

文章编号: 1001-2486(2009)03-0092-05

# 一种新的 MIMO 雷达 DOA 估计方法\*

许红波, 王怀军, 陆 珉, 粟 毅

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 多输入多输出(MIMO)雷达通过分布式布阵可以获得空间分集增益, 抑制目标闪烁, 但过大的阵元间隔不利于 DOA 估计。采用发射阵列分布式布阵, 接收阵列密布阵的收发分置系统, 通过发射正交信号, 在接收端经匹配滤波信号分选后构造虚拟子阵, 提出了一种子阵优选算法, 抑制目标闪烁, 实现多目标超分辨。对子阵优选算法在 MIMO 二维空间定位中进行扩展, 使 MIMO 同时具备抑制目标闪烁和提高自由度的特点。最后仿真实验表明了该算法的有效性。

**关键词:** 阵列信号处理; MIMO 雷达; 正交信号; DOA

中图分类号: TN957.52 文献标识码: B

## A New Algorithm on Estimation of DOA Using MIMO Radar

XU Hong-bo, WANG Huai-jun, LU Min, SU Yi

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** MIMO radar obtains spatial diversity by distributed sensors, which are difficult for the estimation by DOA. In this paper, the transmit elements are widely separated with the receiving elements closely spaced. By transmitting orthogonal signals, virtual subarrays are designed through filters, and the Subarrays Selection(SAS) algorithm is proposed. The algorithm obtains spatial diversity as well as robust super-resolution direction-of-arrival estimation. The proposed algorithm is extended in 2-D location of MIMO, then it obtains spatial diversity as well as increased freedoms. Finally the simulated results show that the SAS algorithm is effective.

**Key words:** array signal processing; MIMO radar; orthogonal signals; DOA

MIMO(Multiple-input Multi-output)雷达技术近年来成为国内外的研究热点<sup>[1-5]</sup>。按照阵列结构的不同,一般可分为两类,即以 Fishler 为代表提出的分布阵统计 MIMO 雷达<sup>[3]</sup>和以 Bekkerman 为代表提出的密布阵多通道雷达<sup>[5]</sup>。前者的优点主要在于对目标观测的空间分集,各通道实现了对目标 RCS 的空间解相关处理,使得 RCS 平稳输出,克服了 RCS 闪烁对目标检测性能的影响;缺点主要在于其分布阵列形成的各观测通道获取的独立目标信息难以采用传统的阵列信号处理手段实现对目标方位向的估计。而与前者不同,后者多通道雷达其优点主要在于可以对目标信息相关采样,通过发射正交信号匹配滤波分离后,扩展系统的有效孔径,系统的自由度成几何级数增加。Lehmann 采取了一个折中的考虑,发射采用分布阵,接收采用密布阵,一方面通过发射分布阵获得空间分集增益,一方面通过接收密布阵进行波束形成波达方向估计<sup>[4]</sup>。不过,Lehmann 没有考虑多个目标的波达方向超分辨估计。

MIMO 雷达多个通道同时发射正交信号,在每一个接收阵元端对所有的发射波形进行匹配滤波处理,可以将接收信号分选开来,对于  $N$  个发射  $M$  个接收的阵列,每一接收阵元端分选出  $N$  路信号,整个接收阵列就得到  $MN$  路信号。基于这一原理,本文采用发射分布阵,接收密布阵的布阵方式,在接收端构造多个虚拟子阵,提出了一种子阵优选算法,可以抑制目标闪烁,并实现多目标超分辨估计。对子阵优选算法在 MIMO 二维定位中进行扩展,首次将 MIMO 的抑制目标闪烁和提高自由度的特点很好地结合起来,最后进行了仿真实验分析。

\* 收稿日期:2008-12-01

基金项目:国家部委基金资助项目

作者简介:许红波(1979-),男,博士生。

## 1 信号模型

假定存在  $M$  元接收均匀线阵 (ULA), 阵元间距为  $d \leq \lambda/2$ 。存在  $N$  个发射阵元, 发射阵元分布式布置。接收阵列在远场区, 以第一个接收阵元为参考点, 第  $m$  个阵元与参考阵元的间距为  $(m-1)d$ ,  $\theta_i$  为接收阵列法线和第  $i$  个目标在参考阵元的夹角。则以参考阵元为起始点, 接收阵列的导向矢量为

$$\mathbf{a}(\theta_i) = [1, \exp(j\beta_i), \dots, \exp(j(M-1)\beta_i)]^T \quad (1)$$

其中,  $\beta_i = 2\pi d \sin(\theta_i) / \lambda$ ,  $\lambda$  表示信号波长。

为获得空间分集增益, 发射阵元之间距离满足文献[3]的定义。各个发射阵元与目标  $i$  时延为  $\tau_{i1}$ , 相位为  $e^{-j\omega_0 \tau_{i1}}$  ( $n = 1, \dots, N$ ), 表示为矢量形式:

$$\mathbf{b}_i = [\exp(-j\omega_0 \tau_{i1}), \exp(-j\omega_0 \tau_{i2}), \dots, \exp(-j\omega_0 \tau_{iN})]^T \quad (2)$$

其中,  $\omega_0 = 2\pi c / \lambda$ ,  $c$  为光速。各个发射信号对应目标  $i$  的回波信号复幅度为  $h_{ni}$  ( $n = 1, \dots, N$ )。  $h_{ni}$  受到目标散射中心分布的影响, 以及目标与发射阵元的相对角度、相对距离的影响等。假定目标为 Swerling I 模型,  $h_{ni} \sim CN(0, 1)$ 。

令发射信号为同频带时域正交 PCM 信号, 表示为  $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_N]^T$ , 则  $K$  个目标的接收信号为

$$\mathbf{X}[l] = \sum_{i=1}^K \mathbf{a}(\theta_i) [\text{diag}(\mathbf{H}_i) \mathbf{b}_i]^T \mathbf{s}[l] + \mathbf{w}[l], \quad l = 1, \dots, L \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{H}_i = [h_{1i} \ h_{2i} \ \dots \ h_{Ni}]^T$ ,  $\text{diag}(\mathbf{H}_i)$  表示以  $\mathbf{H}_i$  的元素为对角元素的对角矩阵,  $L$  表示快拍数,  $\mathbf{w}$  为高斯噪声矢量, 其元素为独立同分布、均值为 0、方差为  $\sigma_w^2$  的复随机变量。

令  $\alpha_i = \text{diag}(\mathbf{H}_i) \mathbf{b}_i$ ,  $\alpha_i = [\alpha_{i1} \ \alpha_{i2} \ \dots \ \alpha_{iN}]^T$ , 则式(3)可以表示为

$$\mathbf{X}[l] = \sum_{i=1}^K \mathbf{a}(\theta_i) \alpha_i^T \mathbf{s}[l] + \mathbf{w}[l], \quad l = 1, \dots, L \quad (4)$$

## 3 子阵选优算法

### 3.1 虚拟子阵的构造及 DOA 估计

关于虚拟 DOA 估计历来有研究<sup>[6]</sup>, 本文则从虚拟子阵的角度来进行 DOA 估计。由式(4)可得充分统计矢量<sup>[6]</sup>为

$$\eta_n \triangleq \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{l=1}^L \mathbf{X}[l] s_n^* [l], \quad n = 1, \dots, N \quad (5)$$

“\*”表示共轭, 则充分统计矩阵为

$$\mathbf{E}_{M \times N} = [\eta_1, \dots, \eta_N] = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{l=1}^L \mathbf{X}[l] \mathbf{s}^H [l] \quad (6)$$

“H”表示共轭转置, 矩阵  $\mathbf{E}$  的第  $n$  列代表了第  $n$  个发射信号在接收阵列的输出。

将式(4)代入式(6)可得

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \sqrt{L} \sum_{i=1}^K \mathbf{a}(\theta_i) \alpha_i^T \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{s}[l] \mathbf{s}^H [l] + \mathbf{V} \\ &= \sqrt{L} \sum_{i=1}^K \mathbf{a}(\theta_i) \alpha_i^T + \mathbf{V} \end{aligned} \quad (7)$$

这里,  $\mathbf{V} = \left( \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{l=1}^L \mathbf{w}[l] \mathbf{s}^H [l] \right)$ , 有  $\mathbf{V} \sim CN(0, \sigma_w^2 \mathbf{I}_M)$ 。

则  $\mathbf{E}$  的第  $n$  列可以写成

$$\eta_n = \mathbf{E} \mathbf{J}_n = \sqrt{L} \sum_{i=1}^K \mathbf{a}(\theta_i) \alpha_{ni} + \mathbf{v}_n, \quad n = 1, \dots, N \quad (8)$$

这里  $\alpha_{ni}$  代表了行向量  $\alpha_i^T$  的第  $n$  元,  $\mathbf{J}_n = [0, \dots, 1, \dots, 0]^T_{1 \times N}$ , 第  $n$  个元素为 1, 其余元素为 0。

式(8)可以表示为

$$\eta_n = \sqrt{LA}(\theta) \varphi_n + \nu_n \quad (9)$$

这里  $A(\theta) \triangleq [a(\theta_1), \dots, a(\theta_k)]$ , 而且  $\varphi_n \triangleq [\alpha_{n1}, \dots, \alpha_{nk}]^T$ 。统计模型  $E$  相当于产生了  $MN$  个虚拟阵元, 现在分成  $N$  个相同结构的子阵, 每个发射信号对应一个子阵, 子阵结构与物理接收阵相同, 信号来向也与物理接收阵相同, 每个子阵包括  $M$  个阵元, 即  $E$  的第  $n$  列可以表示第  $n$  个子阵。因此第  $n$  个子阵的协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_n = LA(\theta) E[\varphi_n \varphi_n^H] A^H(\theta) + E[\nu_n \nu_n^H] \quad (10)$$

第  $n$  个子阵采用 capon 方法进行方位向估计, 有

$$\mathbf{p}_n = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta) (\mathbf{R}'_n)^{-1} \mathbf{a}(\theta)} \quad (11)$$

对所有  $N$  个子阵分别进行 capon 方位向估计, 得到  $N$  个方位谱  $\{p_1, \dots, p_n, \dots, p_N\}$ , 然后取估计相对成功的作为 MIMO 的输出, 估计相对成功的准则定义为估计出的目标最多, 且角度最近的两峰值之间的方位幅度与较小峰值的幅度差距最大。由式(11)可知, 同时可分辨多个目标。这种方法在一定程度上克服了目标闪烁, 且简单易处理, 方便进行多功能扩展。

### 3.2 子阵优选算法在二维空间定位的扩展

基于上文提出的算法, 发射阵列做出修改, 将每个发射阵元用子阵列代替, 也即发射为分布式子阵列, 则每一发射接收对的估计采用类似上文的推导可得

$$\mathbf{p}'_n(\hat{\theta}_r, \hat{\theta}_t) = \frac{1}{\kappa^H(\theta_r, \theta_t) (\mathbf{R}'_n)^{-1} \kappa(\theta_r, \theta_t)} \quad (12)$$

其中,  $\kappa(\theta_r, \theta_t) = \sqrt{L} \text{vec}[\mathbf{a}(\theta_r) \mathbf{b}_n^T(\theta_t)]$ ,  $\mathbf{a}(\theta_r)$  为接收阵列的方向向量,  $\mathbf{b}_n(\theta_t)$  为第  $n$  个发射子阵的方向向量。  $\theta_r, \theta_t$  分别为目标的接收角度和发射角度。

经式(12)估计出来的是目标二维方向, 即目标分别相对发射子阵和接收阵列的方向, 这两个方向角度自动配对, 在目标位置未知的情况下可以以此定位目标。同理得到  $N$  个方位谱  $\{p'_1, \dots, p'_n, \dots, p'_N\}$ , 然后取估计相对成功的作为 MIMO 的输出, 估计相对成功的准则定义为估计出的目标最多, 且接收阵列角度最近的两峰值之间的方位幅度与较小峰值的幅度差距最大。

由式(12)分析可知,  $\kappa(\theta_r, \theta_t)$  为  $MN_n$  维 ( $N_n$  为第  $n$  发射子阵的阵元个数), 每个发射接收对的处理扩展了阵列孔径, 提高了自由度, 同时子阵优选算法抑制目标闪烁的特点, 使得该系统将 MIMO 雷达的两个主要特点很好地结合起来。

## 4 仿真实验结果与分析

采用等距线阵作为接收阵, 接收阵元间隔半波长, 发射阵元分布布阵。相控阵等效为一发多收的形式, 1 个阵元发射, 多个阵元的半波长间隔均匀线阵接收, 即为 MIMO 的一种特例。采用 capon 方法估计波达方向, 相控阵和 MIMO 发射能量始终保持一致, MIMO 阵列采用 5 个阵元分布式发射。

图 1 为采用 8 个接收阵元, 目标在  $-5^\circ, 1^\circ, 40^\circ$ , 信噪比为 20dB, 快拍数 100, 方位向估计仿真比较。从图 2 可见, MIMO 子阵优选法提高了分辨力, 同时三个目标能量皆较大; 而相控阵虽然也有较好的分辨力, 但是由于受目标闪烁的影响, 有的目标能量很小。

采用 8 个接收阵元, 目标在  $-5^\circ, 10^\circ$ , 信噪比为 10dB, 快拍数 100, 仿真成功概率与发射阵元数的关系成功概率比较 (当空间谱曲线中在信源方位附近产生明显的谱峰, 且两峰值之间的方位幅度小于峰值幅度 3dB 时认为估计成功)。图 2 为 100 次蒙特卡罗仿真结果, 为  $10^\circ$  目标的估计结果, 可见 MIMO 阵列采用子阵优选算法估计成功概率与发射阵元数 (也就是虚拟子阵数) 的关系是随着发射阵元的增加先升高再减小。发射阵元较少时, 成功概率随阵元数增加而增大, 这是因为获得了空间分集增益, 抑制了 RCS 闪烁; 发射阵元较多时, 成功概率随阵元数增加而慢慢减小, 这是因为发射能量总是一定的, 当发射

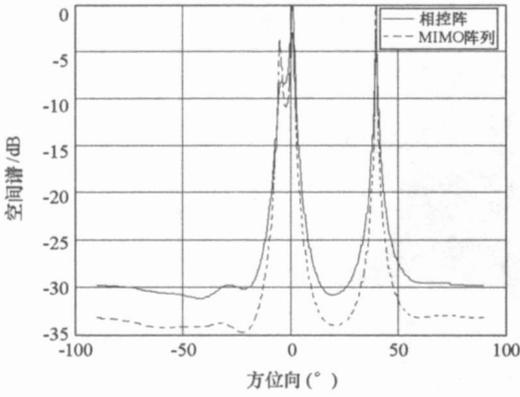


图1 多目标分辨比较

Fig. 1 Comparison with multi-target estimation

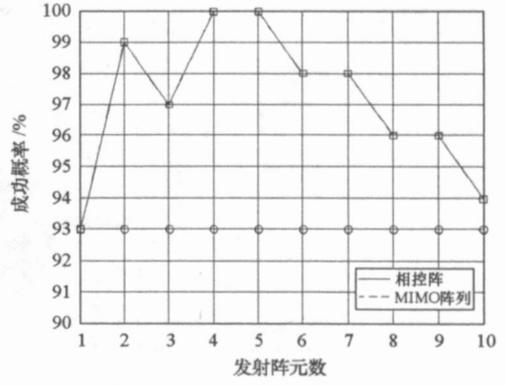


图2 不同发射阵元成功概率变化

Fig. 2 Successful probability with different transmitter numbers

阵元数增加的时候, 发射能量就分散了, 而每个发射的能量对子阵的估计起到决定性的作用, 所以当发射能量分散到一定程度时, 高于空间分集增益带来的改善时, DOA 估计性能就开始下降了。因为考虑了时间补偿, 所以相控阵的估计成功概率不随发射阵元数多少变化, 保持不变。

图3 采用 8 个接收阵元, 目标在  $-5^\circ, 10^\circ$ , 快拍数 100, 100 次蒙特卡罗仿真 MIMO 阵列和相控阵估计成功概率的比较, 采用  $10^\circ$  目标的成功概率。可以看到, 随着信噪比变化 MIMO 阵列采用子阵优选算法估计成功概率高于相控阵, 说明 DOA 估计的稳健性得到了提高。这是因为 MIMO 阵列采用子阵优选算法, 当一个子阵处发生 RCS 闪烁的时候, 却能在另一个子阵处得到较好的估计输出, 这样在一定程度上就克服了 RCS 闪烁对 DOA 估计的影响, 而相控阵则受到 RCS 闪烁的影响, 所以得到相对不稳定的估计。在低信噪比处相控阵估计好一些, 是因为信噪比太低时, 每个子阵都估计不出来了, 而相控阵可以相参积累集中能量估计。

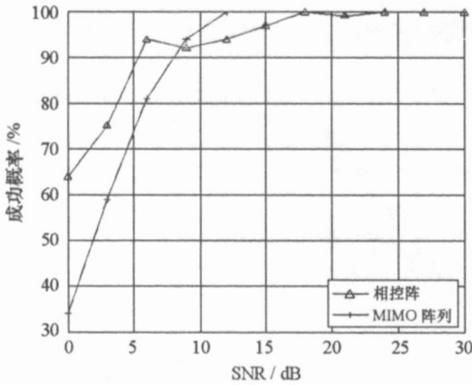


图3 成功概率比较

Fig. 3 Comparison with successful probability

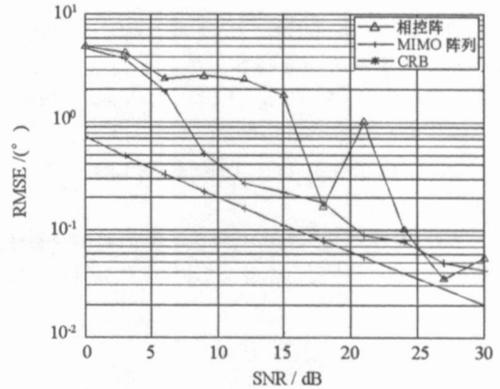


图4 均方根差比较

Fig. 4 Comparison with RMSE

图4 采用 5 个发射阵元, 8 个接收阵元, 目标在  $-5^\circ, 10^\circ$ , 快拍数 100, 100 次蒙特卡罗仿真 MIMO 阵列和相控阵估计均方根差比较, 采用  $10^\circ$  目标的均方根差。可以看到, 三者都随着信噪比的增大而逐渐减小, MIMO 阵列子阵优选算法均方根差小于相控阵, 且逐渐逼近 MIMO 阵列的 CRB。而相控阵均方根差很不稳定, 这是由于受到目标 RCS 闪烁影响的缘故。

图5 为子阵优选法在 MIMO 二维空间定位的扩展。发射采用分布式子阵列, 每个子阵 3 个阵元。接收为 3 个阵元的均匀线阵, 阵元间隔半波长。目标为  $(5^\circ, 60^\circ), (70^\circ, 10^\circ), (25^\circ, 30^\circ), (40^\circ, 50^\circ), (-5^\circ, -60^\circ), (-70^\circ, -10^\circ)$ 。图中 6 个目标清晰地分辨开来, 可见采用子阵优选法还可以在二维定位中扩充孔径, 提高自由度, 3 个阵元的接收阵分辨出了 6 个目标。

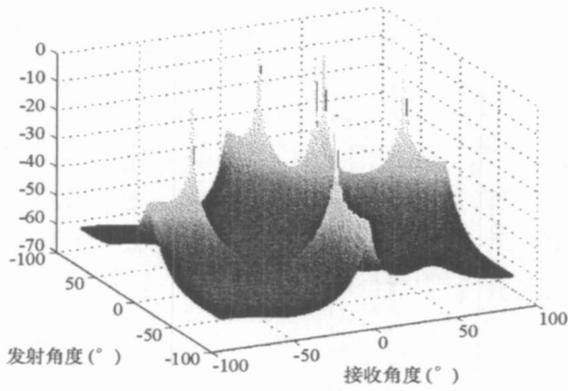


图5 MIMO 二维空间定位

Fig. 5 2D location of MIMO

## 5 结论

本文基于发射分布阵,接收密布阵的布阵方式,通过发射正交信号构造虚拟阵列,提出了一种子阵优选算法,实现了MIMO雷达的多目标波达方向超分辨估计。计算机仿真结果表明,由于子阵优选算法始终选择最强响应输出,可以克服目标RCS闪烁,相比相控阵雷达,得到了更稳健的波达方向估计。由于该算法简单易处理,扩展到MIMO二维空间定位中,将MIMO雷达抑制目标闪烁和提高自由度的特点很好的结合起来。文中采用的capon不需要知道目标数,在知道目标数的前提下可以采用MUSIC等。

## 参考文献:

- [1] Fishler E, Haimovich A, Blum R. MIMO Radar: An Idea Whose Time Has Come[C]//Proc. of the IEEE Int. Conf. on Radar, Philadelphia, PA, 2004: 71-78.
- [2] Li J, Stoica P. MIMO Radar Signal Processing[M]. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., Hoboken, 2009.
- [3] Fishler E, Haimovich A, Blum R, et al. Spatial Diversity in Radars-models and Detection Performance[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(3): 823-838.
- [4] Nikolaus H L, Fishler E, Haimovich A M. Evaluation of Transmit Diversity in MIMO Radar Direction Finding[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(5): 2215-2225.
- [5] Bekkerman I, Tabrikian J. Target Detection and Localization Using MIMO Radars and Sonars[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(10): 3873-3883.
- [6] 刘全, 雍玲, 等. 二维虚拟ESPRIT算法的改进[J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(3): 45-48.
- [7] 罗鹏飞, 等. 统计信号处理基础: 估计与检测理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.