

## 米波雷达低仰角目标多径模型及其反演方法研究

郑轶松\* 陈伯孝

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710017)

**摘要:** 现有的低仰角测高方法多采用镜面反射模型,将直达波与多径简化为两远场点源;然而实际中不规则反射面使多径回波波前畸变,远场点源模型难以完全描述多径信号。针对此模型失配问题,该文重点研究低仰角目标多径模型,首先分析经典多径模型,对反射系数和反射面高度进行参数反演;然后提出一种扰动多径模型,将反射面对多径回波的影响建模为扰动反射系数,并利用最大似然算法反演扰动反射系数。计算机仿真结果验证了参数反演方法的有效性;实测数据验证了复杂情形下所建模型的合理性和反演方法的有效性,提高了低仰角测高算法在实际阵地的适用性。

**关键词:** 米波雷达; 多径模型; 低仰角测高; 扰动反射系数

**中图分类号:** TN958

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2016)06-1468-07

**DOI:** 10.11999/JEIT151013

## Multipath Model and Inversion Method for Low-angle Target in Very High Frequency Radar

ZHENG Yisong CHEN Baixiao

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

**Abstract:** The existing methods of altitude measurement for low-angle targets adopt the specular reflection surface model, and the direct and multipath signals are considered as two correlated far-field point sources. However, in reality, the wavefront of multipath signal is distorted by irregular reflection surface, and the far-field point source model is not enough to describe the multipath signal. To deal with this model mismatch problem, the low-angle multipath model is mainly studied. This paper begins with a discussion of classical multipath model and is followed by the inversion method of reflection coefficient and the height of reflection surface. Then the perturbation of the multipath signal caused by irregular reflection surface is modeled as perturbational reflection coefficient and a perturbational multipath model is developed with a maximum likelihood method to invert the proposed parameter. Simulation data processing results validate the effectiveness of the inversion method. The effectiveness of the proposed model and inversion method are validated by measured data processing results. These research results can provide valuable information for enhancing the applicability of the low-angle altitude measurement method in practical situations.

**Key words:** High frequency radar; Multipath model; Altitude measurement of low-angle target; Perturbational reflection coefficient

### 1 引言

低仰角测高问题一直是米波雷达技术亟待解决的重要问题之一。由于米波雷达波长长,主瓣宽,往往很难从空域、时域或频域分辨直达信号和多径信号。低仰角测高实质是在低信噪比情况下,分辨和测量两个夹角很小的相干源来波方向的问题。针对该问题人们已经进行了大量的理论与实验研

究<sup>[1-7]</sup>。近年来随着压缩感知、稀疏贝叶斯等技术的兴起,稀疏恢复类算法也被用来提高低信噪比下的角度估计性能<sup>[8-10]</sup>。但现有算法多采用镜面反射模型,将直达波与反射波简化为两点源模型,研究多集中于如何解相干和提高测角精度。然而实际中的复杂阵地(如崎岖的山地、高海情的海面)并不满足镜面反射模型,复杂反射面会造成多径信号的波前畸变,导致各阵元反射点不再处于同一反射面,或各阵元接收多径信号的反射系数不再相同,即多径信号导向矢量不再满足远场点源模型。由于多径信号导向矢量无法精确已知,即使直达波信号满足远场点源模型,也会被淹没在相干性很强的多径信

收稿日期: 2015-09-09; 改回日期: 2016-01-22; 网络出版: 2016-03-29

\*通信作者: 郑轶松 zhengys90@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61571344)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61571344)

号中而难以分辨和测量。这也是低仰角测高问题一直难以解决的原因之一，即多径信号的模型失配问题。众多学者针对此问题对低仰角测高算法进行了一系列改进。文献[2,7]利用雷达高度、目标斜距、地球曲率等先验信息，提出基于精确反射多径信号模型的最大似然算法，但没有考虑反射面高度对算法性能的影响，只能适用于非常平坦的阵地。文献[11]阐述了反射面高度对算法的影响，提出基于地形匹配的合成导向矢量算法，但是该文没有提出反演反射面高度的方法，也没有考虑复杂反射面对多径信号的影响。文献[12]考虑漫反射对测高算法的影响，将漫反射占主导地位时的多径信号建模为分布源，但是其分布模型难以确定，一般假设分布源服从高斯分布，因此其适用性不高。因此本文从多径模型及反演方法入手，针对经典多径模型中反射面高度、反射系数提出基于最大似然算法的参数反演方法；并利用扰动反射系数建模复杂反射面对多径信号的扰动，提出扰动多径模型；最后通过仿真数据分析和实测数据验证所提模型和反演方法的有效性。

## 2 经典多径模型及其反演

经典多径模型示意图如图1所示，假设接收阵列为线性均匀线阵，包含 $M$ 个阵元，快拍数为 $T$ 。阵列接收信号 $\mathbf{y}(t)$ 为

$$\mathbf{y}(t) = (\mathbf{a}(\theta_d) + \rho \mathbf{a}(\theta_i))s(t) + \mathbf{n}(t), \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (1)$$

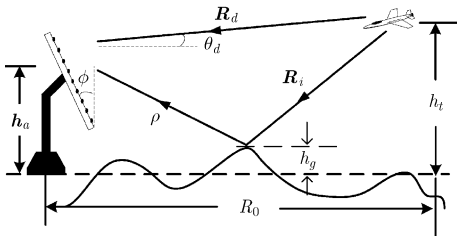


图1 经典多径模型示意图

其中， $\mathbf{a}(\theta_d) = \exp(-j\kappa \mathbf{R}_d)$ 为直达波导向矢量， $\mathbf{a}(\theta_i) = \exp(-j\kappa \mathbf{R}_i)$ 为反射波(多径)导向矢量， $\theta_d$ 为直达波仰角，也即目标仰角， $\theta_i$ 为反射波仰角， $\mathbf{R}_d, \mathbf{R}_i$ 分别为直达波和反射波程， $\kappa = 2\pi/\lambda$ 为波数， $\lambda$ 为波长，阵元间隔 $d = \lambda/2$ ， $\rho$ 为反射系数，阵列向上倾斜角度为 $\phi$ ， $s(t)$ 为信号复包络， $\mathbf{n}(t)$ 为高斯白噪声。

多径模型一般可分为不考虑地球曲率的平面反射模型和考虑地球曲率的曲面反射模型。这两种模型之间具有转化关系<sup>[11]</sup>，因此为了计算简便，本文采用平面反射模型。对于远场目标，可将直达波导向矢量表示为

$$\mathbf{a}(\theta_d) = [1, a(\theta_d), \dots, a^{M-1}(\theta_d)]^T \quad (2)$$

其中， $a(\theta_d) = \exp(-j\kappa d \sin(\theta_d - \phi))$ ，而反射波导向矢量为 $\mathbf{a}(\theta_i) = \exp(-j\kappa(\mathbf{R}_d + \Delta \mathbf{R}))$ ，其中， $\mathbf{R}_d + \Delta \mathbf{R} = \mathbf{R}_i$ ，则反射波导向矢量为

$$\mathbf{a}(\theta_i) = \mathbf{a}(\theta_d) \odot \exp(-j\kappa \Delta \mathbf{R}) \quad (3)$$

其中， $\odot$ 表示Kronecker积， $\Delta \mathbf{R}$ 为直达波和反射波波程差，与反射面高度有关，下面推导 $\Delta \mathbf{R}$ 的表达式。

如图1所示，随着目标的运动，不同点迹对应不同的反射点，而实际阵地并不平坦，因此不同点迹其反射面高度也不相同，设反射面关于参考平面的高度为 $h_g$ ，文中以雷达架设阵地所在平面为参考平面，如图1中虚线所示，则直达波和反射波波程分别为

$$\mathbf{R}_d = \sqrt{R_0^2 + (h_t - h_a)^2} \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_i = \sqrt{R_0^2 + (h_t + h_a - 2h_g)^2} \quad (5)$$

其中， $R_0$ 为目标与雷达的水平距离， $h_t$ 为目标高度， $h_a$ 为各阵元关于参考平面的高度， $\mathbf{h}_a = h_{a0} + [0, d \cos(\phi), 2d \cos(\phi), \dots, (M-1)d \cos(\phi)]^T$ ，其中， $h_{a0}$ 为最下边阵元的高度。由文献[13]可知，当 $R_0 \gg h_t, h_a$ 时，式(4)和式(5)可近似表示为

$$\mathbf{R}_d \approx R_0 + (h_t - h_a)^2 / (2R_0) \quad (6)$$

$$\mathbf{R}_i \approx R_0 + (h_t + h_a - 2h_g)^2 / (2R_0) \quad (7)$$

此时波程差可表示为

$$\Delta \mathbf{R} = \mathbf{R}_i - \mathbf{R}_d \approx 2(h_t - h_g)(h_a - h_g) / R_0 \quad (8)$$

由式(8)可知，若 $h_t, h_a$ 和 $R_0$ 都精确已知，则地面反射面高度 $h_g$ 决定波程差 $\Delta \mathbf{R}$ 。

将阵列接收信号重新表示为式(9)的形式：

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(t) &= (\exp(-j\kappa \mathbf{R}_d) + \rho \exp(-j\kappa \mathbf{R}_i))s(t) + \mathbf{n}(t) \\ &= \mathbf{a}(\theta_d) \odot (1 + \rho \exp(-j\kappa \Delta \mathbf{R}))s(t) + \mathbf{n}(t), \\ & \quad t = 1, 2, \dots, T \end{aligned} \quad (9)$$

阵列接收信号协方差矩阵的最大似然估计为

$$\mathbf{R}_y = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \mathbf{y}(t) \mathbf{y}^H(t) \quad (10)$$

对于合成导向矢量最大似然算法<sup>[2]</sup>，首先构造合成导向矢量矩阵及其投影矩阵：

$$\mathbf{A}_{\text{sum}}(\theta) = \mathbf{a}(\theta) \odot (1 + \rho \exp(-j\kappa \Delta \mathbf{R})) \quad (11)$$

$$\mathbf{P}_{\text{sum}}(\theta) = \mathbf{A}_{\text{sum}}(\theta) [\mathbf{A}_{\text{sum}}^H(\theta) \mathbf{A}_{\text{sum}}(\theta)]^{-1} \mathbf{A}_{\text{sum}}^H(\theta) \quad (12)$$

其中 $\theta$ 为空域搜索角度，进而得到直达波仰角的最大似然估计：

$$\theta_d = \arg \left( \max_{\theta} \text{tr}(\mathbf{P}_{\text{sum}}(\theta) \mathbf{R}_y) \right) \quad (13)$$

其中， $\mathbf{P}_{\text{ML}} = \text{tr}(\mathbf{P}_{\text{sum}}(\theta) \mathbf{R}_y)$ 为似然函数， $\text{tr}(\cdot)$ 表示求迹运算。

通过 DOA 估计得到目标仰角和斜距后, 对于距离较近的目标, 目标高度可由式(14)计算得到:

$$h_t = \mathbf{R}_d \sin(\theta_d) + h_g \quad (14)$$

对于距离较远的目标, 必须考虑地球曲率和空气折射的影响, 修正后得到式(15):

$$h_t = \mathbf{R}_d \sin(\theta_d) + \mathbf{R}_d^2 / (2R_e) + h_g \quad (15)$$

其中,  $R_e$  为地球等效半径, 考虑空气折射, 一般取  $R_e = 4r_e / 3$ ,  $r_e = 6430$  km 为地球平均半径。

合成导向矢量最大似然算法实质是一种模型匹配算法, 对似然函数影响较大的参数包括直达波仰角  $\theta_d$ , 反射系数  $\rho$  和反射面高度  $h_g$ 。现有算法多假设所有点迹的反射系数  $\rho$  和反射面高度  $h_g$  不变, 而在实际阵地, 由于不同点迹对应不同的反射区, 地面反射系数  $\rho$  和反射面海拔高度  $h_g$  时变而未知。因此需要根据二次雷达数据, 在已知目标仰角时, 反演反射系数  $\rho$  和反射面高度  $h_g$ 。当直达波仰角  $\theta_d$  确定时, 只需构造似然函数, 对反射系数  $\rho$  和反射面高度  $h_g$  进行 2 维联合估计即可。反射系数  $\rho$  的搜索范围一般可取  $[-1.2, 0]$ , 而反射面高度  $h_g$  的搜索范围需由以下准则确定:

由式(11)~式(13)可知, 当目标仰角  $\theta_d$  和反射系数  $\rho$  确定时, 波程差  $\Delta \mathbf{R}$  决定了似然函数的大小, 而合成导向矢量矩阵  $\mathbf{A}_{\text{sum}}(\theta)$  中的  $\exp(-j\kappa \Delta \mathbf{R})$  为关于波程差  $\Delta \mathbf{R}$  的周期函数, 周期为  $\lambda$ 。由于似然函数  $\mathbf{P}_{\text{ML}}$  由合成导向矢量矩阵  $\mathbf{A}_{\text{sum}}(\theta)$  确定, 因此似然函数  $\mathbf{P}_{\text{ML}}$  也是关于波程差  $\Delta \mathbf{R}$  的周期函数, 周期为  $\lambda$ 。下面通过此性质推导似然函数关于反射面高度的周期性, 进而确定反射面高度的搜索范围: 令

$$\Delta \mathbf{R} \approx \frac{2(h_t - h_g)(h_a - h_g)}{R_0} = k\lambda, k=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (16)$$

由于  $h_t \gg h_g$ , 则  $(h_t - h_g)/R_0 \approx \tan(\theta_d) \approx \sin(\theta_d)$ , 代入式(16)可得:

$$\Delta \mathbf{R} \approx 2 \sin(\theta_d)(h_a - h_g) = k\lambda, k=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (17)$$

$$h_g = h_a + \frac{k\lambda}{2 \sin(\theta_d)}, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (18)$$

由式(16)~式(18)可知似然函数  $\mathbf{P}_{\text{ML}}$  是关于  $h_g$  的周期函数, 周期为  $\lambda/[2 \sin(\theta_d)]$ , 忽略常数  $h_a$ , 可取反射面高度搜索范围为

$$h_g \in \left[ \frac{-\lambda}{2 \sin(\theta_d)}, 0 \right] \quad (19)$$

进而得到反射系数和反射面高度的最大似然估计:

$$\rho, h_g = \arg \left( \max_{\rho, h_g} \text{tr}(\mathbf{P}_{\text{sum}}(\theta_d) \mathbf{R}_y) \right), \quad (20)$$

$$\rho \in [-1.2, 0], h_g \in \left[ \frac{-\lambda}{2 \sin(\theta_d)}, 0 \right]$$

### 3 扰动多径模型及其反演

当雷达阵地周围地形复杂时, 由于地面有效反射区(第 1 菲涅尔区)内反射面高低不一、反射介质各不相同, 各阵元接收的多径信号的幅度不再一致, 相位也不满足线性变化, 此时, 反射系数、目标仰角和反射面高度等参数都不足以完全描述多径回波。另外对于同一点迹, 若反射介质均匀而各阵元地面反射区高度不同, 其反射系数可以认为近似相同, 但是反射区高度不一会造成多径信号的相位扰动, 此时传统远场点源模型也难以匹配真实多径模型。这也是传统测高算法虽然具有较好角度分辨率且能解相干信号, 却难以在实测数据处理中取得较高测角测高精度的原因。因此本文针对此多径信号导向矢量的模型失配问题, 提出扰动多径模型, 如图 2 所示, 不同阵元接收的多径信号受复杂反射面扰动影响, 反射系数各不相同, 定义第  $m$  个阵元接收信号的扰动反射系数为  $\tau_m$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$ ,  $\tau_m$  为复数, 其幅度的均值为经典多径模型中的反射系数  $\rho$ 。扰动多径模型下阵列接收信号为

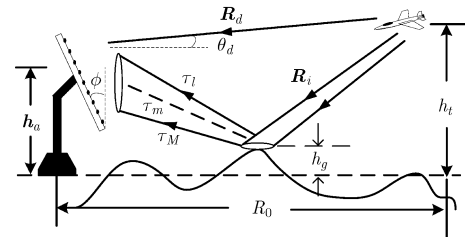


图2 扰动多径模型示意图

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{a}(\theta_d) \odot (1 + \boldsymbol{\tau} \odot \exp(-j\kappa \Delta \mathbf{R})) \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t), t = 1, 2, \dots, T \quad (21)$$

与式(9)不同的是, 式(21)中以扰动反射系数向量  $\boldsymbol{\tau}$  代替反射系数  $\rho$ , 其中  $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_M]^T$ 。扰动多径模型与经典多径模型的区别在于不同阵元对应不同的扰动反射系数。扰动反射系数反映了复杂反射面对不同阵元接收的多径信号的影响, 该影响既包含了不同反射面介质对多径信号的影响, 也反映了高低不一反射面对多径信号的影响, 是经典多径模型中反射系数在复杂反射面下的推广。

通过式(20)得到反射系数和反射面高度的最大似然估计后, 为了得到更精确的扰动多径模型, 需要进一步对扰动反射系数  $\boldsymbol{\tau}$  进行估计。由式(21)可知, 式中未知参数只有信号  $\mathbf{s}(t)$ , 噪声  $\mathbf{n}(t)$  和扰动反射系数  $\boldsymbol{\tau}$ 。若已知信号  $\mathbf{s}(t)$ , 可通过最大似然估计得到扰动反射系数  $\boldsymbol{\tau}$ 。由文献[14]可知, 信号  $\mathbf{s}(t)$  的最大似然估计为

$$\hat{s}(t) = \mathbf{A}_{\text{sum}}^+(\theta_d) \mathbf{y}(t) \quad (22)$$

上标<sup>+</sup>表示 Moore-Penrose 伪逆。进而由式(21)可得扰动反射系数  $\tau$  的最大似然估计:

$$\hat{\tau} = \frac{\mathbf{y}(t) - \mathbf{a}(\theta_d) \hat{s}(t)}{(\mathbf{a}(\theta_d) \hat{s}(t)) \odot \exp(-j\kappa \Delta \mathbf{R})} \quad (23)$$

单快拍即可得到一组扰动反射系数  $\hat{\tau}$ , 更一般地, 由于同一点迹的多快拍对应相同的扰动反射系数, 可利用多快拍对扰动反射系数进行平均估计。至此, 扰动多径模型的参数估计完毕。

下面给出扰动多径模型参数反演的具体步骤:

(1) 利用二次雷达关联一次雷达数据, 作为当前点迹目标仰角  $\theta_d$  的真值, 进而得到目标与雷达的水平距离  $R_0$  和目标高度  $h_t$ , 联合各阵元关于参考平面的高度  $h_a$  等先验信息通过式(19)计算反射面高度搜索范围; 同时确定反射系数搜索范围, 如  $[-1.2, 0]$ ;

(2) 对反射面高度  $h_g$  和反射系数  $\rho$  进行 2 维联合估计, 针对每个特定的反射面高度和反射系数, 根据式(8)计算波程差;

(3) 根据式(10)、式(11)和式(12)分别计算接收信号的协方差矩阵, 合成导向矢量矩阵及其投影矩阵;

(4) 由式(20)得到反射面高度  $h_g$  和反射系数  $\rho$  的参数反演结果。并利用反演得到的反射面高度通过式(8)得到最终的波程差;

(5) 由式(22)得到信号的最大似然估计  $\hat{s}(t)$ ;

(6) 由式(23)得到扰动反射系数的最终反演结果  $\hat{\tau}$ 。

由以上步骤可知, 经典多径模型反演是扰动多径模型反演的前提, 只有通过经典多径模型反演得到正确的反射面高度和反射系数后, 才能进一步得到扰动反射系数的估计。在已知扰动反射系数  $\tau$  和反射面高度  $h_g$  后, 可构造复合导向矢量矩阵  $\mathbf{A}_{\text{sum}}(\theta) = \mathbf{a}(\theta) \odot (1 + \tau \odot \exp(-j\kappa \Delta \mathbf{R}))$ , 结合最大似然、MUSIC 等算法构造空间谱进行 DOA 估计。此时信号模型与真实模型匹配, 因此能得到更高的测角测高精度。

## 4 仿真数据分析

**仿真 1 验证本文参数反演方法的正确性** 需要说明的是, 由于经典多径模型的参数反演方法包含在扰动多径模型反演的步骤中, 因此在仿真 1 中只针对扰动多径模型进行参数反演, 若扰动多径模型反演正确, 也就说明了经典多径模型反演方法的正确性。仿真参数如下: 假设高斯白噪声背景下, 20 阵元的均匀线阵, 波长 1 m, 阵元间隔半波长, 阵列斜向上倾斜  $5^\circ$ , 信噪比 15 dB, 快拍数为 30, 阵列最下边阵元高度为 3 m, 反射面高度为  $-1.0$  m, 直达波入射角度为  $1.5^\circ$ , 扰动反射系数幅度服从  $(0.6, 1.0)$  的均匀分布, 相位服从  $(-210^\circ, -150^\circ)$  的均匀分布。由式(19)计算得反射面高度搜索范围为  $[-19.1, 0]$  m, 取反射系数搜索范围为  $[-1.0, 0]$ , 仿真计算得到反射系数为  $-0.8$ , 反射面高度为  $-1.0$  m, 与仿真所设参数相符, 说明该方法能精确反射系数和反射面高度。为了观察似然函数关于反射面高度的周期性, 取反射面高度搜索范围为  $[-60, 0]$  m, 绘制似然函数关于反射系数和反射面高度的联合 2 维估计图。如图 3(a)所示, 在  $[-60, 0]$  m 的范围中似然函数均匀分布 4 个谱峰, 可见似然函数是关于反射面高度的周期函数。取反射系数为  $-0.8$ , 绘制似然函数关于反射面高度的剖面图, 如图 3(b)所示, 图中虚线为各谱峰所在位置, 可见似然函数谱峰分别位于  $-58.3$  m,  $-39.2$  m,  $-20.1$  m 和  $-1.0$  m 处, 周期为 19.1 m, 与理论分析相符。在反演得到反射面高度和反射系数估计结果后, 代入扰动多径模型中反演扰动反射系数, 估计结果如图 4 所示, 可见扰动反射系数估计值与真实值非常接近, 说明本文算法可有效反演扰动反射系数。综合仿真 1 的结果可知本文反演方法可有效反演扰动多径模型。

**仿真 2 考察扰动大小及信噪比与扰动反射系数估计均方根误差的关系** 信噪比由  $-10 \sim 20$  dB 变化, 考察 5 组扰动反射系数, 其扰动大小满足表 1 中参数分布, 表 1 中参数均为均匀分布, 扰动大

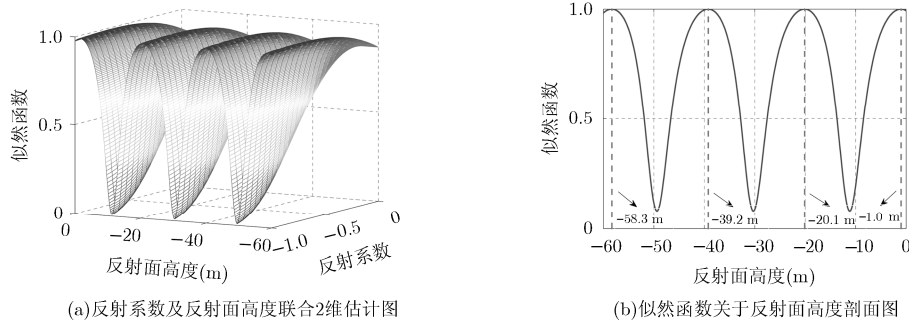


图3 似然函数周期性仿真图

表 1 扰动反射系数分布

序号	9(无扰动)	2	3	4	5
归一化幅度	(1,0)	(0.9,1.0)	(0.7,1.0)	(0.6,1.0)	(0.4,1.0)
相位(°)	-180°	(-190,-170)	(-200,-160)	(-200,-150)	(-220,-140)

小由序号 1 至序号 5 扰动依次增大, 蒙特卡罗次数  $Y=200$  次, 其余仿真参数与仿真 1 一致。定义扰动反射系数的均方根误差 RMSE(Root Mean Square Error)为

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{MY} \sum_{i=1}^Y \|\hat{\tau}^i - \tau^i\|_2^2}$$

蒙特卡罗次数,  $\|\cdot\|_2$  表示  $l_2$  范数。RMSE 统计结果如图 5 所示, 可见低信噪比时各组测试数据都无法有效估计扰动反射系数, 即便对于无扰动的数据组, 由于噪声对信号影响较大, 导致扰动反射系数估计结果精度很差, 因此本算法在低信噪比(小于 0 dB)时无法适用; 信噪比较高(大于 4 dB)时, 各数据组 RMSE 均小于 0.2, 估计结果较好, 且序号较小的数据组的 RMSE 都小于序号较大的数据组, 即反射系数扰动越小可得到越好的估计结果。

## 5 实测数据验证

为了验证本文所建模型及反演方法在实测数据中的有效性, 对某米波雷达实测数据进行处理。某航班航迹图如图 6 所示。该航班自北向南平稳飞行, 高度约 11 km, 目标距离由 170~300 km 变化, 仰角在  $1^\circ$  至  $3^\circ$  之间, 雷达 3 dB 波束宽度约为  $4.5^\circ$ , 因此该航班位于低仰角区。根据一次雷达和二次雷达关联结果, 将二次雷达的仰角信息作为真值反演多径模型, 反射面高度和反射系数幅度反演结果如图 7 所示。可见该阵地较为平坦, 反射面高度变化不大, 反射系数在  $-1.2 \sim -0.8$  之间。进而对扰动反射系数进行参数反演, 分别取点迹号 30~40 和 80~90 的点迹作扰动反射系数估计, 结果如图 8, 图 9 所示, 图中各曲线表现了不同点迹的扰动反射系数估计结果。可见相邻点迹的扰动反射系数相关程度

较高, 图中表现为相邻点迹曲线间聚合程度较高。对于间隔较远的点迹(对比图 8 和图 9), 随着目标运动, 地面反射区域不再相同, 扰动反射系数也随之变化, 图中反映为不同点迹间扰动反射系数曲线的渐变特征。值得注意的是, 图 7~图 9 中出现了反射波强度大于直达波的现象, 分析原因如下: 如果反射面为完全光滑的水平面, 一般假设反射波经由地面反射点产生, 此时反射波能量与直达波能量大小一致, 不会大于直达波能量。而实际中地面反射并非只来自地面等效反射点一点, 而是来自地面菲涅尔反射区。若地面菲涅尔反射区高低不一、或具有一定弧度, 可能会对反射波造成聚焦效应, 类似于凹面镜对光源的聚焦, 这种情形下反射波经地面多点、多条路径反射至雷达(这也是本文所分析地面扰动的来源之一), 因此造成某些点迹反射波强度大于直达波的现象。且该现象应该具有连续性, 与反射面的地形有关。

对该航班进行仰角估计, 不同算法的 DOA 估计结果如图 10 所示, 其中“SSMUSIC”表示前后向空间平滑 MUSIC 算法<sup>[15]</sup>, “DBF”表示数字波束形成, 真值为二次雷达应答的仰角信息, “SVML 反演前”表示没有进行参数反演的合成导向矢量最大似然算法, 其反射面高度和反射系数取固定值, 分别取 0 m 和  $-1.0$  m, “SVML 反演后”表示通过前文所述的参数反演方法, 获得反射面高度和扰动反射系数等先验信息的合成导向矢量最大似然算法。由图 10 可见由于角度分辨率不够和多径信号的模型失配等问题, 传统算法(DBF 和 SSMUSIC)无法在低仰角区得到正确结果。而 SVML 类算法测角效果较好, 由于 SVML 类算法结果与真值接近, 特绘

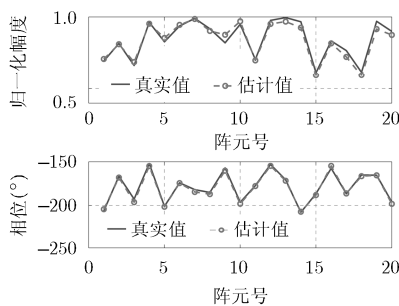


图 4 扰动反射系数估计结果

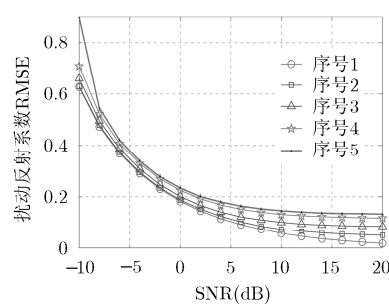


图 5 扰动反射系数均方根误差随信噪比变化图

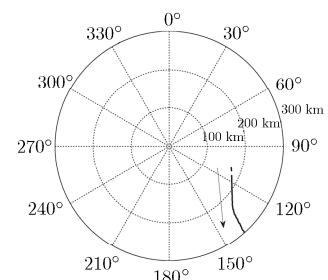


图 6 某航班航迹图

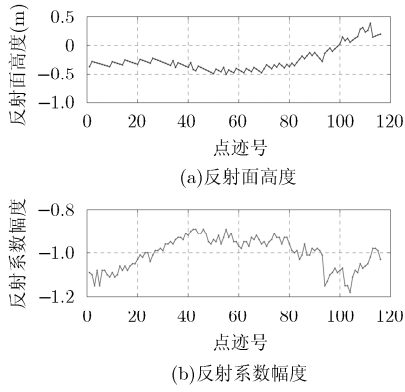


图 7 反射面高度及反射系数反演结果

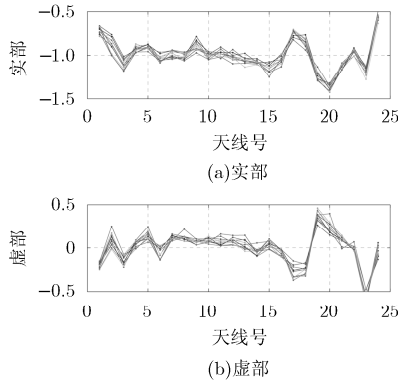


图 8 第 30~40 点迹的扰动反射系数估计结果

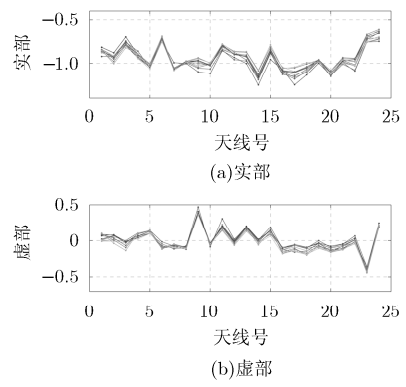


图 9 第 80~90 点迹的扰动反射系数估计结果

制其与真值的仰角估计误差图以方便对照。如图 11 所示。由图可见参数反演后 SVMML 算法的仰角估计精度较参数反演之前有明显提升，参数反演前 SVMML 算法的仰角均方根误差为  $0.15^\circ$ ，而参数反演后 SVMML 算法的多径模型与真实多径信号匹配，其仰角估计均方根误差仅为  $0.03^\circ$ ，满足实际需求。

为进一步验证本文多径模型与参数反演方法的有效性，对两组同航线航班数据进行处理。航迹图如图 12 所示，由图可知航班 1 与航班 2 在航迹图中高度重合。对航线所在区域进行放大，绘制各航班方位角与距离，如图 13 所示，不同航班距离相同的点迹方位角相差最大不超过  $1.5^\circ$ ，因此可认为航班 1 与航班 2 为同一航线，即相同仰角区域对应相类似

的地形。对航班 1 与航班 2 进行参数反演，主要参数如图 14 所示，可见在相同的仰角区域其模型参数变化趋势一致，这也是后续利用反演参数提高算法性能的前提。将航班 1 反演的参数代入航班 2 中进行仰角估计，结果如图 15 所示，各算法标识如前文所述。由图 15 可知参数反演的优势在于低仰角，此时由于孔径限制，大部分算法由于无法分辨直达波和反射波而算法失效，而 SVMML 类算法也需要更准确的模型参数才能对目标仰角进行跟踪与估计，反应了参数反演的必要性。

### 6 结束语

本文研究了低仰角目标多径模型及其反演方法，实现了经典多径模型下的反射系数和反射面高

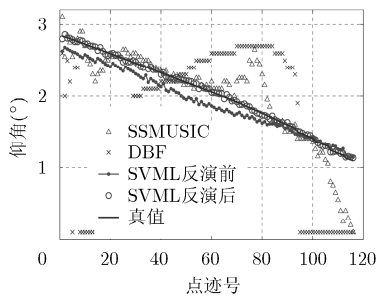


图 10 不同算法仰角估计结果对比图

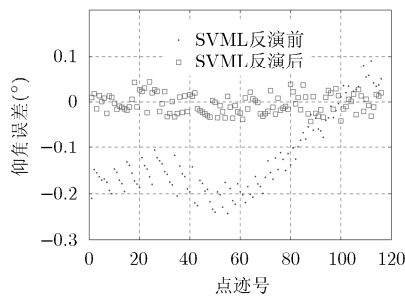


图 11 仰角估计误差结果对比图

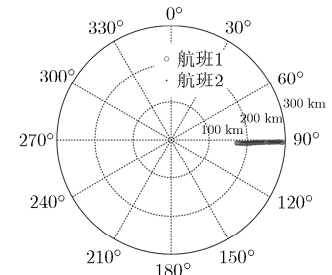


图 12 各航班航迹图

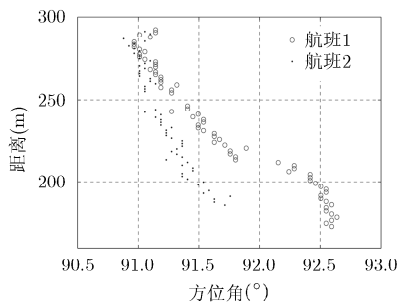


图 13 各航班方位角与距离

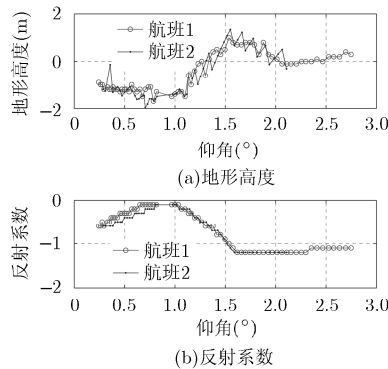


图 14 参数反演结果

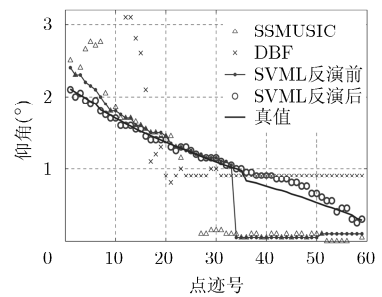


图 15 航班 2 仰角估计结果

度的参数反演；同时为解决实际阵地上多径信号的模型失配问题，提出干扰多径模型，将复杂反射面对多径信号的影响建模为干扰反射系数，合理解释了复杂阵地上传统算法失效的原因；最后反演扰动反射系数，得到其最大似然估计。仿真数据分析表明本文方法在较高信噪比时能获得良好的参数反演效果；实测数据验证了扰动多径模型的合理性，并通过参数反演方法反演扰动反射系数，反映出复杂情形下阵地上反射特性的扰动和渐变特征。本文研究成果表明，若需进一步提高测高算法在实际阵地上精度，必须考虑复杂反射面对多径的扰动影响。

### 参考文献

- [1] BARTON D K. Low-angle radar tracking[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1974, 62(6): 587-704. doi: 10.1109/PROC.1974.9509.
  - [2] LO T and LITVA J. Use of a highly deterministic multipath signal model in low-angle tracking[J]. *IEEE Proceedings F, Radar and Signal Processing*, 1991, 138(2): 163-171. doi: 10.1049/ip-f-2.1991.0022.
  - [3] 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. doi: 10.3321/j.issn:0372-2112.2007.06.003.  
CHEN Baixiao, HU Tiejun, ZHENG Ziliang, et al. Method of altitude measurement based on beam split in VHF radar and its application[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(6): 1021-1025. doi: 10.3321/j.issn:0372-2112.2007.06.003.
  - [4] 洪升, 万显荣, 柯亨玉. 空间色噪声背景下双基地多输入多输出雷达低仰角估计方法[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(1): 15-21. doi: 10.11999/JEIT140290.  
HONG Sheng, WAN Xianrong, and KE Hengyu. Low-elevation estimation for bistatic MIMO radar in spatially colored noise[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(1): 15-21. doi: 10.11999/JEIT140290.
  - [5] 徐振海, 黄坦, 熊子源, 等. 基于频率分集的阵列雷达低角跟踪算法[J]. *国防科技大学学报*, 2014(2): 93-98. doi: 10.11887/j.cn.201402016.  
XU Zhenhai, HUANG Tan, XIONG Ziyuan, et al. Low angle tracking algorithm using frequency diversity for array radar[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2014(2): 93-98. doi: 10.11887/j.cn.201402016.
  - [6] PARK D, YANG E, AHN S, et al. Adaptive beamforming for low-angle target tracking under multipath interference[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 2014, 50(4): 2564-2577. doi: 10.1109/TAES.2014.130185.
  - [7] 胡晓琴, 陈建文, 王永良. 米波雷达测高多径模型研究[J]. *电波科学学报*, 2008, 23(4): 651-657. doi: 10.3969/j.issn.1005-0388.2008.04.011.
  - [8] HU Xiaoqin, CHEN Jianwen, and WANG Yongliang. Research on meter-wave radar height-finding multipath model[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(4): 651-657. doi: 10.3969/j.issn.1005-0388.2008.04.011.
  - [9] ZHU Wei and CHEN Baixiao. Novel methods of DOA estimation based on compressed sensing[J]. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2013, 26(1): 113-123. doi: 10.1007/s11045-013-0239-2.
  - [10] 王园园, 刘峥, 曹运合. 基于压缩感知的米波雷达低空测角算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2014(4): 667-671. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2014.04.10.  
WANG Yuanyuan, LIU Zheng, and CAO Yunhe. Low-angle estimation method based on compressed-sensing for meter-wave radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014(4): 667-671. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2014.04.10.
  - [11] YANG Zai, XIE Lihua, and ZHANG Cishen. A discretization-free sparse and parametric approach for linear array signal processing[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(19): 4959-4973. doi: 10.1109/TSP.2014.2339792.
  - [12] ZHU Wei and CHEN Baixiao. Altitude measurement based on terrain matching in VHF array radar[J]. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2013, 32(2): 647-662. doi: 10.1007/s00034-012-9472-4.
  - [13] HAN Yinghua, WANG Jinkuan, ZHAO Qiang, et al. A blind central DOA estimation algorithm in radar low-angle tracking environment[C]. 2009 IET International Radar Conference, Guilin, 2009: 20-22.
  - [14] BOMAN K and STOICA P. Low angle estimation: models, methods, and bounds[J]. *Digital Signal Processing*, 2001, 11(1): 35-79. doi: 10.1006/dspr.2000.0373.
  - [15] STOICA P and NEHORAI A. MUSIC, maximum likelihood, and Cramer-Rao bound[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1989, 37(5): 720-741. doi: 10.1109/29.17564.
  - [16] SHAN Tiejun, WAX M, and KAILATH T. On spatial smoothing for direction-of-arrival estimation of coherent signals[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1985, 33(4): 806-811. doi: 10.1109/TASSP.1985.1164649.
- 郑轶松: 男, 1990年生, 博士生, 研究方向为阵列信号处理、米波雷达低仰角测高方法。
- 陈伯孝: 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 研究方向包括新体制雷达系统及其实现、雷达信号处理、目标精确制导与跟踪等。