

文章编号: 2095-4980(2014)05-0697-05

一种 GNSS 信号捕获中的比特压缩与重构方法

吴军伟^a, 梁涛涛^a, 秦代成^b, 王 明^a

(中国工程物理研究院 a.电子工程研究所; b.机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 在全球导航卫星系统(GNSS)双模接收机的信号捕获过程中, 采用“多段匹配滤波器(MMF)+快速傅里叶变换(FFT)”的方式实现信号的时频二维搜索, 采用非相干累加算法以提高捕获灵敏度, 这 2 种算法在硬件实现中需要占用大量的存储资源。由于现场可编程门阵列(FPGA)芯片的存储资源有限, 本文提出了一种比特压缩方法, 极大地降低了非相关累加后的随机存取存储器(RAM)资源, 比特重构方法对压缩数据做还原处理, 保证了数据的精确度。该方法只对强信号的非相干累加结果做压缩, 对弱信号结果不做压缩处理。仿真结果表明, 该算法在满足 0.9 的检测概率, 0.01 的虚警概率下, 节省了 0.64 Mbit 的 RAM 资源。

关键词: 全球导航卫星系统; 信号捕获; 非相干累加; 比特压缩; 比特重构

中图分类号: TN961

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201405.0697

A bit compress and recover approach in GNSS signal acquisition

WU Jun-wei^a, LIANG Tao-tao^a, QIN Dai-cheng^b, WANG Ming^a

(a.Institute of Electronic Engineering; b.Institute of Mechanical Manufacturing Technology,
China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: In the signal acquisition process of Global Navigation Satellite System(GNSS) double mode receiver, Multi-bank Matched Filter(MMF)+Fast Fourier Transform(FFT) are adopted to realize signal search in time and frequency domain; and un-correlative accumulation is adopted to increase signal acquisition sensitivity. Whereas, these two algorithms cost a lot of memory resources in hardware implementation. A measure of bit compress and bit recover is proposed aiming to the limit of memory resources of Field Programmable Gate Array(FPGA) chip. Bit compress largely cuts the Random Access Memory(RAM) resource after un-correlative accumulation; and bit recover renews the compressed data to guarantee the data precision. This method just compresses the un-correlative accumulation results of strong power signal, but not of the weak signal. Simulation results indicate that this algorithm can save 0.64 Mbit of RAM resource with a detect probability of 0.9 and a false probability of 0.01.

Key words: Global Navigation Satellite System; signal acquisition; un-correlative accumulation; bit compress; bit recover

在弱信号、高动态环境下, 接收机的载噪比很低, 需要长时间的相关积分来获取增益, 造成了捕获时间长以及捕获困难^[1]。一般的“FFT+IFFT”的捕获方案, 虽能节省存储资源, 但一次只能搜索一个频率槽, 捕获时间长^[2]。本文采用“MMF+FFT”的捕获方案, 减少了捕获时间; 采用非相干累加, 克服了相干积分延长受到导航电文的限制以及多普勒的影响。但这 2 种算法都需要大量的存储空间, 尤其对码片数比较多的 B3 频点。如果数据位数为 m 位, 采用 N 点的 FFT, 考虑半码片的捕获, B3 频点的码相位区间为 20 460, 则需要的存储空间为 $N \times m \times 20$ kbit。如果 N 为 16, m 为 9, 则需要的存储空间为 2.88 Mbit。匹配滤波后还需大量的存储资源, 可见, 仅捕获部分就需要占用很多的 FPGA 存储资源(Virtex-5 系列 XC5VTX150T 的一片 FPGA 芯片其 RAM 资源为 8 Mbit^[3])。如果将 m 缩减为 7, 可以减少 0.64 Mbit 的 RAM 资源。在这种需求下, 本文提出了一种比特压缩与比特重构的方法, 压缩后的数据存储在 RAM 中, 从 RAM 中取出的数据需做重构之后才能完成后续的计算和判决。该算法保证了检测峰值在弱信号条件下的完整性和强信号条件下的明显性。

1 GNSS 信号捕获实现

1.1 基于 MMF+FFT 的 GNSS 信号捕获

捕获的目的是为了获取可见卫星信号的载波多普勒频率和码相位的粗略估计值。基于 MMF+FFT 的捕获方法是一种快速捕获算法,匹配滤波器实现对 C/A 码的快速捕获,FFT 实现对卫星信号多普勒频率的快速捕获,整体实现了信号的时频二维并行搜索^[4-5]。MMF+FFT 的结构如图 1 所示。其具体操作是:总的相关长度为 L ,每一段码匹配滤波器(Code Match Filter, CMF)的相关长度为 L/B ,共有 B 段这样的相关器,相关器输出补零进行 N 点的 FFT。对 FFT 输出数据取模后做非相干累加,累加值存储到 RAM 中,然后再做判决处理。

FFT 输出信号取模后输出^[6]为:

$$|F_i| = \frac{L}{B} \left| R(\tau) \frac{\sin \left[\pi T \left(f_e - \frac{iB}{NT} \right) \right]}{\sin \left[\frac{\pi T}{B} \left(f_e - \frac{iB}{NT} \right) \right]} \right| \quad (1)$$

式中: τ 表示传输时延; $T = LT_c$ 表示总的相关时间,其中 T_c 表示码片速率; $f_e = f_{tr} - f_{local} + f_{dop}$ 表示总的多普勒频差, f_{tr} 表示卫星信号发射频率, f_{local} 表示本地载波, f_{dop} 表示卫星与用户间的多普勒频率。可见,只有在 $\tau=0$ 且 $f_e = iB/(NT)$ 的情况下,能量才会保持最大,该算法实现了真正意义上的时频二维搜索。

1.2 非相干累加

对于微弱信号的捕获,最有效的方法就是采用增加相关积分时间来提高捕获的灵敏度。但是,相干积分时间的延长受到导航电文(比特跳变)的限制以及多普勒的影响。典型的高灵敏度捕获算法通常采用非相干累加来提高灵敏度^[7]。图 2 中给出了非相干累加的结构图,非相干累加的结果需要存储到 RAM 中,下一次对应相位的相干积分结果做累加。

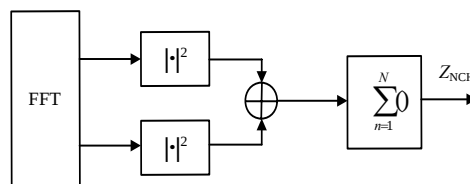


Fig.2 Un-correlative accumulation
图 2 非相干累加

2 捕获算法存储资源分析

从捕获的实现原理上可以计算出整个捕获模块所需要的存储资源,本文以周期内码片数目最多的 B3 为例。

首先是相关积分结果的存储,采用 1 ms 的积分,半个码片(20.46 MHz)的滑动相关, B 段匹配滤波(B 小于等于 FFT 点数 N),每段产生的积分值有 20 460 个,每个积分值的位数为 k 位,则做完分段匹配滤波后需要的存储空间为 $B \times k \times 20\,460$ bit,即 $B \times k \times 20$ kbit。

然后是非相干累加结果的存储,FFT 点数为 N ,非相干累加结果位数为 m 位,码相位区间有 20 460 个,则需要的存储空间为 $N \times m \times 20\,460$ bit,即 $N \times m \times 20$ kbit。

从上面的计算结果可以看出,采用多段匹配滤波器+FFT 的架构需要大量的 RAM 存储资源,而且,随着运算级数的增加,非相干累加结果的位数会比相干积分结果的位数有所增加,所以 $k \leq m$,且由于 $B \leq N$,因此,优先考虑对非相干累加的结果做截位处理后存储。如果减少的比特数目为 n 比特,则节省的资源为 $N \times n \times 20\,460$ bit,即 $N \times n \times 20$ kbit。

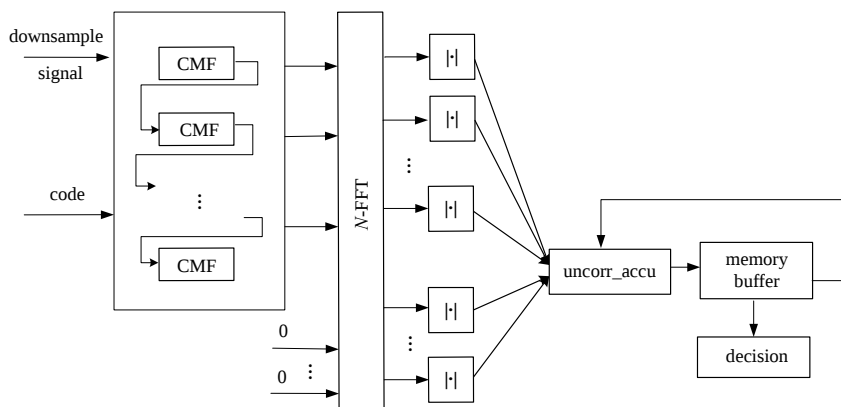


Fig.1 Acquisition algorithm based on MMF+FFT
图 1 基于多段匹配滤波器+FFT 的捕获算法

3 比特压缩与重构方法

一般的算法中,考虑直接对数据做除法达到压缩的目的,然后再做乘法恢复信号。这种压缩还原方式的优越性只限在强信号的捕获中。在弱信号中,信号能量值比较低,峰值本身不是很明显,这样的处理会使峰值降低,影响检测概率,捕获性能会极大下降。在做压缩和重构的过程中,最好是能够同时兼顾弱信号和强信号,本算法正好满足这种需求。

3.1 二维搜索结果分析

本文的定点设计是在浮点仿真平台与定点仿真平台下共同仿真决定的。定点设计满足检测概率为 0.9,虚警概率为 0.001 的捕获要求。在做数据压缩之前,需要统计非相干累加结果在弱信号下的幅值分布情况。为了简化算法,只对 GPS 的捕获做了仿真,B3 频点同理。在满足检测概率和虚警概率要求下对强信号和弱信号进行仿真,它们的时频二维搜索结果如图 3 所示。

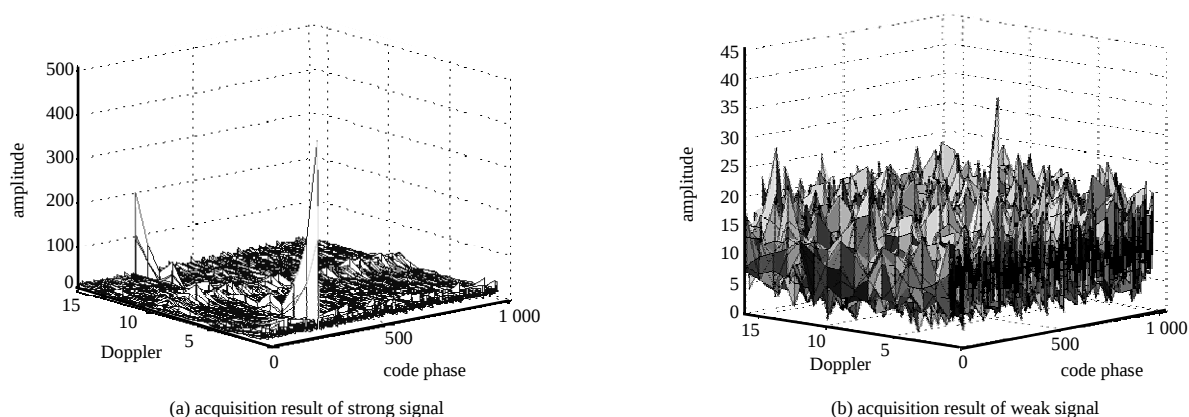


Fig.3 Result of GPS parallel search in time and frequency domain

图 3 GPS 时频二维搜索结果

从图 3(a)中可以看出,强信号下捕获的幅值几乎是满量程的(幅值定点位数为 9 bit),说明当前的定点方案是合理的。从图 3(b)中可以看出,弱信号下捕获的幅值分布在 64(需是 2 的 N 次幂的一个值)以内。压缩机制要保证弱信号下的幅值不变,否则会对输出信噪比造成较大的影响。所以,将 9 bit 数据压缩到 7 bit 是合理的。

3.2 比特压缩与重构方法

具体的压缩原则如下: 64 以内的数据不压缩,直接进入存储器;超过 64 的数据,需要除以 8 后再加上 64,然后再对这个经过压缩后的数据进行存储。数据压缩实现流程图如图 4(a)所示。

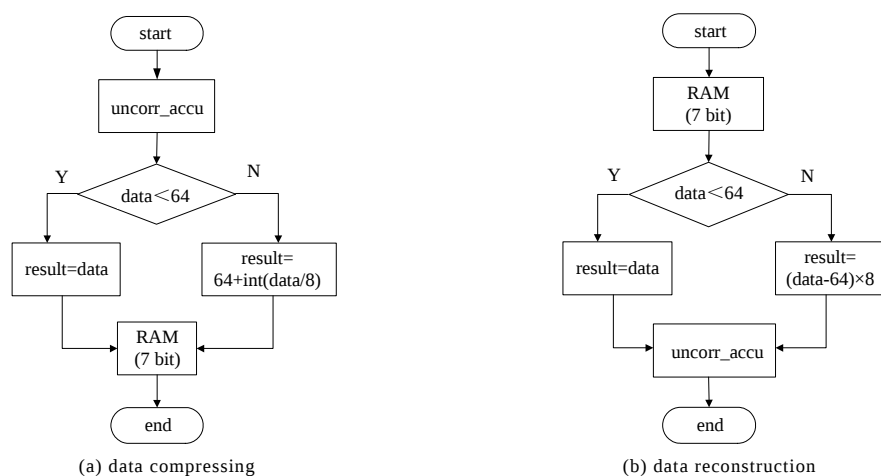


Fig.4 Flow chart of data compressing and data reconstruction

图 4 数据压缩与数据重构流程图

设压缩前的幅值为 A , 压缩数据 y 表达式为:

$$y = \begin{cases} 64 + \text{int}(A/8) & A \geq 64 \\ A & A < 64 \end{cases} \quad (2)$$

非相干累加过程中,新的幅值需要与存储器对应相位和频点的存储值做累加。为保证相加数据处于同一个量级,存储数据在做非相干累加之前,需要进行重构。数据重构过程是数据压缩过程的一个反过程,流程图如图 4(b)所示。

设重构前的幅值为 R , 则重构数据 x 的表达式为:

$$x = \begin{cases} (R - 64) \times 8 & R \geq 64 \\ R & R < 64 \end{cases} \quad (3)$$

很显然,经过重构后的数据(主要是大于 64 的数据)精确度上会有损失,按照这种压缩与重构方式会导致连续的 8 个数据具有相同的结果,误差范围是 0~7。但信号较强时,峰值依然比较明显,这种数据处理方式并不会影响到峰值的判决;而对弱信号,该算法并不会影响弱信号下捕获到的幅值。

4 性能分析与验证

4.1 性能分析

该算法带来的误差范围是 0~7, 设噪声幅值为 A_n , 信号真实的幅值为 A_s , 则信噪比损失可表示为:

$$L = 20 \log \frac{A_s}{A_n} - 20 \log \frac{A_s - B}{A_n}, B \in [0, 7] \quad (4)$$

强信号下, 9 bit 的峰值满量程, 取 $A_s=511$, 噪声幅值 $A_n=11$, 采用压缩机制带来的损失最大为 0.12 dB; 弱信号下, 峰值在 64 左右, 噪声幅值不变, 若对弱信号也采用这样的压缩方式进行压缩, 带来的损失将达到 1 dB。

已知单次信号检测的虚警概率和检测概率^[8]为:

$$P_{fa} = e^{-\left(\frac{V_t^2}{2\sigma_n^2}\right)} \quad (5)$$

$$P_d = Q_1(\sqrt{kT_c C / N_0}, \sqrt{-2 \ln P_{fa}}) \quad (6)$$

式中: V_t 表示捕获判决门限; σ_n 表示噪声功率; $Q_m(a, b)$ 为广义 Marcum Q 函数; kT_c 表示相干积分时间, T_c 表示码周期长度 1 ms; C/N_0 表示载噪比。由式(6)可知, 检测概率是关于相干积分时间、接收信噪比、虚警概率的函数。

选取信号强度在 -120 dBm ~ -144 dBm 的数据, 考虑 10 ms 的积分时间, 在虚警概率为 0.001 的要求下, 分析采用上面的压缩机制带来的信噪比损失以及对检测概率的影响, 分析结果如图 5 所示。

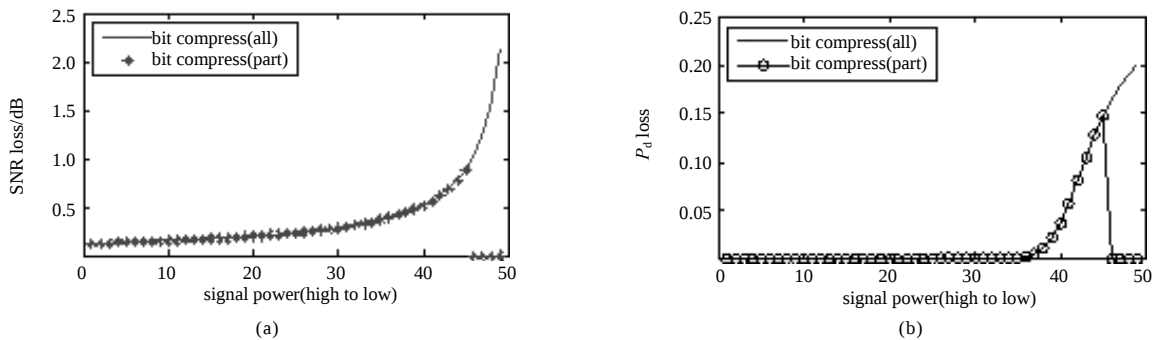


Fig.5 Influence of bit compress on SNR and P_d

图 5 比特压缩对信噪比和检测概率的影响

图 5(a)表示信号由强到弱下, 所有信号采用比特压缩机制和只对强信号采用比特压缩机制分别较所有信号不压缩所带来的信噪比损失; 图 5(b)表示信号由强到弱下, 所有信号采用比特压缩机制和只对强信号采用比特压缩机制分别较所有信号不压缩所带来的检测概率下降值。可见, 输入信号越弱, 压缩对信噪比和检测概率的影响也越大。但若对微弱信号不做压缩处理, 并不会影响弱信号的输出信噪比, 从而保证了单次的检测概率。

4.2 性能验证

在 MATLAB 软件下搭建捕获仿真平台,仿真信号强度由弱到强选择 5 个仿真点: -140 dBm, -135 dBm, -130 dBm, -125 dBm 以及 -120 dBm, 分别对这 5 个不同强度的信号做 1 000 次的捕获仿真, 将比特压缩机制下的捕获成功概率与未采用比特压缩机制下的捕获成功概率的仿真结果做对比, 见表 1, 未采用比特压缩机制下的捕获检测概率表示为 P_A , 采用比特压缩的捕获检测概率表示为 P_B 。

从表 1 的仿真结果中可以看出, 强信号下检测到的峰值很明显, 采用比特压缩算法对捕获结果几乎没有影响; 在中等强度信号和较弱信号下会降低捕获概率, 但是影响较小; 弱信号的捕获峰值低于压缩门限而不会被压缩, 所以不会对捕获造成影响, 检测概率不变。该仿真结果与前面的性能分析一致。

5 结论

本算法是在考虑节省 FPGA 的 RAM 资源情况下提出, 基于用户处于不同运动状态下对信号的接收能力是动态的前提条件, 所以要保证比特压缩方案不能对不同强度信号的接收灵敏度造成较大的影响。本文提出了一种对强信号检测结果做压缩, 对弱信号检测结果保持不变的一种压缩与重构算法。对算法的性能做了分析, 并在仿真平台上加以验证, 从理论和仿真中都证明了算法对强弱信号的通用性。该算法极大地节省了存储资源, 克服了硬件实现时频二维搜索资源紧张的问题, 具有较大的工程实现意义。

参考文献

- [1] Van Nee D J R, Coenen A J R M. New fast GPS code acquisition technique using FFT[J]. Electronic Letters, 1991, 27(2): 158-161.
- [2] Revnivykh S G. Development trends in global satellite navigation[J]. Gyroscopy and Navigation, 2012, 3(4): 215-222.
- [3] Xilinx. Virtex-5catena summarization[Z]. 2009.
- [4] Wolfert R, Chen S, Kohli S, et al. Direct P(Y)-code acquisition under a jamming environment[C]// IEEE 1998 Position Location and Navigation Symposium. New York, NY, USA: [s.n.], 1998: 228-235.
- [5] 罗兴宇, 张其善. 高动态GPS信号C/A码捕获方案及实现[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(3): 358-361. (LUO Xing-yu, ZHANG Qi-shan. Control strategy and implementation for acquisition for C/A code of high dynamic GPS signals[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(3): 358-361.)
- [6] 吴高进, 邹永忠, 谭敏强. 时频二维搜索算法及其FPGA实现[J]. 北京邮电大学学报, 2009, 32(3): 91-92. (WU Gao-jin, ZOU Yong-zhong, TAN Min-qiang. A novel acquisition algorithm based on parallel search in time and frequency domain and FPGA implementation[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009, 32(3): 91-92.)
- [7] 吴志强. GNSS接收机捕获算法的研究及其FPGA实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011. (WU Zhi-qiang. Algorithm study of acquisition and FPGA implementation of GNSS receiver[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011.)
- [8] 黄静, 姚铮, 陆明泉. 一种改进的GPS信号捕获策略的性能分析[J]. 航宇学报, 2011, 32(1): 159-160. (HUANG Jing, YAO Zheng, LU Ming-quan. Performance of an improved GPS acquisition strategy[J]. Journal of Space Navigation, 2011, 32(1): 159-160.)

作者简介:



吴军伟(1987-), 女, 重庆市人, 研究实习员, 主要研究方向为卫星导航. email: wjw1987_1003@163.com.

梁涛涛(1988-), 男, 贵州省遵义市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为GPS信号捕获.

秦代成(1986-), 男, 重庆市人, 助理工程师, 主要研究方向为机械可靠性设计.

王 明(1984-), 男, 河南省洛阳市人, 助理研究员, 主要研究方向为扩频信号处理.

表 1 仿真结果对比

signal power/ dBm	P_A	P_B
-120	1.000	1.000
-125	1.000	1.000
-130	0.986	0.986
-135	0.931	0.928
-140	0.904	0.904