

文章编号: 2095-4980(2016)02-0201-05

基于多径分布源模型的米波雷达测高算法

朱 伟¹, 陈伯孝²

(1.中国电子科技集团 第 38 研究所, 安徽 合肥 230088;

2.西安电子科技大学 雷达信号处理国防重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘 要: 针对复杂环境下的米波雷达低仰角测高问题, 建立多径信号服从高斯分布源的阵列信号模型, 提出一种广义约束多重信号分类(MUSIC)算法。该算法将多径信号作为约束, 通过限制信号子空间包含多径导向矢量, 来提高直达波的估计精确度。算法性能不受信号相干和地面反射系数的影响。与传统的测高算法相比, 该方法在复杂反射地形下能有效进行目标高度估计。计算机仿真结果验证了该算法的可行性。

关键词: 米波雷达; 测高; 分布源; 广义约束多重信号分类

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201602.0201

Altitude measurement based on multi-path distributed source in VHF radar

ZHU Wei¹, CHEN Boxiao²

(1.No.38 Research Institute, CETC, Hefei Anhui 230088, China;

2.Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

Abstract: A new signal model is built aiming to the problem of low-angle altitude measurement in complex environment, in which the multi-path submits to Gaussian distributed source. A generalized constrained Multiple Signal Classification(MUSIC) algorithm is proposed, which takes the multi-path as constraint and improves direct signal precision by deflating the multi-path steering vector in signal subspace. The performance of the proposed algorithm would not be affected by coherent source and reflection coefficient. The proposed method achieves higher resolution under complex reflection surface in comparison with traditional high resolution methods. Simulation results and the real data processing demonstrate the validity and feasibility of the proposed approach.

Key words: VHF radar; altitude measurement; distributed source; generalized constrained MUSIC

米波雷达的波长较长, 具有良好的反隐身和对抗反辐射导弹的能力, 作用距离远。但是米波雷达的波束较宽, 角分辨率较差, 在测量低仰角目标时, 波束打地、地面反射强、目标的多径现象严重, 导致米波雷达测高精确度低, 甚至完全失效。很明显, 影响测高精确度的主要因素是多径信号的存在。由于直达波和多径信号都在天线波束的主瓣之内, 强相关的直达波和地面反射波同时被接收, 因此低仰角目标的高度测量是米波雷达面临的一个难题。目前就米波雷达测高问题已进行了大量的研究, 主要包括多重信号分类(MUSIC)算法和最大似然算法。MUSIC 算法应用于低仰角测高时必须面对直达波和多径信号的相干问题。当信号源完全相干时, 阵列接收的数据协方差矩阵的秩降为 1, 即信号子空间与噪声子空间相互渗透, 导致某些相干源的导向矢量与噪声子空间不完全正交, 使得很多特征子空间类算法性能下降, 甚至完全失效。

常规解相干 MUSIC 算法一般有 2 种途径, 一类是降维处理, 另一类是非降维处理。降维处理方法中典型的有空间平滑算法^[1-2], 该类方法的解相干性能通过降低自由度换取。空间平滑的基本思想是将等距均匀线阵分成若干个相互重叠的子阵, 通过各子阵的协方差矩阵进行平均来实现解相干, 最后结合 MUSIC 算法来进行波达方向(Direction Of Arrival, DOA)估计。非降维处理算法^[3-4]包括 Toeplitz 方法和虚拟阵列变换法等, 其最大优点是阵列孔径没有损失。Toeplitz 方法是通过 Toeplitz 预处理使得接收数据协方差矩阵接近真实的数据协方差矩阵, 但 Toeplitz 方法估计偏差较大; 虚拟阵列变换法主要用于非等距阵列。

收稿日期: 2015-01-12; 修回日期: 2015-02-27

最大似然估计方法是白噪声情况下的贝叶斯最优估计。在最大似然算法中,观测所得信号的似然函数被定义为含有未知参数的条件概率密度函数,目的是选定未知的参数使得该似然函数尽可能大。文献[5]将交替投影最大似然算法应用到米波雷达测高中,同时对直达波和反射波进行精确的波达方向估计;文献[6]提出阵列内插的波束域最大似然米波雷达测高方法,先对大间距的均匀线阵进行等间隔内插,然后通过无模糊的波束域变换将阵元接收的数据合成为少数几个波束域的数据,利用波束域的最大似然算法估计目标的仰角并计算其高度。

除此之外,文献[7]将稀疏分析引入米波雷达测高,通过稀疏解来估计目标仰角和高度。文献[8]利用 RELAX(松弛)算法对各路通道的接收信号进行预处理,然后再利用匹配阵波束形成技术测量目标高度。

但是现有的测高算法都假设多径信号为远场点源,但是实际应用中由于环境的复杂而无法满足这一点,导致传统的测高算法性能受到影响,在复杂阵地下可能失败。目标回波在传播过程中,多径使得信号源的能量在空间形成一定的分布,此时多径信号应该为分布源。针对以上问题,本文首先建立多径服从分布源的阵列信号模型,然后提出广义约束 MUSIC 算法,通过对多径信号进行约束来提高直达波的波达方向估计精确度,最后给出计算机仿真结果。

1 信号模型

考虑一个远场窄带信号入射到垂直放置的 M 个各向同性阵元组成的均匀线阵,图 1 是在复杂阵地下低仰角区测高环境中的几何框图(不考虑地球曲率)。其中 h_t 为雷达天线中心架高, h_l 为目标高度, R_d 为目标相对雷达的直达距离, R_l 为目标由地(海面)反射的多径距离,直达波为点目标, θ_d 为直达波入射角,多径信号为分布源, θ_l 为多径信号中心反射角, Δ 为分布源参数。

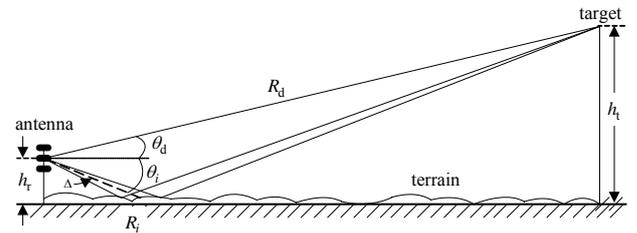


Fig.1 Low-angle altitude measurement geometry based on terrain matching in VHF array radar

图 1 复杂阵地下米波雷达低仰角测高模型

阵列的输出信号矢量为

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X}(t)$ 为各阵元的接收数据; $\mathbf{N}(t)$ 为零均值, 方差为 σ^2 的复高斯白噪声, 各阵元输出噪声统计独立; $\mathbf{S}(t) = [s(t), \rho s(t)]$ 为信号矢量, 其中, ρ 为地面反射系数; $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_d), \mathbf{b}(\theta_l, \Delta)]$ 为导向矢量, 其中, $\mathbf{a}(\theta_d) = [1, a(\theta_d), \dots, a^m(\theta_d), \dots, a^{M-1}(\theta_d)]^T$, ($m = 0, 1, \dots, M-1$) 为直达波为导向矢量, 上标 T 表示矩阵转置, $a(\theta_d) = \exp(j\kappa d \sin \theta_d)$, $\kappa = 2\pi/\lambda$ 为波数; $\mathbf{b}(\theta_l, \Delta)$ 为多径信号为导向矢量。

$$\mathbf{b}(\theta_l, \Delta) = \int \mathbf{a}(\theta) \xi(\theta, \theta_l, \Delta) d\theta \quad (2)$$

式中 $\xi(\theta, \theta_l, \Delta)$ 为角分布函数。

在此假设地面多径反射服从高斯分布源模型, 即角分布函数为高斯函数^[9-10]。

$$\xi(\theta, \theta_l, \Delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta} \exp\left(-\frac{(\theta - \theta_l)^2}{2\Delta^2}\right) \quad (3)$$

将式(3)代入式(2), 得到

$$[\mathbf{b}(\theta_l, \Delta)]_m = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \exp(j\kappa d m \sin \theta) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta} \exp\left(-\frac{(\theta - \theta_l)^2}{2\Delta^2}\right) d\theta \quad (4)$$

对式(4)进行近似^[7],

$$[\mathbf{b}(\theta_l, \Delta)]_m \approx \exp(j\kappa d m \sin \theta_l) \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \exp(j\kappa d m \tilde{\theta} \cos \theta_l) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta} \exp\left(-\frac{\tilde{\theta}^2}{2\Delta^2}\right) d\tilde{\theta} = \exp(j\kappa d m \sin \theta_l) \cdot [\mathbf{h}]_m \quad (5)$$

式中

$$[\mathbf{h}]_m = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \exp(j\kappa d m \tilde{\theta} \cos \theta_l) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta} \exp\left(-\frac{\tilde{\theta}^2}{2\Delta^2}\right) d\tilde{\theta} \quad (6)$$

利用积分公式^[8]

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-f^2 x^2) \exp(jl(x+v)) dx = \sqrt{\pi} \exp\left(-\frac{l^2}{4f^2}\right) \frac{\exp(jlv)}{f} \quad (7)$$

式(5)可以得到闭式表达式

$$[\mathbf{b}(\theta_i, \Delta)]_m \approx \exp(j\kappa d m \sin \theta_i) \exp(-(\kappa d)^2 m^2 \cos^2 \theta_i \Delta^2 / 2) \quad (8)$$

因此式(2)可以写作

$$\mathbf{b}(\theta_i, \Delta) \approx \mathbf{a}(\theta_i) \odot \mathbf{h} \quad (9)$$

式中： \odot 表示 Schur-Hadamard 积； $[\mathbf{h}]_m = \exp(-(\kappa d)^2 m^2 \cos^2 \theta_i \Delta^2 / 2)$ 。

对于有限长接收数据，数据协方差矩阵的最大似然估计为

$$\mathbf{R} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \mathbf{X}(t) \mathbf{X}^H(t) \quad (10)$$

式中： N 为快拍数；上标 H 表示共轭转置。当 $N > M$ 时，矩阵 \mathbf{R}_x 正定。

2 广义约束 MUSIC 算法

约束 MUSIC 算法^[11-13]是利用部分已知信源方向来提高未知信源方向估计的分辨率和估计精确度，已知其中一个信号源的方向，相当于已知信号子空间中的一维方向矢量信息，通过限制信号子空间包含该维方向矢量，使其他信号源的方向估计精确度得到提高，同时当已知的信号与其他信号源相干时，算法不受影响^[14]，这也是其他特征值分解类算法所不具备的。但是在实际中无法获取信源方向的任何先验知识，这使得约束 MUSIC 算法无法直接应用于米波雷达低仰角测高环境中，因此对该算法进行推广，得到广义约束 MUSIC 算法。

假定目标的多径中心反射角 θ_i 已知，定义一个约束矩阵 \mathbf{C} ， \mathbf{C} 的列向量为多径分布源的导向矢量

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}(\theta_i) = \mathbf{b}(\theta_i) \quad (11)$$

对约束矩阵 $\mathbf{C}(\theta_i)$ 进行 QR 分解

$$\mathbf{C}(\theta_i) = \mathbf{Q}_c(\theta_i) \mathbf{R}_c(\theta_i) = [\mathbf{Q}_{c1}(\theta_i) \quad \mathbf{Q}_{c2}(\theta_i)] \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{c1}(\theta_i) \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中： $\mathbf{Q}_{c1}(\theta_i)$ 为 $M \times 1$ 维矩阵，包含了约束矩阵 \mathbf{C} 的一组正交基； $\mathbf{Q}_{c2}(\theta_i)$ 为 $M \times (M-1)$ 维矩阵，扩展了 $\mathbf{C}^H(\theta_i)$ 的零空间， $\mathbf{Q}_{c2}^H(\theta_i) \mathbf{C}(\theta_i) = \mathbf{0}$ ； $\mathbf{R}_{c1}(\theta_i)$ 为 $q \times q$ 维上三角阵； $\mathbf{0}$ 为零矩阵。如果已知多径信号的方向，相当于获得了信号子空间的一部分信息，并且与噪声子空间正交。因此， $\mathbf{Q}_{c1}(\theta_i)$ 中的约束信息确保了噪声子空间和已知多径信号子空间正交。构造以下矩阵

$$\mathbf{R}_c(\theta_i) = \mathbf{Q}_{c2}(\theta_i) \mathbf{Q}_{c2}^H(\theta_i) \mathbf{R}_x \mathbf{Q}_{c2}(\theta_i) \mathbf{Q}_{c2}^H(\theta_i) \quad (13)$$

投影算子 $\mathbf{Q}_{c2}(\theta_i) \mathbf{Q}_{c2}^H(\theta_i)$ 包含噪声子空间的全部信息，且与多径信号子空间正交，因此矩阵 $\mathbf{R}_c(\theta_i)$ 仅含与直达波信号和噪声的相关信息， $\mathbf{R}_c(\theta_i)$ 的秩为 1。通过对 $\mathbf{R}_c(\theta_i)$ 的特征值分解可以得到直达波信号子空间，

$$\mathbf{R}_c(\theta_i) = [\mathbf{U}_{cs1}(\theta_i), \mathbf{U}_{cs2}(\theta_i), \mathbf{U}_{cn}(\theta_i)] \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_{cs2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{cn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{cs1}^H(\theta_i) \\ \mathbf{U}_{cs2}^H(\theta_i) \\ \mathbf{U}_{cn}^H(\theta_i) \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中： $\mathbf{U}_{cs1}(\theta_i)$ 为 $M \times 1$ 维矩阵，投影算子使得多径信号子空间对应的特征值为 0； $\mathbf{U}_{cs2}(\theta_i)$ 为 $M \times 1$ 维矩阵，为直达波信号的子空间； $\mathbf{U}_{cn}(\theta_i)$ 为 $M \times (M-2)$ 维矩阵，为噪声子空间； \mathbf{A}_{cs2} 为 1 个大特征值组成的对角阵，为直达波信号的特征值； \mathbf{A}_{cn} 为 $M-2$ 个小特征值组成的对角阵。因此，广义约束 MUSIC 算法的谱估计为

$$P_{\text{GC-MUSIC}}(\theta_d, \theta_i) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta_d) \mathbf{U}_{cn}(\theta_i) \mathbf{U}_{cn}^H(\theta_i) \mathbf{a}(\theta_d)} \quad (15)$$

一般情况下，直达波和多径信号的关系有 $|\theta_d| < |\theta_i|$ 且 $\theta_d > 0 > \theta_i$ ，因此在搜索过程中，只需搜索 $1/4$ 平面即可。式(15)需要进行二维搜索，计算量较大。在实际雷达测高过程中，目标的距离信息 R_d 和雷达的架高 h_t 是已知的，可以得到 θ_d 和 θ_i 的近似关系，利用该近似关系对式(15)进行简化，将二维搜索降为一维搜索。

由图 1 可以知道， $\sin \theta_d = (h_t - h_r) / R_d$ ， $\sin \theta_i = (h_t + h_r) / R_i$ ，在仰角较小时， $R_d \approx R_i$ ，可以得到 $\theta_i \approx -\arcsin(\sin \theta_d + 2h_t / R_d)$ ，式(15)可简化为

$$\begin{cases} P_{\text{MGC-MUSIC}}(\theta_d, \theta_i) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta_d) \mathbf{U}_{cn}(\theta_i) \mathbf{U}_{cn}^H(\theta_i) \mathbf{a}(\theta_d)} \\ \theta_i = -\arcsin(\sin \theta_d + 2h_t / R_d) \end{cases} \quad (16)$$

此时只需对空间谱函数进行一维搜索即可，可以在很大程度上减少运算量。与常规解相干 MUSIC 算法不同的是，广义约束 MUSIC 利用的是 CLEAN 算法思想，通过抑制多径信号来得到直达波信号子空间，使信号协方差矩阵的秩得到有效恢复，实现解相干。

算法复杂度分析，式(12)的复杂度为 $O\{M^3\}$ ，式(13)的复杂度为 $O\{2M^3 + (M - 1)^2M\} \approx O\{3M^3\}$ ，式(14)的复杂度为 $O\{M^3\}$ ，式(15)的复杂度为 $O\{(2M(M - 2) + M)K\} \approx O\{(2M^2 + M)K\}$ ，因此算法复杂度约为 $O\{5M^3 + (2M^2 + M)K\}$ 。

3 计算机仿真

为了验证本文方法的有效性，在仿真过程中(不考虑地球曲率的影响)，使用垂直放置的 22 个水平极化天线阵元组成的等距布阵，阵列各阵子为各向同性阵子，雷达架高 20 m，载波频率为 150 MHz，天线阵元间距 $d=1\text{m}$ ，3 dB 波束宽度为 4.6° ，地面反射系数为 -0.9 ，多径高斯分布源标准差为 0.2° 。假设目标距天线阵中心的距离为 200 km，高度为 5 000 m，直达波和多径信号中心入射角分别为 1.43° 和 -1.44° ，直达波和多径信号均在阵列的主瓣内，快拍数为 50，信噪比(Signal-Noise Ratio, SNR)为 10 dB。

图 2(a)给出了两维搜索广义约束 MUSIC 算法的空间谱等高线图，直达波入射角为 1.45° ；图 2(b)是使用空间平滑 MUSIC 算法^[1]和一维搜索广义约束 MUSIC 算法的空间谱对比，一维搜索广义约束 MUSIC 算法的直达波入射角为 1.47° ，而空间平滑 MUSIC 的直达波入射角误差较大，为 1.98° ，由此可见本文方法能在复杂环境下很好地分辨夹角小于波束宽度的相干入射信号。

进行 200 次 Monte-Carlo 实验，统计不同信噪比和不同快拍数下广义约束 MUSIC 算法的测角均方根误差，并与空间平滑 MUSIC 算法^[1]和交叉投影最大似然算法^[6]比较，其中目标参数和以上仿真一致。

图 3 为信噪比从 0 dB 变化到 30 dB 时 2 种方法的测角均方根误差曲线，快拍数为 50。仿真结果表明，复杂阵地低仰角环境，广义约束 MUSIC 算法的测角精确度比空间平滑 MUSIC 算法和交叉投影最大似然算法高。

图 4 给出了快拍数从 10 变化至 100 时 2 种方法测角均方根误差随快拍数的变化，信噪比为 10 dB。仿真结果表明，当快拍数小于阵元数时，广义约束 MUSIC 算法性能急剧下降，这是因为此时数据协方差矩阵不正定；在快拍数大于阵元数时，广义约束 MUSIC 算法估计性能最优。

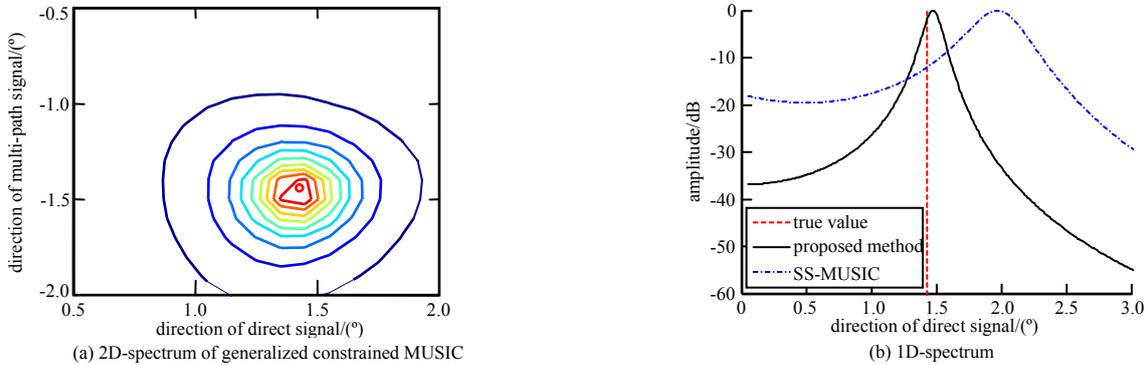


Fig.2 Spectrum of algorithm
图 2 算法空间谱

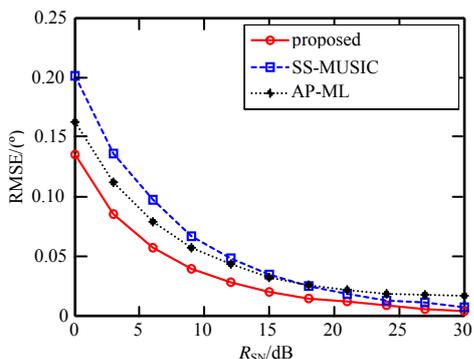


Fig.3 RMSE of the DOA estimates versus input SNR
图 3 信噪比变化时的性能曲线

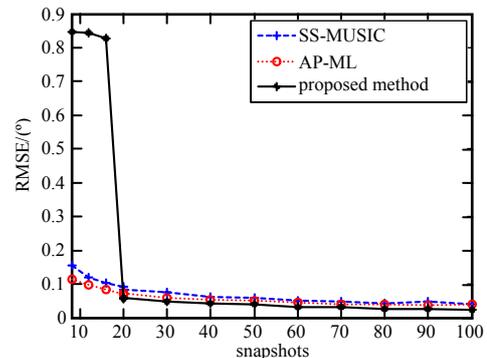


Fig.4 RMSE of the DOA estimates versus snapshots
图 4 快拍数变化时的性能曲线

4 结论

米波雷达低仰角测高时受地面反射多径和宽接收波束的影响严重，测高效果不理想。为此本文建立了一种新的米波雷达低仰角信号模型，将多径回波认为是分布源，使其更加符合实际多径信号的特征。提出广义约束 MUSIC 算法，通过对多径信号进行限制来提高对直达波波达方向估计的精确度。本文算法能直接处理相干信号，并且不用考虑地面反射系数的影响。计算机仿真结果证明本文算法能够有效地估计复杂多径环境下的目标仰角，相对于传统测高算法，能达到更高的测角和测高精度。

参考文献：

- [1] LI J. Improved angular resolution for spatial smoothing techniques[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(12):3078–3081.
- [2] 张聪,胡谋法,卢焕章. 基于虚拟阵列空间平滑的相干信号 DOA 估计[J]. 电子学报, 2010,38(4):929–933. (ZHANG Cong,HU Moufa,LU Huanzhang. Virtual array based spatial smoothing method for direction finding of coherent signal[J]. Acta Electronica Sinica, 2010,38(4):929–933.)
- [3] 吴向东,赵永波,张守宏,等. 利用改进的 Toeplitz 化技术实现米波雷达低仰角测高[J]. 电子与信息学报, 2010,32(3):570–574. (WU Xiangdong,ZHAO Yongbo,ZHANG Shouhong,et al. Height finding of meter-wave radar using improved Toeplitz technique at low-angle environment[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010,32(3):570–574.)
- [4] 谢鑫,李国林,刘华文. 采用单次快拍数据实现相干信号 DOA 估计[J]. 电子与信息学报, 2010,32(3):604–608. (XIE Xin,LI Guolin,LIU Huawen. DOA estimation of coherent signals using one snapshot[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010,32(3):604–608.)
- [5] 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. (ZHAO Guanghui,CHEN Baixiao,DONG Mei. A new DOA estimator based on alternating projection and its application in VHF radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008,30(1):224–227.)
- [6] 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. (HU Tiejun,YANG Xueya,CHEN Boxiao. Application of beamspace ML algorithm based on array interpolation in height measuring using VHF radar[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2009,24(4):660–666.)
- [7] 倪菁. 基于 RELAX 预处理的米波雷达低角测高[J]. 现代雷达, 2011,33(1):22–24. (NI Jing. Height finding of low-elevation target in meter-wave radar based on RELAX preprocessing[J]. Modern Radar, 2011,33(1):22–24.)
- [8] 杨雪亚,杨广玉. 基于稀疏解的米波雷达测高方法[J]. 雷达科学与技术, 2012,10(6):629–632. (YANG Xueya,YANG Guangyu. Method of height measuring based on sparse solution in meter-wave radar[J]. Radar Science and Technology, 2012,10(6):629–632.)
- [9] HAN Y H,WANG J K,ZHAO Q,et al. Parameter estimation algorithm for coherently distributed source[C]// International Conference on Computer Design and Applications. Qinhuangdao,China:IEEE, 2010:516–519.
- [10] GRADSHTEYN I S,RYZHIK I M. Table of Integrals, Series, and Products[M]. 7th ed. Orlando: Academic Press, 2007.
- [11] DEGROAT R D,DOWLING E M. The constrained MUSIC problem[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993,41(3):1445–1449.
- [12] LINEBARGER D A,DEGROAT R D,DOWLING E M. Constrained beamspace MUSIC[C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1993,4(4):548–551.
- [13] PETRE S,TORSTEN S. On the constrained MUSIC technique[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993,41(11):3190–3193.
- [14] 张忠,袁业术,孟宪德. Constrained MUSIC 算法在高频地波舰载超视距雷达中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(5):20–22. (ZHANG Zhong,YUAN Yeshu,MENG Xiande. Application of constrained-MUSIC algorithm in shipborne HFOTH radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2002,24(5):20–22.)

作者简介：



朱 伟(1987–), 男, 安徽省宿松县人, 博士, 工程师, 主要研究方向为雷达总体设计和阵列信号处理. email:zw02031144@163.com.

陈伯孝(1966–), 男, 安徽省宿松县人, 博士, 教授, 主要研究方向为新体制雷达系统和雷达信号处理.