

基于互质阵列的米波雷达低仰角估计方法

王鸿帧, 郑桂妹*, 陈 晨, 邹 帛, 王国铨, 宋玉伟

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 目前基于互质阵 CPA 虚拟阵列的低仰角估计方法虽然近似可行, 但受多径效应影响, 其存在测角误差大的问题。对此提出一种基于互质阵物理阵列的实值低仰角估计方法, 首先利用互质阵列建立信号模型, 并根据物理阵元位置计算回波信号协方差矩阵, 然后对其进行实值处理后利用最大似然估计或广义多重信号分类 MUSIC 算法获得精确的低仰角, 最后利用几何关系获得目标高度。仿真实验对比了均匀线阵和互质阵虚拟阵列法的低仰角估计性能, 在重点分析目标仰角、信噪比和快拍数等因素对低空目标仰角估计精度的影响的基础上得出一般性结论, 证明了所提估计方法的准确性与优越性。

关键词 互质阵列; 米波雷达; 低仰角估计; 广义 MUSIC; 最大似然估计; 实值处理

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2022.03.012

中图分类号 TN953+.5 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2022)03-0075-07

A Method of Estimating for the Error to the Low Elevation of Meter Wave Radar Based on Coprime Array

WANG Hongzhen, ZHENG Guimei*, CHEN Chen, ZOU Bo, WANG Guoxuan, SONG Yuwei
(Air Defense and Antimissile School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract Aimed at the problems that being affected by multiple-aperture influence such as small array aperture, low angle measurement accuracy and poor performance, etc., large angle measurement error still remains in spite of the fact that the existing low elevation estimation algorithms mostly are mostly used by the uniform linear array (ULA) signal model for echo reception and processing, and then use the super-resolution algorithm for low elevation estimation, are approximately feasible, and the performance is not good, a real valued low elevation estimation method based on physical array of CPA is proposed. Firstly, the signal model is established by using CPA, and the echo signal covariance matrix is calculated according to the position of physical array element. Then, after real value processing, the accurate low elevation is obtained by using maximum likelihood (ML) estimation or generalized multiple signal classification (MUSIC) algorithm. Finally, the target height is obtained by using geometric relationship. The simulation experiments compare the low elevation estimation performance of ULA and CPA virtual array, and prove the accuracy and superiority of the proposed low elevation estimation method based on physical array of CPA.

Key words coprime array; meter wave radar; low elevation estimation; generalized MUSIC; maximum likelihood estimation; real value processing

收稿日期: 2021-11-16

基金项目: 国家自然科学基金(61971438)

作者简介: 王鸿帧(1988-), 男, 河南郑州人, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理。E-mail: 214344163@qq.com

通信作者: 郑桂妹(1987-), 男, 福建福州人, 副教授, 研究方向为雷达信号处理。E-mail: zheng-gm@163.com

引用格式: 王鸿帧, 郑桂妹, 陈晨, 等. 基于互质阵列的米波雷达低仰角估计方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2022, 23(3): 75-81.
WANG Hongzhen, ZHENG Guimei, CHEN Chen, et al. A Method of Estimating for the Error to the Low Elevation of Meter Wave Radar Based on Coprime Array[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2022, 23(3): 75-81.

近年来,反辐射导弹(anti-radiation missile, ARM)、隐身技术的快速发展给雷达的生存造成巨大威胁。米波雷达能够降低吸波材料吸收电磁波的效果且频段较低,隐身战机对其仍有较大的 RCS 值,所以米波雷达具有反隐身和抗 ARM 的潜在性能。但米波雷达俯仰维波束较宽,跟踪低仰角目标时存在严重的多径效应^[1-2],导致仰角测量精度急剧下降,因此。米波雷达低仰角估计问题成为低空目标探测领域的难点与重点之一。低空目标的仰角小于雷达半波束宽度时,被称为低仰角目标。对于低仰角目标而言,目标直达波信号和地(海)面反射的多径回波信号位于同一波束宽度内,波程差较小,具有强相关性,相当于两个空间临近的相干点源,信息的混叠造成仰角估计性能下降,进而影响目标的检测与定位性能。因此低空目标仰角的估计问题可以等效为两个空间临近相干源的超分辨问题^[3-5]。

多径条件下的低仰角估计,可以采用空间平滑^[6]、矩阵重构^[7-9]等解相干算法进行解相干处理或利用无需解相干的广义 MUSIC^[10]或最大似然估计^[11]算法进行低仰角估计。为了解决米波雷达低仰角测高问题,文献[12]提出一种基于波瓣分裂的低仰角测高方法,其简单实用,利于工程实现,但对阵地环境要求较高。文献[13]提出一种利用回波信号协方差矩阵在各个信号子空间中交替迭代的交替投影最大似然估计算法,完成对目标低仰角的估计。文献[14]对米波雷达测高应用的超分辨算法进行了改进,在减少算法运算量的同时,提高了算法精确度。文献[15]提出了一种改进的加权广义 MUSIC 算法,该算法在广义 MUSIC 算法的基础上采用了更加合理的权值,其测角精度得到了一定的提高。文献[16]在地形匹配、干涉式阵列等方面研究了米波雷达低仰角测高技术。针对地形问题,文献[17]在推导匹配复杂阵地扰动多径信号模型的基础上,从复杂阵地条件、地形参数反演和电磁矢量阵列等方面研究了米波雷达低仰角估计算法。文献[18]提出了阵列内插的波束域最大似然测高方法,采用阵列内插的方法在保证大间距线阵波束域变换无模糊性的同时降低了运算量。文献[19]提出了一种基于线性预处理的米波雷达低仰角测高算法,有效地克服了多径效应,通过消除反射系数对低仰角估计的影响实现相干信号的 DOA 估计。

值得注意的是,上述文献所提算法所采用均匀线阵信号模型存在阵列孔径小和孔径损失问题,因此其在低信噪比条件下的测角精度较低。随着作战实践的不断深入,目标探测需要更高的角度分辨力和测角精度。互质阵列(coprime array, CPA)能够突破奈奎斯特采样定理的限制,提供比均匀线阵更

大的阵列孔径,在硬件系统开销一定的情况下,可以获得比均匀线阵更好的测向性能,更符合米波雷达系统实际应用中的需求^[20]。为了进一步提高米波雷达角度分辨力,文献[4]提出了一种基于互质阵虚拟阵列的低仰角估计方法,一定程度上提高了米波雷达角度分辨力,但该方法忽略了虚拟阵列中相干信号带来的多余项的影响,造成测角误差较大。为解决上述问题,进一步提高米波雷达测角精度,本文在分析互质阵虚拟阵列法的基础上提出一种基于互质阵物理阵列的米波雷达低仰角估计方法。

1 信号模型

假设一个垂直放置的互质阵列雷达,其采用简单互质阵列作为收发天线,结构见图 1。阵列包含 2 个稀疏均匀子阵,阵元数分别为 M 和 N 个,阵元间距分别为 Nd 和 Md , M 和 N 为互质整数,且 $M < N$, d 为入射波长 λ 的二分之一。将 2 个稀疏均匀子阵以首阵元重叠的形式进行线性叠加组合,就得到包含物理阵元数目为 $M+N-1$ 的互质阵^[4],末端阵元位置为 $(M-1)Nd$ 。

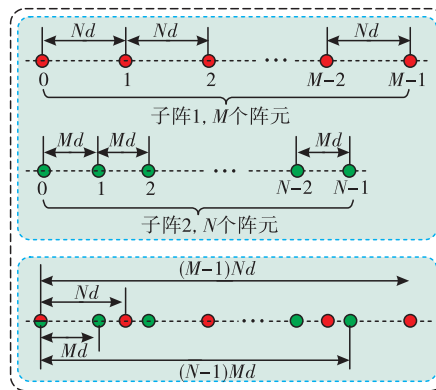


图 1 简单互质阵列结构

该米波阵列雷达采用经典镜像多径传播模型,见图 2。 h_a 为阵列天线高度, h_t 为目标高度, B 为反射点, R 为天线与目标水平投影的距离, R_d 为直达波波程(目标斜距), R_r 为经地面反射到天线的多径反射距离。 θ_d 为目标直达波入射角, θ_s 为反射波入射角。

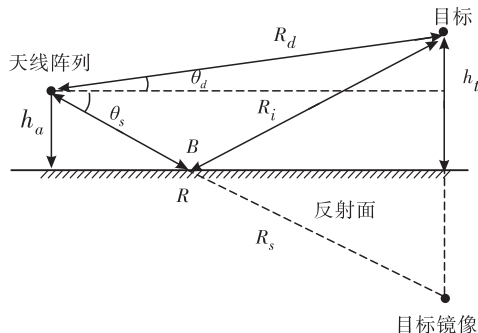


图 2 米波雷达经典镜像多径传播模型

米波雷达对低仰角目标进行探测时存在多径反射现象,即阵列接收到的信号来自4条反射路径:①雷达-目标-雷达;②雷达-目标-反射点-雷达;③雷达-反射点-目标-雷达;④雷达-反射点-目标-反射点-雷达。但常规阵列米波雷达进行低仰角估计时,因距离分辨能力有限,往往将低空目标和镜像目标当作一个距离单元内的目标。因此可以只考虑接收多径,将其看作2条反射路径,即雷达-目标-雷达、雷达-目标-反射点-雷达^[5]。则在 t 时刻第 m 个阵元接收到的数据可表示为:

$$x_m(t) = (e^{-j2\pi d_m \sin(\theta_d)/\lambda} + \rho e^{-j\alpha} e^{-j2\pi d_m \sin(\theta_s)/\lambda})s(t) + n_m(t) \quad (1)$$

式中: ρ 为反射系数,数值一般取-1; $s(t)$ 表示信号复包络; $n_m(t)$ 代表加性高斯白噪声; $\Delta R = R_i - R_d$ 为波程差, $\alpha = 2\pi\Delta R/\lambda$ 是反射波与直达波的相位差。可将直达波与反射波波程表示如下:

$$R_d = \sqrt{R^2 + (h_t - h_a)^2} \quad (2)$$

$$R_i = \sqrt{R^2 + (h_t + h_a)^2} \quad (3)$$

在实际情况中, $R \gg h_a$ 和 $R \gg h_t$,将式(2)和式(3)进行二次方展开化简,舍弃掉高次项,可得波程差公式^[5]如下:

$$\Delta R = R_i - R_d \approx R + \frac{(h_a + h_t)^2}{2R} - (R + \frac{(h_t - h_a)^2}{2R}) = \frac{2h_a h_t}{R} \quad (4)$$

则将式(4)代入相位差公式可得相位差为 $\alpha = 4\pi h_a h_t / R\lambda$ 。由图2所示几何关系得出直达波入射角 θ_d 与反射波入射角 θ_s 的关系式^[5]如下:

$$\theta_s = -\arctan(\tan(\theta_d) + \frac{2h_a}{R}) \approx -\theta_d \quad (5)$$

利用式(5)可以将谱峰搜索由二维降为一维。则整个阵列在 t 时刻接收到的数据可以表示为:

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t), \dots, x_m(t), \dots, x_M(t)]^T = [\mathbf{a}(\theta_d), \mathbf{a}(\theta_s)] [1, \bar{\rho}]^T s(t) + \mathbf{N}(t) = \mathbf{A} \mathbf{I} s(t) + \mathbf{N}(t), \quad t \in (t_1, t_2, \dots, t_L) \quad (6)$$

式中: $\bar{\rho} = \rho e^{-j\alpha}$ 表示多径衰减系数; $\mathbf{N}(t)$ 为加性高斯白噪声矢量; L 为快拍数。 $\mathbf{a}(\theta_d), \mathbf{a}(\theta_s)$ 表示直达波与反射波的导向矢量。 $\mathbf{a}(\theta_d), \mathbf{a}(\theta_s)$ 写为:

$$\mathbf{a}(\theta_d) = [1, \dots, e^{-j2\pi d_m \sin(\theta_d)/\lambda}, \dots, e^{-j2\pi d_M \sin(\theta_d)/\lambda}]^T \quad (7)$$

$$\mathbf{a}(\theta_s) = [1, \dots, e^{-j2\pi d_m \sin(\theta_s)/\lambda}, \dots, e^{-j2\pi d_M \sin(\theta_s)/\lambda}]^T \quad (8)$$

$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_d), \mathbf{a}(\theta_s)]$ 为信号复合导向矢量。

互质阵直达波与反射波的导向矢量分别由稀疏均匀线阵1和稀疏均匀线阵2的直达波与反射波的导向矢量构成。

一个阵元数为 M ,阵元间距 Md 的稀疏均匀线阵,其直达波与反射波的导向矢量 $\mathbf{a}_1(\theta_d), \mathbf{a}_1(\theta_s)$ 为:

$$\mathbf{a}_1(\theta_d) = [1, e^{-j2\pi Nd \sin(\theta_d)/\lambda}, \dots, e^{-j2\pi(M-1)Nd \sin(\theta_d)/\lambda}]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{a}_1(\theta_s) = [1, e^{-j2\pi Nd \sin(\theta_s)/\lambda}, \dots, e^{-j2\pi(M-1)Nd \sin(\theta_s)/\lambda}]^T \quad (10)$$

一个阵元数为 N ,阵元间距 Md 的稀疏均匀线阵,其直达波与反射波的导向矢量 $\mathbf{a}_2(\theta_d), \mathbf{a}_2(\theta_s)$ 为:

$$\mathbf{a}_2(\theta_d) = [1, e^{-j2\pi Md \sin(\theta_d)/\lambda}, \dots, e^{-j2\pi(N-1)Md \sin(\theta_d)/\lambda}]^T \quad (11)$$

$$\mathbf{a}_2(\theta_s) = [1, e^{-j2\pi Md \sin(\theta_s)/\lambda}, \dots, e^{-j2\pi(N-1)Md \sin(\theta_s)/\lambda}]^T \quad (12)$$

则互质阵直达波与反射波的导向矢量为:

$$\mathbf{a}_{\text{CPA}}(\theta_d) = \mathbf{C} [\mathbf{a}_1(\theta_d)^T \mathbf{a}_2(\theta_d) (2:N, :)]^T \quad (13)$$

$$\mathbf{a}_{\text{CPA}}(\theta_s) = \mathbf{C} [\mathbf{a}_1(\theta_s)^T \mathbf{a}_2(\theta_s) (2:N, :)]^T \quad (14)$$

其中 \mathbf{C} 为校验矩阵,它由2个子阵物理阵元在整个互质阵中的位置所决定。举例来说,7根天线阵子($M=3, N=5$)的互质阵的校验矩阵如下:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

然后根据式(6)、式(13)和式(14)计算信号协方差矩阵如下:

$$\mathbf{R}_{\text{XX}} = E[\mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t)] = \sigma_s^2 \mathbf{A}(\theta)\mathbf{W}\mathbf{A}^H(\theta) + \sigma_n^2 \mathbf{I} \quad (16)$$

式中: $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_{\text{CPA}}(\theta_d), \mathbf{a}_{\text{CPA}}(\theta_s)]$ 为信号复合导向矢量; $\mathbf{W} = [1, \epsilon][1, \epsilon^*]^T = \begin{bmatrix} 1 & \epsilon^* \\ \epsilon & |\epsilon|^2 \end{bmatrix}$; $[\cdot]^*$ 为矩阵的共轭处理; $E[\cdot]$ 表示数学期望; $[\cdot]^H$ 表示矩阵共轭转置; \mathbf{I} 表示单位矩阵; σ_s^2 为信号的功率; σ_n^2 为噪声的功率。

2 基于互质阵虚拟阵列的低仰角估计方法

文献[4]提出了一种基于互质阵虚拟阵列的低仰角估计方法,下面简要阐述该方法。

虚拟阵列是将稀疏阵列接收到的入射信号的协方差矩阵 \mathbf{R}_{XX} 向量化后的一种数学表征。根据文献[4],协方差矩阵 \mathbf{R}_{XX} 中的第 i 行第 j 列元素为:

$$r_{ij} = E[x_i(t)x_j^*(t)] = \begin{cases} r_{i\text{-ULA}} + \Delta r_{ij}, & i \neq j \\ r_{i\text{-ULA}} + \Delta r_{ij} + \sigma_n^2, & i = j \end{cases} \quad (17)$$

$$r_{i\text{-ULA}} = \sigma_s^2 (e^{-j2\pi(d_i - d_j) \sin \theta_d / \lambda} + \rho^2 e^{-j2\pi(d_i - d_j) \sin \theta_s / \lambda}) \quad (18)$$

$$\Delta r_{ij} = 2\rho\sigma_s^2 \cos((2h_a - (d_i + d_j))2\pi \sin \theta_d / \lambda) \quad (19)$$

式中: $d_i, d_j (i, j = 1, 2, \dots, M)$ 为物理阵元位置, $d_i - d_j$ 为虚拟阵元位置。把 \mathbf{R}_{XX} 向量化操作后得到一个新的矢量,即虚拟阵列接收信号,公式如下:

$$\mathbf{z} = \text{vec}(\mathbf{R}_{\text{XX}}) \quad (20)$$

取对应于虚拟阵元位置的二阶统计量筛选重排去冗余后作为虚拟均匀线阵的等价接收信号 \mathbf{Z} 。 \mathbf{Z} 中每个位置的接收信号可看成 r_{ij_ULA} 项和 Δr_{ij} 项之和, 这样得到矢量 \mathbf{Z}_{ULA} 和 $\Delta\mathbf{Z}$, \mathbf{Z}_{ULA} 是虚拟均匀线阵的等效接收信号, $\Delta\mathbf{Z}$ 是相干信号引起的多余项。则 \mathbf{Z} 表示成:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_{ULA} + \Delta\mathbf{Z} \quad (21)$$

由式(18)和式(19) r_{ij_ULA} 和 r_{ij} 的表达式可知, \mathbf{Z}_{ULA} 和 $\Delta\mathbf{Z}$ 的相关系数主要与仰角相关, 且随仰角变化呈准周期性变化, 经实验仿真发现在 $0^\circ \sim 8^\circ$ 时其绝对值都控制在 $0 \sim 0.6$ 之间, 基于此认为 r_{ij_ULA} 和 $\Delta\mathbf{Z}$ 在低仰角 $0^\circ \sim 8^\circ$ 的环境内是弱相关的, 则相干信号引起的多余项 $\Delta\mathbf{Z}$ 可当成虚拟阵列接收的噪声项, 接收信号 \mathbf{Z} 可以近似作为虚拟均匀线阵的等效接收信号^[4]。

易知 \mathbf{Z} 为单秩的二阶统计量, 相当于一个单采样快拍虚拟信号, 无法直接用 \mathbf{Z} 作为虚拟阵列协方差矩阵。文献[4]采用空间平滑的方法恢复协方差矩阵的秩, 之后用 MUSIC 算法估计目标低仰角。该方法可参考文献[4], 这里不再赘述。

3 基于互质阵物理阵列的低仰角估计方法

常规阵列雷达中直达波与反射波的关系可以等同于相干信号。由于互质阵阵列间距不等, 故适用于均匀线阵的空间平滑和矩阵重构等解相干算法不适用互质阵模型。基于此本文对接收数据进行实值处理后利用无需解相干的广义 MUSIC^[10] 或最大似然估计算法^[11] 得到精确低仰角。下面介绍基于互质阵物理阵列的实值低仰角估计方法。

式(6)为 $P \times L$ 维阵列接收信号矩阵, 其中对于简单互质阵列, $P = M + N - 1$, 不难发现其协方差矩阵式(16)为复数矩阵, 为进一步减少计算复杂度, 可利用酉矩阵对接收数据进行实值处理。定义酉矩阵为:

$$\mathbf{U}_{2K+1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_K & 0 & \mathbf{jI}_K \\ \mathbf{0}^T & \sqrt{2} & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{II}_K & 0 & -\mathbf{jII}_K \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\mathbf{U}_{2K} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_K & \mathbf{jI}_K \\ \mathbf{II}_K & \mathbf{jII}_K \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中: \mathbf{II}_K 为 $K \times K$ 的交换矩阵, 其反对角线上元素为 1, 其他元素为 0, \mathbf{I}_K 为 $K \times K$ 的单位阵。若 P 为奇数, 采用式(23)进行实值处理, 且 $K = (P-1)/2$; 若 P 为偶数, 采用式(24)进行实值处理, 且 $K = P/2$ 。

根据酉矩阵性质, 酉矩阵可通过酉变换将 Centro-Hermitian 矩阵变为实矩阵, 但 \mathbf{R}_{XX} 不是 Centro-

Hermitian 矩阵, 因此需对其进行一次双向平滑使其转换为 Centro-Hermitian 矩阵^[21]:

$$\mathbf{R}_{XX}^{\beta} = \frac{1}{2} (\mathbf{R}_{XX} + \mathbf{II}^H \mathbf{R}_{XX}^* \mathbf{II}) \quad (25)$$

然后对其进行酉变换即可得到实矩阵:

$$\mathbf{R}_U = \mathbf{U}^H \mathbf{R}_{XX}^{\beta} \mathbf{U} \quad (26)$$

同理, 对复合导向矢量也可进行酉变换得到实值复合导向矢量:

$$\mathbf{A}_U = [\mathbf{U}^H \mathbf{a}_{CPA}(\theta_d), \mathbf{U}^H \mathbf{a}_{CPA}(\theta_s)] \quad (27)$$

实值处理后即可利用最大似然估计算法或广义 MUSIC 算法进行低仰角精估计, 实值广义 MUSIC 谱峰搜索公式如下:

$$P_{GMUSIC} = \frac{\det(\mathbf{A}_U^H \mathbf{A}_U)}{\det(\mathbf{A}_U^H \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \mathbf{A}_U)} \quad (28)$$

式中: \mathbf{U}_n 为 \mathbf{R}_U 特征分解得到的实噪声子空间, 定义实值空间投影矩阵为:

$$\mathbf{P}_a = \mathbf{A}_U (\mathbf{A}_U^H \mathbf{A}_U)^{-1} \mathbf{A}_U^H \quad (29)$$

则实值最大似然估计谱峰搜索公式如下:

$$\mathbf{P}_{ML} = \frac{1}{\text{trace}(\mathbf{I}_P - \mathbf{P}_a) \mathbf{R}_U} \quad (30)$$

式中: trace 为求迹运算符。经谱峰搜索获得目标低仰角后, 即可根据目标斜距 R_d 和仰角估计值, 计算目标高度为:

$$h_t \approx R_d \sin \theta_d + h_a \quad (31)$$

总结基于互质阵物理阵列的低仰角估计方法步骤如下:

步骤 1 利用式(6)计算接收信号数据并根据式(16)计算数据协方差矩阵;

步骤 2 利用酉矩阵对接收到的多快拍数据协方差矩阵和复合导向矢量进行实值处理;

步骤 3 利用广义 MUSIC 或最大似然算法进行谱峰搜索, 获得目标低仰角估计值;

步骤 4 利用式(31)将目标低仰角数据转换为目标高度数据。

4 仿真实验分析

各仿真实验基础条件一致: 假设 2 个垂直放置的米波阵列雷达, 天线阵元成一维线性排布, 其接收天线 1 为均匀线阵, 其接收天线 2 为简单互质阵。均匀线阵阵元数目 $P=7$, 阵元间距 d 为信号波长 λ 的二分之一; 简单互质阵两个子阵阵元数目分别为 $M=3$ 和 $N=5$, 阵元间距分别为 Nd 和 Md ; 雷达工作频率为 300 MHz, 天线高度为 4 m, 地面反射系数为 -0.98, 空间目标数量 $n=1$, 添加噪声为高斯白噪声。本文采取蒙特卡洛重复实验对比不同阵列不同算法的测角精度, 蒙特卡洛重复实验次数为 100

次,一维均方根误差 RMSE 公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (\hat{\theta}_k - \theta_d)^2} \quad (32)$$

式中: K 为蒙特卡洛试验次数; $\hat{\theta}_k$ 为第 k 次测得的目标仰角。

4.1 空间谱成像对比实验

此组实验条件为目标直达波入射角为 5° , SNR=10 dB,快拍数 $L=100$,目标距离为 300 km,角度搜索范围为 $0^\circ \sim 10^\circ$,搜索间隔为 0.1° 。互质阵分别利用物理阵列和虚拟阵列估计低仰角并与均匀线阵进行对比,经 Matlab 仿真得空间谱见图 3。

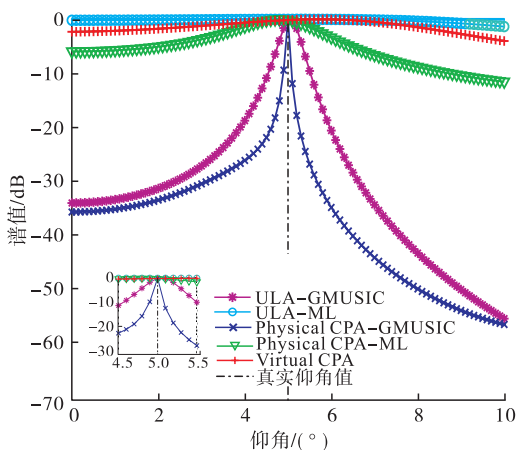


图 3 低仰角估计空间谱图

仿真结果表明:①各阵列采用实值广义 MUSIC 和最大似然算法均能准确测量目标仰角,且实值广义 MUSIC 算法谱峰更尖锐,效果更佳;②采用同种算法的互质阵低仰角谱峰比均匀线阵更尖锐,测角性能更佳;③受虚拟阵列近似模型和解相干算法的影响,互质阵虚拟阵列法只能近似估计目标低仰角,且估计值没有均匀线阵准;即在同等条件下,互质阵物理阵列法比虚拟阵列法低仰角估计效果好。

4.2 仰角影响测角精度实验

实验前,先仿真目标仰角随距离变化曲线。假设一批目标飞行高度分别为 1 000 m、2 000 m、3 000 m,从距离雷达阵地 300 km 飞行至 30 km,仰角随目标距离变化曲线如图 4 所示。从图中发现,在实际作战过程中,目标仰角比较低,高度 1 000 m 时仰角变化区间 $0.2^\circ \sim 2^\circ$,高度 2 000 m 时仰角变化区间 $0.4^\circ \sim 3.8^\circ$,高度 3 000 m 时仰角变化区间 $0.6^\circ \sim 5.8^\circ$,因此实验 2 选取仰角角度为 $0.2^\circ \sim 6^\circ$ 。

其它实验条件为目标距离为 200 km,SNR=0 dB,快拍数 $L=100$,仰角取值间隔为 0.2° ,角度搜索范围为 $0^\circ \sim 6^\circ$,搜索间隔为 0.01° 。仿真测试不同仰角下,仰角估计值相对于真实角度的

蒙特卡洛重复实验误差。经 Matlab 仿真实验绘制仰角角度和均方根误差关系图见图 5。

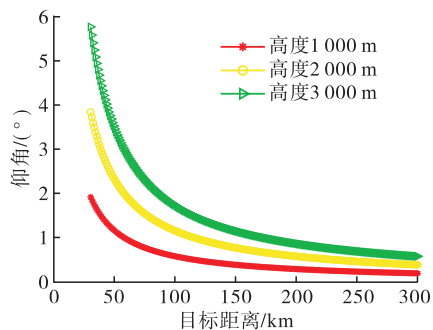


图 4 仰角随目标距离变化曲线

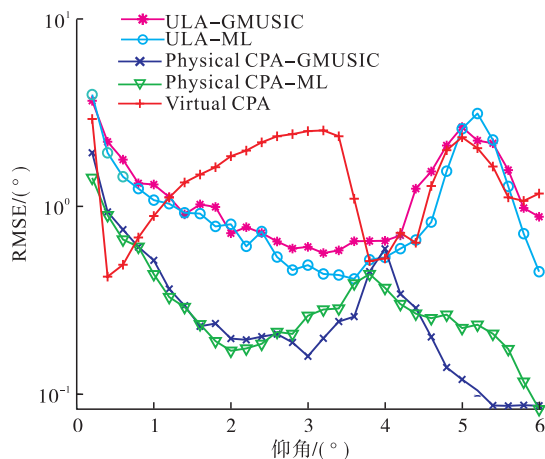


图 5 仰角角度对测角精度的影响

仿真结果表明:①仰角与不同阵列不同算法的测角误差大致呈负相关关系,但部分角度区间存在起伏。主要原因是仰角变化导致直达波和反射波波程差变化,进而造成多径衰减系数相位的周期性变化,影响算法效果。随着仰角变大,直达波和反射波的间隔变大,算法效果受多径效应影响逐渐变小,角度估计性能整体呈上升趋势;②无论使用均匀线阵还是互质阵作为雷达接收天线,实值最大似然算法测角精度与广义 MUSIC 算法相近,随着角度变化互有高低;③在同等仰角条件下,互质阵利用物理阵列估计目标低仰角时较均匀线阵和虚拟阵列法测角精度高,个别角度受多径效应影响略有差别, 0.6° 以下互质阵虚拟阵列法测角精度高于物理阵列的原因是 3° 以下虚拟阵列法无法分辨直达波和反射波,仰角估计值为 0° 引起的。

4.3 信噪比影响测角精度实验

实验条件为目标直达波入射角为 4.5° (根据 4.2 节实验综合选取),目标距离为 200 km,快拍数 $L=100$,SNR 的取值范围为 $-10 \sim 10$ dB,变化间隔为 1 dB,角度搜索范围为 $0^\circ \sim 10^\circ$,搜索间隔为 0.01° 。仿真测试不同信噪比条件下,仰角估计值相对于真实角度的蒙特卡洛重复实验误差,经 Matlab 仿真实验绘制信噪比与均方根误差关系见图。

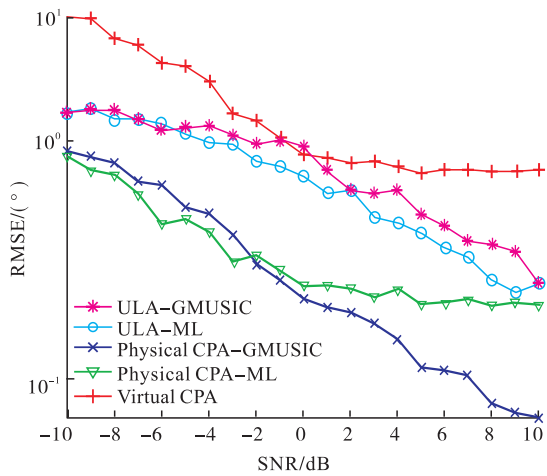


图6 信噪比对仰角测角精度的影响

仿真结果表明:①信噪比与不同阵列不同算法的测角精度呈正相关关系,当信噪比达到一定值后测角精度提升趋于缓慢;②在相同信噪比下,同一阵列采用最大似然算法的低仰角测角精度与广义MUSIC算法相近,随着信噪比的变化互有高低;③在相同信噪比下,采用同种算法的互质阵低仰角测角精度比均匀线阵高,互质阵物理阵列法低仰角测角精度比虚拟阵列法高;④当信噪比大于一定值后,互质阵虚拟阵列法低仰角估计的测角精度基本没有变化,在 0.8° 左右,这是因为互质阵虚拟阵列近似模型中把相干信号引起的多余项 ΔZ 当成噪声造成的,空间平滑算法并不能消除近似模型中 ΔZ 带来的不良影响。

4.4 快拍数影响测角精度实验

实验条件为目标直达波入射角为 4.5° (根据4.2节综合选取),目标距离为200 km, SNR = 0 dB,快拍数 L ,取值变化范围为10~100次,变化间隔为10次,角度搜索范围为 $0^\circ\sim 10^\circ$,搜索间隔为 0.01° 。仿真测试不同快拍数下,仰角估计值相对于真实角度的蒙特卡洛重复实验误差。经Matlab仿真实验绘制快拍数和均方根误差关系见图7。

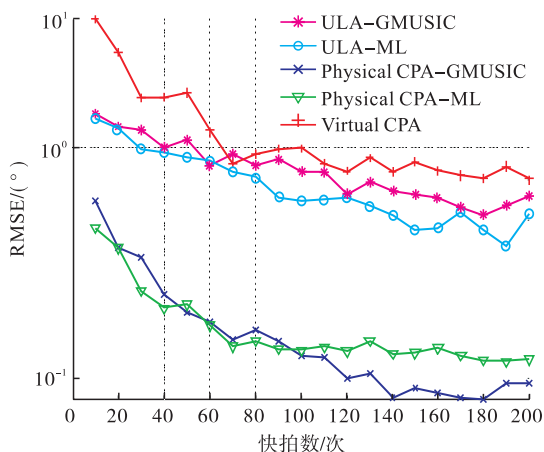


图7 快拍数对仰角测角精度的影响

仿真结果表明:①快拍数与不同阵列不同算法的测角精度呈正相关关系,当快拍数达到一定值后测角精度提升趋于缓慢;②在相同快拍数下,同一阵列采用最大似然算法的低仰角测角精度与广义MUSIC算法相近,随着快拍数变化互有高低;③在相同快拍数下,采用同种算法的互质阵低仰角测角精度比均匀线阵高,互质阵物理阵列法低仰角测角精度比虚拟阵列法高;④当快拍数大于一定值后,互质阵虚拟阵列法低仰角估计的测角精度基本没有变化,在 0.85° 左右,这是因为互质阵虚拟阵列近似模型中把相干信号引起的多余项 ΔZ 当成噪声造成的,空间平滑算法并不能消除近似模型中 ΔZ 带来的不良影响。

5 结语

为了提高米波雷达低仰角估计精度,本文研究了基于互质阵的米波雷达测高问题,推导分析了互质阵米波雷达信号模型,并在综合分析互质阵虚拟阵列法的基础上,提出了基于互质阵物理阵列的低仰角估计方法。相较于均匀线阵,互质阵的物理孔径更大,本文所提低仰角估计方法精度得到了较大提升。仿真结果表明互质阵物理阵列法较均匀线阵和虚拟阵列法具有更高的测角精度,在低快拍、低信噪比时效果更佳。

参考文献:

- [1] KUSCHEL H. VHF/UHF Radar. Part 1: Characteristics [J]. Electronics & Communications Engineering Journal, 2002, 14(2):61-72.
- [2] KUSCHEL H. VHF/UHF Radar Part 2: Operational Aspects and Applications [J]. Electronics & Communications Engineering Journal, 2002, 14(3):101-111.
- [3] LIU Y Q, WAN X R, TANG H, et al. Digital Television Based Passive Bistatic Radar System for Drone Detection [C]// IEEE Radar Conference. Seattle, USA: IEEE, 2017: 1493-1497.
- [4] 徐阳, 易建新, 程丰, 等. 基于互质阵列的外辐射源雷达低仰角估计 [J]. 雷达科学与技术, 2020, 18(5): 501-508.
- [5] 刘源. 米波阵列雷达低仰角目标测高方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [6] GAO Y, CHANG W, PEI Z, et al. An Improved MUSIC Algorithm for DOA Estimation of Coherent Signals [J]. Sensors and Transducers, 2014, 175(7): 75-81.
- [7] ZHANG W, HAN Y, JIN M, et al. Multiple-Toeplitz Matrices Reconstruction Algorithm for DOA Estimation of Coherent Signals [J]. IEEE Access, 2019, 7:

- 49504-49512.
- [8] ZHANG W, HAN Y, JIN M, LI X. An Improved ESPRIT-Like Algorithm for Coherent Signals DOA Estimation[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(2): 339-343.
- [9] 张文俊, 赵永波, 张守宏. 广义 MUSIC 算法在米波雷达测高中的应用及其改进[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(2): 387-390.
- [10] 李晓刚. 基于最大似然算法的 DOA 估计方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [11] 陈伯孝, 胡铁军, 郑自良, 等. 基于波瓣分裂的米波雷达低仰角测高方法及其应用[J]. 电子学报, 2007, 35(6): 1021-1025.
- [12] 赵光辉, 陈伯孝, 董玫. 基于交替投影的 DOA 估计方法及其在米波雷达中的应用[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(1): 224-227.
- [13] 杨雪亚. 米波雷达阵列超分辨和测高方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [14] 蒋柏峰, 吕晓德, 向茂生. 基于广义 MUSIC 算法的低仰角估计新方法[J]. 雷达学报, 2013, 2(4): 422-429.
- [15] 朱伟. 米波数字阵列雷达低仰角测高方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [16] 郑轶松. 米波阵列雷达低仰角测高若干问题研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [17] 胡铁军, 杨雪亚, 陈伯孝. 阵列内插的波束域 ML 米波雷达测高方法[J]. 电波科学学报, 2009, 24(4): 660-666.
- [18] 吴向东, 张守宏, 董玫. 一种基于线性预处理的米波雷达低仰角处理算法[J]. 电子学报, 2006, 34(9): 1668-1671.
- [19] 周成伟. 互质阵列信号处理算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [20] 汪安戈, 胡国平. 实数域广义 MUSIC 的 MIMO 雷达低空目标仰角估计算法[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(11): 128-131.

(编辑: 徐敏)

(上接第 59 页)

5 结语

本文研究了免疫克隆算法在一阶梯度张量中的应用。在一阶梯度张量算法的基础上, 提出了误差梯度张量矩阵并运用免疫克隆算法进行优化处理。在不同的路线上, 将原算法和免疫克隆优化的定位算法进行对比分析并利用实际实验对优化算法进行实际验证。研究表明: 在比较近的距离条件下, 经过免疫克隆算法优化后的一阶梯度张量定位精度得到明显提高。

参考文献

- [1] 常帅, 付晓梅, 张翠翠, 等. 基于磁信标的水下 SLAM 方法[J]. 水下无人系统学报, 2019, 27(3): 277-283.
- [2] 邓国庆, 姚爱国, 龚正, 等. 基于地面磁信标的水平定向钻进实时定位方法[J]. 地球科学, 2017, 42(12): 2336-2344.
- [3] FURUICHI T. Magnetic Sensor and Manufacturing Method of the Same[J]. Journal of Medical Sciences, 2017, 11(1): 303-316.
- [4] 蔡隆慧. 浅析航空飞行器导航技术[J]. 中国新通信, 2019, 21(11): 90-91.
- [5] DELANEY J A, WILEMAN T M, PERRY N J, et al. The Validity of a Global Navigation Satellite System for Quantifying Small-Area Team-Sport Movements[J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2019, 33(6): 1463-1466.
- [6] LI X J, XIAO T T, CHEN F W, et al. A Novel Superconducting Magnetic Levitation Method to Support the Laser Fusion Capsule by Using Permanent Magnets[J]. Matter and Radiation at Extremes, 2018, 3(3): 104-109.
- [7] 邓国庆. 基于地面磁信标的水平定向钻进实时定位系统研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2017: 44-49.
- [8] 李青竹, 李志宁, 张英堂, 等. 基于二阶磁张量欧拉反褶积的磁源单点定位方法[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(4): 915-924, 727.
- [9] 袁鹏, 祗会强, 靳鸿, 等. 基于磁梯度张量不变量的椭圆误差消除方法[J]. 传感技术学报, 2019, 32(8): 1194-1199.
- [10] WANG R, YANG B F, ZHAO Z, et al. Research on MGT Target Location Method Based on Rotating Combined Magnetic Beacon[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2021, 35(8): 1072-1087.
- [11] HE G X, HE T J, LIAO K X, et al. Experimental and Numerical Analysis of Non-Contact Magnetic Detecting Signal of Girth Welds on Steel Pipelines [J]. ISA Transactions, 2021, 6(1): 6-23.
- [12] 赵震, 杨宾峰, 王润, 等. 基于双十字形测量结构的磁信标定位方法[J]. 传感技术学报, 2021, 34(1): 70-74.
- [13] ZHI S T, SUN X C, ZHANG Q Z, et al. Demagnetization Effect in a Meander-Core Orthogonal Fluxgate Sensor [J]. Micromachines, 2021, 12(8): 937-949.
- [14] 刘刚, 行鸿彦, 张金玉. 一种优化的微弱信号检测方法[J]. 现代雷达, 2019, 41(6): 23-30.

(编辑: 姚树峰)