

雷达窄带强干扰自适应频域陷波技术研究与实践

龙永良, 杜雨谔, 陈光拓

(成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:窄带干扰是雷达系统常见的干扰形式,会严重影响雷达的工作质量。针对雷达系统的强窄带干扰抑制问题,采用基于自适应的频域陷波技术的抗干扰算法,算法自适应生成判决门限,判断干扰所在位置,并通过对于干扰与 LFM 雷达信号重叠部分谱线处理抑制干扰。详细介绍方法的原理和处理流程,主要论述判决门限的生成方法和谱线处理的方法。用 Matlab 对该方法进行仿真与分析。最后用 FPGA 实现算法。算法能够较好地抑制 LFM 信号中的大功率窄带干扰,并且具有一定的自适应性。

关键词:信号与信息处理;雷达信号处理;窄带干扰;LFM 信号;自适应滤波;Matlab

中图分类号:TN975

文献标志码:A

0 引言

雷达在现代探测技术中占有非常重要的地位,在军事作战和卫星遥感等诸多领域都发挥着不可替代的作用。由于雷达工作环境日益复杂与恶化,经常会受到各种杂波的干扰,其中窄带干扰(narrow band interference, NBI)是最常见的干扰形式^[1],其干扰带宽小于雷达信号带宽的1%。除人为干扰外,还有存在多种形式的非人为干扰。窄带干扰具有高功率谱密度和易于实现的特点,而且仅仅只需要几个窄带干扰就可以覆盖或是淹没一定带宽的有用信号,当窄带干扰能量较大时,将目标信号完全淹没在干扰中,这将显著降低雷达的分辨率,影响雷达的探测性能^[2]。如何有效地抑制窄带干扰是雷达抗干扰技术领域中的重要课题。近20年来,国内外相继有许多窄带干扰抑制算法被提出^[3-6],而现有的窄带干扰抑制算法大多都比较复杂,计算量大^[7],不利于硬件实现。文中采用基于自适应频率陷波技术的窄带干扰抑制算法,

相比于时域自适应干扰抑制技术^[8],自适应频率陷波技术有着处理步骤简单,速度更快等优点。最后用 xilinx 公司的 Virtex 系列芯片中实现算法,结果表明这种算法能有效地去除雷达信号中的大功率窄带干扰。

1 自适应频域陷波技术

经典的自适应滤波器有着自身难以克服的缺陷:一旦滤波器设计好后,其技术参数是固定不变的。固

定参数的滤波器是无法适应随时快速变化的时变信号而进行准确滤波,然而窄带干扰是统计特性随着时间快速变化的时变干扰,工程实践中常常无法得到窄带干扰的特征先验知识^[9],设计一种自适应的滤波算法来应对窄带干扰。

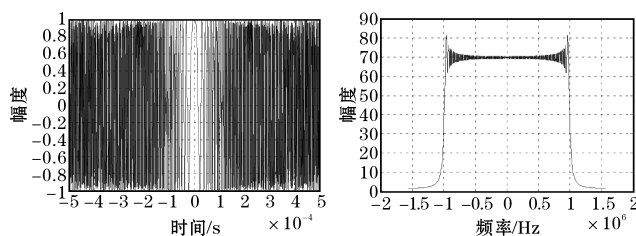
自适应频域陷波技术是建立在方案所处理的信号特点提出。算法所要处理的信号是由雷达线性调频(linear frequency modulation)信号、信道加性噪声以及窄带干扰组成的混叠信号^[10]。

混叠信号可以表示为

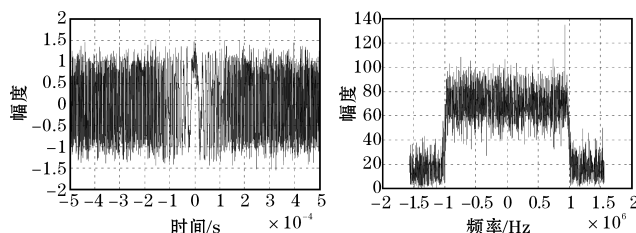
$$r(n) = s(n) + n(n) + j(n) \quad (1)$$

其中 $s(n)$ 表示 LFM 信号本身, $n(n)$ 表示窄带干扰信号, $j(n)$ 表示信道的加性高斯白噪声。

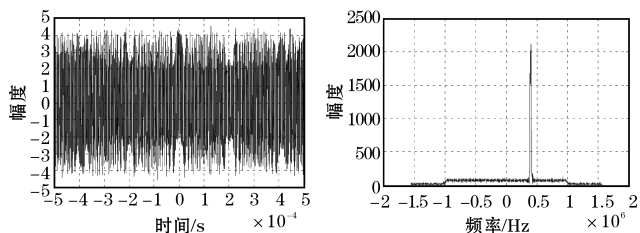
根据傅里叶变换理论分析,当某一点频率的信号受到大功率的窄带干扰时,信号在频域表现为该频点的幅度就会显著增大,如图1所示。



(a) 线性调频信号频域图



(b) 线性调频信号+白噪声频域图



(c) 线性调频信号+白噪声+窄带干扰频域图

图1 窄带干扰对信号影响效果图

图1(a)为LFM信号的时域图和频域图,图1(b)为LFM信号+白噪声的时域图和频域图,图1(c)为LFM信号+白噪声+窄带干扰的时域图和频域图;其中叠加的窄带干扰位置在400 KHz,大小约为10 dB,由图1(c)图可知,对于混叠信号,时域中干扰信号与LFM信号完全混叠,很难区分干扰信号与LFM信号,而在频域中,清楚地看到干扰信号集中在一个窄带内。其能量远高于LFM信号能量,且集中在较窄频带内。经过上图的对比发现窄带干扰对信号的影响非常大,仅仅一个窄带干扰就已经将信号埋没,所以接收信号时对窄带干扰的处理非常有必要。

自适应频域陷波算法是利用干扰相对扩频信号能量集中在很窄的频带内^[11],将接收受到干扰的信号变换到频域,通过自适应的方法生成门限,检测出干扰的频谱位置,将干扰的谱线去掉或进行衰减,最后通过反变换还原成时域信号。算法流程如图2所示。

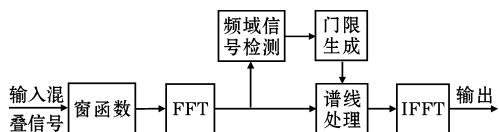


图2 自适应频域陷波技术原理

从图2看出,其信号处理详细流程为:首先,对输入信号进行时域加窗。在这一步中,窗函数的选择为hanning窗。通过加窗,可以平滑频谱,即弱化频谱边缘处的不连续性,这样降低经过时域滤波后信号主瓣能量泄露^[12]。设窗函数为 $w(n)$,则加窗后的信号为

$$r_w(n) = r(n)w(n) \quad (2)$$

然后,对加窗后的信号 $r_w(n)$ 做 N 点FFT变换得到结果 $R_w(k)$ 。在这一步中,FFT的点数选择比较关键,选择的约束条件为频率分辨率,在FFT中,频率分辨率由信号时宽决定,如果信号采样频率 f_s 固定,时宽和点数成正比,频率分辨率为 f_s/N ,由系统参数已知信号采样频率为3.125 MHz,干扰信号最大带宽为30 KHz,则至少为128点,为进一步提高频率分辨率,方案选择采样点数为4096点。

进行FFT变换后,需要对频谱进行检测,从而判断干扰的位置。其中频谱检测最重要的一环便是判决

门限的生成。合理的门限值可以使功率较小的有效信号通过,而使功率较大的窄带干扰信号被识别并被处理。采用的方法的理论依据是信号检测理论中的CFAR技术^[13],在CFAR技术中,检测门限由式(3)确定:

$$T = -\beta^2 \ln P_{FA} \quad (3)$$

其中, β^2 表示噪声功率, P_{FA} 表示虚警概率。可以看出,检测门限与噪声功率成线性关系。在方案中门限生成借鉴CFAR中门限确定的方法,其算法步骤如下:

(1)在FFT后,经过包络检波得到信号在各个频点的功率。

$$P[i] = I^2[i] + Q^2[i] \quad (4)$$

其中, $P[i]$ 表示 i 频点的功率, $I[i]$ 表示频谱在 i 频点实部, $Q[i]$ 表示频谱在 i 频点虚部。

(2)求出信号频带内所有频点的功率均值。

$$P_E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P[i] \quad (5)$$

其中 P_E 表示信号的平均功率。在这一步中,用到了干扰是窄带干扰的约束,认为干扰对信号的平均功率影响可忽略。

(3)将平均功率乘以某个系数,得到检测门限。

$$T = \alpha P_E \quad (6)$$

其中, T 为检测门限, α 为系数。在这一步中,合理的选择系数比较关键,系数的选择有2个约束条件,根据项目的应用要求,需要检测干信比(ISR)为10 dB以上的干扰,所以系数选择要求在10以下;另外一方面,信号检测领域对信号的有效检测要求在超过噪声功率6 dB以上,所以系数选择要求在4以上;通过上述2个约束条件,系数选择的区间为 $[4, 10]$ 。项目针对的是雷达系统的强窄带干扰。因为从接收端来看,窄带干扰是具有随机性,也就是说有可能干扰宽带信号的任意一个频点;但是,就某一时刻而言,窄带干扰噪声就只能干扰宽带信号中的少量频点。而干扰处的频点功率将远大于非干扰点的功率,非干扰处的频谱始终比较平稳。所以 α 取4就可以。

当判决门限生成之后,超过门限值的谱线通常认为是含有干扰信号的谱线,对这些谱线的处理常用2种方法:

(1)将该频点(窄带干扰的频点)谱线置零:认为大于门限的谱线完全是干扰信号,彻底去掉。由于窄带干扰的带宽远小于LFM信号的带宽,所以,置零法对信号的损失并不大。

(2)将该频点的谱线幅度置为频谱谱线幅度的平均值。使信号在该频带中和其他频段一样平稳,然后经

过 IFFT 进行信号重构,而获得更好的滤波效果。

不论是从傅里叶理论分析还是实验结果数据分析都可以得出如下结论:置零法的信号损失大,线性相位度较差,这是因为置零法将被干扰的频点置零的同时也将信号本身有的频率去除,从而导致信号损失较大;取均值法,信号损失较小,线性相位度也比较好。因此谱线处理采用取均值法。

综上,算法采用的功率认知技术,将混叠信号变换到频域,在频域中进行包络检波,进而得到精确的干扰信号信息,最后进行滤波处理抑制干扰。

2 FPGA 算法实现

目前 FPGA 已成为高性能数字信号处理的理想器件,特别适合于完成数字滤波、快速傅里叶变换等。因为系统对算法的实时性和大规模数据处理能力要求较高,所以项目选择的是 Xilinx 公司的 Virtex 系列的 XC5VSX95T 芯片。该芯片配置有 14720 个 Slice, 1520kb 容量的分布式 RAM, 8784 kb 容量的块 RAM, 640 个 DSP48E Slice 以及 640 个可用 I/O 口^[14],为算法的实现提供了较好的支撑。

FPGA 算法实现的流程图如图 3 所示。

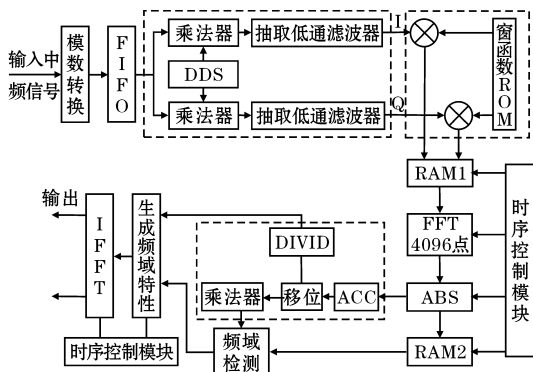


图3 FPGA处理流程图

图3可以看到由任意波形发生器产生的模拟中频信号首先输入硬件系统的AD采集模块, FPGA驱动AD芯片采集中频信号,由于AD芯片是双沿采集,也就是说假如AD的采样时钟为20 MHz,那么上升沿采集一路信号(20 MHz)和下降沿采集一路(20 MHz),再经过FPGA的FIFO内核将两路信号合为一,其采样率也就相当于是40 MHz,所以FIFO内核主要功能是整理数据,提高采样率。

模拟中频信号经AD采集模块输出变为数字中频信号,数字中频信号经过正交下变频变成I、Q两路基带信号。这一步要调取ISE的DDS,乘法器和FIR低通滤波器这几个IP核。其中DDS的作用是产生正弦

信号和余弦信号,分别与数字中频信号相乘,实现I、Q分离。抽取低通滤波器的作用是将I、Q两路信号降到合适数据率。经过低通滤波器输出的两路信号就是解调出来的基带信号的实部和虚部。

然后对I、Q数据进行时域加窗。先用MATLAB生成hanning窗函数,将窗函数数据导出到COE文件,并加载到ROM IP核中。然后分别利用乘法器让I、Q数据和窗函数数据相乘,完成窗函数滤波操作。

因为窗函数输出出来的基带信号的数据率比较低而后续做运算又需要高速运算,所以中间加一级缓存RAM1,窗函数滤波完成后便出发一个使能脉冲启动RAM1的存数据操作,当把一个周期的信号存完之后马上启动FFT操作,FFT操作完成信号触发ABS求模,求模运算结果一路存储到RAM2,另一路累加求和,求和结果锁存后清零,对求和结果进行求平均,由于数据总长度为4096点,所以求平均等价于对求和结果进行截位操作,得到每个频点的均值,然后启动乘法器将均值乘以系数得到门限值,门限生成之后就开始读取RAM2中的数据,并进行一一对比,将大于门限值的点视为干扰,小于门限值的点视为信号,RAM2读取完成后生成频率描述字,频率描述字包括干扰的开始位置、结束位置、干扰功率及噪声平均功率。这几步的时序是由时序/时钟控制模块决定。

生成频域特性模块根据频率描述字的信息,在有干扰的位置将滤波器的频响实部的幅度置为谱线幅度均值,虚部全部置零,然后对其进行IFFT变换,IFFT变换完成后即完成整个滤波运算。

3 仿真分析

评估一个系统性能优劣的指标有很多,该干扰抑制方案中,在系统稳定性的前提下,最主要关心干扰抑制能力和有用信号损失,下面给出这两个指标的定义。

干扰抑制能力^[15]:对干扰抑制后对信号作傅里叶变换分析其频谱,计算干扰抑制后信号的干信比,与干扰抑制之前的干信比作比较,以此衡量干扰抑制能力,干扰抑制能力表示为

$$\text{干扰抑制能力} = \frac{\text{处理后剩余干扰功率}}{\text{处理后信号功率}} \quad (7)$$

有用信号损失^[16]:以原始未加干扰的信号进行匹配滤波得到的信噪比SN0为参照,计算干扰抑制后的信号进行匹配滤波得到的信噪比SN1,求SN0和SN1之差得到信噪比损失,有用信号损失表示为

$$\text{有用信号损失} = 10 \log \left(\frac{\text{未加干扰信号匹配滤波功率}}{\text{干扰抑制后匹配滤波功率}} \right) \quad (8)$$

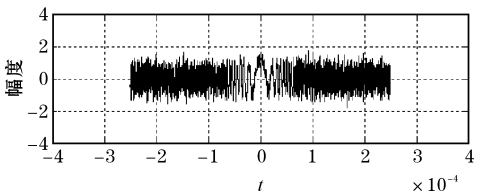
为验证自适应频域陷波算法的干扰抑制性能和硬件实现的效果,现用 MATLAB 和 FPGA 进行对比仿真实验。仿真模型中,待处理信号主要参数要求如表 1 所示。

表 1 仿真信号参数设置

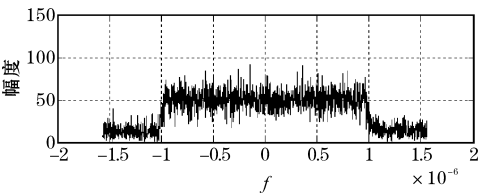
采样频率	信号功率	LFM 信号持续时间	窄带干扰个数	LFM 信号带宽	窄带干扰带宽	信噪比 (SNR)	干信比 (ISR)
3.125 MHz	1 W	0.5 ms	1、3	2 MHz	30 kHz	10 dB	10 dB、30 dB、50 dB

3.1 MATLAB 仿真分析

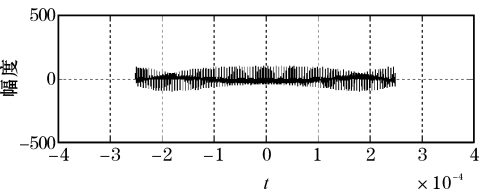
按照表 1 的参数要求,用 MATLAB 产生一个带宽为 2 MHz,持续时间为 0.5 ms 的 LFM 信号,在 LFM 信号中加入高斯白噪声和 3 个带宽为 30 KHz 的窄带干扰信号,得到待处理信号,干信比 (ISR) 为 10 dB,信噪比 (SNR) 为 10 dB。用 MATLAB 进行频域陷波处理,并进行指标运算。仿真过程中信号波形图如图 4 所示。



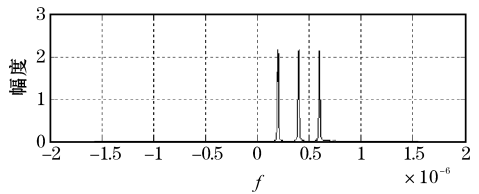
(a) LFM 信号时域波形图



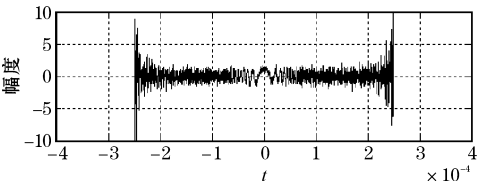
(b) LFM 信号频域波形图



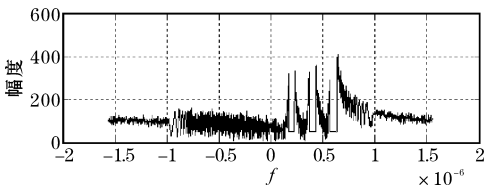
(c) 待处理信号时域波形图



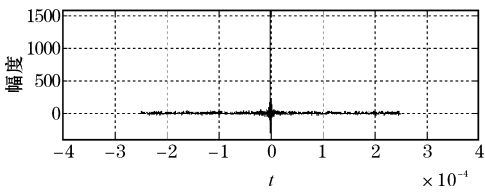
(d) 待处理信号频域波形图



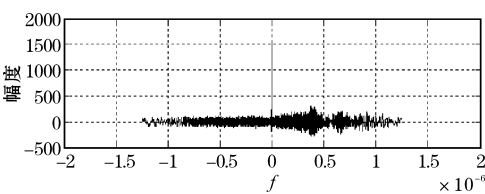
(e) MATLAB 频域陷波处理后信号时域波形图



(f) MATLAB 频域滤波处理后信号频域波形图



(g) LFM 信号通过匹配滤波器后波形



(h) MATLAB 频域陷波后的信号通过匹配滤波器后波形

图 4 MATLAB 仿真波形图

由图 4(c) ~ (d) 图可以看出,在时域中,LFM 信号与窄带干扰信号完全混叠,且 LFM 信号受干扰影响较大;在频域中,有 3 个窄带干扰信号,干扰信号分别在以 200 KHz、400 KHz、600 KHz 为中心,30 KHz 为带宽的频带内。由图 4(e) 图可看出,在时域中,经过频域陷波处理后的信号与原 LFM 信号波形图已比较接近。由图 4(f) 图可以看出,在频域中,干扰存在的地方由于窄带干扰旁瓣的影响,与原 LFM 信号有一定差别。计算经过频域陷波处理后信号的平均功率,可以得到干扰抑制后的 ISR 为 -5.73 dB,即 ISR 降低 15.73 dB。如图 4(g) 所示,将原 LFM 信号发现,在此情况下,经过频域滤波处理后的信号,通过匹配滤波器后性能改善很多,近似为 sinc 函数,通过匹配滤波,此时波形图为一标准的 sinc 函数形式,有用信号为 22.07 dB。如图 4(h) 所示,将经过频域陷波处理后的信号通过同样的匹配滤波器,并与未经任何处理的待处理信号通过匹配滤波器的结果进行对比,有用信号由 22.07 dB 衰减为 22.03 dB,即有用信号损失 0.04 dB。

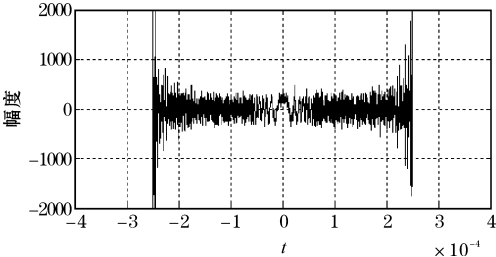
按表 1 的参数设置不同的在带干扰,在 MATLAB 中进行多次试验,实验统计结果如表 2 所示。

表 2 MATLAB 自适应频域陷波处理抑制性能统计表

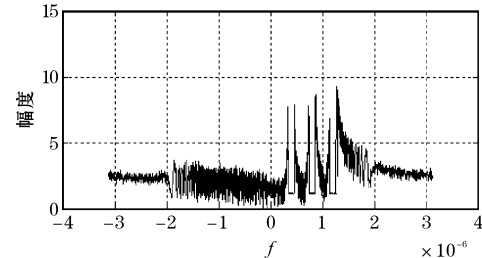
序号	信噪比/dB	干扰带宽/kHz	干扰个数/个	干信比/dB	干扰抑制能力/dB	信号损失/dB
1	10	30	1	10	-11.58	0.01
2			1	30	-1.11	0.02
3			1	50	-0.78	0.05
4			3	10	-5.73	0.04
5			3	30	0.51	0.10
6			3	50	2.41	3.99

3.2 FPGA 仿真分析

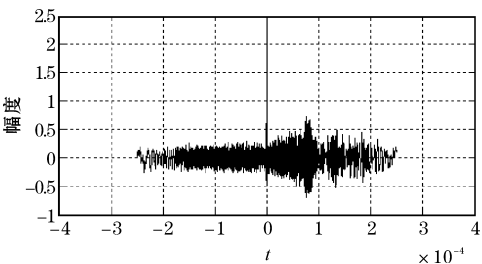
将 MATLAB 产生的待处理信号数据导入到 FPGA 信号处理板中进行频域陷波算法处理。处理完成后用 ChipScope 抓取最后输出的信号数据,然后将数据导入 MATLAB 中进行绘图和指标运算。仿真过程中信号波形如图 5 所示。



(a) FPGA 频域陷波处理后信号时域波形图



(b) FPGA 频域陷波处理后信号频域波形图



(c) FPGA 处理后的信号通过匹配滤波器后波形

图 5 FPGA 频域陷波处理后信号波形图

由图 5(a) ~ (b) 可以看到经过 FPGA 处理后的信号与 MATLAB 处理后的信号的波形图相差不多,干扰被明显抑制。计算经过 FPGA 频域陷波处理后信号的平均功率,可以得到干扰抑制后的 ISR 为 -5.45 dB。如图 5(c)所示,将经过 FPGA 频域陷波处理后的信号通过同样的匹配滤波器,计算可知有用信号由 22.07 dB 衰减为 21.81 dB,即有用信号损失 0.26 dB。

按表 1 的参数设置不同的在带干扰,在 FPGA 中进行多次试验,实验统计结果如表 3 所示。

表 3 FPGA 自适应频域陷波处理抑制性能统计表

序号	信噪比/dB	干扰带宽/kHz	干扰个数/个	干信比/dB	干扰抑制能力/dB	信号损失/dB
1	10	30	1	10	-11.52	0.17
2			1	30	-1.01	0.24
3			1	50	-0.73	0.33
4			3	10	-5.45	0.26
5			3	30	0.72	0.51
6			3	50	2.53	4.03

3.3 仿真结果对比分析

由 MATLAB 仿真和 FPGA 仿真的统计结果可以看出:

- (1)随着干信比 (ISR) 的增大,由 10 dB 增加到 50 dB,干扰抑制能力下降,有用信号损失量增加,说明着干扰强度的增加而损失更多的有用信号,但是有用信号的损失量均很小。
- (2)随着干扰的数目增多,干扰抑制能力有所下

降,有用信号损失量增加,说明在干扰数目较少时,通过该方法进行干扰抑制后损失的有用信号较少。

(3)FPGA 处理测试的指标略差于 MATALB 理论仿真的指标,但差别很小。原因可能是信号数据四舍五入和外界环境干扰所致。

因此,算法在干信比 (ISR) 较小时,干扰数目较少时干扰抑制性能很好。总体来说,硬件平台实测数据与 MATLAB 理论仿真数据基本吻合,并且均已达到干扰抑制要求,所以该算法抑制强窄带干扰可行。

4 结束语

方法从频域滤波的角度出发,通过频域包络检波,估计干扰的位置,进而用插值的方法抑制干扰,同时尽量保留有用信号。通过仿真验证,该方法干扰抑制能力较好。该方法的处理简单,不需要先验信息,可以自适应的进行处理,系统非常稳定,受白噪声影响较小,能够较好地抑制雷达强窄带干扰。但是当干扰的带宽越宽,判决条件就越复杂且干扰抑制性能也会相应降低,因此这种方法只是在处理窄带干扰中适用。

研究能够为军事对抗技术提供理论基础,特别是对脉冲压缩雷达方面的应用更是起着基础地位作用,设计的强干扰抑制方案能够有效地提高雷达系统的分辨率和准确度。

参考文献:

- [1] 周峰. 机载 SAR 运动补偿和窄带干扰抑制及其单通道 GMTI 的研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2007.
- [2] 储晓彬,王国宏. 基于特征子空间的窄带干扰抑制技术[J]. 电子工程师,2008,34(5):46-47,10-12.
- [3] Matthew Braunstein, James Ralston, David Sparrow. Signal processing to radio frequency interference (RFI) suppression[J]. SPIE 2230:190-208.
- [4] Timothy Miller, Lee Potter, John McCorkle. RFI suppression for ultra wideband radar [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1997,33(4):1142-1156.
- [5] Theodore Koutsoudis, Louis. RF interference suppression in ultra wideband radar receiver [J]. SPIE,2487:107-118.
- [6] August Golden Jr Susan A Wemess, Mark Stuff, et al. Radio frequency interference in a VHF/UHF deramp SAR[J]. SPIE,2487:84-95.
- [7] 王彦平,彭海良. 合成孔径雷达窄带干扰抑制技术综述[J]. 现代防御技术,2003,31(1):46-47.
- [8] 黄文晶,梅军辉. 一种有效的窄带干扰抑制技术[J]. 舰船电子工程,2008,28(5):85-86.
- [9] 邹艳碧,高鹰. 自适应滤波算法综述[J]. 广州大学学报:自然科学版,2002,1(2):44-45.
- [10] 薛巍,向敬成. 基于门限估计的直扩通信系统窄带干扰变换域抑制方法[J]. 2003,25(7):991-992.
- [11] 王爱华,夏彩杰. 改进的频域窄带干扰陷波器[J]. 北京理工大学学报,2007,27(12):1099-1100.
- [12] 刘艳良,刘海见. 实时频域滤波干扰抑制补偿技术研究[J]. 信息通信,2013(5):19-20.
- [13] 何友,关键. 雷达自动检测和 CFAR 处理方法综述[J]. 系统工程与电子技术,2003,23(1):9-10.
- [14] 徐文波,田耕. Xilinx FPGA 开发使用教程[M]. 第2版. 北京:清华大学出版社,2012:16-17.
- [15] 冯小平,李晨阳. 线性调频信号参数快速估计[J]. 电子信息对抗技术,2004,19(6):7-10.
- [16] 薛文虎,张明敏,唐劲松,等. Chirp 信号参数估计算法性能比较[J]. 海军工程大学学报,2007,19(2):1-5.

The Research and Realized on Adaptive Frequency Domain Notch Filter with the Strong Narrow Band Interference in Radar

LONG Yong-liang, DU Yu-ming, CHEN Guang-tuo

(College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Narrow Band Interference is a common form of jamming in radar system jamming, It will seriously reduce the work quality of the radar, How to suppress narrow band interference is an important subject in the field of radar ECCM. Aimed at the problem of strong narrowband interference suppression for radar, the authors propose a radar ECCM algorithm based on adaptive frequency domain notch. This method uses the adaptive filtering method, detects the interference location, and suppresses the interference by processing the overlap of the interference and the LFM radar signal. In this paper, the principle and process of the method are introduced in detail, The method of generating decision threshold and the method of processing spectral line are mainly discussed, and the simulation and analysis of the method is carried out with Matlab. At last, the algorithm is realized by FPGA. This algorithm can suppress the strong narrow band interference in LFM signal, and has a certain adaptability.

Key words: signal and information processing; radar signal processing; narrow band interference; linear frequency modulation; adaptive filtering; matlab