

一种应用于 GPS 抗干扰的改进 LCMV 算法

叶建杰

(西安电子科技大学 电子工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要 研究了一种基于 LCMV 算法的自适应波束形成算法。结合 GPS 卫星信号的特点将该算法应用于 GPS 接收机的抗干扰系统中。文中对该自适应算法进行了推导和 Matlab 仿真, 并使之与 LCMV 算法的仿真效果作比较, 结果表明, 该算法能更好地抑制干扰、保留期望信号。

关键词 全球定位系统; 线性约束最小方差算法; 自适应调零算法; 抗干扰

中图分类号 P228.4 **文献标识码** A **文章编号** 1007-7820(2013)02-156-03

Application of an Improved LCMV Algorithm in GPS Anti-jamming

YE Jianjie

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract An adaptive beamforming algorithm based on LCMV algorithm is studied in this paper. Combined with the feature of the GPS satellite signal, this algorithm is applied in anti-jamming system of GPS receiver. The adaptive algorithm is derived in detail, and the simulation models of these two algorithms are constructed in MATLAB. The results show that the proposed adaptive algorithm can retain the desired GPS signal while suppressing the interference signal.

Keywords GPS; LCMV; adaptive nulling algorithm; anti-jamming

全球定位系统(Global Positioning System, GPS)采用“多星、高轨、测时、测距”体制,实现了全球覆盖、全天候、高精度、实施连续导航定位^[1]。GPS 主要由 3 大部分组成:空间星座、地面监控和用户设备^[2]。GPS 空间卫星星座由 24 颗卫星组成。GPS 卫星发射 L_1 和 L_2 两种载波,频率分别为 1 575.42 MHz 和 1 227.60 MHz。 L_1 上调制有 P 码、C/A 码及导航电文数据, L_2 上仅调制了 P 码和导航电文数据。但由于这些信号是深埋在噪声信号下的微弱信号,当它们到达地面时最小信号功率约为 -160 dBW,所以 GPS 接收机易受干扰而无法正常工作。

针对这种情况,自适应调零天线技术在移动通信领域成为研究热点,其中出现了多种算法,如最小均方(LMS)算法^[3]、阿普尔鲍姆(HA)算法^[4]以及采样矩阵求逆算法^[5]等。文中根据导航卫星接收机的特点和自适应天线理论,研究了一种基于 LCMV 算法^[6]的适用于 GPS 接收机的自适应波束形成算法,给出了递推公式,并通过 7 阵元的均匀线阵在 Matlab 中进行了仿真,证明了该算法的有效性。

1 自适应天线原理

自适应天线系统是由多元天线阵和信息处理器组成的系统。天线工作时,信息处理器根据系统的输入和输出,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。

自适应调零天线利用扩频系统伪随机码信号深埋在热噪声中的特点,把若干个独立天线阵子的输出自动合并,使进入接收机系统的总输入功率减至最低限度,可以有效地促使强干扰源电平降低到热噪声水平。如图 1 所示,自适应调零天线包括多个阵元天线,每个天线单元后接一个独立的信号通道,最后用相加器进行合并输出。算法处理器对从天线经信道送来的信号进行抽样处理后,反过来对各个信道信号进行加权调整,相当于使各阵元的增益或相位发生改变,从而在天线阵的方向图中产生对着干扰源方向的零点,以增加抗干扰的性能。

零点的个数由天线阵元的个数决定,一般 N 元阵可产生 $N-1$ 个零点。零点的深度受同一时间控制的零点数限制。自适应调零技术能够有效处理宽频带的噪声和窄带干扰源,这种波束控向技术可以把天线接收方向图的增益聚集在可以利用的导航卫星的方向。效果理想的话,卫星导航接收机上自适应调零天线可

收稿日期: 2012-08-20

作者简介: 叶建杰(1987—),男,硕士研究生。研究方向为:基于自适应调零的 GPS 抗干扰技术。E-mail: 675904689@qq.com

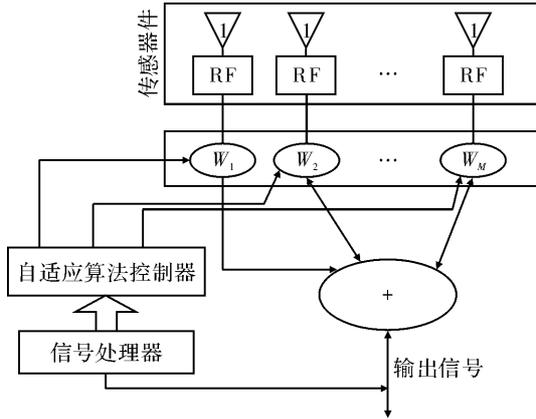


图1 自适应天线阵结构图

以使接收机的抗干扰性能提高 40 ~ 50 dB。

2 算法描述

2.1 LCMV 算法

LCMV 算法在期望方向的增益保持为 1, 同时抑制其他方向的信号, 在这些方向上形成零陷。其准则为在某种约束条件下使阵列输出的方差最小。波束形成器求解的优化问题可表述为

$$\min_{\mathbf{W}} \mathbf{W}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{W} \text{ subject to } \mathbf{W}^H \mathbf{a}_d = 1 \quad (1)$$

这里 \mathbf{a}_d 是期望信号的方向向量, 已知。

LCMV 波束形成器试图使噪声及来自非期望方向的任何干扰的功率最小, 但又保持在期望方向上的信号功率不变, 缺点为必须已知期望分量的波达方向, 其解为

$$\mathbf{W}_{\text{MVDR}} = [\mathbf{a}_d^H \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{a}_d]^{-1} \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{a}_d \quad (2)$$

2.2 基于 LCMV 的改进自适应算法

由于自适应技术的迅速发展, 在经典自适应波束形成算法的基础上出现了各种各样的算法, 在众多自适应算法中, 抽样矩阵求逆算法的一些改进算法如抽样矩阵梯度算法一样, 是快速的开环算法。文献[7]结合抽样矩阵梯度算法, 对严格约束的最小功率自适应算法作了改进, 导出了具有严格约束最小功率的抽样矩阵梯度算法 (CSMG)。此波束形成算法由波束方向约束度而定, 自适应调零能力较强, 收敛速度也较快。

LCMV 波束形成算法是严格约束最小功率自适应算法, 其最优权向量如式(2)所示, 在此式中有相关矩阵求逆, 当天线较大时, 运算较大, 且还需考虑矩阵是否奇异, 因此实际上并不适宜。下面给出 CSMG 波束形成算法的推导过程。约束最小功率准则即在

$$\mathbf{W}^H \mathbf{a}_d = \mathbf{a}_d^H \mathbf{W} = 1 \quad (3)$$

约束条件下, 使 $\mathbf{W}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{W}$ 最小。

构成拉格朗日函数

$$L(\mathbf{W}) = \mathbf{W}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{W} + \lambda (\mathbf{W}^H \mathbf{a}_d - 1) \quad (4)$$

由梯度算法得

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) + \frac{1}{2} \mu [-\nabla(L(\mathbf{W}))] \quad (5)$$

式中, $\lambda(n)$ 随每一级递推而变, 且逐次迭代的 $\mathbf{W}(n+1)$ 都必须满足约束条件

$$\mathbf{a}_d^H \mathbf{W}(n+1) = 1 \quad (6)$$

在式(5)的两边左乘 \mathbf{a}_d^H 得

$$\mathbf{a}_d^H \mathbf{W}(n+1) = \mathbf{a}_d^H \mathbf{W}(n) - \mu \left[\mathbf{a}_d^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{W}(n) + \frac{1}{2} \mathbf{a}_d^H \mathbf{a}_d \right]$$

$$\lambda(n) \Rightarrow \lambda(n) = \frac{2}{\mu} (\mathbf{a}_d^H \mathbf{a}_d)^{-1} [\mathbf{a}_d^H \mathbf{W}(n) - 1] - 2(\mathbf{a}_d^H \mathbf{a}_d)^{-1} \mathbf{a}_d^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{W}(n) \quad (7)$$

把式(7)代入式(5)得

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) - \mu \left[\mathbf{R}_{xx} \mathbf{W}(n) + \frac{1}{2} \mathbf{a}_d \lambda(n) \right] =$$

$$\left[\mathbf{I} - \frac{\mathbf{a}_d \mathbf{a}_d^H}{\mathbf{a}_d^H \mathbf{a}_d} \right] [\mathbf{I} - \mu \mathbf{R}_{xx}] \mathbf{W}(n) + \frac{\mathbf{a}_d}{\mathbf{a}_d^H \mathbf{a}_d} \quad (8)$$

相关矩阵 \mathbf{R}_{xx} 不能精确获得, 因此只能取它的估计值

$$\mathbf{R}_{xx}(n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{X}^*(i) \mathbf{X}^T(i) \quad (9)$$

于是得 CSMG 算法的描述

$$\begin{cases} \mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) - \mu \mathbf{P} \mathbf{R}_{xx}(n) \mathbf{W}(n) \\ \mathbf{W}(0) = \mathbf{B} \\ \mathbf{P} = \mathbf{I} - \frac{\mathbf{a}_d \mathbf{a}_d^H}{\mathbf{a}_d^H \mathbf{a}_d} \\ \mathbf{B} = \frac{\mathbf{a}_d}{\mathbf{a}_d^H \mathbf{a}_d} \end{cases} \quad (10)$$

这种改进算法采用最佳下降的递推方法, 因此运算量不大, 而且采用抽样矩阵来近似相关矩阵 \mathbf{R}_{xx} , 所以收敛速度和抽样矩阵梯度算法一样快, 可以证明 CSMG 波束形成算法有

$$\|\mathbf{W}(n+1) - \mathbf{W}_{\text{opt}}\| = o\left[\frac{\lg(n)}{\sqrt{n}}\right], n \text{ 足够大} \quad (11)$$

即采用 CSMG 算法具有超过 $o[\lg(n)/\sqrt{n}]$ 的量级的收敛速度, 且收敛步长可以从 $0 < \mu < \frac{1}{\lambda_{\max}}$ 增加到 $0 < \mu < \frac{2}{\lambda_{\max}}$, 收敛速度明显提高。

3 计算机仿真

为验证改进自适应算法 (CSMG) 的有效性, 在计算机上进行仿真实验。仿真采用 7 个各向同性的天线阵元组成的均匀直线阵, 阵元间隔 $\lambda/2$, 阵元方向函数为 $f_i(\theta) = 1 + e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d(2-1)\sin(\theta)} + \dots + e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d(7-1)\sin(\theta)}$ 。期望信号波达方向为 5° , 两个干扰信号波达方向分别为 40° 和 70° , 并且期望信号、干扰信号互不相关, 期望信号和干扰信号也互不相关。图 2 ~ 图 3 分别为 LCMV

算法和改进的自适应算法(CSMG)的抑制干扰形成的波束仿真实验图。

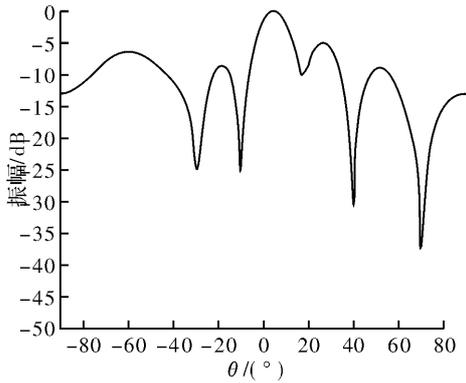


图2 两个干扰时 LCMV 算法波束图

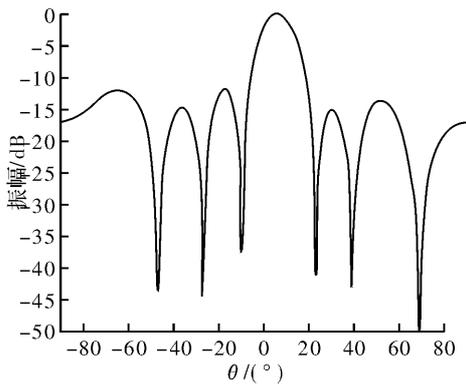


图3 两个干扰时 CSMG 算法波束图

对比图2和图3可以看出,主波束都对准了期望方向,但在40°和70°这两个干扰方向,用改进的自适应算法形成的零陷更深点(改进算法的衰减增益约为-42 dB和-50 dB,而LCMV的为-30 dB和-37 dB),这样更能抑制干扰信号,提高输出信号的信干噪比。而且改进的自适应算法不需要知道期望的波达方向,对比 LCMV 算法有较大提高。

当再增加两个干扰信号,干扰信号的波达方向为(-30°, -10°, 40°, 70°)时,其他仿真条件与图2~图3时相同,仿真结果如图4和图5所示。

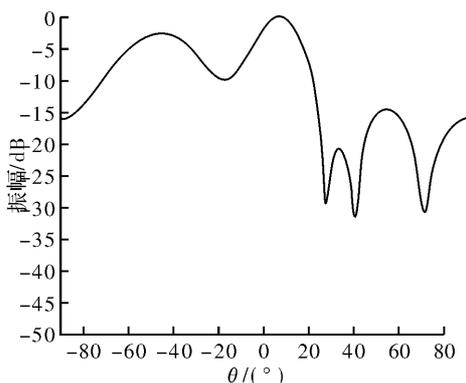


图4 四个干扰时 LCMV 算法波束图

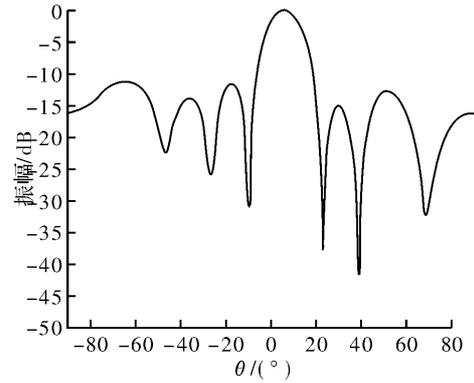


图5 四个干扰时 CSMG 算法波束图

从图4中可以看出当干扰信号增加到4个时,用 LCMV 算法难以实现在-30°和-10°方向上的零陷。而图5依然在4个干扰方向有平均约-32 dB的衰减增益,但是比较图5和图3,图5的零陷没有图3深,在40°和70°方向上,图5的衰减增益平均约为-35 dB,而图3的平均约为-46 dB,但还是能较有效地抑制干扰信号。从以上分析可以得出改进的自适应算法比 LCMV 算法在干扰方向产生的零陷深,在干扰增多时改进算法的零陷较明显而,LCMV 算法则较差。

4 结束语

论述了加强 GPS 接收机抗干扰能力的技术方案,介绍了基于 LCMV 算法改进的自适应调零算法。通过均匀直线阵在计算机上的仿真可以得出,LCMV 算法应用于 GPS 抗干扰具有一定的局限性,而改进的自适应算法(CSMG)能更好地在干扰方向产生波束凹陷,实现抑制干扰信号的目的,并且收敛速度更快。

参考文献

- [1] 袁建平,罗建军,岳晓奎,等. 卫星导航原理与应用[M]. 北京:中国宇航出版社,2003.
- [2] 王惠南. GPS 导航原理与应用[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [3] WIDROW B, MCCOOL J, BALL M. The complex LMS algorithm [J]. Proceedings of the IEEE, 1975(4): 719-720.
- [4] APPLEBAUM S P. Adaptive arrays [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1976, 24(5): 585-595.
- [5] HOROWITZ L L, BLATT H, BRODSKY W G, et al. Controlling adaptive antenna arrays with the sample matrix inversion algorithm [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1979, 15(6): 840-849.
- [6] 张小飞,汪飞,徐大专. 阵列信号处理的理论和应用[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
- [7] 王忠,张继宏,黄顺吉. 一种改进的数字波束形成快速自适应算法[J]. 电子对抗, 1996(4): 16-23.