

两种 GPS 天线阵列抗干扰算法研究及仿真

尹 勇, 王 辉, 斯鹏飞

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要: 介绍了自适应天线阵列信号响应的数学描述, 论述了在 GPS 抗干扰应用中广泛采用的基于最小均平方(LMS)的自适应算法的原理和实现过程, 并对算法进行了仿真。提出了一种优于 LMS 算法的自适应数字波束形成(DBF)技术, 推导出了其最优权系数矢量的计算方法, 并对该算法进行了仿真。仿真结果表明: 4 阵元 LMS 的自适应调零算法对于单干扰的抑制和双干扰的抑制都达到了较好的效果, 同时也体现了该算法零陷的优点。

关键词: 自适应天线阵列; LMS 算法; 波束形成; GPS 抗干扰

中图分类号: TN911 **文献标志码:** A

文章编号: 1008-9268(2011)05-0037-04

0 引言

GPS 用户接收到的民用 L1 C/A 码信号的最低功率电平仅有 -159.6 dBW, 极易被干扰。根据试验, 1W 的干扰机可以使 22 km 范围内的民用 GPS 接收机无法工作^[1]。即使是 GPS 军码接收机, 其抗干扰能力也不强。GPS 用户端的抗干扰能力直接关系到战时该类武器作战效能的发挥。目前, 国外已经工程化的抗干扰技术主要有: 自适应调零和自适应波束形成技术^[2]。

1 自适应天线阵列数学描述

1.1 自适应天线阵列

自适应天线阵列由多个天线单元组成, 每一个天线后有一个加权器, 根据某种准则自适应地确定加权器复系数, 对天线输出信号的幅度和相位进行调整, 形成抗干扰所需要的天线阵列方向图, 从而实现空域滤波^[3]。其原理示意如图 1。这个过程中, 确定准则, 解算最优加权器复系数向量 \mathbf{W}_{opt} 是实现算法的关键。

1.2 阵列天线的数学模型^[3]

假设空间信号源的载波为 $e^{j2\pi f_c t}$, 设坐标原点的接收信号为 $s(t)e^{j2\pi f_c t}$, 则距基准点 r 处的振元接收信号表示为

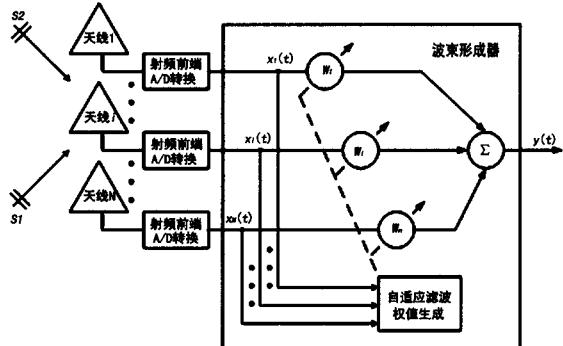


图 1 自适应天线阵列的原理示意图

$$\tilde{s}_r(t) = s(t - \mathbf{r}^T \boldsymbol{\alpha} / c) e^{j(2\pi f_c t - \mathbf{r}^T \mathbf{k})} \quad (1)$$

式中: \mathbf{k} 是波数向量; $\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{k} / |\mathbf{k}|$ 表示电波传播方向, 为单位向量; $|\mathbf{k}| = 2\pi f_c / c = 2\pi / \lambda$ 为波数(弧度/长度)。 $\mathbf{r}^T \boldsymbol{\alpha} / c$ 表示信号在 \mathbf{r} 处相对于基准点的延迟时间。

2 自适应阵列抗干扰原理及算法仿真^[3,5]

目前工程中应用较多的 GPS 抗干扰技术主要有: 自适应调零, 波束形成两种。

2.1 基于 LMS 算法的自适应调零技术

以 4 元自适应天线阵为例, 进行 GPS 自适应

收稿日期: 2011-06-07

联系人: 尹勇 E-mail: yinyongok@sohu.com

2011.5/全球定位系统

• 37 •

调零抗干扰技术分析。正方形边长取 $\lambda/2$, 如图 2 所示。

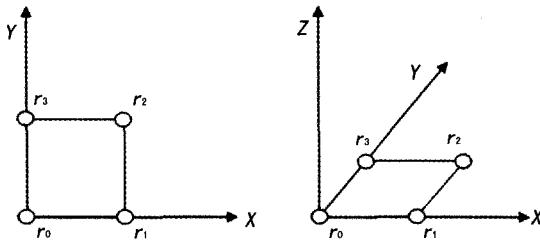


图 2 正方形平行布阵

该天线阵列的方向矩阵为 $A = (\cos\theta\sin\phi, \sin\theta\sin\phi, \cos\phi)$ 。各阵元接收到的干扰复信号可以表示成

$$\begin{aligned} x_1(t) &= e^{j(\omega+\varphi_0)t} \\ x_2(t) &= e^{j(\omega+\varphi_0)t} \cdot e^{-j\pi\sin\varphi\cos\theta} \\ x_3(t) &= e^{j(\omega+\varphi_0)t} \cdot e^{-j\pi\sin\varphi\cos\theta + j\sin\theta\sin\phi} \\ x_4(t) &= e^{j(\omega+\varphi_0)t} \cdot e^{-j\pi\sin\varphi\sin\theta} \end{aligned} \quad (2)$$

设权系数: $w = [w_1, w_2, w_3, w_4]^T$, 根据定义当前阵列输出 $y(n) = w^H x(n)$ 。阵列功率输出误差可表示为

$$e(n) = d(n) - w^H x(n) \quad (3)$$

其中, 最优权系数向量 w_{opt} 为 $w_{opt} = R_{xx}^{-1} r_{sd}$, 解出 w_{opt} 即可获得天线阵列的期望输出。

式中: r_{sd} 输入向量 $x(n)$ 与期望响应 $d(n)$ 的互相关向量; R_{xx} 输入向量 $x(n)$ 的自相关矩阵。

解算 w_{opt} 需要矩阵求逆, 工程实现困难。LMS (Least-Mean-Square) 算法是一种直接对梯度进行估计的方法。利用该算法构建出递推公式:

$$\hat{w}(n+1) = \hat{w}(n) + 2\mu x(n)e^*(n) \quad (4)$$

式中, μ 为正常数。此递推方程的含义是: 权系数向量在 $n+1$ 时的值等于它在 n 时的值加上一个修正量, 后者正比于 $-\nabla_w \xi$, ξ 总是沿着均方误差面最陡的方向下降。由于 ξ 具有唯一的最小值, 故 $w(n)$ 一定趋于最优维纳解, 而与初始值的选择无关。

2.2 LMS 自适应调零算法仿真

根据公式(4), 该 LMS 算法递推公式的具体步骤为

- ① 给定初始权系数矢量 $w(0)$ 和步长因子 μ ;
- ② 有射频前端的中频输出取得 $x(n)$, 并取参考阵元的输出为 $d(n)$;
- ③ 利用 $w(n)$ 和 $x(n)$, 计算出 $y(n) = w^H x(n)$;
- ④ 估计误差 $e^*(n) = d(n) - y(n)$;

⑤ 更新权系数矢量 $\hat{w}(n+1) = \hat{w}(n) + 2\mu x(n)e^*(n)$;

⑥ 判断误差 $e(n)$ 是否足够要求, 满足则结束; 不满足, 重复②~⑥步骤。

使用 MATLAB 进行了仿真。在 $\varphi = 40^\circ, \theta = 60^\circ$ 处施加干扰信号时, 利用 LMS 算法求得最优权系数向量 w_{opt} , 并利用 $y(n) = w_{opt}^H x(n)$ 画出天线阵列的输出方向图如图 3 所示。

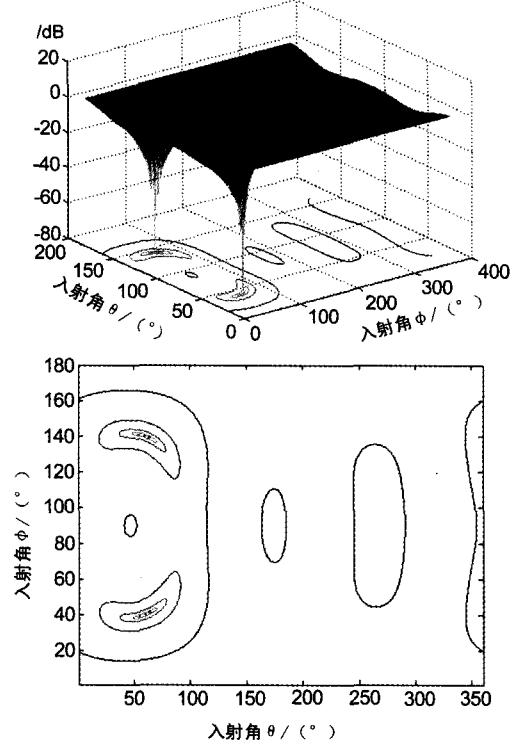


图 3 $\varphi=40^\circ, \theta=60^\circ$ 干扰入射时方向图和平面图

如图 3 所示在整个空间中, 方向图存在两个零陷, 对应的角度为 $\varphi=40^\circ, \theta=60^\circ$ 和 $\varphi=140^\circ, \theta=60^\circ$ 这两个零陷的矢量方向是关于 X0Y 平面对称的, 即关于天线阵面是对称的, 其零陷深度达到了 68 dB。

在加入 $\varphi=40^\circ, \theta=60^\circ$ 和 $\varphi=70^\circ, \theta=160^\circ$ 两个干扰信号时, 得到的天线阵列方向图输出如图 4 所示:

方向图存在四个零陷, 对应的角度为 $\varphi=40^\circ, \theta=60^\circ$ 和 $\varphi=70^\circ, \theta=160^\circ$ 四个零陷的矢量方向关于 X0Y 平面对称的, 其零陷深度达到了 40 dB。

该算法可在干扰信号来向形成零陷, 从而实现对干扰的抑制。仿真中零陷的个数是干扰个数的两倍, 这是因为关于平面对称的信号在天线阵列上形成相同的相位差。

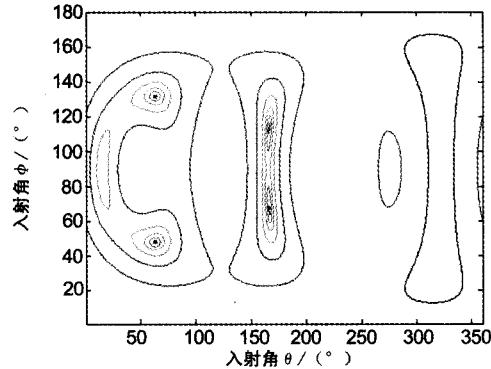
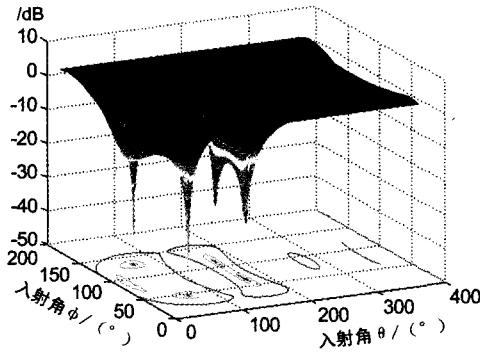


图 4 $\varphi=40^\circ, \theta=60^\circ$ 和 $\varphi=70^\circ, \theta=160^\circ$ 干扰入射时方向图和平面图

3 波束形成抗干扰原理

若改进该自适应调零算法,将约束准则改为天线阵列输出功率最低,且在 GPS 信号来向保持一定增益,可最大程度提高抗干扰系统的信干比,获得更好的抗干扰效果。这种思路即是波束形成抗干扰技术的初衷。

波束形成是一种多波束算法。假设远场空间共有 L 个不相关的干扰信号 $s_i(t)$, 其波达方向为 $\theta_i, i = 1, \dots, L$, θ_i 未知; 卫星信号为 $s_d(t)$, 其波达方向为 θ_d, θ_d 已知; 此外 M 元天线阵列的每个振元上的加性白噪声为 γ_i , 它们具有相同的方差 σ_γ^2 。根据第 1 节所述, M 个振元的阵列接收信号可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= \mathbf{As}(t) + \boldsymbol{\gamma}(t) \\ &= \boldsymbol{\alpha}(\theta_d)s_d(t) + \sum_{i=1}^L \boldsymbol{\alpha}(\theta_i)s_i(t) + \boldsymbol{\gamma}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

假设最佳波束形成的权向量为 \mathbf{w} , 输出为 $\mathbf{y}(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(t)$, 则此时阵列输出的平均功率可表示为

$$\begin{aligned} p(\mathbf{w}) &= E\{|\mathbf{y}(t)|^2\} \\ &= E\{\mathbf{w}^H \mathbf{x}(t) (\mathbf{w}^H \mathbf{x}(t))^*\} \\ &= \mathbf{w}^H E\{\mathbf{x}(t) \mathbf{x}^H(t)\} \mathbf{w} \\ &= \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} \end{aligned} \quad (6)$$

这里 $\mathbf{R} = E\{\mathbf{x}(t) \mathbf{x}^H(t)\}$ 为阵列输入的协方差矩阵。

对权向量的约束条件设定为

$$\begin{cases} \mathbf{w}^H \boldsymbol{\alpha}(\theta_d) = 1 \\ \mathbf{w}^H \boldsymbol{\alpha}(\theta_i) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

利用 Lagrange 乘子法构造目标函数

$$J(\mathbf{w}) = \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} + \lambda (\mathbf{w}^H \boldsymbol{\alpha}(\theta_d) - 1) \quad (8)$$

对上式求偏导, 并令偏导数为零, 即可得到所求最佳权向量为

$$\mathbf{w}_{opt} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \boldsymbol{\alpha}(\theta_d)}{\boldsymbol{\alpha}(\theta_d)^H \mathbf{R}^{-1} \boldsymbol{\alpha}(\theta_d)} \quad (9)$$

公式(9)即为最优权系数矢量的表达式。

3.1 波束形成算法仿真

根据(9)式利用 MATLAB 进行仿真。仿真条件作如下假定:

- 天线阵各振元的方向图均为理想的半球形, 振元间没有互耦;
- 卫星对应的俯仰角 θ 和方位角 φ 分别为: $\theta = 60^\circ, \varphi = 30^\circ$;
- 振元叠加噪声为高斯白噪声, 卫星信号淹没在噪声中。

干扰来向分别为 $\theta_1 = 10^\circ, \varphi_1 = 150^\circ, \theta_2 = 20^\circ, \varphi_2 = 80^\circ$, 干扰功率相同且高于噪声 50 dB。仿真结果如图 5 所示。在卫星信号来向增益为 4 dB, 其附近比较平坦; 在两个干扰来向分别形成了 -105 dB 和 -107 dB 的零陷, 在偏离两方向 10° 范围内的零陷深度也能达到 -55 dB 左右。三干扰仿真结果与双干扰类似, 见图 6 所示。

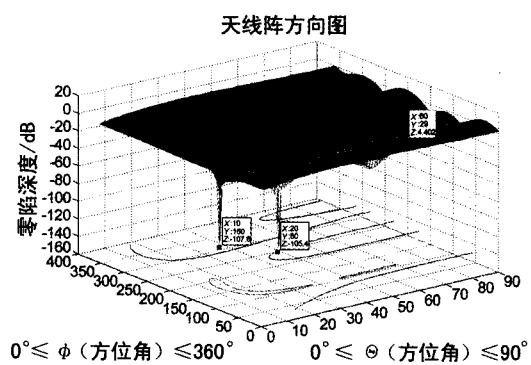


图 5 双干扰仿真结果

从仿真结果能够看出, 波束形成算法可在干扰信号来向形成较深的零陷, 同时在 GPS 信号能很好地形成指向卫星信号来向的波束, 从而保证对

其正常接收。利用波束形成算法可以得到更好的抗干扰能力。

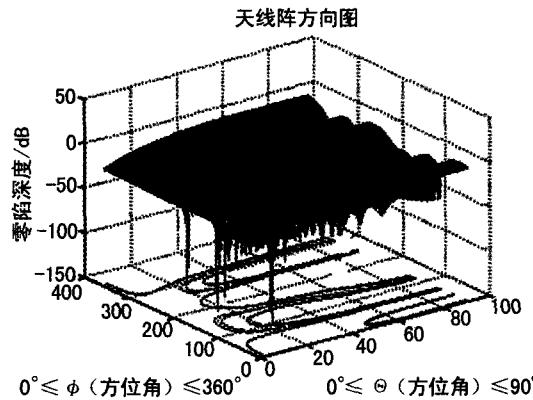


图 6 三干扰仿真结构

4 结 论

介绍了自适应天线阵列的数学描述,进行了LMS、DBF 算法的仿真。通过仿真分析,基于 4 阵元 LMS 的自适应调零算法对于单干扰的抑制达到了 68 dB,对于双干扰的抑制达到了 40 dB。该算法在工程应用中还需进一步研究 LMS 算法收敛步长对权值的收敛性、收敛速度的影响。

波束形成在原理上更为先进合理。仿真结果表明:该算法在干扰来向形成零陷的同时,在 GPS 信号来向保持了 4 dB 的增益,体现出了该算法形成零陷的优点。但该算法工程实现复杂,且 GPS 信号来向与天线阵列的姿态密切相关,求解波束指向的角度较为困难。这些问题有待于进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] 李 跃,邱致和. 导航与定位[M]. 2 版. 北京:国防工业出版社,2008.
- [2] 胡彩波,原 亮. GPS 干扰和抗干扰技术的研究[J]. 测绘与空间地理信息,2005,28(6):36-38.
- [3] 刘 鸣,袁超伟,贾 宁,等. 智能天线技术与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [4] Pratap M, Per E. 全球定位系统-信号、测量与性能[M]. 罗 鸣,曹 冲,肖雄兵,等译. 2 版. 北京:电子工业出版社,2008.
- [5] 程云鹏. 矩阵论[M]. 2 版. 西安:西北工业大学出版社,2000.

作者简介

尹 勇 (1974—),男,硕士,工程师,从事卫星定位抗干扰技术、GPS 接收机技术研究。

Study and Simulation on Adaptive LMS、DBF Algorithm For GPS Anti-jamming

YIN Yong, WANG Hui, JIN Peng-fei

(China Airborne Missile Academy, Luoyang Henan 471009, China)

Abstract: This paper presents the mathematics description of the adaptive antenna array and the basic principle of GPS anti-jamming based on LMS algorithm. The algorithm is simulated by Matlab. A Digital Beam Forming(DBF) technique which is better than LMS is introduced as well. Both its optimal weight vector is deduced. This algorithm has better effect for interfering suppression, and shows its advantage null.

Key words: Adaptive antenna array; LMS(Least Mean Square); digital beam forming; GPS anti-jamming

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)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)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),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>