

双基地 MIMO 雷达高速运动目标的 DOD 和 DOA 联合估计

陈金立^{*①②} 李家强^{①②} 顾红^③

^①(南京信息工程大学江苏省气象探测与信息处理重点实验室 南京 210044)

^②(南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044)

^③(南京理工大学电子工程与光电技术学院 南京 210094)

摘要: 高速目标在回波积累时间内会跨多个距离单元运动, 因此双基地 MIMO 雷达利用单个距离单元上的目标回波数据估计目标发射角(DOD)和接收角(DOA)会产生较大误差, 影响目标的交叉定位。该文根据高速目标回波特点提出一种双基地 MIMO 雷达的跨距离单元估计目标多维参数的方法, 该方法把目标在不同距离单元上的脉冲压缩数据的采样协方差矩阵进行平均, 提高其协方差矩阵的估计精度, 然后采用超分辨算法进行 DOD 和 DOA 参数估计。仿真结果表明该方法对高速运动目标的角度估计精度高于现有算法, 接近于现有算法在目标无距离走动时的角度估计精度, 且其角度估计性能与目标跨越的距离单元数无关。

关键词: 双基地 MIMO 雷达; 高速运动目标; 距离走动; 发射角; 接收角

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)04-0859-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01121

Joint DOD and DOA Estimation of High Speed Moving Target in Bistatic MIMO Radar

Chen Jin-li^{①②} Li Jia-qiang^{①②} Gu Hong^③

^①(*Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*)

^②(*College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*)

^③(*School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*)

Abstract: Owing to the fact that the high speed moving target moves across several range cells during the long coherent observation period, joint Direction Of Departures (DODs) and Direction Of Arrivals (DOAs) estimation with the echo data located at the single range cell has considerable error that affect the cross-positioning for the high speed moving targets in bistatic MIMO radar. A method for estimating the parameters of high speed moving targets is presented. The average of the sample covariance matrixes estimated from the pulse compression outputs at different range cells is exploited to obtain the high precision estimation of the covariance matrix. Then, DODs and DOAs of targets can be estimated by using the traditional super-resolution algorithm. The simulation results indicate that the angle estimation accuracy of the proposed method for the high speed moving targets, which is independent of the number of range cells that target moves across, is better than that of the existence approaches, and is close to that of the existence approaches with no range migration occurrence.

Key words: Bistatic MIMO radar; High speed moving target; Range migration; Direction Of Departure (DOD); Direction Of Arrival (DOA)

1 引言

近年来, 为了提高雷达的检测性能和估计精度,

人们将多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)技术广泛应用于雷达中^[1-3]。MIMO 雷达的发射阵列各阵元发射相互正交的信号, 而接收阵列通过匹配滤波方法分离出各发射通道的信号, 因此在接收端可以形成虚拟阵列, 提高角度估计性能。双基地 MIMO 雷达的收发阵列相距较远, 通过在接收回波中估计目标的发射角

2012-08-31 收到, 2012-11-30 改回

江苏省高校自然科学研究项目(11KJB510008), 南京理工大学自主科研专项计划(2010ZDJH05)和江苏高校优势学科建设工程资助课题

*通信作者: 陈金立 chen820803@yahoo.cn

(Direction Of Departure, DOD)和接收角(Direction Of Arrival, DOA)实现目标的无模糊交叉定位^[4], 是一种非常重要的 MIMO 雷达。因此, 双基地 MIMO 雷达的 DOD 和 DOA 联合估计算法被广泛研究, 涌现出一批稳健、实时和高效的多目标定位方法^[5-9], 然而现有算法均是针对静止目标或者低速目标, 并未涉及高速运动目标。高速运动目标, 如在防空领域中的高速飞行导弹、在航天领域中的轨道目标, 是现代雷达目标探测中面临的新问题。

双基地 MIMO 雷达利用在相同距离单元上的目标回波数据联合估计目标发射角和接收角。然而, 高速运动目标在回波积累时间内会跨多个距离单元运动^[10], 即在 2 维角度估计过程中高速运动目标已经跨越了多个距离单元。现有的双基地 MIMO 雷达的角度估计算法均不能跨距离单元进行回波积累, 因此难以完成空间高速运动目标的 DOD 和 DOA 等参数的有效估计。文献[11]研究了单基地 MIMO 雷达的高速运动目标距离和角度等参数的估计方法, 该方法在短时间内对多个输出通道回波数据进行相参合并来取代回波数据的长时间相参积累检测, 以降低距离徙动对目标探测的影响, 能有效实现多个高速运动目标的无模糊检测, 但是该方法需要大量天线阵元来获得较高的空间合成增益。文献[12]将多载频 MIMO 雷达应用于高速目标的多维参数估计中, 利用级联 Keystone 变换校正距离走动, 并补偿因发射多载频信号而引起的各分离通道的多普勒频率差, 从而解决了高速运动目标下多载频 MIMO 雷达的多维参数估计, 但是 Keystone 变换在目标出现多普勒模糊时会失效, 目标的高速运动必然会出现多普勒模糊, 因此需要预先知道目标的多普勒模糊因子并进行补偿; 此外, 由于多载频 MIMO 雷达是利用频分发射信号实现发射通道的分离, 因此雷达总的发射信号带宽会很大, 这样会导致硬件实现的复杂度增加。本文根据高速运动目标回波特点提出了一种双基地 MIMO 雷达的跨距离单元进行目标多维参数估计方法, 该方法在回波积累时间内把同一目标跨越在不同距离单元的脉冲压缩数据的采样协方差矩阵进行平均, 以获得高精度的协方差矩阵估计值, 因此该方法具有更高的 DOD 和 DOA 的估计精度, 其角度估计精度与现有算法在目标无距离走动时的角度估计精度相近, 且角度估计性能与目标跨越的距离单元数无关, 从而解决了高速运动目标下双基地 MIMO 雷达的多维参数估计问题。

2 信号模型

双基地 MIMO 雷达的发射阵列和接收阵列分别由 M 个发射阵元和 N 个接收阵元组成, 均采用等距

均匀线阵, 其中发射和接收阵元间距分别为 d_t 和 d_r , 如图1所示。 M 个发射阵元发射相互正交的基带相位编码信号, 可表示为 $\{S_m\}_{m=1}^M$ 。

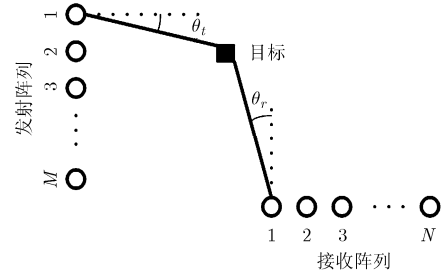


图1 双基地 MIMO 雷达结构

假设在相同起始距离分辨单元上存在 P 个速度互不相同的高速运动目标, $\theta_{t1}, \theta_{t2}, \dots, \theta_{tP}$ 分别表示 P 个目标的发射角(DOD), $\theta_{r1}, \theta_{r2}, \dots, \theta_{rP}$ 分别表示 P 个目标的接收角(DOA), 则第 i ($i = 1, 2, \dots, P$) 个目标的空间位置可以用 $(\theta_{ti}, \theta_{ri})$ 来表示。在回波积累时间内高速目标移动的距离远小于其离发射阵列和接收阵列的距离, 因此目标DOA和DOD在回波积累时间内发生的变化可以忽略不计, 即在回波积累时间内目标的DOA和DOD可近似认为保持不变^[12]。接收阵列的第 l 个基带回波脉冲信号可表示为

$$\mathbf{X}_l = \sum_{p=1}^P \mathbf{a}_r(\theta_{rp}) \alpha_p \mathbf{a}_t^T(\theta_{tp}) \mathbf{S} [(l-1)K + k - z_{pl}] \cdot e^{j2\pi f_{dp} t_l} + \mathbf{w}_l, \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (1)$$

式中 $\mathbf{X}_l(n) = [\mathbf{X}_{l1}, \mathbf{X}_{l2}, \dots, \mathbf{X}_{lM}]^T \in \mathbb{C}^{N \times K}$ 为接收阵列的输出回波信号矩阵, K 为单个脉冲的相位编码长度; $\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_M]^T \in \mathbb{C}^{M \times K}$ 为发射阵列的发射信号矩阵, 满足 $\mathbf{S}\mathbf{S}^H / K = \mathbf{I}_M$, $(\cdot)^T$ 和 $(\cdot)^H$ 分别表示矢量或矩阵的转置和共轭转置, \mathbf{I}_M 为 $M \times M$ 的单位矩阵; α_p 表示第 p 个目标的散射系数; $\mathbf{a}_r(\theta_{rp}) = [1 \ e^{-j(2\pi/\lambda)d_r \sin \theta_{rp}} \ \dots \ e^{-j(2\pi/\lambda)(N-1)d_r \sin \theta_{rp}}]^T$ 是大小为 $N \times 1$ 维的接收阵列导向矢量, λ 为载波波长; $\mathbf{a}_t(\theta_{tp}) = [1 \ e^{-j(2\pi/\lambda)d_t \sin \theta_{tp}} \ \dots \ e^{-j(2\pi/\lambda)(M-1)d_t \sin \theta_{tp}}]^T$ 是大小为 $M \times 1$ 维的发射阵列导向矢量; $f_{dp}(t)$ 为第 p 个目标的多普勒频率, 可表示为 $f_{dp} = (v_{tp} + v_{rp}) / \lambda = v_p / \lambda$, 其中 v_{tp} 和 v_{rp} 分别为第 p 个目标相对于发射阵列和接收阵列的径向速度, 那么 $v_p = v_{tp} + v_{rp}$ 为第 p 目标的两径向速度和, 假设目标多普勒频率在脉冲持续时间内所引起的相位变化可以忽略, 则应满足以下条件^[13], 其中 τ 为码元宽度即单个码元的持续时间,

$$f_{dp} \leq 1 / (2K\tau) \quad (2)$$

t_l 为对应第 l 个脉冲的慢时间; 为了分析方便, 假设 P 个目标的所在的起始距离单元均为零, z_{pl} 为第 p 个

目标在第 l 个发射脉冲时所跨越的距离单元数, z_{pl} 取值为整数, 其中目标与发射阵列和接收阵列之间的距离和所对应的距离单元长度 $\delta = c\tau$, c 为光速; $\omega_l \in \mathbb{C}^{N \times K}$ 为接收阵列的噪声矩阵, 服从零均值, 方差为 σ_ω^2 的复高斯分布, 即 $\omega_l \sim N^c(0, \sigma_\omega^2 \mathbf{I}_{N \times N})$ 。

3 存在距离走动时的目标参数估计

当目标高速运动时, 距离上出现的徙动现象会导致目标能量分散在多个距离单元上, 因此双基地MIMO雷达必须通过跨距离单元联合估计目标的DOD和DOA, 提高其对高速运动目标的角度估计精度。假设第 p 个高速运动目标在第 l 个发射脉冲时所跨越的距离单元数 $z_{pl} \in [-Z, Z]$, 其中 Z 为整数, 那么在接收端用在第 $z(z \in [-Z, Z])$ 距离单元上的参考信号 \mathbf{s}_z 对 \mathbf{X}_l 进行脉冲压缩, 可得在第 z 距离单元上的脉压输出, 即

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{lz} &= \frac{1}{\sqrt{K}} \mathbf{X}_l \cdot \mathbf{S}_z^H = \sqrt{K} \sum_{\substack{p=1 \\ p \in C_z}}^P \alpha_p e^{j2\pi f_{dp} t_l} \mathbf{a}_r(\theta_{rp}) \\ &\quad \cdot \mathbf{a}_t^T(\theta_{tp}) + \frac{1}{\sqrt{K}} \omega_l \cdot \mathbf{S}_z^H \\ &\quad + \frac{1}{\sqrt{K}} \sum_{\substack{p=1 \\ p \notin C_z}}^P \mathbf{a}_r(\theta_{rp}) \alpha_p \mathbf{a}_t^T(\theta_{tp}) \mathbf{S}[(l-1)K \\ &\quad + k - z_{pl}] \cdot e^{j2\pi f_{dp} t_l} \cdot \mathbf{S}_z^H \end{aligned} \quad (3)$$

式中 C_z 为 p 满足 $z_{pl} = z(p = 1, 2, \dots, P)$ 的取值集合。假设 M 个发射信号的自相关旁瓣近似等于零, 那么在式(3)中第3项近似为零, 则式(3)可简化为

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{lz} &= \frac{1}{\sqrt{K}} \mathbf{X}_l \cdot \mathbf{S}_z^H \\ &\approx \sqrt{K} \sum_{\substack{p=1 \\ p \in C_z}}^P \alpha_p e^{j2\pi f_{dp} t_l} \mathbf{a}_r(\theta_{rp}) \cdot \mathbf{a}_t^T(\theta_{tp}) + \mathbf{W}_{lz} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $\mathbf{W}_{lz} = \frac{1}{\sqrt{K}} \omega_l \mathbf{S}_z^H$ 为滤波后的噪声矩阵。将 \mathbf{Y}_{lz} 进行按列堆栈操作, 可得

$$\mathbf{y}_{lz} = \text{vec}(\mathbf{Y}_{lz}) \quad (5)$$

式中 $\text{vec}(\cdot)$ 表示将矩阵按列矢量化。那么 \mathbf{y}_{lz} 的协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_{y_z} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{y}_{lz} \mathbf{y}_{lz}^H \quad (6)$$

利用传统超分辨方法如 ESPRIT 对协方差矩阵 \mathbf{R}_{y_z} 进行处理^[7], 可联合估计出在第 z 距离单元上目标的目标DOD和DOA。但是当目标高速运动时, 在 L 个脉冲重复周期内目标已经跨越了多个距离单元, 使得在第 z 距离单元上的目标能量减弱, 导致目标的角度估计误差较大。在本文中, 在单个距离单元上估

计出的目标角度值称为粗估计值, 利用这些粗估计值可以确定目标在 L 个脉冲重复周期内所跨越的距离单元数。在第 $z(z \in [-Z, Z])$ 距离单元上利用ESPRIT算法获得的已配对的的目标发射角和接收角的粗估计值分别记为 $\hat{\theta}_{t1}^{(z)}, \hat{\theta}_{t2}^{(z)}, \dots, \hat{\theta}_{tQ}^{(z)}$ 和 $\hat{\theta}_{r1}^{(z)}, \hat{\theta}_{r2}^{(z)}, \dots, \hat{\theta}_{rQ}^{(z)}$, 其中 $0 \leq Q \leq P$ 。根据式(7)可以确定第 p 个目标的在 L 个脉冲重复周期内所跨越的距离单元,

$$\begin{aligned} \left[\left(\hat{\theta}_{tq}^{(z)} - \hat{\theta}_{tq}^{(0)} \right)^2 + \left(\hat{\theta}_{rq}^{(z)} - \hat{\theta}_{rq}^{(0)} \right)^2 \right]^{1/2} < \xi, \quad q = 1, 2, \dots, Q, \\ z \text{ 在 } [-Z, Z] \text{ 内连续取值} \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $\hat{\theta}_{tp}^{(0)}$ 和 $\hat{\theta}_{rp}^{(0)}$ 是第 p 个目标在起始距离单元的发射角和接收角的粗估计值; ξ 为判断第 p 个目标是否跨越在第 z 距离单元的阈值。假设根据式(7)已确定了第 p 个目标跨越的距离单元分别为 $z_p = 0, 1, \dots, Z_p$, 那么在这些距离单元上的接收阵列信号 $\mathbf{X}_l(l = 1, 2, \dots, L)$ 经脉压输出的数据分别为 $\mathbf{y}_{l0}, \mathbf{y}_{l1}, \dots, \mathbf{y}_{lz_p}$ 。高速运动目标的距离走动导致第 p 个目标的信号能量分散在 $Z_p + 1$ 个距离单元上, 假设第 p 个目标在 z_p 距离单元上的信号能量出现在脉冲编号为 $l = L_{z_p \min}, L_{z_p \min} + 1, \dots, L_{z_p \max}$ 的时刻内, 则在 z_p 距离单元上经过脉冲压缩获得的 $NM \times 1$ 维矢量可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{lz_p} &= \begin{cases} \sqrt{K} \mathbf{a}_r(\theta_{rp}) \otimes \mathbf{a}_t(\theta_{tp}) \alpha_p e^{j2\pi f_{dp} t_l} \\ \quad + \sqrt{K} \sum_{\substack{i=1, i \neq p \\ i \in C_z}}^P \mathbf{a}_r(\theta_{ri}) \otimes \mathbf{a}_t(\theta_{ti}) \alpha_i e^{j2\pi f_{di} t_l} + \mathbf{W}'_{lz_p}, \\ l \in [L_{z_p \min}, L_{z_p \max}] \\ \sqrt{K} \sum_{\substack{i=1, i \neq p \\ i \in C_z}}^P \mathbf{a}_r(\theta_{ri}) \otimes \mathbf{a}_t(\theta_{ti}) \alpha_i e^{j2\pi f_{di} t_l} + \mathbf{W}'_{lz_p}, \\ l \in [1, L_{z_p \min} - 1] \cup [L_{z_p \max} + 1, L] \end{cases} \\ &= \begin{cases} \mathbf{T}_{lz_p} + \mathbf{Q}_{lz_p} + \mathbf{W}'_{lz_p}, & l \in [L_{z_p \min}, L_{z_p \max}] \\ \mathbf{Q}_{lz_p} + \mathbf{W}'_{lz_p}, & l \in [1, L_{z_p \min} - 1] \\ & \cup [L_{z_p \max} + 1, L] \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

式中 \otimes 为 Kronecker 积; \mathbf{W}'_l 是大小为 $NM \times 1$ 维的矢量, 由 \mathbf{W}_l 按列堆栈操作生成; $\mathbf{T}_{lz_p} = \sqrt{K} \mathbf{a}_r(\theta_{rp}) \otimes \mathbf{a}_t(\theta_{tp}) \alpha_p e^{j2\pi f_{dp} t_l}$ 为第 p 个目标在第 z_p 距离单元上的信号分量,

$$\mathbf{Q}_{lz_p} = \sqrt{K} \sum_{\substack{i=1, i \neq p \\ i \in C_z}}^P \mathbf{a}_r(\theta_{ri}) \otimes \mathbf{a}_t(\theta_{ti}) \alpha_i e^{j2\pi f_{di} t_l}$$

为其他目标在第 z_p 距离单元上的信号分量。 \mathbf{y}_{lz_p} 的协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_{y_{z_p}} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{y}_{l z_p} \mathbf{y}_{l z_p}^H \approx \frac{1}{L} \sum_{l=L_{z_p \min}}^{L_{z_p \max}} \mathbf{T}_{l z_p} \mathbf{T}_{l z_p}^H + \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{Q}_{l z_p} \mathbf{Q}_{l z_p}^H + \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{W}_{l z_p}^H \quad (9)$$

由式(9)可知, 由于高速运动目标的能量分散在多个距离分辨单元, 因此用于估计第 p 个目标信号的协方差矩阵的快拍数只有 $L_{z_p \max} - L_{z_p \min} + 1 \ll L$ 。在小快拍数情况下, 采样协方差矩阵的估计值与真实值会存在较大差异, 导致噪声和信号子空间的估计值发生畸变, 严重恶化了超分辨算法的角度估计性能, 因此只利用单个距离单元上的数据估计高速运动目标的 DOD 和 DOA 会存在较大的误差。将第 p 个目标的脉压输出数据 $\mathbf{y}_{l_0}, \mathbf{y}_{l_1}, \dots, \mathbf{y}_{l_{Z_p}}$ 按式(10)进行组合,

$$\mathbf{y}_{\Sigma p} = \left[\underbrace{\mathbf{y}_{l_0} \mathbf{y}_{20} \dots \mathbf{y}_{L0}}_{\mathbf{y}_{l_0, l=1, 2, \dots, L}} \underbrace{\mathbf{y}_{l_1} \mathbf{y}_{21} \dots \mathbf{y}_{L1}}_{\mathbf{y}_{l_1, l=1, 2, \dots, L}} \dots \underbrace{\mathbf{y}_{l_{Z_p}} \mathbf{y}_{2Z_p} \dots \mathbf{y}_{LZ_p}}_{\mathbf{y}_{l_{Z_p}, l=1, 2, \dots, L}} \right] \quad (10)$$

式中 $\mathbf{y}_{\Sigma p}$ 是大小为 $NM \times L(Z_p + 1)$ 的矩阵。那么 $\mathbf{y}_{\Sigma p}$ 的协方差矩阵可表示为

$$\mathbf{R}_{\Sigma p} = \frac{1}{L(Z_p + 1)} \sum_{l=1}^L \mathbf{y}_{\Sigma p} \mathbf{y}_{\Sigma p}^H = \frac{1}{(Z_p + 1)} \sum_{z_p=0}^{Z_p} \mathbf{R}_{y_{z_p}} \quad (11)$$

由式(11)可知, $\mathbf{R}_{\Sigma p}$ 等于 $\mathbf{y}_{l_0}, \mathbf{y}_{l_1}, \dots, \mathbf{y}_{l_{Z_p}}$ 的采样协方差矩阵的均值, 即估计由式(10)组合后数据的协方差矩阵等价于把 $\mathbf{y}_{l_0}, \mathbf{y}_{l_1}, \dots, \mathbf{y}_{l_{Z_p}}$ 的采样协方差矩阵进行平均。将式(9)代入式(11)可知,

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{\Sigma p} &= \frac{1}{(Z_p + 1)} \sum_{z_p=0}^{Z_p} \left(\frac{1}{L} \sum_{l=L_{z_p \min}}^{L_{z_p \max}} \mathbf{T}_{l z_p} \mathbf{T}_{l z_p}^H + \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{Q}_{l z_p} \mathbf{Q}_{l z_p}^H + \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{W}_{l z_p}^H \right) \\ &= \frac{1}{L(Z_p + 1)} \sum_{z_p=0}^{Z_p} \sum_{l=L_{z_p \min}}^{L_{z_p \max}} \mathbf{T}_{l z_p} \mathbf{T}_{l z_p}^H \\ &\quad + \frac{1}{L(Z_p + 1)} \sum_{z_p=0}^{Z_p} \left(\sum_{l=1}^L \mathbf{Q}_{l z_p} \mathbf{Q}_{l z_p}^H + \sum_{l=1}^L \mathbf{W}_{l z_p}^H \right) \quad (12) \end{aligned}$$

由式(12)可知, 根据式(10)把第 p 个目标在不同距离单元上的脉冲压缩数据进行组合操作, 然后估计其采样协方差矩阵, 等价于把第 p 个目标在不同距离单元上的采样协方差矩阵进行平均, 这样大大增加了用于估计第 p 个目标的信号协方差矩阵的快拍数, 提高了协方差矩阵的估计精度, 从而能得到更为精确的闭式解, 因此特征分解 $\mathbf{R}_{\Sigma p}$ 再利用超分辨估计算法如 ESPRIT 算法会具有更高的角度估计精度。

下面给出本文双基地 MIMO 雷达的高速运动

目标 DOD-DOA 估计算法的基本步骤:

步骤 1 根据式(3)和式(4), 对回波分别在第 $z(z = -Z, -Z + 1, \dots, Z)$ 距离单元上进行脉冲压缩处理, 得到 \mathbf{y}_z 。

步骤 2 分别计算 $\mathbf{y}_z (z = -Z, -Z + 1, \dots, Z)$ 的协方差矩阵, 得到对应不同距离单元目标的发射角和接收角的粗估计值。

步骤 3 根据式(7)确定第 $p(p = 1, 2, \dots, P)$ 个目标的在 L 个脉冲重复周期内所跨越的距离单元, 以及对应这些距离单元上的脉压输出的数据 $\mathbf{y}_{l_0}, \mathbf{y}_{l_1}, \dots, \mathbf{y}_{l_{Z_p}}$ 。

步骤 4 分别计算 $\mathbf{y}_{l_0}, \mathbf{y}_{l_1}, \dots, \mathbf{y}_{l_{Z_p}}$ 的协方差矩阵, 并把它们取均值得到 $\mathbf{R}_{\Sigma p}$ 。特征分解 $\mathbf{R}_{\Sigma p}$, 然后利用超分辨估计算法如 ESPRIT 算法估计第 p 个目标 DOD-DOA。

步骤 5 重复步骤 3, 估计其他高速运动目标的 DOD-DOA。

4 实验结果与分析

双基地MIMO雷达天线布置如图1所示, 发射阵元数 $M=6$, 接收阵元数 $N=8$, 阵元间距均为半波长。发射阵列各阵元发射相互正交的随机二相编码信号, 码元宽度 $\tau = 5$ ns, 单个脉冲内的相位编码长度 $K=200$, 脉冲重复周期数 $L=1000$ 。假设雷达系统可测高速运动目标的最大“径向速度和”为 $v_{\max} = 10000$ m/s, 雷达载波频率 $f_0 = 10$ GHz, 即波长 $\lambda = 0.03$ m, 那么最大多普勒频率为 $f_{d \max} = v_{\max} / \lambda = 333.33$ kHz, 上述参数代入式(2), 可知满足该条件。目标 p 的回波信噪比定义为 $\text{SNR}_p = 10 \lg(\alpha_p^2 / \sigma_w^2)$ 。本文方法步骤3中判断目标是否跨越在某个距离单元的门限值 $\xi = 1^\circ$, 仿真中假设所有目标能够跨越的距离单元数在 $[-9, 9]$ 内。下面分别从高速运动目标角度估计星座图, 均方根误差(RMSE)与SNR的关系以及RMSE与目标跨距离单元数的关系3个方面说明本文方法的有效性和优越性, 其中在本文方法中采用ESPRIT算法从协方差 $\mathbf{R}_{\Sigma p}$ 中估计目标DOD和DOA。

实验 1 目标角度估计星座图 假设在同一起始距离分辨单元上存在3个高速目标, 它们发射角和接收角分别为 $(\theta_{t1}, \theta_{r1}) = (20^\circ, 40^\circ)$, $(\theta_{t2}, \theta_{r2}) = (30^\circ, 60^\circ)$, $(\theta_{t3}, \theta_{r3}) = (20^\circ, 10^\circ)$, 3个目标的径向速度和分别为7800 m/s, 8800 m/s, 10000 m/s, 它们所跨越的距离单元数分别为6, 7, 9, 信噪比相等为 $\text{SNR} = -10$ dB, 进行200次Monte Carlo实验。图2为利用本文方法估计的参数星座图, 图中“+”表示目标的真实位置。从图中可以看出本文算法能对高速目标

的2维方位角估计参数进行准确配对,即可对多个高速目标进行有效定位。

实验 2 角度RMSE与SNR的关系 假设存在2个高速运动目标。它们相对发射和接收阵列的方位角分别为 $(\theta_{t1}, \theta_{r1}) = (20^\circ, 40^\circ), (\theta_{t2}, \theta_{r2}) = (30^\circ, 60^\circ)$, 两者的径向速度和分别为7800 m/s, 8800 m/s, 两目标所跨越的距离单元数分别为6和7。定义目标方位角估计的均方根误差为 $RMSE = [E(\hat{\theta}_r - \theta_r)^2 + E(\hat{\theta}_t - \theta_t)^2]^{1/2}$, 其中 $\hat{\theta}_r, \theta_r$ 和 $\hat{\theta}_t, \theta_t$ 分别为目标相对接收阵列和发射阵列方位角的估计值和实际值。利用文献[7]的ESPRIT算法对目标存在距离走动和不存在距离走动(仿真中设置两目标所跨越的距离单元数均为0)情况下的角度估计精度与本文方法进行比较。独立进行200次Monte-Carlo实验,本文方法和ESPRIT算法(分为存在距离走动和不存在距离走动两种情况)的目标角度估计均方根误差与信噪比SNR的变化关系如图3所示。由图3可知,目标的距离走动使得目标能量分散在不同的距离单元上,因此直接利用文献[7]中的ESPRIT算法估计高速目标角度时其估计精度较低,而本文算法能够跨距离单元进行目标角度估计,因此其角度精度优于ESPRIT算法,并且与不存在距离走动情况下的ESPRIT算法的角度估计精度相近。

实验 3 角度 RMSE 与跨距离单元数的关系 假设存在 2 个高速运动目标,它们的 DOD, DOA 和

速度设置同实验 2, 信噪比 SNR 均为 -10 dB, 目标 2 的跨距离单元数为 6, 目标 1 的跨距离单元数从 0~9 之间变化。独立进行 200 次 Monte-Carlo 实验, 本文方法和 ESPRIT 算法的目标 1 角度估计的 RMSE 与目标 1 跨距离单元数的关系如图 4 所示。由图 4 可知, 在目标不存在距离走动(即跨距离单元数为 0)时, 本文方法和 ESPRIT 算法角度估计精度相近, 随着跨距离单元数增加, ESPRIT 算法角度估计精度会变差, 而本文方法的角度估计精度变化不大, 因此该方法对目标所跨越的距离单元数的适应性较强, 稳健性较好。

5 结论

高速运动目标的距离走动使得在回波积累时间内目标能量分散到多个距离单元上, 导致在单个距离单元上的目标信号协方差矩阵的估计值与真实值相差较大, 以致噪声和信号子空间的估计值发生畸变, 降低了双基地 MIMO 雷达利用传统超分辨率方法估计目标参数的精度。本文提出了一种跨距离单元估计高速运动目标 DOD 和 DOA 的方法, 通过把同一目标跨越在不同距离单元的回波脉冲压缩数据的采样协方差矩阵进行平均, 以提高目标信号协方差矩阵估计精度, 从而能获得更为精确的闭式解, 有效解决了双基地 MIMO 雷达的高速运动目标的 DOD 和 DOA 的超分辨估计问题, 仿真实验验证了所提算法的可行性和有效性。

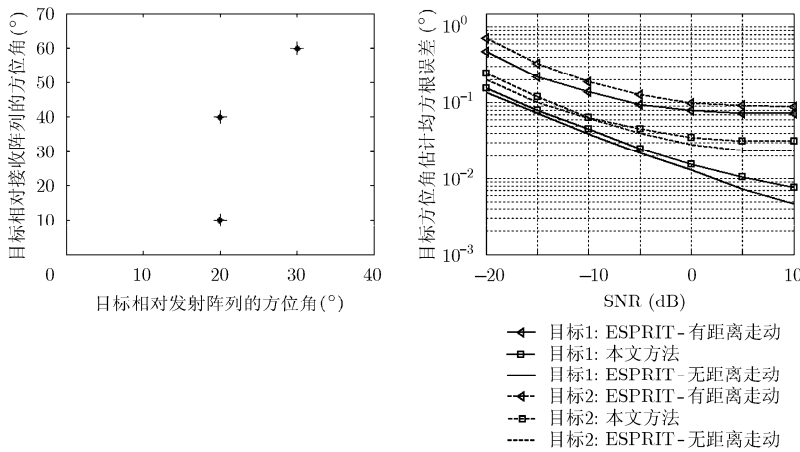


图2 利用本文方法估计的参数星座图

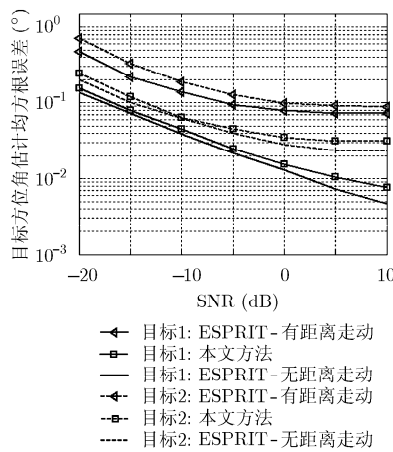


图3 目标角度估计均方根误差与信噪比SNR的变化关系

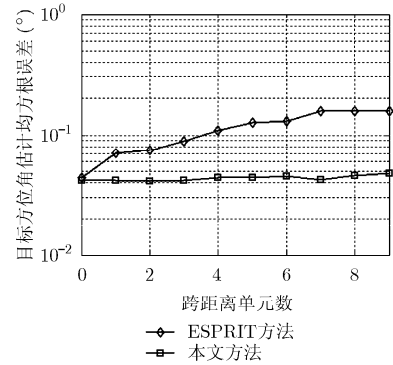


图4 目标1角度估计均方根误差与其跨距离单元数的变化关系

参考文献

[1] Li J and Stoica P. MIMO Radar Signal Processing[M]. New York: Wiley Press, 2008: 65-121.

[2] Haimovich A, Blum R, and Cimini L. MIMO radar with widely separated antennas[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(1): 116-129.

[3] Li J and Stoica P. MIMO radar with collocated antennas[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(5): 106-114.

[4] Yan H D, Li J, and Liao G S. Multitarget identification and localization using bistatic MIMO radar systems[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2008, 8(2): 1-8.

- [5] Guo Y D, Zhang Y S, and Tong N N. Beamspace ESPRIT algorithm for bistatic MIMO radar[J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(15): 876-878.
- [6] Zhang X, Xu Z, and Xu L, *et al.* Trilinear decomposition-based transmit angle and receive angle estimation for multiple-input multiple-output radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5(6): 626-631.
- [7] Chen J, Gu H, and Su W. Angle estimation using ESPRIT without pairing in MIMO radar[J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(24): 1422-1423.
- [8] 李建峰, 张小飞, 汪飞. 基于四元数的 Root-MUSIC 的双基地 MIMO 雷达中角度估计算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 300-304.
Li Jian-feng, Zhang Xiao-fei, and Wang Fei. Quaternion root-MUSIC algorithm for angle estimation in bistatic MIMO radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(2): 300-304.
- [9] Zheng G, Chen B, and Yang M. Unitary ESPRIT algorithm for bistatic MIMO radar[J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(3): 179-181.
- [10] 苏军海, 吕孝雷, 邢孟道, 等. 窄带雷达高速多目标检测及其运动参数估计[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(7): 1539-1543.
Su Jun-hai, Lv Xiao-lei, and Xing Meng-dao, *et al.* Detection and motion parameters estimation of high speed multi-target in narrowband radar systems[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(7): 1539-1543.
- [11] 陈金立, 顾红, 苏卫民. 基于 MIMO 噪声雷达的高速运动目标检测[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(6): 1350-1354.
Chen Jin-li, Gu Hong, and Su Wei-min. High speed moving target detection using MIMO noise radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(6): 1350-1354.
- [12] 秦国栋, 陈伯孝, 陈多芳, 等. 一种多载频 MIMO 雷达高速运动目标多维参数估计方法[J]. 电子学报, 2010, 38(12): 2763-2768.
Qin Guo-dong, Chen Bai-xiao, and Chen Duo-fang, *et al.* A method of multiple parameters estimation for high speed moving targets in multi carrier-frequency MIMO radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(12): 2763-2768.
- [13] 刘国岁, 顾红, 苏卫民. 随机信号雷达[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 98-134.
Liu Guo-sui, Gu Hong, and Su Wei-min. Random Signal Radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 98-134.
- 陈金立: 男, 1982年生, 讲师, 博士, 研究方向为MIMO雷达信号处理技术、高速运动目标探测等.
- 李家强: 男, 1976年生, 讲师, 博士, 研究方向为雷达杂波抑制、高速运动目标探测等.
- 顾红: 男, 1967年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为MIMO雷达信号处理、随机信号雷达等.