

# 基于智能天线的改进型 SPRLS 算法研究

丁治国,叶中付

(中国科学技术大学 信号统计处理研究室,安徽 合肥 230027)

**摘要** 针对 SPRLS 算法在误差较小时收敛速度慢的问题,利用误差梯度信息对自扰动项进行修正,从而提出了一种适合智能天线的改进型 SPRLS 算法。通过仿真试验,验证了在信道发生突变时,改进后的算法在有限迭代次数下,具有比 SPRLS 算法更好的收敛速度和更小的均方误差。同时该算法在复杂度上代价较小,具有较好的实用性。

**关键词** 智能天线; SPRLS 算法; 自扰动项; 误差梯度

中图分类号 TN891<sup>+</sup>.91 文献标识码 A

## A Modified SPRLS Algorithm in Smart Antenna

DING Zhi-guo, YE Zhong-fu

(Institute of Statistical Signal Processing, USTC, Hefei Anhui 230027, China)

**Abstract** In order to overcome the drawback of SPRLS algorithm that have slow convergence rate when error is small, we use the information of error grads to modify the self-perturbing term and present a new modified SPRLS algorithm which is applicable to smart antenna. Theory and computer simulations show that the modified algorithm, which is simple and practical, has faster convergence rate and smaller square error than SPRLS algorithm.

**Key words** smart antenna SPRLS algorithm self perturbing term error grads

## 0 引言

智能天线由于其良好的抗多用户干扰和多径干扰性能,近年来在通信领域得到了广泛关注和研究。其中,智能天线的自适应算法一直是人们研究的热点问题之一,在常用的自适应算法中,最小均方误差算法(LMS)的特点是算法简单,但收敛速度慢,均方误差大。恒模算法(CMA)不需要参考信号,但存在多个恒模信号时,需要进行信号的分检,且收敛速度和均方误差都不理想。而递归最小二乘算法(RLS)以其快速的收敛性和较小的均方误差,得到了广泛的应用。然而,RLS 算法也存在一些固有的缺陷,当预测参数趋向真值时,算法中的 Kalman 增量趋近于 0,可能跟踪不上信道的变化,因此 Park 和 Jun 对算法进行了改进,提出了 SPRLS<sup>[1]</sup>( Self Perturbing Recursive Least Square) 算法,在此基础上又出现了 MRLS<sup>[2]</sup>、ISPRLS<sup>[3]</sup> 和 FVFF-RLS<sup>[4]</sup> 算法等。但 SPRLS 算法在误差较小时,仍然会存在收敛速度慢的问题。本文则利用误差梯度信息对 SPRLS 算法的自扰动项进行修正,从而提出了一种适合智能天线的改进型 SPRLS 算法。

## 1 信号模型

采用自适应算法的智能天线由天线阵列和自适

应算法调整部分组成。对于 DS-CDMA 系统,由  $M$  个天线阵元组成的离散基带接收信号可表示为:

$$\mathbf{x}(n) = \sum_{i=0}^{S-1} \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sigma_k \alpha_{k,p}(i) d_k(i) c_k(n - iT - \tau_{k,p}) \cdot \mathbf{a}(\theta_{k,p}) + \mathbf{i}(n)$$

式中  $\mathbf{x}(n)$  为  $M \times 1$  维 chip 级向量;  $S$  为考虑的符号数;  $P$  为衰落的路径数;  $\sigma_k$  为第  $k$  个用户的信号幅度;  $\alpha_{k,p}$  和  $\tau_{k,p}$  分别为第  $k$  个用户的第  $p$  路径的复衰落和时延;  $d_k$  为符号信息; 假设采用 BPSK 调制,  $c_k$  为第  $k$  个用户的扩频码;  $T$  为符号间隔,且  $T = NT_c$ ,  $T_c$  为码片间隔;  $\mathbf{i}(n)$  是零均值的高斯白噪声; 方差为  $\sigma_n^2$ ,且为  $M \times 1$  维 chip 级向量。当天线为等距线阵,阵元间隔为半波长时,则:

$$\mathbf{a}(\theta_{k,p}) = [1, \exp(-j\pi \sin \theta_{k,p}), \dots, \exp(-j(M-1)\pi \sin \theta_{k,p})]^H$$

式中,  $\theta_{k,p}$  为第  $k$  个用户第  $p$  条路径的到达角( . )<sup>H</sup> 为转置运算。

## 2 SPRLS 算法及其改进

### 2.1 SPRLS 算法

假设天线阵列的输出信号为:

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{W}(n) \mathbf{x}(n) + \mathbf{i}(n) \quad (1)$$

收稿日期 2005-08-13

常用的 RLS 算法<sup>[5]</sup>可以描述如下：

① 初始化 :  $W(0) = 0, P(0) = I/\delta$ ;

② 更新 :  $n = 1, 2, \dots$ ,

$$e(n) = d(n) - W^H(n-1)x(n) \quad (2)$$

$$K(n) = \frac{P(n-1)x(n)}{\lambda + x^H(n)P(n-1)x(n)} \quad (3)$$

$$P(n) = \frac{1}{\lambda} [P(n) - K(n)x^H(n)P(n-1)] \quad (4)$$

$$W(n+1) = W(n) + K(n)e(n) \quad (5)$$

式中,  $\lambda$  是遗忘因子,  $1/\delta$  是一个很小的正数;  $v(n)$  是零均值的高斯白噪声, 方差为  $\sigma_n^2$ ;  $d(n)$  为参考信号;  $K(n)$  为 Kalman 增益向量;  $P(n)$  为协方差矩阵;  $I$  为单位矩阵。

为了减少预测中的噪声, 当迭代次数很大时, Kalman 增益趋近于 0, 此时  $W(n)$  与  $W(n-1)$  非常接近, 如果此时信道发生变化, 由于  $K(n)$  太小, 算法就失去了跟踪能力。因此改进型的 RLS 算法, 即 SPRLS 算法给  $P(n)$  增加了与误差信息  $e(n)$  有关的项, 称为自扰动项  $Q(n)$ 。这样信道发生变化时, 可以使  $K(n)$  非 0 以跟踪信道的变化。

SPRLS 算法定义  $P(n)$ <sup>[1]</sup> 为:

$$P(n) = \frac{1}{\lambda} [P(n) - K(n)x^H(n)P(n-1) + Q(n)] \quad (6)$$

$$Q(n) = \beta * \text{NINT}[\gamma e^2(n)] * I \quad (7)$$

式中,  $\beta, \gamma$  为常数, 通常  $0 < \gamma < 1$ ;  $\text{NINT}(x)$  取  $x$  最接近的整数, 所以当  $\gamma e^2(n) \geq 0.5$  时,  $Q(n) \neq 0$ , 使算法有较快的收敛速度, 从而能及时反映信道的变化。而当  $\gamma e^2(n) < 0.5$  时,  $Q(n) = 0$ 。这时算法的收敛性同正规 RLS 算法一样。所以该算法的优点在于误差较大时, 可以快速收敛, 误差较小时, 可以保持同正规 RLS 算法的一样的收敛误差。

## 2.2 SPRLS 算法的改进

但是该算法用于智能天线自适应处理时, 并不太适用。因为在噪声较小时, 采用自适应算法的智能天线的误差极限通常小于  $0.1$  ( $\gamma e^2(n) < 0.5$ ), 这就使得  $Q(n)$  在相当长的收敛过程中, 没有发挥作用, 所以收敛效果并不理想。而如果简单的增加  $\gamma$ , 以提高  $\gamma e^2(n)$ , 会导致在收敛初期  $e^2(n)$  过大, 算法无法收敛。因此必须对  $Q(n)$  进行适当的改进。值得注意的是, 误差的梯度信息  $|e(n) - e(n-1)|$  反应了系统的收敛程度, 当  $|e(n) - e(n-1)| < \epsilon$  时 ( $\epsilon$  为任意小的正数), 认为系统已趋于收敛。因此不如去掉  $\text{NINT}(\cdot)$  函数, 让  $Q(n)$  随  $e^2(n)$  线性变化, 所以对  $Q(n)$  进行如下修正:

$$Q(n) = \begin{cases} \beta * \gamma * e^2(n) * I & |e(n) - e(n-1)| \geq \epsilon \\ 0 & |e(n) - e(n-1)| < \epsilon \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\epsilon$  为很小的正数, 这里被称为收敛因子, 可根据经验获得, 一般来说当干扰用户数越多且噪声功率越大时,  $\epsilon$  越大。反之,  $\epsilon$  越小。这样当系统误差较大时,  $Q(n)$  也较大, 快速收敛, 当收敛接近极限 ( $|e(n) - e(n-1)| < \epsilon$ ) 时,  $Q(n) = 0$ , 降低收敛速度, 保证收敛精度。

所以利用误差高梯度信息改进型 SPRLS 算法步骤如下:

① 初始化  $u(0), P(0)$ ;

② 分别用式(2)、(3)、(6)、(8)和式(5)计算  $e(n), k(n), P(n), Q(n)$  和  $W(n)$ ;

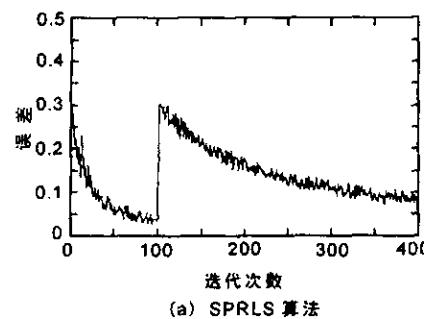
③ 判断是否满足收敛条件, 是 转入④, 否,  $n = n + 1$  转入②;

④ 算法结束。

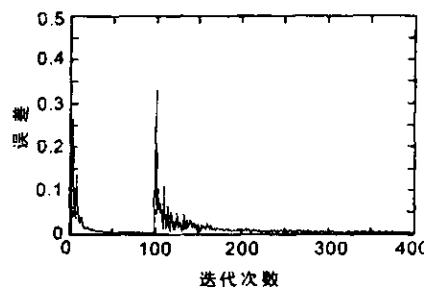
## 3 仿真实验及性能分析

为了验证上述算法的有效性, 用 BPSK 信号进行仿真实验。采用间隔为半个波长的 8 阵元的直线天线阵列。共有 3 个用户, 其中用户 1 为干扰用户, 各用户只有一条传输路径, 天线阵接收信号的幅度相同, 来波方向分别为  $90^\circ, 45^\circ, 140^\circ$ , 各用户均采用 32 位的扩频码扩频。参数分别为  $\lambda = 0.9, 1/\delta = 0.01, \beta = 1, \gamma = 0.4, \epsilon = 0.01$ , 信噪比 20 dB, 信道在算法迭代到 100 次时, 发生突变, 增加了 2 个干扰用户, 来波方向分别为  $20^\circ, 120^\circ$ 。

从图 1 可以看到 SPRLS 算法在信道发生突变后, 由于分量  $\gamma e^2(n) < 0.5$ , 自扰动项  $Q(n) = 0$ , 其收敛速度同常规 RLS 算法一致, 无法克服 RLS 算法由于信道突变而收敛慢的问题, 继续迭代 300



(a) SPRLS 算法



(b) 改进型 SPRLS 算法

图 1 算法改进前后的误差性能比较

次以后仍然没有收敛。而改进后算法,自扰动项  $Q(n)$  在收敛的绝大多数时间内都发挥作用(只有在收敛接近极限时,  $|\epsilon(n) - \epsilon(n-1)| < \epsilon$ ,  $Q(n) = 0$ ),所以能快速收敛,仅用 50 次迭代就完成收敛了。

图 2 为改进前后 SPRLS 算法在用户输出端的星座图(迭代 400 次后),可以看到前者星座点分布分散,收敛于信号值(1,0)和(-1,0)的轨迹不明显。而改进后的算法星座点集中,可较容易的看出收敛于信号点。

图 3 为改进前后采用 SPRLS 算法的天线阵的方向图(迭代 400 次后),可以看到两者的方向图都能对准了来波方向,主瓣对准了期望用户的来波方向( $90^\circ$ ),且在干扰方向( $20^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $140^\circ$ )都形成下陷。但应该看到,改进前的算法在迭代 400 次后仍然没有收敛,所以对干扰的抑制能力很弱。而改进后的算法已完成收敛,在干扰信号方向下陷更深,分别比前者降低了约 7 dB, 20 dB, 8 dB 和 15 dB, 可见改

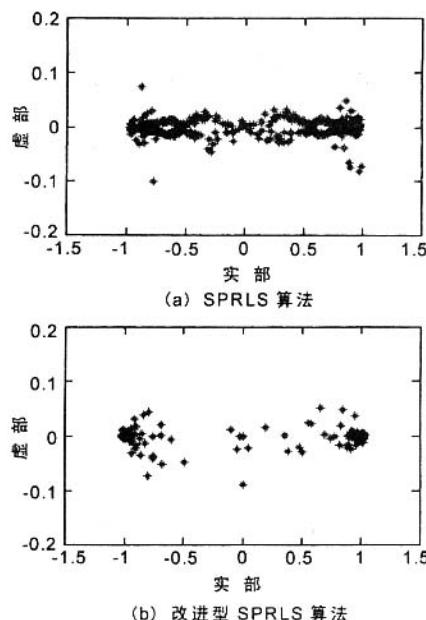


图 2 算法改进前后的星座图比较

进后的算法不仅收敛速度快,而且有更好的收敛效果。

## 4 结束语

针对 SPRLS 算法在误差较小时收敛速度慢的问题,本文利用误差梯度信息对自扰动项进行修正,从而提出了一种适应智能天线的改进型 SPRLS 算法。通过仿真实验验证了在信道发生突变时,改进后的算法具有比 SPRLS 算法更好的收敛速度和更小的均方误差。同时该算法在复杂度上代价较小,具有较好的实用性。值得注意的是收敛因子  $\epsilon$  是影响算法的关键因素,本文主要通过先验知识确定。如何在不同的系统环境下,准确的设定  $\epsilon$ ,有待于进一步的研究。

## 参考文献

- [1] PARK D J, JUN B E. Selfperturbing Recursive Least Squares Algorithm with Fast Tracking Capability[J]. Electronics Letters 12<sup>th</sup>, 1992, 28(6): 558-560.
- [2] JIANG J, COOK R. Fast parameter Tracking RLS Algorithm with High Noise Immunity[J]. Electronics Letters 22<sup>th</sup>, 1996, 32(22): 680-683.
- [3] KWONG S, EOM B, EUL J, DONG J P. Fast Tracking and Noise-Immunised RLS Algorithm Based on Kalaman Filter[J]. Electronics Letters 5<sup>th</sup>, 1996, 32(25): 2311-2312.
- [4] 华琳. 梯度可变遗忘因. RLS 算法在智能天线中的应用[J]. 信息与电子工程 2004, 3(1): 33-36.
- [5] 张贤达. 现代信号处理(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

## 作者简介

丁治国 男(1977-), 硕士研究生。主要研究方向:扩频通信。  
叶中付 男(1959-), 教授, 博士生导师。主要研究方向:阵列与统计信号处理、图像分析与处理。

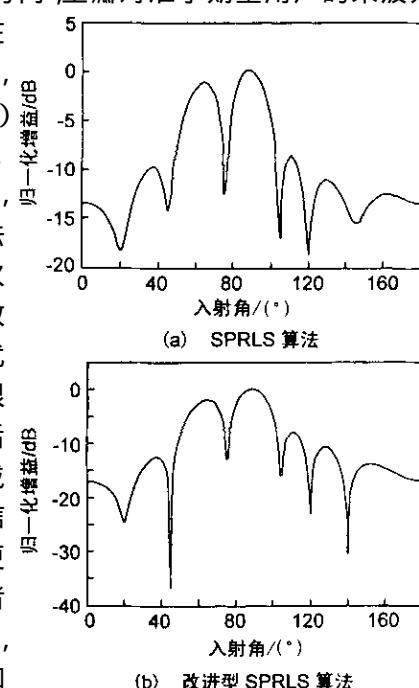


图 3 算法改进前后的天线阵方向图比较

## 欢迎投稿

《无线工程》期刊是信息产业部优秀电子科技期刊、全国中文核心期刊、中国期刊全文数据库全文收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊、万方数据资源系统数字化期刊群入网期刊和中文科技期刊数据库全文收录期刊。

**主要刊登:**国家基金项目论文、博(硕)士学术论文、信息系统与网络、信号与信息处理、测控遥感与导航定位、电磁场与微波及专题技术与工程应用等。

**联系电话:** 0311-86924962, 86924954

E-mail: gch@mail. eti. ac. cn

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>