

智能天线在卫星定位抗干扰中的应用

王 辉 柴俊栓

(中国空空导弹研究院,洛阳 471009)

摘要 介绍了自适应波束形成技术的基本原理,结合卫星定位系统的特点,提出了一种将自适应波束形成技术应用于卫星定位接收机抗干扰系统的解决方案。该方案利用卫星星历和惯性导航器件的输出来构造卫星信号的方向向量,对阵列接收信号的协方差矩阵利用其最大似然估计逼近,在最大化输出 SINR 准则下求出相应的最佳权值向量。仿真结果显示利用该最佳权值向量能够有效地对单干扰和多干扰在干扰来向形成深度零陷,同时在卫星信号来向保持一定的增益,能较好地满足卫星定位抗干扰系统对前端天线阵抗干扰能力的需求。

关键词 智能天线 自适应波束形成 卫星定位 抗干扰

中图法分类号 TP828.5; **文献标志码** A

导航系统是制导武器的眼睛,尤其对我国正在研制的中、远程精确制导武器而言,其作用更不可忽视。以 GPS、GLONASS、BD2 为代表的星基导航系统,具有全球覆盖、连续/全天候工作、能为高动态平台提供服务,以及高精度等特性,被广泛用于中、远程精确制导武器的定位、导航。

现阶段,我国自行研制的 BD2 导航系统还不完善,我军不得不以民用的形式利用美国的 GPS 导航系统,不仅损失了 GPS 的定位精度(相对美国及其盟国而言),更严重的是失去了战时的使用保障,敌方能够较容易地对我方的 GPS 接收设备进行压制式干扰。为此,在 GPS 接收设备中不得不采取必要的抗干扰措施。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智能天线技术^[1]。

本文主要以自适应波束形成技术在 GPS 抗干扰系统中加以应用。

1 系统结构和信号模型

图 1 所示为一个具有 N 振元的自适应天线阵列,其组成包括天线阵列、射频前端与 A/D 转换模

块,以及波束形成器模块。来自不同路径的信号首先在阵列各振元上接收,通过射频通道和 A/D 转换为基带数字信号,输入波束形成器的信号是一个复基带信号向量。波束形成器模块包括自适应权值生成模块和振元信号加权叠加模块两部分。自适应权值生成模块是整个自适应天线阵列系统的核

心所在,它是一个阵列信号处理器,接收来自各振元的阵列信号,并按照一定的自适应算法计算出加权向量,而该权向量再输入到加权叠加模块中,将阵列信号向量加权叠加,从而得到整个自适应天线系统的输出。

在讨论阵列接收信号模型之前,首先假设接收信号符合窄带模型的要求,即信号的带宽 B 远远小于载波频率 f_c 。事实上,绝大多数通信系统的信号以及对 GPS、BD2 等系统的干扰信号都满足此要求。在此假设下,入射信号在不同振元间的微小延时可以用相移来代替。也就是说,对同一个信号,不同振元对该信号的响应间只相差一个相位。

假设空间只有一个信号源,令信号的载波为 $e^{j2\pi f_c t}$,并以平面波的形式在空间沿波数向量 k 的方向传播,如图 2 所示。

设基准点(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:

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

式(1)中, \vec{k} 是波数向量; $\vec{\alpha} = \vec{k}/|\vec{k}|$ 表示电波传播方向, 为单位向量; $|\vec{k}| = 2\pi f_c/c = 2\pi/\lambda$ 为波数(弧度/长度), 其中 c 是波速, λ 是波长。 $\vec{r}^T \vec{\alpha}/c$ 表示基带

信号在 \vec{r} 处相对于基准点的延迟时间, $\vec{r}^T \vec{k}$ 表示载波在 \vec{r} 处相对于基准点的滞后相位(弧度)。图 2 中, θ 为波传播的方位角, 则波束向量可表示为 $\vec{k} = k[\cos\theta, \sin\theta]$ 。

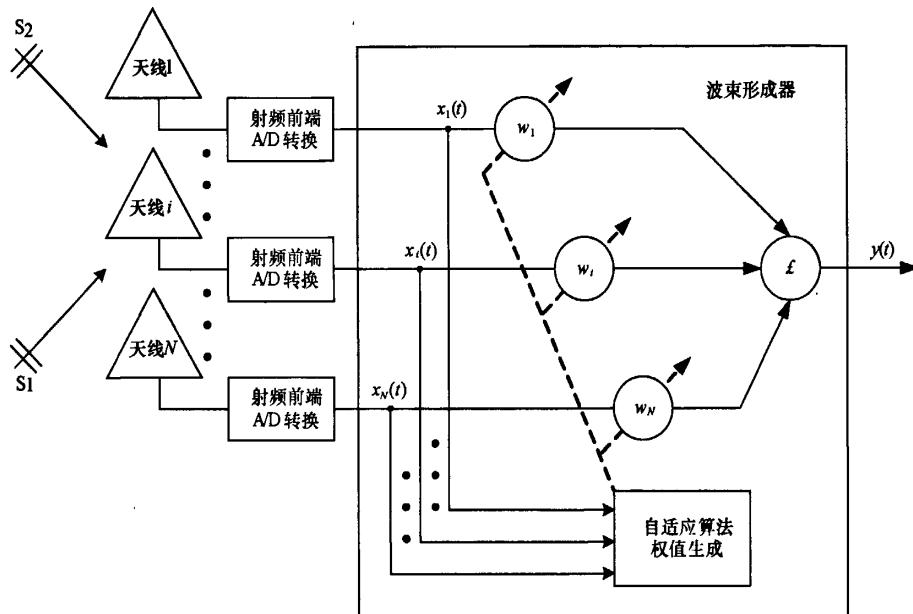


图 1 自适应波束形成系统结构

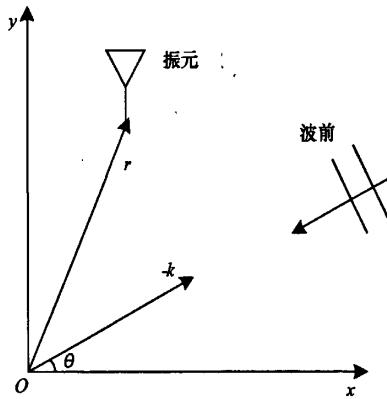


图 2 空间中振元位置与信号传播的关系

假设在空间有 M 个振元组成的天线阵, 将振元从 1 到 M 编号, 并以振元 1 作为基准点。设各振元是无方向性的, 振元相对于基准点的位置向量分别

表示为 $\vec{r}_i (i=1, \dots, M; \vec{r}_1 = 0)$ 。若基准点的接收信号为 $s(t) e^{j2\pi f_c t}$, 由公式得到第 i 个振元上的接收信号表示为:

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

在上述“窄带信号”假设的前提下, 基带信号 $s(t)$ 的变化相对缓慢, 时间延时 $\vec{r}^T \vec{\alpha}/c \leq 1/B$, 故有 $s(t - \vec{r}_i^T \vec{\alpha}/c) \approx s(t)$, 由此阵列信号可以用向量的形式表示为:

$$\begin{aligned} s(t) &\stackrel{\text{def}}{=} [s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)]^T = \\ &= s(t) [e^{-j\vec{r}_1^T \vec{k}}, e^{-j\vec{r}_2^T \vec{k}}, \dots, e^{-j\vec{r}_M^T \vec{k}}]^T \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中的向量 $[e^{-j\vec{r}_1^T \vec{k}}, e^{-j\vec{r}_2^T \vec{k}}, \dots, e^{-j\vec{r}_M^T \vec{k}}]^T$ 称为方向向量, 因为当阵列的几何结构和信号的波长确定时, 该向量只与信号源的角向量 θ 有关, 故方向

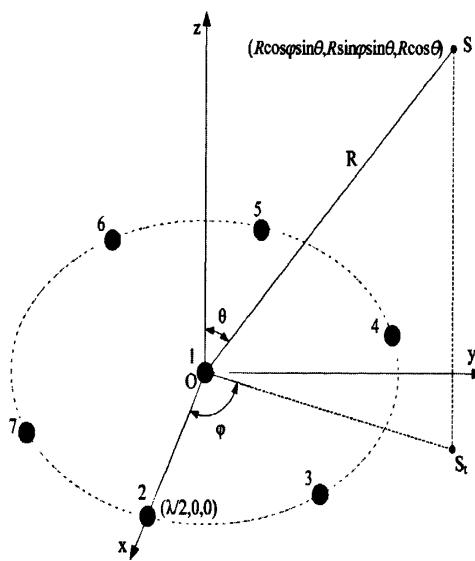


图3 天线阵坐标描述

向量记为 $\vec{a}(\theta)$ 。由于 \vec{r}_i 表示振元与基准点的相对位置,所以 $\vec{a}(\theta)$ 与基准点的位置无关。当有 N 个信号源时,到达波的方向向量分别表示为 $\vec{a}(\theta_1), \vec{a}(\theta_2), \dots, \vec{a}(\theta_N)$,组成矩阵 $A = [\vec{a}(\theta_1), \vec{a}(\theta_2), \dots, \vec{a}(\theta_N)]$ 。矩阵 A 称为阵列的方向矩阵或响应矩阵,有时也称为阵列流形。

2 波束形成原理

自适应波束形成技术的基本原理,是根据一定的准则和算法自适应地调整阵列天线阵元激励的权值,使得阵列接收信号通过加权叠加后,输出信号的质量在所采取的准则下最优^[2]。另一方面,阵列的方向图(或称波束)正是由阵列的权值向量所决定的。因此,调整权值的效果即是使阵列方向图的波束主瓣指向有用信号,而在干扰信号方向形成零陷或较低的旁瓣,从而将不同的信号从空间上实现分隔,起到“空间滤波”的作用^[3]。

以均匀线阵为例,设振元数为 M ,振元间距为 d ,信号的波达方向为 θ ,并以第一个振元作为参考振元,信号源在参考振元的复包络记为 $s(t)$ 。对振元的一次采样称为一次快拍,则第 m 个振元上第 n

次快拍的采样值表示为:

$$x_m(n) = s(n) e^{-\frac{2\pi}{\lambda}(m-1)d \sin \theta} + \gamma_m(n) \quad (4)$$

式(4)中, $\gamma_m(n)$ 表示第 m 个振元上的噪声,其是振元自身的热噪声与无线信道里各种电磁噪声的总和。

将各振元上第 n 次快拍的采样表示为向量的形式:

$$\vec{x}(n) = \vec{\alpha}(\theta) s(n) + \vec{\gamma}(n) \quad (5)$$

式(5)中,

$$\vec{\alpha}(\theta) = [1, e^{-\frac{2\pi}{\lambda}d \sin \theta}, \dots, e^{-\frac{2\pi}{\lambda}(M-1)d \sin \theta}]_{M \times 1}^T;$$

$$\vec{\gamma}(n) = [\gamma_1(n), \dots, \gamma_M(n)]_{M \times 1}^T$$

阵列权向量记为 \vec{w} ,则阵列输出为:

$$y = \vec{w}^H \vec{x} \quad (6)$$

将公式(5)代入公式(6):

$$y = \vec{w}^H \{ \vec{\alpha}(\theta) s + \vec{\gamma} \} \quad (7)$$

由于阵列为均匀线阵,故 $\vec{\alpha}(\theta)$ 使信号 s 在每个振元上做相同的相移。如果此时取权向量 $\vec{w} = \vec{\alpha}(\theta)$,则每个振元上的相移刚好被完全补偿。即:

$$y = \vec{\alpha}^H \{ \vec{\alpha}(\theta) s + \vec{\gamma} \} = M s + \tilde{\gamma} \quad (8)$$

式(8)中, $\tilde{\gamma} = (\vec{\alpha}(\theta))^H \vec{\gamma}$ 。此时阵列的输出重构了源信号 s 。像这种完全与阵列响应向量匹配的波束形成器称为空间匹配滤波器。由上述分析看出,构造空间匹配滤波器需要预先知道信号的波达方向。

3 自适应波束形成抗干扰原理

由于GPS信号很微弱(到达地面时功率仅为-160 dB·W左右),使其完全淹没在天线振元等设备的内部噪声中,且易受干扰。当干扰强于天线振元内部噪声时,可能导致GPS接收机不能正常工作,所以应设计自适应天线阵列在干扰来向形成零陷,保证GPS接收机不受干扰影响^[4,5]。

因为GPS信号淹没在噪声中,为达到输出不含干扰的目的,只需使阵列输出功率最小即可。这种抑制干扰的天线阵列常采用功率反演算法。该算法以阵列输出作为误差信号,通过权值调整使阵列

输出最小,自适应地将方向图零陷对准干扰来向。该算法只进行方向图零点的自适应调整,存在的弊端是没有考虑到对卫星信号的影响(干扰来向附近的卫星信号同样会被衰减)。将卫星信号考虑进来:一方面应在干扰来向形成零陷,另一方面应在卫星信号来向保持一定增益。

此外,对 GPS 接收机抗干扰的处理还应考虑到其特殊性:卫星概略坐标可由星历得到;接收机本身姿态及概略坐标能够由惯性器件得到;一般情况下干扰机动态较低等。因此,对 GPS 抗干扰的处理应采用最佳波束形成,根据阵列接收数据的统计知识,以及卫星信号来向(由卫星坐标、接收机坐标和天线阵姿态得到),按照一定的最佳准则产生最佳的波束形成空间响应。

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;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 $\gamma(t)$,它们具有相同的方差 σ_γ^2 。根据第 1、2 节所述, M 个振元的阵列接收信号可表示为:

$$\vec{x}(t) = \vec{A} \vec{s}(t) + \vec{\gamma}(t) = \vec{\alpha}(\theta_d) s_d(t) + \sum_{i=1}^L \vec{\alpha}(\theta_i) s_i(t) + \vec{\gamma}(t) \quad (9)$$

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

$$P(\vec{w}) = E\{ |y(t)|^2 \} = E\{ \vec{w}^H \vec{x}(t) (\vec{w}^H \vec{x}(t))^* \} = \vec{w}^H E\{ \vec{x}(t) \vec{x}^H(t) \} \vec{w} = \vec{w}^H \vec{R} \vec{w} \quad (10)$$

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

另一方面,由公式(6)和公式(9)同样可求得输出的平均功率:

$$\begin{aligned} P(\vec{w}) &= \{ |\vec{w}^H \vec{x}(t)|^2 \} = \\ &= \left\{ \left| \vec{w}^H (\vec{\alpha}(\theta_d) s_d(t) + \sum_{i=1}^L \vec{\alpha}(\theta_i) s_i(t) + \vec{\gamma}(t)) \right|^2 \right\} = \\ &= E\{ |s_d(t)|^2 \} |\vec{w}^H \vec{\alpha}(\theta_d)|^2 + \sum_{i=1}^L E\{ |s_i(t)|^2 \} \times \\ &\quad |\vec{w}^H \vec{\alpha}(\theta_i)|^2 + \sigma_\gamma^2 \|\vec{w}\|^2 \end{aligned} \quad (11)$$

在公式(11)中,为了确保来自 θ_d 方向的期望信号被正确接收,希望它在输出功率中所占的份额尽可能大;为了抑制其它 L 个方向的干扰,希望这些干扰在输出中的功率尽可能小。于是,对权向量的约束条件设定为:

$$\begin{cases} \vec{w}^H \vec{\alpha}(\theta_d) = 1 \\ \vec{w}^H \vec{\alpha}(\theta_i) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

在上述约束条件下,公式(11)可简化为:

$$P(\vec{w}) = E\{ |s_d(t)|^2 \} + \sigma_\gamma^2 \|\vec{w}\|^2 \quad (13)$$

仅有约束条件还不够,为了最大化信噪比,还必须让输出的噪声尽可能地小。因此,最佳波束形成器的权向量还应在约束条件下满足:

$$\min_{\vec{w}} \{ P(\vec{w}) \} = \min_{\vec{w}} \{ \vec{w}^H \vec{R} \vec{w} \} \quad (14)$$

利用 Lagrange 乘子法求解公式(14),构造目标函数为:

$$J(\vec{w}) = \vec{w}^H \vec{R} \vec{w} + \lambda (\vec{w}^H \vec{\alpha}(\theta_d) - 1) \quad (15)$$

对上式求偏倒,并令偏倒数为零,即可得到所求最佳权向量为:

$$\vec{w}_{opt} = \frac{\vec{R}^{-1} \vec{\alpha}(\theta_d)}{\vec{\alpha}^H(\theta_d) \vec{R}^{-1} \vec{\alpha}(\theta_d)} \quad (16)$$

4 算法描述

如图 3 建立平面天线阵列,共 7 振元,一个振元位于坐标原点,另外 6 个振元均匀分布于 XOY 平面上以原点为圆心、 $\lambda/2$ 为半径(λ 为 GPS L1 频段波长)的圆周上,各振元的坐标为:

$$\begin{cases} x_i = \frac{\lambda}{2} \cos\left(2\pi \frac{i-2}{6}\right) \\ y_i = \frac{\lambda}{2} \sin\left(2\pi \frac{i-2}{6}\right) \\ z_i = 0 \end{cases} \quad i=2,3,\dots,7 \quad (17)$$

空间一点 S 的坐标为 $(R \cos\varphi \sin\theta, R \sin\varphi \sin\theta, R \cos\theta)$, R, φ, θ 为相应点的球坐标参数。

假设点 S 为卫星,则其相应的球坐标参数 φ 和 θ 可由卫星星历和接收机辅助惯导联合算出。由第 1 节的内容可得出卫星信号来向的方向向量 $\vec{\alpha}_d$ 为:

$$\vec{\alpha}_d = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(j\pi \sin\theta \cos(2\pi(2-2)/6 - \varphi)) \\ \exp(j\pi \sin\theta \cos(2\pi(3-2)/6 - \varphi)) \\ \vdots \\ \exp(j\pi \sin\theta \cos(2\pi(7-2)/6 - \varphi)) \end{bmatrix} \quad (19)$$

由公式(16)可知,为求 \vec{w}_{opt} 还要求出阵列输入的协方差矩阵 R 。由于实际中,我们没有对协方差矩阵 R 的先验知识,故只能以阵列的接收数据为基础,从中估计出 R 。对 R 的最大似然估计表示为:

$$\bar{R} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \vec{x}(t) \vec{x}^H(t) \quad (19)$$

式(19)中,用于估计的总快拍数 K 称为样本支撑。当 $K \rightarrow \infty$ 时, $\bar{R} \rightarrow R$ 。由于用 \bar{R} 代替了 R ,波束形成器的性能会有所损失,能够证明,以 \bar{R} 代替 R 产生的性能损失的期望可表示为^[2]:

$$E\{L_{SMI}\} = \frac{K-5}{K+1} \quad (20)$$

当 $K=60$ 时,性能损失小于1 dB。

由公式(16)、式(18)和式(19)可得出在最大化输出信号干扰噪声比(SINR)准则下的最佳权值向量为:

$$\vec{w}_{opt} = \frac{\bar{R}^{-1} \vec{\alpha}_d}{\vec{\alpha}_d^H \bar{R}^{-1} \vec{\alpha}_d} \quad (21)$$

5 仿真结果

这一节将利用仿真数据验证上述算法的正确性及其性能,并对仿真结果加以分析。使用 Matlab 进行仿真,仿真使用图 3 所示的坐标系和天线阵分布。对仿真场景作如下假定:

- 1) 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;
- 2) 卫星对应的俯仰角 θ 和方位角 φ 分别为:
 $\theta=60^\circ, \varphi=30^\circ$;
- 3) 干扰信号为单频扩频信号,载波频率为 1 575.42 MHz;
- 4) 振元叠加噪声为高斯白噪声,卫星信号淹没在噪声中。

在上述假定下进行仿真,仿真中利用公式(18)、式(19)和式(21)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。

首先对单干扰,干扰来向为 $\theta=10^\circ, \varphi=150^\circ$,其功率比噪声高 50 dB。仿真结果如图 4(a)所示,在卫星信号来向增益约为 0 dB,其附近也比较平坦;在干扰来向形成了深度达 -140 dB 的零陷,该零陷比较“尖锐”,但在该方向周围几度范围内的零陷深度仍能达到 -45 dB 左右。

对相同功率的两干扰进行仿真。干扰来向分别为 $\theta_1=10^\circ, \varphi_1=150^\circ, \theta_2=20^\circ, \varphi_2=80^\circ$,两干扰的功率都比噪声高 50 dB。仿真结果如图 4(b)所示,在卫星信号来向增益为 0 dB,其附近比较平坦;在两个干扰来向分别形成了 -141 dB 和 -136 dB 的零陷,在偏离两方向 10° 范围内的零陷深度也能达到 -45 dB 左右。

对不同功率的两干扰进行仿真。干扰来向分别为 $\theta_1=10^\circ, \varphi_1=150^\circ, \theta_2=20^\circ, \varphi_2=80^\circ$,两干扰的功率分别比噪声高 50 dB 和 40 dB。仿真结果如图 4(c)所示,在卫星信号来向增益约为 0 dB,其附近比较平坦;在两个干扰来向分别形成了 -155 dB 和 -129 dB 的零陷,在偏离两方向 10° 范围内的零陷深度也能达到 -45 dB 左右。

对相同功率的三干扰、不同功率的四干扰和相同功率的五干扰分别进行仿真,仿真结果与上面的结果类似,分别如图 4(d)、(e)和(f)所示。

从上述的仿真结果中能够看出,该算法对单个或多个(不大于 5 个,由振元数目决定)干扰,都能很好地形成指向卫星信号来向的波束,从而保证对其的正常接收;同时在干扰来向形成零陷,且零陷深度较大能够很好地起到对干扰的抑制作用。但该算法的不足之处是形成的深度零陷较尖锐,其附近形成零陷深度约为 -45 dB 的“旁瓣”。这种情况适用于静止或低动态的卫星定位载体,在信号接收过程中干扰来向不变或变化缓慢,该条件下能够充分利用形成的深度零陷,使干扰不至于落入到深度较浅的旁瓣区域。但对高动态的卫星定位载体而言,由于其动态特性,在信号的接收过程中干扰信号来向会随着载体的运动而变化,容易落入旁瓣区

域,造成对其抑制能力的降低。解决该问题的方案为增加权值更新的频率,使最佳权值向量随着卫星

定位载体的动态而改变,能够“实时”地反映当前干扰信号的来向。

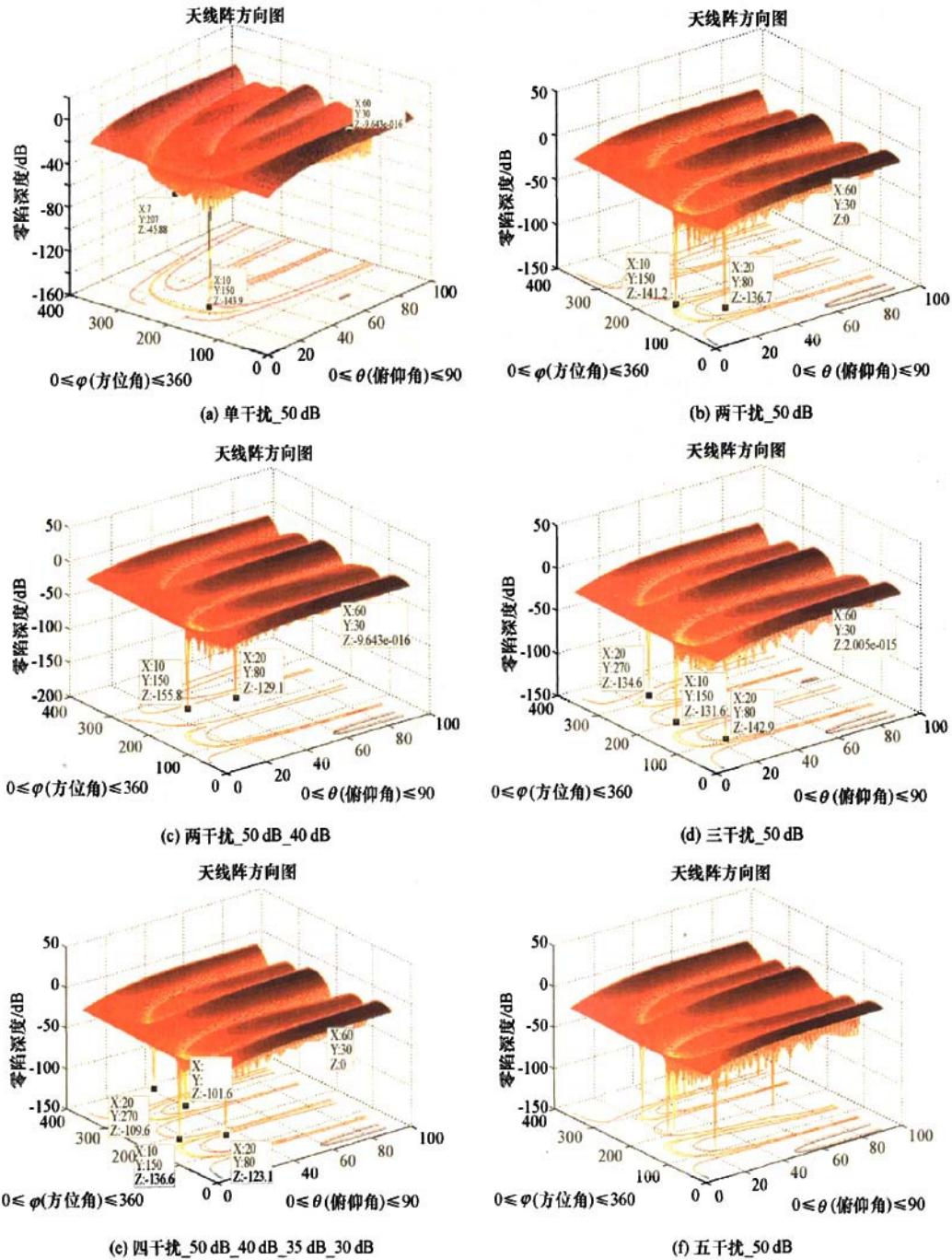


图 4 仿真结果

6 结 论

随着各种精确制导武器对 GPS 接收机抗干扰能力要求的不断提高,各种卫星定位抗干扰技术不断涌现。本文提出了一种将自适应波束形成技术应用于 GPS 接收机抗干扰系统的解决方案。该方案利用卫星定位系统中星历数据容易得到的特点,结合惯性导航设备,由接收到的信号根据波束形成算法,求出在最大化输出信号干扰噪声比准则下的最佳权值向量。仿真结果显示该算法在干扰功率比噪声功率高 50 dB 的情况下,在干扰来向形成约 -140 dB 的零陷,该结果完全能够满足静态或低动态条件下的应用需求。同时,由仿真看出算法形成的深度零陷比较尖锐,造成高动态条件下对干扰的抑制能力有所降低,如何改进算法扩大零陷宽度,

使之适用于高动态载体的应用,是一个有待于进一步深入研究的课题。

参 考 文 献

- 1 胡彩波,原 亮. GPS 干扰和抗干扰技术的研究. 测绘与空间地理信息,2005;28(6):36—38
- 2 邱天爽,魏东兴,唐 洪,等. 通信中的自适应信号处理. 北京:电子工业出版社,2005
- 3 张 斌. 最新智能天线设计与应用新技术制导手册. 北京:科学技术出版社,2007
- 4 Wang Li jun, Zhao Hui chang, Xiong Gang, et al. Adaptive beamforming with coherent interference for GPS receivers. *Microwave and Millimeter Wave Technology'04*, 2004;622—626
- 5 Junqueira C, Suyama R, Von Zuben F J, et al. An evolutive algorithm for blind adaptive beamforming in GPS applications. *Machine Learning for Signal Processing'04*, 2004;715—724

Application of Adaptive Antenna for Satellite Positioning Anti-jamming

WANG Hui, CHAI Jun-shuan

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, P. R. China)

[Abstract] The adaptive beam forming technology according to the feature of the satellite positioning system is presented. A designing plan for satellite positioning receiver anti-jamming system based on the technology is given. It gives out the satellites' orientation vector according to the ephemeris and the output of inertial navigation system. It uses the maximum likelihood estimate of the received signal's covariance matrix, and gives out the optimal weight vector under the rule of maximum output SINR. The simulation gives that this method can form deep null on the direction of one-jamming or several jamming, and gives property gain on the direction of satellite signal. The method can satisfy the request of the anti-jamming ability of antenna array for satellite navigation system, and this result is given in the simulation.

[Key words] smart antenna adaptive beam forming satellite navigation 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>