

引用格式: 代智辉, 饶永南, 王雪, 等. GPS L2C CL 码折叠联合快速捕获算法研究[J]. 时间频率学报, 2023, 46(4): 341-354.

GPS L2C CL 码折叠联合快速捕获算法研究

代智辉^{1,2,3}, 饶永南^{1,2,3}, 王雪⁴, 陈校非^{1,2}

1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 时间基准与应用重点实验室(中国科学院), 西安 710600;
3. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 101408;
4. 西安电子科技大学, 西安 710600

摘要: GPS L2C 信号是 GPS L2 频点增加的新型民用信号, 与传统导航信号 L1C/A 码相比, GPS L2C 信号的导航电文和伪码结构均作出了改进, 伪码由数据和导频双通道组成, 数据通道伪码周期 20 ms, 导频通道伪码周期 1.5 s, 伪码周期分别是 C/A 码的 20 倍和 1 500 倍, 较长的伪码有更好相关性以及抗干扰能力, 但是长码捕获需要更长的捕获时间。对此, 提出一种基于折叠技术联合 CM 码相位辅助实现 CL 码的快速捕获方法。在高信噪比和高采样率的工作环境下, 通过实测数据分析验证, 在伪码折叠次数为 5 次时, 本文方法比时域并行的短码辅助长码捕获方法速度提升了 77%, 与利用 XFAST 直捕 CL 码相比速度提升了 93%。

关键词: GPS L2C 信号; 折叠码; 捕获算法

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2023-04-0341-14

Research on acquisition algorithm of GPS L2C CL code

DAI Zhi-hui^{1,2,3}, RAO Yong-nan^{1,2,3}, WANG Xue⁴, CHEN Xiao-fei^{1,2}

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101048, China;
4. Xidian University, Xi'an 710600, China

Abstract: GPS L2C signal is a new type of civil signal with increased frequency of GPS L2. Compared with the traditional navigation signal L1C/A code, the navigation message and pseudocode structure of GPS L2C signal have been improved. The pseudocode is composed of data and frequency channel, with a pseudocode period of 20 ms for data channel and 1.5 s for frequency channel, which are 20 times and 1 500 times of C/A code respectively. Longer pseudo-codes have better correlation and anti-jamming capability, but long-code acquisition requires longer acquisition time. In this regard, a fast acquisition method of CL codes based on folding technology and CM code phase assistance is proposed. In the working environment of high signal-to-noise ratio and high sampling rate, through the analysis and verification of measured data, when the number of

收稿日期: 2022-04-19; 接受日期: 2022-05-20

基金项目: 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部青年学者”资助项目(XAB2022YN15)

pseudo-code folding times is 5, the speed of this method is improved by 77% compared with the time-domain parallel short-code-assisted long-code acquisition method. Compared with the use of XFAST to directly capture CL code, the speed is increased by 93%.

Key words: GPS L2C signal; folding code; acquisition algorithm

0 引言

20 世纪 90 年代, 为了满足民用用户对复杂环境下高精度导航定位的需求, 美国政府启动了 GPS (Global Positioning System) 的现代化计划, 其中的一个重要内容是在 L2 频点上增加了一个新的民用信号, 即 L2C 信号。与 L1 C/A 码相比, L2C 码采用了全新的信号结构, 由调制了导航电文的民用中等长度的 CM 码与作为导频码的民用长码 CL 码采用时分复用的方式构成, 其中导频码可以进行长时间的相干积分, 且在跟踪阶段可以使用纯锁相环的方式进行跟踪, 降低了跟踪的门限。由于伪码周期较长, L2C 信号还有更强的抗干扰能力。除此之外, L2C 信号的导航电文还采用了前向纠错编码等若干技术, 因而进一步降低了载波跟踪门限和数据解调门限, 更适合在复杂环境下的应用^[1-4]。

由于 L2C 的信号结构作出了较大的改进, 若使用传统的方法对 L2C 进行捕获, 计算量大, 捕获时间长。针对 L2C 信号的捕获也成为了研究热点。文献[5]提出了基于分块折叠的捕获方法, 利用折叠码与分块捕获技术, 快速捕获 CL 码, 该方法是牺牲了捕获灵敏度来提升捕获速度; 文献[6]提出了基于时域频域双折叠技术直接捕获 CL 码, 虽然捕获速度有所提升, 但是两次折叠后噪声的影响更加明显; 文献[7]将扩展复制重叠捕获算法与均值算法结合起来, 用以实现长码的捕获, 该方法中叠加次数和均值点数的选取对捕获性能影响较大; 文献[8]通过先对伪码较短的 L2CM 码捕获, 然后利用 CM 码和 CL 码之间的相位关系实现对 CL 码的捕获, 但即使是 CM 码, 传统的并行捕获方法也要用很长的时间; 文献[9]利用双频接收机, 通过 L1 C/A 码和 L2C 信号的码相位关系进行捕获, 降低了运算量, 但是 L1 信号容易受干扰进而导致捕获失败; 文献[10]评估了几种本地码对捕获结果的影响; 文献[11]对几种 L2C 信号常用的捕获方法进行了比较。针对信号质量评估中高采样率数据的快速处理需求, 本文利用伪码折叠技术与码相位关系实现 CL 码的快速捕获, 不需要过高的折叠次数且有效降低了数据运算量, 提升了捕获速度。

1 GPS L2C 信号结构

GPS L2C 信号表达式为

$$S_{L2C}(t) = \sqrt{2P}[d(t-\tau) \times C_{CM}(t-\tau) + C_{CL}(t-\tau)] \times \cos[2\pi(f + f_d)(t-\tau) + \varphi_0] + n_0(t)。 \quad (1)$$

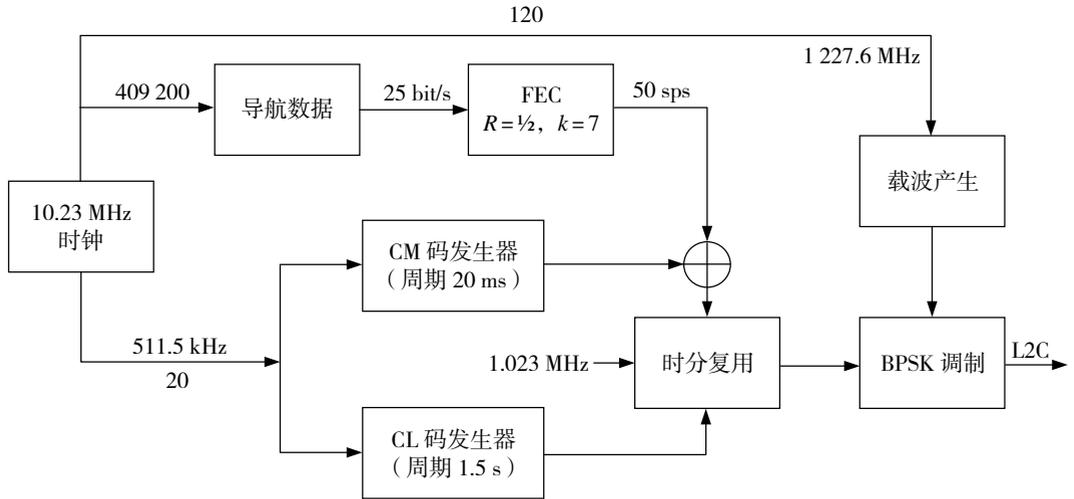
式(1)中: p 为接收信号的功率, d 为导航电文, C_{CM} 和 C_{CL} 分别为伪随机噪声码 CM 码和 CL 码, τ 为传播时延, f 和 f_d 分别为接收信号的中频频率和多普勒频偏, φ_0 为载波相位, n_0 表示均值为零方差为 σ^2 的高斯白噪声。

信号产生原理和信号体制如图 1 和表 1 所示。L2C 信号的载波频率为 1 227.6 MHz, 采用二进制相移键控 (binary phase shift keying, BPSK) 方式对伪码进行调制。L2C 信号的伪码由两个序列采用时分复用 (time division multiplexing, TDM) 的方式组成, 分别是调制有导航数据的 CM 码和没有调制导航电文的 CL 码。CM 码码长为 10 230, 码速率 511.5 keps, 码周期为 20 ms; CL 码码长为 767 250, 码速率同样为 511.5 kbit/s, 码周期 1.5 s。L2C 的导航电文采用 CNAV 电文结构, 原始导航电文速率为

25 bit/s, 经过约束长度为 7 编码率为 1/2 的前向纠错编码器 (forward error correction, FEC), 得到每秒 50 个符号的数据码。

CM 码和 CL 码的码发生器结构相同, 由一个 27 级的线性反馈移位寄存器来产生, 不同卫星所用的 CM 码和 CL 码是通过给码发生器赋不同的初始相位所得, 其特征多项式为

$$G = 1 + x^3 + x^4 + x^5 + x^6 + x^9 + x^{11} + x^{13} + x^{16} + x^{19} + x^{21} + x^{24} + x^{27} \quad (2)$$



注：FEC 为方向纠错编码器，BPSK 为二进制相移键控

图 1 GPS L2C 信号结构

表 1 GPS L2C 信号体制

信号	中心频率	伪码	码长	码速率/(kbit/s)	码周期	调制方式
L2C	1 227.6 MHz	CL	767 250	511.5	1.5 s	BPSK-R(1)
		CM	10 230	511.5	20 ms	

由于 L2C 信号伪码由两个独立序列组成, 因此不同本地码的选取对捕获结果也有一定的影响。不能直接将 CM 码与 CL 码时分复用作为本地码, 因为 CM 码调制有导航电文。常见的本地码有两种形式^[2]: 非归零本地码 (non return to zero): 直接用 CM 码或 CL 码与接收信号作相关; 归零本地码 (return to zero): 将 CM 码或 CL 码与 0 时分复用作为本地码。其中归零本地码的互相关噪声略低于非归零本地码, 因此使用归零本地码。

2 捕获算法

2.1 基于 CM 码辅助的 CL 码捕获算法

GPS L2C 信号的伪码由 CM 码和 CL 码组成, CM 码和 CL 码的相位关系如图 2 所示, 一个 CL 码周期包含 75 个 CM 码周期, 将 CL 码按照 CM 码的周期分成 75 段, 保存 CL 码的相对位置, 每一段的起始相位由捕获到的 CM 码相位来确定。然后分别将 75 段 CL 码与接收信号作相关从而获得具体的 CL 码相位^[8]。

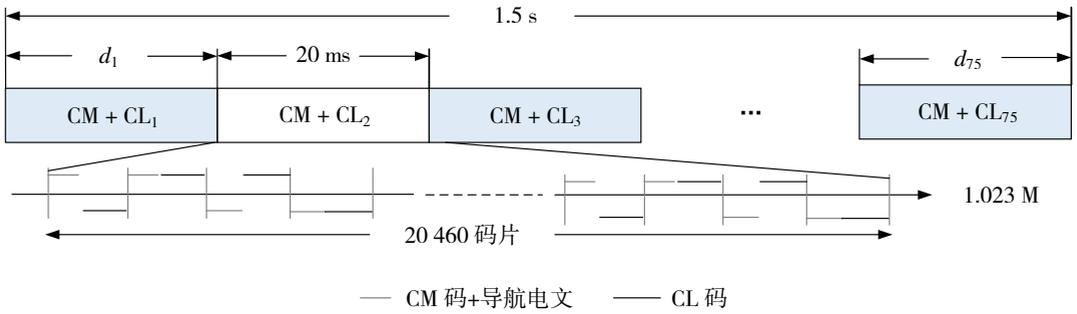


图 2 CM 码和 CL 码的相位关系

该算法的捕获过程如图 3 所示。首先接收信号经采样后得到 $S_{L2C}(n)$ 与载波估计值进行混频得到 $r(n)$

$$r(n) = S_{L2C}(n) \times e^{j2\pi(f_{IF} + f_d)n\Delta t} \quad (3)$$

式 (3) 中: $n\Delta t$ 是采样的时间, Δt 为采样周期。长度为 N 的序列 $r(n)$ 经离散傅里叶变换得到 $Y(k)$

$$Y(k) = \text{FFT}[r(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} r(n) \cdot e^{-j(\frac{2\pi}{N})nk} \quad (4)$$

本地码首先选取归零 CM 码, 对本地码进行傅里叶变换后取共轭

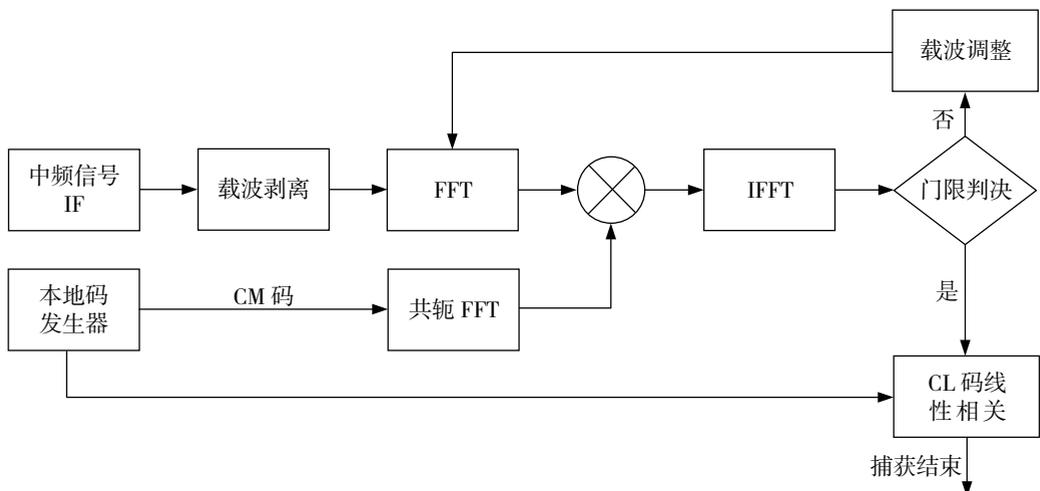
$$X^*(k) = \text{FFT}^*[\text{CM}(n)] = \left[\sum_{n=0}^{N-1} \text{CM}(n) \cdot e^{-j(\frac{2\pi}{N})nk} \right]^* \quad (5)$$

将两次傅里叶变换的结果相乘后进行逆傅里叶变换即可得到所有相位的相关值 $z(n)$

$$z(n) = \text{IFFT}[X^*(k) \cdot Y(k)] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (X^*(k) \cdot Y(k)) \cdot e^{j(\frac{2\pi}{N})nk} \quad (6)$$

判断相关结果最大值是否超过捕获门限, 若没有超过, 则调整载波频率再次进行捕获, 直到超过设置好的捕获门限。当 CM 码捕获成功后, 由 CM 的码相位 φ_{CM} 得到 75 个 CL 码的初始相位, 然后用这 75 段归零 CL 码分别与接收信号作相关, 由相关结果即可求得 CL 码相位 φ_{CL} , 即

$$\varphi_{\text{CL}} = \varphi_{\text{CM}} + (i-1) \times N, \quad i = 1, 2, \dots, 75. \quad (7)$$



注: FFT 为傅里叶变换, IFFT 为傅里叶逆变换

图 3 由 CM 码相位捕获 CL 码相位的算法捕获过程

2.2 基于 XFAST 的捕获方法

扩展折叠复制码捕获技术最早被用来实现长码 $P(k)$ 码的捕获^[5]，得益于长码良好的自相关特性，在对伪码折叠后码周期越长，伪码之间的相互干扰越小，表现出来的捕获性能就越好。该方法的本质是将本地的伪码先转换成 +1 和 -1，然后平均分成 S 段，每一段的长度为 K 。将 S 段码片对应的位置进行算数相加得到长为 K 的新的子码，这段子码包含了原来长为 $S \times K$ 的伪码的所有信息，接收信号的长度也为 K 。用折叠后的伪码与接收信号进行相关，得到相关峰后其中还包含着值为 S 的模糊度，需要再进行一次长度为 S 的线性相关，最终实现捕获。

如图 4 所示，假设 $K = 6$ ， $S = 4$ ，接收信号为 $[A, B, \dots, F]$ ，一周期的伪码为 $[A_1, \dots, F_1, A_2, \dots, F_2, \dots, A_4, \dots, F_4]$ ，接收信号与本地码 $[B_2, \dots, A_3]$ 对应，将一周期的伪码分成 4 段，然后将对应位置相加，得到新的本地码 $[a, b, c, d, e, f]$ ，将新的伪码与接收信号相关，最大相关峰出现在 b 位置，然后将本地伪码重新分段为 $[B_1, \dots, A_2]$ ， $[B_2, \dots, A_3]$ ， \dots ， $[B_4, \dots, A_1]$ ，再将 4 段伪码分别与接收信号相关，即可实现信号的捕获。

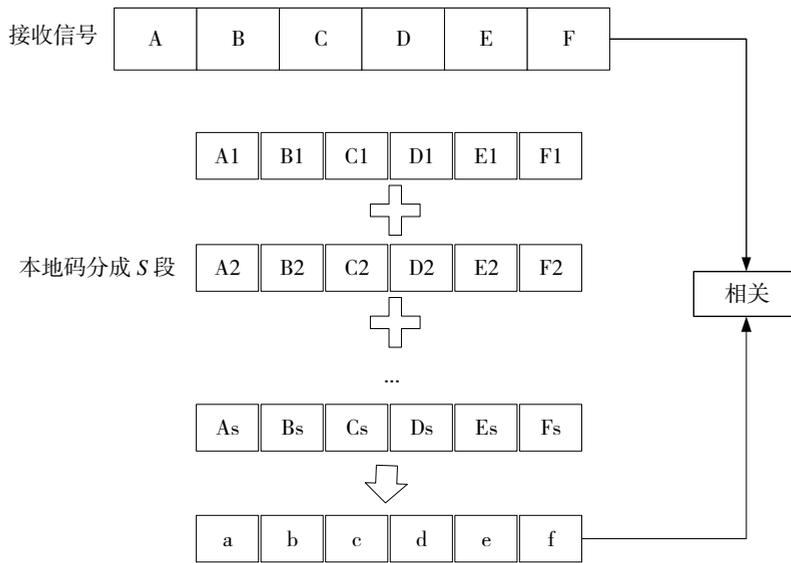


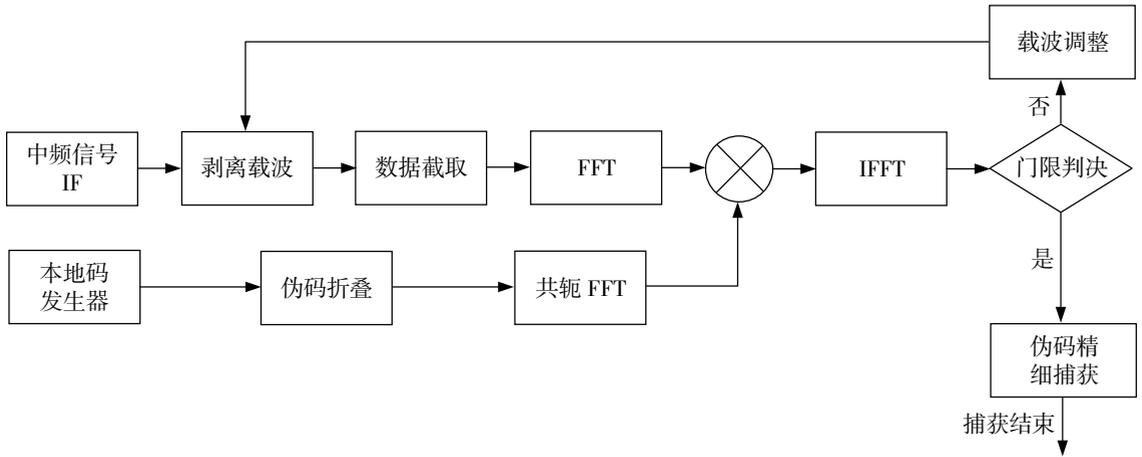
图 4 XFAST 捕获原理

该算法的捕获过程如图 5 所示。将一周期的 CM 码分成 S 段，记为 CM_1, CM_2, \dots, CM_s ，折叠本地码 X 可表示为

$$X = CM_1 + CM_2 + \dots + CM_s \tag{8}$$

式 (8) 中：其长度为 K ，设粗捕获得到的码相位为 p ，由此可得 S 个新的本地码 $CM'_1, CM'_2, \dots, CM'_s$ ，分别与 $r(n)$ 进行线性相关，其中最大值的位置即为码相位。

XFAST 捕获算法能以较低的运算量实现长码信号的快速捕获^[12-13]，这是由于接收机每次处理的数据量与传统方法相比只有原来的 $1/S$ 。理论上来说，码折叠次数越多，捕获的速度越快，然而当折叠次数过高时，伪码之间的相互干扰越大，使得相关峰淹没在噪声中。对于码片长度为 10 230 的 CM 码分别进行折叠次数为 2、5、10、30 的仿真，结果如图 6 所示，在折叠次数 S 为 2 次、5 次时相关峰很明显，当 S 为 10 次时相关峰也比较明显，但是当 S 达到 30 次时，已经无法分辨出相关峰的位置。因此伪码的折叠次数是有限制的，折叠次数过高会导致伪码捕获失败。



注：FFT 为傅里叶变换，IFFT 为傅里叶逆变换

图 5 XFAST 算法捕获过程

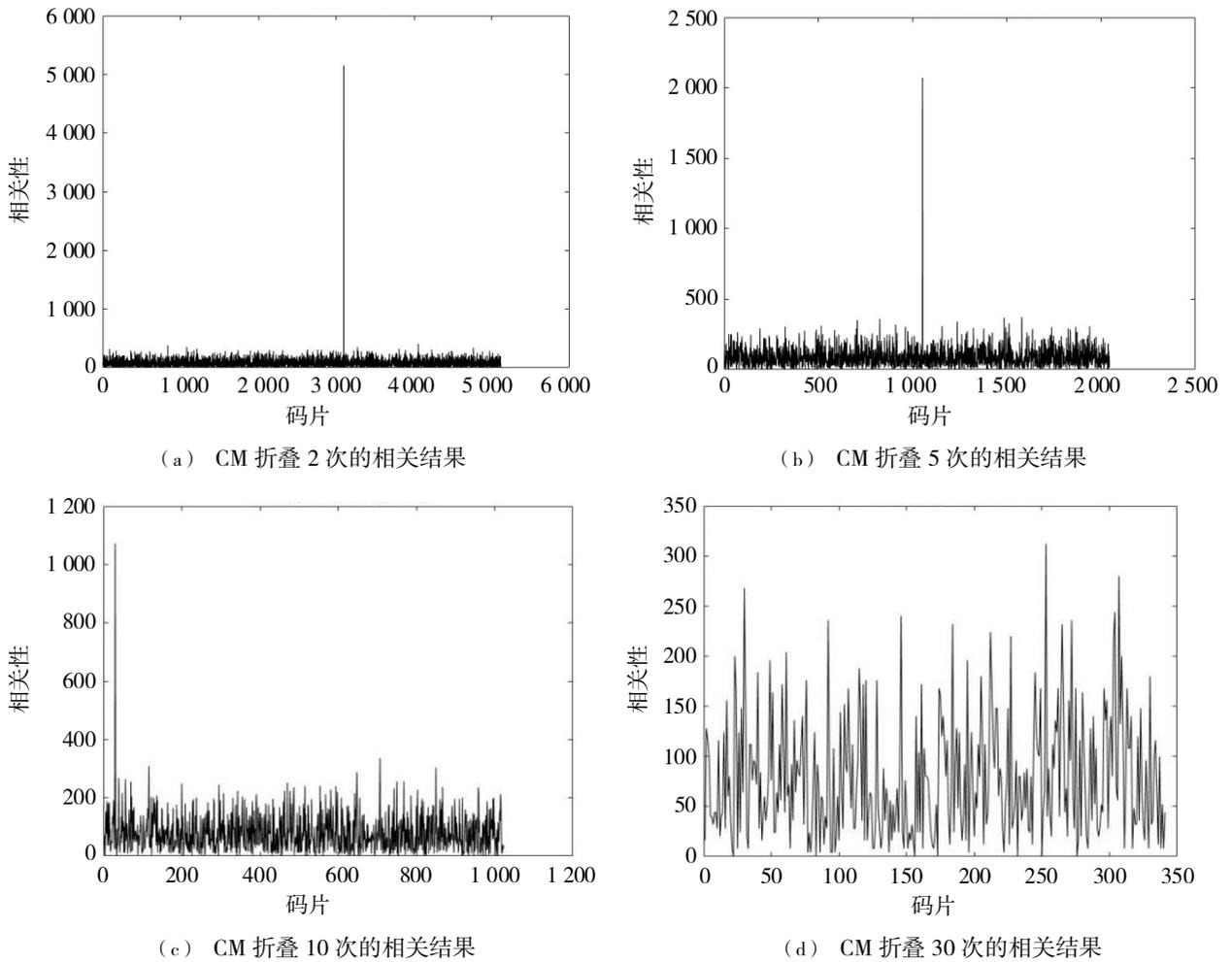


图 6 CM 码折叠次数为 2、5、10、30 的相关结果

基于 XFAST 算法的码段叠加次数不能够无限制增加的特性，在接收信号长度固定的情况下，CM 码的折叠次数比 CL 码折叠次数低 75 倍，相关峰更加明显。图 7 为比较 CM 码和 CL 码折叠后的相关结果：当 CM 码折叠段数为 2 时，CL 码折叠段数要达到 150 段，明显看出 CM 码的相关结果优于 CL 码的相关结果；当 CM 码折叠数为 5 时，CL 码折叠数相应的要达到 375，CL 码的相关峰已经被淹没。可以发现 CM 码的捕获效果更好，除此之外 CL 码的数据量大，在精细捕获阶段用时更长，且在数据预处理

阶段要占用较大的内存空间，因此不适宜直接捕获 CL 码。

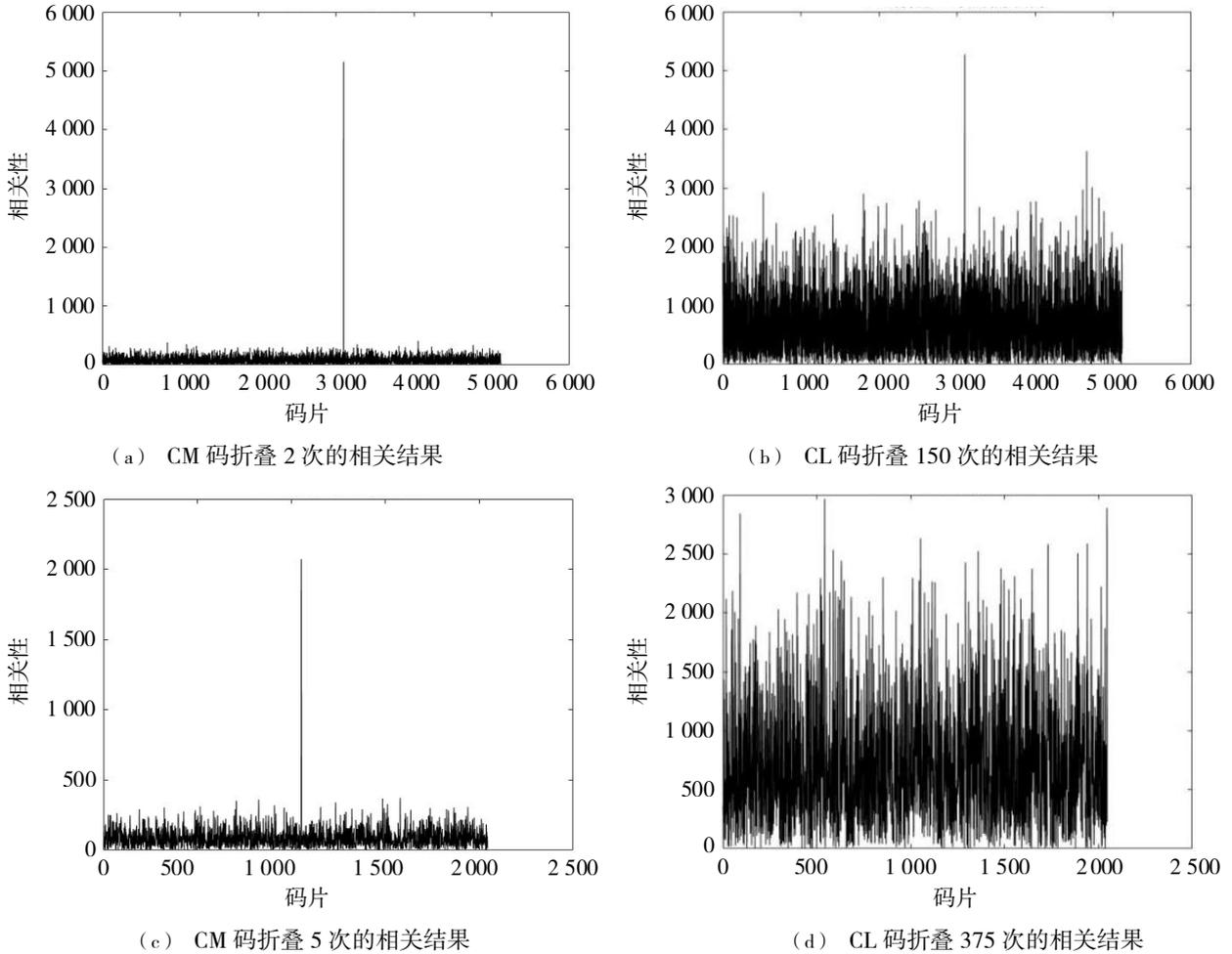
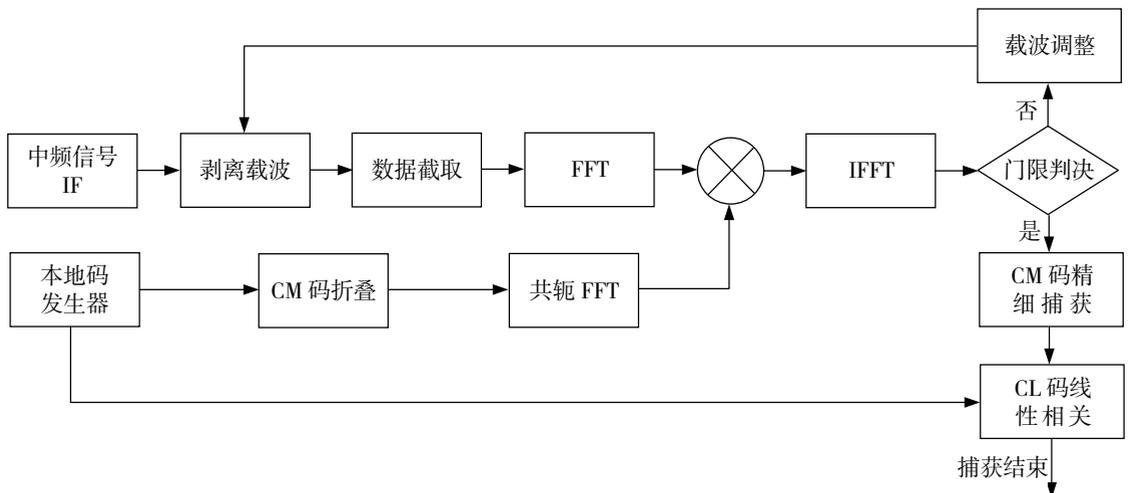


图 7 CM 码和 CL 码的相关结果比较

2.3 基于折叠技术联合 CM 辅助的 CL 码快速捕获算法

由于 XFAST 算法可以快速实现 CM 码的捕获，因此首先进行 CM 码的捕获，在得到 CM 码相位和多普勒频移等信息后，利用 CM 码和 CL 码的相位关系，实现 CL 码的快速捕获，算法流程图如图 8 所示。



注：FFT 为傅里叶变换，IFFT 为傅里叶逆变换

图 8 改进算法流程图

该方法的捕获过程具体流程为:

① 对接收到的数据分别进入同相和正交支路进行载波剥离, 截取一定长度的数据 K , 具体长度由伪码折叠次数 S 和接收的信号长度 N 决定, $K = N/S$, 设经过采样和载波剥离后的信号为 $r(n)$ 。

② 本地码为一周期的归零 CM 码, 对本地伪码同样进行采样后得到长为 N 的数据 $C_{CM}(k)$, 将本地伪码平均分为 S 段, 记为 CM_1, CM_2, \dots, CM_s , 每段码长为 K , S 段伪码对应位置叠加形成长为 K 的子码 C'

$$C' = \sum_{i=1}^S CM_i \quad (9)$$

对子码 C' 取共轭傅里叶变换。对经过傅里叶变换的长为 K 的子码和输入信号对应位置相乘, 并取逆傅里叶变换即可得到所有相位的相关值, 找出最大相关峰并判断是否超过捕获门限, 若没有超过门限则调整载波频率再次进行捕获, 直到相关峰超过预设门限。

③ 当捕获结果超过预设门限则表示 CM 码粗捕获结束, 令粗捕获得到的相位为 p , 再进行精细相位捕获, 在得到的 S 个相关值中找到最大相关值 $i (i=1, 2, \dots, S)$ 的伪码段数, 此时 CM 码捕获结束, CM 码相位为

$$\varphi_{CM} = (i-1) \times K + p \quad (10)$$

式 (10) 中: $i (i=1, 2, \dots, S)$, $K = N/S$ 。

④ 由捕获到的 CM 码相位可以得到 75 个 CL 码的初始相位, 由粗捕获得到载波频率对接收到的信号进行载波剥离, 用接收到的信号分别与本地的 75 段 CL 码进行线性相关, 得到的最大相关值对应的位置 $j (j=1, 2, \dots, 75)$ 就是 CL 码的码相位所在的段数, 即 CL 码相位为

$$\varphi_{CL} = (j-1) \times N + \varphi_{CM} \quad (11)$$

式 (11) 中: N 为采样后的数据长度。

3 算法性能分析

3.1 折叠次数分析

本文中的算法是基于折叠算法展开的, 本地码的折叠次数对算法性能有很大的影响, 通过 Matlab 进行仿真, 对算法的工作信噪比与 CM 码折叠次数的关系进行分析, 仿真结果如图 9 所示。

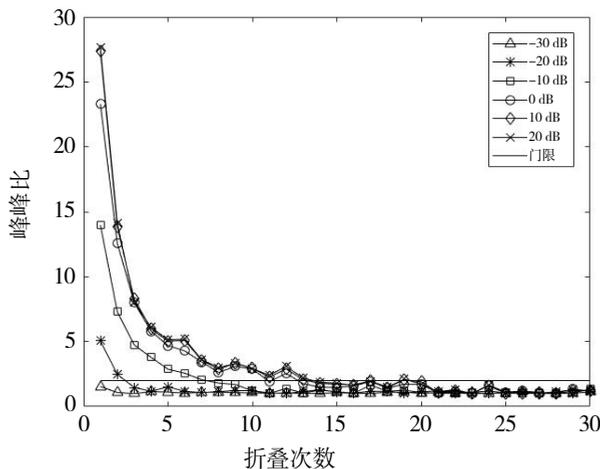


图 9 不同信噪比下峰峰比与折叠次数的关系

通常设置峰峰比大于 2 作为门限值, 峰峰比指的是捕获结果中捕获所得的最大相关峰和第二相关峰的比值。根据仿真的对比结果, 在不折叠的情况下, 信噪比高于 -20 dB 时就可以捕获到信号, 而随着折叠次数的增加, 峰峰比快速下降, 即使在高信噪比的情况下, 当折叠次数达到 10 次以后, 也容易导致捕获失败, 因此折叠次数应该小于 10 次。

3.2 噪声影响分析

折叠算法虽然提高了捕获速度, 但是伪码之间的叠加却提高了噪声^[14]。假设接收到的信号为 $r(n) = s(n) + n_0$, 其中 n_0 是方差为 σ^2 的高斯白噪声, 本地伪码为 $C' = \sum_{i=1}^S CM_i$, 折叠 S 段, 则经过 T_{coh} 的相干积分后得到噪声 $n(t)$

$$n(t) = \int_0^{T_{\text{coh}}} n_0 \cdot C' dt \quad (12)$$

噪声均值为

$$E(n(t)) = \int_0^{T_{\text{coh}}} E(n_0) \cdot C' dt = 0 \quad (13)$$

方差为

$$D(n(t)) = E(n(t))^2 = E\left(\int_0^{T_{\text{coh}}} n_0 \cdot C' dt\right)^2 = ST_{\text{coh}} \sigma^2 \quad (14)$$

由此可以发现噪声与折叠次数和相干积分时间相关。

3.3 检测概率

虚警概率 p_{fa} 和检测概率 p_d 是两个很重要的指标^[15]。当非相干累加次数为 1 时, 在信号不存在的情况下, 检测统计量服从瑞利分布, 其概率密度函数为

$$f_n(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad x \geq 0 \quad (15)$$

则虚警概率 $P_{\text{fa}} = \int_{v_i}^{\infty} \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx$, 其中 v_i 为检测门限, 在设定好虚警率后就可以计算出相应的检测门限; 在信号存在的情况下, 检测统计量服从莱斯分布, 其概率密度函数为

$$f_s(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\left(\frac{x^2}{2\sigma^2} + \frac{C}{N}\right)\right) I_0\left(\frac{x\sqrt{\frac{2C}{N}}}{\sigma}\right), \quad x \geq 0 \quad (16)$$

式(16)中: $\frac{C}{N}$ 为载噪比, $I_0\left(\frac{x\sqrt{\frac{2C}{N}}}{\sigma}\right)$ 为第一类零阶修正贝塞尔函数, 相应的检测概率为 $P_d = \int_{v_i}^{\infty} \frac{x}{\sigma^2}$

$\exp\left(-\left(\frac{x^2}{2\sigma^2} + \frac{C}{N}\right)\right) I_0\left(\frac{x\sqrt{\frac{2C}{N}}}{\sigma}\right) dx$ 。虚警率 p_{fa} 设为 10^{-3} , 图 10 展示了在不同载噪比情况下, 检测概率随着折叠次数的变化情况。

从图 10 中可以看出信号的检测概率随着折叠次数的增加而减小, 在接收信号的载噪比较低时, 信号的捕获概率都处于很低的水平。在检测门限设置为 0.95 时, 输入信号的载噪比高于 50 dB-Hz, 且折叠次数在 6 次以下时才能达到, 当载噪比高于 55 dB-Hz 时, 捕获概率都高于检测门限。

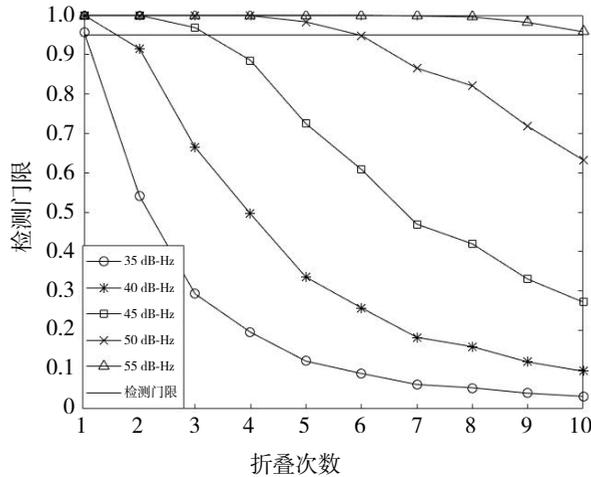


图 10 检测概率与折叠次数的关系

3.4 算法复杂度分析

算法复杂度代表着算法所需资源的大小，也是衡量算法捕获性能的重要指标之一。比较短码辅助长码捕获、XFAST 直捕 CL 码以及改进算法的运算复杂度。参数设置如下：采样率 f_s 设置为 250 MHz，中频为 62.5 MHz，伪码速率 1.023 MHz，输入信号长度为 20 460。载波多普勒搜索范围为 ± 5 kHz，频率搜索步进为 500 Hz，相应的频点数 f 为 21，伪码折叠次数为 S ，伪码长度为 K 。在 XFAST 直捕 CL 码算法中，输入信号长度为 1 534 500，频率搜索步进为 50 Hz，步进过大会导致捕获失败，因此相应的频点数 f' 为 201，折叠次数为 S' ，伪码的长度为 K' 。3 种捕获算法的计算量如表 2 所示。

表 2 3 种捕获算法的运算复杂度比较

	短码辅助长码捕获	XFAST 直捕 CL 码	改进捕获方法
乘法运算	$f(N/2)\log_2 N + 75N$	$f'(K'/2)\log_2 K' + S'K'$	$f(K/2)\log_2 K + SK + 75N$
加法运算	$fN\log_2 N + 75(N-1)$	$f'K'\log_2 K' + S'(K'-1)$	$fK\log_2 K + S(K-1) + 75(N-1)$

短码辅助长码捕获的乘法运算量为 1.54×10^9 ，加法运算量为 2.97×10^9 ；改进捕获方法的折叠次数 $S=5$ ，乘法运算量为 5.89×10^8 ，比短码辅助长码捕获运算量减少 61.75%，加法运算量为 7.98×10^8 ，运算量减少 70.55%；在 XFAST 直捕 CL 码算法中，折叠次数 $S'=100$ ，乘法运算量为 6.79×10^9 ，加法运算量为 1.33×10^{10} ，改进捕获方法相对于 XFAST 直捕 CL 码方法的乘法运算量减少 91.33%，加法运算量减少 94%。由此可以看出改进后的捕获方法运算量明显减少，捕获速度有了很大的提升。

4 实测数据结果分析

本文使用实测数据实现对 GPS L2C 信号的捕获，所用的数据由中国科学院国家授时中心吴平观测站的空间信号质量评估系统进行采集，对接收信号有较高的增益^[16]。采用 GPS 系统卫星 PRN 号为 32 的采集数据，采样率设置为 250 MHz，积分时间 20 ms，中频频率为 62.5 MHz，频率搜索范围 10 kHz，搜索步长 500 Hz，捕获结果用峰峰比的比值作为预设的捕获门限，其中第二相关峰的位置是在最大相关峰所在的两个码片范围之外，以此来保证第二相关峰为信号噪底的功率。改进算法折叠次数 S 设置为 5 次，捕获结果如图 11 所示。

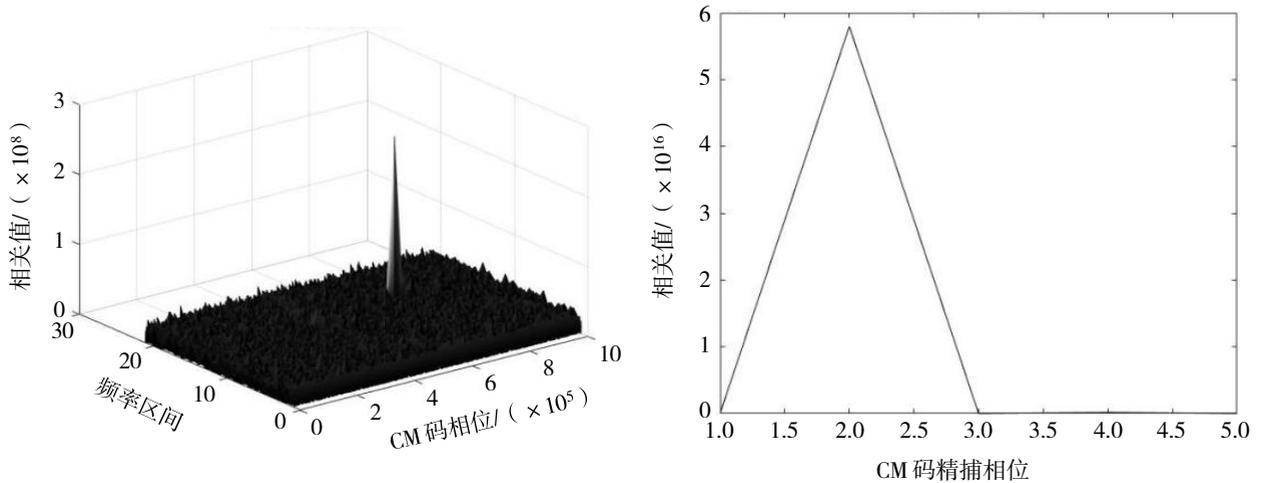


图 11 CM 码捕获结果

由 CM 码粗捕获得到相位为第 815 363 个采样点，将折叠 5 次的 CM 码展开与接收信号作相关得到最大相关值为 2，即展开后的第 2 段伪码与接收信号对齐，其中每一段 CM 码折叠后的长度为 1 000 000 个采样点，则 CM 码精捕获的相位为第 $(2-1) \times 1\,000\,000 + 815\,363 = 1\,815\,363$ 个采样点。在得到 CM 码相位和载波频率后，对 CL 码的捕获结果如图 12 所示，最大相关值在 48 处，其中每一段 CL 码的长度为 5 000 000 个采样点，最终求得 CL 码的码相位为第 $(48-1) \times 5\,000\,000 + 1\,815\,363 = 236\,815\,363$ 个采样点。

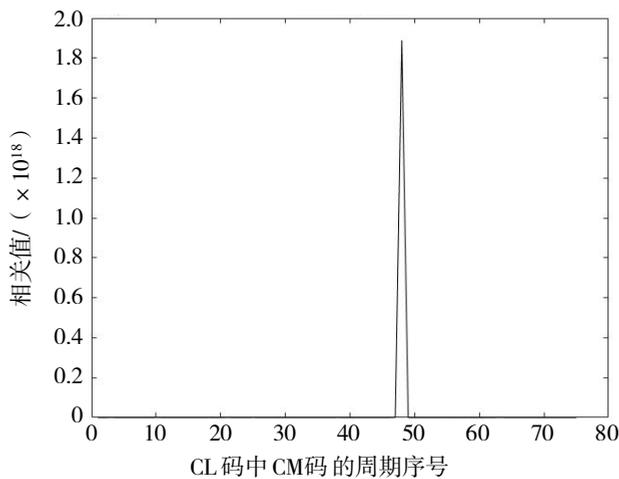


图 12 CL 码捕获结果

图 13 展示了改进方法的捕获结果与折叠次数 (1~10 次) 的关系，通过图 13 可以看出：随着折叠次数的增加，峰峰比整体呈下降趋势，在折叠次数达到 5 次以后，下降趋势变缓；捕获时间也随着折叠次数的增加而大幅度降低，同样在折叠次数达到 5 次以后，捕获速度也很难再降低。通过对比可以发现，在折叠次数为 5 次时，有较高的峰峰比和较低的捕获时间。

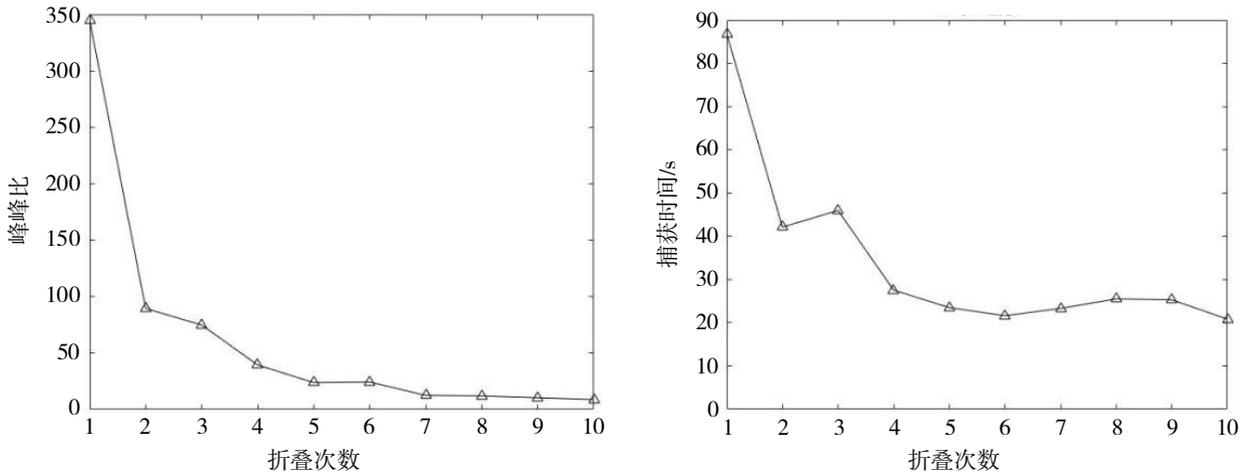


图 13 改进算法捕获结果与折叠次数的关系

图 14 展示了 XFAST 直接捕获 CL 码的捕获结果与折叠次数 (100~200 次) 的关系, 由于采样率较高, 折叠次数小于 100 次时需要处理的数据量较大, 所用捕获时间过长, 因此折叠次数从 100 次开始。通过图 14 可以看出: 在折叠次数达到 100 次以后, 峰峰比都在很低的水平, 在折叠次数 160 次以后就处于 1.5 以下, 捕获时间也达到了 200 s 以上。

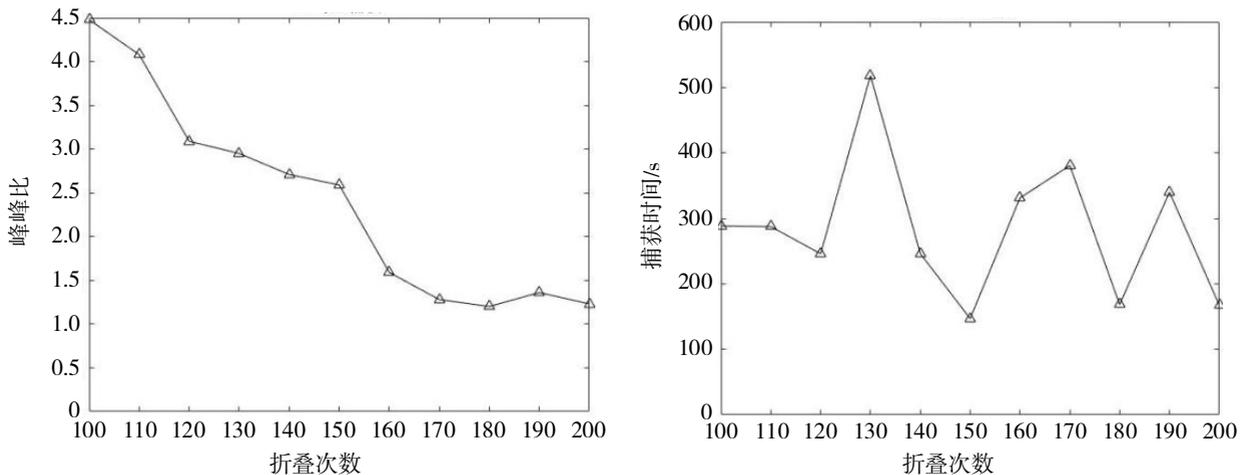


图 14 XFAST 算法直捕获结果与折叠次数的关系

采集 6 组数据, 分别使用 3 种方法进行捕获, 由上面的分析可将改进捕获方法的折叠次数设置为 5 次, XFAST 直捕 CL 码的折叠次数设置为 100 次, 得到的捕获结果两两比较如表 3 所示, 可以看到, 改进捕获方法的捕获速度最快, 与 XFAST 直捕 CL 码相比速度平均提升了 93%, 与短码辅助长码相比速度平均提升了 77%。同时改进捕获方法的峰峰比相较于短码辅助长码平均下降了 4.01 dB, 与 XFAST 直捕 CL 码相比峰峰比平均上升了 6.09 dB。

表 3 算法捕获结果比较

	短码辅助长码方法		改进捕获方法		方法对比	
	峰峰比	捕获时间/s	峰峰比	捕获时间/s	峰峰比下降/dB	捕获时间减少/%
1	16.70	86.9	6.31	18.9	4.23	78.18
2	53.06	79.6	26.85	17.1	2.99	78.58
3	12.49	91.5	8.41	19.1	1.72	79.14

续表 3

	短码辅助长码方法		改进捕获方法		方法对比	
	峰峰比	捕获时间/s	峰峰比	捕获时间/s	峰峰比下降/dB	捕获时间减少/%
4	50.47	82.6	32.05	17.2	1.97	79.20
5	31.19	89.9	21.96	23.3	1.52	74.04
6	344.70	86.8	23.89	23.5	11.59	72.94
均值	84.77	86.2	19.91	19.9	4.01	77.01

	XFAST 直捕 CL 码		改进捕获方法		方法对比	
	峰峰比	捕获时间/s	峰峰比	捕获时间/s	峰峰比上升/dB	捕获时间减少/%
1	4.48	288.5	6.31	18.9	1.49	93.42
2	3.09	296.2	26.85	17.1	9.39	94.24
3	5.12	331.2	8.41	19.1	2.16	94.23
4	3.54	260.1	32.05	17.2	9.57	93.39
5	4.82	265.9	21.96	23.3	6.59	91.22
6	4.36	304.5	23.89	23.5	7.39	92.28
均值	4.24	291.1	19.91	19.9	6.09	93.13

5 结论

GPS L2C 信号相比于传统的导航信号作出了较多的改进,有更多的优势,同时,复杂的伪码结构也对捕获技术提出了更高的要求。本文介绍了 GPS L2C 的信号结构,以及几种 CL 码的捕获方法,提出一种基于折叠技术联合 CM 码相位辅助实现 GPS L2C CL 码的捕获方法,可以快速实现 CL 码的捕获,有效提升 L2C 频点信号质量的评估数据处理速度,但是对本地伪码的折叠处理,会降低信号捕获的灵敏度,因此该方法更适用于高信噪比条件下的捕获。通过理论分析和实测数据验证,在高信噪比条件下,折叠次数为 5 次时捕获速度有了很大的提高,与短码辅助长码方法相比速度提升了 77%,与 XFAST 直捕 CL 码方法相比速度提升了 93%,成功实现了 GPS L2C CL 码的快速捕获。

参考文献:

- [1] TRAN M. Performance evaluations of the new GPS L5 and L2 civil (L2C) signals[J]. Navigation, 2004, 51(3): 199-212.
- [2] MARIAPPAN S, BABU S R, RAO S B. Acquisition and tracking strategies of modernized GPS L2C signal[C] // International Conference on Recent Trends in Information Technology, IEEE, 2011.
- [3] 陈校非,卢晓春,王雪,等.星地链路的 Cn 频段导航信号设计与测距性能分析[J].时间频率学报,2021,44(2): 132-141.
- [4] 郑洁,潘士娟. GNSS 空间信号完好性评估与分析[J].时间频率学报,2022,45(1): 59-74.
- [5] 张骅,秦红磊,金天.基于分块折叠的 GPS L2C CL 码直接捕获算法研究[J].电子测量技术,2010,33(1): 35-39.
- [6] ZHU X F, YANG D R, CHEN X Y, et al. A fast direct acquisition algorithm of GPS L2C CL signal based on time-frequency dual folding technique[C] // International Conference on Sensing Technology, IEEE: Nanjing, 2016.
- [7] 曾芳玲,欧阳晓凤,徐浩,等.基于时频融合的长码直接捕获优化算法研究[J].电子与信息学报,2019,41(2): 309-316.
- [8] 李成军,陆明泉,冯振明,等. GPS L2C 捕获算法研究及性能分析[J].电子与信息学报,2010,32(2): 296-300.
- [9] HOU B, ZHANG X L, DU P C, et al. Acquisition algorithm for GPS L2C signal on dual-frequency navigation receiver[J].

Advanced Materials Research, 2012(457-458): 1413-1419.

- [10] QAISAR S U, DEMPSTER A G. Assessment of the GPS L2C code structure for efficient signal acquisition[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2012, 48(3): 1889-1902.
- [11] KWON K C, SHIM D S. Rapid acquisition of CM and CL code for GPS L2C software receivers[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2011,6(5): 723-730.
- [12] 胡辉, 路春, 吴超, 等. 基于 XFAST 技术的 L2 CM 信号快速捕获算法研究[J]. 电子技术应用, 2013, 39(11): 118-124.
- [13] 王雷. GPS L2C 信号捕获跟踪技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- [14] 高娟娟, 陈新, 宋荣方, 等. GPS L2C CM 码快速捕获算法研究及互噪声分析[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2014, 34(3): 64-68.
- [15] 饶永南, 王萌, 康立, 等. GPS III 首星空间信号质量监测评估[J]. 电子学报, 2020, 48(2): 407-411.
- [16] 孙亮. GPS L2C 信号的捕获跟踪算法及软件实现[D]. 北京: 清华大学, 2010.