的计算量. 因此可以提高多普勒补偿的速度. 各多普勒补偿可以通过移位同时产生,因此补偿电路具有一定的并行性. 如果补偿后的 IFFT 变换也能同时并行完成,即可实现多普勒补偿的完全并行化,从而可以极大地缩短处理时间.

## 3 一种新的频域 P 码直接捕获算法

为了进一步提高 P 码的捕获效率,我们在研究 XFAST 算法和均值法的基础上,将两种算法有机地结合起来完成码元搜索,并通过频域多普勒搜索方法来完成频率搜索. 算法流程图及描述如下:

Step1 接收的 GPS 信号(经中频处理)经正交双通道后,以适当采样频率  $f_s$  进行 A/D 采集、缓存.

Step2 生成本地伪码.

Step3 选取长度为  $L$  的  $I$  支路接收 P 码样本和  $Q$  支路接收 P 码样本,分别记作  $G_I$  和  $Q_O$ ; 然后,将这两路信号构成时域复采样序列,记作  $G$ ; 对  $G$  进行均值处理,每  $i$  个值进行平均运算,从而获得长度为  $k$  的新样本序列,记作  $G$ .

Step4 选取长度为  $M \times L$  的本地伪码序列,记作  $F$ ,以每段为  $L$  个样本的大小进行复制重叠,重合部分进行算术相加,获得长度为  $L$  的新序列,记作  $F$ ; 对  $F$  进行每  $i$  个样本的均值运算,获得长度为  $k$  的新的本地伪码序列,记作  $F$ .

Step5 进行  $G$  的 FFT 运算,并取复共轭,获得新的序列,记作  $FG$ . 然后,根据多普勒频移的搜索范围,将  $FG$  进行  $2d+1$  次循环移位,产生  $2d+1$  个多普勒补偿序列.

Step6 进行  $F$  的 FFT 运算,获得  $F$  的 FFT 变换序列,记作  $FF$ .

Step7 将  $FF$  分别与多普勒补偿序列进行乘法运算,完成 IFFT.

Step8 对 Step7 中的结果值进行取大操作,并记录最大相关峰值、最大相关峰所在位置  $m$  及其所对应的多普勒补偿序列  $n(-d \ n \ d)$ . 此时,可以获得最佳多普勒补偿序列  $FG_n$  以及最佳多普勒补偿值  $f_s \times n/L$  (Hz).

Step9 若 Step8 中的最大值小于门限,则重新选取本地伪码序列重复 Step4 到 Step9 的运算.

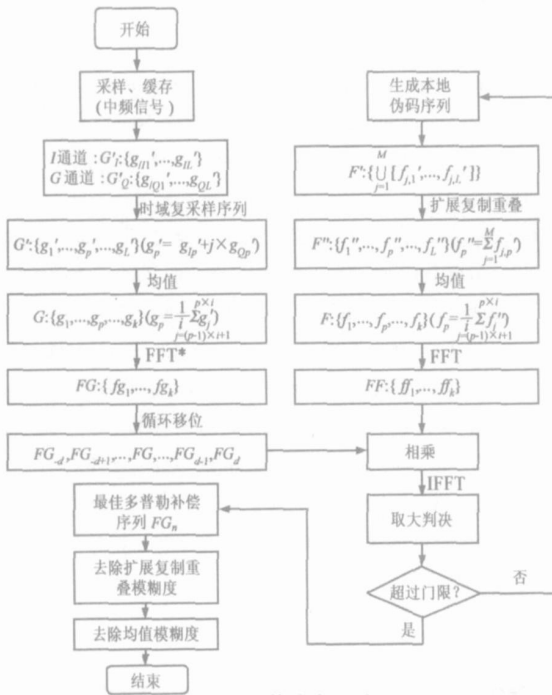


图 1 算法流程图

Step10 为了增加码的搜索范围,提高捕获效率,我们对接收的 P 码信号进行了均值的处理,对本地伪码进行了扩展复制重叠、均值的处理,因此最大相关峰值对应的位置  $m$ ,是一个相对序列位置,必须通过“去除位置模糊度”操作,获得确切的峰值位置。其中,“去除位置模糊度”包括“去除扩展复制重叠模糊度”和“去除均值模糊度”。

Step11 “去除扩展复制重叠模糊度”的目的在于判定该相关峰值出自第几个子序列。将进行重叠的  $M$  个子序列分别进行每  $i$  个样本的均值运算,获得  $M$  个序列,然后,这  $M$  个序列分别与  $FG_n$  进行相关运算,获得产生真实相关峰值的子序列  $s$ 。

Step12 “去除均值模糊度”的目的在于判定最终的接收 P 码的位置。将本地伪码序列延负方向(序列点序号减少的方向)移动  $(m - 1) \times i$ ,得到新的样本序列  $F_1$ ,对  $F_1$  进行 FFT;对  $G$  进行 FFT,并取复共轭,然后进行  $n (-d \ n \ d)$  次循环移位;将上述结果进行乘法运算,完成 IFFT,此时峰值位置为  $m_1$ ,于是可以获得最终的确切相关峰值位置,即:  $(s - 1) \times L + m \times i + m_1 - i$ 。

#### 4 算法测试评估

在 Windows 平台下,使用 MATLAB 仿真环境对本文的新算法进行了仿真。就 P 码的产生机理而言,遵照 GPS-ICD-200C 来实现。

在实验中,新算法的参数选取为:采样频率  $f_s$  为 10.23MHz、选取的接收信号样本长度  $L$  为 102400、扩展复制重叠段数  $M$  为 2、均值点数  $i$  为 20、FFT 点数  $k$  为

5120。此时,一次搜索范围可达 204800 个码元,多普勒补偿的步进量为 100Hz。

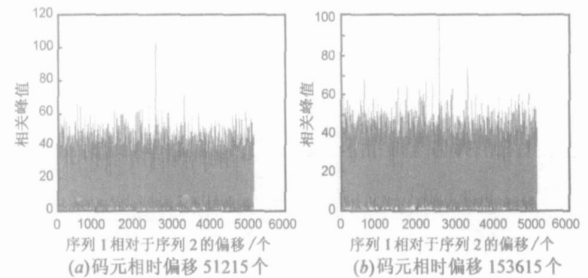


图 2 不同码元偏移下的相关峰值

图 2 (a) 和图 2 (b) 分别为接收信号 P 码相对于本地伪码序列偏移 51215 个码元和 153615 个码元的情况下,接收信号时域复采样序列经过均值处理后的序列(称为序列 1)与本地伪码序列经过扩展复制重叠和均值处理后的序列(称为序列 2)进行循环相关后的相关峰值。当接收信号 P 码相对于本地伪码序列偏移 51215 个码元时,接收信号起始码元应该落在第一个扩展段内(对应位置为 51215),由于均值点数  $i$  为 20,因此,序列 1 的起始位置应该与序列 2 的 2561 处对应,从图 2 (a) 中可以看出在 2561 处具有明显的相关峰值。当接收信号 P 码相对于本地伪码序列偏移 153615 个码元时,接收信号起始码元应该落在第二个扩展段内(对应位置为 51215),由于均值点数  $i$  为 20,因此,序列 1 的起始位置应该与序列 2 的 2561 处对应,从图 2 (b) 中可以看出在 2561 处具有明显的相关峰值。因此,可以有效地进行捕获判决,完成码元的搜索。

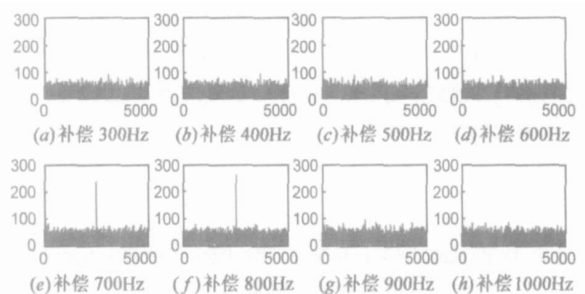


图 3 不同多普勒补偿下的相关峰值

图 3 (a) ~ (h) 为在多普勒频移为 750Hz 的情况下,使用不同的多普勒补偿序列进行相关的相关峰值。可见,当多普勒补偿量为 800Hz 时,相关效果最佳,这时的多普勒频移的估计偏差为 50Hz,因此,可以有效地完成多普勒频移的搜索。仿真结果表明,本文新算法可以有效地完成 P 码的捕获。

进一步,在 Windows 平台下,使用 MATLAB 仿真环境对 XFAST 算法、均值法和本文的新算法进行了仿真。在偏移 100000 个码元,多普勒频移为 3314Hz 的情况下进行比较。表 1 为三种算法在对应参数相同的情况下的比较,可见,相比 XFAST 算法,在同等参数 ( $k = 5120$ ,

$M=2$ ) 的情况下, 本文新算法的一次码搜索范围提高 20 倍; 相比均值法, 在同等参数 ( $k=5120, i=20$ ) 的情况下, 本文新算法的一次码搜索范围提高 2 倍; 相比直接使用 FFT 进行相关, 在 FFT 计算量相同的情况下, 一次码搜索覆盖范围可以提高 40 倍。

表 1 对应参数相同情况下的比较

算法	参数	平均捕获时间(s)
本文算法	$k=5120, M=2, i=20$	17.875
XFAST 算法	$k=5120, M=2$	1878.75
均值法	$k=5120, i=20$	327.687

表 2 一次搜索范围相同情况下的比较

算法	参数	平均捕获时间(s)
本文算法	$k=5120, M=2, i=20$	17.875
XFAST 算法	$k=20480, M=10$	412.465
均值法	$k=10240, i=20$	424.312

表 3 各算法最优情况下的比较

算法	参数	平均捕获时间(s)
本文算法	$k=5120, M=2, i=20$	17.875
XFAST 算法	$k=10000, M=4$	395.969
均值法	$k=5120, i=20$	327.687

表 2 和表 3 分别为三种算法在一次搜索范围相同的情况和各种算法最优的情况下的比较。从统计出的平均捕获时间可以看出, 本文新算法的捕获速度远远高于 XFAST 算法和均值法。因此, 本文新算法可以有效地提高 P 码的捕获效率。

## 5 结论

本文从直接信号捕获算法研究的角度出发, 提出了一种基于 P 码的频域直接捕获算法, 该算法可以有效地提高 P 码的捕获效率, 对发展我国自己的卫星定位系统提供了技术基础。

## 参考文献:

- [1] E D Kaplan. Understanding GPS Principles and Applications [M]. Boston: Artech House, 1996.

- [2] 任亚安, 王鹏, 许卫东, 等. GPS 中 P(Y) 码直接捕获技术的研究进展[J]. 全球定位系统, 2003, (1): 2-7.
- [3] C Yang. Fast code acquisition with FFT and its sampling schemes [A]. Proceedings of the 1996 National Technical Meeting [C]. Kansas City: The Institute of Navigation, 1996. 1729-1734.
- [4] C Yang, J Vasquez, J Chaffee. Fast direct P(Y)-code acquisition using XFAST [A]. Proceedings of ION GPS-99 [C]. Nashville: The Institute of Navigation, 1999. 317-324.
- [5] C Yang, J Chaffee, J Abel, M Vasquez. Extended replica folding for direct acquisition of GPS P-code and its performance analysis [A]. Proceedings of ION GPS 2000 [C]. Salt Lake City: The Institute of Navigation, 2000. 2070-2078.
- [6] J Pang. Direct Global Positioning System P-Code Acquisition Field Programmable Gate Array Prototyping [D]. Ohio: Ohio University, 2003.

## 作者简介:



田明浩 男, 1977 年生于吉林省磐石市, 现为南京理工大学自动化系博士研究生。从事 GPS 技术、扩频通信方面的研究工作。  
E-mail: tianminghao01@163.com



冯永新 女, 1974 年生于辽宁省沈阳市, 博士后, 沈阳理工大学副教授, 主要从事 GPS 技术、扩频通信、信息对抗、移动无线网络等方面的研究工作。E-mail: fengyongxin@263.net

潘成胜 男, 1962 年生于江苏宜兴, 博士, 博士生导师。主要研究方向为 GPS 技术、扩频通信、网络管理等。  
E-mail: pancs@sohu.com