

# 基于合成导向矢量广义 MUSIC 算法的 水平极化米波雷达测高方法

王国铨, 王鸿帧, 郑桂妹\*, 宋玉伟

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

**摘要** 米波雷达具有抗击隐身目标和反辐射导弹的天然优势,但其俯仰维波束较宽,探测低空目标时波束打地,多径效应的存在严重影响米波雷达测高精度。针对这一问题,采用均匀线阵米波雷达经典镜像多径传播信号模型,总结归纳了以广义多重信号分类算法为基础的 3 种测高方法,并在此基础上提出了一种适用于水平极化米波雷达基于合成导向矢量广义 MUSIC 算法的精确测高方法,仿真实验与性能最优的第三种测高方法进行对比,在重点分析目标仰角、信噪比、快拍数、幅相误差和地面反射系数等因素对低空目标测高性能影响的基础上得出一般性结论,证明了新方法的优越性。

**关键词** 广义 MUSIC 算法;米波雷达;多径效应;高度测量

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2022.06.007

**中图分类号** TN953+.5 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2022)06-06-0049-08

## A Height Measurement Method of Horizontally Polarized Meter Wave Radar Based on Synthetic Steering Vector Generalized MUSIC Algorithm

WANG Guoxuan, WANG Hongzhen, ZHENG Guimei\*, SONG Yuwei

(Air and Missile Defense School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract** Meter wave radar is characterized by the natural anti-stealth and anti-radiation missiles, but is wide in pitch dimension beam, there is a possibility of the beam hitting the ground in detecting low altitude targets, and the existence of multipath effect seriously affects the height measurement accuracy of meter wave radar. The classical mirror multipath propagation signal model of uniform linear array meter wave radar is utilized for summarizing three height measurement methods based on generalized multiple signal classification (MUSIC) algorithm, i. e. the height measurement method based on improved generalized MUSIC algorithm, the joint estimation method of low elevation and multipath attenuation coefficients based on generalized MUSIC algorithm, and the Height measurement method of generalized MUSIC algorithm based on reasonable weight. Based on the analysis of the above algorithms, an accurate altitude measurement method is proposed based on synthetic steering vector generalized MUSIC algorithm for horizontally polarized meter wave radar. the simulation experiment is compared with the third height measurement method with the best performance, and a general conclusion is drawn based on the analysis of the in-

**收稿日期:** 2022-07-12

**基金项目:** 国家自然科学基金(61971438)

**作者简介:** 王国铨(1998-),男,河南邓州人,硕士生,研究方向为米波雷达测高。E-mail:wang\_gx2016@126.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:** 王国铨, 王鸿帧, 郑桂妹, 等. 基于合成导向矢量广义 MUSIC 算法的水平极化米波雷达测高方法[J]. 空军工程大学学报, 2022, 23(6): 49-56. WANG Guoxuan, WANG Hongzhen, ZHENG Guimei, et al. A Height Measurement Method of Horizontally Polarized Meter Wave Radar Based on Synthetic Steering Vector Generalized MUSIC Algorithm[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2022, 23(6): 49-56.

fluence of target elevation, signal to noise ratio, snapshot number, amplitude phase error, ground reflection coefficient and other factors on the height measurement performance of low altitude targets, which proves the superiority of the new method.

**Key words** generalized MUSIC algorithm; meter wave radar; multipath effect; height measurement

米波雷达因具有信号衰减弱、探测距离远、抗击隐身目标和反辐射导弹能力突出等优点,被广泛应用于现代战争<sup>[1]</sup>。但其波束较宽、波段较低,在低仰角区域地(海)面反射回波较强而不可忽略,导致严重的多径效应,在对低空、超低空目标的检测及跟踪上存在弱点<sup>[2-3]</sup>。目标高度与仰角具有几何对应关系,测量目标高度等效于测量目标仰角<sup>[4]</sup>。低空目标仰角估计问题可等效为2个空间临近相干源的超分辨问题<sup>[5]</sup>,超分辨技术是提高米波雷达低空目标仰角估计性能的重要手段。

为解决多径条件下目标仰角估计中直达波与反射波之间的强相干性,可以采用空间平滑<sup>[6-9]</sup>、矩阵重构<sup>[10]</sup>等解相干算法进行解相干处理或利用无需解相干的极大似然<sup>[11-13]</sup>或广义 MUSIC<sup>[14-16]</sup>算法估计目标仰角。空间平滑算法将整个阵列划分为多个重叠的子阵,通过对各子阵协方差矩阵求平均的方式达到解相干的目的,有前向平滑、后向平滑和前后向平滑3种方式。空间平滑算法不仅要求阵列具有平移不变性的特殊空间几何结构,而且会损失阵列有效孔径从而导致测角精度下降。文献[7]将前后空间平滑多重信号分类(forward backward spatial smoothing multiple signal classification,FBSSMUSIC)算法应用到米波雷达低仰角估计中,但效果一般。文献[8]综合分析了FBSS解相干算法在米波雷达低空目标测高问题中应用,指出该算法即使在接收信号协方差矩阵满秩条件下,也会出现去相干失效、仰角误差很大的现象。文献[9]研究表明空间平滑算法在多径衰减系数相位为 $0^\circ$ 或 $\pm 180^\circ$ 时解相干能力几乎为0,仰角估计误差会急剧增大。典型的矩阵重构类解相干算法有Toeplitz矩阵重构法<sup>[10]</sup>,其根据回波数据协方差矩阵的Toeplitz性质进行矩阵重构来解决协方差矩阵秩亏问题。矩阵重构类方法不牺牲阵列孔径,但其不是无偏估计所以误差较大。另外,极大似然算法和广义MUSIC算法无需解相干处理即可估计出目标仰角。文献[11]将ML算法利用交替投影(alternating projection, AP)技术求解应用到米波雷达测高中,将回波相关矩阵在各个信号子空间中交替迭代,完成目标的DOA估计。文献[12]提出了阵列内插的波束域ML测高方法,采用阵列内插的方法在保证大间距阵波束域变换无模糊性的同时降低了运算量。文

献[13]紧密结合米波常规阵列雷达特点,在镜面多径反射信号模型基础上,总结归纳了以传统ML算法为基础的3种米波雷达测高方法,并对这些方法进行了理论性能分析,梳理了3种方法之间的相互关系。然而,最大似然算法计算复杂度相对于广义MUSIC算法高,尤其是在多个目标DOA估计场景中。

基于此,本文在均匀线阵米波雷达经典镜像多径传播信号模型基础上,总结归纳了以广义MUSIC算法为基础的3种测高方法:①基于改进广义MUSIC算法的测高方法<sup>[14]</sup>;②基于广义MUSIC算法的低仰角和多径衰减系数联合估计的测高方法<sup>[15]</sup>;③基于合理权值的广义MUSIC算法的测高方法<sup>[16]</sup>。并在重点分析以上算法的基础上提出一种采用新的导向矢量的基于广义MUSIC算法的精确测高方法,通过仿真实验验证了其有效性与优越性。

## 1 信号模型

假设一个米波雷达采用垂直放置的均匀线阵作为接收天线,其采用经典镜像多径传播信号模型,见图1。雷达在A处,目标在T处,B为多径反射点。其中 $h_a$ 和 $h_t$ 分别为天线架设高度和目标高度, $R$ 为雷达与目标的水平距离, $R_d$ 与 $R_i$ 分别为直达波和多径反射波路径长度, $\theta_d$ 与 $\theta_s$ 分别为目标直达波与反射波入射角。

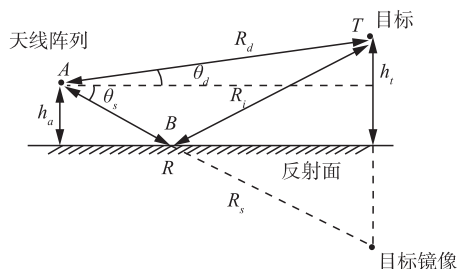


图1 米波雷达经典镜像多径传播模型

由图1可得 $R_d$ 和 $R_i$ 分别为:

$$R_d = \sqrt{R^2 + (h_t - h_a)^2} \quad (1)$$

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

对式(1)和式(2)进行二项式展开可得:

$$R_d = R \left[ 1 + \frac{(h_t - h_a)^2}{2R^2} - \frac{(h_t - h_a)^4}{8R^4} + \dots \right] \quad (3)$$

$$R_i = R \left[ 1 + \frac{(h_t + h_a)^2}{2R^2} - \frac{(h_t + h_a)^4}{8R^4} + \dots \right] \quad (4)$$

在实际情况下,当目标飞行高度较低时,  $R \geq h_a, h_t$ 。因此可舍弃高次项,仅保留二项式中的前两项,得到  $R_d$  和  $R_i$  的近似值为:

$$R_d = R + (h_t - h_a)^2 / 2R \quad (5)$$

$$R_i = R + (h_t + h_a)^2 / 2R \quad (6)$$

则直达波与反射波的波程差  $\Delta R$  的公式<sup>[17]</sup>为:

$$\Delta R = R_i - R_d \approx 2h_t h_a / R = 2h_a \tan(\theta_d) \quad (7)$$

因波程差  $\Delta R$  引起的相位差  $\alpha$  为:

$$\alpha = 2\pi\Delta R / \lambda = 4\pi h_a \tan(\theta_d) / \lambda \quad (8)$$

式中:  $\lambda$  为波长。

米波雷达回波信号有 4 条传播路径: A-T-A 路径、A-T-B-A 路径、A-B-T-A 路径和 A-B-T-B-A 路径。常规阵列米波雷达估计低空目标仰角时,因距离分辨力有限,往往将低空目标和镜像目标当作同距离单元内的目标,因此可仅考虑接收多径,将其看作 2 条路径,即 A-T-A 路径、A-T-B-A 路径<sup>[17]</sup>。

则在  $t$  时刻第  $m$  个阵元接收数据为:

$$x_m(t) = s_m^{\text{直达-直达}}(t) + s_m^{\text{直达-反射}}(t) + n_m(t) = (e^{-j\frac{2\pi d_m \sin(\theta_d)}{\lambda}} + \epsilon e^{-j\frac{2\pi d_m \sin(\theta_s)}{\lambda}})s(t) + n_m(t) \quad (9)$$

式中:  $j$  为虚数单位,  $\epsilon = \rho e^{-j\alpha}$  表示多径衰减系数,  $\rho$  为地面反射系数;  $s(t)$  为信号复包络;  $n_m(t)$  为加性高斯白噪声。

则整个阵列在  $t$  时刻接收到的数据为:

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t), \dots, x_m(t), \dots, x_M(t)]^T = [\mathbf{a}(\theta_d), \mathbf{a}(\theta_s)][1, \epsilon]^T s(t) + \mathbf{N}(t) = \mathbf{A}\mathbf{\Gamma}s(t) + \mathbf{N}(t) \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{N}(t)$  为加性高斯白噪声矢量;  $t \in (t_1, t_2, \dots, t_L)$ ,  $L$  为快拍数;  $M$  为天线阵元数目;  $\mathbf{\Gamma} = [1, \epsilon]^T$ ,  $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_d), \mathbf{a}(\theta_s)]$  为信号复合导向矢量,  $\mathbf{a}(\theta_d), \mathbf{a}(\theta_s)$  表示直达波与反射波的导向矢量,表达式为:

$$\mathbf{a}(\theta_d) = [1, \dots, e^{-2j\pi d_m \sin(\theta_d)/\lambda}, \dots, e^{-2j\pi d_M \sin(\theta_d)/\lambda}]^T \quad (11)$$

$$\mathbf{a}(\theta_s) = [1, \dots, e^{-2j\pi d_m \sin(\theta_s)/\lambda}, \dots, e^{-2j\pi d_M \sin(\theta_s)/\lambda}]^T \quad (12)$$

根据式(10)可计算信号协方差矩阵为:

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t)] = \sigma_s^2 \mathbf{A}\mathbf{\Gamma}\mathbf{\Gamma}^H \mathbf{A}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I} \quad (13)$$

式中:  $\sigma_s^2$  为信号功率;  $\sigma_n^2$  为噪声功率;  $E[g]$  表示数学期望;  $\mathbf{I}$  表示单位矩阵。

根据最大似然估计准则,协方差矩阵  $\mathbf{R}$  的估计值  $\hat{\mathbf{R}}$  计算为:

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{L} \mathbf{X}\mathbf{X}^H \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{X}$  为整个阵列接收数据矩阵。

为了讨论问题方便,文中假设为单目标模型,非相干多目标情况类似,这里不再赘述。

## 2 基于广义 MUSIC 算法的测高方法

将广义 MUSIC 算法应用于米波雷达测高中,其谱峰搜索方程如下:

$$P = \frac{\det(\mathbf{A}^H \mathbf{A})}{\det(\mathbf{A}^H \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \mathbf{A})} \quad (15)$$

式中:  $\mathbf{U}_n$  为对协方差矩阵  $\hat{\mathbf{R}}$  进行特征分解得到的噪声子空间;  $\det$  为求矩阵行列式运算。

由图 1 中的几何关系易得:

$$\sin(\theta_d) = (h_t - h_a) / R_d \quad (16)$$

$$\sin(\theta_s) = -(h_t + h_a) / R_i \quad (17)$$

又有  $R \approx R_d \approx R_i$ ,则由式(16)和式(17)推导出  $\theta_d$  与  $\theta_s$  的关系式如下:

$$\theta_s = -\arcsin(\sin(\theta_d) + 2h_a/R) \approx -\theta_d \quad (18)$$

利用式(18)可将复合导向矢量  $\mathbf{A}$  由二维降为一维。降维后的导向矢量如下:

$$\mathbf{A}_1 = [\mathbf{a}(\theta_d), \mathbf{a}(-\arcsin(\sin(\theta_d) + 2h_a/R))] \quad (19)$$

降维后的广义 MUSIC 谱峰搜索方程如下:

$$P_1 = \frac{\det(\mathbf{A}_1^H \mathbf{A}_1)}{\det(\mathbf{A}_1^H \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \mathbf{A}_1)} \quad (20)$$

经谱峰搜索获得低空目标仰角后,根据目标距离  $R_d$  和仰角估计值  $\hat{\theta}_d$ ,计算目标高度估计值为:

$$\hat{h}_t \approx R_d \sin \hat{\theta}_d + h_a \quad (21)$$

该方法在降低运算量的同时提升了测高精度<sup>[14]</sup>,称此为方法(1)。

文献[15]在此基础上,提出了一种目标仰角和多径衰减系数联合估计算法,即方法(2)。其搜索方程式如下:

$$\mathbf{\Gamma} = \frac{(\mathbf{A}_1^H \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \mathbf{A}_1)^{-1} \boldsymbol{\omega}}{\boldsymbol{\omega}^H \mathbf{A}_1^H \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \mathbf{A}_1 \boldsymbol{\omega}} \quad (22)$$

$$P_2 = \frac{\mathbf{\Gamma}^H \mathbf{A}_1^H \mathbf{A}_1 \mathbf{\Gamma}}{\mathbf{\Gamma}^H \mathbf{A}_1^H \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \mathbf{A}_1 \mathbf{\Gamma}} \quad (23)$$

式中:  $\boldsymbol{\omega} = [1, 0]^T$ 。

方法(2)经过一次角度搜索,可同时估计目标角度和多径衰减系数  $\epsilon$ ,后可利用多径衰减系数计算得到地面反射系数  $\rho$ 。

文献[16]理论推导出方法(1)和方法(2)有效性的实质是对基本谱峰搜索方程进行加权,抑制了小角度产生的大谱值。在此基础上,提出了基于广义 MUSIC 算法的低仰角估计方法模型,并给出方法(3)。其搜索方程式如下:

$$\mathbf{A}_1^H \mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \Lambda & a_{12} \\ a_{21} & \Lambda \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$P_{31} = \frac{\Lambda^{2\delta} - (a_{12} a_{21})^\delta}{\det(\mathbf{A}_1^H \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \mathbf{A}_1)} \quad (25)$$

$$P_{32} = \frac{(\Lambda^2 - a_{12}a_{21})^\delta}{\det(\mathbf{A}_1^H \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \mathbf{A}_1)} \quad (26)$$

经文献[16]仿真验证,当式(25)中 $\delta \leq 1$ ,式(26)中 $\delta = 1.1$ 时,方法(3)精度最高。由于两式效果相近,本文实验选取式(26)进行对比仿真。

与方法(1)和方法(2)相比,方法(3)利用了更加合理的权值,对于低仰角目标估计的成功概率更高,测高精度优于方法(1)和方法(2)或与其一致,总体上性能更优。

### 3 基于合成导向矢量广义 MUSIC 算法的测高方法

基于合成导向矢量广义 MUSIC 算法的测高方法是在方法(1)基础上,利用多径衰减系数 $\epsilon$ 中地面反射系数 $\rho$ 的先验信息,将多径反射条件下的合成导向矢量 $\mathbf{A}_0$ 代替降维后的复合导向矢量 $\mathbf{A}_1$ ,再用广义 MUSIC 算法进行谱峰搜索得到目标仰角估计值。

#### 3.1 地面反射系数分析

水平极化和垂直极化条件下的 Fresnel 反射系数 $\rho_h$ 、 $\rho_v$ 表达式分别为:

$$\rho_h = \frac{\sin\varphi_g - \sqrt{\epsilon_c - \cos^2\varphi_g}}{\sin\varphi_g + \sqrt{\epsilon_c - \cos^2\varphi_g}} \quad (27)$$

$$\rho_v = \frac{\epsilon_c \sin\varphi_g - \sqrt{\epsilon_c - \cos^2\varphi_g}}{\epsilon_c \sin\varphi_g + \sqrt{\epsilon_c - \cos^2\varphi_g}} \quad (28)$$

式中: $\varphi_g$ 为擦地角; $\epsilon_c$ 为地面复介电常数,通常可由相对介电常数 $\epsilon_r$ 、波长 $\lambda$ 和电导率 $\sigma_e$ 表示, $\epsilon_c = \epsilon_r - j60\lambda\sigma_e$ 。

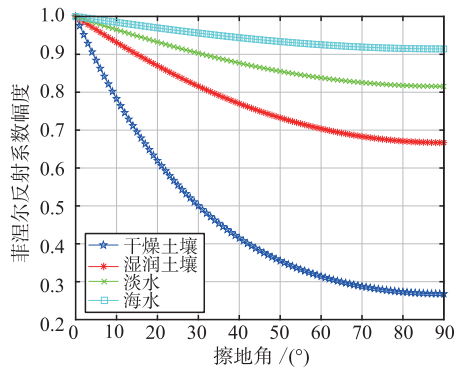
在水面、陆地、植被等不同的阵地场景下,其大小不尽相同,常见介质下的参数见表1。

表1 几种典型介质参数

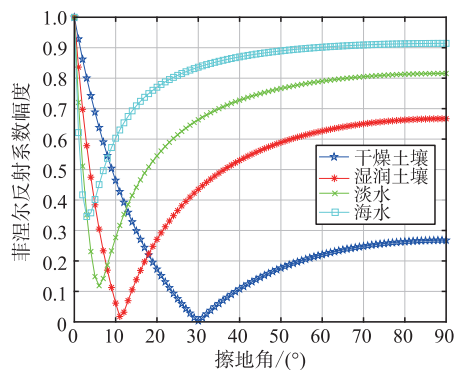
反射介质	$\epsilon_r$	$\sigma_e$
干土壤	3	0.001
湿土壤	25	0.02
海水	75	5
淡水	81	0.7

图2和图3分别为不同极化方式下,波长为1 m条件下,不同反射介质下的 Fresnel 反射系数幅度和相位与擦地角 $\varphi_g$ 之间的变化图。分析图2和图3,得到以下结论:当擦地角较小时,即目标处于低仰角区域时,各反射介质下的水平极化 Fresnel 反射系数幅度近似为1,相位近似为 $180^\circ$ 。即当雷达信号为水平极化波时,低仰角区域 $\rho$ 取值在 $-0.9$ 至 $-1$ 之间。而垂直极化 Fresnel 反射系数的幅度先随着擦地角的增大而快速减小至最小值(对应擦地角被称为 Brewster 角),然后随着擦地角的继续增大,垂直极化 Fresnel 反射系数的幅度开始逐渐

增加。值得注意的是,不同反射介质下的 Brewster 角均不相同,且当擦地角在 Brewster 角附近时,垂直极化的相位会快速下降。

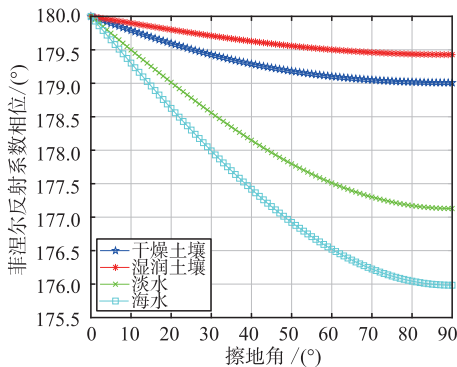


(a) 水平极化菲涅尔反射系数幅度

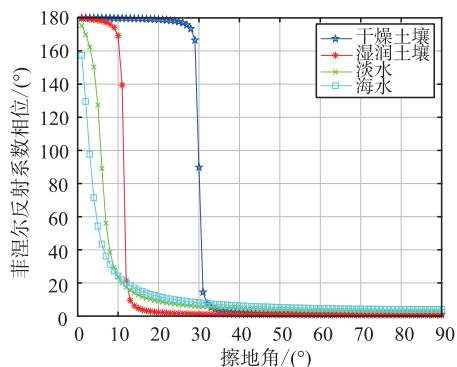


(b) 垂直极化菲涅尔反射系数幅度

图2 菲涅尔反射系数幅度随擦地角变化



(a) 水平极化菲涅尔反射系数相位



(b) 垂直极化菲涅尔反射系数相位

图3 菲涅尔反射系数相位随擦地角变化

从上述分析结论中可知,垂直极化波的地面反射系数由于在低仰角区域幅度和相位的剧烈变化不能当成已知量,而对于水平极化波而言,将地面反射系数当成已知量是可行的。

### 3.2 基于合成导向矢量的广义 MUSIC 算法

综上所述,合成导向矢量  $\mathbf{A}_0$  的表达式为:

$$\mathbf{A}_0 = \mathbf{A}_1 \mathbf{\Gamma} = [\mathbf{a}(\theta_d), \mathbf{a}(-\arcsin(\sin\theta_d + 2h_a/R))] [1, \epsilon]^T = \mathbf{a}(\theta_d) + \rho e^{-j\alpha} \mathbf{a}(-\arcsin(\sin\theta_d + 2h_a/R)) \quad (29)$$

则合成导向矢量广义 MUSIC 算法谱峰搜索方程如下:

$$P_0 = \frac{\det(\mathbf{A}_0^H \mathbf{A}_0)}{\det(\mathbf{A}_0^H \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \mathbf{A}_0)} \quad (30)$$

根据式(8),反射波与直达波的相位差  $\alpha = 4\pi h_a \tan(\theta_d)/\lambda$ ,当天线架高  $h_a$  和波长  $\lambda$  已知时,  $\alpha$  是随  $\theta_d$  变化的变量。这样多径条件下  $\mathbf{A}_0$  是  $\theta_d$  的函数,则式(30)为一维搜索。经谱峰搜索获得目标仰角后,根据式(21)计算目标高度。

综上,总结基于合成导向矢量广义 MUSIC 算法的水平极化米波雷达测高方法步骤如下:

**步骤 1** 根据雷达阵元位置按照式(11)~(12)计算其直达波导向矢量  $\mathbf{a}(\theta_d)$  和反射波导向矢量  $\mathbf{a}(\theta_s)$ ,得到复合导向矢量  $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_d), \mathbf{a}(\theta_s)]$ ;

**步骤 2** 利用式(18)对复合导向矢量  $\mathbf{A}$  进行降维得到降维导向矢量  $\mathbf{A}_1$ ;

**步骤 3** 在水平极化 Fresnel 反射系数已知的情况下,按照式(8)计算波程差引起的相位差  $\alpha$ ,后按照式(29)计算合成导向矢量  $\mathbf{A}_0$ ;

**步骤 4** 按照式(14)计算协方差矩阵  $\hat{\mathbf{R}}$  并进行特征值分解获得噪声子空间  $\mathbf{U}_n$ ;

**步骤 5** 利用式(30)进行谱峰搜索,获得目标仰角估计值  $\hat{\theta}_d$ ;

**步骤 6** 利用式(21)提供的几何关系将目标仰角数据转换为目标高度数据。

上述步骤利用的地面反射系数是根据阵地条件并经试验校正后的已知参数。

### 3.3 方法性能分析

由估计理论可知,同样的条件下,若信号的先验知识越多,所需估计的参数就越少,则性能也越好。本文方法利用了水平极化米波雷达在水平地面上反射系数  $\rho$  已知的先验知识,因而仰角估计误差相对于前3种方法也会大大降低,雷达的测高性能会进一步提高。

需注意的是,本文方法有以下限定条件:①阵地反射面必须满足瑞利条件,是平坦地面,当阵地为起伏地面时测高精度会随着起伏程度变大而下降,可提前探测地形条件并通过已知目标修订地面反射系数数值,从而提高本文方法精度和适应性;②本文信号模型未考虑地球曲率,即目标距离需小于雷达直视距离;③当天线架高  $h_a$  与信号波长  $\lambda$  的比值  $h_a/\lambda$  过大时,反射波与直达波的相位差  $\alpha$  将会存在大于  $2\pi$  的情况,这样在谱峰搜索时会存在假谱峰。根据雷达基本参数设置天线架设高度,当  $\theta_d$  最大值取  $10^\circ$  时,  $h_a/\lambda$  小于  $0.5/\tan(10^\circ) = 2.83$  时不存在假谱峰的问题,若米波雷达波长为 2 m,则其天线架设相对阵地反射面的高度  $h_a$  需小于 5.6 m。

## 4 仿真实验

各实验基础条件设置如下:考虑一米波雷达采用垂直均匀线阵,回波信号为水平极化波,雷达工作频率  $f_0 = 150$  MHz,阵元数目  $M = 8$ ,阵元间隔  $d = 0.5\lambda$ ,地面反射系数  $\rho = -0.95$ ,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算法的测高精度,实验次数为 300 次,高度均方根误差 (root mean square error, RMSE) 公式为:

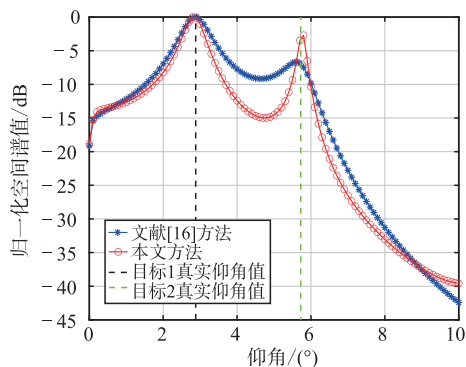
$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (\hat{H}_k - h_t)^2} \quad (31)$$

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

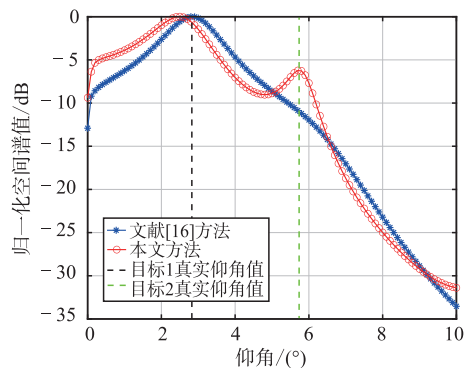
### 4.1 空间谱对比实验

实验条件:空间非相干目标数量为 2,目标 1 高度  $h_{t1} = 10$  km,目标 2 高度  $h_{t2} = 20$  km,2 个目标距离均为 200 km,即目标 1 直达波入射角  $\theta_{d1} = 2.86^\circ$ ,目标 2 直达波入射角  $\theta_{d2} = 5.74^\circ$ ,信噪比 SNR 分别取 20 dB 和 10 dB,快拍数  $L = 30$ ,天线高度  $h_a = 5$  m,角度搜索范围为  $0^\circ \sim 10^\circ$ ,搜索间隔为  $0.1^\circ$ 。

图 4 给出 2 种方法的空间谱对比图。仿真结果表明:①当 SNR 取 20 dB 时,文献[16]与本文方法都能准确测量目标仰角,但本文方法谱峰更尖锐,性能更佳;②当 SNR 取 10 dB 时,文献[16]方法的空间谱只有 1 个谱峰,已无法准确分辨两个目标仰角,而本文方法仍能清晰分辨 2 个目标仰角,角度分辨力更强,主要因为本文方法利用了地面反射系数  $\rho$  已知的先验信息。



(a) SNR=20 dB



(b) SNR=10 dB

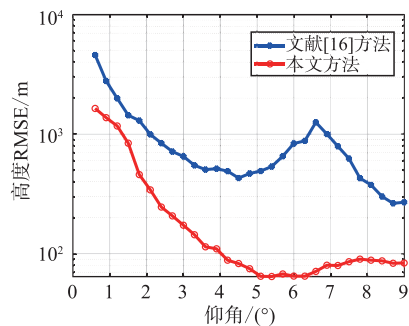
图4 空间谱对比图

#### 4.2 目标仰角影响测高性能实验

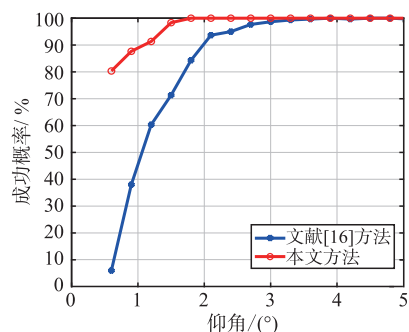
实验条件:空间目标数量为1,  $R_d = 100$  km, SNR=10 dB,  $L = 30$ ,  $h_a = 5$  m, 改变目标仰角的取值, 变化范围为  $0.6^\circ \sim 9^\circ$ , 角度间隔为  $0.3^\circ$ 。角度搜索范围为  $0^\circ \sim 10^\circ$ , 搜索间隔为  $0.01^\circ$ 。

图5(a)给出2种方法目标仰角与高度RMSE的关系图。仿真结果表明:①目标仰角与高度测量误差一定程度上呈负相关关系, 但存在随目标仰角变化在区间内会呈现一定的起伏变化, 主要原因是目标仰角变化带来多径衰减系数相位的周期性变化, 进而影响了算法效果。随着目标仰角进一步变大, 直达波和反射波的间隔变大, 算法效果受衰减系数相位的影响逐渐变小, 高度估计性能整体呈上升趋势。②总体上看, 在同等目标仰角条件下, 随着先验信息利用增多, 本文方法高度测量精度较文献[16]更高, 性能更佳。③与文献[16]方法相比, 本文方法高度测量误差并没有随着目标仰角的变化有较大的起伏变化, 说明在已知地面反射系数数值的情况下本文算法大大降低了多径效应的影响。

图5(b)为目标仰角变化时的分辨成功概率。当空间谱曲线在直达波方向和多径信号方向附近产生明显的谱峰, 且两峰值之间的空间谱曲线为凹曲线时认为分辨成功。仿真结果表明对波束宽度内的2个相干源, 本文方法较文献[16]分辨成功概率更高, 具有更低的分辨率门限。



(a) 测高精度



(b) 分辨成功概率

图5 目标仰角对测高性能的影响

#### 4.3 天线架高影响测高精度实验

实验条件:空间目标数量为1,  $\theta_d = 6^\circ$ ,  $R_d = 200$  km,  $L = 30$ , SNR=10 dB, 改变  $h_a$  的取值, 变化范围为  $3 \sim 20$  m, 间隔为  $1$  m, 角度搜索范围为  $0^\circ \sim 10^\circ$ , 搜索间隔为  $0.01^\circ$ 。

图6给出了2种方法天线架高与目标高度RMSE关系图。仿真结果表明:①当目标直达波入射角固定时, 高度估计误差随天线高度变化一定程度上呈周期性变化, 主要原因是天线高度变化带来多径衰减系数相位的周期性变化, 进而影响到算法效果;②总体上看, 在同等天线高度条件下, 随着先验信息利用增多, 本文方法高度测量精度较文献[16]更高, 性能更佳;③与文献[16]所提方法相比, 本文方法高度测量误差并没有随着天线架高的变化有较大的起伏变化, 说明在已知地面反射系数数值的情况下本文算法大大降低了多径效应的影响。

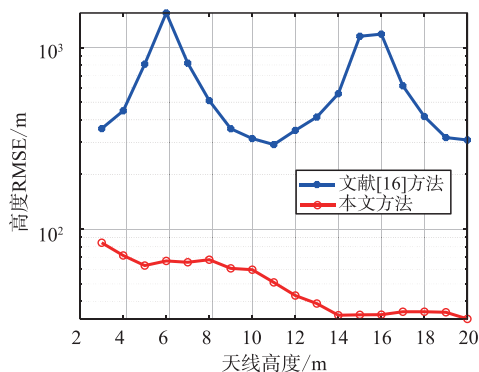


图6 天线架高对测高精度的影响

#### 4.4 信噪比影响测高精度实验

实验条件:空间目标数量为1,  $\theta_d = 4.5^\circ$ ,  $R_d = 200$  km,  $h_a = 5$  m,  $L = 30$ , SNR 取值范围为  $-10 \sim 20$  dB, 变化间隔为 5 dB, 角度搜索范围为  $0^\circ \sim 10^\circ$ , 搜索间隔为  $0.01^\circ$ 。

图7给出2种方法信噪比与目标高度 RMSE 关系图。仿真结果表明:①信噪比与不同方法的高度测量精度呈正相关关系;②总体上看,在同等信噪比条件下,随着先验信息利用增多,本文方法测量精度较文献[16]更高,性能更好。

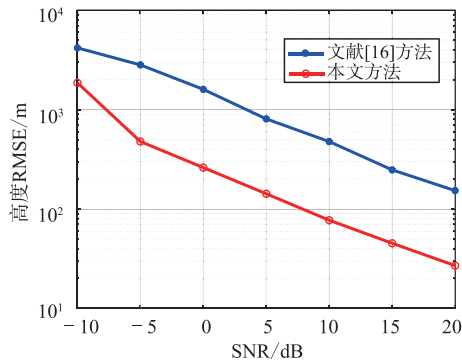


图7 信噪比对测高精度的影响

#### 4.5 快拍数影响测高精度实验

实验条件:空间目标数量为1,  $\theta_d = 4.5^\circ$ ,  $R_d = 200$  km,  $h_a = 5$  m, SNR = 10 dB, 快拍数  $L$  取值范围为 3 次至 30 次, 变化间隔为 3 次, 角度搜索范围为  $0^\circ$  至  $10^\circ$ , 搜索间隔为  $0.01^\circ$ 。

图8给出2种方法快拍数与目标高度 RMSE 关系图。仿真结果表明:①快拍数与不同方法的高度测量精度呈正相关关系;②总体上看,在同等快拍数条件下,随着先验信息利用增多,本文方法测高精度较文献[16]更高,性能更好。

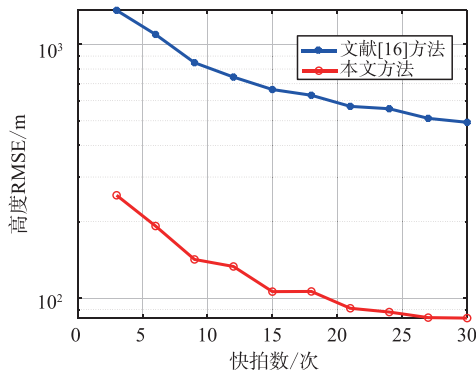


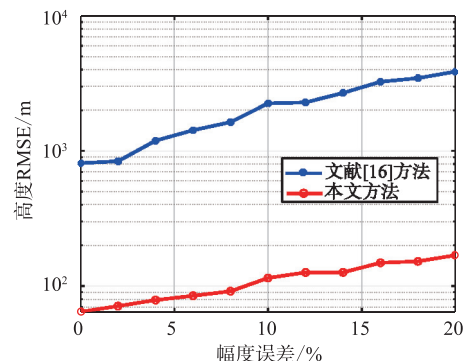
图8 快拍数对测高精度的影响

#### 4.6 幅相误差影响测高精度实验

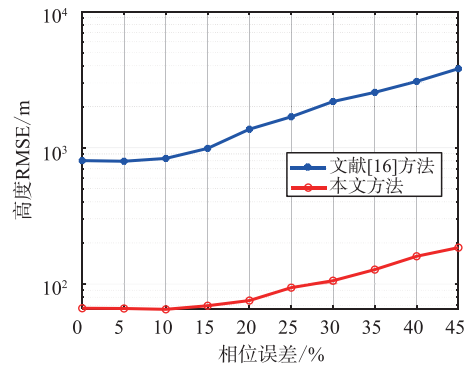
实验条件:空间目标数量为1,  $\theta_d = 6^\circ$ ,  $R_d = 200$  km,  $L = 30$ , SNR = 10 dB,  $h_a = 5$  m, 幅度误差和相

位误差均服从均匀分布,幅度误差变化范围为  $0\% \sim 20\%$ , 变化间隔为  $2\%$ , 相位误差变化范围为  $0^\circ \sim 45^\circ$ , 变化间隔为  $5^\circ$ , 角度搜索范围为  $0^\circ \sim 10^\circ$ , 搜索间隔为  $0.01^\circ$ 。

图9给出2种方法幅相误差与目标高度 RMSE 关系图。仿真结果表明:①随着幅相误差的增大,算法性能随之下降;②总体上看,在同等幅相误差条件下,随着先验信息利用增多,本文方法测高精度较文献[16]更高,性能更好;③相位误差在  $10^\circ$  以内对本文算法影响不大。



(a) 存在幅度误差



(b) 存在相位误差

图9 幅相误差对测高精度的影响

#### 4.7 地面反射系数误差影响测高精度实验

实验条件:地面反射系数误差变化范围为  $0\% \sim 20\%$ , 变化间隔为  $2\%$ , 其它仿真条件与 4.6 节相同。SNR 分别取 0 dB 和  $-10$  dB。

图10给出两种方法两种 SNR 条件下地面反射系数误差与目标高度 RMSE 关系图。仿真结果表明:①地面反射系数误差对文献[16]算法估计性能无较大影响,即文献[16]算法未考虑地面反射系数误差的影响,而本文算法中,当 SNR 较低时,地面反射系数误差对算法估计性能影响较大,影响程度随着 SNR 降低而变大,主要原因是本文算法利用了地面反射系数已知的先验条件;②总体上看,在同等地

面反射系数误差时,无论何种 SNR,本文方法测高精度均较文献[16]更高,性能更好。

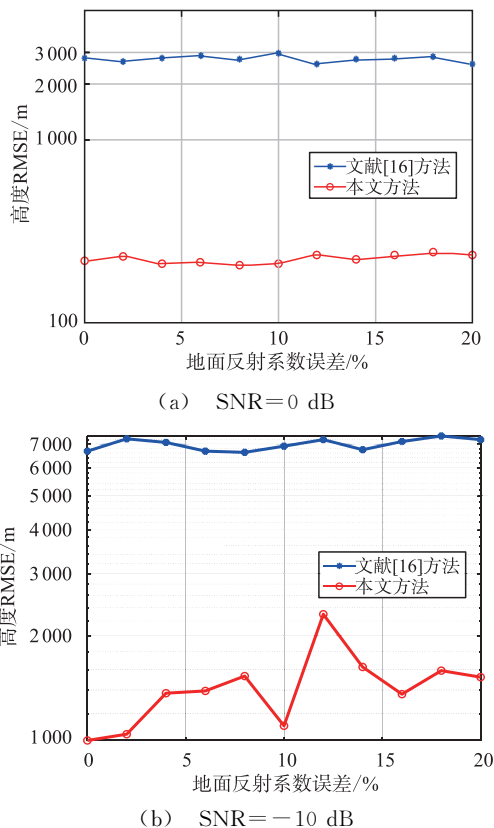


图 10 地面反射系数误差对测高精度的影响

## 5 结语

本文紧密结合米波常规阵列雷达的特点,总结和归纳了现有的基于广义 MUSIC 算法的 3 种测高方法,并利用雷达阵地反射面满足瑞利判据时水平极化波地面反射系数可已知的先验信息提出了一种采用直达波和反射波合成导向矢量的基于广义 MUSIC 算法的精确测高方法。经仿真验证,随着先验信息利用增多,本文所提方法比现有基于广义 MUSIC 算法的测高方法具有更佳的高度测量精度及角度分辨力,但使用时需根据阵地情况提前校对好地面反射系数,防止因地面反射系数出现偏差造成测高性能下降。

### 参考文献

[1] 王海同. 米波阵列雷达测高技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2017.  
 [2] KUSCHEL H. VHF/UHF Radar. Part 1: Characteristics[J]. Electronics & Communications Engineering Journal, 2002, 14(2):61-72.

[3] KUSCHEL H. VHF/UHF Radar Part 2: Operational aspects and Applications[J]. Electronics & Communications Engineering Journal, 2002, 14(3): 101-111.  
 [4] 赵永波, 霍炯, 朱玉堂, 等. 阵列米波雷达测高方法及性能分析[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(12): 3205-3211.  
 [5] LIU Y Q, WAN X R, TANG H, et al. Digital Television Based Passive Bistatic Radar System for Drone Detection[C]// Proceedings of 2017 IEEE Radar Conference, Seattle, WA:IEEE, 2017: 1493-1497.  
 [6] 董玫, 张守宏, 吴向东, 等. 一种改进的空间平滑算法[J]. 电子与信息学报, 2008(4):101-104.  
 [7] CHEN J, XU D, LIU B. Performance Analysis of Meter Band Radar Height-finding Approach for Low-angle Tracking[C]// International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications. Yonago:[s. n.], 2006: 657-660.  
 [8] 马献德, 路彬彬, 冯兵. 米波阵列测高的空间平滑算法性能优化[J]. 现代雷达, 2014, 36(10):49-53.  
 [9] 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: 13-43.  
 [10] KUNG S, LO C, FOKA R. A Toeplitz Approximation Approach to Coherent Source Direction Finding [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Tokyo, Japan:IEEE, 1986: 193-196.  
 [11] 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.  
 [12] 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.  
 [13] 项厚宏. 基于深度学习的米波雷达阵列超分辨 DOA 估计方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2021.  
 [14] 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.  
 [15] 刘俊, 刘峥, 刘韵佛. 米波雷达仰角和多径衰减系数联合估计算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(1): 33-37.  
 [16] 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.  
 [17] 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.

(编辑:徐敏)