

# 基于幅相线性约束的自适应和差波束形成方法研究

许京伟, 廖桂生, 朱圣棋

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 阵列雷达自适应和差波束单脉冲测角面临信号对消、训练样本有限、波束保形及零点约束困难等问题. 针对上述问题, 本文提出基于幅相线性约束的自适应和差波束形成方法. 该方法通过增加对主瓣临近角度的幅相线性约束条件, 有效的克服和波束信号对消的现象; 通过引入相位约束条件, 使得差波束的在主瓣方向逼近静态差波束, 具有良好的稳健性. 同时通过合理的设计幅相约束条件实现了单脉冲和差波束测角二维解耦合. 仿真实验验证了本文方法的有效性.

**关键词:** 自适应和差波束; 幅相线性约束; 稳健波束形成; 二维解耦合; 单脉冲测角

**中图分类号:** TN957. 52      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2013) 09-1724-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.09.009

## Approach of Adaptive Sum and Difference Beamforming Based on Magnitude and Phase Linear Constraint

XU Jing-wei, LIAO Gui-sheng, ZHU Sheng-qi

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** Adaptive sum and difference beam pattern of array radar encounters some problems, such as signal cancellation, finite sample supports, beam-pattern maintaining and zero-point constraint and so on. In this paper, an adaptive sum and difference beamforming approach based on magnitude and phase response linear constraint is proposed. In this method, magnitude and phase response constraints on several other directions are set and these directions are around that of the assumed signal. This robust beamforming approach effectively overcomes the signal cancellation problem and shows considerable improvement in signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR). Through imposing these constraints on both magnitude and phase responses, the sum and difference beamformers are drawing up to the standard static beamformers at the region of the main beam. This approach is robust against signal presence in training data. And through properly setting the magnitude and phase constraints, we can implement azimuth and elevation uncoupling in monopulse angle estimation. Simulation examples demonstrate the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** adaptive sum and difference beam pattern; magnitude and phase linear constraint; robust beamforming; two-dimensional uncoupling; monopulse angle estimation

## 1 引言

和差波束测角技术, 具有简单可靠、运算量小、数据率高、抗干扰能力强等优点, 单脉冲测角跟踪技术在导引和测控等中有着广泛的应用. 现代雷达工作环境日益恶劣, 要求雷达能够完成搜索、截获、跟踪、制导等功能的同时还应当具有抗干扰、自适应波束捷变及多目标跟踪能力. 而阵列雷达能够完成自适应干扰抑制和波束捷变, 因此, 阵列天线单脉冲测角技术已日益取得广泛应用, 具有重要的军用和民用价值.

阵列静态和差波束形成可以有效实现目标测角, 阵列天线和差波束加权方法<sup>[1,2]</sup>, 基于时间调制的子阵和差波束形成方法<sup>[3]</sup>可解决和差波束副瓣抑制和主瓣保形问题. 文献[4]研究了不同分布特性的目标单脉冲和差测角的统计性能, 取得很好的应用. 文献[5]中给出了一种改进的两级子阵自适应单脉冲测角方法. 当干扰信号存在时, 自适应抗干扰成为阵列和差波束设计需要解决的问题. 文献[6]中给出了自适应和差波束抑制旁瓣干扰时的近似性能分析. 文献[7]基于线性约束通过增加零点、鉴角率和去耦和三个约束条件研究了空时二维

差波束保形方法,一定程度的克服了主瓣内杂波对差波束的影响.这些方法都是在假定不存在目标信号的前提下完成的.然而实际中由于目标信号的存在,在有限的训练样本条件下协方差矩阵估计存在误差;同时目标信号的真实角度需要后续进行和差测角,因此自适应波束形成的目标信号约束亦是存在误差的.在这种情况下,基于最小方差无失真响应(MVDR)的波束形成器性能下降严重<sup>[8]</sup>.稳健的波束形成方法对和差波束单脉冲测角具有重要意义.文献[9~12]研究了稳健的自适应波束形成方法.文献[13]提出了两点二次约束稳健波束形成方法,可视为增益约束优化的线性约束最小方差(LCMV)波束形成器.文献[14]研究了采用幅度响应约束的 LCMV 波束形成方法.文献[15]提出了相位响应线性约束 LCMV 波束形成方法,具有较强的稳健性.自适应和差波束测角无论采用比幅还是比相的方法,都需要解决主瓣波束保形问题,同时还需要考虑波束形成器的稳健性.

本文针对自适应和差波束主瓣保形问题,提出了基于幅相响应约束的 LCMV 波束形成方法.该方法通过增加对主瓣附近多个方向的幅度响应约束和相位响应约束,使自适应和差波束的幅相响应在主瓣方向接近静态和差波束的幅相响应.然后通过合理的设计幅相响应约束,使得差波束实现方位俯仰二维解耦合,从而实现和差测角二维解耦合.仿真实验验证了本文方法的有效性.

## 2 问题描述

本文主要考虑平面相控阵和差波束形成,以水平面内的矩形平面阵为例,如图 1 三维坐标系中,平面阵的  $x$  轴阵元间距  $d_x$  和  $y$  轴阵元间距  $d_y$  均为工作波长的一半,  $\theta$  和  $\varphi$  分别是空间方位角和俯仰角.

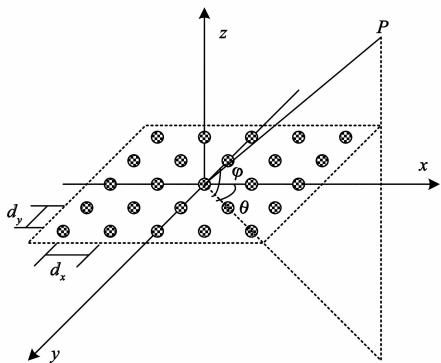


图1 矩形平面相控阵构型

传统的自适应和差波束形成技术可归结为如下的优化问题

$$\text{和波束} \begin{cases} \min_{w_\Sigma} w_\Sigma^H R_X w_\Sigma \\ \text{s.t. } w_\Sigma^H s_\Sigma = 1 \end{cases} \quad \text{差波束} \begin{cases} \min_{w_\Delta} w_\Delta^H R_X w_\Delta \\ \text{s.t. } w_\Delta^H s_\Delta = 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中  $R_X$  为协方差矩阵估计,实际中通常采用距离维样本估计得到,  $R_X = (x_l x_l^H / L, l = 1, 2, \dots, L, x_l$  为第  $l$  个距离门的采样快拍数据.  $w_\Sigma$  和  $w_\Delta$  分别为自适应和差波束形成器权矢量.  $s_\Sigma$  和  $s_\Delta$  分别为静态和差波束权矢量,对于均匀面阵,  $s_\Sigma$  为波束指向对应的导向矢量,而  $s_\Delta$  采用对称取反得到.由式(1)得自适应和差波束形成器权矢量为

$$w_\Sigma = \mu R_X^{-1} s_\Sigma \\ w_\Delta = \mu R_X^{-1} s_\Delta \quad (2)$$

其中  $\mu$  为归一化因子,  $s_\Sigma$  和  $s_\Delta$  为由假定目标方向得到和差通道约束矢量,真实的目标角度是需要通过和差波束测量的.因此和差通道阵列天线方向图分别为

$$F_\Sigma(\Delta\theta, \Delta\varphi) = w_\Sigma^H a(\theta_0 + \Delta\theta, \varphi_0 + \Delta\varphi) \\ F_\Delta(\Delta\theta, \Delta\varphi) = w_\Delta^H a(\theta_0 + \Delta\theta, \varphi_0 + \Delta\varphi) \quad (3)$$

其中  $\theta_0$  和  $\varphi_0$  为波束指向的方位角和俯仰角,  $\Delta\theta$  和  $\Delta\varphi$  分别为目标空间方向偏离波束指向的方位角偏差和俯仰角偏差,  $a(\theta, \varphi)$  为空域导向矢量.单脉冲鉴角曲面定义为

$$\text{MRS} = \frac{F_\Delta(\Delta\theta, \Delta\varphi)}{F_\Sigma(\Delta\theta, \Delta\varphi)} = G(\Delta\theta, \Delta\varphi) \quad (4)$$

式(4)表明,单脉冲和差测角的鉴角曲面是方位角偏差和俯仰角偏差的函数,因此可以由式(4)计算求得目标信号的空间角度估计.

由于阵元间互耦、近场特性、波形畸变以及非理想幅相校正以及阵列形变等因素,使得目标导向矢量估计误差难以避免;此外,在有限的训练样本条件下协方差矩阵估计存在误差,尤其当样本中存在目标信号时协方差矩阵收敛更慢.因此,实际中不仅和波束主瓣会发生畸变现象,而且差波束零点也会因训练样本中包含目标信号而发生偏离,从而导致目标测角性能严重下降.

线性约束最小方差波束形成方法旨在保持主瓣方向的幅度响应,具有一定的稳健性.然而,仅仅考虑幅度约束通常难以保证和差通道主瓣波束的形状,对和差测角产生较大的影响.第3节提出幅相线性约束的方法,通过结合幅度响应约束和相位响应约束,从而使得到的和差波束在主瓣方向逼近静态和差波束,降低目标信号的存在对自适应和差测角的影响.同时考虑二维测角方位俯仰耦合带来巨大的计算压力,本文设计和差波束二维解耦合方法,通过合理的幅相线性约束,实现了差波束主瓣方向方位俯仰二维解耦合.

## 3 基于幅相线性约束的自适应和差波束形成技术

本文方法的基本原理是:在传统幅度响应约束的

基础上增加相位响应约束构成幅相约束,在假定的目标信号方向以及附近的多个方向采用幅相约束,使自适应和差波束的主瓣与静态和差波束的主瓣在幅相响应特性上保持一致,从而使自适应波束形成在完成抗干扰的同时实现主瓣和差波束保形。

自适应和波束形成器可表达为

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{w}_{\Delta}} \mathbf{w}_{\Delta}^H \mathbf{R}_{\Delta} \mathbf{w}_{\Delta} \\ \text{s.t. } \mathbf{w}_{\Delta}^H \mathbf{C} = \mathbf{u}_{\Sigma}^H \end{cases} \quad (5)$$

其中  $\mathbf{w}_{\Delta}$  为和波束自适应权矢量,  $\mathbf{C} = [\mathbf{a}(\theta_0, \varphi_0), \dots, \mathbf{a}(\theta_p, \varphi_q), \dots, \mathbf{a}(\theta_P, \varphi_Q)]$  为假定目标方向及附近方向的约束矩阵,  $\mathbf{a}(\theta, \varphi)$  为空间导向矢量,  $\theta$  为方位角,  $\varphi$  为俯仰角,  $(\theta_0, \varphi_0)$  为假定的目标方向,其余为以目标方向为中心构成的约束区域。  $\mathbf{u}_{\Sigma}$  与传统幅度响应约束不同,  $\mathbf{u}_{\Sigma} = (u_{00}, \dots, u_{pq}, \dots, u_{PQ})^H$  为和波束幅相响应矢量,其中每个元素与静态和波束的幅相响应值相对应,满足关系

$$u_{pq}^* = s_{\Sigma}^H \mathbf{a}(\theta_p, \varphi_q), p=0,1,\dots,P; q=0,1,\dots,Q \quad (6)$$

其中  $s_{\Sigma}$  为和波束静态权矢量,通常取  $s_{\Sigma} = \mu \mathbf{a}(\theta_0, \varphi_0)$ ,  $\mu$  为归一化的因子。将静态权  $s_{\Sigma}$  代入式(6)可得

$$u_{pq}^* = \mu \mathbf{a}(\theta_0, \varphi_0)^H \mathbf{a}(\theta_p, \varphi_q) = \rho_{pq} e^{j\varphi_{pq}} \quad (7)$$

其中  $\rho_{pq}$  为静态权矢量与任意约束方向的导向矢量的相关系数,即  $\rho_{pq} = \mu \langle \mathbf{a}(\theta_0, \varphi_0), \mathbf{a}(\theta_p, \varphi_q) \rangle$ ,  $\varphi_{pq}$  为相位差。系数  $\mu$  可以保证  $\max\{\rho_{pq}\} (p=0,\dots,P; q=0,\dots,Q) = 1$ , 因此

$$\mu = \frac{\max\{\rho_{pq}\}}{\max\{\|\mathbf{a}(\theta_0, \varphi_0)^H \mathbf{a}(\theta_p, \varphi_q)\|\}} = \frac{1}{\|\mathbf{a}(\theta_0, \varphi_0)\|_2^2} \quad (8)$$

因此,得到和波束自适应权矢量为

$$\mathbf{w}_{\Delta} = \mathbf{R}_{\Delta}^{-1} \mathbf{C} (\mathbf{C}^H \mathbf{R}_{\Delta}^{-1} \mathbf{C})^{-1} \mathbf{u}_{\Sigma} \quad (9)$$

对比传统线性约束自适应波束形成,本文方法的不同之处在于增加了相位约束,并且其幅度约束为静态波束形成主瓣的幅度响应值,而相位约束为静态波束在对应方向的阵列输出相位响应。

由于平面阵测角存在方位俯仰二维耦合问题,而采用二维鉴角曲面进行测角的计算量很大,因此本文考虑进行二维解耦合,将二维测角简化为一维测角。则自适应差波束形成表示为(以俯仰差波束形成为例,方位差波束形成方法类似)

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{w}_{\Delta}} \mathbf{w}_{\Delta}^H \mathbf{R}_{\Delta} \mathbf{w}_{\Delta} \\ \text{s.t. } \mathbf{w}_{\Delta}^H \mathbf{C} = \mathbf{v}_{\Delta}^H \end{cases} \quad (10)$$

其中  $\mathbf{v}_{\Delta} = (v_{00}, \dots, v_{pq}, \dots, v_{PQ})^H$  为差波束幅相响应约束矢量,其中每个元素与静态差波束的幅相响应值相对应,差波束约束矢量也可以按照式(6)构造和波束约束矢量的方法得到,然而为了解决二维测角中方位俯仰耦合的问题,本文设计的幅相响应约束方法如下图

所示(以  $P=2, Q=2$  为例)

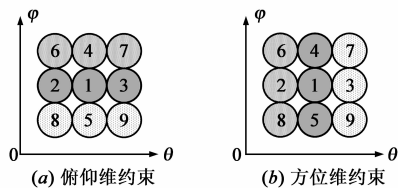


图2 差波束幅相约束示意图

图2中给出了和差波束幅相响应约束示意图,数字1~9表示约束矩阵  $\mathbf{C}$  的9个空间导向矢量对应的空间方向。图2(a)中给出了俯仰维差波束的约束方法:沿着方位向采用相同的幅度响应约束,即1、2、3的幅度均与1相同(等于零),4、6、7与4相同,5、8、9与5相同;而相位响应约束仍与静态差波束的相位响应相同,即

$$\angle[v_{pq}^*] = \angle[s_{\Delta}^H \mathbf{a}(\theta_p, \varphi_q)], p=0,1,\dots,P; q=0,1,\dots,Q \quad (11)$$

其中  $s_{\Delta}$  为差波束静态权矢量,  $\angle[\cdot]$  表示取相位角。

$$v_{pq}^* = |v_q| e^{j \cdot \angle[s_{\Delta}^H \mathbf{a}(\theta_p, \varphi_q)]}, p=0,1,\dots,P; q=0,1,\dots,Q \quad (12)$$

其中复约束  $v_{pq}$  的模值仅与  $q$  有关(即仅与俯仰方向有关),不随  $p$  的变化而变化,相位约束与  $p, q$  均有关。因此,俯仰差波束约束方向沿着方位向采用相同的幅度约束不同的相位约束。实际上,在假定的目标俯仰角( $q=0$ )上,其幅度响应约束为零( $|v_q|=0$ )。类似的,图2(b)中给了方位维差波束的幅相响应约束方法:沿着俯仰向采用相同的幅度响应约束不同的相位响应约束,即方位差波束的约束矢量的元素表示为

$$v_{pq}^* = |v_p| e^{j \cdot \angle[s_{\Delta}^H \mathbf{a}(\theta_p, \varphi_q)]}, p=0,1,\dots,P; q=0,1,\dots,Q \quad (13)$$

因此,分别将俯仰维和方位维幅相响应约束矢量代入式(9),即可得到方位和俯仰差波束自适应权矢量为

$$\mathbf{w}_{\Delta} = \mathbf{R}_{\Delta}^{-1} \mathbf{C} (\mathbf{C}^H \mathbf{R}_{\Delta}^{-1} \mathbf{C})^{-1} \mathbf{v}_{\Delta} \quad (14)$$

其中  $\mathbf{v}_{\Delta}$  按式(12)构造,即得到俯仰维自适应差波束权矢量,按式(13)构造,即得到方位维自适应差波束权矢量。值得注意的是本文方法中,无论是和波束形成还是差波束形成,均需要先验得到静态和差波束权矢量,实际中和波束静态权矢量容易得到,对于差通道,当存在阵元误差、幅相响应不一致等因素甚至非对称结构阵列时,需要实际测量得到静态差波束权,可以保证本文方法的性能。

## 4 仿真实验

本节从仿真实验给出了本文方法的有效性验证。仿真参数如表1所示。

表 1 雷达系统仿真参数

参数	参数值	参数	参数值
工作波长 $\lambda$	0.03m	通道行数 $M$	10
阵元间距 $d$	0.015m	通道列数 $N$	10
信噪比 SNR	10dB	干噪比 INR	30dB

4.1 目标信号存在时的波束形成方法比较

本节通过一维自适应和差波束形成验证本文方法

对目标信号的稳健性.对图 1 中的平面阵做列合成得到一维等距线阵,阵元数  $N = 10$ ,假定目标真实信号入射方向为  $90^\circ$ ,波束主瓣指向为  $88^\circ$ ;干扰信号相互独立,干扰个数为 2,其入射方向分别为  $50^\circ$  和  $130^\circ$ ;采样快拍数为 200;约束方向分别为  $85^\circ, 88^\circ$  和  $91^\circ$ .其他参数如表 1 所示.

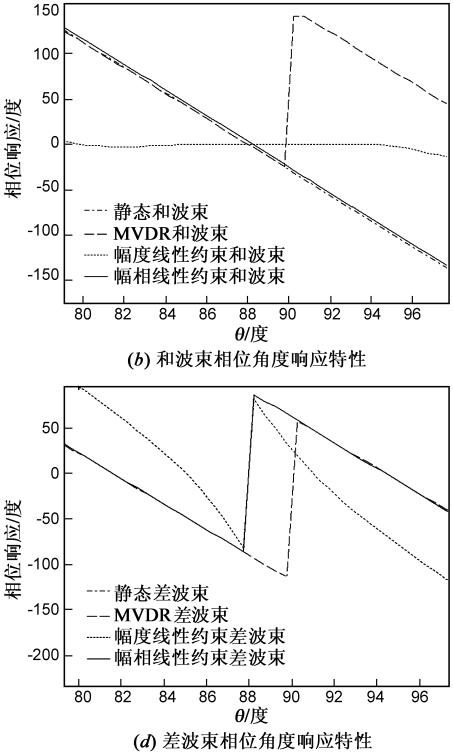
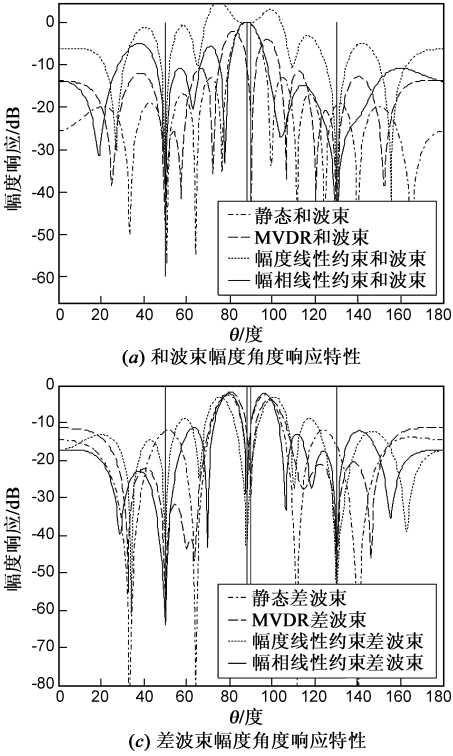


图3 一维和差波束幅相响应特性

图 3 中分别给出了静态波束形成、最小方差无失真响应(MVDR)波束形成、传统幅度线性约束(LCMV)波束形成以及本文幅相线性约束(MP-LCMV)波束形成四种方法的幅度响应特性和相位响应特性.其中图 3(a)和图 3(b)分别给出了和波束的幅相响应特性,图 3(c)和图 3(d)为差波束的幅相响应特性.图中的竖线(自左至右)依次对应干扰 1 方向、波束指向、真实信号方向和干扰 2 方向.在幅相角度响应中,幅度响应的零点位置对应相位响应突变点.由图 3 可见,由于目标信号的存在, MVDR 自适应和波束会出现目标相消现象,自适应差波束在目标方向(而非波束指向)形成零陷,直接导致和差测角难以完成.而传统的幅度线性约束波束形成方法约束主瓣方向相位响应相同(均为零),其和差波束在主瓣方向均偏离静态波束,且和波束在主瓣方向存在波动,难以保证和差测角的线性鉴角区间.而本文提出的 MP-LCMV 方法自适应和差波束在主瓣方向与静态和差波束基本一致(幅相角度响应特性均一致),能够

得到近似静态和差测角的鉴角斜率,并且在干扰方向自适应形成零陷;且对目标信号污染导致协方差矩阵估计误差以及目标信号约束不准确的情况均具有稳健性.此外,由于本文方法的幅相角度响应特性在主瓣方向与静态和波束基本相同,此时波束形成对信号波形的影响最小.

4.2 阵列误差条件下波束形成方法分析

由于阵元幅相响应不一致等因素的存在,导致阵列天线和差波束发生变形,本节利用静态和差波束权矢量作为先验信息,给出本文波束形成方法在幅相误差条件下的有效性验证.仿真条件同 4.1 节,阵列误差为零均值复随机扰动产生的幅相响应误差,且阵元间误差互相独立.其他参数如表 1 所示.

图 4 给出了利用 MP-LCMV 和差波束形成方法得到的在不同幅相误差水平下的鉴角曲线,作为对比给出了静态和差波束的鉴角曲线.由图可见,由于幅相误差的存在,导致鉴角曲线的斜率变小.当幅相误差较小

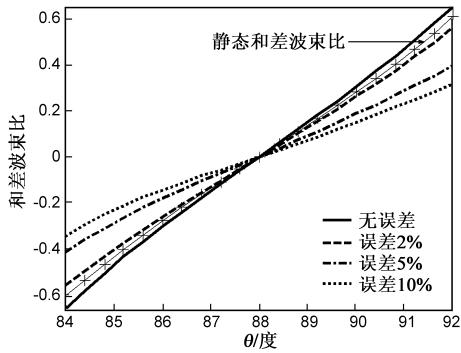


图4 不同幅相误差下的鉴角曲线比较

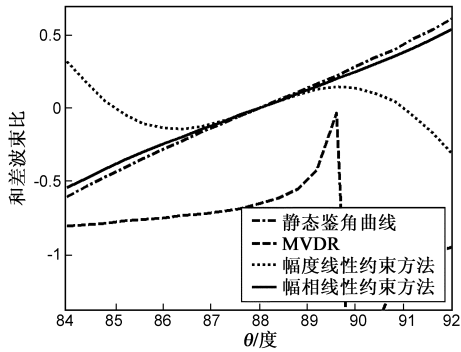


图5 幅相误差为5%时的和差波束鉴角曲线

(如误差 2% 的情况)时,鉴角曲线偏离静态鉴角曲线较小,且具有较大的线性区间;而当幅相误差较大(如误差 10% 的情况)时,鉴角曲线偏离静态曲线较大并且线性区间变小,鉴角性能下降.图 5 中给出了幅相误差为 5% 时的不同和差波束形成方法鉴角曲线比较.由图可见,存在误差条件且目标信号存在时,MVDR 波束形成方法鉴角曲线严重畸变,实际中不能用于测角;传统幅度 LCMV 方法所得鉴角曲线的线性区间小,一旦目标信号真实方向超出这一线性鉴角区间,将导致较大的测角误差;而本文方法得到的鉴角曲线,具有良好的线性度,且其线性区间较大,具有较好的测角性能.

4.3 二维解耦合特性仿真

本节实验验证方位俯仰二维解耦合性能.目标真实空间方向为 $(\theta, \varphi) = (70^\circ, 45^\circ)$ ,波束指向为 $(\theta, \varphi) = (68^\circ, 46^\circ)$ .相互独立的干扰信号 2 个,其入射方向分别为 $(\theta_1, \varphi_1) = (40^\circ, 10^\circ)$ , $(\theta_2, \varphi_2) = (50^\circ, 30^\circ)$ ;采样快拍数为 200.

图 6(a)和图 6(b)中分别给出了俯仰维静态差波束和幅相响应线性约束二维解耦合自适应差波束顶视图.平面相控阵和差波束测角对于方位角和俯仰角的测量通常是耦合的,如图 6(a)中在主瓣附近(方框区域)存在方位俯仰鉴角耦合现象.根据第 3 节分析,通过增加解耦合线性约束,改变俯仰差波束在主瓣附近的

幅相响应特性,从而实现二维测角解耦合.如图 6(b)中,差波束的幅度响应特性沿方位向变化很小,其差波束零点分布在一条近似与方位角无关的直线上(主瓣附近).实质上,本文解耦合约束方法直接约束差波束沿方位向的幅相响应,比导数约束方法更直接有效.差波束解耦合约束改变了静态差波束的主瓣幅度响应特性,因此,基于 MP-LCMV 差波束解耦合后在主瓣方向与静态差波束相比略有损失.

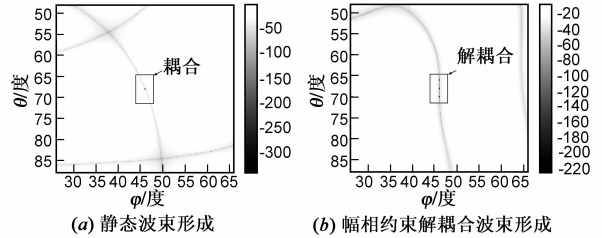


图6 俯仰维差波束解耦合特性比较

图 7(a)和图 7(b)中分别给出了俯仰维静态和差波束和 MP-LCMV 和差波束在主瓣方向的一族鉴角曲线,其对应方位角范围为 $[63^\circ, 73^\circ]$ .如图 7(a)所示,静态和差波束测角存在方位和俯仰的耦合:不同的方位角对应的俯仰维鉴角曲线不同.目标的方位角估计误差会直接反映到俯仰角测角误差中,因此对于方位和俯仰角的测量是耦合的、测不准的.利用鉴角曲面进行二维搜索可以实现二维测角,然而二维搜索计算量大.本文方法可以有效的实现方位俯仰解耦合,如图 7(b)中所示,鉴角曲面的俯仰维侧视图近似为直线,即对于主瓣附近不同的方位角,其鉴角曲线随俯仰角的变化为近似重合的直线,此时,方位角的测角误差对俯仰角的测量不会产生任何影响.同理,方位向测角也不受俯仰角测角误差的影响.

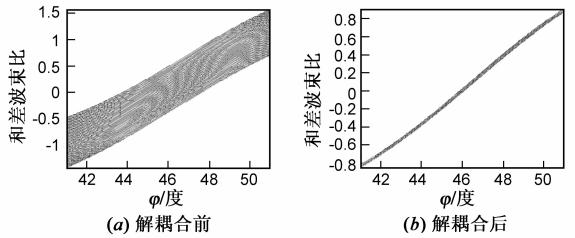


图7 不同方位角的俯仰和差鉴角曲线束

5 结论

目标导向矢量约束以及协方差矩阵估计存在误差,不仅导致和波束主瓣会发生畸变现象,而且差波束零点也会发生偏离.本文针对和差波束主瓣保形问题,提出了基于幅相响应线性约束的自适应和差波束形成方法,该方法相比传统幅度响应约束具有良好的主瓣保形能力,在主瓣方向本文和差波束逼近静态和差波

束,且本文方法对目标约束误差具有稳健性.同时本文设计了二维测角解耦合方法,通过合理的约束差波束主瓣幅响应有效的实现二维解耦合.

## 参考文献

- [1] David A Shnidman. An optimization technique for sum and difference array factors[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(1): 360 – 370.
- [2] Alvarez Folgueiras M, Rodriguez Gonzalez J A, Ares Pena R. Synthesising Taylor and Bayliss linear distributions with common aperture tail[J]. Electronics Letters, 2009, 45(1): 18 – 19.
- [3] P Rocca, L Manica, L Poli, A Massa. Synthesis of compromise sum-difference arrays through time modulation[J]. IET Radar Sonar and Navigation, 2009, 3(6): 630 – 637.
- [4] Ulrich R O Nickel, Eric Chaumette, Pascal Larzabal. Statistical performance prediction of generalized monopulse estimation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(1): 381 – 404.
- [5] 胡航, 张皓. 一种改进的两级子阵级自适应单脉冲方法[J]. 电子学报, 2009, 37(9): 1996 – 2003.  
HU Hang, ZHANG Hao. An improved two-stage processing approach of adaptive monopulse at subarray level[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9): 1996 – 2003. (in Chinese)
- [6] 韩彦明, 陈希信. 自适应和差波束形成与单脉冲测角研究[J]. 现代雷达, 2010, 32(12): 44 – 47.  
Han Yanming, Chen Xixin. A study on adaptive sum and difference beamforming and monopulse angle estimation[J]. Modern Radar, 2010, 32(12): 44 – 47. (in Chinese)
- [7] 王璐, 苏志刚, 吴仁彪. 基于线性约束的空时自适应单脉冲技术[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(10): 2501 – 2505.  
Wang Lu, Su Zhigang, Wu Renbiao. Linear-constraint-based space-time adaptive monopulse processing technique[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(10): 2501 – 2505. (in Chinese)
- [8] Jian Li, Petre Stoica. Robust Adaptive Beamforming[M]. New York: Wiley and Sons, 2006.
- [9] Krolik J L. The performance of matched-field beamformers with Mediterranean vertical array data[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(10): 2605 – 2611.
- [10] 刘聪锋, 廖桂生. 基于二次约束的稳健 LCMP 波束形成算法[J]. 电子学报, 2010, 38(9): 1990 – 1996.  
LIU Cong-feng, LIAO Gui-sheng. Robust LCMP beamformer under quadratic constraint[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(9): 1990 – 1996. (in Chinese)
- [11] Choi Y H. Robust adaptive array using Taylor series expansion[J]. Electronics Letters, 2011, 47(15): 840 – 841.

- [12] Joni Polili Lie, Wee Ser, Chong Meng Samson See. Adaptive uncertainty based iterative robust Capon beamformer using steering vector mismatch estimation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(9): 4483 – 4488.
- [13] Chunyang Chen, P P Vaidyanathan. Quadratically constrained beamforming robust against direction-of-arrival mismatch[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(8): 4139 – 4150.
- [14] Zhu Liang Yu, Wee Ser, Meng Hwa Er, Zhenghui Gu, Yuanqing Li. Robust adaptive beamformers based on worst-case optimization and constraints on magnitude response[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(7): 2615 – 2628.
- [15] Jingwei Xu, Guisheng Liao, Shengqi Zhu. Robust LCMV beamforming based on phase response constraint[J]. Electronics Letters, 2012, 48(20): 1304 – 1306.

## 作者简介



**许京伟** 男, 1987 年 5 月生于山东日照. 现为西安电子科技大学信号与信息处理专业博士生, 主要研究方向为空时自适应处理和阵列信号处理.

E-mail: xujingwei1987@163.com



**廖桂生** 男, 1963 年 6 月生于广西桂林. 现为西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室教授, 博士生导师, 国家杰出青年基金获得者, 长江学者特聘教授. 先后主持和承担国防 973 项目课题、国家“863”高新技术项目、国防科技预研、国家自然科学基金重点基金等十余项科研任务. 现主要从事雷达探测系统信号处理, 包括空时自适应处理、天基预警和阵列信号处理等研究领域.

E-mail: gsliao@xidian.edu.cn



**朱圣棋** 男, 1984 年 10 月生于江西赣州. 现为西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室副教授, 主要研究领域为: 阵列信号处理、机载/星载雷达地面运动目标检测以及参数估计.

E-mail: zhushengqi8@163.com