

一种基于数字匹配滤波的高灵敏度 GNSS 信号位同步算法

何文涛¹, 徐建华², 叶甜春¹, 殷 明²

(1 中国科学院 微电子研究所, 北京 100029; 2 杭州中科微电子有限公司, 浙江 杭州 310053)

摘 要: 提出的基于匹配滤波的位同步算法有效利用了这种信号结构, 可以显著提高位同步的灵敏度. 仿真结果表明, 以 NH(20) 次码信号结构的信号为例, 采用 2s 的位同步时间, 在错误位同步概率为 $1e-3$ 的情况下, 位同步灵敏度可以达到 12 dB-Hz.

关键词: GNSS; 位同步; 高灵敏度; 匹配滤波

中图分类号: TN961

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)03-0048-03

A High Sensitivity GNSS Signal Bit Synchronization Algorithm Based on Matched Filtering

HE Wen-tao¹, XU Jian-hua², YE Tian-chun¹, YIN Ming²

(1 Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2 Hangzhou Zhongke Microelectronics Co., Ltd, Hangzhou 310053, China)

Abstract: A new bit synchronization algorithm based on matched filtering is presented applicable to this signal structure. It can significantly improve the sensitivity of bit synchronization. When spending 2s to synchronize the signal with NH(20) second code signal structure, simulation results show that the bit synchronization sensitivity can reach 12dB-Hz with false bit synchronization probability of $1e-3$.

Key words: GNSS; bit synchronization; high sensitivity; matched filtering

1 引言

在自主型 GNSS 接收机中, 必须通过检测输入信号以实现位同步. 匹配滤波器已经广泛应用于 GPS 信号的快速捕获算法中^[1-2].

目前大多数位同步算法都是针对最成熟的 C/A 码信号. 直方图法^[3]以及其改进算法^[4]是应用最广泛的位同步算法, 它通过统计相邻积分值的极性翻转来检测位边沿. 最大似然法^[5-6]通过计算所有可能的位边沿位置对应的数据能量的时间平均, 并选择最大值的位置作为位边沿. 与直方图法相比, 最大似然法没有对相关器的积分值量化, 因此在位同步速度和灵敏度方面都优于直方图法. 但是, 不管在强信号还是弱信号下, 最大似然法容易出现错误的位同步, 文献^[7]提出了一种改进的最大似然法, 可以

显著减小错误位同步的概率.

本文针对采用了二级码调制方式的信号, 提出一种基于匹配滤波的位同步算法. 在位同步速度, 灵敏度以及错误位同步概率方面都有显著的提高.

2 算法的理论推导

相关器输出的相干积分值是一个扩频码周期内的卫星信号相关值, 数据率等于扩频码周期 T . 对于所有的 GNSS 信号, 其相干积分值都可以表示为

$$r(k) = A \cdot D(k) \cdot CS(k) \cdot \exp(j(2\pi\Delta f T k + \Delta\theta)) + (n_l(k) + j \cdot n_q(k)) \quad (1)$$

式中, $CS(k)$ 是次码, 一个次码周期的码片数目为 N_s , 周期为 $T_{sc} = N_s T$, 对于 C/A 码信号, 次码可以认为是常数 1; A 是相关后的信号幅度; 对于数据信号, $D(k)$ 是调制数据位, 对于导频信号, $D(k)$ 是常

收稿日期: 2010-03-09; 修回日期: 2010-05-18

基金项目: “核高基”重大专项(2009ZX01031-002-008)

数 1; Δf 和 $\Delta \theta$ 分别是跟踪的载波频率和相位误差, 在一个次码周期内, 信号幅度、调制数据、载波频率和相位误差可以认为是常数; $n_I(k)$ 和 $n_Q(k)$ 是独立同分布的加性高斯噪声, 标准差为 σ 。

信号 $r(k)$ 受到加性高斯噪声的影响, 具有匹配与信号的冲激响应的滤波器使输出信噪比最大^[8]。信号 $r(k)$ 的数字匹配滤波器的冲激响应为 $h(k) = \text{CS}(N_s - k)$, 匹配滤波的结果为

$$\begin{aligned} x(\tau) &= \sum_{k=0}^{N_s-1} r(\tau+k)h(N_s-k) \\ &= \sum_{k=0}^{N_s-1} r(\tau+k)\text{CS}(k) \\ &= A \cdot \exp(j\Delta\varphi) \cdot \frac{\sin(\pi\Delta f T N_s)}{\sin(\pi\Delta f T)} \cdot R(\tau) + \\ &\quad \sqrt{N_s}(n_I(\tau) + j \cdot n_Q(\tau)) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, τ 表示次码相位偏移, 第一项是信号成分, 第二项是噪声成分; 信号中数据调制的次码的自相关函数为

$$R(\tau) = \frac{1}{N_s} \sum_{k=0}^{N_s-1} D(\tau+k)\text{CS}(\tau+k)\text{CS}(k) \quad (3)$$

从式(2)、(3)可以看出, 匹配滤波的结果本质上是信号的自相关函数, 位同步的性能很大程度上取决于次码的自相关特性。如图 1 所示, 以 GPS L1 C/A 为代表的信号利用数据位翻转来获得位同步, 其位同步性能不仅受限于位翻转的概率, 另外位边沿附近的相关值容易受噪声影响而超过位边沿对应的相值, 从而导致错误的位同步。相比而言, NH 和 CS 次码的相关特性相似, 位边沿对应的相值明显大于其他的相关值, 所以受噪声的影响较小。

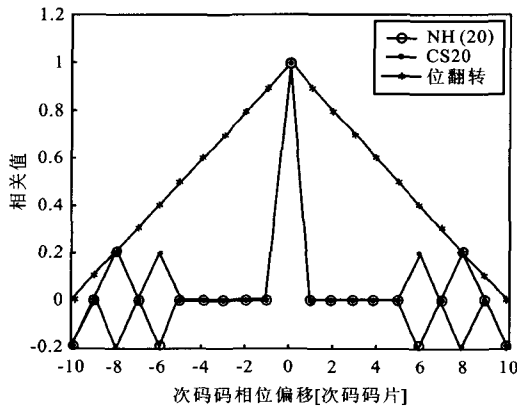


图 1 次码的自相关特性曲线

为了提高位同步的灵敏度以及可靠性, 通常对匹配滤波结果进行非相干积分来提高信噪比。积分之前先计算匹配滤波结果的幅度, 为了简化分析, 假

设信号完全同步, 即载波频率和码相位误差为零, 幅度服从赖斯分布, 均值和方差分别为^[8]

$$\begin{cases} E[x(\tau)] = \sqrt{N_s}\sigma \sqrt{\pi/2}e^{-\gamma/2} \\ ((1+\gamma)I_0(\gamma/2) + \gamma I_1(\gamma/2)) \\ D[x(\tau)] = 2N_s\sigma^2(1+\gamma) - E^2[x(\tau)] \end{cases} \quad (4)$$

式中, γ 表示匹配滤波后的信噪比, 与相关值 $R(\tau)$ 有关, 当准确位同步时, $\gamma = T_s \text{CN}_0$ 。经过时间长度为 $T = MT_s$ 的位同步, 匹配滤波结果的幅度经过 M 次累加的非相干积分结果为

$$y(\tau) = \sum_{m=0}^{M-1} x_m(\tau) \quad (5)$$

$y(\tau)$ 可以近似认为是高斯分布, 均值和方差分别为

$$\begin{cases} E[y(\tau)] = M \cdot E[x(\tau)] \\ D[y(\tau)] = M \cdot D[x(\tau)] \end{cases} \quad (6)$$

错误位同步的概率为

$$\text{EBSR} = \sum_{i=1}^{N_s-1} \text{prob}(y(i) > y(0)) \quad (7)$$

从式(4)~(6)可以看出, 除了与次码的自相关特性外, EBSR 只与信号的信噪比以及位同步的时间有关。

3 算法实现

如图 2 所示, 基于匹配滤波的位同步算法主要分为三部分:

(1) 匹配滤波。接收信号 $r(k)$ 经匹配滤波器, 依次输出对应 N_s 个可能位边沿的匹配滤波结果 $x(k)$;

(2) 非相干积分。 N_s 个 $x(k)$ 各自经过非相干积分得到 N_s 个非相干积分值;

(3) 位边沿判决。找出最大的非相干积分值, 最大值的位置对应位同步得到的位边沿。

4 算法仿真

利用统计仿真方法来估计基于匹配滤波的位同步算法的性能, 即错误位同步概率与信号载噪比以及位同步时间的关系。信号模型由式(1)给出, 为了简化仿真与分析, 忽略载波频率和初级码的码相位误差。随机设置数据位边沿的位置, 利用本文的位同步算法估计的位边沿若与设置值相同, 则认为是正确的位同步, 否则认为是错误的位同步。采用 NH(20) 次码, 匹配滤波的时间间隔是 20 ms, 分别采用不同的非相干积分次数 $M=4, 10, 20, 50, 100$, 对应的位同步时间分别是 80 ms, 200 ms, 400 ms, 1 s, 2

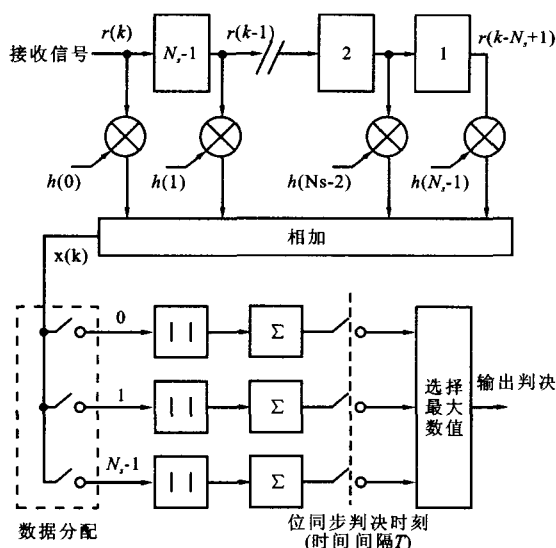


图2 基于匹配滤波的位同步算法的结构框图

s. 对每个信号载噪比以及位同步时间,重复100 000次试验,统计错误位同步的概率。仿真结果如图3所示。

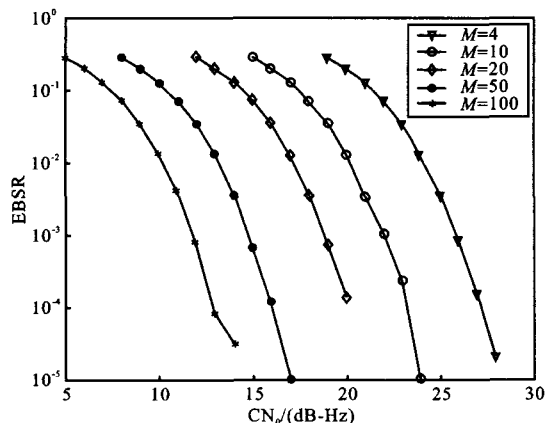


图3 错误位同步概率与信号载噪比的关系曲线

从图3可以看出,随着信号载噪比的提高,错误位同步的概率呈指数急剧减小;同时随着非相干积分次数 M 的增加,错误位同步的概率也逐渐减小。从通常,在GNSS接收机中,错误位同步概率需要小于某个值,比如 $1e-3$,那么对于固定的非相干积分次数,其信号载噪比必须大于某个最小载噪比(用以表示位同步灵敏度)。具体数值如表1所示。

表1 位同步灵敏度与非相干积分次数的关系

非相干积分次数 M	4	10	20	50	100
错误位同步概率	$0.81e-3$	$1e-3$	$0.72e-3$	$0.67e-3$	$0.75e-3$
位同步灵敏度/(dB-Hz)	26	22	19	15	12

从中可以看出,在相同的错误位同步概率下,最

小载噪比与 M 成反比关系,比如 M 从50到100,最小载噪比降低3 dB,即位同步灵敏度改进3 dB。

5 结束语

新的GNSS信号中大多采用了二级码的信号结构,这为提高位同步性能提供了条件。本文提出的基于匹配滤波的位同步算法有效利用了这种信号结构。仿真结果表明,以NH(20)次码信号结构为例,采用2 s的位同步时间,在错误位同步概率为 $1e-3$ 的情况下,位同步灵敏度可以达到12 dB-Hz。

参考文献:

- [1] 许诺,陈培,王云,等. 匹配滤波器组与FFT结合的伪码快速捕获方案研究[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(2): 84-88.
- [2] 赵慷慨,汪峰,李金海,等. 基于FPGA高动态GPS快速捕获协处理器设计实现[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(2): 38-40.
- [3] Parkinson B, Spilker J. Global position system: theory and applications [M]. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996.
- [4] 许峰,赵民建,沈雷,等. 一种基于相位差分的GPS比特同步方法[J]. 浙江大学学报:工学版, 2007, 41(12): 2031-2035.
- [5] Kokkonen M, Pietila S. A new bit synchronization method of a GPS receiver [C]// IEEE Positioning, Location, and Navigation Symposium. Palm Springs: IEEE, 2002: 85-90.
- [6] 郑睿,陈培,陈陌寒,等. 一种自适应最大似然法GPS比特同步方法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(24): 7747-7750.
- [7] 张锦红,叶甜春,徐建华. 一种高灵敏度的GPS比特同步技术[J]. 电子器件, 2008, 31(6): 1926-1928.
- [8] Frank van Diggelen. A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS [M]. Boston: Artech House, 2009.

作者简介:

何文涛 男, (1982-), 博士研究生. 研究方向为卫星导航接收机信号处理算法、超大规模集成电路设计。

徐建华 男, (1963-), 研究员. 研究方向为嵌入式软件、无线通讯系统、定位系统及算法研究。

叶甜春 男, (1965-), 研究员. 研究方向为集成电路设计与应用、纳米加工与制造技术、新型器件。

殷明 男, (1965-), 研究员. 研究方向为卫星导航市场与应用。