

GPS L2C 捕获算法研究及性能分析

李成军^{①②} 陆明泉^① 冯振明^① 张 祺^②

^①(清华大学电子工程系 北京 100084)

^②(中国人民解放军 91917 部队 北京 102249)

摘 要: L2C 是 GPS 现代化 Block IIR-M 卫星发射的一个新民用信号。为了估计 GPS L2C 的捕获性能, 该文首先研究了 GPS L2C 捕获算法, 即本地产生的归零 CM, 利用 FFT 快速实现短码的捕获后, 利用短码和长码固定的相位关系实现长码的捕获, 仿真验证, 该方法能够快速实现 L2C 的捕获; 然后利用统计理论分析了 L2C 码捕获性能, 建立了确定接收机抗干扰能力一般方法, 该方法可以运用到其它 GNSS 信号干扰性能的分析中去。

关键词: 卫星通信; L2C; 信号捕获; 时分复用; 检测概率; 抗干扰容限

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)02-0296-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2008.01850

Study on GPS L2C Acquisition Algorithm and Performance Analysis

Li Cheng-jun^{①②} Lu Ming-quan^① Feng Zhen-ming^① Zhang Qi^②

^①(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

^②(Unit 91917 of PLA, Beijing 102249, China)

Abstract: L2C is a new civilian's signal, broadcast by the modernized GPS Block IIR-M satellites. In order to access acquisition performance of GPS L2C signal, the algorithm of L2C signal is discussed firstly in the paper. That is, after acquisition of CM code by using locally generated Return to Zero (RZ) CM code and FFT, the fixed relationships between CM code and CL code are used to realize acquisition of CL code. Simulation shows that this method can complete acquisition of L2C quickly and can be applied to L2C software receiver. Then the performance of this acquisition algorithm is analyzed by using statistical theory. A general method of anti-jamming capability determination is constructed that can be applied into the analysis of the anti-jamming tolerance of other GNSS signals.

Key words: Satellite communication; L2C; Signal acquisition; Time multiplexes; Detection probability; Anti-jamming tolerance

1 引言

自从 1999 年美国提出 GPS 现代化计划以来, 已经发射了 8 颗现代化的 GPS Block IIR-M 卫星^[1], 每颗卫星将发射第 2 个民用信号 L2C 和两个新的军用信号 L1 M 和 L2 M。L2C 信号采用了特殊的民用中等长度码(CM)和民用长码(CL)时分复用的方式, 使得 L2C 能够实现在室内、林荫路上以及微弱信号条件的捕获。同时, 对于日益增长的双频用户来说可以利用两个频点的民用信号消除电离层误差和快速解决相位模糊度。另外采用更为紧凑的导航电文帧格式以及分离的有数据通道和无数据通道使得 L2C 信号比传统的 L1 C/A 码信号具有更多的优势, 必将会受到广泛的应用。

捕获是 GPS 信号接收的重要环节, 利用 2 维搜

索过程实现伪码和载波的粗同步, 由于 L2C 采用特殊的信号结构, 必须设计全新的捕获算法才能获得性能上的优势。本文着重研究 GPS L2C 信号的捕获算法, 是在捕获 CM 的基础上, 利用 CM 和 CL 之间固定的相位关系实现 CL 捕获, 并分析了其捕获性能和抗干扰能力。本文的第 2 节主要介绍了 L2C 信号的构成、CM 和 CL 的自相关和互相关特性。第 3 节讨论了针对长码和中码时分复用的 L2C 信号的特殊捕获算法, 仿真验证了算法正确性。第 4 节根据统计检测理论分析了 L2C 信号的捕获算法性能。第 5 节分析了捕获算法的抗干扰能力。论文建立了分析算法抗干扰能力的一般步骤, 得到的一些结论对设计高可靠性的接收机具有一定的指导意义, 并可以应用到其它 GNSS 信号的分析中去。

2 L2C 信号的构成

L2C 信号的扩频码由两个独立的码序列组成,

2008-12-31 收到, 2009-11-12 改回

国家 863 计划项目(2006AA701108)资助课题

通信作者: 李成军 Li-cj05@mails.tsinghua.edu.cn

包括 L2C CM 和 L2C CL, CM 码长 10230, 码速率为 511.5 kbps, 周期长度则为 20 ms。CL 码长 767250, 码速率为 511.5 kbps, 周期长度则为 1.5 s。一个 CL 周期中包含 75 个 CM 码周期。L2C 信号组成框图如图 1 所示^[2]。25 bps 的导航电文经过卷积编码($r=1/2, k=7$)变为每秒 50 个符号的符号序列。50 bps 的符号序列同 CM 码进行模二加后, 同 CL 码发生器产生的 CL 进行码片复用, 利用复用后速率为 1.023 Mbps 码片对 1227.6 MHz 的载波进行 BPSK 调制, 从而产生射频 L2C 信号。

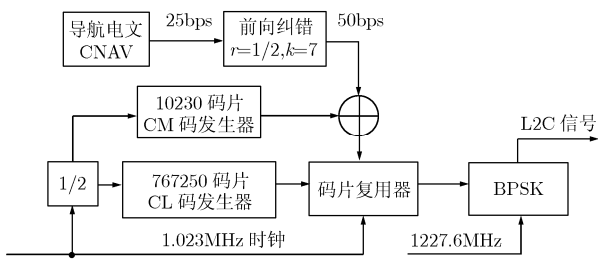


图 1 L2C 信号构成框图

L2C 信号的两个扩频码序列都是通过一个 27 位的移位寄存器截位产生的^[3], 每颗卫星对应不同的移位寄存器的初始状态和最终状态, 移位寄存器初始化后开始产生伪码, 通过判断移位寄存器的最终状态来重新初始化寄存器, 就是利用这种重新初始化的方法产生 10230 bit 的 CM 码和 767250 bit CL 码。伪码的自相关函数和互相关函数决定了伪码跟踪精度。图 2 是 37 颗卫星的 CM 码的最大自相关值(除零延迟点外, 以零点处相关值作归一化)和 C/A 码的最大自相关值比较图。从图中可以看出第 16 号卫星的最大自相关值为 -26.9 dB, 但是还是比 C/A 低 3 dB。

3 捕获算法

GPS M 捕获过程是一个 2 维搜索的过程^[4], 就是在频率域和码域的一定的不确定范围内, 将整个搜索范围划分为多个格(Cell), 每个格子上首先将信

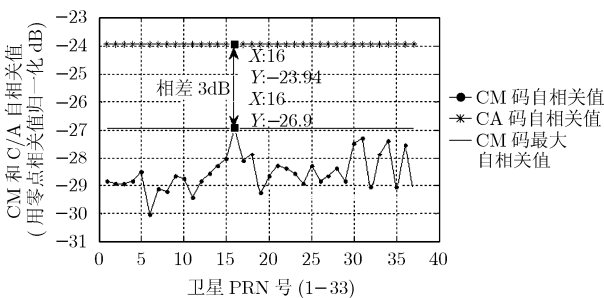


图 2 CM 码自相关值同 C/A 比较(以零点处相关值作归一化)

号同本地产生载波相乘剥离载波, 剥离载波后的信号同本地产生伪码进行相关求和, 对于固定积分时间的捕获方法, 还要通过 M 次非相干累加, 将累加后的结果同预先设定的门限相比较, 大于门限说明信号存在, 捕获成功, 不大于则说明信号不存在, 继续搜索下一格。

L2C 信号包括 CL 和 CM 两个伪码, 因此 L2C 码的捕获可以通过捕获 CL 或捕获 CM 来实现, 但是直接捕获 CL 是不可行的, 除非接收机对初始时间的不确定度有很好的估计^[5]。因此, L2C 接收机必须首先捕获和跟踪 CM 码, 一旦 CM 码捕获和跟踪成功后, 由 CM 与 CL 码之间的相位关系实现 CL 快速捕获和跟踪。每个 CL 周期中包含 75 个 CM 周期, 他们之间的相位关系如图 3 所示, 通过保存 75 个 CL 码相对相位间隔, L2C 接收机可以通过搜索这些位置来捕获 CL 码。接收机不能直接使用码片复用的 L2C 伪码作为本地复现码, 由于 CM 码上调制有导航电文, 而 CL 码上没有调制导航电文。在实现中, CL 码和 CM 码生成器产生 511.5 kbps 的伪码, 然后同零进行码片复用以产生 1.023 Mbps 的本地复现码, 在进行相关时利用零代替 CM 码或 CL 码主要是消除 CM 和 CL 互相关对相关结果的影响^[6], 本地产生 L2C 信号的跟踪码如图 4 所示。图 5 和图 6 是仿真 L2C 信号捕获的情况, 输入信号的载噪比为 -20 dB, 中心频率为 1.25 MHz, 采样率为 5 MHz, 频偏为 253 Hz, 码偏为 524134 个采样点, 积分时间为 20 ms, 频率格搜索步进 25 Hz, 码格搜索步进采样点。图 5 显示了首先捕获 CM 的 3 维图, 从图中可以看出清晰的相关峰, 横轴表示码片估计值, 纵轴表示频率估计值, 最高相关峰处的码片和频率估计值分别为 $C_e=24133$ 和 1249747 Hz, 频率估计值同实际信号中心频率相差 9.5 Hz。然后利用 CM 的码片估计值, 得到 75 个不同初始位置的 CL 码序列, 初始位置为 $C_e+(i-1) \times 10230, i=1:75$, 直接利用这 75 个 CL 码序列同输入信号作相关, 得到 75 个相关值中最大的就是 CL 所对应的码相位。图 6 显示了 75 个 CL 码相关值, 从图可看出第 6 个序列的相关值为最大, 因此 CL 码的码相位为 $C_e+(6-1) \times 10230=524133$, 同实际的码片只相差 1 个采样点, 达到了较好的捕获效果, 满足后续跟踪对捕获的要求。

4 捕获性能

GPS 信号捕获就是一个信号检测过程, 通过根据预设的虚警概率计算判决门限, 然后根据判决门限计算捕获性能, 如检测概率、捕获时间等^[7]。如果忽略扩频码之间的相关性以及射频前端的影响, 接

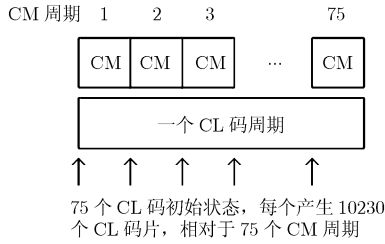


图 3 CM 和 CL 码相位关系

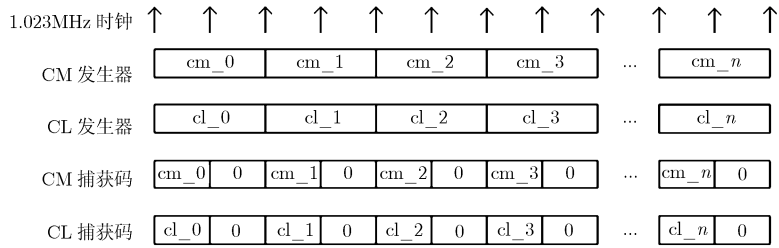


图 4 L2C 跟踪码

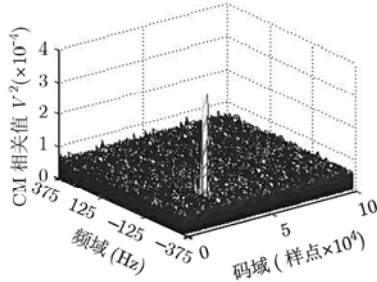


图 5 CM 捕获 3 维图

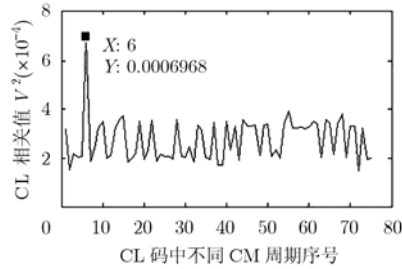


图 6 利用 CL 与 CM 的相位关系捕获 CL 码

收机捕获过程中即时相关器的同相输出和正交输出可以建模为^[8]

$$I_i = \text{sinc}(\pi\Delta f_i T) \sqrt{2 \frac{S}{N_0}} TR(\tau_i) D_i \cos(\Delta\phi_i) + \eta_{Ii} \quad (1)$$

$$Q_i = \text{sinc}(\pi\Delta f_i T) \sqrt{2 \frac{S}{N_0}} TR(\tau_i) D_i \sin(\Delta\phi_i) + \eta_{Qi} \quad (2)$$

其中 Δf_i 表示残留多普勒频率; T 表示预检测积分时间; S/N_0 表示载噪比; τ_i 表示估计时延同实际时延的差; $R(\tau_i)$ 表示本地伪码和输入信号伪码的自相关函数; D_i 表示导航电文; $\Delta\phi_i$ 表示估计载波相位同实际相位的差; η_{Ii} 表示同相噪声; η_{Qi} 表示正交噪声, 并且具有单位功率。

$$E(\eta_{Ii}^2) = E(\eta_{Qi}^2) = 1 \quad (3)$$

累加器输出中存在 $\text{sinc}(\pi\Delta f_i T)$ 项对后续处理会产生一定的影响。如果预积分时间为 1 ms, 频率搜索格等于 500 Hz, 因此最大的频率误差 Δf_i 在 $[-250 \text{ Hz}, +250 \text{ Hz}]$ 范围内, 相关器输出由于频率误差产生的最大衰减为 1 dB。选择伪码搜索速率为半个码片, 则相关器输出由于码片的误差产生的最大衰减为 2.5 dB。由于码和频率不确定, 整个功率衰减为 3.5 dB。

统计量为 $T = \sum_M (I_p^2 + Q_p^2)$ ^[8], 相关积分时间为 1 ms, $T_p = PT_s$, T_s 为采样率, M 为非相关累计次数, 假设检验过程叙述如下:

假设 H0 没有有用信号 如果不考虑伪码之间的互相关值, 此时的检测统计量为

$$T_0 = \sum_{k=1}^M [\eta_{Ii}^2(k) + \eta_{Qi}^2(k)] \quad (4)$$

其中 $\eta_{Ii}(k)$ 和 $\eta_{Qi}(k)$ 定义如式(1)和式(2)。 T_0 是 $2M$ 个自由度的 χ^2 分布。虚警概率为

$$P_{fa} = \Pr[T_0 > \text{Th}] = \int_{\text{Th}}^{\infty} p_{T_0}(y) dy = f(\text{Th})$$

根据设定的虚警概率 P_{fa} , 如果知道非相关累计次数 M , 就可以计算门限值。

假设 H1 存在有用信号 如果存在有用信号并且只有噪声情况下, 此时的检测统计量为

$$T_1 = \sum_{k=1}^M \left\{ \left[\text{sinc}(\pi\Delta f_i T) \sqrt{\frac{S}{N_0}} TR(\tau) D_i \cos(\Delta\phi_i) + \eta_{Ii} \right]^2 + \left[\text{sinc}(\pi\Delta f_i T) \sqrt{\frac{S}{N_0}} TR(\tau) D_i \sin(\Delta\phi_i) + \eta_{Qi} \right]^2 \right\} \quad (5)$$

检测统计量 T_1 是 $2M$ 个自由度的非中心 χ^2 分布。中心化参数为

$$\lambda = \sqrt{\frac{S}{N_0}} TR^2(\tau_i) \left(\frac{\sin(\pi\Delta f_i T)}{\pi\Delta f_i T} \right)^2 \quad (6)$$

图 7 表示了 GPS L2C 信号捕获性能, 在 $P_{fa} = 1e-3$, $T_p = 10 \text{ ms}$, $M = 5, 10, 15$, 同时考虑 τ_i 和 Δf_i 的影响, 其衰减为 3.5 dB, 不考虑射频滤波器的影响, 检测概率随载噪比变化的情况, 增加信噪比可以获得更好的捕获性能。从图中可以看出对于不同的非相关累计次数, 固定 95% 检测概率时所对应的最低载噪比分别为: 32.4 dB-Hz、30.4 dB-Hz 和 29.4 dB-Hz, 增加非相干累加次数可以降低信号捕获门限。

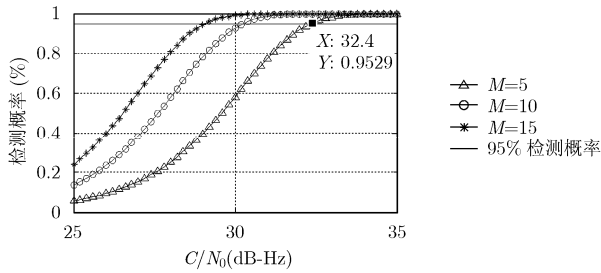


图 7 L2C 捕获性能

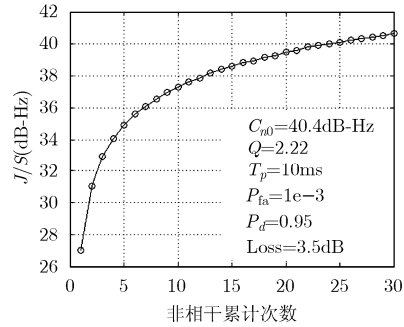


图 8 干信比随非相干累加次数改变的变化图

5 抗干扰容限

从上面的分析来看, L2C 信号的捕获概率依赖于信噪比, 干扰对 GPS 接收机性能的影响就是使得相关器输出端的 SINR 降低到一个更低的水平, 使得接收机失锁、捕获不了有用信号, 进而使得 GPS 接收机丧失导航定位功能。为了便于分析, 我们定义 $(C_s/N_0)_{dB}$ 无干扰时信号载噪比, $(C_s/N_0)_{eff,dB}$ 为固定检测概率对应的载噪比, 称为等效载噪比, 文献[9]给出了在干扰条件下, GPS 接收机捕获所容忍的最大干信比:

$$(J/S)_{dB} = (G_{SVi})_{dB} - (G_J)_{dB} + 10 \lg \left[\left(10^{\frac{(C_s/N_0)_{eff,dB}}{10}} - 10^{\frac{(C_s/N_0)_{dB}}{10}} \right) \right] \quad (7)$$

其中 $(J/S)_{dB}$ 是以分贝表示的天线输入端干扰和信号功率之比; $(G_{SVi})_{dB}$ 表示指向 SV_i 的天线增益 (dBic); $(G_J)_{dB}$ 表示干扰方向的天线增益; R_c 伪码速率; $(C_s/N_0)_{dB}$ 为无干扰时信号载噪比, 等效载噪比 $(C_s/N_0)_{eff,dB}$ 为固定检测概率不同检测情况下对应的载噪比; Q 是由各种类型干扰源和信号调制器而确定的无量纲抗干扰品质因数。

由公式(7)可以计算出捕获所能容能的最大的干信比。根据 ICD-200 规定最低 L2C 信号接收电平 -160 dBW^[1], 则 $(C_s/N_0)_{dB}=40.4 \text{ dB-Hz}$, $(G_{SVi})_{dB} = 1.5 \text{ dB}$; $(G_J)_{dB} = -3 \text{ dB}$, $R_c = 1.023 \text{ Mbps}$, 3 种干扰类型所对应的抗干扰品质因数如表^[9] 1 所示。根据图 5 中 3 种非相关累加次数所对应的载噪比, 当干扰为高斯白噪声干扰时, 3 种情况所容忍最高干信比分别为: 34.9 dB、37.2 dB 和 38.5 dB。图 8 描述了干信比随非相干累加次数增加的变化情况, 当非相干累加次数达到 10 次后, 继续增加累加次数

表 1 L2C 抗干扰品质因数

干扰信号类型	零点至零点高斯白噪声	匹配谱干扰	窄带干扰
抗干扰品质因数	2.22	1.5	1.0

得到的干信比增加会变得很慢。

6 结论

GPS Block IIR-M 卫星已经发射民用 L2C 信号, 与传统的 C/A 码相比具有更多优势, 必将获得更广泛的应用。本文首先讨论了 GPS L2C 信号结构, 通过分析 CM 和 CL 码之间的相位关系实现 L2C 信号捕获算法。仿真实验表明, 该算法能够在 -20 dB 的载噪比下实现 L2C 信号的捕获。接着, 本文利用统计检测理论分析了捕获性能, 证明通过增加非相干累加次数可以降低捕获门限。由于干扰对民用接收机的影响越来越受到重视, 本文还分析了干扰对接收机的捕获影响根本原因是降低相关器输出的 SINR, 描述了接收机抗干扰性能随非相干累积次数增加的变化曲线, 这对设计高可靠性民用接收机有一定的指导意义。本文所建立的分析接收机抗干扰能力的一般方法, 可以运用到其它 GNSS 信号抗干扰能力的分析中去。

参考文献

- [1] The United States Naval Observatory.gpsb2.txt.http://tycho.usno.navy.mil/ftp-gps, 2008.12.
- [2] ARINC Engineering Services, Proposed interface revision notice to ICD-GPS-200C for L2 civil (L2C) signal, PIRN-200C-007, Revision B, 8 Nov 2002.
- [3] Fontana R D, Cheung R W, and Stansell T A. The new L2 civil signal [C]. Proceeding of The Institute of Navigation ION GPS-2001, Salt Lake City, Utah, USA, Sep. 2001: 617-631.
- [4] Kaplan E D and Hegarty C. Understanding GSP Principles and Applications [M]. Second edition, USA, Artech Huse, INC, 2006: Chap 4-Chap 6.
- [5] Bastide F, Julien O, and Macabiau C, et al.. Analysis of L5/E5 acquisition, tracking and data demodulation thresholds[C]. Proceeding of The Institute of Navigation ION GPS-2002, Portland, Oregon, USA, Sep. 2002: 2196-2207.
- [6] Qaisar S and Dempster A. Receiving the L2C signal with

- “Namuru” GPS L1 receiver[C]. International Global Navigation Satellite System Society IGNSS Symposium 2007, Sydney, Australia, Dec. 2007: 154-164.
- [7] Sun C and Jan S. GNSS signal acquisition and tracking using a parallel approach[C]. Proceeding of IEEE/ION PLANS-2008, Monterey, California, USA, May, 2008: 1332-1340.
- [8] Tran M and Hegarty C. Receiver algorithm for the new civil GPS signals[C]. Proceeding of The Institute of Navigation ION NTM-2002, SanDiego, California, USA, Jan. 2002: 778-789.
- [9] Parkinson B and Spilker J J. Global Positioning System: Theory and Applications [M]. USA Washington, D. C, AIAA, INC, 1996: 329-407.
- 李成军: 男, 1976 年生, 博士, 研究方向为 GPS 接收机算法及干扰性能分析.
- 陆明泉: 男, 1964 年生, 副教授, 研究方向为 GNSS 信号设计、兼容性操作.
- 冯振明: 男, 1946 年生, 教授, 研究方向为 GNSS 关键技术、接入网.