

GNSS 软件接收机中信号捕获新算法

李伟强¹ 张其善¹ 杨东凯¹

(1 北京航空航天大学电子信息工程学院,北京市海淀区学院路 37 号,100083)

摘 要:利用频域圆周移位与时域载波剥离等价的原理,提出了一种新的捕获算法。通过对输入信号频谱序列的圆周移位操作,代替在不同载波 Doppler 搜索单元下对输入信号的重复性的载波剥离和 FFT 操作,在码相位和多普勒单元的二维搜索过程中,只需对输入信号进行一次 FFT 操作。新算法有效地缩短了捕获时间,且不影响捕获概率和捕获精度。实验结果证明,该算法可以正确地完成信号捕获,并节省了近 50% 的捕获时间。

关键词:全球导航卫星系统(GNSS);捕获;快速傅立叶变换;软件接收机

中图法分类号:P228.41

GNSS 信号是经过直接序列扩频调制及载波调制的扩频信号,为了跟踪并解调 GNSS 信号,必须使用捕获算法来搜索信号的出现。在捕获过程中,必须估计出两个重要参数的值,即 C/A 码周期的起始位置和输入信号的载波频率^[1,2]。由于 GNSS 软件接收机的输入数据是分块的,因此,基于 FFT 的信号捕获算法很适合作为软件接收机的信号捕获算法。

对于实时的软件接收机来说,捕获速度十分重要。决定捕获速度的因素有两个:捕获参数的选取和捕获算法的运算量。在捕获参数方面,一般应尽可能地缩短用于捕获的数据长度,用于捕获的最长数据为 10 ms^[3]。捕获算法需要在-10~+10 kHz 的频率范围内搜索,以覆盖全部 Doppler 频率范围^[4]。同时,搜索的频率带宽不能过窄(可取 1 kHz 步长),否则会影响捕获的速度^[5]。在降低捕获算法的运算量方面,人们也作了大量的研究^[6-8]。这些研究都是通过降低 FFT 运算本身的计算量来降低捕获算法的计算量,从而达到节省捕获时间的目的。本文从减少捕获算法执行过程中的 FFT 运算次数的角度出发,利用对输入信号频谱序列的圆周移位,代替在不同载波 Doppler 搜索单元下对输入信号的重复性的载波剥离和 FFT 操作,降低算法的运算量,从而达到节省捕获时间的目的。

1 基于频域圆周移位信号捕获算法

1.1 算法的基本原理与执行过程

由于对时间序列的 FFT 变换可以得到该时间序列的频谱序列,因此,可以利用这个条件,通过对输入信号频谱序列的简单操作代替载波剥离、Doppler 搜索等复杂的时域操作,从而降低运算量,缩短捕获时间。

在各个 Doppler 搜索单元上,对接收信号进行载波剥离的过程实际上就是对接收信号的下变频过程,而下变频过程可以在频域通过频谱的搬移实现^[9]。对于离散时间信号 $x(n)$,有:

$$\text{DFT}[x(n)] = X(k) \quad (1)$$

$$Y(k) = X((k-l)_N)R_N(k) \quad (2)$$

$$\text{IDFT}[Y(k)] = x(n)e^{j(\frac{2\pi}{N})ln} \quad (3)$$

式中, $Y(k)$ 为 $X(k)$ 圆周移位后得到的新序列; N 为序列 $X(k)$ 和 $Y(k)$ 的长度; l 为圆周移位操作的位数; $R_N(k)$ 为长度为 N 的矩形序列。式(2)中,等号右边的表达式表示对序列 $X(k)$ 的圆周移位操作。此式表明,若在时间序列乘以复载波信号,则离散频谱序列就会有相应单位数的圆周移位,这可以看作是调制信号的频谱搬移。

对于 GNSS 信号捕获过程来说,如果 $Y(k)$ 为接收信号 $y(k)$ 的频谱序列,即

$$Y(k) = \text{FFT}[y(k)] \quad (4)$$

则载波剥离后的基带信号频谱序列 $B(k)$ 可以通过中频信号频谱序列 $Y(k)$ 的圆周移位得到。

接收信号 $y(k)$ 进行 FFT 操作后得到的频谱序列 $Y(k)$ 的频率分辨率为:

$$f_{\text{resolution}} = 1/T = f_s/N_{\text{FFT}} \quad (5)$$

其中, T 为相关积分时间; N_{FFT} 为 FFT 的点数。可以看出, 对于 n ms 的积分时间, 接收信号进行 FFT 后得到的频谱序列的频率分辨率为 $1/n$ kHz。

1) 中频频率 f_{IF} 可以表示为:

$$f_{\text{IF}} = k_{f_{\text{shift_IF}}} \cdot \frac{1\,000}{n} + f_{\text{IF_remains}} \quad (6)$$

其中, $f_{\text{IF_remains}}$ 为通过圆周移位不能消除的残余中频频率; $k_{f_{\text{shift_IF}}}$ 为圆周移位点数, 是一个使 $|f_{\text{IF_remains}}| < 500/n$ 成立的整数。

2) 对序列 $Y(k)$ 向左圆周移位 $k_{f_{\text{shift_IF}}}$, 得到序列 $B_0(k)$:

$$B_0(k) = Y((k + k_{f_{\text{shift_IF}}}))_N R_N(k) \quad (7)$$

则 $B_0(k)$ 可以看作接收信号下变频后的基带信号。实际上, 由于 $f_{\text{IF_remains}}$ 是圆周移位不能消除的残余中频频率, 因此, $B_0(k)$ 实际上是一个极低中频信号, 这里可以近似看作基带信号, 由 $f_{\text{IF_remains}}$ 带来的影响可以在后面进行修正。

3) 对序列 $B_0(k)$ 圆周移位 mn , 得到序列 $B_{mn}(k)$:

$$B_{mn}(k) = B_0((k + mn))_N R_N(k) \quad (8)$$

由于频谱序列的频率分辨率为 $1/n$ kHz, 因此, $B(k, mn)$ 可以表示在 Doppler 估计值为 m kHz 下的基带频谱序列。考虑式(6)中的残余中频频率, 实际的 Doppler 搜索单元对应的 Doppler 值为 $(1\,000\,m + f_{\text{IF_remains}})$ Hz。

基于上述原理, 图 1 给出了基于频域圆周移位的信号捕获算法的流程。

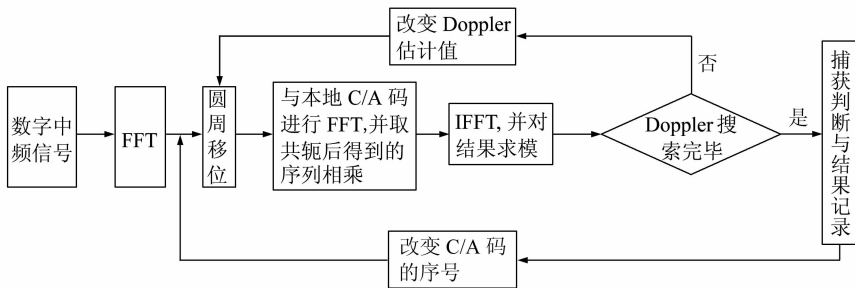


图 1 新信号捕获算法流程图

Fig. 1 Flow Diagram of New Acquisition Method

1) 对输入信号 $y(k)$ 进行 FFT 操作, 得到它的频谱序列 $Y(k)$, 并根据式(6)计算出 $k_{f_{\text{shift_IF}}}$ 和 $f_{\text{IF_remains}}$ 的值。

2) 对序列 $Y(k)$ 圆周移位 $k_{f_{\text{shift_IF}}} + mn$, 得到序列 $B_{mn}(k)$,

$$B_{mn}(k) = Y((k + k_{f_{\text{shift_IF}}} + mn))_N R_N(k) \quad (9)$$

3) 用与传统算法中相同的方法得到序列 $C^*(k)$, 然后与 $B_{mn}(k)$ 相乘。

4) 对结果进行 IFFT 处理, 得到复数相关值序列 $z(k, m)$, 并对序列求模得到 $|z(k, m)|$ 。

5) 完成上述过程后, 进入下一个 Doppler 搜索单元, 重新进入第 2) 步, 直到所有 Doppler 单元都搜索完毕, 得到相关矩阵 $|z(k, i)| (k=0, \dots, N-1; i=0, \dots, N_f-1)$ 。

6) 判断最大相关值是否超过门限, 如果超过门限, 则判断当前卫星可见, 记录对应的 Doppler 值和码相位值; 否则, 判断当前卫星为不可见, 然后重新进入第 2) 步, 开始下一颗卫星的捕获, 直

到所有卫星都捕获完毕。

7) 用残余中频频率 $f_{\text{IF_remains}}$ 对第 6) 步中得到的 Doppler 值进行修正, 得到每颗卫星信号的实际载波 Doppler。

上述过程中, 多普勒搜索单元为 1 kHz, 这样选择可以使每个多普勒搜索单元对应的圆周移位数为整数。事实上, 前面也提到, 对软件接收机来说, 1 kHz 是个合理的 Doppler 搜索步长。

对于多普勒搜索单元为其他值的情况, 可以首先对接收信号频谱序列进行插值操作, 改变其频率分辨率, 使每个多普勒搜索单元对应的圆周移位数为整数, 移位后再进行抽取操作, 恢复原频谱序列的点数。

1.2 算法分析与比较

在传统的 FFT 信号算法的执行过程中, 对于每个 Doppler 搜索单元, 都需要对输入信号进行载波剥离和 FFT 操作, 完成单颗卫星的信号捕获过程需要进行 $2N_f$ 次(I、Q 两路)载波剥离操作

(每次载波剥离操作需要进行 N 次乘法操作)和 $2N_f+1$ 次 FFT 或 IFFT 操作。而基于频域圆周移位的信号捕获算法对输入信号只需进行一次 FFT 操作,而对于每个 Doppler 搜索单元,则可以通过简单、快速的圆周移位操作实现。完成单颗卫星的信号捕获过程,只需 N_f+2 次 FFT 或 IFFT 操作,且不需要载波剥离操作。

由于式(6)中 $f_{\text{IF_remains}}$ 的影响,两种算法的载波 Doppler 搜索单元对应的 Doppler 值不同。传统算法中,第 i 个 Doppler 搜索单元对应的 Doppler 值为:

$$f_{D,i} = f_{\min} + i \cdot \Delta f$$

(10)

新算法中,第 i 个 Doppler 搜索单元对应的 Doppler 值为:

$$f_{D,i}^* = f_{\min} + i \cdot \Delta f - f_{\text{IF_remain}}$$

(11)

由于两种算法的多普勒搜索单元宽度相同,因此,捕获得到的载波 Doppler 频率的估计值的精度也相同。且由于圆周移位替代载波剥离的过程并不会给相关能量带来损失,因此,新算法不会影响信号的捕获概率。

2 算法实现

根据上述算法,在 VC++ 6.0 环境中对 GPS 信号捕获的程序进行了实现,用于获取当前可见卫星的序号以及每颗可见卫星的 C/A 码起始相位和载波 Doppler 值。在算法的实现过程中,选择 1 ms 作为积分时间,选择载波 Doppler 的搜索单元宽度为 1 kHz。

实验平台如图 2 所示,GPS 信号经过 GPS L_1 天线进入射频前端,并由中频信号采样器采样得到 GPS 数字中频信号(中频 4.130 4 MHz;采样率 16.367 6 MHz;采用 2 bit 量化,量化值分别为 ± 1 和 ± 3),将此信号通过 USB 接口输入到 PC 机,用于 GPS 软件接收机处理。

在此实验平台中,分别使用传统算法和本文算

法对同一时间段内的 GPS 信号进行捕获,表 1 给出了捕获的结果。可以看出,捕获时间由原来的 3.42 s 降低到 1.73 s,新算法的捕获速度提高了近 50%。



图 2 算法验证平台
Fig. 2 Verification Platform of the Algorithm

表 1 两种算法的捕获结果

Tab. 1 Acquisition Result of two Algorithm

算法	卫星号	最大相关值/ 10^7	码相位/采样点	多普勒 /Hz	捕获时间 /s
传统捕获方法	06	1.386 638	2 018	1 000	3.42
	09	2.165 454	7 357	2 000	
	15	1.349 060	10 537	-2 000	
	18	1.485 461	4 971	-4 000	
	21	0.781 754	3 662	3 000	
	24	0.863 173	13 752	-2 000	
	26	0.738 512	5 792	1 000	
基于频域圆周移位的捕获算法	06	1.034 212	2 018	600	1.74
	09	2.607 852	7 357	1 600	
	15	0.867 745	10 536	-1 400	
	18	1.535 476	4 971	-3 400	
	21	0.874 238	3 662	2 600	
	24	1.054 613	13 753	-2 400	
	26	1.176 854	5 792	1 600	

为了比较两种算法的频率估计精度,表 2 给出了采用文献[4]中的方法计算的各颗卫星的 Doppler 精确值。通过与表 1 中两种捕获算法得到的 Doppler 估计值进行比较可以看出,新算法没有影响捕获的载波 Doppler 估计精度。

表 2 载波多普勒的精确值

Tab. 2 Fine Estimation of Carrier Doppler

卫星号	06	09	15	18	21	24	26
Doppler/Hz	836.4	1 672.7	-1 704.6	-3 665.3	2 776.1	-2 413.6	1 328.4

图 3 给出了 GPS 原始数据信号(PRN=9)在 C/A 码相位和 Doppler 频移所构成的二维平面上进行搜索时得到的相关值。在采集到的 GPS 信

号中,包含 PRN=9 的卫星的信号,这可以从搜索图中显著的峰值看出,峰值所在的位置为信号的 C/A 码码相位和 Doppler 搜索单元值。

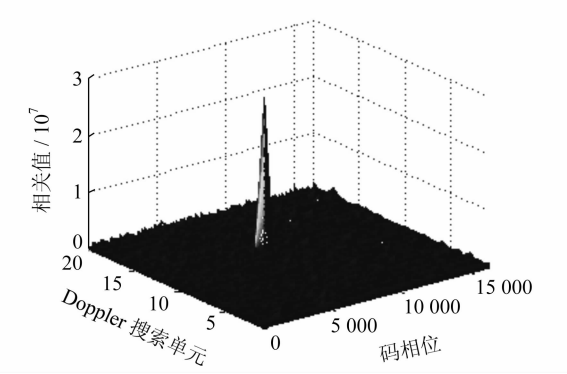


图 3 9 号卫星的捕获结果

Fig. 3 Outputs of Acquisition for PRN 9 by New Acquisition Method

参 考 文 献

[1] Kaplan E D. Understanding GPS: Principles and Applications[M]. Boston: Artech House, 1996:75-132

[2] 胡丛玮,李晓玲,安雷.一种改进的 GPS 微弱信号捕获方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2008,33(8):821-823

[3] Spilker J J J. GPS Signal Structure and Performance Characteristics[J]. Navigation, 1978, 25(2):121-146

[4] Tsui J B. Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach[M]. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 2005: 133-164

[5] 赵昀,张其善. 软件 GPS 接收机架构与捕获算法实现[J]. 北京航空航天大学学报,2006,32(1):53-56

[6] Nee D J R, Coenen A J R M. New Fast GPS Code-acquisition Technique Using FFT[J]. Electronics Letters, 1991, 27: 158-160

[7] Psiaki M L. Block Acquisition of Weak GPS Signals in a Software Receiver[C]. The 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS 2001, Salt Lake City, UT, 2001

[8] Starzyk J, Zhu Z. Averaging Correlation for C/A Code Acquisition and Tracking in Frequency Domain [C]. MWSCS Conf, Fairborn, OH, 2001

[9] 黄磊.GNSS 软件接收机设计及信号捕获技术研究 [D]. 北京:北京航空航天大学,2006

[10] 郑君里,应启珩,杨为理. 信号与系统[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2000:125

第一作者简介:李伟强,博士生,主要研究方向为全球导航卫星系统(GNSS)接收机中的信号处理方法。
E-mail:cokelee@sina.com

A New Signal Acquisition Algorithm in GNSS Software Receiver

LI Weiqiang¹ ZHANG Qishan¹ YANG Dongkai¹

(1 School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, 37 Xueyuan Road, Haidian District, Beijing 100083, China)

Abstract: A new signal acquisition algorithm is proposed based on the principle that the circular shifting operation in frequency-domain is equal to the carrier wipe-off operation in time-domain. The repeating operations of FFT and carrier wipe-off in each carrier Doppler searching bin could be replaced by the circular shifting of the spectrum sequence of the incoming signal, thus the FFT of the incoming signal is implemented only once during the 2-dimension search of code-phase and carrier Doppler. With no degradation in probability and accuracy of acquisition, the new algorithm can significantly reduce the acquisition time compared with the traditional one. This algorithm has been implemented in the GNSS software receiver to acquire the raw GPS signal, experiment results show that the proposed algorithm can acquire GPS signal correctly while reducing acquisition time by 50%.

Key words: global navigation satellite system (GNSS); acquisition; FFT; software receiver

About the first author: LI Weiqiang, Ph.D candidate, majors in signal processing methods in GNSS receiver.
E-mail: cokelee@sina.com