

基于时频融合的长码直接捕获优化算法研究

曾芳玲 欧阳晓凤* 徐浩 吕大千

(国防科技大学电子对抗学院 合肥 230037)

摘要:长码因其码率高、周期长的特点,是现有导航系统广泛采用的军用信号体制。该文针对长码间接捕获方法的不足,以及扩展复制重叠捕获算法和均值捕获算法的局限性,提出一种以优化复杂度和搜索速度为目标的,基于扩展复制重叠捕获(XFAST)和均值算法相融合的时频捕获改进方法,给出了该算法的基本原理和捕获结果。对该算法的信噪比条件和复杂度进行了分析仿真,进一步论证了该算法应用于长码直接捕获的可行性和优良性。

关键词:长码; 导航信号; 直接捕获; 时频融合; 效能分析

中图分类号: TN967.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)02-0309-08

DOI: 10.11999/JEIT180119

Improved Long-code Direct Acquisition Algorithm Based on Time-frequency Fusion

ZENG Fangling OUYANG Xiaofeng XU Hao LÜ Daqian

(Institute of Electronic Countermeasures, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: At present, long-code with the characteristic of high bit rate and long period is widely used in satellite navigation system as military signal. To overcome the shortcomings of the indirect acquisition method for long-code, the limitations of the extended replication overlay acquisition algorithm and the mean acquisition algorithm, an improved time-frequency capture method based on the Extended replica Folding Acquisition Search Technique (XFAST) and the mean algorithm is proposed. The feasibility of the algorithm is simulated and the performance of the algorithm is analyzed. The simulation experiment shows the superiority of the proposed algorithm.

Key words: Long-code; Navigation signal; Direct acquisition; Time-frequency fusion; Performance analysis

1 引言

直接序列扩频信号(DSSS)按照扩频码周期内调制的信码个数可分为短码和长码,也分别是目前卫星导航系统的民用和军用信号体制。长码较短码信号具有定位精度更高、抗干扰能力更强的特点,全球定位系统(GPS)采用的就是码周期长达一星期的P码信号提供军用精密定位服务(PPS)^[1]。虽然对于非合作方无法获得美军采用的加密后的P(Y)码,但军码的长周期特性在包括我国北斗系统的全球导航系统建设中被广泛借鉴,对该类长码的捕获也是导航系统接收终端的关键技术之一。随着科技的发展,战场电磁环境变得十分复杂多变,对定位精度的要求也越来越高,因此,对于长码的直接捕

获技术研究成为了国内外相关领域学者关注的重点问题之一^[2,3],美国GPS第3代计划中,更是明确提出加快对P码直接捕获技术的研究^[4]。全球各大导航系统在信号结构、服务过程和GPS系统有很多相似点,加快对长码信号的直捕方法探究,能够对我国北斗系统的完善、GNSS兼容互操作下的多模接收机研究提供有力支撑。

GPS设计初期,由于各方面的技术限制,采用的是通过首先捕获短码(C/A码)辅助捕获长码的间接捕获方法^[5]。文献^[6]对短码和长码同时捕获时的抗干扰能力进行了分析,当短码受扰时相关峰值完全淹没,捕获失败,而长码的抗干扰能力明显优于短码,但采用间接捕获时,由于抗干扰能力差的短码极易被干扰,一旦受扰则无法再进行长码的捕获,因此研究长码的直接捕获技术是必须的也是迫切的^[7]。

现代军用GPS接收机采用数字结构,利用高速VHDL电子器件实现P(Y)码信号的直接处理。如NAVSYS开发的缓冲数字接收机结构,通过在频域

收稿日期: 2018-01-29; 改回日期: 2018-11-20; 网络出版: 2018-11-29

*通信作者: 欧阳晓凤 xfouyang@sina.com

基金项目: 安徽省自然科学基金(1408085MF129)

Foundation Item: The Anhui Provincial Natural Science Foundation (1408085MF129)

操作来优化GPS直接捕获过程，其捕获有效性直接取决于大量傅里叶变换的实现速度^[8,9]。扩展复制重叠捕获(XFAST)算法和均值捕获算法是目前导航接收机中典型的频域长码直捕算法^[10-12]，均是以循环相关为基础的改进频域捕获算法，本文从这两种算法切入，分析两种方法的局限，从而结合两种算法的优势，提出一种改进的长码直接捕获技术，对算法可行性进行分析，对捕获结果进行仿真，并对算法的效能进行分析，仿真实验说明了改进算法的优良性。

2 XFAST算法和均值算法分析

2.1 XFAST算法分析

扩展复制重叠算法是基于FFT并且建立在伪码良好的自相关特性之上的直接捕获方法^[13]。其主要思想是将本地伪码分成 M 段，每一段的长度包含 L 个码元，然后将这 M 段子码段对应位置进行算术相加，得到一个新的重叠的码段，这个码段的长度为 L ，但包含了原来长为 $M \times L$ 的码段的信息。图1以 $M=4, L=4$ 对主要的原理进行了解释。

根据上述原理，将本地长码分成 M 段，每段对

应位置相加得到新的重叠码段，然后根据频域捕获原理，进行循环相关，找到这个新的重叠码和接收码的最大相关结果，最后进行门限判断和去除模糊度处理，找到最终的伪码位置，完成捕获，具体的捕获流程如图2所示。

根据图2的流程，在Windows平台下，采用Matlab软件，对扩展复制重叠捕获算法的捕获结果进行仿真，仿真分别是在分段数 M 为4, 8, 12, 16, 40, 60, 段内点数 L 为8192的参数下的仿真结果，其结果如图3所示。

根据仿真结果，当分段数 M 分别为4, 8时，相关峰值明显，能够成功分辨出峰值位置，完成对长码的捕获； M 为16时，虽然相关峰值能够分辨出，但噪声影响变大，峰值有所下降； M 为40时，噪声影响很大，相关峰值已经被淹没，分辨不出峰值位置，捕获失败。综合而言，通过伪码的分段叠加处理， M 个子码段进行叠加，使得FFT的运算量相比之前减少了 M 倍，同时也将搜索的不确定区域扩大到了 M 倍。然而，码段的叠加将产生背景噪声，导致信噪比有所下降，继而影响相关搜索峰值，甚至

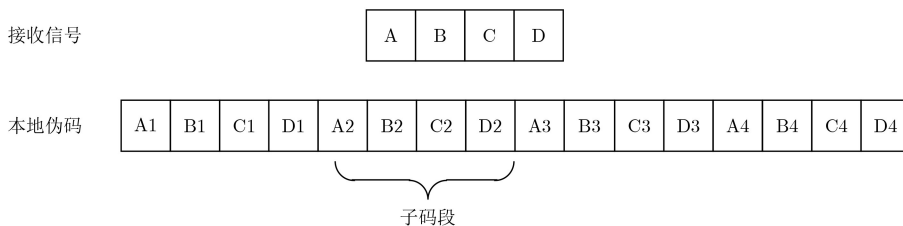


图1 扩展复制原理

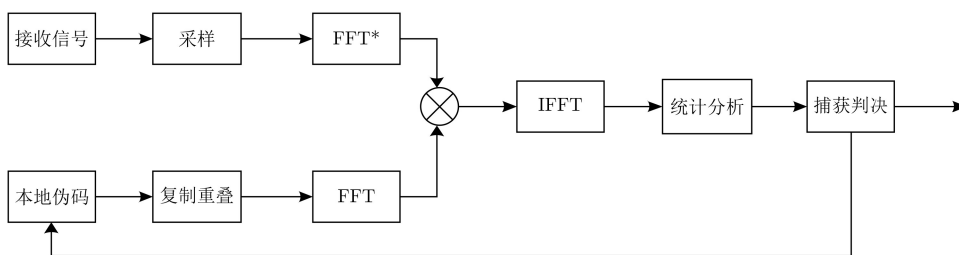


图2 扩展复制重叠捕获过程

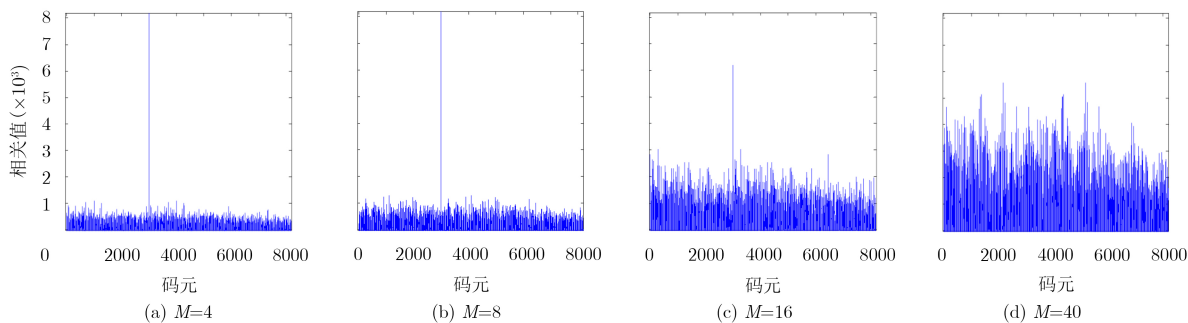


图3 扩展复制重叠捕获结果仿真

会产生多值性。由此可见，码段的叠加段数并不是无限制的，这也是扩展复制重叠捕获算法对伪码捕获的速度提升被限制的原因。

2.2 均值捕获算法

均值捕获算法以循环相关理论为基础，它不仅使用循环相关的方法使搜索时间的覆盖域扩大，而且通过分段补零的方法很好地实现了频域的码多普勒频移的补偿。其原理如图4所示。

根据上述均值算法原理，取 L 长的接收码序列，进行补 L 个零处理，得到长度为 $2L$ 的新序列，然后对该序列每 i 个码元取均值后得到长为 $2k$ 的序列 $G(2L=i \times 2k)$ ；取长为 $2L$ 的本地样本，每 i 个码元取均值得到长为 $2k$ 的序列 $F(2L=i \times 2k)$ ；对两个新序列 G 和 F 按频域捕获原理，求得 $2k$ 个相关结果，然后进行门限判定和去模糊度处理以完成捕获，具体的处理过程如图5所示。

根据图5的均值捕获过程，同样在Windows平台下，采用Matlab对均值算法进行了仿真，分别选取均值点数为4, 8, 10, 20，其在各自的参数设定

下的仿真结果如图6所示。

根据图6的仿真结果，在各自的参数设定下，均值点数为4, 8时，相关峰值明显，容易完成捕获；当均值点数为10时，存在较大相关峰值，不会影响到峰值的检测，但峰值的衰减已经开始显现。当均值点数为20时，峰值的衰减很大，甚至无法分辨出峰值的位置，会造成捕获失败的结果。因此均值点数并不是没有限制的。综上所述，均值算法明显减少了FFT运算的点数，提高了处理的速度，但是平均的码元个数越长，它的码相位偏移越大，峰值捕获的性能越差，因此平均的点数不能过长，这就在时间域上限制了检索的范围，对均值点数的选取也要根据接收机的实际应用来确定。

3 改进的长码直接捕获方法

3.1 改进算法的原理和捕获过程

XFAST捕获算法可以扩大搜索的范围，理论上讲，重叠的段数越大，搜索范围越大，但是由于背景噪声对峰值的影响，段数过多又会影响捕获成

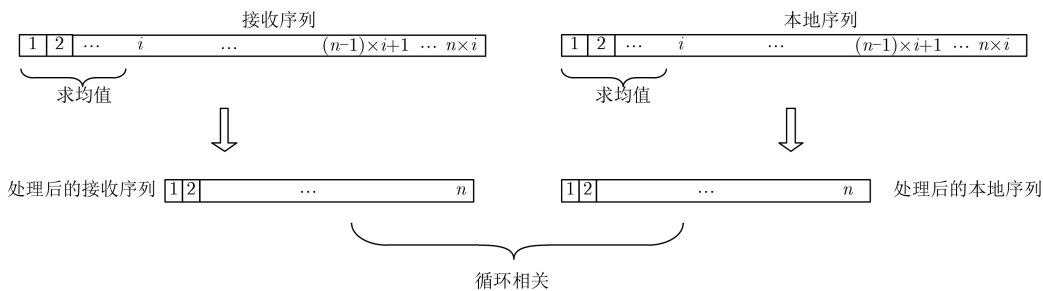


图4 均值算法原理

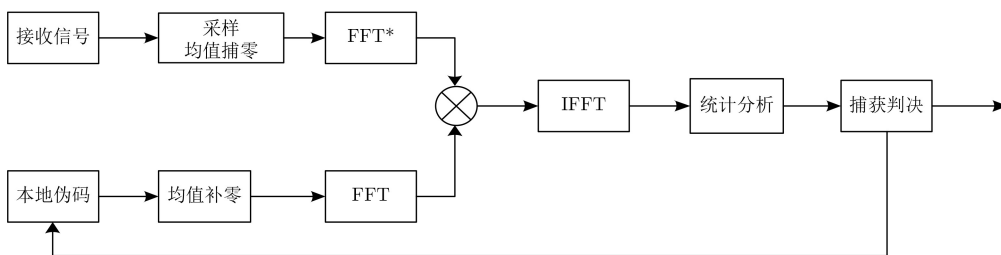


图5 均值捕获过程

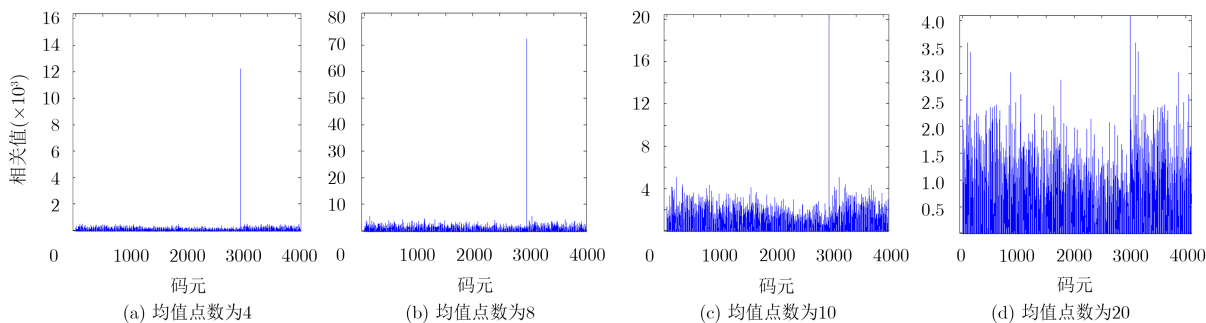


图6 均值捕获方法的仿真结果

功率^[14,15]。而均值捕获方法可以提高相关处理速度，理论上均值的点数越多捕获速度越快，但点数过多同样会使峰值模糊，捕获成功率下降。为此，结合两种方法的优势，将两种方法联合，提出一种改进的直接捕获方法，以达到更优更快的捕获效果。其基本原理如图7所示。

有效地结合均值捕获算法和扩展复制重叠捕获算法的优势，能够完成对长码的直接捕获。但是当多普勒频移较大时，仍会导致捕获相关度以及捕获的时效性较差。因此，算法进一步结合FFT的运算特点以及时域、频域处理方法，采用时频变换的方法，将捕获阶段分成两个阶段进行，也即粗捕获阶段和精捕获阶段。

在粗捕获阶段，多普勒搜索范围较大，伪码以及载波的不确定度同样比较大，因此在粗捕获阶段选择在频域FFT的处理方法，可以起到导频的作用，从而进一步降低载频误差，提高处理速度，但是捕获的精度受限。而进入精捕获阶段时，因为对伪码和载波的精度的要求较高，采用的是时域FFT处理办法，但是这时不确定度已经通过粗捕获阶段，控制在了一定的范围内。因此可以以较高的分辨率处理，在不影响捕获速度的同时，可以进一步地提高捕获精度。

优化算法的粗捕获方法如图8所示，具体处理过程为：

(1) 将接收信号中频处理后，以适当的速率、

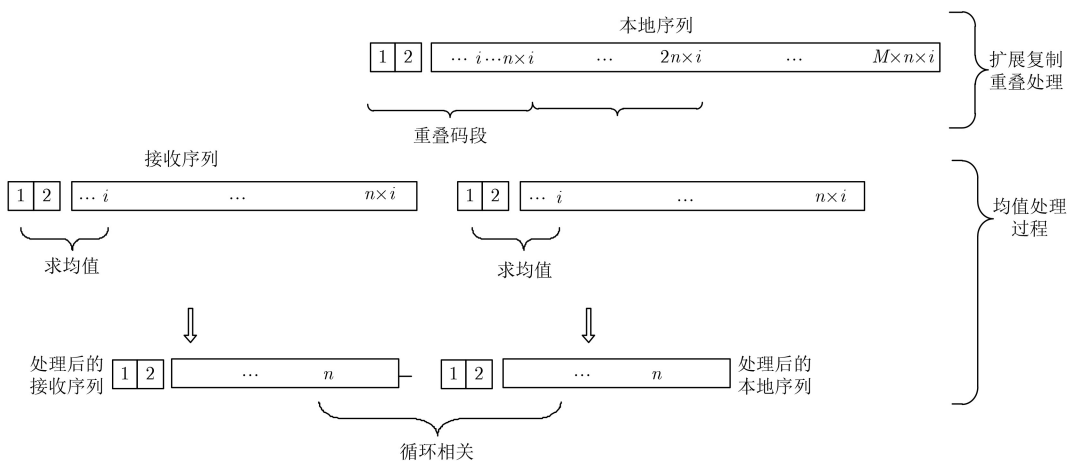


图7 改进算法的基本原理

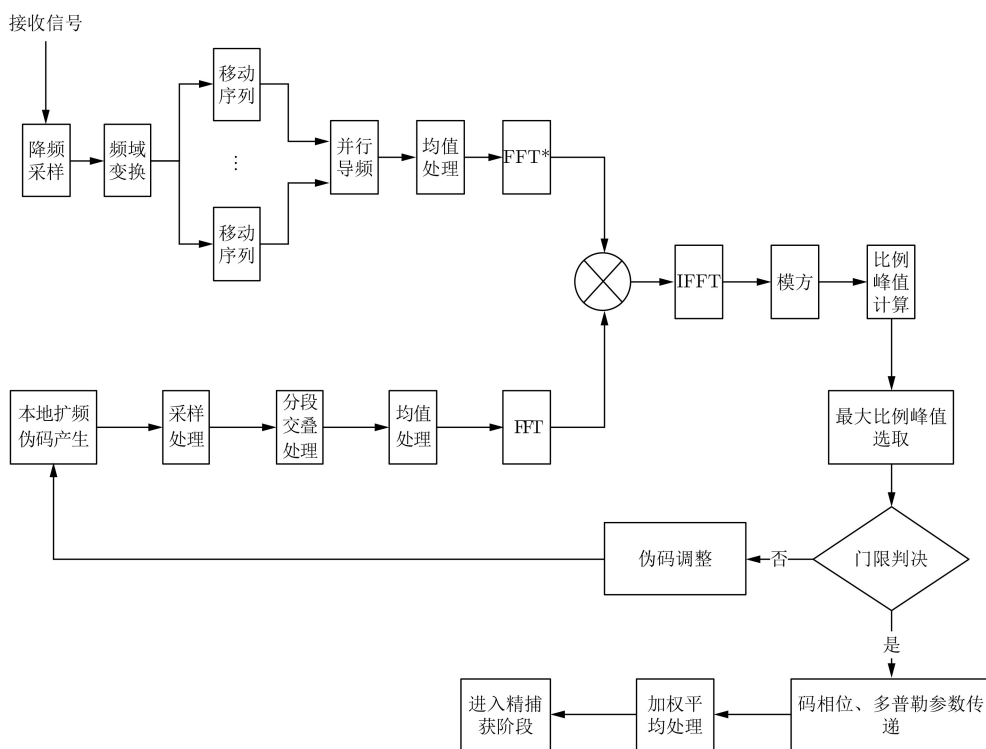


图8 优化算法的粗捕获处理过程

载波频率进行A/D采样和缓存，生成一个长为 L 的样本： $\mathbf{G}' = \{g_1, g_2 \dots, g_L\}$ ($L = i \times k$)；

(2) 取 L 长的接收信号，并对其进行补 L 个零操作，这样得到一个长为 $2L$ 的样本，将其记为： $\mathbf{G}'' = \{g_1, g_2 \dots, g_{2L}\}$ ($g_{L+1}, g_{L+2}, \dots, g_{2L} = 0$)，对该样本每 i 个码元求均值，得到新的 $2k$ 长的样本记为： $\mathbf{G} = g_q[p] \{g_q = (g_{(p-1)i+1} + g_{(p-1)i+2} + \dots + g_{pi}) / i, p = 1, 2, \dots, 2k\}$ ($2L = i \times 2k$)；

(3) 取一定偏移量的长为 $2L \times M$ 的本地扩频伪码样本，将其分成 M 段，并且将这 M 段码元对应位置相加，进而得到一个长为 $2L$ 的样本。然后再对这个样本进行类似第(2)步中的均值运算处理，得到长为 $2k$ 的样本： $\mathbf{F} = \bigcup_j^M f_q[p] \{f_q = (f_{j(p-1)i+1} + f_{j(p-1)i+2} + \dots + f_{jpi}) / i, p = 1, 2, \dots, 2k\}$ ($2L = i \times 2k$)；

(4) 对 \mathbf{G} 进行FFT运算，取其复共轭(该运算记为图8中的FFT*)；对 \mathbf{F} 进行FFT运算；将两者处理后的结果相乘后进行IFFT，对结果取绝对值，即得到相关结果。对相关结果进行采样并对 $2k$ 长度的各峰值进行比较，若超过门限则继续执行，否则，返回重新产生后的本地伪码序列；

(5) 对最大的比例峰值进行门限判决，判决成功后得到伪码相位和多普勒参数，并对多普勒参数进行平均加权处理，进入精捕获阶段。若门限判定失败，则重新进行伪码调整，重新捕获搜索。

优化算法的精捕获过程是在粗捕获过程的基础上进行的，根据粗捕获过程提供的多普勒频移参数和伪码相位参数，对伪码和多普勒频率进行更加精确的搜索，提高伪码和多普勒频率搜索的精度。精捕获过程主要是在时域进行的，包括在时域对多普勒频率进行搜索和在时域对展开后伪码进行相关搜索。其处理的流程图如图9所示。

如图9所示，优化算法的精捕获过程如下：首先根据粗捕获传递的参数，确定对本地伪码以及载频的搜索范围。将接收信号做展开均值处理，并以粗捕获阶段获取的载频为中心，以粗捕获阶段频率搜索的步进的2倍为搜索范围，用更小的频率分辨率作为步进，完成该搜索范围内的时域并行导频处理。然后将本地扩频伪码进行展开分段处理，并且展开均值，以便于去除模糊度。最后将上述处理之后的本地伪码信号和接收信号基于FFT进行循环相关处理，完成相关峰搜索、比例峰值门限判决，若超过门限则进行加权平均处理，捕获完成，否则调整本地序列，重新进行捕获。

3.2 改进算法的仿真分析

对改进算法的捕获结果的仿真分析，利用Matlab平台，对改进的长码直接捕获算法的捕获结果进行仿真，并根据不同捕获方法多次捕获过程的统计分析^[16,17]，验证说明改进算法达到了提高捕获精度和速度的效果。仿真所用伪码序列参考了GPS ICD文件中的P码信号体制生成，并与GPSTK进行了精确比对，其它仿真参数设定如下：信噪比为-12 dB，中频频率为20.46 MHz，码率为10.23 MHz，采样率为25 MHz，多普勒不确定度为±7 kHz，时域不确定度20 ms，码长 $L=204600$ (chip)。改进算法的捕获仿真结果如图10所示。

表1给出了改进算法和其它捕获算法之间的对比结果。表2给出了各算法在各自最优参数下的比较结果。

表1，表2中， $G1$ 表示的是去除模糊度之前最大峰值和平均峰值的比例， $G2$ 表示的是去除模糊度之后最大峰值和平均峰值的比例； $T1$ ， $T2$ 分别表示完成1次搜索和搜索完1 s的码片范围所用的仿真

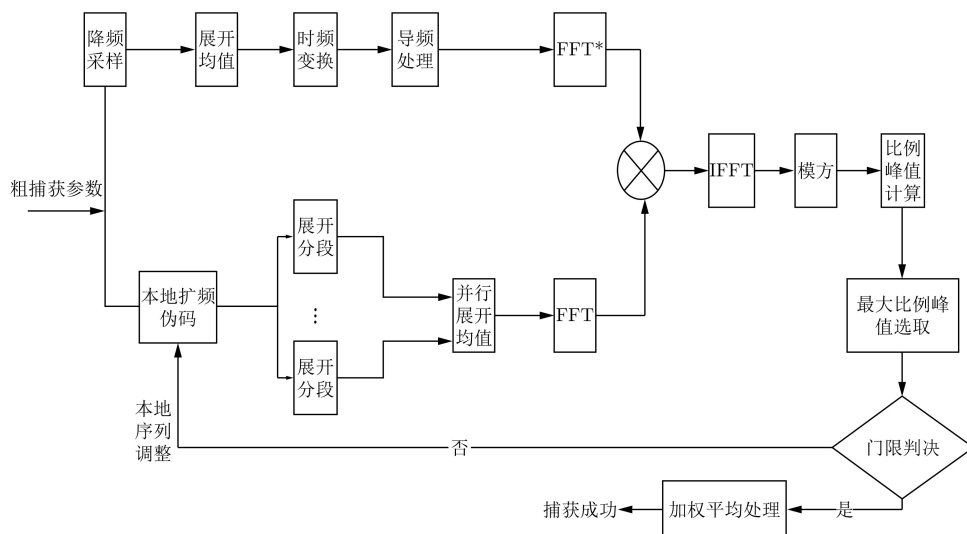


图9 优化算法的精捕获过程

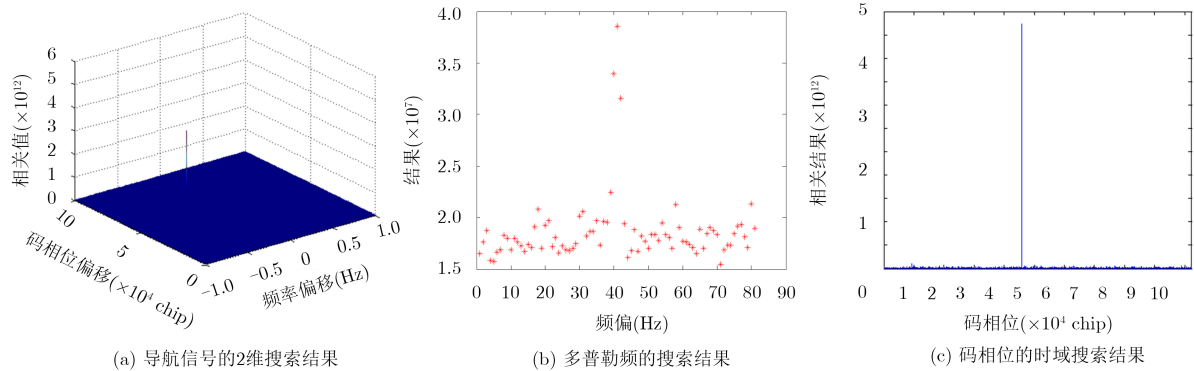


图 10 改进算法的捕获仿真结果

表 1 各算法在同等参数下的捕获结果对比

算法	参数	G1	T1(s)	Doppler误差(Hz)
		G2	T2(s)	
XFAST	M=4	150.65	33.025	26
		55.56	508.35	
均值法	i=8	151.01	8.885	26
		107.25	234.65	
改进算法	M=4 i=8	165.33	27.102	10
		53.656	87.56	

表 2 各算法在各自最优参数下的比较结果

算法	参数	G1	T1(s)	Doppler误差(Hz)
		G2	T2(s)	
XFAST	M=6	165.24	45.405	26
		45.68	360.075	
均值法	i=12	152.14	8.186	26
		92.651	178.68	
改进算法	M=4 i=8	165.33	27.102	10
		53.656	87.56	

时间； i 表示均值点数， M 表示分段个数。

图10的仿真结果显示，改进算法能够成功完成对长码的捕获，即比例相关峰值超过捕获门限。表1和表2的对比结果显示，改进算法对多普勒频移的搜索估计误差要小于均值法和扩展复制重叠法；同等参数下，粗捕获阶段和精捕获阶段的比例峰值也明显要优于另外两种算法；优化算法完成一次相关搜索的时间尽管较另两种方法长，但是当搜索区间较大时(本文以最大相干积分时间20 ms的搜索范围为例^[8])，改进算法完成搜索仿真的时间明显小于另外两种算法，速度更快。

综上所述，优化捕获算法在融合算法的基础上完成了优化，提高了捕获的精度；该算法的捕获效果也明显优于均值法和扩展复制重叠捕获算法。

3.3 改进算法的效能分析

3.3.1 工作信噪比分析

在仿真的环境下，对改进算法的工作信噪比进行了仿真分析，仿真结果如图11所示。

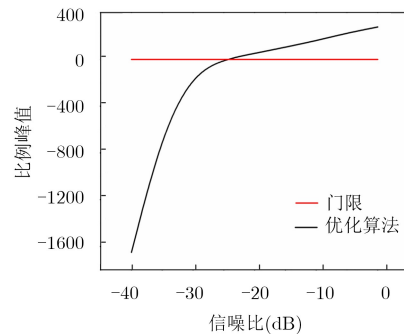


图 11 改进算法的工作信噪比分析

根据图11的对比结果，通常情况下，比例峰值超过门限值是在信噪比大于-25 dB时，并且信噪比越大，相关比例峰值越大，峰值越明显，捕获更容易成功。因此优化后算法的工作信噪比通常大于-25 dB，本文的其他仿真也均遵循了这一原则。

3.3.2 算法的复杂度分析

算法的复杂度一方面在一定程度上代表着算法所需资源的大小，而算法所占资源的大小也是选择算法的考虑因素^[18]；另一方面也是衡量算法效率的重要指标，是算法效率度量的一个标准，本节将对改进算法的复杂度进行分析，并与其它算法的复杂度进行比较。

下面根据算法复杂度定义给出改进算法、均值捕获算法、扩展复制重叠捕获算法的时间复杂度。假设长码直接捕获过程中要处理的码元的总长度为 n ；扩展重叠的段数为 M ；均值点数为 I ；每次相关处理的数据长度为 N 。

已知FFT的计算复杂度为 $O(n \log_2(n))$ ^[19,20]，那么优化后的捕获算法的时间复杂度计算为

$$\begin{aligned}
f_1(n) &= \frac{n}{N} \left(\frac{N}{L} L + \frac{L}{I} \left(2 \frac{L}{I} \log_2 \left(\frac{L}{I} \right) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + 4 \frac{L}{I} + \frac{L}{I} \log_2 \left(\frac{L}{I} \right) \right) \right) \\
&= n + \frac{n}{N} \left(3 \frac{L^2}{I^2} \log_2 \left(\frac{L}{I} \right) + 4 \frac{L^2}{I^2} \right) \\
&= n + 3 \frac{nL^2}{NI^2} \log_2 \left(\frac{L}{I} \right) + 4 \frac{nL^2}{NI^2} \quad (1)
\end{aligned}$$

式中, $L = n/(MN)$, 将其代入式(1)中得

$$\begin{aligned}
f_1(n) &= n + 3 \frac{n^3}{N^3 M^2 I^2} \log_2 \left(\frac{n}{MNI} \right) \\
&\quad + 4 \frac{n^3}{N^3 M^2 I^2} \quad (2)
\end{aligned}$$

同理, 可以通过计算得到扩展复制重叠算法的复杂度 $f_2(n)$ 和均值捕获算法的复杂度 $f_3(n)$ 分别如式(3)和式(4)所示。

$$f_2(n) = n + 3 \frac{n^3}{N^3 M^2} \log_2 \left(\frac{n}{MN} \right) + 4 \frac{n^3}{N^3 M^2} \quad (3)$$

$$f_3(n) = n + 3 \frac{n^3}{N^3 I^2} \log_2 \left(\frac{n}{NI} \right) + 4 \frac{n^3}{N^3 I^2} \quad (4)$$

根据式(2)–式(4)的计算结果, 在同样的搜索单元数目下, 优化后的算法的时间复杂度较扩展复制重叠算法和均值算法的时间复杂度而言都要低,

并且随着分段数和均值点数增大, 时间复杂度的下降程度越大。3种算法的时间复杂度仿真分析对比结果如图12所示, 其中仿真参数设定为: 每次处理的相关点数 N 为2048, 分段数 M 分别选取了4和8, 均值点数 I 分别选取了8和16。

根据图12的仿真结果, 3种算法的时间复杂度均随着数据长度的增大而增大。优化算法较扩展复制重叠捕获算法以及均值捕获算法的时间复杂度都低, 并且数据长度越大, 优化算法与其余两种算法的差距也越大。另外通过对不同均值点数以及不同分段数的仿真结果对比来看, 均值点数越大, 分段数越多, 算法之间复杂度相差也越大。

4 结束语

本文主要对长码的直接捕获算法进行研究和分析, 提出了一种结合均值法和扩展复制重叠法两种方法的改进捕获算法, 给出了改进算法的捕获原理和具体捕获过程, 对改进算法的捕获结果进行了仿真实验, 并与其他频域捕获算法进行了基于时间复杂度的对比和效能分析。从仿真实验和效能分析结果来看, 改进算法具有更高的捕获精度和更快的捕获速度, 尤其对于高速运动载体捕获长码所需的较大搜索区间, 具有更加优良的效能, 能够满足现在长码直接捕获的快速要求, 但也同时对接收终端设计提出了更复杂的硬件需求。

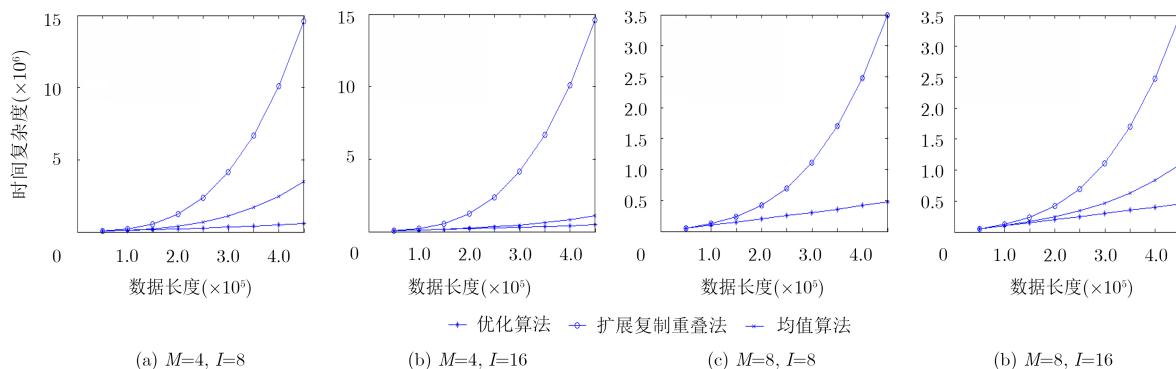


图 12 改进算法与扩展复制重叠算法和均值算法时间复杂度对比图

参考文献

- [1] KAPLAN D E and CHRISTOPHER J H. Understanding GPS: Principles and Applications[M]. London: Artech House Inc, 2006: 181–188.
- [2] GUO Xinpeng, SUN Hua, ZHAO Hongbo, et al. A modified LFF method for direct P-code acquisition in satellite navigation[C]. International Conference on Communications and Networking in China, Beijing, China, 2016: 499–508.
- [3] BINHEE Kim and SEUNGHYUN Kong. Design of FFT-Based TDCC for GNSS acquisition[J]. *IEEE Transactions*

on Wireless Communications, 2014, 13(5): 2798–2808. doi: 10.1109/TWC.2014.040714.131884.

- [4] CHAE K and YOON S. An improved direct acquisition scheme for rapid P code acquisition[C]. International Conference on Applied System Innovation, Osaka, Japan, 2017: 376–379.
- [5] 刘基余. 北斗卫星导航系统的现状与发展[J]. *遥测遥控*, 2013, 34(8): 1–8. doi: 10.3969/j.issn.2095-1000.2013.03.001.
- LIU Jiyu. Status and development of the Beidou navigation satellite system[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and*

- Command*, 2013, 34(8): 1–8. doi: [10.3969/j.issn.2095-1000.2013.03.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1000.2013.03.001).
- [6] 徐浩. GPS P码直接捕获技术研究[D]. [硕士论文], 国防科技大学, 2017.
XU Hao. Research on GPS P-code direct acquisition technology[D]. [Master dissertation], National University of Defense Technology, 2017.
- [7] 聂杨. 在GPS干扰试验中运用DOP算法评估干扰效能[J]. 电子信息对抗技术, 2017, 5(5): 58–62. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2017.05.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2017.05.011).
NIE Yang. Using DOP algorithm to evaluate jamming efficiency in GPS jamming tests[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2017, 5(5): 58–62. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2017.05.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2017.05.011).
- [8] HECKROTH K, SCHERRER K, and NIELSON J. Fast direct-Y GPS acquisitions with inaccurate time[C]. Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Long Beach, USA, 2004: 573–578.
- [9] ALTAF M M and AHMAD E H. An ultra-high-speed FPGA based digital correlation processor[J]. *IEICE Electron Express*, 2015, 12(8): 1–7. doi: [10.1587/elext.12.20150214](https://doi.org/10.1587/elext.12.20150214).
- [10] YANG Chun. FFT Acquisition of periodic, aperiodic, puncture, and overlaid code sequences in GPS[C]. Proceeding of GPS institute of navigation, Salt Lake City, USA, 2011: 137–148.
- [11] 赵盼盼, 姚彦鑫. 卫星导航中XFAST捕获的降计算量去模糊处理算法[J]. 电讯技术, 2017, 57(10): 1205–1212. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2017.10.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2017.10.017).
ZHAO Panpan and YAO Yanxin. An ambiguity resolving algorithm for XFAST acquisition with less computational amount in satellite navigation[J]. *Telecommunication Engineering*, 2017, 57(10): 1205–1212. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2017.10.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2017.10.017).
- [12] 唐小妹, 雍少为, 王飞雪. 存在伪码多普勒条件下的XFAST性能分析[J]. 通信学报, 2010, 31(18): 54–59. doi: [10.3969/j.issn.1000-436X.2010.08.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-436X.2010.08.008).
TANG Xiaomei, YONG Shaowei, and WANG Feixue. Performance of XFAST in the presence of code Doppler[J]. *Journal on Communications*, 2010, 31(18): 54–59. doi: [10.3969/j.issn.1000-436X.2010.08.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-436X.2010.08.008).
- [13] KRASNR R and NORMAN F. GPS receiver and method for processing GPS signals[P]. United States Patent, 6725159, 2004.
- [14] MATHEWS M B and MACDORAN P F. GNSS long-code acquisition, ambiguity resolution, and signal validation[P]. United States Patent, 9658341, 2017.
- [15] 唐小妹, 庞晶, 黄仰博, 等. XFAST长码直捕算法参数优化设计[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(4): 1113–1118.
TANG Xiaomei, PANG Jing, HUANG Yangbo, et al. Optimization of XFAST design[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(4): 1113–1118.
- [16] MUSUMECI L, DOVIS F, SILVA P F, et al. Design of a very high sensitivity acquisition system for a space GNSS receiver[C]. IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, California, USA, 2014: 556–568.
- [17] 沈锋, 李伟东, 李强. 基于I/Q支路相干积分观测滤波的GPS接收机信号跟踪方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 31(1): 37–42. doi: [10.11999/JEIT140314](https://doi.org/10.11999/JEIT140314).
SHEN Feng, LI Weidong, and LI Qiang. GPS receiver signal tracking method based on I/Q branch coherent integration measurements filter[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 31(1): 37–42. doi: [10.11999/JEIT140314](https://doi.org/10.11999/JEIT140314).
- [18] PASQUAL P M, ELOSEGUI P, LIND F, et al. An exploration of software-based GNSS signal processing at multiple frequencies[C]. American Astronomical Society Meeting, Washington, USA, 2017: 229–238.
- [19] LECLERE J, BOTTERON C, and FARINE P A. Feature article: High sensitivity acquisition of GNSS signals with secondary code on FPGAs[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2017, 32(8): 46–63. doi: [10.1109/MAES.2017.160176](https://doi.org/10.1109/MAES.2017.160176).
- [20] 陈松, 黄开枝, 吉江. 一种基于频域采样的序列快速捕获算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(8): 1807–1813. doi: [10.3724/SP.J.1146.2011.01383](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2011.01383).
CHEN Song, HUANG Kaizhi, and JI Jiang. A fast sequential acquisition method based on frequency sampling[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(8): 1807–1813. doi: [10.3724/SP.J.1146.2011.01383](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2011.01383).
- [21] XIONG Zhulin, AN Jianping, and WANG Aihua. Improved double block zero padding algorithm for P code direct acquisition[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2017, 37(5): 515–520. doi: [10.15918/j.tbit1001-0645.2017.05.015](https://doi.org/10.15918/j.tbit1001-0645.2017.05.015).
- [22] WANG Ningyuan, FENG Wenquan, ZHAO Hongbo, et al. A self-adaptive fast direct acquisition approach for long PN code in the high dynamic circumstance[C]. Proceedings of the 29th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, USA, 2016: 509–520.
- 曾芳玲: 女, 1970年生, 教授, 主要从事导航与时频方面的研究。
欧阳晓凤: 女, 1989年生, 博士生, 研究方向为卫星导航与导航对抗。
徐浩: 男, 1992年生, 硕士生, 研究方向为导航与定位和卫星信号捕获。
吕大千: 男, 1990年生, 博士生, 研究方向为导航与时间频率技术。