

Galileo 接收机双驻留捕获策略性能分析与研究

王 云, 陈 培, 杨 颖, 陈 杰

(中国科学院 微电子研究所通信与多媒体 SoC 研究室, 北京 100029)

摘 要: 伽利略系统采用了长扩频码序列以提高扩频码的互相关性能,但同时大大增加了搜索区间,采用单驻留搜索策略的系统平均捕获时间将因此增加数倍.使用双驻留机制对系统性能进行优化,在系统虚警概率和发现概率保持不变的前提下,将典型信噪比下的平均捕获时间减小 20%~90%.系统仿真证明了算法的有效性.

关键词: 伽利略;长码;双驻留;平均捕获时间

中图分类号: TN 914.42

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)04-0099-04

Analysis and Research on the Double-Dwell Strategy for Galileo Receivers

WANG Yun, CHEN Pei, YANG Ying, CHEN Jie

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

Abstract: Long spread spectrum code is applied in the Galileo system in order to improve the cross-correlation isolation ability. Longer spread spectrum code enlarges the search region which doubles the mean acquisition time when the single dwell strategy is adopted. The double-dwell strategy is proposed in this paper to optimize the system performance and the mean acquisition time is thus reduced up to 20 to 90 percent with given false alarm probability and detection probability. System simulation validates the strategy.

Key words: Galileo; long code; double dwell; mean acquisition time

1 引言

卫星导航接收机在完成扩频码同步时需要同时对扩频码相位和多普勒频移进行时频二维搜索,普通民用接收机一般采用半码相位搜索,搜索空间大小与扩频码长度成线性增长关系^[1].文献[2-3]给出一种增加并行度提高 GPS P 码捕获速度的快捕方案.伽利略系统中采用了长扩频码序列,其长度为 GPS 系统 CA 码长度的四倍至十倍^[4],导致搜索空间增加四倍以上,简单的采用传统的单驻留搜索策略将带来平均捕获时间的等比例增加,无法满足首次定位时间(Time To First Fix)的要求.文献[5-7]讨论了 CDMA 系统中的驻留时间问题,但并未对存在多普勒频移时候的系统性能进行分析.文中采用了双驻

留机制对伽利略接收机性能进行优化,在保持虚警率和发现概率不变的前提下,大大减小了平均捕获时间.

2 双驻留捕获机制原理

在扩频码同步过程中,卫星导航接收机需要对时频二维空间进行搜索,由于信号只存在于固定的码相位和频率,绝大部分搜索单元并不存在信号,而传统的单驻留机制对所有搜索单元采用相同的驻留时间导致搜索时间的浪费.如果能够快速排除信号缺失的单元将有利于总体捕获时间的减小.因此,双驻留机制将搜索分为二级,第一级搜索采用较短的驻留时间和较低的检测门限,目的在于保证足够高的信号检测概率并且快速排除信号缺失单元.在第一级搜索发现

信号后转入二级搜索,二级搜索采用较长的驻留时间和较高的门限以降低虚警概率,减小误捕带来的时间损耗.图1为双驻留机制系统结构图.

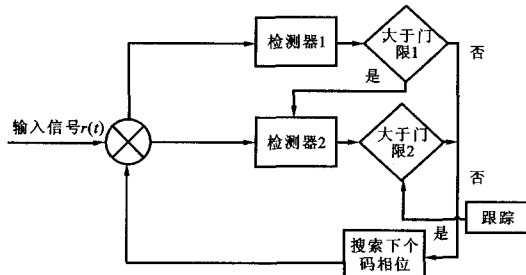


图1 双驻留机制系统结构图

3 驻留系统模型

系统捕获过程可以描述成 Markov 状态转移过程.每个时频搜索单元对应一个中间状态,假设共有 v 个搜索单元,并且加上1个虚警状态和1个捕获状态,总共 $v+2$ 个状态.其中 $v-1$ 个状态对应信号缺失状态,1个状态对应信号存在状态,信号在任意一个单元中存在的概率为 $\pi_i = \frac{1}{v}$,服从均匀分布.图2和图3分别为单驻留机制和双驻留机制的状态转移图.

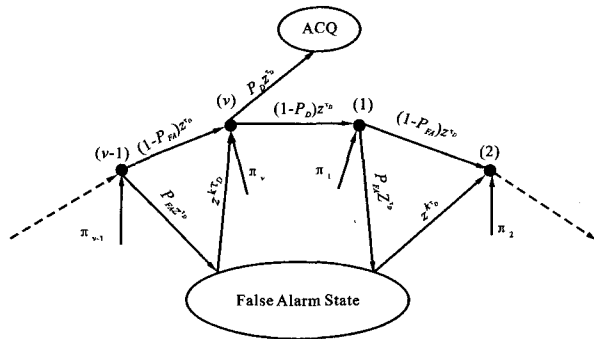


图2 单驻留机制状态转移图

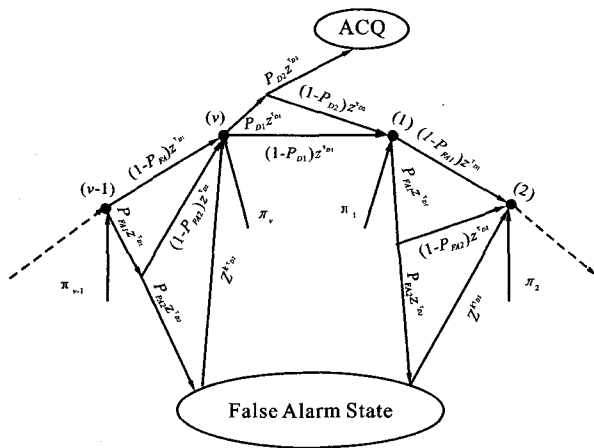


图3 双驻留机制状态转移图

其中 z 代表每一步转移的单位延迟因子,若每步转移的时间是 τ_D ,则 z 用 z^{τ_D} 替代.图2中 P_D 为信号发现概率, P_{FA} 为虚警概率, K 是因虚警惩罚时间.图3中 τ_{D1} 为一级驻留时间,发现概率为 P_{D1} ,虚警率为 P_{FA1} ;第二级驻留时间为 τ_{D2} ,发现概率 P_{D2} ,虚警率 P_{FA2} ,虚警惩罚时间 $K\tau_{D2}$.

定义 $H_0(z)$ 为连接任意两个连续节点 $(i, i+1)$, $i = 1, \dots, v-1$ 且该两节点上信号均不存在的增益. $H_{NFA}(z)$ 是节点 i 没有虚警时向节点 $i+1$ 转移的增益, $H_{FA}(z)$ 是节点 i 发生虚警时的增益, $H_R(z)$ 是节点 i 由虚警状态向下一节点转移时的增益. $H_D(z)$ 是由节点 v 即 H_1 状态向 ACQ 节点转移的增益, $H_M(z)$ 则是从节点 v 向节点 1 转移的增益. 则有

$$H_0(z) = H_{NFA}(z) + H_{FA}(z)H_R(z) \quad (1)$$

对于单驻留系统有

$$H_0(z) = (1 - P_{FA})z^{\tau_D} + P_{FA}z^{(k+1)\tau_D} \quad (2)$$

$$H_D(z) = P_D z^{\tau_D} \quad (3)$$

$$H_M(z) = (1 - P_D)z^{\tau_D} \quad (4)$$

对于双驻留系统有

$$H_0(z) = (1 - P_{FA1})z^{\tau_{D1}} + P_{FA1}z^{\tau_{D1}}[(1 - P_{FA2})z^{\tau_{D2}} + P_{FA2}z^{(K+1)\tau_{D2}}] \quad (5)$$

$$H_M(z) = (1 - P_{D1})z^{\tau_{D1}} + P_{D1}z^{\tau_{D1}}(1 - P_{D2})z^{\tau_{D2}} \quad (6)$$

$$H_D(z) = P_{D1}z^{\tau_{D1}}P_{D2}z^{\tau_{D2}} \quad (7)$$

文献[7] 给出平均捕获时间公式:

MAT =

$$\frac{[H'_D(1) + H'_M(1) + (v-1)H'_0(1)(1 - \frac{H_D(1)}{2})]}{H_D(1)} \quad (8)$$

将式(2)、式(3)、式(4)和式(5)~式(7)分别代入式(8)可得单驻留系统和双驻留系统下系统平均捕获时间公式.

$$\text{MAT}_{\text{single}} = \frac{2 + (2 - P_D)(v-1)(1 + KP_{FA})}{2P_D} \tau_D \quad (9)$$

$$\text{MAT}_{\text{double}} = \frac{\tau_{D1} + P_{D1}\tau_{D2}}{P_{D1}P_{D2}} + \frac{[(v-1)(2 - P_{D1}P_{D2})(\tau_{D1} + P_{FA1}\tau_{D2} + P_{FA1}P_{FA2}K\tau_{D2})]}{P_{D1}P_{D2}} \quad (10)$$

进一步考虑码多普勒影响,利用搜索相位的平均更新率 μ 来修正搜索空间中的总状态数 v . 定义

N 为搜索的整个码片数, $\Delta T_c/T_c$ 为搜索步长, Δf_c 为码多普勒, 单位是码片, $\Delta f_c \tau_D$ 为驻留时间内码片的偏移. 则单驻留系统和双驻留系统的平均更新率分别为

$$\mu = \Delta T_c/T_c + \Delta f_c \tau_D + P_{FA} \Delta f_c K \tau_D \quad (11)$$

$$\mu = \Delta T_c/T_c + \Delta f_c \tau_{D1} + P_{FA1} \Delta f_c \tau_{D2} + P_{FA1} P_{FA2} \Delta f_c K \tau_{D2} \quad (12).$$

将 $v = \frac{N}{\mu}$ 代入式(9)和式(10)可得新的系统平均捕获时间公式.

4 伽利略系统捕获性能分析与仿真

假设系统接收信号表达式为

$$r(t) = \sqrt{2P_s} d(t) c(t + \tau) \cos(\omega_0 t + \omega_d t + \varphi) + n(t) \quad (13)$$

式中, P_s 代表信号功率, $d(t)$ 代表调制的数据, 假设为 1, $c(t + \tau)$ 代表 BOC 调制后的扩频码, ω_d 载波多普勒, $n(t)$ 是均值为 0, 方差为 σ^2 的窄带高斯白噪声, 其双边功率谱密度为 $N_0/2$. 接收信噪比为

$$\text{SNR} = \frac{P_s}{P_n} = \frac{P_s}{\sigma^2}.$$

首先对接收信号进行边带滤波去除子载波调制影响, 然后下采样到半码片速率, 经过 I、Q 分离, 解扩, $N_c \text{ms}$ ($N_c \geq 1$) 的相干累加等处理后, I、Q 两路信号的表达式为 (1ms 的采样点数为 N_1):

$$I_k = A \cos\left(\frac{\pi f_d (N_c N_1 - 1) + \omega_d k N_c N_1 + \varphi}{\omega_d k N_c N_1 + \varphi}\right) + N_I(n) \quad (14)$$

$$Q_k = -A \sin\left(\frac{\pi f_d (N_c N_1 - 1) + \omega_d k N_c N_1 + \varphi}{\omega_d k N_c N_1 + \varphi}\right) + N_Q(n) \quad (15)$$

$$A = \frac{\sqrt{2P_s}}{2} R(\tau) \frac{\sin(\pi f_d N_c N_1 T_s)}{\sin(\pi f_d T_s)} \quad (16)$$

式中, $R(\tau)$ 为自相关函数, $\omega_d = 2\pi f_d$, $N_I(n) \sim N(0, \frac{1}{2} N_c N_1 \sigma^2)$, $N_Q(n) \sim N(0, \frac{1}{2} N_c N_1 \sigma^2)$. 检验统计量为 $Y = \sum_{k=0}^{N_c-1} (I_k^2 + Q_k^2)$, 建立假设检验

H_1 状态: 信号存在.

H_0 状态: 信号不存在.

则两种状态下, 检验统计量概率密度分别为

$$f_Y(y | H_1) = \frac{\left(\frac{y}{s^2}\right)^{(N_c-1)/2} e^{-(s^2+y)/(N_c N_1 \sigma^2)} I_{N_c-1}\left[\frac{2\sqrt{ys}}{N_c N_1 \sigma^2}\right]}{N_c N_1 \sigma^2} \quad (17)$$

$$f_Y(y | H_0) = \frac{1}{\sigma^2 2^{N_c/2} \Gamma(N_c)} y^{N_c/2-1} e^{-y/2\sigma^2} \quad (18)$$

$$s^2 = \frac{P_s N_{nc} R^2(\tau) \left[\frac{\sin(\pi f_d N_c N_1 T_s)}{\sin(\pi f_d T_s)} \right]^2}{2} \quad (19)$$

则系统发现概率和虚警概率表达式分别为

$$P_d = \int_{V_t}^{\infty} f_Y(y | H_1) dy \quad (20)$$

$$P_{fa} = \int_{V_t}^{\infty} f_Y(y | H_0) dy \quad (21)$$

下面假设码长为 4092, 系统发现概率和虚警概率分别为 0.9 和 10^{-5} , 相干累加时间为 4ms, 惩罚时间为 1s. 图 4、图 5 和图 6 分别为不存在多普勒频移时, 正多普勒频移和负多普勒频移时的系统仿真图.

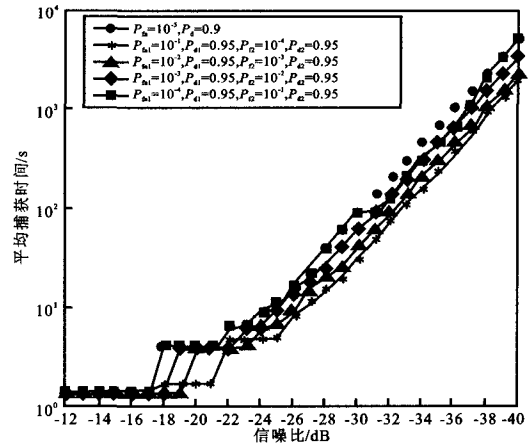


图 4 无多普勒频移时平均捕获时间

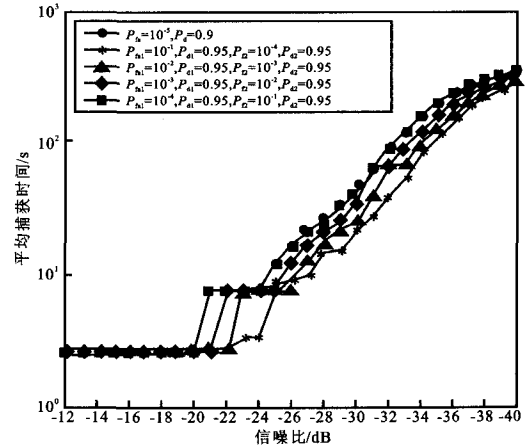


图 5 多普勒频移为正时的平均捕获时间

由图 4 可以看出, 在不考虑多普勒的前提下, 在信噪比较高的条件下, 双驻留机制比单驻留机制的优势并不明显, 在信噪比低于 -19dB 之后开始体现出优势, 在 $-20\text{dB} \sim -33\text{dB}$ 时候的平均捕获时间最

多较单驻留机制减小一个数量级. 由于伽利略的信号典型信噪比通常在 $-17\text{dB} \sim -34\text{dB}$, 因此双驻留机制对系统性能的提升优势明显.

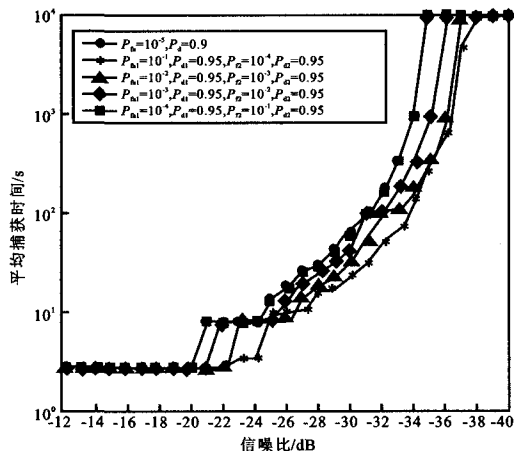


图6 多普勒频移为负时的平均捕获时间

图5和图6反映了多普勒频移对平均捕获时间的影响. 对于多普勒频移为正的情况, 信噪比低于 -40dB 时, 单双驻留的平均捕获时间均趋于相同. 主要原因是码相位在驻留时间内发生漂移, 弱信号时驻留时间长, 码相位漂移多, 因此多普勒频移对平均捕获时间的影响超过了驻留策略, 导致单双驻留机制性能相同. 对于多普勒频移为负的情况, 信噪比低于 -34dB 时, 系统性能恶化明显. 主要原因是多普勒变化引起的码片漂移的速度超过了搜索速度, 导致在重复单元内反复搜索而无法捕获信号. 因此在弱信号的时候应该增大搜索并行度, 提高搜索速度. 此外通过不同二级驻留策略的影响可以看出, 第一级采用较小的虚警概率性能更优, 这是因为较小的虚警概率减小了所需驻留时间, 在更短的时间内排除了信号缺失的单元从而减小了平均捕获时间.

5 结束语

文中推导了双驻留机制的系统模型, 以此为基础对伽利略系统在载波多普勒频移条件下的系统捕

获性能进行了理论分析和仿真. 仿真结果表明, 在典型信噪比下, 采用双驻留机制能将平均捕获时间降低 $20\% \sim 90\%$, 达到系统性能的优化.

参考文献:

- [1] Kaplan. GPS 原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [2] 金璐, 廉保旺. 双向大步进法实现 P 码快速捕获[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(5): 157-159.
- [3] 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.
- [4] European Space Agency/Galileo Joint Undertaking, Galileo open service signal in space interface control document[S]. Draft GAL OS SIS ICD/D. 1, 2008.
- [5] Sheen W H, Chiou S. Performance of multiple-dwell pseudo noise code acquisition with I-Q detector on frequency-nonselective multipath fading channels[J]. Wireless Networks, 1999(5): 11-21.
- [6] Caini C, Corazza G E, Vanelli C A. Multi dwell architectures for DS-CDMA code acquisition in fading channels [C]// 2002 IEEE Seventh International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications. Italy: Bologna, 2002: 214-218.
- [7] Holmes J K, Yang C C. Acquisition time performance of PN spread-spectrum systems[J]. IEEE Trans On Communication, 1977, COM-25: 778-783.

作者简介:

王云男, (1982-), 博士研究生. 研究方向为导航系统算法研究与芯片实现.

陈培男, (1982-), 博士研究生. 研究方向为导航系统算法研究与芯片实现.

杨影女, (1982-), 博士研究生. 研究方向为导航系统算法研究与芯片实现.

陈杰男, (1963-), 博士生导师. 研究方向为无线通信和多媒体芯片设计.