

GPS 接收机中自适应连续波干扰抑制算法

蔺晓龙, 何文涛, 徐建华, 叶甜春

(中国科学院 微电子研究所, 北京 100029)

摘 要: 在地球表面, GPS 信号强度在 -130 dBm 左右, 容易受到干扰. 其中最主要的一类干扰类型是连续波干扰, 针对该问题, 提出一种新的连续波干扰检测和抑制算法, 该算法首先使用多级 DFT 变换检测连续波干扰, 然后使用级联的 IIR 陷波器对干扰进行抑制. 测试结果表明: 在存在多个 -81 dBm 连续波干扰的情况下, 该方法能够在 3 s 内进行检测和抑制, 同时 GPS 接收机的载噪比损失小于 3 dB.

关键词: GPS 接收机; 连续波干扰; DFT; 陷波器

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)12-0018-04

The Adaptive Continuous Wave Interference Mitigation Algorithm in GPS Receiver

LIN Xiao-long, HE Wen-tao, XU Jian-hua, YE Tian-chun

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

Abstract: On the surface of the Earth, the GPS signal's strength is around -130 dBm. It's vulnerable to interference. And the most important types of interference are the continuous-wave interference. A new continuous-wave interference detection and suppression method is presented. First, this method uses multi-level DFT transform to detect continuous wave interference, and then uses the cascade IIR notch filter to suppress the interferences. Test results show that: When there are -81 dBm continuous wave interferences, this method can detect and suppress these interferences in 3 s, and the GPS receiver's carrier to noise ratio's loss is less than 3 dB.

Key words: GPS receiver; Continuous-wave Interference; DFT; Notch Filter

1 引言

全球定位系统(GPS)为用户提供定位导航服务,已广泛应用于消费、交通、电力、国防等领域.地面接收到的GPS的信号强度在 -130 dBm左右,远噪声功率之下,使其容易被干扰.随着GPS定位功能越来越多的集成到移动设备中,由其他通信设备泄露到GPS信号频段的干扰不断增多.这些干扰会严重降低GPS接收机的性能,甚至导致GPS接收机无法捕获卫星,最终无法定位.其中最常见的干扰类型是连续波干扰(Continuous-wave Interference, CWI),属于窄带干扰^[1].

目前关于连续波干扰的抑制论文已有很多^[2-4],

这些技术主要包括:自适应天线阵列技术,FFT的频域变换技术,自适应时域滤波器技术等.这些技术都需要大量的额外硬件开销和计算负担,不适用于在单芯片的GPS接收机中.

本文采用频域检测加时域滤波相组合的结构,在消耗少量硬件资源的情况下,通过多级DFT变换算法,实现对连续波干扰的快速检测,然后通过级联的二阶IIR陷波对多个连续波干扰进行有效的抑制.实际测试表明了该结构和算法的有效性.

2 自适应连续波干扰抑制算法

2.1 具有干扰抑制功能的GPS接收机

接收机接收到的GPS信号功率远在噪声功率

收稿日期: 2013-01-20; 修回日期: 2013-03-18

基金项目: 中国第二代卫星导航系统重大专项多模导航型基带芯片(GFZX03030204)

之下,因此正常情况下射频输出为平坦的窄带高斯信号.当外界存在连续波干扰,且该干扰的频率处于射频信号带宽内时,无法通过滤波器对该干扰进行抑制.受到连续波干扰的GPS信号功率谱如图1所示,信号带内可见明显的窄带干扰功率峰值.

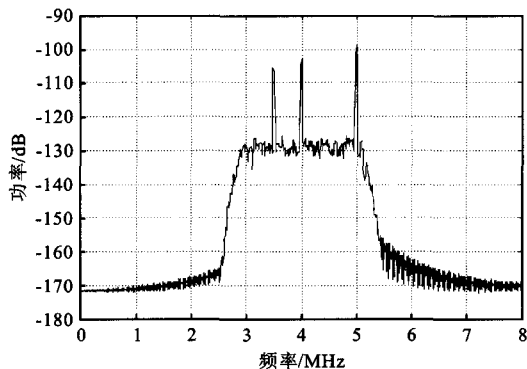


图1 受连续波干扰的GPS信号功率谱

传统的GPS接收机将射频输出的中频数字信号直接输入给相关器通道进行解扩等信号处理操作,最后由微处理器进行定位结算.本文的连续波干扰抑制装置处于射频和相关器之间,接收机的结构如图2所示.

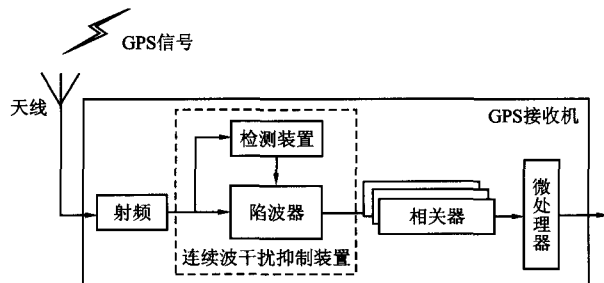


图2 具有干扰抑制装置的GPS接收机

检测装置采用数字傅里叶变换(DFT)对输入信号进行频域变换,DFT所需硬件开销很小,因此适合集成电路实现,但其计算速度慢,导致检测时间过长.为此本文提出了最优化的多级DFT频率检测算法,该算法首先设计最优化的DFT的等级和每级的频率分辨率,然后通过多次DFT计算,极大地提高连续波干扰频率检测速度.

陷波器能够去除输入信号中特定频率附近的信号,而保留大部分GPS信号功率.为了能够处理实数数据,本为使用2阶IIR陷波器,同时抑制一对正负频率的窄带干扰.多个陷波器级联实现对多个连续波干扰的同时抑制,实现和计算复杂度低.

2.2 多级DFT频率检测算法

传统DFT变换结果的频率分辨率 $f_0 = 1/T^{[5]}$.则以频率分辨率 f_0 ,对带宽为BW的频率范围进行

DFT变换,所需要的时间为

$$T = \frac{BW}{f_0} * T_L = \frac{BW}{f_0^2} \quad (1)$$

以GPS信号为例,需要检测的频率带宽 $BW = 2$ MHz,要达到100 Hz的频率分辨率,则需要时间 $T = 200$ s,检测时间过长而无法使用.

多级DFT频率检测算法能够在保证最终检测结果分辨率不变的情况下,大幅度减少检测时间.其原理为:连续波干扰频率随机分布在信号带宽之内,干扰的带宽远小于信号的带宽,所以在每次DFT检测时,仅有小部分干扰所在的频率分量会有较大的幅度超过门限,从而被记录下来由下一级用更高的频率分辨率继续检测.大部分不存在干扰的频率范围被排除掉,不需要下一级的检测,从而节省了总的检测时间.

仍然以GPS信号为例,假设存在8个连续波干扰,采用2个等级的DFT检测算法,最终频率分辨率仍然为100 Hz,不同的第1等级频率分辨率情况下检测时间如图3所示.

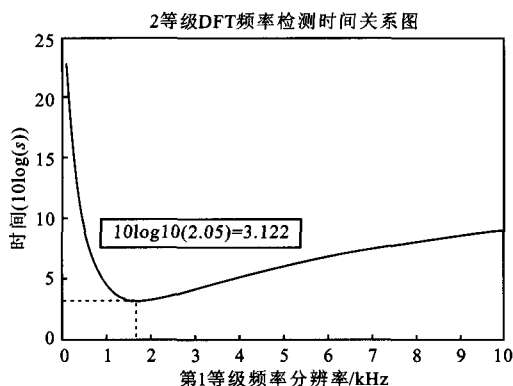


图3 频率分辨率 f_1 ——检测时间关系图

由图3可见,当第1等级频率分辨率为1 710 Hz时,检测时间为2.05 s,仅为传统检测时间的1%,极大地提高了检测速度.另外第1等级频率分辨率选择不同时(横坐标不同)总体检测时间也不同,且存在极小值,说明多级DFT频率检测算法存在最优的等级和频率分辨率组合.

2.3 最优化频率组合模型

多级DFT频率检测算法中,假设使用 m 个等级检测BW的频率范围,所需要耗费的总时间最大值可建模:

$$T = \frac{BW}{f_1^2} + N \frac{f_1}{f_2^2} + N \frac{f_2}{f_3^2} + \dots + N \frac{f_{m-1}}{f_m^2} \quad (2)$$

式中, f_i 表示第 i 等级的DFT频率分辨率, N 表示连续波干扰的最大数目.为了求得极小值,对每一变量求微分,并令等式为零,解方程组,得到检测时间取

得极小值的条件——最优频率组合^[6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{m-1} = \sqrt{\frac{2^K * BW * f_m^{Z-1}}{N}} \\ \dots \\ f_2 = \frac{f_3^3}{2f_4^2} \\ f_1 = \frac{f_2^3}{2f_3^2} \end{array} \right. \quad (3)$$

其中系数:

$$\left\{ \begin{array}{l} K = 2^m - m - 1 \\ Z = 2^m - 1 \end{array} \right. \quad (4)$$

最后将最优频率结果带入式(2),得到最小检测时间.例如将 $m = 2, f_2 = 100$ Hz 带入式(2)、(3)、(4)可得到最优解为

$$\begin{aligned} f_2 &= 100 \text{ Hz} \\ f_1 &= \sqrt[3]{\frac{2 * 2 * 10^6 * 10^4}{8}} = 1\,710 \text{ Hz} \\ T &= \frac{2 * 10^6}{1\,710^2} + 8 * \frac{1\,710}{100^2} = 2.05 \text{ s} \end{aligned} \quad (5)$$

2.4 二阶 IIR 陷波器

二阶 IIR 陷波器频率响应图见图 4. 信号为 $\sqrt{2P_j} \cos(2\pi f_j t + \theta_j)$, 其傅里叶变换在 $\pm f_j$ 频率处产生两个干扰峰值, 使用二阶 IIR 陷波器同时抑制这两个干扰频率, 其传递函数^[7]:

$$H(z) = b \frac{1 - 2\cos\omega_0 z^{-1} + z^{-2}}{1 - 2b\cos\omega_0 z^{-1} + (2b-1)z^{-2}} \quad (6)$$

式中, $\omega_0 = 2\pi f_0/f_s$ 表示 IIR 陷波器归一化中心频率; $0 < b < 1$ 表示与 IIR 陷波器带宽有关的参数.

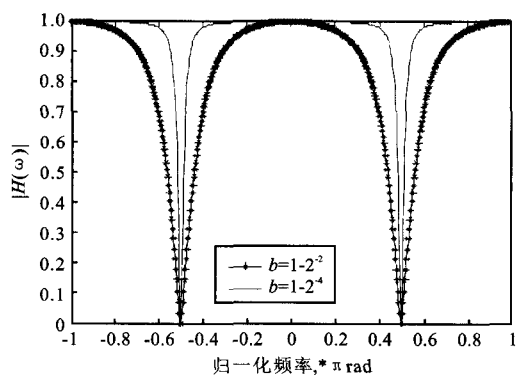


图 4 二阶 IIR 陷波器频率响应图

该二阶 IIR 陷波器的两个极点的半径:

$$\left| b\cos\omega_0 \pm j\sqrt{(2b-1)-b^2\cos^2\omega_0} \right| = \sqrt{2b-1} < 1, (b < 1) \quad (7)$$

极点总在单位圆内, 所以该二阶 IIR 陷波器是稳定的. 该二阶 IIR 陷波器的带宽与系数 b 有关, 其关系表达式:

$$\frac{1}{b} = 1 + \frac{\sqrt{1-G_B^2}}{G_B} \tan\left(\frac{\Delta\omega}{2}\right) \quad (8)$$

3 测试

3.1 测试方案

连续波干扰抑制测试方案如图 5 所示. 采用斯伯伦公司的 GSS6700 GNSS 信号模拟器产生 GPS 卫星信号; 安捷伦公司的 E4438 信号发生器产生连续波干扰信号; 功率分配器将 GPS 卫星信号与连续波干扰合成输出, 作为测试信号. GPS 接收机采用杭州中科微公司的 ATGBM02 模块, 串口输出到 PC 机上观测载噪比载噪比(CNo). 传输路径经过损耗测试, 在最后考虑进入测试结果. 控制 E4438 输出连续波干扰的频率和功率测试本文的连续波干扰抑制能力. 信号条件: GPS 卫星 PRN=9, 多普勒 680 Hz, 信号功率 -134 dBm. 系统参数设置为: 使用 2 级 DFT 频率检测算法, 陷波器带宽参数 $b = 1-2^{-9}$.

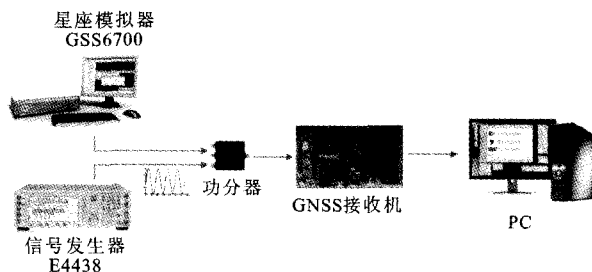


图 5 连续波干扰抑制测试方案

3.2 测试结果

首先, 测试不同频率的连续波干扰对接收机的影响, GPS 信号功率为 -134 dBm, 连续波干扰功率为 -75 dBm, 干扰频率从 1 571.42 MHz 变化到 1 579.42 MHz. 本方案的检测和抑制能力如图 6 所示.

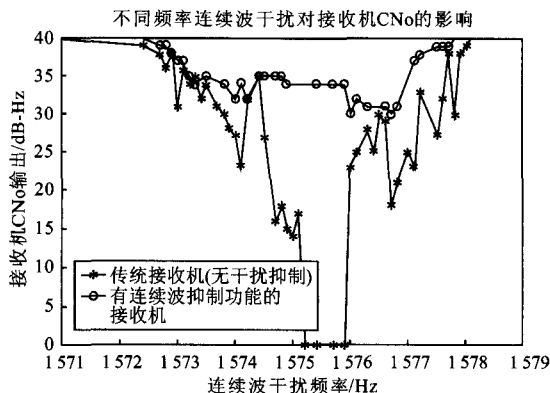


图 6 不同频率连续波干扰对接收机载噪比的影响

由图 6 可见, 本方案都能正确检测到干扰频率

的变化,并进行抑制.当干扰频率在1 571 MHz 或 1 579 MHz附近时,由于处于射频的滤波器带宽之外而被作为带外信号抑制,此时无论有无干扰抑制功能,接收机载噪比都不受影响.当干扰频率在 1 575~1 576 MHz 时,传统接收机(无干扰抑制)的载噪比下降超过 25 dB,甚至无法跟踪;而有干扰抑制功能的接收机的载噪比最多下降 5~10 个 dB,但仍然能够正常跟踪该卫星.

其次,测试不同功率的连续波干扰对接收机的影响,GPS 信号功率为-134 dBm,连续波干扰频率为 1 575.42 MHz,干扰功率从-110 dBm 变化到-73 dBm.本方案的检测 and 抑制能力如图 7 所示.

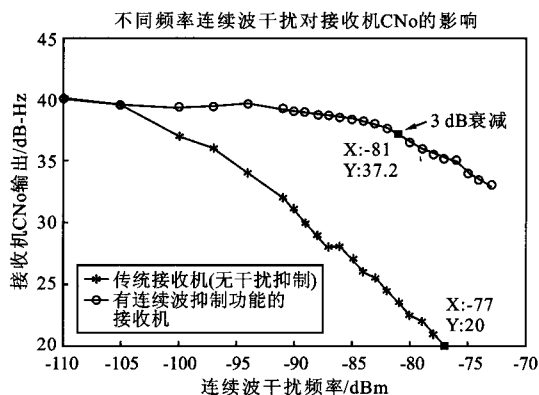


图7 不同功率连续波干扰对接收机载噪比的影响

由图7可见,当干扰频率小于-110 dBm 时,由于处于GPS卫星扩频信号本身所具有一定的抗干扰能力,所以此时无论有无干扰抑制功能,接收机载噪比都不受影响.传统接收机(无干扰抑制)的载噪比随干扰功率增加而剧烈下降,当干扰功率达到-77 dBm 时,载噪比下降超过 20 dB,之后更强的干扰功率时,已无法跟踪;有干扰抑制功能的接收机的载噪比缓慢的下降,当干扰功率达到-81 dBm 时,载噪比下降 3 dB,当干扰功率达到-73 dBm 时,载噪比最多下降 8 dB,但仍然能够正常跟踪该卫星.

4 结束语

本文针对GPS接收机中连续波干扰,使用多级DFT 频率检测算法对输入信号进行DFT 变换并检

测干扰频率,然后使用多级级联的二阶IIR 陷波器对检测到的连续波频率进行滤除.测试结果表明在多个-81 dBm 连续波干扰的情况下,该方法能够在 3 s 内进行检测和抑制,同时GPS接收机的载噪比损失小于 3 dB.

参考文献:

- [1] Elliott D Kaplan, Christopher J Hegarty. GPS 原理与应用[M]. 寇艳红,译. 北京:电子工业出版社,2002: 181-221.
- [2] Asghar Tabatabaei Balaei, Elias Aboutanios. Characterization of interference effects in Multiple Antenna GNSS Receivers[C]// 3rd International Congress on Image and Signal Processing. USA: Missouri, 2010: 3930-3934.
- [3] Paul T Capozza, Brian J Holland, Thomas M Hopkinson, et al. A single-chip narrowband frequency domain excisor for a global positioning system (GPS) receiver [C]// Custom Integrated Circuits Conference, San Diego, 1999: 549-552.
- [4] Daniele Borio, Laura Camoriano, Letizia Lo Presti. Two-pole and multi-pole notch filter: a computationally effective solution for GNSS interference detection and mitigation[J]. IEEE System Journal, 2008 (2): 38-47.
- [5] 胡广书. 数字信号处理—理论、算法与实现[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社,2012.
- [6] Giordano F R. 数学建模[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- [7] Sophocles J Orfanidis. Introduction to signal processing [M]. 北京:清华大学出版社,2010.

作者简介:

蔺晓龙 男,(1985—),博士研究生.研究方向为GNSS接收机信号处理算法.

何文涛 男,(1982—),副研究员.研究方向为GNSS接收机基带设计.

徐建华 男,(1963—),研究员,博士生导师.研究方向为GNSS接收机设计、ZigBee 算法、FPGA 验证平台开发、芯片测试系统设计等.

叶甜春 男,(1965—),研究员,博士生导师.研究方向为集成电路设计与应用、纳米加工制造技术、新型器.