

# 跳频通信干扰抑制中的改进自适应抵消技术

吴 奇<sup>1</sup>, 谭志良<sup>2</sup>, 周 宇<sup>3</sup>

(1. 63850 部队, 吉林白城, 137001; 2. 陆军工程大学静电与电磁防护研究所, 石家庄, 050003;

3. 国防科技大学电子对抗学院, 合肥, 230037)

**摘要** 与传统阻塞式干扰对短波跳频通信的干扰相比, 以通过侦查截获跳频的频率进行干扰的跟踪干扰方法对跳频的干扰更具有针对性。然而干扰信号的处理时间、干扰机与发射机接收机之间的距离等使得跳频信号与干扰信号存在时延。为解决以上问题, 提出了一种基于二级最小均方(LMS)算法的自适应抵消技术。同时, 在理论分析的基础上重点对所提出的改进的 LMS 算法应用在 FPGA 平台上进行仿真实验。首先, 通过 Simulink 仿真平台模拟有用跳频信号与干扰信号建立自适应算法仿真平台; 其次, 通过 ISE 软件仿真得到原始信号及抵消后的波形; 最后, 通过 Matlab 仿真得到抵消前后信干比数值。仿真实验表明该算法具有良好的抑制效果。

**关键词** 跳频通信; LMS; 跟踪干扰; 自适应抵消

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.04.015

**中图分类号** TN914.41 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)04-0086-07

## Research on Improved Adaptive Cancellation Technology in Frequency Hopping Communication Interference Suppression

WU Qi<sup>1</sup>, TAN Zhiliang<sup>2</sup>, ZHOU Yu<sup>3</sup>

(1. Unit 63850, Baicheng 137001, Jilin, China; 2. Research Institute of Electronic and Electromagnetic Protection, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China; 3. College of Electronic Countermeasure, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

**Abstract:** Aimed at the problems that the frequency hopping signal and the interference signal are delayed due to the processing time of the interfering signal and the distance between the jammer and the transmitter receiver, an adaptive cancellation technique based on algorithm superposition least mean square (LMS) algorithm is proposed. At the same time, on the basis of the theoretical analysis, the proposed improved LMS algorithm is applied to the FPGA platform for simulation experiments. Firstly, the adaptive algorithm simulation platform targeted by the frequency hopping signal and the interference signal is simulated by simulink simulation platform. Secondly, the original signal and the offset waveform are obtained by ISE software. Finally, the signal-to-interference ratio is obtained by Matlab. The simulation results show that the algorithm is good in suppression effect.

**Key words:** Frequency hopping communication; LMS; tracking interference; adaptive cancellation

**收稿日期:** 2017-06-29

**基金项目:** 国家自然科学基金(61372040)

**作者简介:** 吴 奇(1993—), 男, 河北邯郸人, 硕士生, 主要从事电磁防护理论与技术研究. E-mail: 649124645@qq.com

**引用格式:** 吴奇, 谭志良, 周宇. 跳频通信干扰抑制中的改进自适应抵消技术[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(4): 86-92. WU Qi, TAN Zhiliang, ZHOU Yu. Research on Improved Adaptive Cancellation Technology in Frequency Hopping Communication Interference Suppression[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(4): 86-92.

随着现代无线通信技术的发展,通信信道干扰越来越复杂,通信质量受到严重影响。近几年在跳频通信领域,以跟踪干扰为典型的新型灵巧式干扰技术的出现,对跳频通信的抗干扰性能提出了新一轮的严峻的考验。由于跟踪干扰具有一定局限性,可以通过提高跳速来防止跟踪干扰,但是增加跳频却给收发双方的同步又带来了新的技术难题。虽然提高跳速可以有效地抑制跟踪干扰,但是高速跳频通信也会给收发双方的同步带来巨大困难。由于干扰机要接收机达到有效干扰需要一定时间,从而给自适应对消提供了时间与理论上的可行性。

目前许多国内外学者都对自适应滤波(LMS)算法<sup>[1]</sup>及其相关改进进行了相关研究。这些算法在理论分析与仿真试验中都有很好的收敛性和干扰抑制能力。但是由于他们的计算的复杂度相对过高,在实际应用中,由于对硬件的要求较为严苛很难实现数据的高速并行流水线处理。

但是随着硬件水平与 FPGA 技术的发展,以上问题得到了一定的解决。不少学者已经提出了几种有效的 FPGA 设计方案来实现基于 LMS 算法的自适应滤波器的实时应用<sup>[2-3]</sup>。电子科大基于雷达有缘干扰特征及其干扰的作用机理提出了一种针对压制干扰的干扰重构抑制干扰方法<sup>[4]</sup>, Baietal 使用嵌入式乘法器<sup>[5]</sup>在 FPGA 中实现了基于 LMS 的自适应滤波器,这种方法的提出开辟了使用横向滤波器(FIR)结构来实现滤波的新技术路线。一部分学者将此类算法在阻塞干扰上进行了应用,但是本质上并没有拓展其干扰形式范围,文献<sup>[6]</sup>主要研究了跟踪干扰的干扰模型,但是并没有进行更深入的研究,提出针对跟踪干扰防护措施或对消算法。文献<sup>[7]</sup>主要是根据跟踪干扰的原理提出了双曲线抗跟踪干扰方法,通过计算出跟踪干扰的无效区域,通过改变距离、跳速等方法使跟踪干扰能够落在干扰的无效区域内从而达到抗干扰的目的。陈立伟<sup>[8]</sup>等人利用 LMS 自适应对消技术对跳频电台中单音干扰和梳状干扰等定频干扰进行了抑制,有明显的效果。实现了跳频通信的抗干扰能力,但是并没有针对跟踪干扰建立模型并实现对消的效果。文献<sup>[9]</sup>介绍的大部分抗跟踪干扰的方法属于对干扰源的策略,不属于本文研究的重点。

综合以上文献的相关不足,本文基于文献<sup>[5]</sup>提出的二级 LMS 自适应对消算法,采用 8 阶 FIR 滤波器结构,通过实验可以得到信号对消前后信干比提升都在 10 dB 以上,效果较好。

## 1 自适应对消原理

### 1.1 针对定频干扰的自适应对消模型

LMS 对消模型<sup>[11-16]</sup>就是一个自适应的滤波算法模块,图 1 为自适应滤波器的算法框图,图中  $x(n)$  为输入信号,通过权系数可调的数字滤波器后产生输出信号  $y(n)$ ,将输出信号  $y(n)$  与标准信号(又称期望信号)  $d(n)$  进行比较,得到误差信号  $e(n)$ 。 $e(n)$  和  $x(n)$  通过自适应算法对滤波器的权系数进行调整,调整的目的使得误差信号  $e(n)$  最小。重复上面过程,滤波器在自己的工作过程中逐渐了解到输入信号和噪声的统计规律,并以此为根据自动调整滤波器权系数,从而达到最佳的滤波效果。一旦输入的统计规律发生了变化,滤波器能够自动跟踪输入信号变化,自动调整滤波器的权系数,最终达到滤波效果,实现自适应过程。

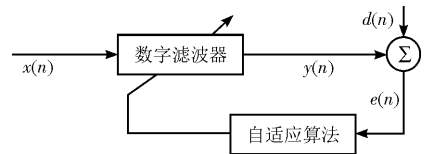


图 1 自适应滤波器的对消框图

Fig. 1 Adaptive filter block diagram

通过自适应滤波器的基本原理,可以获得自适应滤波器的 3 个递推公式。LMS 滤波器的实现步骤可总结如下:

**步骤 1** 初始化权系数  $W(n)$ , 步长  $u$ 。

**步骤 2** 计算滤波器输出信号:

$$y(n) = W(n) \mathbf{X}(n)^T。$$

**步骤 3** 计算误差  $e(n) = d(n) - y(n)$ 。

**步骤 4** 计算  $N+1$  阶的滤波器系数:

$$W(n+1) = W(n) + 2ue(n)\mathbf{X}(n)。$$

**步骤 5** 重复步骤 2~步骤 4。

将上式迭代可以得到:

$$W(n+1) = W(n) + 2u \mathbf{X}(n) [d(n) - W(n) \mathbf{X}(n)^T]$$

由自适应干扰对消原理<sup>[17-20]</sup>可知:自适应干扰对消器消除干扰的效果与基本输入端和参考输入端的信号的相关性有直接关系,相关性越强,消噪效果越好;相关性越弱,消噪效果越差,因此,要根据干扰信号的差异采用不同的处理方式。若干扰信号为正弦等具有固定频率的干扰,因频率固定,其相关性很强将不受时延影响;而对于高斯白噪声及其他随机干扰,其随机性使得相关性受时延影响较大。

### 1.2 针对跟踪干扰的新型自适应对消模型

由上述算法可以对定频干扰得到较好的效果,但是跟踪干扰始终伴随着通信信号存在,根据文献

[8]可知,由于干扰机与跳频通信机和跟踪干扰机之间都存在着一定的距离,所以当通信之后一定时间干扰才存在,通信信号结束或者跳频之后在本频率的干扰信号也就随之消失,因此,想要提取干扰信号问题较大,但是通过分析,跟踪干扰与通信信号在时间域上相关性很强,通过上述方法很难抵消。目前跟踪干扰由于空间和技术等局限性往往会与通信信号产生一定的延时,因此,被干扰的信号中有一定的时间是无跟踪干扰的,可以通过反向思维提取有用信号来看作参考提出两级 LMS 对消原理,见图 2。

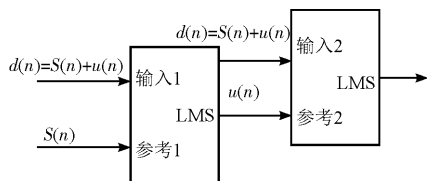


图 2 两级干扰对消原理图

Fig. 2 Two-stage interference cancellation schematic

图中的输入 1 和输入 2 端口全都作为输入端由  $d(n)$  输入,参考 1  $S(n)$  表示干扰信号输入端,而参考 2 表示经一级干扰对消模块处理后的参考信号  $u(n)$ ,经二级干扰对消模块处理后可得到最终输出信号。

利用这一特点设计出基于自适应对消器的两级自适应对消模块,由于算法较为简单适用于应用于硬件电路,算法的主要包括跟踪过程,随着信号特性的变化,通过计算误差来频繁调节误差信号,补偿信道特性失真,由于常见的 LMS 算法提取的参考信号是干扰信号,但是在针对跟踪干扰的情况下没有办法像阻塞干扰一样直接提取出干扰信号,所以需要通过对提取有用一定量的有用信号来作为参考信号,因为误差公式:

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (1)$$

在第 1 级的误差信号中通过误差的  $e(n)$  得到干扰信号,再通过第 2 级的误差公式可以得到最后的有用信号,图 2 中  $d(n)$  表示有用信号加干扰信号, $s(n)$  表示有用信号, $u(n)$  表示干扰信号,首先通过式(1)应用在第 1 级算法中得到式(2):

$$e(n) = d(n) - s(n) = u(n) \quad (2)$$

得到干扰信号后,再通过得到的误差信号,即:干扰信号取进行第 2 级的算法得到  $e'(n)$ :

$$e'(n) = d(n) - u(n) \quad (3)$$

故根据式(2)和式(3)这两级算法的整体结构结合可以得到:

$$e'(n) = d(n) - [d(n) - s(n)] \quad (4)$$

可以通过推导公式发现得到最终两级的误差信号趋近于有用信号。

## 2 实验仿真与结果

### 2.1 跳频通信模块的建立

图 3 为基于 Simulink 建立的实验数据获取模型。有用信号采用频率为 1 kHz、2 kHz、3 kHz、4 kHz、5 kHz、6 kHz、7 kHz、8 kHz、9 kHz 的 Sine Wave 模块生成,采样率为  $1 \times 10^7$  Hz;频率控制模块通过 Multiport Switch 控制生成不同频率的正弦信号来模拟电台的跳频信号;噪声干扰信号采用均值为 0、方差为 1 的 Random Number 模块生成;单音干扰采用频率为 9 kHz 的 Signal Generator 模块产生;梳状干扰采用频率为 9 kHz、10 kHz、15 kHz、16 kHz 的正弦信号组成。虽然频率与实际通信系统信号有所差距,并且干扰信号也没有根据跟踪干扰模型建立,分析原因是受到 PC 机与 FPGA 开发板 USB 通信速率的限制,但是此仿真环境对 LMS 硬件模型的分析依然具有一定价值。

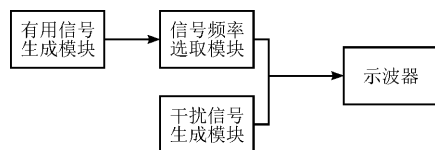


图 3 跳频通信 Simulink 模型

Fig. 3 Simulink model of frequency hopping communication

### 2.2 LMS 滤波算法的 Simulink 模型构建的建立与定频条件下的仿真

通过自适应滤波器的递推公式,在 MATLAB 中构建 Simulink 8 阶仿真模型。首先构建一个单个权值更新模块,利用单个权值更新模块,可以实现任意阶数的 LMS 自适应算法。然后,利用权值更新模块中 Switch 调用相应阶数的权值更新模块,实现横向结构的 LMS 自适应算法。本文构建了一个 8 阶横向 LMS 自适应结构。

根据 LMS 权值更新公式,利用 Xilinx Blockset 中现有的模块对 LMS 自适应算法进行了实现,并在定频条件下进行验证。通过构建的 Simulink 模型,结合 Simulink 自带 LMS 滤波算法模块对同一信号进行仿真处理,获得仿真效果见图 4。参数设置如下:采样时间为 0.000 1 s;信号源为幅值 1 V、频率 1 kHz 的正弦信号;干扰源为均值 0,方差 1 的高斯白噪声;自适应抗干扰算法的阶数为 8 阶,步长为 0.01,仿真结果由上到下依次为理想的正弦信号、被干扰的信号和经过算法模块处理后得到的信号。通过仿真波形可以看出,经过  $0.2 \times 10^{-4}$  s 左右的迭代过程后,干扰信号基本有效滤除,证明所建模块正确性和有效性。

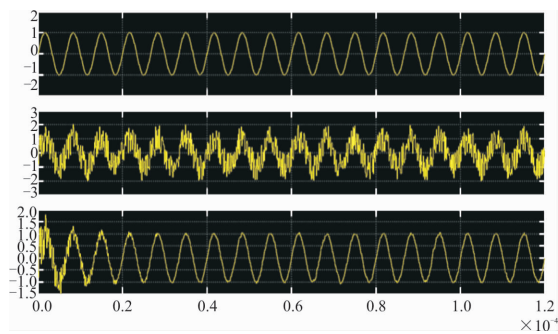


图 4 Simulink 仿真模型与仿真模块滤波效果

Fig. 4 Simulink simulation model and simulation module filtering effect

### 3 仿真与结果

#### 3.1 不同频率下干扰对消效果分析

通过观看上位机对 USB 数传回来的数据观看,可以得到如图所示的波形图,在前  $100 \mu\text{s}$  的时间内信号没有被干扰到,当刚刚被干扰之后滤波系统的抵消效果不明显,2 个自适应滤波算法权值的迭代更新,其滤波效果得到提升,将数据保存下来通过 Matlab 运行可以得到在各个频率下的信干比数值。基于设计出的 FPGA 硬件实验平台,当有用信号分别为 1 kHz、2 kHz、3 kHz、4 kHz、5 kHz、6 kHz、7 kHz、8 kHz、9 kHz 时,干扰信号分别为噪声干扰(SIR=0 dB)、梳状干扰(干扰幅值为 0.5 V, SIR=-6.021 2 dB)、单音干扰(干扰幅值为 0.5 V, SIR=-5.978 9 dB)情况下 LMS 干扰对消模块的干扰抑制效果。表 1 为干扰对消后不同干扰提升的信干比数值。图 5 为干扰对消前后通过测试系统的图。

表 1 不同频率信号干扰对消后 SIR 提高数值

Tab. 1 Different frequency signal interference cancellation after SIR increase the value

频率/ kHz	噪声干扰消 信干比提高/dB	单音干扰对消 信干比提高/dB	梳状干扰对消 信干比提高/dB
1	12.542 4	11.945 5	11.482 9
2	12.286 7	13.090 3	12.732 5
3	11.734 4	13.547 8	10.704 7
4	12.049 7	13.526 1	12.720 7
5	12.304 2	13.327 8	10.840 0
6	11.945 6	13.491 0	11.838 4
7	12.087 6	13.309 7	11.571 7
8	13.079 0	13.418 5	12.113 2
9	13.343 7	13.480 2	10.165 3

通过表 1 数据与图 6 曲线可以得到:①在 1~9 kHz 频率范围内,本文基于 FPGA 构建的 LMS 干扰对消模块都能够有效抑制 3 种干扰;②当干扰信号相同而有用信号频率不同时,信干比提高数值在一定数

值范围内上下浮动,与有用信号频率关系不大;③分析同一频点、不同干扰信号的对消效果,对单音干扰抑制效果略优于梳状干扰与噪声干扰情况。

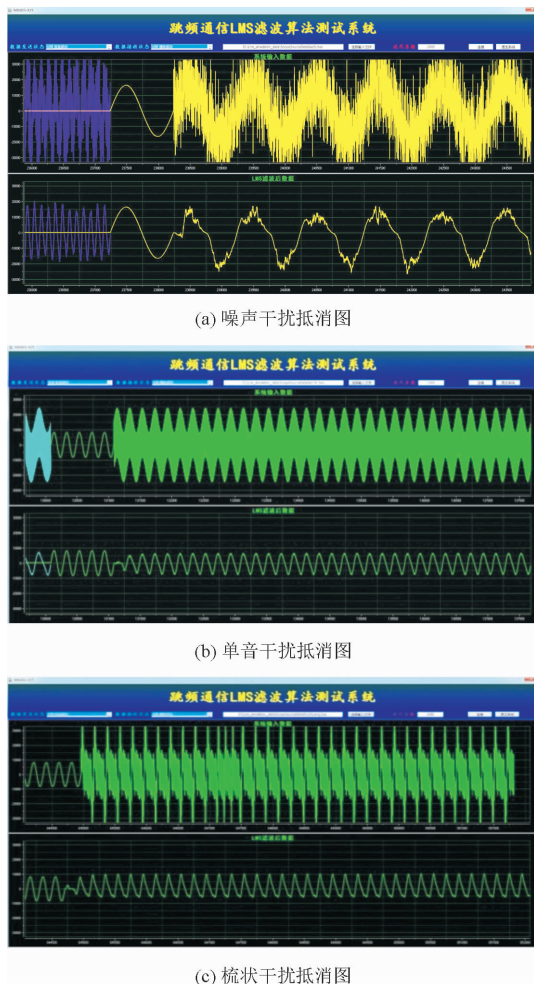


图 5 自适应干扰抵消效果图

Fig. 5 The Figure of Adaptive interference cancellation effect

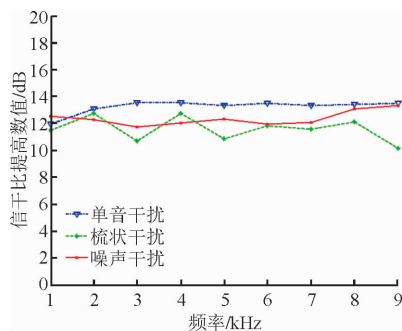


图 6 不同频率信号对消后 SIR 提高数值曲线

Fig. 6 Increases the numerical curve of the SIR with different frequency signals

#### 3.2 不同信干比条件下对消效果分析

##### 3.2.1 噪声干扰对消结果

设置有用信号为 3 kHz 的正弦信号,图 7 中横坐标表示对消前的信干比数值,不同强度噪声干扰下 FPGA 模块处理效果通过表 2 数据与图 7 曲线可以

得到:①对消前信干比数值越大,得到信号的信干比数值越大。在  $SIR = -9.3900$  dB时,噪声干扰对消后信干比只能达到  $4.7375$  dB;而当  $SIR = 1.7482$  dB时,噪声干扰对消后信干比能够达到  $12.6825$  dB。②对消前信干比数值越大,干扰对消模块抑制效果越不明显。当  $SIR = -9.3900$  dB时,噪声干扰对消后可以提高  $14.1275$  dB;而当  $SIR = 1.7482$  dB时,噪声干扰对消后信干比只能提高  $10.9343$  dB。综上,当参考信号与输入信号严格同步时,干扰对消模块能够有效抑制噪声干扰,在信干比在  $-9.390 \sim 1.7482$  dB取值时,对消后信号质量与干扰信号强度成反比,干扰抑制效果与干扰信号强度成正比。

表2 不同强度噪声干扰对消前后信干比数值

Tab.2 Different intensity of noise interference before and after the letter-to-dry ratio values dB

对消前信干比	对消后信干比	信干比提高
-9.390 0	4.737 5	14.127 5
-7.870 9	6.096 8	13.967 7
-6.907 6	6.740 1	13.647 7
-5.292 3	8.267 0	13.559 3
-3.914 2	9.314 7	13.228 9
-2.705 8	10.242 7	12.948 5
-1.626 9	10.933 7	12.560 6
-0.593 2	11.141 2	11.734 4
-0.375 2	12.020 9	11.645 7
1.748 2	12.682 5	10.934 3

### 3.2.2 单音干扰对消结果

干扰信号为不同强度单音干扰时,FPGA 模块处理效果通过表3数据与图8曲线可以得到:①当信干比在  $-10.0846 \sim 1.9367$  dB取值时,单音干扰强度对干扰对消后得到信号的信干比数值影响不大,对消后信干比数值基本在  $5 \sim 9$  dB浮动;②单音干扰强度越强,干扰对消效果越明显。当增大单音干扰强度使信干比达到  $-10.0846$  dB时,对消后信干比能够提高  $18.8714$  dB;当降低单音干扰强度使信干比达到  $1.9367$  dB时,信干比只能提高  $5.7236$  dB。综上,干扰对消模块能够有效抑制单音干扰,且对消后信号质量与干扰强度关系不大,干扰抑制效果与信号强度成正比。

表3 不同强度单音干扰对消前后信干比数值

Tab.3 Different intensity of single-tone interference before and after the letter-to-interference ratio values dB

对消前信干比	对消后信干比	信干比提高
1.936 7	7.660 3	5.723 6
0.931 3	7.847 9	6.916 6
-1.584 3	8.505 9	10.090 2
-3.624 5	7.245 3	10.869 8
-4.083 0	6.534 0	10.617 0
-5.193 6	6.447 2	11.640 8
-6.021 3	5.196 2	11.217 5
-7.604 8	7.269 2	14.874 0
-8.943 7	7.077 7	16.021 4
-10.084 6	8.786 8	18.871 4

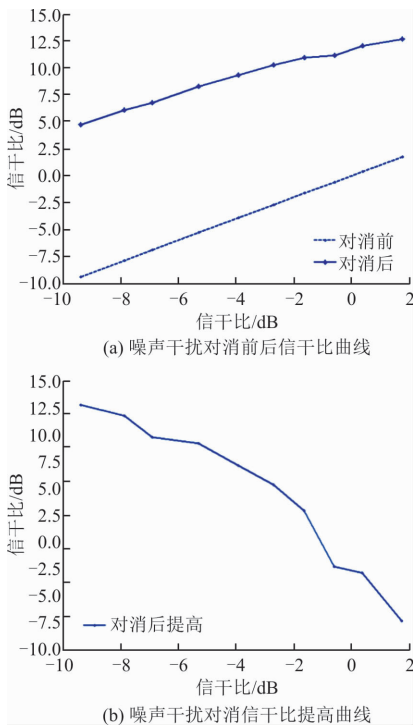


图7 不同强度噪声干扰对消效果曲线

Fig.7 Different intensity noise interference cancellation effect curve

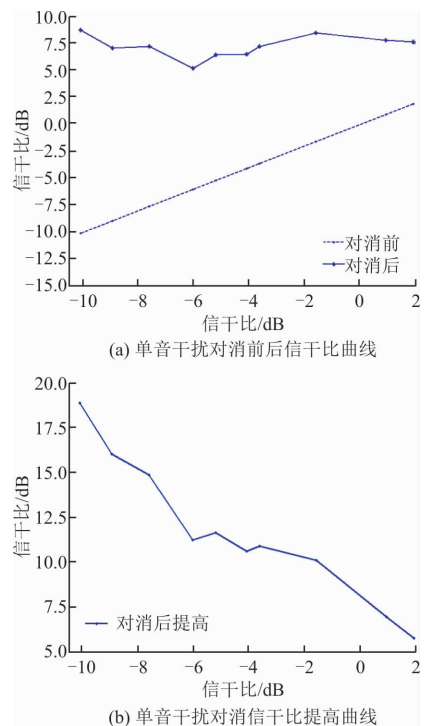


图8 不同强度单音干扰对消效果曲线

Fig.8 Different intensity of single tone interference cancellation effect curve

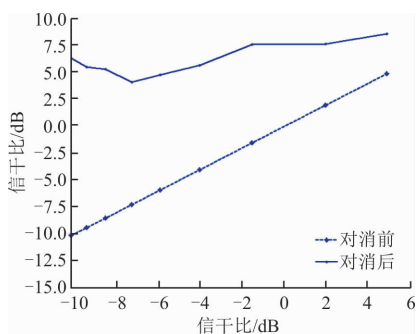
### 3.2.3 梳状干扰对消结果

干扰信号为不同强度的梳状干扰时,FPGA 模块处理效果通过表 4 数据与图 9 曲线得到:①信干比在  $-10.2399 \sim 4.8726$  dB 取值时,随着梳状干扰对消前信干比数值的增大,干扰对消后信号的信干比数值在一定范围内浮动;②梳状干扰强度越强,干扰对消效果越明显。增大梳状干扰强度使信干比达到  $-10.2399$  dB 时,信干比能够提高  $16.5457$  dB;减小梳状干扰强度使信干比为  $4.8726$  dB 时,信干比只能提高  $3.6759$  dB。综上,干扰对消模块能够有效抑制梳状干扰,信干比在  $-10.2399 \sim 4.8726$  dB 取值时,干扰对消后信号质量与干扰信号强度关系不大,干扰抑制效果与干扰信号强度成正比。

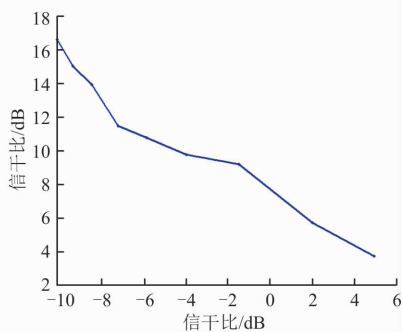
表 4 不同强度梳状干扰对消前后信干比数值

Tab. 4 Different strength comb interference interference before and after the letter to dry ratio values dB

对消前信干比	对消后信干比	信干比提高
4.872 6	8.548 5	3.675 9
1.933 7	7.609 2	5.675 5
-1.585 1	7.576 8	9.161 9
-5.982 4	4.722 3	10.704 7
-4.084 5	5.622 9	9.707 4
-7.352 6	4.086 1	11.438 7
-8.589 9	5.281 9	13.871 8
-9.507 8	5.449 8	14.957 6
-10.239 9	6.305 8	16.545 7



(a) 梳状干扰对消前后信干比曲线



(b) 梳状干扰对消信干比提高曲线

图 9 不同强度梳状干扰对消前后信干比曲线

Fig. 9 Different strength comb interference interference before and after the letter to do the ratio curve

## 4 结语

本文基于 FPGA 定点实现的自适应滤波算法进行研究,提出针对跟踪干扰的二级 LMS 改进自适应对消模块方案,解决了跟踪干扰信号难以提取并对消的问题,通过 Simulink 建模产生信号到算法模块对自适应滤波算法的性能进行测试,得到良好的滤波测试效果,将算法的应用范围拓宽到了跟踪干扰的处理上,为该方法嵌入跳频无线数传电台提供理论支持。

### 参考文献(References):

[1] HAYKIN S. Adaptive Filter Theory, 3rd ed., Upper Saddle River, New Jersey[M]. Prentice Hall, 1996.

[2] MEHER P K, PARK S Y. Critical-Path Analysis and Low-Complexity Implementation of the LMS Adaptive Algorithm[J]. IEEE Transaction on Circuit and Systems-I: Regular Papers, 1996, 61(3):778-788.

[3] MOHANTY B K, MEHER P K. A High-Performance Energy-Efficient Architecture for FIR Adaptive Filter Based on New Distributed Arithmetic Formulation of Block LMS Algorithm[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(4):921-932.

[4] 杜东平. 雷达压制式干扰抑制算法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2009.

[5] DU D P. Radar Suppression Interference Suppression Algorithm [D]. Chengdu: Electronic Science and Technology University, 2009. (in Chinese)

[6] BAI Y B, CHEN Z L, HOU R B, et al. FPGA Implementation of A Channel Equalizer based on LMS Algorithm[C]// 2010 First International Conference on Pervasive Computing, Signal Processing and Applications. Harbin, China: IEEE, 2010:1149-1152.

[7] 陈刚, 黎福海. 变速跳频通信抗干扰性能研究[J]. 火力指挥与控制, 2016, 41(7):107-109.

[8] CHEN G, LI F H. Research on Anti-Follower Jamming Performance of Variable Rate Frequency Hopping Communication [J]. Fire Command and Control, 2016, (41)7:107-109. (in Chinese)

[9] 方超, 郝威. 双曲线法抗跟踪干扰研究[J]. 海军工程大学学报, 2012, 24(1):105-108.

[10] FANG C, HAO W. Hyperbola Method for Anti-Following-Jamming[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2012, 24(1):105-108. (in Chinese)

[11] 陈立伟. 基于短波跳频电台的抗干扰算法的实现[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(11): 3721-3723.

[12] CHEN L W. Implementation of Anti-jamming Algorithm Based on Shortwave Frequency Hopping Radio [J]. Computer Measurement and Control, 2015, 23 (11):3721-3723. (in Chinese)

- [9] 那丹彤. 跳频通信干扰与抗干扰技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.  
NA D T. Technology of Frequency-Hopping Communication Jamming and Anti-Jamming [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [10] 齐海兵. 自适应滤波器算法设计及其 FPGA 实现的研究与应用[D]. 长沙: 中南大学, 2006.  
QI H B. Design and Application of Adaptive Filter Algorithm and Its FPGA Implementation[D]. Changsha: Central South University, 2006. (in Chinese)
- [11] AZUBOGU A C O, NWALOZIE G C, IDIGO V E, et al. Simulation Evaluation of Least Mean Square (LMS) Adaptive Beamforming Algorithm for Smart Antennas[J]. The IUP Journal of Telecommunications, 2012, IV(1): 27-39.
- [12] JEONG T T, KOO K, CHOI G T, et al. A Variable Step Size for Normalized Subband Adaptive Filters [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2012, 19(12): 906-909.
- [13] HUANG H, LEE T. A New Variable Step-Size NLMS Algorithm and Its Performance Analysis [J]. IEEE Transactions Signal Process, 2012, 60(4): 2055-2060.
- [14] QIN J F. A Novel Variable Step Size LMS Adaptive Filtering Algorithm Based on Sigmoid Function [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 1997, 12(3): 171-174.
- [15] YANG Y, CAO X Y, YANG Q, et al. New Variable Step-Size LMS Algorithm Based on Exponential Function [J]. Computer Engineering, 2011, 38(10): 134-136.
- [16] MAYYAS K, MOMANI F. An LMS Adaptive Algorithm with a New Step-Size Control Equation [J]. Journal of the Franklin Institute, 2011, 348(4): 589-605.
- [17] YI Y, WOODS R, TING L K, et al. High Speed FPGA-Based Implementations of Delayed-LMS Filters [J]. Journal of VLSI Signal Processing Systems for Signal, Image and Video Technology, 2005(1): 113-131.
- [18] TING L K, WOODS R, COWAN C F N. Virtex FPGA Implementation of a Pipelined Adaptive LMS Predictor for Electronic Support Measures Receivers [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems, 2005, 13(1): 86-95.
- [19] MAHFUZ E, WANG C, AHMAD M O, A High-Throughput DLMS Adaptive Algorithm [C]//IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Kobe, Japan: IEEE, 2005: 3753-3756.
- [20] OBA H, KIM M, ARAI H. FPGA Implementation of LMS and N-LMS Processor for Adaptive Array Applications [C]//2006 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications. Tottori, Japan: IEEE, 2006: 485-488.

(编辑: 徐楠楠)

## (上接第 58 页)

- [14] ZHAO Z C, WANG X S, XIAO S P. Cooperative Deception Jamming Against Radar Network Using a Team of UAVs [C]// Radar Conference, 2009 IET International. Guilin: IET, 2009: 1-4.
- [15] TAHMOUSH D. Securing Radars Using Secure Wireless Sensor Networking [C]// SPIE Defense + Security. Amsterdam: SPIE, 2014: 90970B.
- [16] CHAN H, PERRIG A, SONG D. Random Key Pre-distribution Schemes for Sensor Networks [C]// Proceedings 2003 Symposium on Security and Privacy. IEEE, 2003: 197-213.
- [17] 赵永刚. 基于雷达/红外数据融合跟踪系统简述 [J]. 电脑与信息技术, 2017, 25(2): 20-22.  
ZHAO Y G. Research on Tracking System Based on Radar/Infrared Data Fusion [J]. Computer & Information Technology, 2017, 25(2): 20-22. (in Chinese)
- [18] 李翠芸, 王精毅, 姬红兵. 模型参数未知时的 CPHD 多目标跟踪方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2017, 44(2): 37-41.  
LI C Y, WANG J Y, JI H B. CPHD Multi-Target Tracking Algorithm with Unknown Model Parameters [J]. Journal of Xidian University, 2017, 44(2): 37-41. (in Chinese)
- [19] 马丽丽, 陈金广, 胡西民, 等. 目标跟踪性能的评价准则 [J]. 西安工程大学学报, 2013, 27(3): 364-368.  
MA L L, CHEN J G, HU X M, et al. Evaluation Metrics for Filtering Performance in Target Tracking System [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2013, 27(3): 364-368. (in Chinese)
- [20] MO Y, SINOPOLI B. Secure Control Against Replay Attacks [C]// Allerton Conference on Communication, Control, and Computing. Illinois: IEEE, 2009: 911-918.
- [21] ZHANG H, CHENG P, SHI L, et al. Optimal DoS Attack Policy Against Remote State Estimation [C]// Decision and Control. Firenze: IEEE, 2013: 5444-5449.
- [22] GUO H D, ZHANG X H. Distributed Fusion of Multi-sensory Data Based on Probabilistic Data Fusion [J]. Control and Decision, 2004, 19(12): 1359-1363.
- [23] HE Y, XIU J J, GUAN X. Radar Data Processing with Applications [M]. New York: John Wiley & Sons, 2016.

(编辑: 徐楠楠)