

## 自适应波束形成技术在GNSS抗干扰中的应用

齐志强<sup>1</sup>, 穆仕博<sup>2</sup>

(1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009; 2. 驻中国空空导弹研究院军事代表室, 河南 洛阳 471009)

**摘要:** 介绍了自适应波束形成技术的基本原理, 对具体算法进行了数学推导。根据波束形成技术的特点, 提出一种将其应用于GNSS抗干扰系统的解决方案。以七阵元均匀圆阵为例, 推导出期望信号的阵列响应公式, 给出接收信号协方差矩阵的求解方法, 从而为将自适应波束形成技术应用于GNSS抗干扰系统铺平了道路。仿真显示利用该方法能够在卫星信号来向保持一定增益的同时, 在干扰来向形成深度零陷, 从而达到较好的GNSS抗干扰效果。

**关键词:** 全球导航卫星系统; 自适应波束形成; 抗干扰; 惯导; 精确制导武器

**中图分类号:** V271.4; TP228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)10-0110-04

## Application of Adaptive Beam-Forming Technique in GNSS Anti-jamming

QI Zhi-qiang<sup>1</sup>, MU Shi-bo<sup>2</sup>

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;

2. Military Deputy Office of PLA in China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** This paper introduces the principle of adaptive beam-forming technique, and presents a mathematical deduction to the algorithm in detail. A Global Navigation Satellite System (GNSS) anti-jamming method based on the adaptive beam-forming technique is proposed. Taking the circular antenna array with seven units as an example, the response of array is deduced, and a method for solving covariance matrix of the received signal is given. Therefore, the adaptive beam-forming technique can be used in the anti-jamming system of GNSS. The results of the simulation show that: this method keeps a gain with certain level in the direction of satellite signal and forms deep null in the direction of jamming, thus can have a good anti-jamming effect.

**Key words:** Global Navigation Satellite System (GNSS); adaptive beam-forming; anti-jamming; inertial navigation; precision guided munition

### 0 引言

20世纪70年代, 美国为了能够在世界范围内实施精确、快速定位和导航, 开发了第一个全球导航卫星系统(GNSS), 并于1994年投入使用, 从根本上解决了海、陆、空各种运行平台的定位和导航问题。从海湾战争、阿富汗战争到伊拉克战争, 美军已将GNSS广泛应用于军事领域, 并取得了良好的效果。

GNSS精确制导武器在战争中发挥的作用越来越大, GNSS在定位、导航、授时、通信、指挥、控制、情报侦察、交通管制等领域的应用也日益广泛。然而, 由于卫星信号太弱, GNSS抗干扰能力弱成为其最大弱点, 这

也成为GNSS应用的瓶颈, 如何提高GNSS的抗干扰能力成为GNSS能否发挥效用的关键。GNSS的干扰与反干扰正逐步成为现代战争中的重要组成部分<sup>[1]</sup>, 目前国外已经工程化的卫星定位抗干扰技术主要有自适应调零和自适应波束形成两种技术。自适应调零技术利用卫星信号湮没在白噪声中的特点, 自动生成对着强信号来向的方向图零陷点, 从而达到消除干扰的目的, 由于实现简单, 抗干扰能力强, 获得了广泛应用, 国内的GNSS抗干扰方法多采用此技术。但自适应调零技术不考虑卫星信号来向, 当干扰与卫星信号来向比较接近时, 干扰被消除的同时信号也被削弱了, 而且自适应调零技术不能对信号形成指向, 对信号来说和单天线接收的信噪比相同, 不能充分利用天线阵的优势。而自适应波束形成技术可以使天线波束对准所要跟踪的卫星, 提高卫星信号增益, 同时在干扰来向形成零

陷,因此可以获得更高的抗干扰能力,本文主要阐述自适应波束形成技术在 GNSS 抗干扰中的应用。

### 1 自适应波束形成原理

自适应波束形成技术是 20 世纪 80 年代以来新兴的一门天线波束形成技术,因具有数据率高、可同时形成多波束、可实现自适应零点控制等优点,而被广泛应用于雷达、通信等领域<sup>[2]</sup>。自适应波束形成技术是采用多个接收天线分别接收信号,然后送入后端处理,通过调整各个通道的加权系数,让某个特定方向的信号通过而滤掉其他方向的信号,从而达到空域滤波的目的<sup>[3]</sup>。如图 1 所示,通过对加权系数的调整,可以使信源 1 输出的信号在加权后的输出里得到加强,信源 2 输出的信号受到抑制。如果有多组加权系数,则可使波束分别指向多个方向。

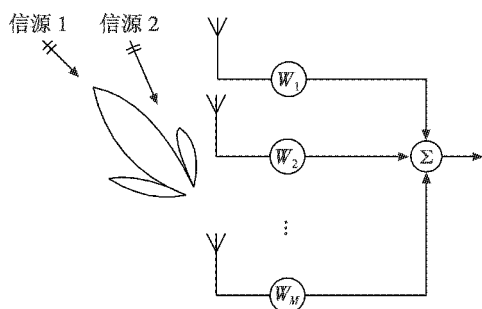


图 1 波束形成技术的空间检测特性

Fig.1 Space detection characteristics of beam-forming technology

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  $\theta_i, i=1, \dots, L, \theta_i$  未知; 1 个期望信号  $s_d(t)$ , 其波达方向为  $\theta_d, \theta_d$  已知; 每个阵元上的加性白噪声为  $\nu(t)$ , 它们具有相同的方差  $\sigma_v^2$ 。  $M$  个阵元的阵列接收信号可表示为<sup>[4]</sup>

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_M(t) \end{bmatrix} = [\alpha(\theta_d) \ \alpha(\theta_1) \ \dots \ \alpha(\theta_L)] \begin{bmatrix} s_d(t) \\ s_1(t) \\ \vdots \\ s_L(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \nu_1(t) \\ \nu_2(t) \\ \vdots \\ \nu_M(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $\alpha(\theta_d)$  为阵列在  $\theta_d$  方向的阵列响应。式(1)可简记为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}s(t) + \boldsymbol{\nu}(t) = \alpha(\theta_d)s_d(t) + \sum_{i=1}^L \alpha(\theta_i)s_i(t) + \boldsymbol{\nu}(t) \quad (2)$$

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

$$\begin{aligned} P(\mathbf{w}) &= E\{|\mathbf{y}(t)|^2\} = E\{|\mathbf{w}^H \mathbf{x}(t)|^2\} = \\ &= E\{\mathbf{w}^H \mathbf{x}(t) (\mathbf{w}^H \mathbf{x}(t))^*\} = \mathbf{w}^H E\{\mathbf{x}(t) \mathbf{x}^H(t)\} \mathbf{w} = \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{R}$  为输入信号的协方差矩阵。为了确保来自  $\theta_d$

方向的期望信号被正确接收,对权向量的约束条件设定为

$$\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_d) = 1 \quad (4)$$

为了让输出的干扰和噪声尽可能小,最佳波束形成器的权向量还应在约束条件下满足

$$\min_{\mathbf{w}} \{P(\mathbf{w})\} = \min_{\mathbf{w}} \{\mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w}\} \quad (5)$$

利用 Lagrange 乘子法求解式(5),构造目标函数为

$$J(\mathbf{w}) = \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} + \lambda (\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_d) - 1) \quad (6)$$

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

$$\mathbf{w}_{opt} = -\alpha \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta_d) \quad (7)$$

式中,  $\alpha$  为比例常数。由式(4)易得  $\mathbf{a}^H(\theta_d) \mathbf{w} = 1$ , 式(7)两边同乘以  $\mathbf{a}^H(\theta_d)$ , 可求得

$$\alpha = \frac{-1}{\mathbf{a}^H(\theta_d) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta_d)} \quad (8)$$

代入式(7)可得

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

由式(9)可知,只要知道了期望信号的阵列响应,就可以构建一组加权系数使得期望信号来向的信号被正确接收,而其他方向的干扰信号和噪声得到抑制,从而达到空域滤波的目的。

### 2 自适应波束形成在 GNSS 抗干扰中的应用

自适应波束形成技术被认为是干扰抑制最有效的工具之一<sup>[5]</sup>,根据自适应波束形成技术能够在保证期望方向信号被正确接收的前提下,最大限度地削弱其他来向信号的特点,可以将其应用于 GNSS 抗干扰系统中。通过构建权值系数,使波束指向卫星信号,同时最大限度地削弱其他来向信号,就可以成功地消除干扰。图 2 是自适应波束形成技术应用于 GNSS 抗干扰系统的结构框图。

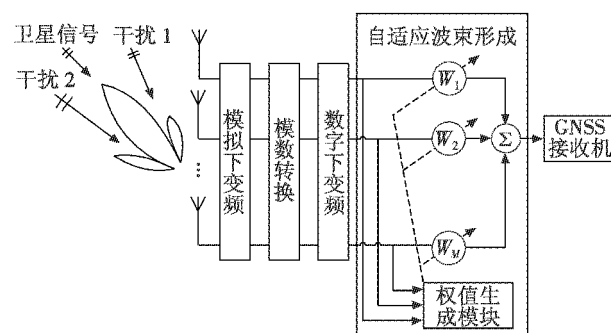


图 2 系统结构框图

Fig.2 System structure diagram

由系统结构框图可以看出,其组成包括天线阵列、模拟下变频模块、模数转换模块、数字下变频模块、波束形成模块和 GNSS 接收机。信号被各阵列接收后,

通过模拟下变频变为中频信号,中频信号经模数转换模块变换为数字信号,再经过数字下变频变换为基带信号,数字基带信号通过自适应算法处理,去掉干扰后送入 GNSS 接收机。图示是针对 1 颗卫星信号,实际应用时,至少有 4 颗卫星才能实现定位,因此需要生成多组权值系数。要生成多组权值系数,硬件不需变动,只需要求得多个期望方向信号的阵列响应即可。

### 3 算法描述

由式(9)可知,要想求得权值系数,必须知道期望信号的阵列响应,期望信号的阵列响应由天线阵元结构和期望信号来向决定。常见的天线阵列分为均匀线阵和均匀圆阵等,阵元间距  $d$  不能太大,如果超过信号波长的一半就会产生相位模糊,另外,在阵元数量固定的情况下,希望阵列有尽可能大的孔径,所以通常取  $d = \lambda/2$ 。

均匀线阵结构简单易于分析,但在阵元连线所在的方向上阵列孔径很小,在三维空间分析均匀线阵与信号源的位置关系可以发现,分布在一个以阵元为中心轴的锥面上的信号到达阵列具有相同的延迟,因此在三维空间里,一个线性阵列只能确定信号源的一个位置参数。本文主要研究均匀圆阵,如图 3 所示。

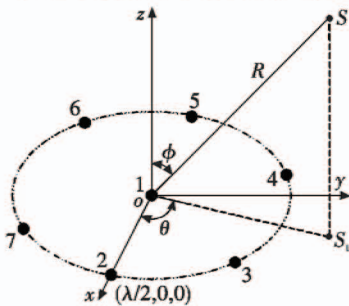


图3 均匀圆阵坐标描述  
Fig.3 Uniform circular array coordinate

建立平面天线阵列,共 7 个阵元,1 个阵元位于坐标原点,另外 6 个阵元均匀分布于  $xoy$  平面上以原点为圆心、 $\lambda/2$  为半径的圆周上,第  $m$  个阵元与  $x$  轴的夹角为

$$\gamma_m = 2\pi(m-2)/6, \quad m = 2, 3, \dots, 7 \quad (10)$$

其位置向量

$$\mathbf{p}_m = \frac{\lambda}{2}(\cos \gamma_m, \sin \gamma_m, 0) \quad (11)$$

假设卫星  $S$  的空间点坐标为  $R(\sin \phi \cos \theta, \sin \phi \sin \theta, \cos \phi)$ ,  $R, \phi, \theta$  为相应点的球坐标参数,由于这里只关心信号来向,取  $\mathbf{R}$  为单位向量,则信号来向为  $\mathbf{r} = (\sin \phi \cdot \cos \theta, \sin \phi \sin \theta, \cos \phi)$ , 相应的球坐标参数  $\phi$  和  $\theta$  可由接收机和惯导信息联合算出。第 1 阵元和第  $m$  阵元接收信号间的相位差为

$$\varphi_m(\theta, \phi) = \mathbf{r} \cdot \mathbf{p}_m = \pi \sin \phi \cos(\theta - \gamma_m) \quad (12)$$

则均匀圆阵对于波达方向为  $(\theta, \phi)$  的信号的阵列响

应为

$$\mathbf{a}(\theta, \phi) = [1, e^{-j\pi \sin \phi \cos(\theta - \gamma_2)}, \dots, e^{-j\pi \sin \phi \cos(\theta - \gamma_7)}]^T \quad (13)$$

由式(9)可知,为求  $\mathbf{w}_{opt}$  还要求出阵列输入的协方差矩阵  $\mathbf{R}$ 。由于实际中没有对协方差矩阵  $\mathbf{R}$  的先验知识,只能以阵列的接收数据为基础,从中估计出  $\mathbf{R}$ 。对  $\mathbf{R}$  的最大似然估计表示为

$$\tilde{\mathbf{R}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{x}(k) \mathbf{x}^H(k) \quad (14)$$

式中,用于估计的总快拍数  $K$  称为样本支撑。当  $K \rightarrow \infty$  时,  $\tilde{\mathbf{R}} \rightarrow \mathbf{R}$ 。由于用  $\tilde{\mathbf{R}}$  代替了  $\mathbf{R}$ ,波束形成器的性能会有所损失,能够证明,对于 7 阵元天线,以  $\tilde{\mathbf{R}}$  代替  $\mathbf{R}$  产生的性能损失的期望可表示为<sup>[2]</sup>

$$E\{L_{SM}\} = \frac{K-5}{K+1} \quad (15)$$

因此,只要有足够的样本支撑,就可以用  $\tilde{\mathbf{R}}$  代替  $\mathbf{R}$ ,从而由式(9)求解出加权系数。

### 4 仿真

使用图 3 所示的坐标系和天线阵分布,将式(13)、(14)代入式(9)计算出最佳权向量,再利用该权向量绘制出天线阵的方向图,该方向图反映了天线阵对不同来向信号的抑制作用。用 Matlab 进行仿真,对仿真场景做如下假定。

- 1) 天线阵各阵元的方向图均为理想的半球形,增益取 0 dB,阵元间不考虑互耦。
- 2) 卫星对应的俯仰角  $\phi$  和方位角  $\theta$  分别为:  $\phi = 50^\circ, \theta = 130^\circ$ 。
- 3) 干扰信号为扩频信号。
- 4) 式(14)的快拍数取 64。
- 5) 阵元叠加噪声为高斯白噪声,卫星信号淹没在噪声中。

首先对单干扰进行仿真。干扰来向为  $\phi = 20^\circ, \theta = 60^\circ$ ,其功率比噪声高 50 dB。仿真结果如图 4 所示。

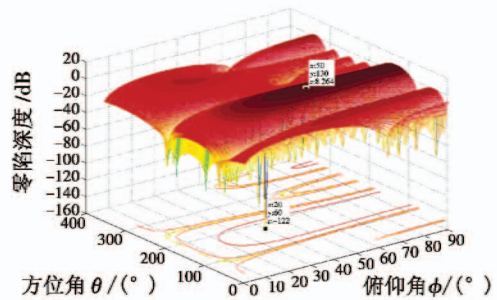


图4 单干扰方向图

Fig.4 Directivity diagram of single jamming source

在卫星信号来向增益约为 8 dB,其附近也比较平坦;在干扰来向形成了深度达 -122 dB 的零陷,零陷比较“尖锐”。图中:方位角  $\theta$  范围为  $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ ;俯仰

角  $\phi$  范围为  $0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ 。

对两个干扰源进行仿真。干扰来向分别为  $\phi_1 = 10^\circ, \theta_1 = 10^\circ; \phi_2 = 30^\circ, \theta_2 = 200^\circ$ 。干扰信号强度分别比噪声高 50 dB。仿真结果如图 5 所示,在卫星信号来向增益约为 8 dB,其附近也比较平坦;在两个干扰来向分别形成了 -139 dB 和 -123 dB 的零陷,零陷比较“尖锐”。

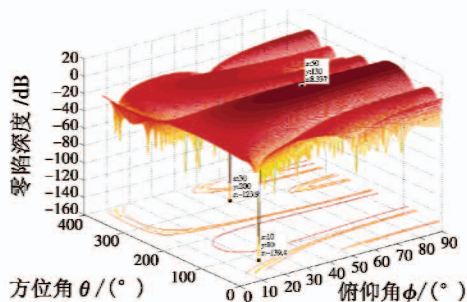


图 5 双干扰方向图

Fig. 5 Directivity diagram of two jamming sources

从上述仿真可以看出,该算法无论是对单干扰还是对多干扰,都可以在卫星信号来向产生增益,形成指向卫星信号的波束;同时在干扰方向形成较深零陷,从而达到滤除干扰的目的。本仿真采用的天线阵为 7 阵元,所以可产生的增益最大值为  $10 \lg 7 = 8.45$  dB,由于仿真模型比较理想,仿真效果很好,实际实现时性能会比仿真结果略有下降,零陷不会这么“尖锐”,不过仍然会达到较好的效果。

## 5 结束语

本文所述的 GNSS 抗干扰算法已在工程上实现,天线阵元数目相同时,其抗干扰效果明显优于自适应调零抗干扰系统。自适应波束形成抗干扰系统由于需

要预知卫星信号来向,就需要预先知道自身位置、天线阵姿态和卫星位置,因此需要与惯导系统和 GNSS 接收机紧密配合才能正常工作,对系统要求较高,实现难度较大;同时,该抗干扰算法工程实现时运算量较大,其运算量随着天线阵元数目的增加而迅速增长,也是一个无法回避的问题。

## 参考文献

- [1] 俞泽瀚. GPS 干扰和抗干扰技术的研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.  
YU Z T. The study of GPS interference and anti-jamming [D]. Xi'an: XiDian University, 2011.
- [2] 郭崇贤. 相控阵雷达接收技术[M]. 北京:国防工业出版社,2009.  
GUO C X. Receiving technology of phased array radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [3] 张斌. 最新智能天线设计与应用新技术制导手册[M]. 北京:科学技术出版社,2007.  
ZHANG B. The design and application of the smart antenna technology guidance manual[M]. Beijing: Science and Technology Press, 2007.
- [4] 邱天爽,魏东兴,唐洪,等. 通信中的自适应信号处理[M]. 北京:电子工业出版社,2005.  
QIU T S, WEI D X, TANG H, et al. Adaptive signal processing in communication[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005.
- [5] 王永良,丁前军,李荣峰. 自适应阵列处理[M]. 北京:清华大学出版社,2009.  
WANG Y L, DING Q J, LI R F. Adaptive array processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.

(上接第 109 页)

- [6] 张亢,程军圣,杨宇. 局部均值分解方法中乘积函数判据问题研究[J]. 振动与冲击,2011,30(9):84-88.  
ZHANG K, CHENG J S, YANG Y. Product function criterion in local mean decomposition method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(9):84-88.
- [7] HUANG N E, WU Z H, LONG S R, et al. On instantaneous frequency[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(2):177-229.
- [8] CHENG J S, YU D J, YANG Y. Energy operator demodulating approach based on EMD and its application to mechanical fault diagnosis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(8):115-118.
- [9] 束洪春,田鑫萃,董俊,等. 利用电压相关性的  $\pm 800$  kV

直流输电线路区内外故障判断方法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(4):151-160.

- SHU H C, TIAN X C, DONG J, et al. Identification between internal and external faults of  $\pm 800$  kV HVDC transmission lines based on voltage correlation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4):151-160.
- [10] 林达,王慧芳,何奔腾,等. 基于波形相关性的带并联电抗器线路永久性故障判别方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(16):80-84.  
LIN D, WANG H F, HE B T, et al. Identification of permanent fault at transmission line with shunt reactors based on waveform correlation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16):80-84.