

卫星导航自适应调零天线抗干扰算法研究

耿峰

(中国电子科技集团公司第二十研究所, 西安 710068)

摘要: 为了提高卫星导航接收机抗干扰能力, 深入研究了应用于卫导自适应调零天线的多线性约束自适应调零算法。对现有功率倒置自适应算法进行改进, 将阵列协方差矩阵分为干扰子空间和噪声子空间, 通过对子空间的处理提高输出信干比, 在不是很强的干扰信号方向上也形成较深“零陷”。此外, 为了降低计算的难度, 避免自相关矩阵求逆, 采用了陡降算法。通过仿真分析, 结果表明: 所研究的自适应滤波算法能够提供较高的输出信干比, 在干扰信号方向产生较深的“零陷”, 具有较好的干扰抑制能力。

关键词: 全球卫星导航系统; 调零天线; 功率倒置; 自适应

中图分类号: TN973

文献标志码: A

文章编号: 1674-7976-(2014)04-235-04

Research on Anti-Jamming Algorithm for GNSS Adaptive Nulling Antenna

GENG Feng

Abstract: In order to improve anti-jamming capability of GNSS navigation receiver, a multi-linear constrained adaptive algorithm is researched, which could be used on the GNSS adaptive nulling antenna. Furthermore, a steep drop algorithm is adopted to avoid the autocorrelation matrix inversion, thus, the difficulty of calculation is reduced greatly. Through the simulation and analysis, the results show that the proposed adaptive filtering algorithm can generate deeper "nulling" in the direction of interfering signals and able to provide higher output signal-interference ratio, thus it has better interference rejection capability.

Key words: GNSS; Nulling Antenna; Power Inversion (PI); Adaptive

0 引言

全球卫星导航系统利用导航卫星提供的信息进行导航与定位, 但是, 由于卫星信号十分微弱, 特别容易受到无意的射频干扰和敌方有意释放的干扰的影响而丧失导航定位功能。

自适应调零天线技术是一种有效的抗干扰手段, 受到了广泛关注。天线的自适应调零是一种空域自适应滤波技术, 通过限制一定的约束条件, 使

得天线性能函数达到最佳, 不同的性能函数或条件对应不同的最佳准则。天线工作时, 根据系统输入和输出自适应调整天线阵权值, 自动修正和优化天线的方向图、频率响应和极化特性, 抑制和消去干扰提高系统输出信噪比。

在空域自适应滤波算法中, 比较常见的有最小均方(LMS)算法、约束自适应算法、递推最小二乘(RLS)算法、采样矩阵求逆(SMI)算法、Howells-Applebaum(HA)算法、功率倒置(PI)自适应算法等^[1]。其中, LMS算法实现简单, 但需要有参考信号, 而且在输入信号自相关矩阵特征值分散的情况下收敛很慢; RLS算法的收敛性能优于LMS算法, 但运算量比较大; SMI算法是利用取样

信号协方差矩阵来直接估计自适应加权系数的，它能够实现与特征值散布无关的最快收敛速率，但是存在数值计算不稳定性问题；HA 算法具有与 LMS 算法相同的优缺点，而且要求获取信号来向。功率倒置自适应算法^{[2][3]}通过使自适应阵列的输出功率最小来达到抑制干扰目的算法。由于不需要预先知道干扰和有用信号的来向，这种算法在卫星通信领域得到了广泛的应用。

本文对卫星导航自适应调零天线技术——多线性约束自适应调零算法进行了研究，并且为了降低计算的难度，采用了最陡下降算法，避免自相关矩阵求逆。此外，对功率倒置自适应算法进行改进，以提高算法的输出信干比。

1 自适应调零天线

在干扰信号来向自动形成方向图零点是自适应调零天线实现信号最佳接收的重要保证。以一种四阵元自适应调零天线为例，该天线主要由四阵元的阵列天线、方向图形成网络和自适应控制单元等部分组成，如图 1 所示。

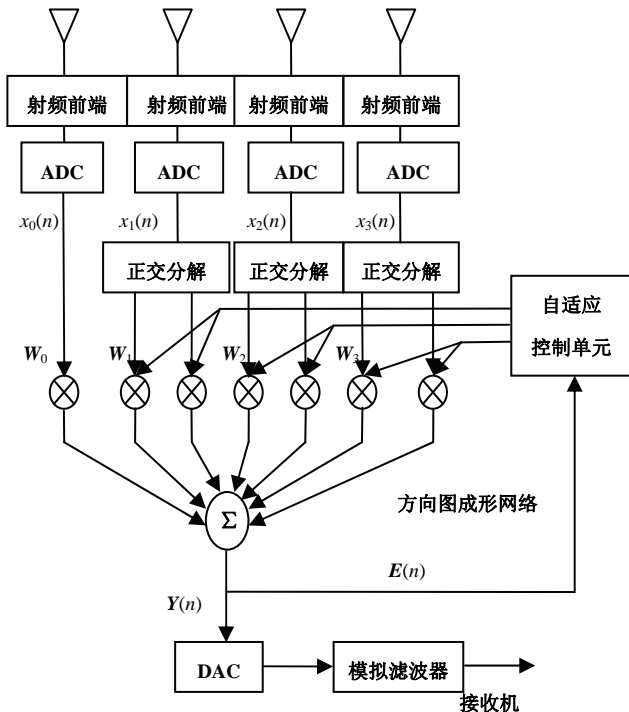


图1 自适应调零天线组成

天线阵的 4 个阵元接收到的信号分别经过由低噪放 LNA、带通滤波器 BPF 和下变频器等组成的射频前端，然后用 ADC 对中频信号采样，得到 4

路在 n 时刻采样的信号 $x_0(n), x_1(n), x_2(n), x_3(n)$ ，其中第 1 个阵元为参考阵元，其采样信号 $x_0(n)$ 经过固定加权 w_0 后作为参考信号送给自适应控制单元，其他阵元的采样信号则通过 IQ 分离送给加权乘法器。选择在数字域进行 IQ 分离主要是可以把 IQ 通道的不平衡度降到最低水平。加权乘法器的复权值 w_1, w_2, w_3 可改变辅助阵元的 IQ 两路信号的幅度和相位，相应地改变了阵列天线方向图的零点指向。所有阵元输出信号 $e(n)$ 作为误差信号送入自适应控制单元，以一定的准则进行自适应运算后，对加权乘法器进行权值优化，使得合成波束在干扰信号来向产生零陷。同时误差信号 $e(n)$ 也作为阵列输出信号 $y(n)$ 经过 DAC 和上变频等方式送给卫导接收机。

2 多线性约束自适应调零算法

2.1 多线性约束最小方差 (MLCMV) 准则

多线性约束最小方差准则的主要思想是，在满足多个线性约束条件下，使输出的信号功率最小。由于接收机实际接收到的有用信号十分微弱，而干扰信号又很强，使用 MLCMV 准则求得的最优权向量可以在有干扰的方向上形成深陷的零点，从而达到抗干扰的目的。MLCMV 准则的具体数学描述如下^[4]：

$$\begin{cases} \text{minimize } P_{\text{out}} = E\{Y(n)^2\} = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{w} \\ \text{s.t. } \mathbf{w}^H \mathbf{A}_g = \mathbf{c} \end{cases} \quad (1)$$

式中， P_{out} 为信号输出功率， \mathbf{w} 为支路加权系数向量， $\mathbf{w} = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ \dots \ w_m]^T$ ， m 为阵元数， \mathbf{R}_{xx} 为阵列输入信号的协方差矩阵， \mathbf{c} 为期望信号方向向量， $\mathbf{c} = [1 \ \dots \ 1 \ 0 \ \dots \ 0]^T$ ， \mathbf{A}_g 为期望信号波到达方向角对应的方向向量，可表示如下：

$$\mathbf{A}_g = [s_1(\theta_1), s_2(\theta_2), \dots, s_p(\theta_p), s_{p+1}(\theta_{p+1}), \dots, s_q(\theta_q)]^T$$

其中， p 表示期望信号数， q 表示干扰信号数。根据拉格朗日乘法，可得最优权向量 \mathbf{w}_{opt} 和最小输出功率 P_{outmin} 分别为：

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_{\text{opt}} &= \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{A}_g (\mathbf{A}_g^H \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{A}_g)^{-1} \mathbf{c} \\ P_{\text{outmin}} &= \frac{1}{\mathbf{A}_g^H \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{A}_g} \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 功率倒置 (PI) 算法

在多线性约束最小方差 (MLCMV) 最佳准则中, 令约束条件 $\mathbf{w}^H \mathbf{S}_0 = 1$, $\mathbf{S}_0 = [1 \ 0 \ \dots \ 0]^T$ (期望信号方向向量), 即要求天线阵列在任何情况下都要确保 θ 方向的增益为 1。根据式 (1), 选择 $\mathbf{w} = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ \dots \ w_m]^T$ 的最佳值使输出功率 P_{out} 最小。输出功率 P_{out} 表达式如下:

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} &= E\left\{|\mathbf{Y}(n)|^2\right\} \\ &= E\left\{\left[\mathbf{w}^H \mathbf{X}(n)\right]\left[\mathbf{w}^H \mathbf{X}(n)\right]^H\right\} = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{\text{xx}} \mathbf{w} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_{\text{xx}} = E\left\{\mathbf{X}(n)\mathbf{X}(n)^H\right\} = \mathbf{A}\mathbf{M}\mathbf{A}^H + \sigma^2 \mathbf{I} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{X}(n) = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$ 为阵列输入矢量, $\mathbf{Y}(n) = \mathbf{w}^H \mathbf{X}(n)$ 为阵列输出。 \mathbf{M} 为信号的相关矩阵, $\mathbf{M} = E\left\{\mathbf{S}(n)\mathbf{S}(n)^H\right\}$, σ^2 为噪声功率, \mathbf{A} 为阵列导引矢量矩阵, $\mathbf{A} = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_d)]$, $a(\theta_k)$ 为第 k 个干扰信号的导引矢量, θ_k 为干扰入射方向, $k \in [1, d]$ 。

构建拉格朗日代价函数:

$$L(\mathbf{w}) = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{\text{xx}} \mathbf{w} + \lambda (\mathbf{w}^H \mathbf{S}_0 - 1) \quad (5)$$

式中, λ 为拉格朗日乘数。令 $\nabla_{\mathbf{w}} L(\mathbf{w}) = 0$, 最优权向量 \mathbf{w}_{opt} 和最小输出功率 P_{outmin} 分别为:

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = P_{\text{outmin}} \mathbf{R}_{\text{xx}}^{-1} \mathbf{S}_0 \quad (6)$$

$$P_{\text{outmin}} = \left(\mathbf{S}_0^H \mathbf{R}_{\text{xx}}^{-1} \mathbf{S}_0\right)^{-1} \quad (7)$$

为了降低计算难度, 不对 \mathbf{R}_{xx} 进行求逆运算, 采用最陡下降 (Steepest Descent, SD) 法^[5]得到支路加权系数向量 \mathbf{w} 的递归方程, 过程如下:

设置一个支路加权系数向量 \mathbf{w} 的初始值 $\mathbf{w}(0) = [1, 0, 0, \dots, 0]^T$, 再让 \mathbf{w} 沿 P_{out} 减小最快的方向——负梯度方向变化, 得到

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \mu \nabla_{\mathbf{w}} P_{\text{out}} + \alpha \mathbf{S}_0 \quad (8)$$

式中, μ 为可调步长因子, $\nabla_{\mathbf{w}} P_{\text{out}}$ 为输出功率 P_{out} 对支路加权系数向量 \mathbf{w} 的梯度, α 使得 $\mathbf{w}^H \mathbf{S}_0 = 1$ 恒成立。已知 $\mathbf{w}(n+1)^H \mathbf{S}_0 = 1$, 因此, $[\mathbf{w}(n) - \mu \nabla_{\mathbf{w}} P_{\text{out}} + \alpha \mathbf{S}_0]^H \mathbf{S}_0 = 1$, 从而可得

$$\alpha = \frac{1 - [\mathbf{w}(n) - \mu \nabla_{\mathbf{w}} P_{\text{out}}]^H \mathbf{S}_0}{\mathbf{S}_0^H \mathbf{S}_0} \quad (9)$$

将 α 代入式 (8) 可得支路加权系数向量的递推公式为:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \mu \nabla_{\mathbf{w}} P_{\text{out}} + \mu \frac{\mathbf{S}_0 \mathbf{S}_0^H}{\mathbf{S}_0^H \mathbf{S}_0} \nabla_{\mathbf{w}} P_{\text{out}} \quad (10)$$

2.3 算法改进设计

功率倒置 (PI) 算法能够在强干扰信号方向上形成很深的“零陷”, 具有很好的强干扰抑制能力, 但是对于不太强的或者弱干扰信号的抑制能力较弱, 即就是在该信号方向上不能形成较深的“零陷”, 针对这一问题, 对 PI 算法进行改进, 采用特征空间法将阵列协方差矩阵分为干扰子空间和噪声子空间, 通过对子空间的处理提高 PI 算法的输出信噪比。对接收信号矢量协方差矩阵 \mathbf{R}_{xx} 进行特征值分解如下:

$$\mathbf{R}_{\text{xx}} = \sum_{i=1}^J \lambda_i \mathbf{q}_i \mathbf{q}_i^H = \sum_{i=1}^j \lambda_i \mathbf{q}_i \mathbf{q}_i^H + \sum_{i=j+1}^N \sigma_n^2 \mathbf{q}_i \mathbf{q}_i^H \quad (11)$$

其中, λ_i 为矩阵 \mathbf{R}_{xx} 的 J 阶子矩阵的第 i 个特征值, σ_n^2 为矩阵 \mathbf{R}_{xx} 的 $N - J$ 阶子矩阵的最小特征值 (每个天线阵元产生的噪声功率), \mathbf{q}_i 为该特征值对应的特征矢量, 由于 \mathbf{R}_{xx} 为埃尔米特矩阵, 所以对应于不同的特征值, 其特征矢量相互正交。从而有

$$\mathbf{R}_{\text{xx}}^{-1} = \sum_{i=1}^j \lambda_i^{-1} \mathbf{q}_i \mathbf{q}_i^H + \sum_{i=j+1}^N \sigma_n^{-2} \mathbf{q}_i \mathbf{q}_i^H \quad (12)$$

将式 (12) 代入式 (6) 可得

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = P_{\text{outmin}} \left(\sum_{i=1}^j \lambda_i^{-1} \mathbf{q}_i \mathbf{q}_i^H + \sum_{i=j+1}^N \sigma_n^{-2} \mathbf{q}_i \mathbf{q}_i^H \right) \mathbf{S}_0 \quad (13)$$

$$P_{\text{outmin}} = \frac{1}{\mathbf{S}_0^H \left(\sum_{i=1}^j \lambda_i^{-1} \mathbf{q}_i \mathbf{q}_i^H + \sum_{i=j+1}^N \sigma_n^{-2} \mathbf{q}_i \mathbf{q}_i^H \right) \mathbf{S}_0} \quad (14)$$

由式 (13) 可以看出, 功率倒置的最优加权是各特征值对应的特征矢量的加权和。前一项为干扰特征值对应的特征矢量加权和, 后一项是噪声特征值对应的特征矢量和。对于强干扰源, 其特征较大, 倒数比较小, 对于所形成的最优加权贡献比较小, 所以能在强干扰的地形成较深的零陷。对于弱干扰, 其特征值要接近噪声特征值, 舍弃第一项, 只采用噪声特征矢量的加权和作为最优加权, 则可以在干扰的地方形成更深的零陷。

3 仿真分析

以对称圆阵为例，阵元个数 $m = 7$ ，假设位于圆心的 1 号阵元为参考阵元，所设计的天线波数 $k = 2\pi / \lambda$ ，阵列圆半径 $d = \lambda / 2$ ，其中， λ 为射频载波的波长。共有 2 个互不相关的信号入射到阵列上，其中一个为卫星信号，另外一个为宽带干扰信号。入射信号的来向表示为 φ ，为信号与 x 轴的夹角，其对应的阵列方向矢量为：

$$\hat{\mathbf{a}}(\mathbf{r}_d) = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-jkd \cos \theta \cos \varphi} \\ \vdots \\ e^{-jkd \cos \theta \cos \left(2\pi \times \frac{5}{6} - \varphi\right)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

仿真条件为有用导航信号入射角 80° ，干扰信号入射角 150° 。输入信噪比 -30.15dB ，输入信干噪比为 -48.6dB ，热噪声功率 $\sigma^2 = 1$ 。

功率倒置算法的输出信干比为 -22.76dB 。从图 2 中可以看出，功率倒置算法在干扰信号方向产生了较深的“零陷”，深度达到 -95dB ，具有较好的干扰抑制能力。

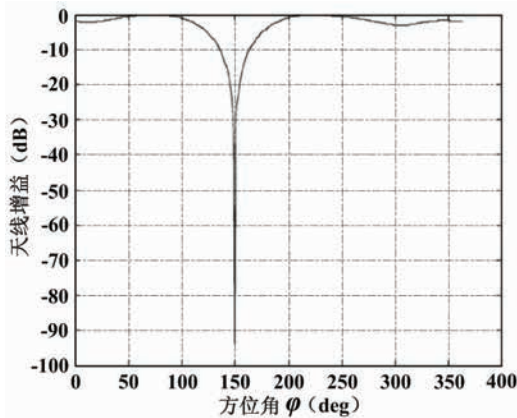


图2 波束方向图（径向）

在相同条件下，有用导航信号和干扰信号入射

角不变，输入信噪比 -30.15dB ，干扰信号减弱，输入信干噪比为 -67.7dB ，热噪声功率 $\sigma^2 = 1$ 。功率倒置算法在干扰信号方向产生的“零陷”深度达到 -35.12dB ，因此，改进算法在弱干扰条件下也具有较好的干扰抑制能力。

4 结论

为了提高卫星导航接收机抗干扰能力，本文深入研究了应用于卫星导航自适应调零天线的多线性约束自适应调零算法。为了降低计算得难度，避免自相关矩阵求逆，采用了陡降算法。另外，采用了特征空间法将阵列协方差矩阵分为干扰子空间和噪声子空间，通过对子空间的处理提高了 PI 算法输出信噪比。仿真结果表明改进的功率倒置自适应算法有着良好的抗干扰效果，即使在弱干扰信号条件下也能够干扰波达方向形成深陷的零点。

参考文献：

- [1] 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: 129 -138.
- [2] Compton R T. The Power-Inversion Adaptive Array: Concept and Performance [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1979, 15:803-814.
- [3] Gecan A , Zoltowski M. Power Minimization Techniques for GPS Null Steering Antenna [C]. Proceedings of ION GPS -95, 1995:861-868.
- [4] 王柯. 基于阵列天线的 GPS 抗干扰系统的研究与开发 [D]. 长安大学. 2011.
- [5] L C Godara. Application of antenna arrays to mobile communications II beam forming and direction of arrival considerations [J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(8):1195-1245.

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,一直致力和专注于微波、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>