

# BLMS 算法在 GNSS 天线抗干扰中的应用

刘海波, 吴德伟, 卢艳娥, 严玉国, 庞春雷  
(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

**摘要:**首先,简要介绍了国内外卫星导航抗干扰研究现状,结合 BLMS(Block Least Mean Square)算法在 GNSS 抗干扰方面的应用,给出了其硬件实现的方框图和信号流程图,并对实现中存在的问题进行了分析;其次给出了一种实验室条件下模拟干扰环境,进行抗干扰算法研究的方法,即用信号发生器模拟干扰源和卫星信号,使其通过由功分器和合路器搭建的模拟阵列信号单元模拟干扰环境;最后,用单频干扰和扫频宽带干扰测试算法的抗干扰性能,并用 Matlab 编写的基带处理程序对算法的输出进行码相关,测量输出信号信干噪比(SINR)变化,以检验其有效性。数据表明,该算法具有良好的抑制干扰能力,为 GNSS 抗干扰研究提供了参考。

**关键词:**GNSS; 干扰环境模拟; 抗干扰; BLMS; 有效性验证

**DOI:**10.3969/j.issn.1009-3516.2009.06.014

**中图分类号:** TN973 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)06-0060-05

以 GPS 为代表的全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)在现代战争中起着非常重要的作用,但由于其信号功率较小,且频率公开,很容易受到干扰而无法工作。为保证卫星定位在复杂电磁环境下应用,抗干扰成为卫星导航领域研究的热点,是 GNSS 应用的关键技术之一。

GNSS 干扰可以分为压制式干扰和欺骗式干扰<sup>[1]</sup>。抗干扰技术研究在国外已经取得较为丰富的成果。由于国内研究起步晚,相对落后,从公开发表的论文来看,北京航空航天大学做过抗干扰天线及其算法研究<sup>[2]</sup>,武汉大学做过自适应抗干扰算法的研究<sup>[3]</sup>,国防科大主要研究了空时联合处理<sup>[4]</sup>。大部分文章是对 GNSS 抗干扰算法的理论和算法仿真研究,系统地介绍基于实验室的干扰环境模拟、算法实现以及有效性验证的文章较少。

## 1 BLMS 自适应滤波算法权值计算

LMS 算法结构简单,可在线计算,适用于扩频信号信干比较低的情况<sup>[5]</sup>。当干扰信号特性不稳定或信干比较高时,瞬时梯度计算存在一定的盲目性,不能准确反映真正的梯度方向,有时甚至相反,因此收敛速度较慢,且该算法对自相关矩阵的条件数的变化敏感<sup>[6]</sup>。

分块最小均方算法(Block Least Mean Square, BLMS)是 Gregory A. Clark 提出的一种改进算法,即使用梯度的平均来代替期望值。与 LMS 算法相比, BLMS 算法除同样具有实现结构简单、可在线计算等特点外,收敛到最佳的迭代次数明显减少,且收敛的稳定性好,其梯度计算式为:

$$\nabla_{nL+l} \approx - \left[ \frac{l}{L} \right] \frac{2}{L} \sum_{i=1}^L e_{nL+l}^* \mathbf{X}_{nL+i} \quad (1)$$

式中:  $[\cdot]$  表示取整;  $L$  为累计长度,  $1 \leq l \leq L$ 。

\* 收稿日期: 2009-04-27

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(SJ08F06)

作者简介: 刘海波(1985-), 男, 江苏连云港人, 硕士生, 主要从事卫星导航接收端抗干扰技术研究;

E-mail: liuhaibo20061985@126.com

吴德伟(19-), 男, 吉林省吉林市人, 教授, 博士生导师, 主要从事无线电导航系统理论及应用研究。

设天线阵为  $M$  元阵,将输入阵列信号  $\mathbf{x}_0$  延时  $i\Delta(1 \leq i \leq P)$ ,得到  $\mathbf{X}_n = [x_1(n), x_2(n), \dots, x_M(n)]$ ;设参考信号为  $d$ ,则 BLMS 算法的递推公式:

$$\begin{aligned} e_n &= d_n - \mathbf{W}_n^H \mathbf{X}_n = d_n - \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{p=0}^{P-1} \mathbf{w}_{mp}^*(n) x_{mp}(n) \\ \mathbf{W}_{nL+l+1} &= \mathbf{W}_{nL+l} - \left[ \frac{l}{L} \right] \frac{2\mu}{L} \sum_{l=1}^L e_{nL+l}^* \mathbf{X}_{nL+l} \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{w}_{mp}^*$  为加权向量;  $\mathbf{X}_{mp}$  为第  $m$  个阵元经过  $p$  个延时的输出。

## 2 BLMS 算法的设计与实现

### 2.1 算法总体框图设计

为了将信号采样速率保持在较高水平,同时兼顾 FPGA 芯片处理压力,减少其功耗,可采取以下几点措施:①对输入信号进行带通采样,并进行滤波抽取。在芯片处理能力范围内,尽量减小抽取的倍数。②采样频率和信号中频的关系应满足  $f_0 = 3f_s/4$ 。这样,经正交变换后的 I、Q 信号的频谱相对于零频对称,最大程度上降低了信号在频谱上所处位置,增加了信号最高频率成分的单个周期内算法处理点数,有利于提高算法抑制干扰的能力。③在硬件功能模块参数设置中,将乘法器设定为输入寄存和输出非寄存型,而部分加法器设定为输入输出非寄存型。这样,内部最高时钟为 2.5 倍频即可实现 BLMS 算法的在线计算,增强了算法实现的稳健性。

算法实现要以 GPS 信号作为实验的输入信号。设进入 A/D 的信号中频为  $f_0$ ,采样时钟为  $f_s$ ;对 A/D 采样的中频信号进行 I/Q 变换,I/Q 变换本振为  $f_s/4$ ,使信号严格正交,以减小正交变换不一致性给信号带来的影响;I/Q 变换后,FIR 低通滤波器将接近零频的信号以外的其它镜像滤除,然后将信号一路送至自适应算法进行权值计算,另一路进行加权输出。

在信号恢复部分,采用内插和逆 I/Q 变换后再进行总体滤波的方式,不会造成频谱混叠。信号做内插处理时,一般选择插 0,在程序上也较易实现<sup>[7]</sup>。为避免反 I/Q 变换相乘结果全零,选择  $\{1, -1, -1, 1\}$  和  $\{1, 1, -1, -1\}$  作为 I、Q 两路相乘序列。

采用上述方法和措施进行设计实现,只需  $2M$  个低通滤波器和一个带通滤波器,有效节省了硬件资源。

### 2.2 权值计算的信号流程设计

GPS 信号为负信噪比信号,以中央天线阵元为参考信号采用功率倒置(PI)算法是解决参考信号问题的有效途径<sup>[2]</sup>。将式(2)进行分解,得到 BLMS 算法实现的迭代公式:

$$\begin{cases} \mathbf{W}_0 = [0, 0, \dots, 0], n = 0, 1, \dots \\ y_n = \mathbf{W}_n^* \mathbf{X}_n \cdots \cdots D_1 \\ e_n = d_n - y_n \cdots \cdots D_2 \\ \mu \nabla_n = -2\mu e_n^* \mathbf{X}_n \cdots \cdots D_3 \\ \mathbf{W}_{n+1} = \mathbf{W}_n + \left[ \frac{l}{L} \right] \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mu \nabla_n \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{W}_0$  为加权矢量的初值;  $n$  为采样时间点;  $\mathbf{X}_n$  为第  $n$  时刻信号矢量。在 FPGA 程序中,由于信号处理时延,需要对数据进行延时补偿。式(3)中,  $D_i$  为经实验测得第  $i$  步计算所需的时钟数,则经时延补偿后  $e_n$ 、 $\mu \nabla_n$  可表示为:

$$\begin{cases} e_n = d_{(n+D_1)} - y_n \\ \mu \nabla_n = -2\mu e_n^* X_{(n+D_1+D_2)} \end{cases} \quad (4)$$

按照补偿后的递推式设计 FPGA 程序,其信号流程如图 1 所示,将天线阵列信号进行  $P$  个移位寄存延时,得到  $MP \times 1$  的输入信号向量,做空时联合处理。累计长度平均系数  $1/L$  和  $\mu$  的取值放在一起,采用截取末尾的方式获得。图 1 中,  $D_1$ 、 $D_2$  为式(4)中的补偿时钟数。

在式(4)迭代过程中,权值的在线更新需要多个时钟信号。采用移位寄存和时钟计数相结合,通过判断移位寄存器组和计数器的状态关系以确知不同频率时钟信号的相位关系,这样能够避免使用门控时钟,增强

了程序的稳健性。

### 3 干扰环境构建及算法有效性验证

选用 Xilinx 公司的 XC4VLX60 开发板作为开发平台,板上共有 4 路 A/D,量化位数为 14 bits。选用安捷伦 E4438C 和 IFR2032 模拟 GPS 信号源和干扰源,使用分路器将每个信号分成 4 路,然后将不同源信号两两合路,送入射频模块。由于信号源和干扰源的通道独立,信号和干扰的相移并不相同,可以认为来自不同的方向。在射频模块上加自动增益控制(Automatic Magnitude Control, AGC),将输入信号的功率稳定在某一范围内,有利于减小  $\mu$  取值上限的浮动范围。

经测量,实验室条件下噪底约为  $-110$  dBm, E4438C 和 IFR2032 信号经功分器、合路器到达射频模块的衰减分别为  $-21$  dB、 $-18$  dB。

普通信号发生器的脉冲信号最小周期为  $8 \mu\text{s}$ ,是窄带信号,不宜作为测试算法跟踪性能的干扰类型。可以采用扫频干扰来测试算法抑制干扰的能力。下面分别设定干扰源为单频干扰和扫频干扰,观察其干扰抑制情况。

#### 3.1 单频干扰抑制

设置信号源卫星号 ID = 3,功率为  $-95$  dBm;设置干扰源为单频输入,功率为  $-50$  dBm。用 Chipscope 采集信号数据,放入 Originpro 中绘出波形。图 2 为  $L = 16, \mu = 1/2^{17}$  时算法的收敛波形图。从图中明显可以看出,复位以后,经过  $2.1 \mu\text{s}$  算法收敛到最佳。

将原信号和处理后的信号分别做 16 384 点的 FFT 变换,观察其功率谱。如图 3 所示,左侧原信号功率谱中,干扰功率谱密度相对于噪底高出 52 dB,即不考虑 A/D 量化损失, C/A 信号输入干扰功率比 ( $JNR_{in}$ ) 为 26 dB;右侧为处理后的信号功率谱,干扰被明显抑制,并在原信号频谱图干扰主峰位置形成了一个椭圆的凹槽,抑制深度略大于 52 dB。

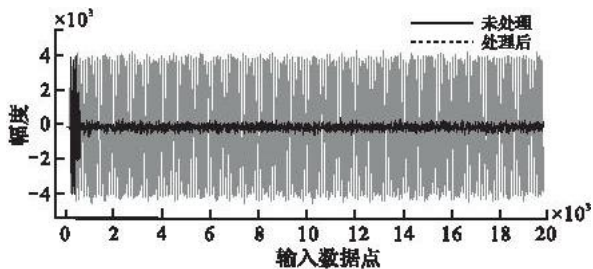


图 2 单频干扰抑制时域图

Fig. 2 Monochromatic jammer depressing temporal graph

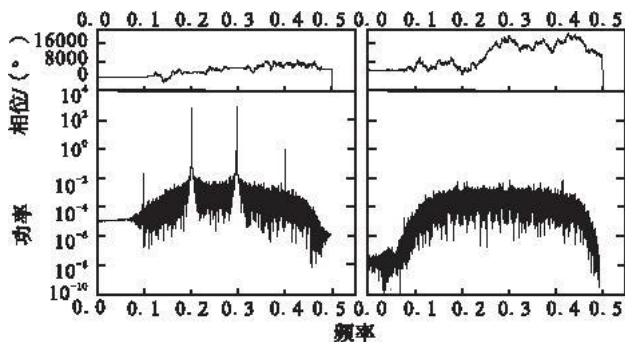


图 3 单频干扰抑制功率谱图

Fig. 3 Monochromatic jammer depressing power spectrogram

由两信号源的输入功率及其信道衰减参数可得到 C/A 信号带宽内干扰功率比为  $18 \text{ dB}^{[8]}$ ,而从图 3 可得到  $JNR_{in}$  约为 26 dB,这是由于 AGC 自动调整对输入信号功率,致使在 A/D 量化时,噪声与强干扰相比其量化损失更大。干扰主峰左侧 0.096 处的单频干扰为射频模块所致,也得到了很好的抑制,这里不作讨论。

将信号放入 Matlab 编写的 C/A 码捕获程序观察信号的码捕获情况<sup>[9-10]</sup>,相关长度为 1 ms。图 4(a)为没有干扰情况下信号的捕获情况,输出信噪比  $SJNR_{out}$  约为 18 dB;图 4(b)和图 4(c)分别为单频干扰输入情况下原信号和处理后信号的相关情况,很明显,由于单频干扰存在,未经算法处理的信号不能找到相关峰,  $SJNR_{out}$  为负值,而处理后的信号的相关峰比较明显,其解扩后  $SJNR_{out}$  约为 13 dB。由图 4(a)、图 4(c)可知,与未加干扰情况相比,信噪比损失约 5 dB。

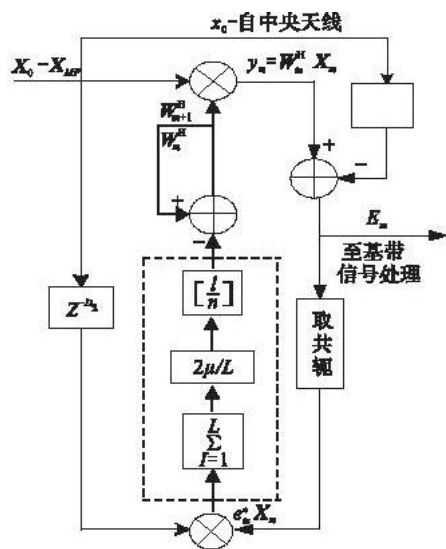


图 1 BLMS 算法的 FPGA 实现信号流程图

Fig. 1 Signal flow chart of BLMS in FPGA

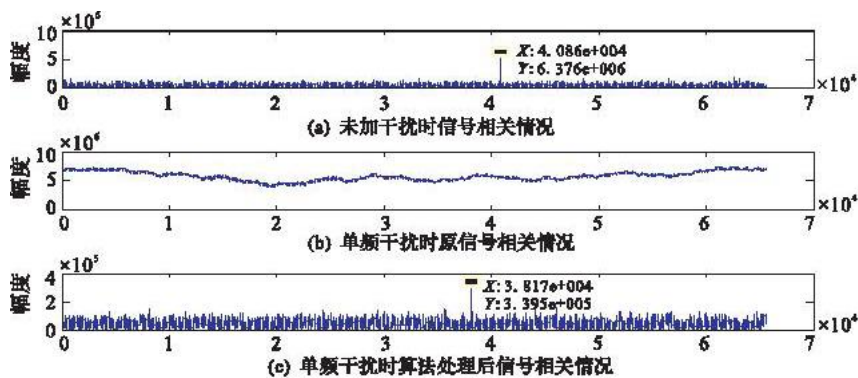


图 4 单频干扰时算法处理前后 C/A 码相关峰比较

Fig. 4 The correlation apex of the C/A code comparison between processed and unprocessed signals under monochromatic jammer

### 3.2 扫频干扰抑制

设置干扰源扫频宽度 10 MHz,扫频速率 10 kHz,其它参数不变;E4438C 参数如前所述。利用 Chipscope 采集得到在  $L = 8, \mu = 1/2^{16}$  时的信号数据,绘出波形如图 5 所示。经过 2.3  $\mu\text{s}$  算法收敛到最佳。

图 5 中的幅度调制是由射频功分器衰减特性以及滤波器的滚降特性引起的。在  $\pm 10 \text{ MHz}$  范围内,其衰减幅度呈线性增加了 2.6 dB。可采用变  $\mu$  的归一化 BLMS 算法来改善其抑制调幅类干扰的性能<sup>[11]</sup>。

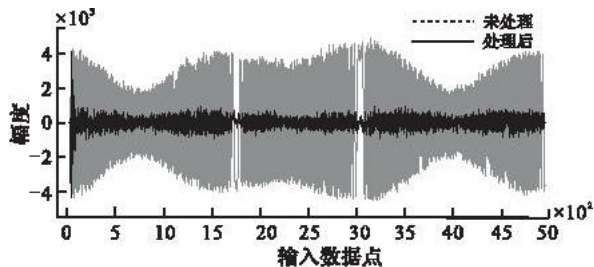


图 5 扫频干扰抑制时域图

Fig. 5 Swept jammer depressing temporal graph

对比图 6 算法处理前后信号功率谱可知,不考虑 A/D 量化损失情况下 C/A 信号带宽内噪声比大于 23 dB,干扰平均抑制深度为 23 dB。算法处理后,信号功率谱趋于平滑。

图 7(a)、图 7(b)分别为扫频干扰下算法处理前后信号相关情况。可以看出,算法处理前输出没有相关峰,而处理后信号相关峰明显,  $\text{SJNR}_{\text{out}}$  约为 12 dB。与没有干扰情况相比,信噪比损失约 6 dB。

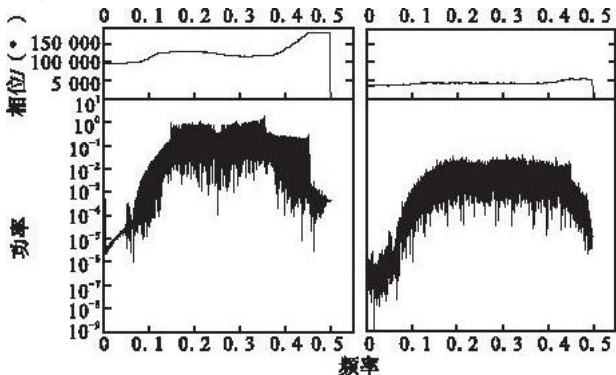


图 6 扫频干扰抑制功率谱图

Fig. 6 Swept jammer depressing power spectrum

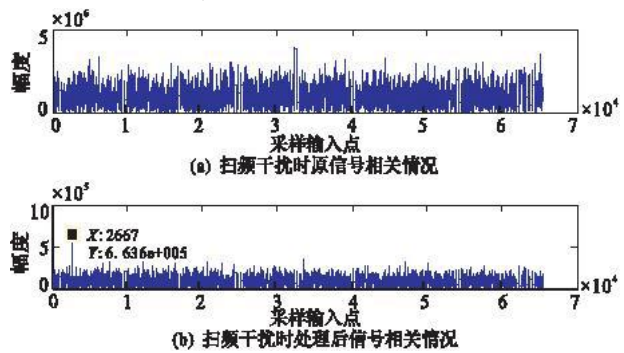


图 7 扫频干扰时算法处理前后 C/A 码相关峰比较

Fig. 7 The correlation apex comparison between processed and unprocessed signals under swept jammer

随着扫频速率的增大,输出信干噪比不断降低。当扫频速率提高到 200 kHz 时,算法无法对于干扰信号进行抑制,输出发散。

## 4 结束语

本文基于 XC4VLX60 开发板实现了 BLMS 算法,详细介绍了如何在实验室条件下模拟干扰环境,开展抗干扰算法研究,给出了算法流程图以及验证抗干扰算法有效性的方法,并对算法有效性进行了验证,分析了 BLMS 算法抗干扰性能。结果表明累计个数  $L$  和收敛系数  $\mu$  的取值对 BLMS 算法的性能有很大影响,对不同干扰, $L$  和  $\mu$  的最佳取值不同,并且满足一定规律。而 BLMS 算法的一些变形有利于提高其抑制干扰的能

力。这类问题将在后续文章中进行深入分析。

### 参考文献:

- [ 1 ] Sameet Mangesh Deshpande. Study of Interference Effects on GPS Signal Acquisition[D]. Alberta:University of Calgary, 2004.
- [ 2 ] Mohamed E Ahmed,王永芳. 用于 GPS 接收机的自适应算法抗干扰性能比较[J]. 北京航空航天大学学报, 2006,32(5): 561-565.  
Ahmed M E, WANG Yongfang. Comparison between Adaptive Algorithms Using in GPS Receiver[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006,32(5):561-565. (in Chinese)
- [ 3 ] 尚建平. GPS 抗干扰技术研究[D]. 武汉:武汉大学, 2004:3-5.  
SHANG Jianping. Anti-Jamming Technique Research for GPS[D]. Wuhan:Wuhan University, 2004:3-5. (in Chinese)
- [ 4 ] 狄旻珉. GPS 抗干扰技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2006:11-14.  
DI Minmin. Research on GPS Anti-jamming Technologies[D]. Changsha:National University of Defence Technology,2006:11-14. (in Chinese)
- [ 5 ] 苟彦新. 无线电抗干扰通信原理及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2005:169-172.  
GOU Yanxin. Radio Antijamming Communications Fundamentals and Applications[M]. Xi'an:Xidian University Press,2005:169-172. (in Chinese)
- [ 6 ] 卢艳娥.“北斗一号”用户接收机自适应抗干扰天线半物理仿真系统(关键技术研究、系统设计与研制)[D]. 北京:北京航空航天大学,2004:19-24.  
LU Yane. The Simulation System Integrating with Core Hardware for 'BD-I' Receiver Adaptive Anti-jamming Antenna (Research on Key Technique, System Design and Development)[D]. Beijing:Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004:19-24. (in Chinese)
- [ 7 ] 杨小牛, 楼才义. 软件无线电原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2000:21-26.  
YANG Xiaoni, LOU Caiyi. Software Radio Theory and Its Application[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2000: 21-26. (in Chinese)
- [ 8 ] Hwang Sukseung. Adaptive Algorithms for A GPS Interference Suppression Receiver and A Sparse Reconfigurable Adaptive Filter[D]. Santa Barbara:University of California,2006.
- [ 9 ] JAMES BAO-YEN TSUI. Fundamentals of Global Positioning System Receivers A Software Approach (Second Edition)[M]. New York:John Wiley & Sons, Inc,2005.
- [ 10 ] ICD-GPS-200C NAVSTAR GPS User Interface[R]. ARINC Research Corporation,REV-PR-002,1993.
- [ 11 ] 张贤达,保铮. 通信信号处理[M]. 北京:国防工业出版社,2001.  
ZHANG Xianda, BAO Zheng. Communication Signal Processing[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2001. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

## BLMS Algorithm Application in GNSS Anti-jamming Antenna Array

LIU Hai-bo, WU De-wei, LU Yan-e, YAN Yu-guo, PANG Chun-lei

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** A brief introduction to current GNSS anti-jamming research situation at home and abroad is given. In combination with the application of BLMS (Block Least Mean Square) in GNSS anti-jamming, the BLMS Algorithm's block diagram and its signal flow chart are given to show how to realize it in hardware, and some problems are analyzed in its realizing process. An in-lab anti-jamming researching method is introduced, that is, using signal generators to simulate the jamming and the satellite navigation signal, and using power divider and synthesizer to simulate the array. Finally, monochromatic jamming and swept jamming are used to test the Algorithm's anti-jamming capability, and its validity is checked by a matlab C/A code correlating program. According to the experimental data, the jamming can be mitigated at large scale when it is suppressive. This offers a valuable reference for GNSS anti-jamming research.

**Key words:** GNSS; jamming environment simulation; anti-jamming; BLMS; validity confirming