

GNSS接收机最优中频积累时间研究

王云, 陈培, 杨颖, 陈杰

(中国科学院微电子研究所 北京 朝阳区 100029)

【摘要】分段相关-视频积累是一种典型的雷达信号检测方法, 同时也可用于全球定位系统(GPS)或伽利略系统的卫星信号检测。该文重点分析了载波多普勒条件下分段相关-视频积累检测方法的性能, 推导了平均处理损耗公式。在给定最大多普勒频偏和载噪比的情况下, 采用平均处理损耗最小准则, 分析了全球卫星导航(GNSS)接收机最优中频积累时间的计算方法和变化规律。在载噪比45 dB-Hz和最大多普勒频偏2 000 Hz的条件下, 该算法比经典算法减小了13.5%的平均处理损耗。

关键词 多普勒效应; 全球定位系统; 全球卫星导航接收机; 信号检测

中图分类号 TN914.42

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.01.005

Research on Optimum Intermediate Frequency Integration Time for GNSS Receivers

WANG Yun, CHEN Pei, YANG Ying, and CHEN Jie

(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences Chaoyang Beijing 100029)

Abstract Segment correlation-video integration is the most commonly used method for radar signal detection, global positioning system (GPS), and Galileo signal detection. The performance of the segment correlation-video integration method under Doppler shift is analyzed and the processing loss formula is derived. Given the maximum Doppler shift and the carrier-to-noise ratio, the optimum intermediate frequency integration time for the global navigation satellite system (GNSS) receiver is calculated and analyzed based on the minimal mean processing loss criteria. Given the carrier-to-noise ratio of 45 dB-Hz and maximum Doppler shift of 2000 Hz, the mean processing loss is reduced up to 13.5% with the proposed method.

Key words Doppler shift; global positioning system; GNSS receiver; signal detection

全球卫星导航系统(GNSS)信号到达地面的最小接收功率为 -160 dBW^[1], 卫星信号的检测属于典型的弱信号检测。为了提高检测信噪比和信号检测概率, GNSS接收机一般采用分段相关-视频积累, 即相干累加与非相干累加相结合的办法。

由于存在多普勒频移, 卫星信号的检测本质上是一个时间-频率的二维搜索问题。传统的GNSS接收机采用串行搜索的结构, 即对每个搜索单元依次完成分段相关-视频积累的操作, 其硬件结构简单, 但是信号检测时间过长。为了提高信号检测速度, 现代GNSS接收机往往采用并行搜索结构对多个搜索单元同时完成分段相关-视频积累的操作。文献[2-10]对时域并行、频域并行、时域-频域同时并行的搜索算法和相应的接收机结构进行了广泛深入的研究。采用时间维或者频率维并行搜索结构的接收机并行度有限。而完成两维同时并行搜索的接收机

需要额外的快速傅里叶变换单元或者采用多通道并行工作方式, 从而大大提高了接收机硬件复杂度。

为了在系统性能下降不大的情况下减小接收机复杂度, 往往采用检波前中频积累加检波后视频积累的方法(以下称为分段相关视频积累法), 对接收机的结构进行简化, 将时间-频率二维搜索近似为一维时间搜索, 可大大降低接收机复杂度。文献[11-12]采用最大多普勒损耗最小化准则, 对基于包络检波和平方律检波的二相编码信号分段相关-视频积累的方法进行了分析和研究, 得出最优中频积累时间值。但由于多普勒频移的大小随卫星与接收机相对运动大小和方向的变化而变化, 最大多普勒损耗最小准则得到的最优中频积累时间, 在实际多普勒频移小于最大多普勒频移时会导致额外的处理损耗。如在载噪比为45 dB-Hz时, 以系统多普勒容限为1 000 Hz得到的积累时间, 在实际多普勒频移为250 Hz时会

收稿日期: 2009-03-12; 修回日期: 2009-06-26

基金项目: 国家高技术研究发展863计划(2009AA011700)

作者简介: 王云(1974-), 男, 博士生, 主要从事导航系统算法与芯片实现等方面的研究。

导致1.7 dB的额外损耗。

因此本文采用平均多普勒损耗最小化准则对二相编码信号分段相关-视频积累的方法进行研究,并以数值仿真方法得出最优中频积累时间值。

1 平均检测损耗模型

GNSS信号检测可以看作扩频码相位与载波频率的检测问题^[8],建立如下二元假设检验:

$$H_0: r(t/H_0) = n(t) \quad (1)$$

$$H_1: r(t/H_1) = AS(t)\cos(w_0t + w_d t + \varphi) + n(t) \quad (2)$$

式中 A 为接收信号幅度; $S(t)$ 为二相编码的扩频码波形,其信号周期持续时间为 T ; w_0 和 w_d 分别为中频频率和多普勒频移; φ 为随机相位; $n(t)$ 为双边功率谱 $N_0/2$ 的加性高斯白噪声。

分段相关-视频积累的方法是将信号周期 T 均匀分为 N 段,在每一段进行长度为 T/N 的检波前中频积累,各段的相关值经过包络检波或者平方律检波后进一步作非相干视频积累。基于包络检波的分段相关-视频积累接收机结构如图1所示。

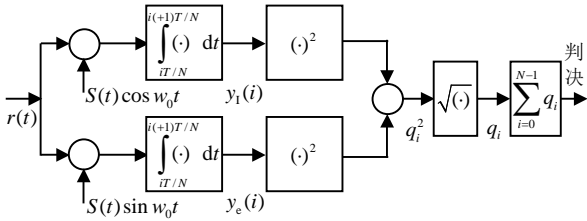


图1 分段相关-视频积累接收机结构

经数学推导,得到以下关系^[11]:

$$E[y_1(i/H_1)] = \frac{AT}{2N} S_a \left(\frac{w_d T}{2N} \right) \cos \left[\frac{(i+0.5)w_d T}{N} + \theta \right] \quad (3)$$

$$E[y_Q(i/H_1)] = -\frac{AT}{2N} S_a \left(\frac{w_d T}{2N} \right) \sin \left[\frac{(i+0.5)w_d T}{N} + \theta \right] \quad (4)$$

$$E[y_1(i/H_0)] = E[y_Q(i/H_0)] = 0 \quad (5)$$

$$D[y_1(i/H_0)] = D[y_Q(i/H_0)] = \frac{N_0 T}{4N} \quad (6)$$

式中 $E(\cdot)$ 代表均值; $D(\cdot)$ 代表方差; $S_a(x) = \sin(x)/x$, 则包络检波输入中频信噪比为:

$$\text{SNR}_B = \{E^2[y_1(i/H_1)] + E^2[y_Q(i/H_1)]\} / D[y_1(i/H_0)] = \frac{A^2 T}{2N_0 N} S_a^2 \left(\frac{w_d T}{2N} \right) \quad (7)$$

由检波损耗^[13] $C_x = \frac{\text{SNR}_B + 2.3}{\text{SNR}_B}$ 和视频积累

N , 以及理想相干接收机输出信噪比 $\text{SNR}_c = \frac{A^2 T}{2N_0}$,

可得出给定多普勒下的处理检测损耗因子^[11]:

$$L_c = \frac{\text{SNR}_c}{\text{SNR}_0} = \frac{A T \text{SNR}_B + 2.3}{2N_0 N \text{SNR}_B^2} \quad (8)$$

由式(8)可以看出,系统处理损耗随多普勒 w_d 的变化而变化,而多普勒 w_d 取决于接收机和卫星之间的相对速度。多普勒 w_d 的不确定性给系统性能分析带来困难,因此本文采用平均处理损耗因子来代替式(8),在系统设计的多普勒容限 $w_{d\max}$ 内,定义平均处理损耗因子为:

$$\bar{L}_c = \frac{1}{w_{d\max}} \int_0^{w_{d\max}} L_c(w_d) dw_d \quad (9)$$

由式(7)~式(9)可知, \bar{L}_c 消除多普勒 w_d 的影响,只取决于信号功率 $C = A^2/2$ 、噪声功率 N_0 、中频积分时间 $T_a = T/N$ 以及系统多普勒容限 $w_{d\max}$ 。该积分解析表达式求解困难,只能通过数值积分计算。

2 最优中频积累时间分析

系统弱信号检测性能本质上归结于系统发现概率 P_d 和虚警概率 P_f 。在虚警概率 P_f 大小固定的情况下,发现概率 P_d 越大则检测系统的性能越好。

虚警概率 P_f 与检测损耗因子 L_c 有关,在虚警概率大小一定的情况下,检测损耗越小则发现概率越大^[12]。因此本文主要分析在给定输入载噪比和系统多普勒容限的情况下,如何寻求最优的中频积累时间,使得平均处理损耗因子最小,以达到系统优化的目的。定义最优中频积累时间为:

$$T_{a\text{-opt}} = \arg \min_{T_a} \{\bar{L}_c\} \quad (10)$$

下面分析系统多普勒容限以及输入载噪比对选取最优中频积累时间的影响。

2.1 载噪比固定,系统多普勒容限不同

假定载噪比为45 dB-Hz,系统多普勒容限分别为250 Hz、500 Hz和2 000 Hz。图2给出不同多普勒下,平均处理损耗 \bar{L}_c 随中频累积时间 T_a 变化的曲线。由图可以看出 $T_a < 1/f_d$ 时,平均处理损耗随中频累积时间增加先减小后变大,因此存在一个最优值。而在 $T_a \geq 1/f_d$ 时,平均处理损耗大大增加,导致系统性能急剧下降。因此中频累积时间不应当超过 $1/f_d$ 。而由图2也可以看出,多普勒频移越小,其最优中频累积时间越长,并且处理损耗越小。载噪比等于45 dB-Hz时,对应250 Hz、500 Hz和2 000 Hz的最优中频累积时间分别为0.758 ms、0.460 ms和0.157 ms,对应的处理损耗分别为0.57 dB、0.97 dB和2.33 dB。

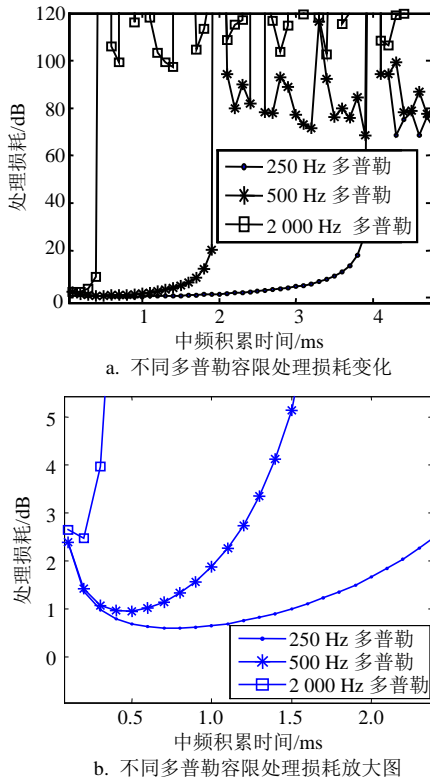


图2 多普勒效应处理损耗

假定多普勒容限500 Hz, 载噪比分别为30 dB-Hz, 40 dB-Hz和50 dB-Hz。图3给出了在中频积累时间、(0,1/f_d)内平均处理损耗随载噪比变化的曲线。

由图3可以看出, 在中频积累时间接近于1/f_d时, 平均损耗会急剧变大。对于不同的载噪比而言, 载噪比越高, 最优中频积累时间越短, 而平均处理损耗也越小。对于载噪比分别为30 dB-Hz、40 dB-Hz和50 dB-Hz, 其最优中频积累时间分别为0.77 ms、0.61 ms和0.33 ms, 对应的处理损耗分别为7.41 dB、2.01 dB和0.43 dB。

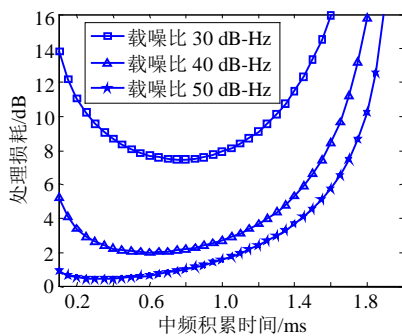


图3 不同载噪比处理损耗

2.3 最大损耗最小准则与平均损耗最小准则

文献[11-12]研究了基于最大损耗最小准则的最优中频积累时间, 本文研究了基于平均损耗最小准则的最优中频积累时间。图4和图5给出了两种不同

准则的最优中频积累时间在整个多普勒区间上的处理损耗对比, 多普勒容限均假设为2 000 Hz, 对应载噪比CN₀分别为35 dB-Hz和45 dB-Hz。平均损耗最小准则得出的最优中频积累时间分别为0.193 ms和0.157 ms, 最大损耗最小准则对应的最优中频积累时间分别为0.130 ms和0.106 ms。

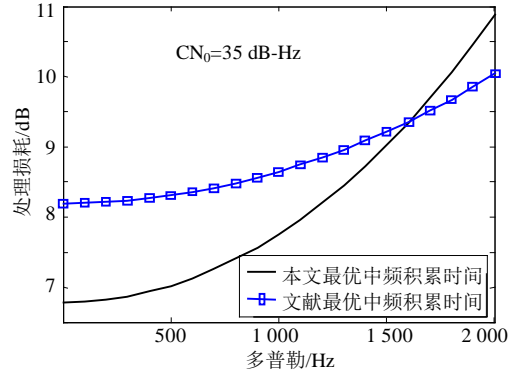


图4 载噪比为35 dB-Hz时的处理损耗

由图4和图5可以看出, 在实际多普勒频移小于临界多普勒值即两种准则处理损耗相等的多普勒值时, 采用平均损耗最小准则得出的最优中频积累时间造成的处理损耗, 小于基于最大损耗最小准则所得最优中频积累时间造成的处理损耗。在实际多普勒频移超过临界多普勒值时, 情况则正好相反。而对于不同的载噪比而言, 临界多普勒值的大小也不一样, 载噪比越高, 临界多普勒值越小。35 dB-Hz和45 dB-Hz对应的临界多普勒值的大小分别为1 608 Hz和1 563 Hz。由于实际接收信号的多普勒频移大小在整个多普勒区间上为均匀分布, 而临界多普勒值的大小总是在系统多普勒容限的4/5左右, 因此本文得出的最优中频积累时间能够使系统性能更优。

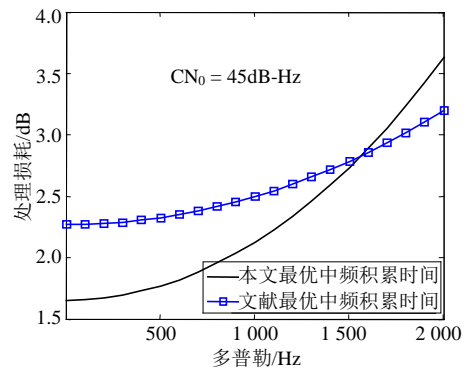


图5 载噪比为45 dB-Hz时的处理损耗

从仿真可知, 在载噪比35 dB-Hz和45 dB-Hz, 系统多普勒容限为2 000 Hz时, 本文得出的最优中频积累时间导致的平均处理损耗分别为8.293 0 dB和4.689 5 dB, 较文献[11-12]方法所得平均处理损耗9.330 3 dB和5.420 9 dB分别减小了11.15%和13.495%。

3 结 论

本文分析了载波多普勒条件下分段相关-视频积累检测方法的性能,推导了平均处理损耗公式,并以平均损耗最小准则得出最优的中频积累时间。仿真结果表明,该方法较传统方法更能优化系统平均性能。

参 考 文 献

- [1] KAPLAN E D. GPS原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
KAPLAN E D. GPS theory and application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- [2] YU T. Rapid code acquisition algorithms employing PN matched filters[J]. IEEE Transactions on Communications, 1988, 36(6): 724-733.
- [3] ANDREAS P, CHARLES L. A unified approach to serial search spread-spectrum code acquisition—a matched-filter receiver (Part II)[J]. IEEE Transactions on Communications, 1986, 32(5): 550-560.
- [4] VAN NEE D J R, COENEN A J R M. New fast GPS code-acquisition technique using FFT[J]. Electronics Letter, 1991, 27(2): 158-160.
- [5] JAMES T. Fundamentals of global positioning system receivers: a software approach[M]. San Francisco: John Wiley & Sons, 2005: 133-137.
- [6] BETZ J, CAPOZZA F. System for direct acquisition of received signals: US, 2004/0071200A1[P]. 2004.
- [7] 陈 培, 王 云, 陈 杰. 短时相关和FFT相结合的伪码快速捕获算法[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(1): 59-62.
- [8] CHEN Pei, WANG Yun, CHEN Jie. Rapid PN code acquisition scheme based on the combination of short time correlation and FFT[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(1): 59-62.
- [9] SAGRUIA P, RAJU V. Fast acquisition implementation for high sensitivity global positioning systems receivers based on joint and reduced space search[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2008, 2(5): 376-387.
- [10] LI Jian, LIU Feng. Study of direct acquisition of GPS P-code in low-SNR[C]//Intelligent Information Technology Application 2008. Shanghai: IEEE, 2008: 249-253.
- [11] SAHMOUDI M, AMIN M G, LANDRY R. Acquisition of weak GNSS signal using a new block averaging preprocessing[C]//Location and Navigation Symposium 2008 IEEE/ION. Monterey, CA: IEEE Press, 2008: 1362-1372.
- [12] 王飞雪, 郭桂蓉. 二相编码信号分段相关-视频积累检的最优中频积累时间[J]. 国防科技大学学报, 1999, 21(1): 71-75.
WANG Fei-xue, GUO Gui-rong. The optimum if integration time length for binary phase-coded signals detection based on segment correlation-video integration method[J]. Journal of National University of Defense, 1999, 21(1): 71-75.
- [13] 朱祥维, 王飞雪. 基于平方律检波的二相编码信号分段相关-视频积累方法研究[J]. 电子学报, 2005, 33(3): 545-548.
ZHU Xiang-wei, WANG Fei-xue. Study on segment correlation-video integration method using square-law detector for binary phase-coded signals detection[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(3): 545-548.
- [14] BARTON D. Modern radar system analysis[M]. Norwood: Artech House, 1988.

编 辑 张 俊