

文章编号:1001-893X(2012)09-1469-05

P 码直接捕获方法信噪比损失分析*

王江安¹, 刘鹏举², 张会锁²

(1. 长安大学 信息工程学院, 西安 710064; 2. 西安飞行自动控制研究所, 西安 710065)

摘要:与传统捕获方法相比, P 码信号直接捕获具有很强的抗干扰能力, 因此近年来国内外对 P 码直接捕获方法研究也很多, 这些方法大多是基于均值法和 XFAST 方法进行计算量的缩减, 但计算量缩减对于捕获效果会有一些影响, 而对于捕获影响的定量分析以及捕获方法所适用的范围很少进行讨论。通过理论分析和仿真实验得出了典型的两种 P 码直接捕获方法中参数设置值和信噪比损失的关系, 为这两种 P 码直接捕获方法的适用应用范围提供了一定的理论依据, 并对基于这两种的其他捕获方法的应用范围提供了参考。

关键词:全球定位系统; P 码; 直接捕获; 扩频增益; 信噪比损失

中图分类号: TN967; TN911 **文献标志码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.09.011

Analysis of SNR Loss in P-code Direct Acquisition Methods

WANG Jiang-an¹, LIU Peng-ju², ZHANG Hui-suo²

(1. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: Compared with traditional acquisition methods, P-code direct acquisition possesses a strong anti-jamming capability. Therefore, there have been many new computation reduction methods for P-code direct acquisition which are based on the XFAST (Extended Replica Folding Acquisition Search Technique) and average method. The computation reduction has some effect on signal acquisition, but there is no quantitative analysis on the effect and the application filed of P-code direct acquisition methods. Through theoretical analysis and simulation, the relationship between parameters setting and the SNR (Signal-to-noise Ratio) loss of the two typical direct acquisition methods are obtained, which is useful in application field selection, and also has the reference value for other P-code direct acquisition design.

Key words: GPS; P-code; direct acquisition; spreading gain; SNR loss

1 引言

全球定位系统 (GPS) 能为用户提供标准定位服务 (SPS) 和精密定位服务 (PPS)^[1], PPS 能提供更为

精确的定位精度和授时精度。SPS 的提供是以 C/A 码为基础, 而 PPS 的提供是以 P 码为基础。一般 P 码的捕获是以 C/A 码的捕获为基础, 根据 C/A 码提供的信息对 P 码信号进行捕获, 但是 C/A 码容易受到干扰, 因此对 P 码的直接捕获就变得非常重要。

* 收稿日期: 2012-04-11; 修回日期: 2012-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61101215); 航空科学基金项目 (20100818020, 20100818022); 中央高校基本科研业务费 (CHD2011JC084, CHD2011JC049, CHD2011JC014); 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2011JQ8014)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61101215); Aeronautical Science Foundation of China (No. 20100818020, 20100818022); Fundamental Research Funds for the Central Universities (CHD2011JC084, CHD2011JC049, CHD2011JC014); The Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province (2011JQ8014)

P 码是一种周期长、速率高的伪随机码，直接捕获的难度较大，需要很长的捕获时间和巨大的运算量。

目前，国外对 P 码直接捕获的算法进行了很多研究。1997 年，J. B. Lozow 对非相干检测时采用串行和并行搜索的 P 码捕获进行了分析，给出了平均捕获时间^[2]。对于 P 码的直接捕获方法可以大致分为两类：一是时域捕获算法，Robert Wolfert 和 Steve Chen 在 1998 年提出了用 Y-EXPRESS 处理器实现 P 码直接捕获的方法，该方法主要基于大规模并行相关器实现^[3]；二是频域捕获算法，Chun. Yang 在 1999 年提出了 XFAST(Extended Replica Folding Acquisition Search Technique)实现 P 码的快速捕获方案^[4]，使得用 FFT 进行 P 码的捕获成为可能，XFAST 在降低直接捕获复杂度的同时却引入了较大的多址干扰。Chun Yang 在 2001 年又提出了序列块搜索算法^[5](Sequential Block Search Technique)，并对利用 FFT 实现短周期码、长周期码以及无周期码的捕获方法进行分类和归纳^[4-5]。Jing Pang 在 2003 年提出了直接平均和重叠平均算法^[6]。这些算法的本质都是通过接收数据和本地产生数据进行分段或连续叠加、累加，在可接受的 FFT 算法长度的基础上，提高码搜索速度。

近年来，国内对 P 码直接捕获方法研究也很多：通过将 XFAST 方法和直接平均法相结合，提高了捕获效率^[7-9]；用小波变换代替 FFT 进行时域到频域计算，可以降低数据量，大致估算出多普勒频率^[10]；还有大量研究集中在对现有算法的具体实现上^[11-12]，但很少有文章详细叙述 XFAST 方法、直接平均法的参数设置与应用范围之间的关系。

2 系统描述

2.1 信号接收

根据 GPS 系统的 ICD 文件^[1]，L1 频段的 P 码信号的发射等效全向辐射功率(Effective Isotropic Radiated Power, EIRP)为

$$EIRP_{L1-P} = 239.32 \text{ W} = 23.8 \text{ dBW} \tag{1}$$

GPS 信号是从距地面 20 000 km 的低轨道(Low Earth Orbit, LEO)卫星上发送到地面上来的，其自由空间衰减为

$$F = \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 = \left(\frac{0.19}{4\pi \times 2 \times 10^7}\right)^2 \approx 5.73 \times 10^{-19} \approx 182.4 \text{ dB} \tag{2}$$

以上为真空所获得的结果，实际大气层的衰减约为 $A \approx 2 \text{ dB}$ ，因此 L1 频段 P 码到达地面的信号强度为

$$P_{L1-P} = EIRP_{L1-P} - F - A = 23.8 - 182.4 - 2.0 = -160.6 \text{ dBW} = -130.6 \text{ dBmW} \tag{3}$$

影响 GPS 噪声的主要因素是环境温度和设备噪声，因此统一化 GPS 接收机的噪声温度一般可以等效为 513 K，因此 GPS 接收机的噪声密度为

$$N_0 = kT = 10 \lg(1.38 \times 10^{-23} \times 513) = -201.5 \text{ dBW/Hz} = -171.5 \text{ dBmW/Hz} \tag{4}$$

可知 P 码信号的噪声功率

$$\begin{aligned} P_{N_0-P} &= kTB = 10 \lg(1.38 \times 10^{-23} \times 513 \times 2 \times 10^7) = \\ &= -201.5 + 73 = -128.5 \text{ dBW} = \\ &= -98.5 \text{ dBmW} \end{aligned} \tag{5}$$

由式(3)知道 P 码信号到达地面的信号强度，因此载噪比为

$$\frac{P_{L1-P}}{N_0} = -130.6 - (-171.5) = 40.9 \text{ dB/Hz} \tag{6}$$

信噪比为

$$\frac{P_{L1-P}}{P_{N_0-L1-P}} = -130.6 - (-98.5) = -32.1 \text{ dB} \tag{7}$$

信号经过射频模块进行下变频和 A/D 转换，变成数字中频采样信号，交由基带模块进行处理。

2.2 基带解扩

解扩过程其实也是一种低通滤波过程，使用相关器和数字混频器实现，如图 1 所示。

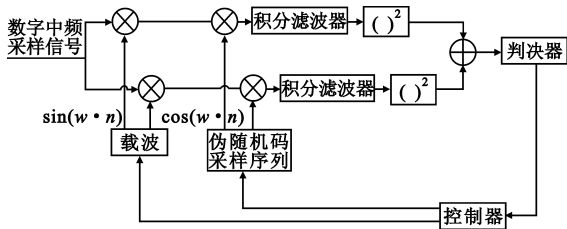


图 1 相关器框图
Fig.1 Block diagram of correlator

白噪声在系统滤波和解扩过程中 $P = kTB$ 依然成立，设在时间段 T ，信号功率为

$$\begin{aligned} P_{\text{SIN}} &= \frac{V_{S(1)}^2 + V_{S(2)}^2 \cdots + V_{S(m \times n)}^2}{m \times n} = \\ &= \frac{\bar{V}_S^2}{m \times n} = \bar{V}_S^2 \end{aligned} \tag{8}$$

其中, $|V_{S(1)}| \approx |V_{S(2)}| \approx \cdots \approx |V_{S(m \times n)}| \approx |V_S|$ (短时间内信号功率变化不明显)。

噪声 $N_1, N_2 \cdots, N_{m \times n}$ 功率为

$$P_{\text{NIN}} = \frac{V_{n(1)}^2 + V_{n(2)}^2 \cdots + V_{n(m \times n)}^2}{m \times n} =$$
$$E(m \times n \cdot \frac{V_{n(k)}^2}{m \times n}) =$$
$$E(V_{n(k)}^2) = \delta^2 (\text{因为白噪声均值为 } 0) \quad (9)$$

解扩前, 信噪比为 $\frac{\bar{V}_S^2}{\delta^2}$ 。进行 m 长码元解扩, 则

信号功率

$$P_{\text{SOUT}} = \frac{\sum_{j=1}^n (\sum_{i=1}^m V_{S(i)})^2}{n} = m^2 \times n \frac{\bar{V}_S^2}{n} = m^2 \times \bar{V}_S^2 \quad (10)$$

进行 m 长码元解扩, 则噪声功率

$$P_{\text{NOUT}} = \frac{\sum_{j=1}^n (\sum_{i=1}^m V_{N(i)})^2}{m \times \delta^2} = n \times \frac{E((\sum_{i=1}^m V_{N(i)})^2)}{n} =$$
$$m \times \delta^2 \quad (11)$$

解扩后, 信噪比为 $m \cdot \frac{\bar{V}_S^2}{\delta^2}$, 因此扩频带来的增益是 $10 \lg m$ 。

3 直捕算法叙述

3.1 XFAST 法原理

XFAST 方法利用了码子序列的互相关特性, 根据接收信号的伪码序列长度 (设为 L_1), 在扩展 M 段的情况下, 需要产生长度为 $M \times L_1$ 的本地伪码序列, 将其分成 M 个长度为 L_1 的子码序列, 并将 M 个子码序列进行叠加处理, 将此叠加处理的序列与接收信号进行循环相关处理。如图 2 所示, 假设选取接收序列段的长度为 $L_1 = 4$, 表示为 $[a, b, c, d]$, 其持续时间为 T , 信号到达时间的估计值为 $\hat{t}$, 不确定度为 Δ 。为了覆盖整个不确定区间, 选择本地 P 码产生时间为区间 $(\hat{t} - \Delta, \hat{t} + \Delta)$, 本地伪随机码可以表示为 $[a_i, b_i, c_i, d_i]$, 其中 $i = 1, 2, \cdots, M$ 。本地 P 码折叠平均后的序列为 $[\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}]$, 可表示为

$$[\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}] = [\sum_{i=1}^M a_i, \sum_{i=1}^M b_i, \sum_{i=1}^M c_i, \sum_{i=1}^M d_i] \quad (12)$$

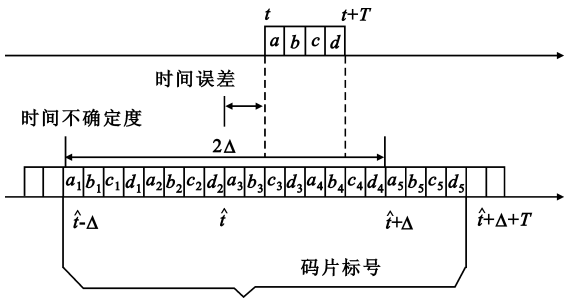


图 2 XFAST 运算原理
Fig.2 XFAST operation

3.2 均值法

Jing Pang 在 2003 年的毕业博士论文中提出的均值法^[3], 是以循环相关的理论为基础的一种快速 P 码直接捕获算法, 将接收信号伪码序列中的每 N 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码区间, 进而确定其确切位置。接收信号经过下变频处理后的数字化中频信号序为 $G_1 = [S_1, S_2, \cdots, S_{m \times n}]$, 对其进行均值处理, 进行 L_2 点平均后

$$G_2 = [\frac{\sum_{i=1}^{L_2} S_i}{L_2}, \frac{\sum_{i=L_2+1}^{2 \times L_2} S_i}{L_2}, \cdots, \frac{\sum_{i=(K_2-1) \times L_2+1}^{K_2 \times L_2} S_i}{L_2}] \quad (13)$$

$$K_2 \times L_2 = m \times n, K_2, L_2, m, n \in N \quad (14)$$

本地产生的随机码序列为 $G_3 = [P_1, P_2 \cdots, P_{m \times n}]$, 进行 L_2 点平均后

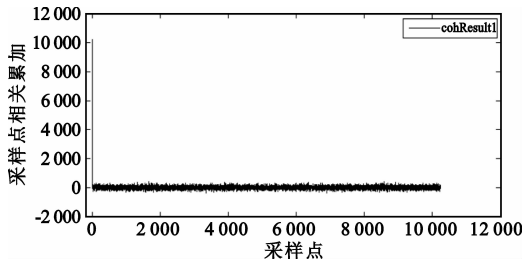
$$G_4 = [\frac{\sum_{i=1}^{L_2} P_i}{L_2}, \frac{\sum_{i=L_2+1}^{2 \times L_2} P_i}{L_2}, \cdots, \frac{\sum_{i=(K_2-1) \times L_2+1}^{K_2 \times L_2} P_i}{L_2}] \quad (15)$$

对 G_2 和 G_4 进行相关运算, 找出相关峰值, 进一步确定具体码相位。

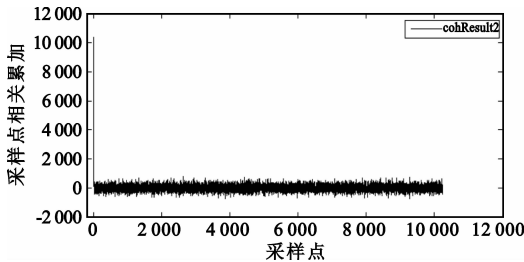
4 仿真与分析

对 XFAST 方法和平均法进行仿真实验, 研究其捕获特性, 因为国内外很多方法均是以这两种方法为基础进行改进的。首先对 XFAST 方法进行仿真, 并和逐点相关结果进行比较, 如图 3 所示, 进行 4 组叠加, 可以看出 XFAST 方法虽然可以节约计算量, 并得到相同高度的相关峰值, 但是相关后会引入噪声功率的增加。XFAST 方法和逐点相关方法相比, 损失了一定的相关信噪比。对于平均法, 采用 20 点进行累加

平均,如图 4 所示,平均法相关结果和逐点相关结果进行比较,同样会得到相同高度的相关峰值,引起相关后噪声功率的增加,引起信噪比的损失。



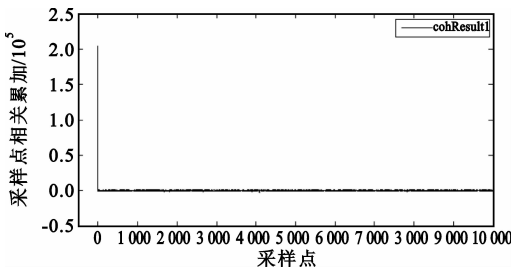
(a)逐点相关结果



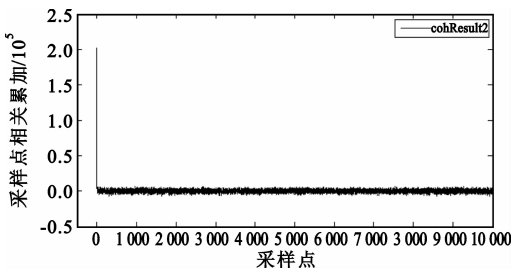
(b)XFAST 相关结果

图 3 逐点与 XFAST 的相关结果

Fig.3 Correlation result of point by point and XFAST



(a)逐点相关结果



(b)均值法相关结果

图 4 逐点与均值法的相关结果

Fig.4 Correlation result of point by point and average method

从图 3 和图 4 可以看出,XFAST 方法和平均法都是对中频采样信号和本地随机码序列先行进行一定的叠加处理,然后再进行相关运算。这样可以减少相关次数,节约计算资源,以实现用低成本器件进

行 P 码直接捕获的目标,但是缺点是会降低捕获时的信噪比。XFAST 方法中参数 M 和平均法中参数 L_2 与信噪比损失的关系作者并没给出,这就影响到这两种方法的应用。信噪比的损失是由于在相关前对采样信号和本地随机码信号进行了预先处理,组合后的伪随机码的扩频增益有所降低。XFAST 方法损失的信噪比和参数 M 的关系如图 5 所示,平均法损失的信噪比和参数 L_2 的关系如图 6 所示。由图 5 和图 6 的仿真结果可以得出,随着 XFAST 方法的参数 M 以及平均法的参数 L_2 的增加,系统由于解扩所造成的信噪比损失将会随之增加,这就限制了这两种方法的应用范围。

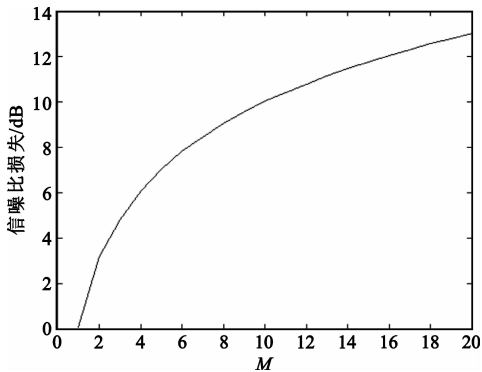


图 5 M 与信噪比损失的关系

Fig.5 The relationship between M and SNR loss

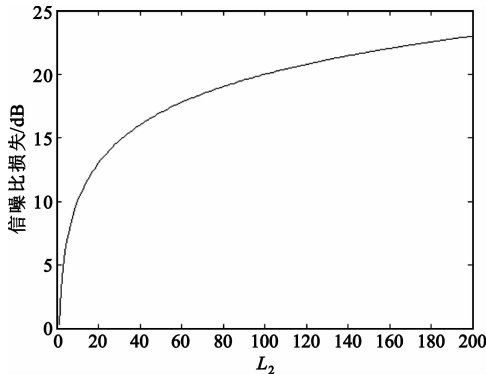


图 6 L_2 与信噪比损失的关系

Fig.6 The relationship between L_2 and SNR loss

5 结 论

国内外出现很多 P 码直接捕获的方法,但基本上是以 XFAST 和均值法为基础,在实现和应用过程中并没有考虑直捕方法本身造成的信噪比损失对于实际捕获的影响。XFAST 和均值法虽然可以实现快

速直接捕获 P 码信号,但是会造成一定的信噪比损失。本文通过理论分析并实验仿真给出了两种方法选择的参数与信噪比损失的关系,为这两种 P 码直接捕获方法所适用的实际范围选定提供了一定的理论依据。

参考文献:

- [1] ICD-GPS-200C[S].
- [2] Lozow J B. Analysis of Direct P(Y)-Code Acquisition[J]. Journal of ION,1997,44(1):89-97.
- [3] Wolfert R, Chen S, Kohli S, et al. Direct P(Y)-Code Acquisition under a Jamming Environment[C]//Proceedings of 1998 IEEE Position Location and Navigation Symposium. Palm Springs, CA:IEEE,1998:228-235.
- [4] Yang C, Vasquez M J, Chaffee J. Fast Direct P(Y)-Code Acquisition Using XFAST [C]//Proceedings of ION GPS 1999. Nashville, TN:ION,1999:317-324.
- [5] Yang C, Chaffee J, Abel J, et al. Extended Replica Folding for Direct Acquisition of GPS P-Code and Its Performance Analysis[C]//Proceedings of ION GPS 2000. Salt Lake City, UT:ION,2000:2070-2078.
- [6] Jing Pang. Direct global positioning system P-code acquisition field programmable gate array prototyping[D]. Athens, Ohio: Ohio University, 2003:21-40.
- [7] 王文静. GPS 信号 P 码直接捕获技术的研究与改进 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007:49-57.
WANG Wen-jing. Research and improvement on the technology for GPS P-code direct acquisition [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2007:49-57. (in Chinese)
- [8] Xu Ying, Wang Ju, Wu Siliang. Improved direct P code acquisition technique[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics,2009, 20(5):948-953.
- [9] Wang Na, Qin Yong, ZHANG Bang-ning. Direct and Rapid P code Acquisition Technique [C]//Proceedings of 2007 International Symposium on Communications and Information Technologies. Sydney, NSW:IEEE, 2007:1022-1024.
- [10] 徐庆,王开华,徐继麟.基于小波处理的 P 码直捕及实现研究[J].系统工程与电子技术,2007,29(4):536-539.
XU Qing,WANG Kai-hua, XU Ji-li. Research for direct P-code acquisition based on wavelet filtering[J]. Systems Engineering and Electronics,2007,29(4):536-539. (in Chinese)
- [11] 黄飞,冯永新. GPS P 码捕获处理器中信号传递的策略与实现[J]. 沈阳理工大学学报,2007,26(2):75-79.
HUANG Fei, FENG Yong-xin. The Strategy and Implementation of Signal Transferring in Global Positioning System P Code Acquisition[J]. Transactions of Shenyang Ligong University,2007,26(2):75-79. (in Chinese)
- [12] 张新波,张扬,刘田. GPS 接收机 P(Y)直捕方法研究 [J]. 电子科技大学学报,2008,37(增 1):62-65.
ZHANG Xin-bo, ZHANG Yang, LIU Tian. Research on GPS Long-Code-Acquisition Method[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China,2008,37(s1):62-65. (in Chinese)
- [13] 刘芳,冯永新. 基于新算法的 P 码序列捕获处理器设计与实现 [J]. 系统仿真学报,2008,20(10):2659-2665.
LIU Fang, FENG Yong-xin. Design and Actualize of P Code Sequence Acquisition Processor Based on New Algorithm [J]. Journal of System Simulation,2008,20(10):2659-2665. (in Chinese)

作者简介:

王江安(1981—),男,陕西人,2010 年于西安电子科技大学获博士学位,现为讲师,主要研究方向为惯性与卫星导航接收机基带算法;

WANG Jiang-an was born in Shaanxi Province, in 1981. He received the Ph. D. degree from Xidian University in 2010. He is now a lecturer. His research concerns SINS and GNSS receiver baseband algorithm.

Email: jawang@chd.edu.cn

刘鹏举(1972—),男,陕西人,2005 年于西北工业大学获硕士学位,现为高级工程师,主要研究方向为导航与控制;

LIU Peng-ju was born in Shaanxi Province, in 1972. He received the M. S. degree from Northwestern Polytechnical University in 2005. He is now a senior engineer. His research concerns navigation and flight control.

张会锁(1972—),男,陕西人,2000 年于西安电子科技大学获硕士学位,现为高级工程师,主要研究方向为惯性与卫星组合导航算法。

ZHANG Hui-suo was born in Shaanxi Province, in 1972. He received the M. S. degree from Xidian University in 2000. He is now a senior engineer. His research concerns SINS and GNSS integrated navigation algorithm.