

脉冲信号检测中的窄带干扰抑制器设计

韩 煜^{1,2}, 张东坡², 彭小名², 赵 艳^{1,2}

(1 通信系统信息控制技术国家级重点实验室, 浙江 嘉兴 314033;

2 中国电子科技集团公司 第三十六研究所, 浙江 嘉兴 314033)

摘 要: 针对脉冲信号检测中的窄带信号干扰问题, 从时域和频域角度分析了不同的干扰抑制措施, 进一步基于数字调谐和一阶陷波方法, 在FPGA上实现了简洁高效, 可独立工作的干扰抑制电路, 并推导了相应的干扰抑制条件. 该方法通过频谱数据判定脉冲检测中的干扰信号频率和带宽, 并经由数字下变频将干扰信号搬移至零频, 利用简单的高通滤波器陷波后, 再数字上变频恢复原始脉冲信号. 实验结果表明: 该干扰抑制器能够以较小的代价滤除一定频率间隔的窄带干扰, 脉冲参数估计在容许均方差范围之内.

关键词: 脉冲检测; 窄带干扰; 干扰抑制器; FPGA

中图分类号: TP303

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)09-0119-04

Design of Narrowband Interference Suppressor for Pulse Signal Detection

HAN Yu^{1,2}, ZHANG Dong-po², PENG Xiao-ming², ZHAO Yan^{1,2}

(1 National Laboratory of Information Control Technology for Communication System, Jiaxing 314033, China;

2 The 36th Institute of CETC, Jiaxing 314033, China)

Abstract: This paper analyzes narrowband interference suppression using temporal and frequency processing techniques for pulse signal detection. We implement a stand-alone interference suppressor on field programmable gate array (FPGA) based on digital tuning and 1st-order notch filtering. When a pulse signal along with narrowband interference is detected through spectral measurements, the interference signal is translated to zero frequency using down-converter and filtered out by a simple high-pass infinite impulse response (IIR). The original pulse signal is translated to its previous frequency using corresponding up-converter after alleviating the effects of interference. Furthermore, we deduce the frequency interval between pulse signal and narrowband interference to satisfy interference suppression performance. Experimental results show that the proposed interference suppressor can reduce narrowband interference effect and detect pulse signal under acceptable root mean square (RMS) value.

Key words: pulse signal detection; narrowband interference; interference suppressor; FPGA

1 引言

雷达和通信领域的很多信号具有脉冲特性, 绝大部分监视雷达采用相干脉冲串波形, 外军广泛使用的 link16 数据链在每一跳频点也表现为脉冲信号形式. 通过脉冲检测和参数测量, 正确估计信号的起始时刻和持续时间, 是对该类信号实现电子侦察、

识别和对抗的必需前提. 在日益复杂、高密度的战场电磁环境下^[1], 雷达和通信的信号体制日趋接近, 信号在时、频和空域多维不断融合. 在脉冲信号的检测带宽内, 常常会混有连续波信号, 它们可能是敌方或友方的通信信号, 也可能是有意或无意的干扰信号. 此类连续波信号往往表现为窄带形式, 与脉冲信号同时存在情况下, 会对脉冲信号检测形成干扰, 从而给脉冲信号的检测带来困难. 如果把脉冲信号中同

时存在的连续波信号视为干扰的话,则脉冲检测不仅需要考虑到低信噪比问题,还应该考虑信干比对检测性能的影响。

文中分别从时域和频域的角度分析比较了几种不同的窄带干扰抑制、抵消方法,进而权衡代价及效率,在 FPGA 上为窄带干扰下雷达脉冲信号检测,设计并实现了一个简洁高效、可独立工作的干扰抑制器。

2 几种窄带干扰抑制方法

结合雷达侦察中的同时到达信号处理和直扩通信系统的窄带干扰抑制措施,把脉冲检测中的窄带干扰抑制方法归纳如下:

(1) 数字信道化方法. 通过多相滤波或者短时快速傅里叶变换(STFT)处理方法^[2],将有效频带等间隔地划分为若干个子信道. 通过选择合适的滤波器或者 STFT 窗函数,以及子信道数目、重采样数据率来实现整个频带的无盲区覆盖,同时确保保持检测脉冲信号和窄带干扰信号频率分别属于不同的子信道,能够实现脉冲检测的干扰抑制. 在文献[3]中,利用多相滤波数字信道化方法实现了 16 通道 1GHz 带宽雷达脉冲侦察处理任务. 实验结果表明,在脉冲信号和连续波干扰信号分属不同子信道时,连续波信号对脉冲信号的检测无任何干扰影响,脉冲检测性能完全由滤波器决定. 数字信道化方法的优点是实现简单,干扰抑制效果良好,但缺点是灵活性差,固定的信道划分不能保证脉冲信号和窄带干扰信号属于不同子信道,一旦该条件不满足,脉冲检测几乎无法进行。

(2) 雷达侦察信号处理中常用的匹配滤波方法^[4]. 在脉冲检测中,由于窄带干扰信号长时间存在,其载频、调制参数等相对稳定,可以先对干扰信号进行各个参数估计,构造相应的干扰匹配信号,通过相干处理抵消干扰信号,提高信干比,使得脉冲检测成为可能. 该方法原理简单,但受干扰信号参数估计精度影响较大,仿真发现,对于无调制的连续波干扰信号有较好的抑制作用。

(3) 借鉴直扩通信系统中强窄带干扰的频域抑制处理方法^[5]. 对于扩谱后,背景噪声下的直扩信号而言,通过 DFT 处理后,很容易从幅度谱上找到窄带干扰信号,对干扰信号幅度进行抑制,并最大限度保留相位信息,在通过 IDFT 处理就可以得到干扰抑制后的时域信号. 文献[5]分析并比较了已知噪声功率情况下的不同频域抑制干扰算法的性能,但对

于脉冲检测中该方法是否适应,抑制效果,以及脉冲检测性能的影响尚未见报道. 此外,该方法能够很容易抑制多个干扰,而不需要增加额外的资源. 频域抑制干扰方法的硬件代价包括 FFT、IFFT 模块和谱峰搜索模块。

(4) 针对窄带干扰抑制的数字陷波器设计^[6-7]. 陷波器是通过带阻滤波器来消除某个特定频率的干扰信号,通过调整陷波宽度及深度,达到抑制窄带干扰的目的. 由于干扰信号的频率和带宽并不固定,陷波器需要自适应地改变滤波器参数与之匹配. 自适应陷波方法具有自学习、自适应、自调整的能力,它能依据事先确定的最优准则. 通过迭代运算,自动调整陷波器参数,以适应复杂的干扰情况. 但主要缺点是仅能对一个干扰信号进行自适应处理,如欲对多个干扰信号抑制,则可将多个干扰抑制器进行级联处理. 自适应滤波通常采用最小均方误差(MMSE)、最小二乘(LS)、最大似然(ML)等准则实现,计算量比较大。

3 干扰抑制器设计与实现

上述自适应数字陷波器方法计算复杂度高,在硬件实现中难以接受. 一种可采用的方案是结合数字调谐,将干扰信号调谐至零频,则陷波器可以用一个简单的 IIR 高通滤波器代替(固定或者最小化滤波器系数改变,以降低计算复杂度),这样的处理过程将大大简化滤波器设计和信号处理过程. 文中干扰抑制器及其应用框图如图 1 所示。

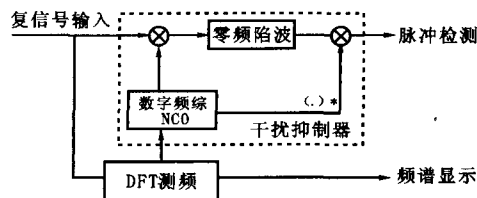


图 1 干扰抑制器应用框图

ADC 采样数据经过正交解调^[8]作为复信号输入,测频模块实时进行 FFT 运算进行频谱显示. 通过对幅度谱数据进行人工甄别或者包络检测、门限自动生成后,找到影响脉冲检测的窄带干扰信号并估计其频点 f_1 及信号带宽 B_1 . 数字频综 NCO 模块根据 DFT 频点,产生复本振信号输出. 上下变频共用同一本振,唯一区别是图 1 中的共轭运算,记为 $(\cdot)^*$. 经过下变频后,窄带通信信号已经调至零频附近,经过高通滤波滤除干扰信号,再经过上变频恢复原始待检测脉冲信号. 由图 1 可知,干扰抑制器直接加入在信号数据流通路中,由于独立工作,对包括

脉冲检测在内的其他模块并无影响,可以根据频谱检测结果旁路或者选择干扰抑制功能。

为最简化硬件实现代价,文中设计的 IIR 高通滤波器如下:

$$y(n) = x(n) - x(n-1) + \frac{15}{16}y(n-1) \quad (1)$$

其幅度响应如图 2 所示。3 dB 截止归一化频率近似满足 $f_c=0.01$,最大衰减幅度 14 dB。

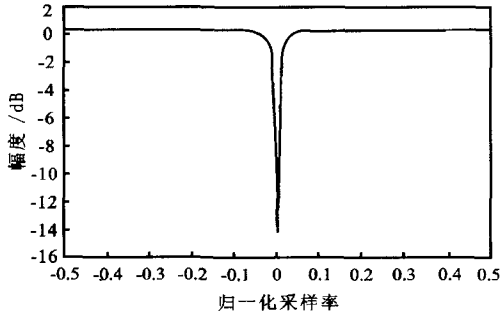


图 2 一阶陷波器幅度响应

为满足抑制干扰条件,必须保持脉冲信号和通信信号具备一定的频率间隔,如下:

$$\begin{cases} |f_i - f_0| < \max(\alpha, f_c) \\ B_i/2 < f_c \\ \alpha = k/PW \end{cases} \quad (2)$$

其中, f_0 为脉冲载频, PW 为脉冲宽度, k 是常数因子。经过仿真试验,一般设定 $k > 10$,能够保证干扰抑制性能。

4 实验结果

在 Altera 公司的 Stratix2-EP2S180F1020I4 FPGA 芯片上实现了上述干扰抑制器的电路设计,干扰抑制电路 FPGA 资源占用如表 1 所示。

表 1 Stratix2-EP2S180F 资源占用 ($f_{clk}=148\text{MHz}$)

	数字 上变频	数字 下变频	NCO	陷波器
ALUT (0.28%)	1	1	171	222
REG (0.31%)	48	64	156	178
DSP (3.125%)	8	8	8	0
BRAM (0.15%)	0	0	13 824	0

在一个实际的雷达、通信信号截获平台,进行了射频注入式测试实验以测试干扰抑制性能。一般说来,连续波信号的平均功率弱于脉冲信号,为最小化脉冲检测电路自身的性能影响,设定单载波脉冲信号载频 1500 MHz,脉宽为 5 μs ,重频 800 μs 。以无干扰存在,且旁路干扰抑制器的脉冲检测结果为统

计参考依据。当复采样率即系统时钟为 148 MHz,按式(2),以单音连续波信号作为干扰,其频率分别与脉冲载频间隔(FI)分别为 3、10、20、30 MHz,信干比(SIR)分别为 0、5、10、15、20 dB 进行干扰抑制试验。脉冲幅度(PA)、脉冲载频(RF)、脉冲宽度(PW)检测结果统计均方差值(RMS)如图 3 所示。图中结果是以脉冲完成去交错分选^[7]后,100 个脉冲描述字(PDW)进行处理得到。

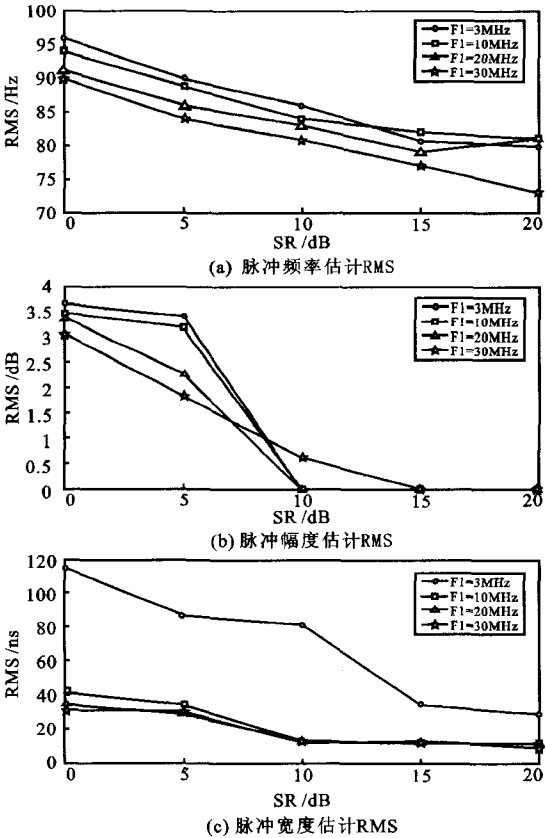


图 3 脉冲参数估计 RMS

与无干扰脉冲检测结果相比,经过干扰抑制后的脉冲参数估计 RMS 有所增大,基本与信干比和频率间隔成单调关系。随着频率间隔和信干比增大,RF、PA、PW 的 RMS 均逐渐递减,在 3MHz 和 0dB 时,与输入脉冲相比,RF、PA、PW 的 RMS 分别为 0.063%、13.33%、2.32%。而在 10MHz 和 10dB 时,RF、PA、PW 的 RMS 分别减至 0.063%、0%、0.32%。PA、PW 可以近似认为是脉冲信号在频域上、功率上和时域上的度量,其 RMS 可看作干扰抑制对参数估计带来的影响。其中,干扰抑制对频域估计结果影响最大为 100Hz,而对时域估计结果影响为 100ns 左右。根据 PA 的 RMS,功率估计与信干比关系较大,在大于 10 dB 时,干扰抑制几乎无影响,反之则影响较大。与上述分析直接相关的是对脉

冲去交错的影响. 脉冲载频和重频常常作为去交错依据, 在进行干扰抑制时, 其容差需要根据 RMS 值作相应调整, 否则可能带来虚警.

5 结束语

文中对脉冲检测中的窄带干扰抑制问题进行分析, 提出了一种数字调谐和一阶陷波解决方案, 并推导了相应的干扰抑制条件. 在 FPGA 上实现了干扰抑制器的电路设计, 具有结构简单, 实现代价小, 可独立工作的特点. 实验结果表明, 经过干扰抑制后的脉冲参数估计 RMS 值, 与信干比和频率间隔成单调关系. 在满足频率间隔条件下, 干扰抑制器能够滤除窄带干扰, 实现正确的脉冲信号参数估计.

参考文献:

- [1] 李朝伟, 周希元, 刘福来. 雷达/通信信号侦察一体化技术[J]. 舰船电子对抗, 2008, 31(2): 5-11.
- [2] Zahimiak R, Sharpin L, Fields W. A hardware-efficient, multirate, digital channelized receiver architecture[J]. IEEE Tran on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(1): 137-152.
- [3] 韩煜, 赵艳, 张东坡. 一种数字宽带截获接收机的高效实现[J]. 通信对抗, 2010(1): 51-54.
- [4] 安秀娟, 张东坡, 文连国. 一种强连续波干扰下的宽带脉冲检测方法[J]. 舰船电子对抗, 2010, 33(1): 97-100.
- [5] Capozza P T, Holland B J, Hopkinson T M. A single-chip narrow-band frequency-domain excisor for a global positioning system (GPS) receiver[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2000, 35(3): 401-411.
- [6] Michael H, Michail K T. Adaptive techniques for multi-user CDMA receivers[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2000: 49-52.
- [7] 张伟, 周力. 一种改进的 DSSS 系统自适应干扰抑制技术[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(12): 75-77.
- [8] 张兵, 汤清华, 吴国安, 等. 基于 DSP 的数字正交解调器的设计与实现[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(7): 35-38.
- [9] Wiley R G. Electronic intelligence: the interception of radar signals[J]. Dedham, MA: Artech House Publishers, 1985.

作者简介:

韩煜 男, (1975-), 工程师, 研究方向为宽带数字接收机算法及其实现.

张东坡 男, (1975-), 高级工程师, 研究方向为雷达信号处理.

彭小名 男, (1974-), 高级工程师, 研究方向为通信信号处理算法及其实现.

赵艳 女, (1982-), 工程师, 研究方向为通信信号处理算法及其实现.

(上接第 118 页)

- measurement in the intel core duo processor[C]//. Proc. of 12th Int'l Workshop on Thermal investigation of ICs. France; Nice, 2006, 23-27
- [5] Young Han, Sung Jin Kim. Diode temperature sensor array for measuring micro-scale surface temperatures with high resolution[R]. Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology. Korea, 2008: 52-58.
- [6] Wu W, Jin L L, Yang J, et al. Efficient power modeling and software thermal sensing for runtime temperature monitoring[J]. ACM Transaction on Design Automation of Electronic Systems, 2007, 12(3): 26.
- [7] 陈星弼, 张庆中. 晶体管原理与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 144
- [8] 苏蓉, 郭春生, 冯士维, 等. 基于有限元分析的集成电路瞬态热模拟[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(5): 74-77
- [9] Giacomo Paci, Francesco Poletti, Luca Benini, et al. Exploring temperature-aware design in low-power MP-SoCs[J]. International Journal of Embedded Systems, 2007 3(1/2): 43-51.
- [10] Stephen H Gunther, Frank Binns, Douglas M Carmean, et al. Managing the impact of increasing microprocessor power consumption[J]. Intel Technology Journal Q1, 2001, 5(1): 22-25.

作者简介:

施教芳 女, (1966-), 硕士, 副教授. 研究方向为计算机应用技术.

苏品刚 男, 副教授.

王俭 男, 教授.