DOI: 10.3724/SP.J.1187.2013.00492

级联陷波器抗窄带干扰设计与实现

李献斌 王跃科 杨 俊
(国防科学技术大学机电工程与自动化学院 长沙 410073)

摘 要: 针对扩频通信系统中常见的带宽较宽的强窄带干扰，提出了一种基于级联滤波器的干扰抑制方法，并对其抑制性能进行了仿真，最后针对该方案在FPGA上进行了优化设计并加以实现，对实现效果进行了性能测试。仿真和测试结果表明，设计的级联滤波器对于占有用信号扩频带宽1/10的窄带干扰可以达到40 dB的抗干扰性能，且占用硬件资源少，当采用常用的赛灵思600万门的FPGA实现时，仅占用4%的逻辑资源，在航空、航天等资源受限的场合具有较强的工程应用价值。

关键词: 级联; 陷波器; 窄带干扰; FPGA
中图分类号: TN929.52 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 510.5015

Design and implementation of cascade IIR notch filters for narrow-band interferences suppression

Li Xianbin Wang Yueke Yang Jun
(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Aiming at the narrow-band interference with high power and certain wide band width in spread spectrum communication system, a design method for suppression based on cascade IIR notch filters is proposed, and the performance is simulated. Finally, this method is implemented by FPGA. The simulation and test results show that the proposed method achieves good performance when the band width of NBI is ten percent of useful signal and the noise-to-signal ratio is 40 dB. Also, when the method is implemented by XINLX FPGA with six million gates, the utilization is no more than 4 percent.

Keywords: cascade; notch filter; narrow-band interference; FPGA

1 引 言

扩频通信系统对其频谱范围内的干扰有一定的抗干扰能力，但针对较强功率的干扰，需要在扩频系统基础上配合干扰抑制技术来进一步提高系统的抗干扰能力[1-6]。

通信对抗中，由于窄带干扰(narrowband interference, NBI)容易产生，功率谱密度可做到很高，且几个窄带干扰就可覆盖一定的宽度，相对宽带压制性干扰而言，更有利于干扰敌方通信而保证己方的正常通信，因此是一种常见的干扰形式[7-8]。研究窄带抑制技术有实际的需求并已有了很多的研究成果[9-11]。对于单频干扰，使用一个二阶IIR陷波器即可达到较好的效果，干扰参数的估计与陷波器的设计均较为简单[12-13]。针对具有一定带宽的干扰信号，使用单个二阶的陷波器无法有效去除全部干扰，必须通过多个二阶的陷波器加以组合来达到抗干扰的效果。同时，航空、航天领域内对资源的要求较为苛刻，要求以较小的资源代价实现抗一定干扰的能力，因此需要对抗干扰的设计与实现进行优化设计。在综合评估抗干

收稿日期: 2013-01 Received Date: 2013-01

万方数据

扰效果、实现复杂度和资源占有情况的基础上，采用时频相结合的级联陷波器方法并给出了实现方案，以较小的资源代价在通用的 FPGA 平台上进行了实现，并对抗干扰效果进行性能测试。

2　级联陷波器抑制窄带干扰原理

2.1　二阶 IIR 数字陷波器的设计

对于单频干扰，使用一个二阶 IIR 陷波器去除窄带干扰，是一种非常有效的方法，其传递函数如式(1)所示[14]。将复变量 z 用 $e^{j\omega}$ 代替之后就得到了 IIR 数字滤波器的频率特性 $H(e^{j\omega})$，如式(2)所示：

$$H(z) = \frac{\sum_{j=1}^{M} b_j z^{-1}}{1 - \sum_{k=1}^{N} a_k z^{-k}} \tag{1}$$

$$H(e^{j\omega}) = H(z)\big|_{z=e^{j\omega}} = A\frac{\prod_{j=1}^{M}(e^{j\omega} - c_j)}{\prod_{k=1}^{N}(e^{j\omega} - z_k)}e^{j(N-M)\omega} \tag{2}$$

对 ω_0 点进行陷波，即当 $\omega = \omega_0$ 时 $|H(e^{j\omega_0})| = 0$，则取零点 $z = e^{\pm j\omega_0}$，同时为了保证 $\omega \neq \omega_0$ 时 $|H(e^{j\omega_0})| \approx 0$，取极点 $z = \alpha e^{\pm j\omega_0}$，从而得到二阶 *IIR* 陷波器的传递函数如下：

$$H(z) = \frac{(1 - e^{j\omega_0}z^{-1})(1 - e^{-j\omega_0}z^{-1})}{(1 - \alpha e^{j\omega_0}z^{-1})(1 - \alpha e^{-j\omega_0}z^{-1})} \tag{3}$$

将式(3)的分子分母的乘积因式展开得到：

$$H(z) = \frac{1 - 2\cos(\omega_0)z^{-1} + z^{-2}}{1 - 2\alpha\cos(\omega_0)z^{-1} + \alpha^2 z^{-2}} \tag{4}$$

根据系统稳定性判定依据：一个线性时不变系统是稳定的充要条件是所有的极点都位于 z 平面单位圆以内，参数 α 的值决定极点的位置，因此 α 的值应小于 1 且接近 1，这样才能保证稳定性的前提下获得比较好的选择性。陷波归一化角频率 $\omega_0 = \frac{2\pi f_0}{f_s}$，其中 f_0 为陷波频率，f_s 为采样频率。即在整个传递函数中 f_0 确定陷波的频点，α 确定陷波的宽度。假设陷波频率 $f_0 = 6$ MHz，采样速率 $f_s = 40$ MHz，于是求得陷波归一化角频率为 $\omega_0 = 2\pi \times 6/40 = 0.3\pi$。分别取 $\alpha = 0.95$ 和 $\alpha = 0.90$，由式(4)计算出陷波器的参数，得到的幅频特性如图 1 所示。

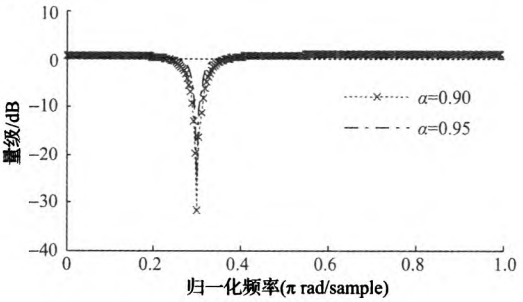

图 1　陷波器幅频特性

Fig. 1　Frequency response of notch filter

由图 1 可以看出，α 值减小时陷波器的陷波频率宽度增大，可以通过调整 ω_0 改变陷波频率，调整 α 改变陷波宽度。但是 α 值应该接近于 1，又不能太靠近 1 否则会引起系统不稳定。

2.2　级联 IIR 陷波器的设计

当窄带干扰的带宽较宽时，采用一个二阶 IIR 陷波器无法达到理想的抗干扰效果，在此采用级联的方式来解决。

假定干扰信号的带宽为有用信号带宽的 10%，此时可以通过将分布在不同陷波位置二阶 IIR 滤波器级联起来达到陷波效果。同时，考虑实现的复杂度和资源代价，每个陷波器均取相同的陷波深度 α。则得到的最终的陷波器的传递函数为：

$$H(z) = \prod_{i=1}^{N} H_i(z) \tag{5}$$

式中：

$$H_i(z) = \frac{1 - 2\cos(\omega_i)z^{-1} + z^{-2}}{1 - 2\alpha\cos(\omega_i)z^{-1} + \alpha^2 z^{-2}} \tag{6}$$

同二阶 IIR 数字陷波器一样，该级联滤波器的性能可以通过调整级联阶数、陷波频点 ω_i 的间隔和陷波深度来决定，根据实际抗干扰需求来选择。

图 2 所示为设计的 5 个级联二阶 IIR 陷波器，各个滤波器的陷波频点分别为 0.26π、0.28π、0.30π、0.32π、0.34π，级联后的陷波器的陷波频点为 0.3π，陷波带宽为 0.1π，即占整个信号带宽的 10%，陷波效果可以达到将近 30 dB。

3　级联陷波器的 FPGA 设计方法

陷波器的实现有时域预测技术和变换域技术。由于时域预测陷波器不管是属于线性的还是非线

万方数据

性的，总是存在收敛速度与控制稳定性的矛盾，无法应对变化较快的时变干扰；对于变换域干扰抑制算法，虽不存在时域陷波方法的收敛速度与控制稳定性矛盾的问题，但是需要将信号经过变换域与反变换域处理，变换过程中需要进行大量的计算和资源代价。采用时域、频域相结合的抗干扰方案，干扰抑制模块可以分为 3 个部分，如图 3 所示，分别为 FFT 变换模块、干扰参数估计模块和参数可配置级联 IIR 陷波器模块。其中 $x(t)$ 为数字基带输入信号，$x(n)$ 为经过 A/D 采样后的信号，包括有用信号 $s(n)$、干扰信号 $i(n)$ 和噪声信号 $v(n)$，$y(n)$ 为经过抗干扰处理过的输出信号。

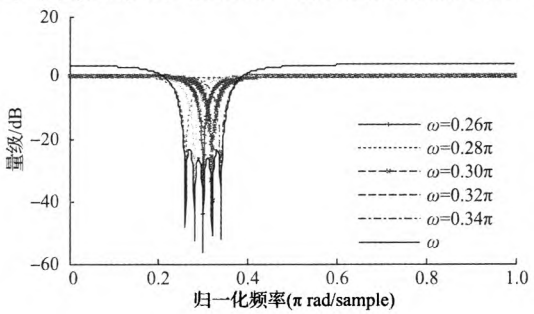

图 2 级联陷波器幅频特性

Fig. 2 Frequency response of cascade notch filter

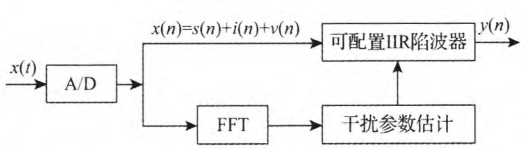

图 3 时域、频域相结合窄带干扰抑制框图

Fig. 3 Diagram of narrow-band interference method in time-frequency domain

3.1 FFT 变换模块

在 ISE12.2 中，提供了 FFT/IFFT 的 IP Core，可以完成实数、复数信号的 FFT 以及 IFFT 运算，共有 4 种结构[15]。

Streaming architecture 结构：允许连续的数据处理，但占用最多的资源。

Radix-4，Burst I/O 结构：提供数据导入/导出阶段和处理阶段。此结构拥较小的结构，但转换时间长，占用资源较少；

Radix-2，Burst I/O 结构：使用更少的逻辑资源，同 Radix-4 相同，提供两阶段的过程，但是转换时间比 Radix-4 更长。

Radix-2-lite Burst I/O 结构：基于 Radix-2 结构，使用多元时间节拍用更小的核来完成蝶形运算，因此资源占用最少，转换时间最长。

研究的窄带干扰频率变化速率相对于基带信号处理的采样频率 40 MHz 可以忽略不计，即可以认为短时间内窄带干扰的频率是恒定的，故选用资源占用最少的 Radix-2-lite Burst I/O 结构 FFT 算法。

3.2 干扰参数估计模块

经过 FFT 运算后，得到带有干扰信号的频域谱线，干扰频点估计模块的作用就是在频谱中找到干扰所在的位置与带宽，为 IIR 陷波器提供配置参数。

对于单频干扰，含有干扰的扩频信号经过 FFT 变换之后，能够很容易估计出干扰频点，从而根据估计出来的频点配置陷波器的参数。而且根据单频干扰的特性，一般只有干扰频点处少数的一根或者两三根谱线值较大，因此只需频点估计值即可滤除干扰频点。

对于窄带干扰，不同于单频干扰的是其在频域内数值较大的谱线不再是少数的几根，而是占扩频信号一定的带宽。图 4 所示为干扰带宽占据扩频信号 10% 带宽的扩频信号，其中 a、b 分别表示干扰信号在频域的起点和终点，干扰估计模块的作用就是找出窄带干扰的起始点和结束点，从而确定干扰的中心频点和带宽，为后续配置级联陷波器提供输入参数。

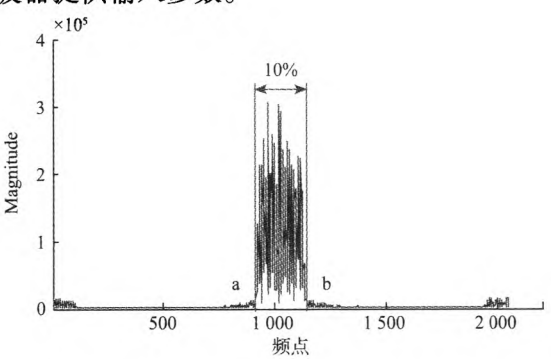

图 4 干扰占 10% 带宽的扩频信号

Fig. 4 Spread spectrum signal with 10% bandwidth interference

在 FPGA 中实现时，为了更为准确的确定干扰位置和带宽，首先对 FFT 输出的数据进行平滑，得到输入信号在频域的包络，根据该包络是否存

万方数据

在跳变来确定干扰的有无，根据跳变的位置确定干扰的起点和终点，其中上升点为干扰的起点，对应图 4 中的 a 点，下跳点为干扰的终点，对应图 4 中的 b 点。考虑到节省资源且便于实现，对输入数据的平滑采用 α 滤波器，其表达式为：

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + \alpha(\tilde{x}_k - \hat{x}_{k-1}) = (1-\alpha)\hat{x}_{k-1} + \alpha\tilde{x}_k \tag{7}$$

式中：系数 α 的值越大，则滤波器对当前测量值的权重就越高，在此取 $\alpha = 1/8$，对图 4 中的频谱进行平滑得到的结果如图 5 所示。

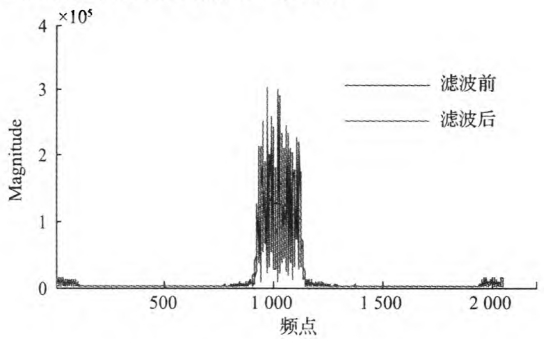

图 5　α 滤波前后频域信号

Fig. 5　Signal spectrum before and after α filtering

3.3　可配置 IIR 格型陷波器实现模块

得到窄带干扰的位置和带宽后，就可以配置级联陷波器。配置时从中心频点开始陷波，然后将陷波频点左右移动来配置下一级陷波器，直到陷波频点到起始频点或者终止频点。陷波器的级数由窄带干扰的带宽来确定，即终止频点与起始频点差值。

单个可配置 IIR 格型陷波器根据式(4)来设计实现，将公式变换为差分方程如下：

$$y(n) = 2\alpha\cos(\omega_0)y(n-1) - \alpha^2 y(n-2) + x(n) - 2\cos(\omega_0)x(n-1) + x(n-2) \tag{8}$$

式中：随干扰频点 ω_0 变化而变化的参数为 $\beta = \cos(\omega_0)$，FPGA 设计中将一个周期的 β 值量化后存储在 ROM 中，根据干扰频点估计模块得到的频点位置来读取 ROM 中的 β 值。其中为了避免小数运算，需先将 β 值放大再存入 ROM 表，计算结束后再对计算结果缩小相应倍数即可。

多个级联 IIR 格型滤波器通过将前一级滤波器的输出作为下一级滤波器的输入来实现，其中存储 β 值的 ROM 表可以使用同一个，只是各个滤波器在读取 ROM 表时取地址相差一定的间隔，该间接即对应陷波频点的间隔。

3.4　资源评估

XILINX 的 V4FX60-1148FPGA 是数字信号处理中常用的一款 FPGA，就在该 FPGA 上实现上述的 5 个级联抗 10% 带宽干扰的滤波器，经过编程综合后得到其主要资源使用情况如表 1 所示。

表 1　级联陷波器资源使用情况表

Table 1　Resource consumption of cascade notch filter

逻辑单元	使用数量	可用数量	使用率
Slices	783	25 280	3.1%
LUTs	1 176	50 560	2.33%
FIFO/RAMB16s	10	232	4.31%
DSP48s	5	128	3.91%

从表 1 可以看出，整个陷波器的资源使用约占整个 FPGA 资源的 4%。3 个分模块中，FFT 变换模块分别使用了 495 个 slices、665 个 LUTs 和 7 个 RAMB16s，占用了整个陷波器所占资源的一半以上，因此是设计中优先考虑资源优化的对象。

4　测试结果

4.1　测试环境

利用 1 块数字基带板和 2 台安捷伦信号源 81150A 搭建环境进行测试，其中数字基带板具有 AD、FPGA 和 DA，其软件具备基本的扩频信号产生和解调功能，用于通信性能的测试与评估。本测试系统中扩频信号码率设为 10.23 Mcps，信息速率为 10 Kbps，通过 DA 输出，信号中频为 70 MHz，该信号对应图 3 中的 $s(t)$。

2 台 81150A 信号源用来产生噪声信号，其中 1 台用于产生宽带高斯白噪声信号，对应图 3 中的 $v(t)$，作为噪声基底；另外 1 台用于产生带宽为 2.046 MHz的高斯白噪声信号，作为窄带干扰信号，对应于图 3 中的窄带干扰 $i(t)$。通过合路器将有用信号 $s(t)$、宽带噪声 $v(t)$ 和窄带干扰 $i(t)$ 进行叠加，得到信号 $x(t) = s(t) + i(t) + v(t)$。将 $x(t)$ 接入 AD，在 FPGA 内部做抗干扰和解扩处理，并将解调输出通过串口输出到上位机以便检测。测试过程中，通过设定两个信号源的输出功率可以得到不同的载噪比和信干比的信号，以进行不同载噪比下的抗干扰性能分析。

万方数据

4.2 测试结果

测试中，通过 XILINX 公司提供的逻辑在线分析仪软件工具将抗干扰模块的输入数据和输出数据分别取出后进行对比得到图 6。

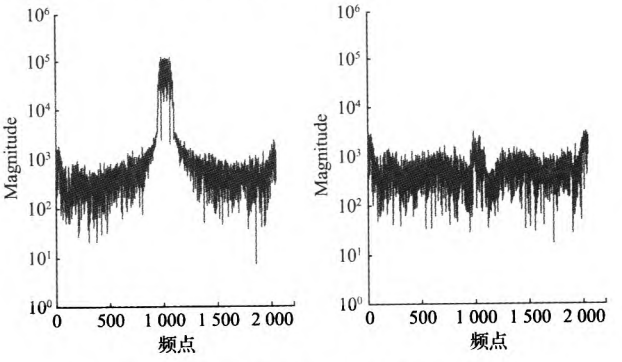

图 6 抗干扰模块输入输出信号频谱

Fig. 6 Spectrum of anti-interference module input and output signal

图 6 中左图为干扰模块输入信号的频谱曲线，其中有用信号的带内能量为 -30 dBm，信号源 1 输出的宽带噪声的带内能量为 -7 dBm，此时的信号 E_b/N_0 为 10 dB。信号源 2 输出的窄带干扰信号的功率为 10 dBm，带宽为 2.046 MHz，对应的干信比为 40 dB。右图为经过抗干扰模块后的信号的频谱曲线，从图中可以看出，干扰信号的基本被滤除掉。

图 7 所示分别为误码率的理论曲线、未加干扰时的实测曲线、干信比为 30 dB 时的曲线和干信比为 40 dB 时的曲线。从图中可以看出，抗窄带干扰措施对于干信比为 30 dB 的信号处理的劣化度大概为 1 dB，对于干信比为 40 dB 的信号处理的劣化度大概为 2 dB，具有较好的抗干扰性能。

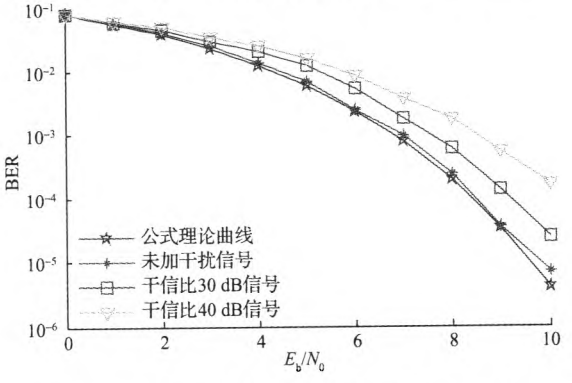

图 7 不同场景信号对应的误码率曲线

Fig. 7 BER curves of different conditions

5 结 论

针对航天通信对抗中常见的窄带干扰展开研究，阐述了利用级联陷波器实现抗具有一定带宽的窄带干扰的方法，对其在 FPGA 中的实现的各个环节进行了优化设计以减少资源，并搭建了实物测试场景进行性能测试。理论分析和测试结果表明，抗窄带干扰的方法占用资源少，仅仅占用 XILINX 公司 V4FX60 的 FPGA 的资源的 4%；抗干扰效果好，通过实际系统测试，对于干信比为 40 dB的信号处理的劣化度大概为 2 dB，具有较强的工程应用价值。

参考文献

[1] ZHUANG X B, CUI X W, LU M Q, et al. Analysis of beam forming algorithms for GPS receivers in the jamming environment[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(3): 570-574.

[2] 刘禹圻，胡修林，冉一航. 卫星导航信号抗单频干扰性能研究[J]. 电子学报，2011，39(6)：1410-1416.
LIU Y Q, HU X L, RAN Y H. Study on evaluating the impact of CWI on DLL tracking performance for GNSS signals [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(6): 1410-1416.

[3] BETZ J W, KOLODZIEJSKI K R. Generalized theory of code tracking with an early-late discriminator part I: lower bound and coherent processing[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 10, 45 (4): 1538-1550.

[4] BETZ J W, KOLODZIEJSKI K R. Generalized theory of code tracking with an early-late discriminator part II: noncoherent processing and numerical results[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 10, 45(4): 1551-1564.

[5] ZHU X W, LI Y L, YONG SH W. A novel definition and measurement method of group delay and its application[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(1): 229-233.

[6] 胡修林，刘禹圻，冉一航. 单频干扰下卫星导航信号的码跟踪性能评估[J]. 华中科技大学学报：自然科学版，2010，38 (8)：5-8.
HU X L, LIU Y Q, RAN Y H. Tracking performance evaluation of GNSS signals in CW interference [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2010, 38 (8): 5-8.

万方数据

[7] JANG J Y, PAONNli M, EISSFELLER B. CW interference effects on tracking performance of GNSS receivers [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(1): 243-258.

[8] BORIO D. GNSS acquisition in the presence of continuous wave interference[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics, 2010, 46(1): 47-60.

[9] 郭黎利, 殷复莲, 卢满宏. DSSS/CDMA 系统窄带干扰抑制技术概述[J]. 电子学报, 2009, 37(10): 2248-2255.
GUO L L, YIN F L, LU M H. Overview on NBI suppression of DSSS/ CDMA systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(10): 2248-2255.

[10] 柯熙政, 刘娜. 卫星导航自适应抗干扰算法及零陷加宽研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(12), 1082-1087.
KE X ZH, LI N. Research on adaptive anti-jamming and null widening algorithm for satellite navigation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(12): 1082-1087.

[11] TAZEBAY M, AKANSU A. Adaptive subband transforms in time-frequency excisers for DSSS communication systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 143(11): 2776-2782.

[12] CHOI J W, NAM I CH. Narrow-band interference suppression in direct sequence spread spectrum systems using a lattice IIR notch filter[J]. Signal Processing, 2001(6): 2237-2240.

[13] KWAN T, MARTIN K. Adaptive detection and enhancement of multiple sinusoids using a cascade IIR filter[J]. IEEE Transactions on Circuits System, 1989 (1): 937-945.

[14] SHOTARO N, MVUMA A. Rejection of narrow-band interference in BPSK demodulation using adaptive IIR notch filter[J]. IEEE Transactions on Circuits System, 1999: 41-44.

[15] 曾庆喜, 王庆, 王浩为, 等. 基于DSP的GPS软件接收机关键技术研究与实现[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(6): 1251-1255.
ZENG Q X, WANG Q, WANG H W, et al. Research and realization of key technology for software GPS receiver based on DSP [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(6): 1251-1255.

作者简介

李献斌, 分别于2004年、2009年获得国防科学技术大学学士学位和硕士学位, 现为国防科学技术大学机电工程自动化学院博士生, 主要研究方向为导航星座星间链路和卫星通信与测距技术。
E-mail: lixianbincn@163.com

Li Xianbin received B. Sc. and M. Sc. from National University of Defense Technology (NUDT) in 2004 and 2009, respectively. And now, he is a Ph. D. candidate in NUDT. His present research interests include inter satellite link, and satellite communication and ranging technology.

万方数据

级联陷波器抗窄带干扰设计与实现

万方数据 WANFANG DATA 文献链接

作者： 李献斌， 王跃科， 杨俊， Li Xianbin， Wang Yueke， Yang Jun
作者单位： 国防科学技术大学机电工程与自动化学院 长沙410073
刊名： 电子测量与仪器学报ISTIC
英文刊名： Journal of Electronic Measurement and Instrument
年，卷(期)： 2013,27(6)

参考文献(15条)

1. ZHUANG X B;CUI X W;LU M Q Analysis of beam forming algorithms for GPS receivers in the jamming environment 2009(03)

2. 刘禹圻;胡修林;冉一航 卫星导航信号抗单频干扰性能研究[期刊论文]-电子学报 2011(06)

3. BETZ J W;KOLODZIEJSKI K R Generalized theory of code tracking with an early-late discriminator part Ⅰ:lower bound and coherent processing 2009(04)

4. BETZ J W;KOLODZIEJSKI K R Generalized theory of code tracking with an early-late discriminator part Ⅱ:noncoherent processing and numerical results 2009(04)

5. ZHU X W;LI Y L;YONG SH W A novel definition and measurement method of group delay and its application 2009(01)

6. 胡修林;刘禹圻;冉一航 单频干扰下卫星导航信号的码跟踪性能评估[期刊论文]-华中科技大学学报(自然科学版) 2010(08)

7. JANG J Y;PAONNIi M;EISSFELLER B CW interference effects on tracking performance of GNSS receivers 2012(01)

8. BORIO D GNSS acquisition in the presence of continuous wave interference 2010(01)

9. 郭黎利;殷复莲;卢满宏 DSSS/CDMA系统窄带干扰抑制技术概述[期刊论文]-电子学报 2009(10)

10. 柯熙政;刘娜 卫星导航自适应抗干扰算法及零陷加宽研究[期刊论文]-电子测量与仪器学报 2010(12)

11. TAZEBAY M;AKANSU A Adaptive subband transforms in time-frequency excisers for DSSS communication systems 1995(11)

12. CHOI J W;NAM I CH Narrow-band interference suppression in direct sequence spread spectrum systems using a lattice IIR notch filter 2001(06)

13. KWAN T;MARTIN K Adaptive detection and enhancement of multiple sinusoids using a cascade IIR filter 1989(01)

14. SHOTARO N;MVUMA A Rejection of narrow-band interference in BPSK demodulation using adaptive IIR notch filter 1999

15. 曾庆喜;王庆;王浩为 基于DSP的GPS软件接收机关键技术研究与实现[期刊论文]-仪器仪表学报 2009(06)

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_dzclyyqxb201306002.aspx