

一种基于核的 GPS 空时自适应抗干扰方法

李文元¹, 解明辉¹, 樊 静²

(1 西安通信学院 通信指挥系, 陕西 西安 710106; 2 61858 部队, 陕西 西安 710106)

摘 要: 针对 GPS 接收系统的空时自适应抗干扰技术, 分析目前基于 FROST 阵列处理的最小均方算法 LMS (FLMS) 算法, 提出一种基于核方法的 FLMS 算法 (Kernel FLMS, KFLMS). 通过对空时自适应 STAP 和算法的建模, 研究了 KFLMS 算法的性能. 系统仿真表明, KFLMS 算法不仅能抑制大于阵元个数的多个宽、窄带干扰, 而且使接收机整体抗干扰能力达到 70 dB 左右, 比 FLMS 算法效果更优.

关键词: 空时自适应处理; 核方法; 最小均方算法; 全球定位系统

中图分类号: TN 911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)10-0099-04

Kernel-based GPS Space-time Adaptive Anti-jam Method

LI Wen-yuan¹, XIE Ming-hui¹, FAN Jing²

(1 Communications Command Department, Xi'an Communications Institute, Xi'an 710106, China;

2 Troop 61858, Xi'an 710106, China)

Abstract: To the technology on space-time adaptive anti-jam of GPS receiver system, the paper analyzed the Least-mean-square (LMS) algorithm based on FORST array processing presently and then proposed a new Least-mean-square (LMS) algorithm of FORST based on kernel method. By modeling space-time adaptive processing (STAP) and KFLMS algorithm, it researches the performance of anti-jam system. The simulations show the number of wideband and narrowband interferences suppressed by KFLMS algorithm is more than that of the sensors of array antenna. KFLMS algorithm can restrain the intensity of interference up to 70 dB, which is better than FLMS algorithm.

Key words: space-time adaptive processing; kernel method; least-mean-square; global positioning system

1 引言

近几年, 统计学习理论^[1]的研究得到了广泛的关注, 尤其是基于结构风险最小化的支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 的提出, 使得 SVM 中使用的核方法也再次崛起. GPS 卫星离地面 2 万多公里, 发射功率不大, 用户接收机对电子干扰比较敏感, 即使受到远距离低能干扰器的干扰, 也会丧失导航定位能力. 在这种背景下, 自适应抗干扰系统成为保证 GPS 接收机正常工作的关键技术, GPS 空时自适应滤波技术 (Space-Time Adaptive Processing, STAP) 能够抑制多种复杂的干扰形式, 如宽、窄带干扰、多径干扰等. 空时自适应滤波技术

是由 Brennan、Reed^[2]等学者首先提出, 并被广泛应用于雷达系统. 与此同时, FROST^[3]也提出了具有相同模型结构的宽带处理时变波束形成器. 由于空时处理的计算量很大, 对硬件处理器的要求很高, 因此以降低计算量为目的算法是空时处理重要研究的课题之一. 近年来, 比较先进的算法采用多级维纳滤波技术^[4-6] (MSNWF), 对矩阵降维处理以达到减小工作量的目的. 然而, 这种算法采用硬件实现时步骤繁琐, 需要较大的数据存储空间, 难以保证信号处理的实时性. 文献[7]中基于 FROST 阵列处理, 推导了 FROST-LMS (FLMS) 算法, FLMS 算法是一个递推算法, 不需要数据存储, 计算量很小, 使得自适应处理变得简单.

本文在文献[7]中的基础上,结合统计学习理论中的核方法,将 FLMS 算法进行核化,提出核化的 FLMS 算法(Kernel FLMS, KFLMS),仿真实验研究了 KFLMS 算法下 GPS 抗干扰系统以及接收系统的性能,结果表明能够有效抑制强宽、窄带干扰信号,保护卫星信号。

2 STAP 模型

当信号通过天线阵时,由阵元的位置和波达方向,可以确定一组相关的相位信息,根据功率倒置算法原理,干扰信号越强则该方向上的天线方向图零陷越深,达到抑制强干扰的目的。如果干扰信号是窄带干扰,那么这组信息相对简单,一般的空域自适应处理就可以抑制。然而,如果是宽带干扰,这组相位信息就比较复杂了,特别是在满带宽干扰情况下,所耗用的天线自由度很大,抑制效果不理想。

STAP 则利用时间延迟扩展权值个数,相当于提高天线自由度,从而提高抗干扰的性能。延迟时间为 $T \leq 1/B$, B 为传输信号的带宽。如果滤波器延迟阶数为 N ,这样每路长度为 $(N-1)T$ 的滤波器能够形成不同时间延迟的信号,从频域上看,相当于把一个宽带信号分成 N 个频段进行窄带处理。处理器通过选择更多的权值达到抑制宽带干扰,保护 GPS 信号的作用。STAP 处理器的模型如图 1 所示。

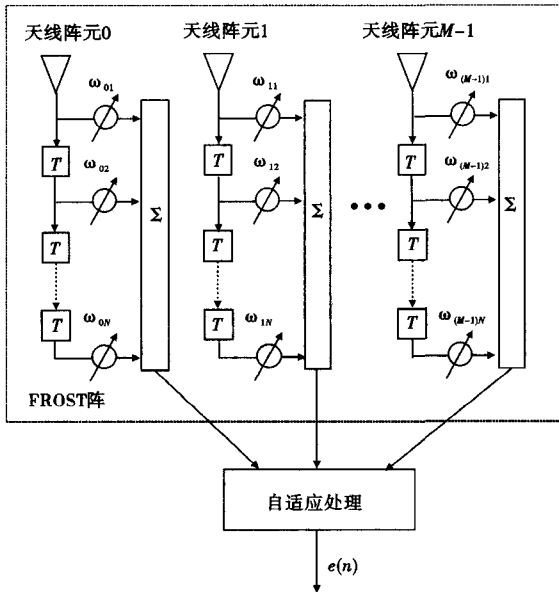


图 1 STAP 原理图

设天线有 M 个阵元,每个阵元通道后面接有一个 N 阶滤波器。STAP 的输出表达式为

$$y(n) = \omega^H x(n) \quad (1)$$

式中, $x(n)$ 为阵列输入信号, ω 为权值向量,具体形式为

$$\omega = [\omega_0^T, \omega_1^T, \dots, \omega_{M-1}^T]^T \quad (2)$$

$$x = [x_0^T, x_1^T(n), \dots, x_{M-1}^T(n)]^T \quad (3)$$

其中,

$$\omega_i = [\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{iN}]^T \quad (4)$$

$$x_i = [x_{i1}(n), x_{i2}(n-1), \dots, x_{iN}(n-N+1)]^T \quad i = 0, 1, \dots, M-1 \quad (5)$$

权值矢量的解为

$$\omega_{\text{opt}} = \alpha R^{-1} s_0 \quad (6)$$

式中, α 为任一常数; $R = E[x(n)x^H(n)]$ 是输入信号的协方差矩阵,为 $MN \times MN$ 维; s_0 为导航卫星的导向矢量。

3 KFLMS 算法

3.1 Mercer 核及核方法

核方法就是将原空间的数据集合 $x_k \in R^N, k = 1, 2, \dots, K$, 通过非线性函数 ϕ 映射到某一高维特征空间 $F(\phi: R^N \rightarrow F)$ 得到集合 $\{\phi(x_k), k = 1, 2, \dots, K\}$ 来进行处理。通过引入 Mercer 核函数,使所有的计算都在原空间进行,避免了在核空间的复杂运算。根据 Mercer 定理,映射到特征空间的两个点的内积可以用一个核函数来表示,即

$$\kappa(x, x') = \langle \phi(x), \phi(x') \rangle \quad (7)$$

如果将原空间的优化问题中的 $\langle x, x' \rangle$ 用 $\kappa(x, x')$ 来代替,就可以得到特征空间的优化问题。这意味着,通过给定核函数 $\kappa(x, x')$ 可以实现所有的计算,而不需要知道非线性映射函数 ϕ 和特征空间的具体形式。

事实上,任一个函数只要满足 Mercer 条件,就可以用作 Mercer 核,并可以分解成式(7)所示的点积形式。根据 Mercer 条件,对任意的对称函数 $\kappa(x, x')$,它是某个特征空间中的内积运算的充分必要条件是,对任意的平方可积函数 $f(x)$ 不恒等于 0,且 $\int f^2(x) dx < \infty$,并满足条件:

$$\iint \kappa(x, y) f(x) f(y) dx dy \geq 0 \quad (8)$$

多项式核函数 $\kappa(x, x') = (x \cdot x' + 1)^p$ 和高斯核函数 $\kappa(x, x') = \exp(-a \|x - x'\|^2)$ 是两类比较常见的核函数。

3.2 FLMS 算法

式(6)是理论情况下权值求解的公式,很难在实践中应用。一方面自相关矩阵 R 及其逆矩阵难以直接运算得到;另一方面,卫星信号到达方向是未知

的,即 s_0 不可预知.文献[7]中采用递推公式求解权值,即在 FROST 阵列上应用 LMS 算法,下面简述文献[7]中 FLMS 算法的推导过程.

将天线阵元分为两部分:阵元 0 为主天线阵元作为自适应处理的期望信号,其他 $M-1$ 个辅助阵元作参考阵元.可重新定义各阵元信号表达式为

$$d(n) = x_0(n) \quad (9)$$

$$x(n) = [x_1^T(n), x_2^T(n), \dots, x_{M-1}^T(n)]^T \quad (10)$$

$$\omega(n) = [\omega_1^T(n), \omega_2^T(n), \dots, \omega_{M-1}^T(n)]^T \quad (11)$$

根据功率倒置算法,设 $\omega_0 = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$,则滤波器输出为

$$e(n) = d(n) - y(n) = \omega_0^T d(n) - \omega^H x(n) \quad (12)$$

由最小均方误差准则,最佳的滤波器参量 ω_{opt} 应使得均方误差函数 $f(\omega) = E\{|e(n)|^2\}$ 最小.

根据最陡梯度原理,梯度的方向是 $f(\omega)$ 增长最快的方向,所以负的梯度方向就是 $f(\omega)$ 减少最快的方向.这样,自然可得如下的递推公式来调整 ω .

$$\omega(n+1) = \omega(n) - \mu \nabla_{\omega}(f(\omega)) \quad (13)$$

式中, $\nabla_{\omega}(f(\omega))$ 为 $f(\omega)$ 的梯度, μ 称为步长因子.

根据最陡下降法的统一形式, $\omega(n)$ 的更新公式为

$$\omega(n+1) = \omega(n) + \mu e(n) x(n) \quad (14)$$

式中, $\omega(0)$ 作为初始值可以任意设定,而后通过式(14)不断迭代更新可得到 ω_{opt} 的近似值.

3.3 KFLMS 算法

(1) KFLMS 算法原理

假设输入信号 $x(n)$ 与期望信号 $d(n)$ 是非线性关系,则 FLMS 算法将不再适用,为解决这一问题,将输入信号 $x(n)$ 变换到高维特征空间 F ,则输入 $x(n)$ 变换为 $\phi(x(n))$,记为 $\phi(n)$.

在核空间中 FLMS 算法变为如下形式

$$\begin{aligned} e(n) &= d(n) - \omega(n-1)^T \phi(n) \\ \omega(n) &= \omega(n-1) + \mu e(n) \phi(n) \end{aligned} \quad (15)$$

递推可得

$$\begin{aligned} \omega(n) &= \omega(n-1) + \mu e(n) \phi(n) = \\ &= [\omega(n-2) + \mu e(n-1) \phi(n-1)] + \mu e(n) \phi(n) = \\ &= \omega(n-2) + \mu [e(n-1) \phi(n-1) + \\ &+ e(n) \phi(n)] \dots \dots = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega(0) + \mu \sum_{j=1}^n e(j) \phi(j) = \\ \mu \sum_{j=1}^n e(j) \phi(j) \quad (\text{假定 } \omega(0) = [0 \ 0 \ \dots \ 0]^T) \end{aligned} \quad (16)$$

经过 n 次训练之后,输入 x' 可得输出为

$$\begin{aligned} \omega(n)^T \phi(x') &= \left[\mu \sum_{j=1}^n e(j) \phi(x(j))^T \right] \phi(x') = \\ &= \mu \sum_{j=1}^n e(j) [\phi(x(j))^T \phi(x')] \end{aligned} \quad (17)$$

至此出现了向量点积,可以进行核化,利用核方法将点积转化为核函数可得

$$\omega(n)^T \phi(x') = \mu \sum_{j=1}^n e(j) \kappa(x(j), x') \quad (18)$$

定义 f_n 为核空间内训练 n 次之后的滤波系数向量,则有

$$\begin{aligned} f_{n-1}(\ast) &= \mu \sum_{j=1}^{n-1} e(j) \kappa(x(j), (\ast)) \\ f_{n-1}(x(n)) &= \mu \sum_{j=1}^{n-1} e(j) \kappa(x(j), x(n)) \\ e(n) &= d(n) - f_{n-1}(x(n)) \\ f_n(\ast) &= f_{n-1}(\ast) + \mu e(n) \kappa(x(n), (\ast)) \end{aligned} \quad (19)$$

将此算法称为 KFLMS 算法.

(2) 核函数及其参数选择

常见的核函数有多项式核函数和高斯核函数,高斯核函数具有稳定的性能,在信号处理领域默认选择高斯核函数,高斯核函数定义如下:

$$\kappa(x, x') = \exp(-a \|x - x'\|^2) \quad (20)$$

式中, a 称为核参数.

研究表明可以用交叉确认法和惩罚函数法来确定核参数 a ,核参数对内积的影响很大,影响着核空间内样本的相似度.从泛函分析的观点来看, a 过大,则所有的输入在核空间差别不大,内积接近于 1,系统降为线性衰落. a 过小,则所有的点在核空间的映射将过于稀疏,算法的扩展能力不强^[8].

文献[8]中 Silverman 通过交叉确认法得出核参数 a 的最优值为

$$a_{\sigma} = 1.06 \sigma N^{-\frac{1}{5}} \quad (21)$$

式中, σ 为输入样本的标准差, N 为输入样本的数量.

4 仿真试验

为进行算法性能的比较,仿真条件与文献[7]一致,采用 7 元 Y 型布局圆天线阵,圆阵的第一阵元位于圆点,其他六个阵元均匀分布于圆的边上,相位为 $\{0^\circ \ 60^\circ \ 120^\circ \ 180^\circ \ 240^\circ \ 300^\circ\}$,阵元距圆心半径为圆阵半径 $r \leq l/2$, l 是卫星信号载波波长.每个阵元上接有 7 阶 FIR 滤波器. GPS 信号为 P 码调制的 BPSK 信号,入射功率为 -160 dBW ,入射方向为

($120^\circ, 30^\circ$) (前一个角度为方位角, 后一个角度为俯仰角), 信噪比设为 -35 dB. 10 个干扰信号如表 1

所示. ADC 采样位数为 12 位, 数字处理时每个码片采样数为 6, 采用高斯核函数.

表 1 宽带干扰信号信息表

干扰	类型	干扰方向	干扰频率/MHz	带宽/MHz	干信比/dB	干扰波形
1	窄带	($50^\circ 20^\circ$)	6.667	0	33	连续波
2	窄带	($70^\circ 30^\circ$)	10	0	34	连续波
3	窄带	($90^\circ 45^\circ$)	13.334	0	35	连续波
4	窄带	($110^\circ 60^\circ$)	16.667	0	36	连续波
5	窄带	($120^\circ 75^\circ$)	20	0	37	连续波
6	宽带	($45^\circ 25^\circ$)	15	20	30	BPSK
7	宽带	($145^\circ 25^\circ$)	15	20	31	BPSK
8	宽带	($90^\circ 50^\circ$)	15	20	32	BPSK
9	宽带	($30^\circ 75^\circ$)	15	20	33	BPSK
10	宽带	($150^\circ 70^\circ$)	15	20	34	BPSK

图 2 中给出了 10 个干扰信号加噪声之后的频谱图, 图 3 中给出了 KFLMS 算法抑制 10 个干扰之后的频谱图. 可以明显看出 10 个干扰信号被抑制, 验证了 KFLMS 算法具有从空时域同时抑制宽、窄带干扰信号的作用. 一般的空域算法只能抑制阵元个数 $M-1$ 个干扰, 而实验中的干扰数目已经超过了阵元个数, 显示了 KFLMS 算法良好的性能.

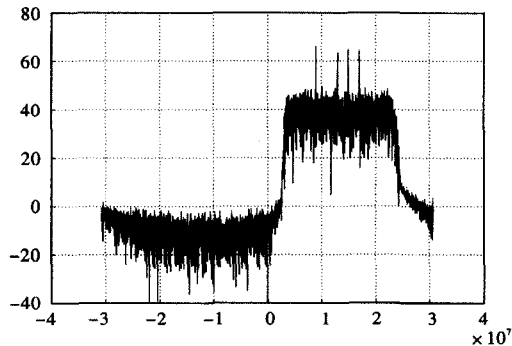


图 2 10 个干扰信号的频谱

图 4 中给出了在空时自适应处理后, 对 GPS 接收机的误码率随输入干信比(J/S)的改变进行测试的结果, 对比 KFLMS 算法和 FLMS 算法可以看出, 对 FLMS 算法, 当干扰信号比大于 65 dB 时, 接收机的误码率逐渐变大. 而对 KFLMS 算法来说, 当干扰信号比大于 70 dB 时, 接收机的误码率才开始变大. 由此可以得出, KFLMS 具有比 FLMS 算法更优的抗干扰性能.

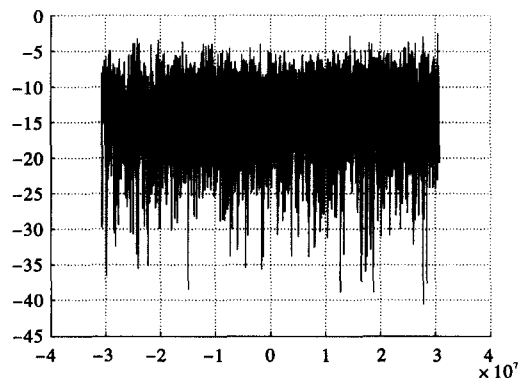


图 3 抑制干扰后的频谱

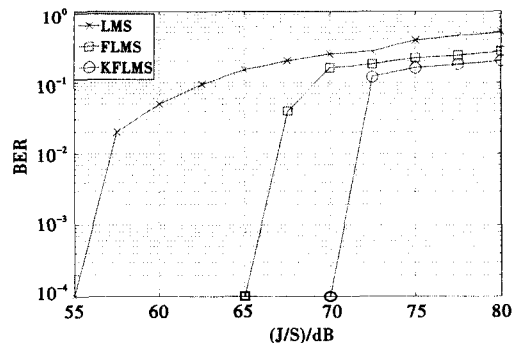


图 4 BER 随 J/S 的变化曲线

5 结束语

本文在 STAP 模型的基础上, 结合统计学习理论中的核方法将 FLMS 算法进行核化, 提出了

(下转第 107 页)

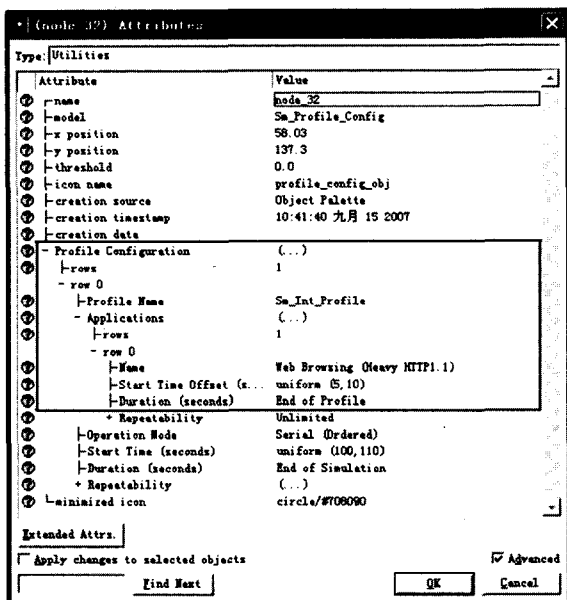


图8 业务规格定义(node_32)属性的设置

5 结束语

本文在 OPNET 软件平台上设计和仿真了校园网网络架构,通过仿真配置和综合结果统计量,得到仿真结果.仿真结果表明,所设计的校园网能够满足实际的要求,具有可行性和精确性.借助网络仿真技术,为实际网络的设计能够提供非常有价值的数据参考和设计依据,具有很现实的指导意义.

(上接第 102 页)

KFLMS 算法.仿真实验表明,对 GPS 接收系统来说,KFLMS 算法明显提高了接收机抗干扰的动态范围,比 FLMS 算法提高约 5dB,在保护导航信号方面有更好的效果.系统仿真结果对工程实践具有一定的指导意义.

参考文献:

- [1] Vladimir N Vapnik. 统计学习理论的本质[M]. 张学工,译. 北京:清华大学出版社,2008.
- [2] Brennan L E, Reed I S. Theory of adaptive radar [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic System, 1973,9(2): 237-252.
- [3] Frost O L. An algorithm for linearly constrained adaptive array processing [J] Proc IEEE, 1972,60(8): 926-935.
- [4] J Scott Glodstein, Reed I S, Scharf L L. A multistage representation of the Wiener filter based on orthogonal

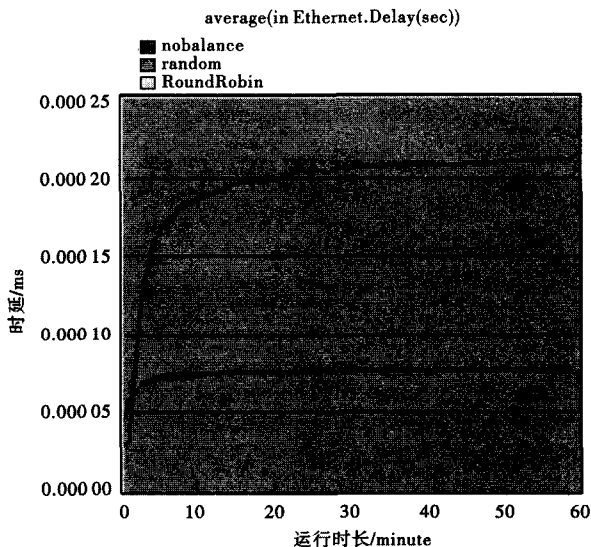


图9 三种系统时延均值比较图

参考文献:

- [1] 石怀伟,李明生,王少华. 网络仿真技术与 OPNET 应用实践[J]. 计算机系统应用,2006(3):49-55.
- [2] 王文博,张金文. OPNET Modeler 与网络仿真 [M]. 北京:人民邮电出版社,2003.
- [3] 陈敏. OPNET 网络仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

作者简介:

彭燕女,(1975—),硕士.研究方向为网络技术、仿真技术.

projections[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1998(44):2943-2959.

- [5] Cagley R E Suk-seung. A multistage interference rejection system for GPS, signals, systems and computers [J]. Asilomar Conference,2002,48(4):134-148.
- [6] 孙晓昶,皇甫堪,陈强. GPS 接收机抗干扰空时自适应滤波方法[J]. 通信学报,2004,25(8):98-105.
- [7] 项建弘,郭黎利,陈立明. GPS 空时自适应抗干扰系统性能研究[J]. 系统工程与电子技术,2009,5(31):1022-1025.
- [8] Weifeng Liu, Haykin S. Kernel adaptive filtering[M]. New York: John Wiley Publication, 2010:130-139.

作者简介:

李文元男,(1964—),副教授.研究方向为移动通信抗干扰.
解明辉男,(1986—),硕士研究生.研究方向为北斗导航系统抗干扰.
樊静女,(1977—),讲师.研究方向为无线电通信.