

带波束指向的 GPS 抗干扰技术研究

董李梅

(成都天奥信息科技有限公司, 成都 610041)

摘要: 针对 GPS 卫星接收系统在存在强宽带压制式干扰无法正常工作的情况, 研究了基于阵列天线的自适应抗干扰技术。提供了采用约束的最小方差准则实现抗干扰算法, 算法充分利用了信号和干扰空间角度的不同进行滤波, 对有用信号进行保护, 使得波束在指向卫星信号的同时最大程度抑制干扰信号。给出了算法的硬件实现方案, 最后通过仿真试验对算法的抗干扰能力进行了分析, 验证了算法的有效性。

关键词: GPS; 抗干扰; 阵列天线; 波束

中图分类号: TN973 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2016)02-0053-06

GPS Anti-jamming Technology Research with Beam Forming

DONG Li-mei

(Chengdu Spaceon Technology Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: For the case of GPS satellite reception system does not work in the presence of broadband interference, we research the adaptive anti-jamming technology based on the array antenna. A constrained minimum variance algorithm is given to suppress the interference. The Algorithm utilizes the difference of angles between signal and interference to filter interference, so that the beam can point to the satellite signals, protect the useful signals and greatest suppress the interference. The hardware implementation is given based on the algorithm. Finally, we simulated the algorithm and analyzed it in detail, verified the effectiveness of the algorithm.

Key words: GPS; Anti-jamming; Array antenna; Beam

0 引言

随着 GPS 卫星导航系统在民用和军用领域的迅速推广, 其易于受到电磁干扰的问题也日益凸显出来。原因在于卫星处于离地球表面很远的轨道上, 卫星的发射功率不可能很大, 其信号传播到地球表面时必然是很弱的; 同时国际电信联盟对其到达地面时的功率谱密度作了严格的限制, 以避免对其他系统产生干扰。因此, 接收机在地面上的接收信号功率很弱, 大约为 -130dBm 左右, 深埋在接收机的热噪声之中, 极易受到干扰, 包

括故意的和无意的干扰, 接收机带内或带外的干扰。其中覆盖整个接收带宽的宽带干扰最为常见, 也极具破坏性。针对这种干扰, 采用频域处理的方式已经无法分辨有用信号和干扰信号。自适应调零天线系统^[1-2]是一种行之有效的方法。它利用信号和干扰空间角度的不同进行空域滤波技术, 在干扰的方向上产生波束零陷, 滤除强干扰信号, 从而保证 GPS 卫星系统的正常工作。同时, 在抗干扰算法中进行约束处理, 抑制干扰的同时保护有用的卫星导航信号。

收稿日期: 2015 - 12 - 10; 修订日期: 2016 - 01 - 06。

作者简介: 董李梅 (1982 -), 女, 工程师, 主要从事导航抗干扰系统方面的研究。

E-mail: 76533023@qq.com

1 抗干扰天线系统模型

1.1 约束的最小方差准则抗干扰算法

线性约束最小方差 (LCMV) 准则也称为最小方差准则, 该准则进行抗干扰的基本原理是对多路阵列信号进行约束, 调整权值使输出信号方差最小, 即使输出信号功率最小, 在抗干扰的同时, 保证有用信号方向的方向图与原方向图接近, 以达到波束保形的目的。

假定期望信号导向矢量为 \mathbf{a}_s , 同时存在来自其他方向的干扰, 阵列时刻 t 的接收数据为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{a}_s s(t) + \mathbf{J}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

式中, \mathbf{a}_s 为信号包络矢量, $s(t)$ 为有用信号矢量, $\mathbf{J}(t)$ 为干扰信号矢量, $\mathbf{n}(t)$ 为接收机内部噪声矢量。

假设天线阵元数为 M , 最小方差无失真准则就是合理选择各支路的权值 $\mathbf{w}_s = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_M]$, 使得输出功率最小^[4-5]。抗干扰后输出的信号为

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{w}_s^T \mathbf{X} \quad (2)$$

在线性约束最小均方误差 (LCMV) 准则下做自适应滤波, 用数学公式可表述为:

$$\min_{\mathbf{w}_s} \mathbf{w}_s^H \mathbf{R} \mathbf{w}_s \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \mathbf{w}_s^T \mathbf{S}(\theta, \varphi) = 1 \quad (4)$$

其中, $\mathbf{S}(\theta, \varphi)$ 表示期望信号导向矢量, 上标 H 表示共轭转置, \mathbf{w}_s 为自适应权矢量, \mathbf{R} 为采样数据的协方差矩阵。

记采样快拍为 M , 则 \mathbf{R} 可通过式 (5) 估计得到

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M \mathbf{x}(t) \mathbf{x}^H(t) \quad (5)$$

以 $\mathbf{w}_s^T \mathbf{S}(\theta, \varphi) = 1$ 为条件, 可以构成拉格朗日函数

$$L(\mathbf{W}) = \mathbf{W}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{W} + \lambda (\mathbf{W}^T \mathbf{S} - 1) \quad (6)$$

令 $\nabla_{\mathbf{W}} L(\mathbf{W}) = 0$, 得到最佳加权矢量和最小输出功率:

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = P_{\text{outmin}} \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{S}^*(\theta, \varphi) \quad (7)$$

$$P_{\text{outmin}} = (\mathbf{S}^T(\theta, \varphi) \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{S}^*(\theta, \varphi))^{-1} \quad (8)$$

为了避免对 \mathbf{R}_{xx} 求逆寻求 \mathbf{w}_{opt} , 先设置一个 \mathbf{w} 的初值 $\mathbf{w}(0)$ ^[6]。可以想象, 沿着 ξ 减少的方向调

整 \mathbf{w} , 应该可以找到 \mathbf{w}_{opt} 。因为梯度的方向是 ξ 增长最快的方向, 所以负的梯度方向就是 ξ 减少最快的方向。这样, 自然会采用如下的递推公式来调整 \mathbf{w} 以寻求 \mathbf{w}_{opt} ^[7-8]。

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) - \mu \mathbf{A} \mathbf{X}^*(n) \mathbf{X}^T(n) \mathbf{W}(n) \quad (9)$$

$$\mathbf{A} = 2\mu [\mathbf{I} - (\mathbf{S} \mathbf{S}^T) / (\mathbf{S}^T \mathbf{S})] \quad (10)$$

其中, μ 为迭代步长, 它决定了算法的收敛速度。

$\mathbf{S}(\theta, \varphi)$ 代表了不同的约束方向的方向矢量。可以根据导向矢量的表达式计算约束不同卫星方向的方向矢量数值。当方向导向矢量 $\mathbf{S}(\theta, \varphi) = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$ 时代表约束法线方向, 即天顶方向。在实际的工程应用中, 由于接收的卫星信号仰角较高, 而干扰一般从地面发射, 位于低仰角, 处于天顶的几率较小, 为此, 约束法线方向可以保护天顶附近的卫星信号, 具有一定的实用价值。

功率倒置算法 (PI) 是线性约束最小方差准则抗干扰算法的一种特殊形式。即当 $\mathbf{S}(\theta, \varphi) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 时, $\mathbf{S}(\theta, \varphi)$ 不具备约束任何卫星信号方向的物理意义, 仅使得参考阵元 (阵元 1) 的增益始终为 1, 并最小化输出功率。

功率倒置算法 (PI) 本身在卫星方向上没有特定的控制模式, 在抑制干扰信号的同时, 卫星信号将可能被系统削弱。

1.2 信干噪比 SINR 分析

为了定量的评估不同抗干扰算法的抗干扰能力, 引入输出信干噪比 SINR, 由于在经过相关器后, 干扰会变成噪声形式, 定义输出信干噪比如下

$$\text{SINR} = \frac{\text{输出信号功率}}{\text{输出噪声功率} + \text{输出干扰功率}}$$

SINR 门限值是影响后端捕获和跟踪的一项重要指标。当存在大功率干扰时, 如果不采取任何抗干扰处理, 输出信噪比大大降低, 如果超出性能正常工作的最小 SINR 时, 系统将完全失效。自适应调零天线的一个关键技术指标是抗干扰的同时最大限度保证有用信号不被抑制, 即最大限度地提高 SINR。

采用波束指向的抗干扰算法在期望信号方向进行保护, 可以为约束方向带来信号增益, 理想

的信号增益可以达到 $10\log_{10}(M)$ 。以四阵元天线为例,进行波束约束可以对信号带来 6dB 的增益。

1.3 算法硬件实现

带波束指向的抗干扰技术通过对卫星信号加以保护,提升了 SINR。但卫星信号的来向必须靠接收机定位后获取,并且在动态平台下必须具有能够实时跟踪平台航向、姿态(俯仰和横滚)的惯导辅助信息,才能保持对卫星信号的跟踪保护。具体工程化应用时需要利用平台惯导或捷联惯导实时获得航姿数据更新,具体实施方案如图 1 所示。

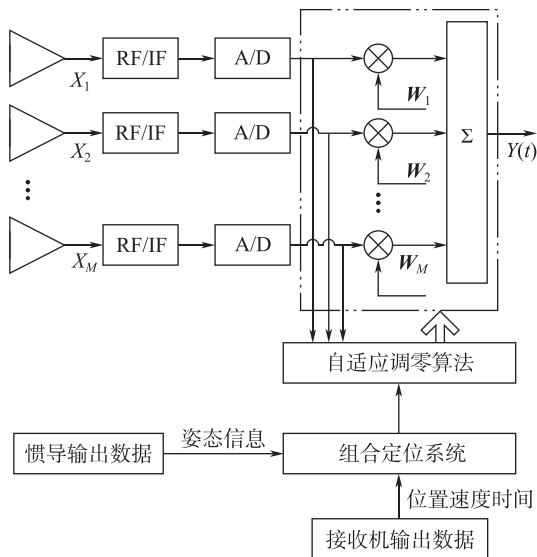


图 1 抗干扰算法硬件实现结构框图

Fig. 1 Block diagram of hardware implementation of anti-jamming algorithm

从图 1 可以看出,硬件设计主要由天线阵面、信道、自适应处理模块、组合定位系统四个部分组成。它采用包括多个阵元的天线阵,阵中各天线单元经各自通道混频、中放、中频采样后,与一个自适应数字信号处理器相联,信号处理器对从各天线通道送过来的信号进行处理后,结合组合定位系统提供的卫星信号相对于阵列天线的方位和俯仰信息,对各阵元接收的信号进行相应的幅度增益和相移的加权调节,从而在总的天线阵的方向图中产生对着干扰源方向的零点,以抑制或降低干扰的性能,并保护有用的卫星信号。最后将抑制干扰后的合成信号输出,送给后端的导航定位处理机。

天线的阵列结构是自适应调零天线的一个重要组成部分。对于 GPS 接收系统,为保证全方位导航信号的接收,阵列天线必须选择全向天线。阵元个数、阵元间距的选择等对算法性能会产生很大的影响。阵元个数的增加能够获得更高的信号增益,同时,阵元个数决定了功率倒置算法的处理自由度, M 元阵列最多能够产生的零陷为 $M-1$ 个^[3]。然而,由于阵元个数增加带来的是体积、重量和成本的增加,在实际工程应用中,必须综合考虑这些因素,在保证算法性能的情况下,尽可能采用更少的阵元数目。

2 算法抗干扰能力分析

2.1 仿真建模

仿真环境参照强干扰环境下的接收机环境进行设置,以一颗 GPS 卫星信号的接收为例,有用信号为扩频信号,带宽为 2M。信号的功率设置为 -130dBm ,输入信噪比设为 -30dB 。

阵列形式采用四元阵,具体方式如图 2 所示,实心点代表天线阵元,阵元 $d = \lambda/2$, λ 为卫星导航信号的波长。设干扰信号 $J(t)$ 以 (θ, φ) 角度入射,其中 θ 为方位角, φ 为俯仰角。

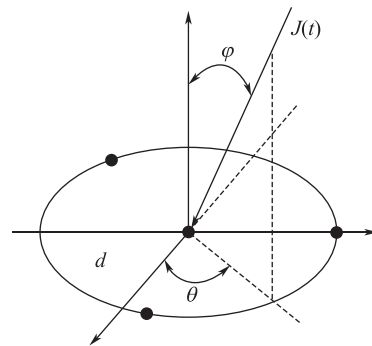


图 2 阵列天线三维坐标图

Fig. 2 Array antenna 3D coordinates

2.2 带约束的抗干扰算法性能分析

(1) 单干扰条件下的抗干扰性算法对比

阵列天线和卫星信号参数与上仿真参数设置相同,设置一个宽带干扰信号,入射角度为 $(120^\circ, 40^\circ)$,带宽均为 2MHz,输入干噪比为 50dB。导航信号的入射角度设置为 $(240^\circ, 40^\circ)$ 。仿真中,分别采用传统的功率倒置算法和带指向

的抗干扰算法进行干扰抑制，干扰抑制后功率的极坐标图如图3和图4所示。图3示出了自适应抗干扰之后形成的模拟静态方向图。可以看到，在干扰方向产生了一个很深的零陷，有效抑制了干扰。但由于不带波束指向，在有用信号的方向没有对信号进行保护，有用信号方向也被抑制。而从图4所示的极坐标图可以看到，抑制干扰的同时，有用信号方向产生了一个波束而获得保护。从有用信号的输出功率来看，采用功率倒置算法的输出信干噪比为-34dB，而采用带波束指向的抗干扰算法的输出信干噪比为-28dB。由此可见，采用带波束指向的自适应抗干扰算法能够有效地保护卫星信号不受到损失。

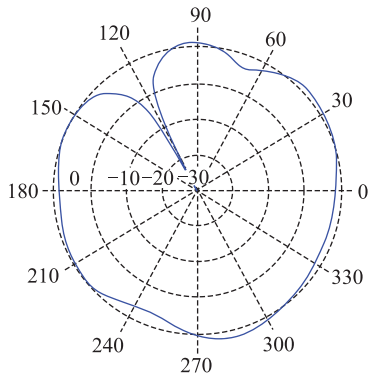


图3 功率倒置算法的极坐标投影

Fig. 3 Polar projection of power inversion algorithm

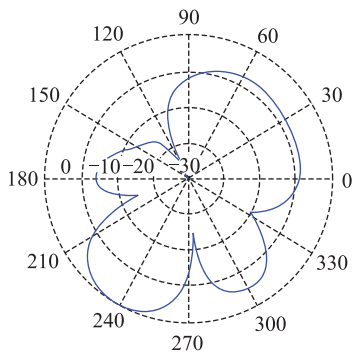


图4 带波束指向的抗干扰极坐标投影

Fig. 4 Polar projection of anti-jamming algorithm with beamforming

(2) 两个干扰条件下的抗干扰算法性能分析

阵列天线和卫星信号参数与上仿真参数设置相同，卫星导航信号的入射角分别为（100°，80°）；两个干扰的入射方向分别为（40°，70°），

（130°，30°），对应干噪比为50dB，采用功率倒置算法和带波束指向的抗干扰算法产生的三维方向图如图5、图7所示。稳态方向图投影分别如图6、图8所示。

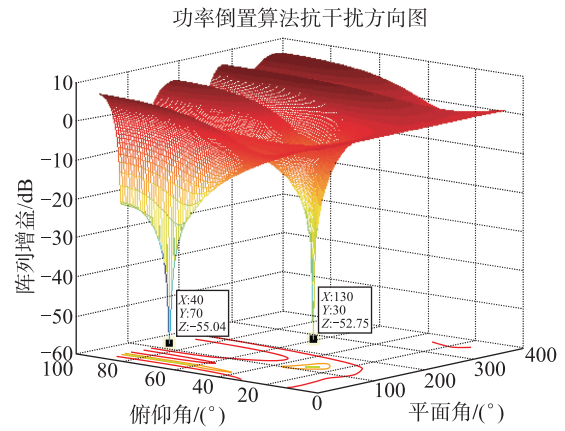


图5 功率倒置算法的三维方向图

Fig. 5 3D direction map of power inversion algorithm

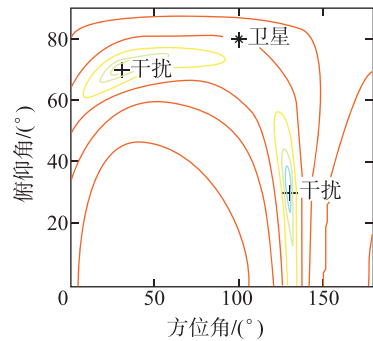


图6 功率倒置算法的方向图投影

Fig. 6 Direction map projection of power inversion algorithm

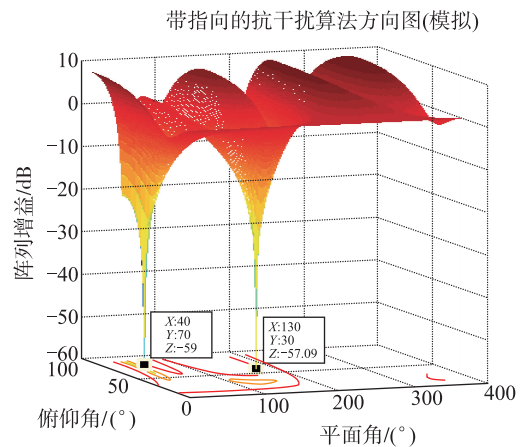


图7 带波束指向的抗干扰方向图

Fig. 7 3D direction map of anti-jamming algorithm with beamforming

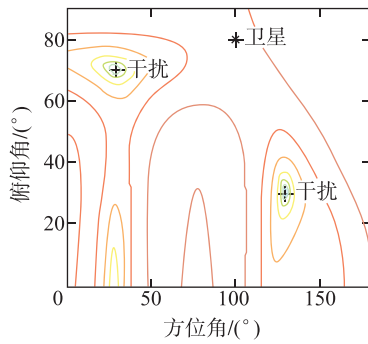


图 8 带波束指向的抗干扰方向图投影

Fig. 8 Direction map projection of anti-jamming algorithm with beamforming

对比图 5~图 8, 可以发现尽管两种算法在两个干扰的对应方向均产生了较深的零陷, 但是却在其他部分方向上存在差异。计算卫星信号的输出信干噪比 SINR, 分别约为 -40dB 和 -27dB 。可见, 在两个干扰场景下, 传统功率倒置算法卫星信号损失了 10dB , 而约束卫星方向的抗干扰算法, 在抑制干扰的同时, 可对卫星导航信号起到一定的保护作用, 输入功率没有被削弱, 反而信号功率提升了 3dB 。

(3) 三个干扰条件下的抗干扰算法性能分析

卫星导航信号的入射角分别为 $(100^\circ, 80^\circ)$; 三个干扰的入射方向分别改为 $(40^\circ, 70^\circ)$, $(130^\circ, 30^\circ)$ 和 $(60^\circ, 20^\circ)$, 对应干噪比为 50dB , 两种约束条件下所产生的自适应调零天线稳态方向图的投影采用功率倒置算法和带波束指向的抗干扰算法产生的稳态方向图投影分别如图 9、图 10 所示。

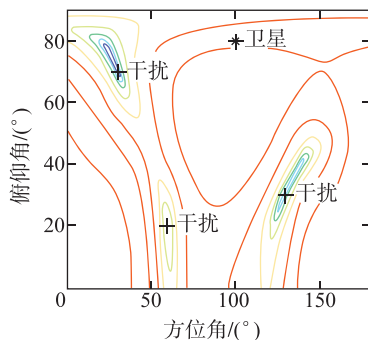


图 9 功率倒置算法的方向图投影

Fig. 9 Direction map projection of power inversion algorithm

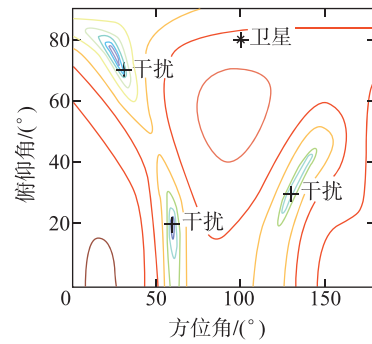


图 10 带波束指向的抗干扰方向图投影

Fig. 10 Direction map projection of anti-jamming algorithm with beamforming

从图 9 和图 10 可以看出, 两者方向图基本一致, 在三个干扰方向均产生了相应零深。通过计算可知, 卫星信号所对应的输出信干噪比均为 -32dB 左右。在三个干扰场景下, 尽管约束条件不同, 但并没有带来太大的影响。分析算法本身可知, 仿真中采用 4 阵元天线, 仅有 3 个自由度, 当干扰数量为 3 个时, 则利用所有的自由度抑制干扰, 无法在有用信号方向上产生波束, 带来信干噪比提升。

3 结束语

本文针对 GPS 卫星导航系统容易受到干扰的特点, 给出了带波束指向的干扰抑制技术方案。仿真试验证明了该算法的有效性, 同时对算法的性能进行了对比分析。该方法算法简单, 易于硬件实现, 对宽带压制式干扰具有很好的抑制能力, 并且能够有效地保护有用信号。在工程应用中, 卫星定位需要 4 颗星以上才能定位, 可以考虑对多颗卫星进行约束, 即采用数字多波束技术来提升抗干扰性能。

参考文献

- [1] 龚耀寰. 自适应滤波[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [2] 桑怀胜, 李峥嵘, 王飞雪, 雍少为, 郁文贤. 采用 RLS 算法的功率倒置阵列的性能[J]. 国防科技大学学报, 2003, 25 (3): 36-40.
- [3] Mohamed E A, 王永芳, 谈展中. 用于 GPS 接收机的自适应算法抗干扰性能比较[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 5 (32): 561-565.
- [4] 廖群, 郑建生, 黄超. GPS 自适应抗干扰算法及其 FPGA 实

- 现[J]. 现代雷达, 2006, 28 (4): 79-81.
- [5] 贾洪峰, 康锡章. GPS 接收机天线自适应抗干扰系统的设计[J]. 通信学报, 2001, 22 (8): 54-59.
- [6] 张琳, 初海彬. 卫星导航用户机空时滤波抗干扰技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33 (1): 76-80.
- [7] R L Fante, J J Vaccaro. Wideband Cancellation of Interference in a GPS Receive Array[J]. IEEE, 2000, 36 (2): 549-564.
- [8] 李双勋, 程翥, 薛鸿印, 皇甫堪. 复杂约束条件下空时自适应抗干扰方法[J]. 信号处理, 2008 (1): 36-39.