

基于差分预处理的米波雷达低仰角处理算法

赵光辉 陈伯孝 吴向东 张守宏

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘 要: 由于多径信号的存在,使得米波雷达难以对低仰角目标进行高度测量,为此该文提出一种适用于多径情况下的波达方向估计方法。该方法通过差分处理,补偿了多径信号回波延迟的相位,使得接收回波中仅包含直达波信号,对差分后数据进行常规数字波束形成即可得到目标俯仰角。Monte-Carlo 试验结果表明在进行低仰角测高过程中,该方法性能优于空间平滑和线性预测等方法。某米波雷达的实测数据验证了该方法的可行性与有效性。

关键词: 米波雷达; 测高; 多径; DOA; 超分辨

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)02-0363-03

An Algorithm Based on Differential Preprocessing of Low Elevation Estimation in VHF Radar

Zhao Guang-hui Chen Bai-xiao Wu Xiang-dong Zhang Shou-hong

(National Key Lab for Radar Signal Processing, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: Considering the presence of multi-path propagation, it is quite difficult for VHF radar to measure the altitude of a low elevation target. In this paper, a new algorithm is proposed to estimate the DOA of the target, which by using the differential preprocessing, the phase of the multipath wave can be compensated, the echo from multi-path propagation can be subtracted from the signal that received. Then the general DBF can be used to estimate the direction of the direct wave. The Monte-Carlo experiments prove that the performance of the new algorithm is better than that of the spatial smoothing technique and the forward-backward predictors for bearing estimation. The real data from some VHF radar demonstrates the validity and feasibility of the new algorithm.

Key words: VHF radar; Altitude measurement; Multi-path; DOA; Super resolution

1 引言

随着现代武器的战术性能的日益提高,对低角雷达跟踪测量精度的要求也越来越高。一般常规雷达要发现远距离、低仰角的目标是非常困难的,而要跟踪它就更加困难。雷达在低仰角探测和跟踪空中、陆地、海上等目标时,除了低层大气的不均匀性引起的电波折射效应外,还有地面、海面产生的镜面反射或漫反射引起的多径干涉效应。在低空目标时,雷达数据的多径误差取决于由目标和雷达之间的表面前向反射的目标能量幅度和空间分布,由于地面的漫散射或镜面反射的影响^[1-3],使得回波信号中包含多径相干分量,这些都会给雷达低仰角目标高度测量精度产生很大的影响。

阵列超分辨技术是阵列信号处理的主要内容之一,在最近的 20 多年中这一技术得到了迅速发展,其主要成果有: MUSIC 法^[4], Min-Norm 法^[5]等特征结构法和最大似然类参数估计方法^[6]。但是对于图 1 所示接收模式,由于接收回波中存在多径分量, MUSIC 等算法无法解决这一相干信号问题,而最大似然算法需要多维搜索,存在运算量大的缺点;

于是相继出现了前后向预测法^[7-9]、空间平滑法^[10,11]、高阶谱估计^[12]、改进的 ESPRIT^[13]等方法,这些方法通常要求对回波信号构造相关矩阵,进行特征值分解,且精度有限。本文针对以上诸多问题,提出了一种适用于多径情况的差分预处理算法。该方法在接收天线的回波数据上补偿多径信号的相位,再通过差分运算即消除了多径信号分量,差分后的数据仅包含直达波,采用数字波束形成(DBF)即可得到目标的俯仰角,且运算量大大降低。

2 信号模型

考虑垂直方向一个由 N 个无方向性阵元组成的等距线

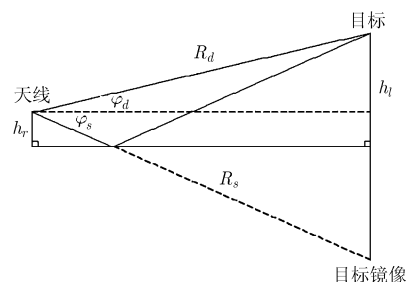


图 1 接收天线模型

2007-08-30 收到, 2008-01-24 改回

国家部委级项目(51307050201)和教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0856)资助课题

阵(ULA), 空间存在 P 个低仰角远场的信源, 即每个目标的回波, 包含直达波和地面反射的多径信号, 阵列接收信号的复包络可以表示为

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

其中 $\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T$, $x_i(t)$ 为第 i 个阵元接收到信号的复包络, $i = 1, 2, \dots, N$; 矩阵 $\mathbf{A}(\theta) = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_P)]$, $\mathbf{a}(\theta_k) = \mathbf{a}(\theta_{dk}) + r_k \mathbf{a}(\theta_{sk})$, $k = 1, 2, \dots, P$; $\mathbf{a}(\theta_{dk})$ 为目标 k 的直达波方向 θ_{dk} 的空域方向矢量, $\mathbf{a}(\theta_{sk})$ 为目标 k 的多径方向 θ_{sk} 的空域方向矢量; 对于水平极化来说, $r_k = \rho_k \exp(j\Delta\phi)$ 为第 k 个目标反射区所在地面的反射系数, ρ_k 为地面反射系数幅值, $\Delta\phi = \pi$, $k = 1, 2, \dots, P$; $\mathbf{S}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_P(t)]^T$, $\mathbf{u}(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_N(t)]^T$ 为阵列的加性噪声, 假定为互不相关的零均值高斯白噪声, 且与信号源不相关, 即 $E[u_k(t)u_i^H(t)] = 0, (k \neq i)$ 。由式(1)可知, 第 l 根接收天线的回波信号可以表示为

$$x_{lP}(t) = \sum_{k=1}^P \left[\exp\left(j \frac{2\pi(l-1)d}{\lambda} \sin(\theta_{dk})\right) s_k(t) + r_k \exp\left(j \frac{2\pi(l-1)d}{\lambda} \sin(\theta_{sk})\right) s_k(t - \tau_k) \right] + u_l(t) \quad (2)$$

由于每个信源的回波延迟不同, 通过脉冲压缩, 多普勒滤波等处理, 可以得到单个目标的回波信号。假设目标 k 的回波信号可以表示为

$$x_l(t) = \exp\left(j \frac{2\pi(l-1)d}{\lambda} \sin(\theta_{dk})\right) s_k(t) + r_k \exp\left(j \frac{2\pi(l-1)d}{\lambda} \sin(\theta_{sk})\right) s_k(t - \tau_k) + u_l(t) \quad (3)$$

令 $f(i, \theta) = \exp[j2\pi(d/\lambda) \cdot i \cdot \sin \theta]$, 在式(3)的左右分别乘以 $f(1, \theta) = \exp[j2\pi(d/\lambda) \cdot 1 \cdot \sin \theta]$, $f(1, -\theta) = \exp[-j2\pi(d/\lambda) \cdot 1 \cdot \sin \theta]$, 并令 $\theta = \theta_{sk}$ 得到下式

$$x_l(t)f(1, \theta_{sk}) = f(1, \theta_{sk}) \exp\left(j \frac{2\pi(l-1)d}{\lambda} \sin(\theta_{dk})\right) s_k(t) + r_k \exp\left(j \frac{2\pi l d}{\lambda} \sin(\theta_{sk})\right) s_k(t - \tau_k) + u_l(t)f(1, \theta_{sk}) \quad (4)$$

$$x_l(t)f(1, -\theta_{sk}) = f(1, -\theta_{sk}) \exp\left(j \frac{2\pi(l-1)d}{\lambda} \sin(\theta_{dk})\right) s_k(t) + r_k \exp\left(j \frac{2\pi(l-2)d}{\lambda} \sin(\theta_{sk})\right) s_k(t - \tau_k) + u_l(t)f(1, -\theta_{sk}) \quad (5)$$

则

$$x_{l+1}(t) - x_l(t)f(1, \theta_{sk}) = A \exp\left(j \frac{2\pi l d}{\lambda} \sin(\theta_{dk})\right) s_k(t) + \Delta u_l \quad (6)$$

$$x_l(t)f(1, -\theta_{sk}) - x_{l-1}(t) = -A^* \exp\left(j \frac{2\pi(l-2)d}{\lambda} \sin(\theta_{dk})\right) \cdot s_k(t) + \Delta \hat{u}_l \quad (7)$$

将式(6)、式(7)合并得下式:

$$\begin{aligned} & x_{l+1}(t) - x_{l-1}(t)f(2, \theta_{sk}) \\ &= -A^* \exp\left(j \frac{2\pi 2d}{\lambda} (\sin(\theta_{sk}) - \sin(\theta_{dk})) + A\right) \\ & \cdot \exp\left(j \frac{2\pi l d}{\lambda} \sin(\theta_{dk})\right) s_k(t) + \Delta U_l \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $\Delta U_l = \Delta u_l + \Delta \hat{u}_l \exp\left(j \frac{2\pi 2d}{\lambda} \sin(\theta_{sk})\right)$, $\Delta \hat{u}_l = u_l(t)f(1, -\theta_{sk}) - u_{l-1}(t)$, $\Delta u_l = u_{l+1}(t) - u_l(t)f(1, \theta_{sk})$, $A = 1 - \exp\left(j \frac{2\pi d}{\lambda} (\sin(\theta_{sk}) - \sin(\theta_{dk}))\right)$ 。

考虑到远场低仰角情况下^[14], $R_d \approx R_s$, $\sin(\theta_d) = (h_t - h_r)/R_d$, $\sin(\theta_s) = (h_t + h_r)/R_s$, θ_d 、 θ_s 之间存在如下关系:

$$\theta_s = \arcsin(\sin(\theta_d) + 2h_r/R_d) \quad (9)$$

将上式代入式(8)得

$$\begin{aligned} y_{l-1}(t) &= x_{l+1}(t) - x_{l-1}(t) \exp\left(j \frac{2\pi 2d}{\lambda} (\sin(\theta_{dk}) + \frac{2hr}{R_d})\right) \\ &= B \exp\left(j \frac{2\pi l d}{\lambda} \sin(\theta_{dk})\right) s_k(t) + \Delta U_l \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $B = A - A^* \exp\left(j \frac{2\pi d}{\lambda} \frac{4hr}{R}\right)$ 。

通过以上推导可以看出, 当接收回波中包含多径分量时, 通过差分运算可以得到新的接收信号 $y_{l-1}(t)$ 。从式(10)可以看出差分后的信号 $y_{l-1}(t)$ 其接收阵元孔径比实际孔径少两个, 此时接收信号不含有多径分量, 仅包含直达波信号, 对其进行常规 DBF 即可求出目标的俯仰角 θ_d 。

3 计算机仿真和实测数据处理

为验证本文超分辨算法的有效性和理论分析的正确性, 将本文方法与空间平滑、四阶线性预测等方法进行了如下计算机仿真对比。阵列为垂直放置的 16 阵元的等距线阵, 阵元间距为半波长, 雷达天线(中心点)的架设高度为 40m, 发射中心频率为 240MHz。考虑一远场低仰角目标, 目标距参考发射阵元的中心距离为 100km, 高度为 4500m, 俯仰角为 2.55° , 信噪比为 13dB, 地面反射系数为 0.7, 快拍为 100。图 2 即为采用 3 种方法分别得到的俯仰角测量结果。其中垂直线为目标实际仰角值, 通过比较 3 条曲线的峰值, 可以发现本文方法较其他方法在精度上有显著的提高。

为验证该方法的有效性, 对不同信噪比下目标高度随距离变化的均方根误差进行了性能对比。假设目标飞行高度为 4000m, 目标距离为 100km, 其余参数同图 2。图 3 为单根天线接收信噪比由 0dB 变化到 20dB 过程中目标高度的均方根误差, 图中每一个实验值是由 100 次 Monte-Carlo 实验结果统计得到。从仿真结果可以看出, 随着信噪比的提高, 本文方法搜索得到的目标高度误差最小。为比较不同距离情况下本文方法的测角误差, 进行了图 4 所示的 100 次 Monte-Carlo 实验, 假设目标恒定飞行在 2000m 的高空, 距离由 40km 变化到 80km, 单根天线接收信噪比为 13dB, 其余参数同图 2。从图 4 的仿真结果同样可以看出在给定信噪比下本文方法与其余两种方法相比有更高的精度。

针对本文提出的差分预处理算法, 本文采用一组米波雷达实测数据进行了方法验证, 实测数据为某一民航机回波, 其中天线中心架高 23m, 采用 8×2 路阵元等间距垂直布线的

面阵列天线, 阵元间距为 1.1m, 采样频率为 1000Hz。采用本文方法对多普勒滤波后的单个目标回波进行跟踪与高度测量, 该民航机的高度测量结果经曲线拟和如图 5 所示, 图中虚线为 GPS 纪录的目标真实高度, 实线为采用本文方法测得的目标高度。由图可见, 高度测量的均方根误差为 261m, 可见该方法可以满足米波雷达测高的精度要求。由以上的结果分析可见, 本文提出的方法可行, 可以较精确的测量目标的俯仰角和高度值。

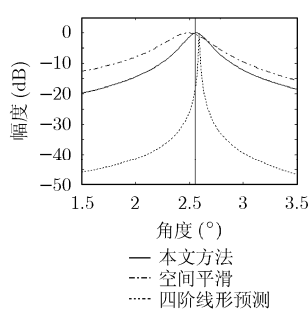


图 2 3 种方法俯仰角测量结果

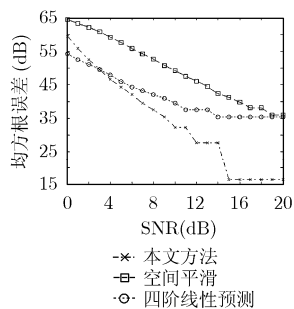


图 3 不同信噪比目标高度均方根误差对比图

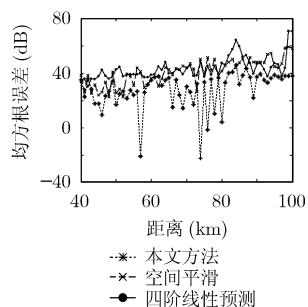


图 4 不同距离目标高度均方根误差对比图

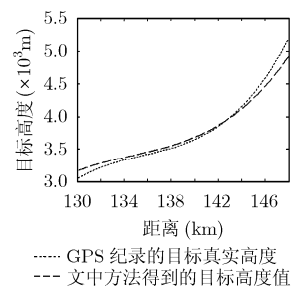


图 5 某米波雷达实测数据处理结果

4 结束语

本文针对米波雷达测高过程中接收回波存在多径信号这一问题, 提出了一种基于接收信号差分预处理算法, 考虑到接收模型的几何关系, 将二维角度搜索简化为一维搜索, 且可以得到较精确的俯仰角估计值; 并在同一仿真环境下, 将本文方法和空间平滑、线性预测算法进行了性能上的比较, 通过比较均方根误差在不同信噪比、不同仰角区的测量结果很好地验证了本文方法的稳健性和精确性。实测数据的处理结果更好地验证了该方法的实用性。

致谢 感谢中电集团 38 所提供某米波雷达实验系统的实测数据。

参考文献

- [1] 张瑜, 李玲玲. 多径条件下雷达到达角的估算及仿真. 电波科学学报, 2004, 19(2): 215-218.
Zhang Yu and Li Ling-ling. Radar arrived angle estimation and simulation under multi-path condition. *Chinese Journal*

- of Radar Science*, 2004, 19(2): 215-218.
- [2] 张瑜, 李玲玲. 低角雷达跟踪时的多路径散射模型. 电波科学学报, 2004, 19(1): 83-86.
Zhang Yu and Li Ling-ling. Multipath scattering model of low angle radar tracking. *Chinese Journal of Radar Science*, 2004, 19(1): 83-86.
- [3] 李立萍, 文忠, 陈天麒. 多径信号到达角和时延高分辨联合估计算法. 电子学报, 2006, 34(4): 746-750.
Li Li-ping, Wen Zhong and Chen Tian-qi. High resolution algorithm of joint doa and toa estimation for multi-path signals. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(6): 746-750.
- [4] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Trans. on AP*, 1986, AP-34(3): 276-280.
- [5] Kumaresan R *et al.* Estimating the angles of arrival of multiple plane waves. *IEEE Trans. on AES*, 1983, AES-19(2): 134-139.
- [6] Ziskind I and Wax M. Maximum likelihood localization at multiple sources by alternating projection. *IEEE Trans. on ASSP*, 1988, ASSP-36(10): 1553-1560.
- [7] Burg J P. Maximum entropy spectral analysis. Proc. of the 37th meeting of the Annual Int. SEG Meeting. Oklahoma City, OK, 1967.
- [8] Shahmirian V and Kesler S. Bias and resolution of the vector space methods in the presence of coherent planewaves. *ICASSP*, 1987: 2520-2523.
- [9] Lee W C, Park S C, Chan I W, and Yong D H. Adaptive spatial domain forward-backward predictors for bearing estimation. *IEEE Trans. on ASSP*, 1990, 38(7): 1105-1109.
- [10] Shan T J, Wax M, and Kailath T. Adaptive beamforming for coherent signals and interference. *IEEE Trans. on ASSP*, 1985, 33(3): 527-539.
- [11] Shan T J, Wax M, and Kailath T. On spatial smoothing for estimation of coherent signals. *IEEE Trans. on ASSP*, 1985, 33(4): 806-811.
- [12] Miron S and Bihan N L. Quaternion MUSIC for vector sensor array processing. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2006, 54(4): 1218-1229.
- [13] Gao F and Gershman A B. A generalized ESPRIT approach to direction of arrival estimation. *IEEE Letters. on Signal Processing*, 2005, 12(3): 254-257.
- [14] 赵永波, 张守宏. 雷达低角跟踪环境下的最大似然波达方向估计方法. 电子学报, 2004, 32(9): 1520-1523.
Zhao Yong-bo and Zhang shou-hong. Maximum likelihood doa estimation in radar low-angle tracking environment. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(9): 1520-1523.

赵光辉: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为阵列信号处理、米波雷达测高方法研究。

陈伯孝: 男, 1966 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向包括新体制雷达系统设计、雷达信号处理、阵列信号处理、精确制导与目标跟踪等。

吴向东: 男, 1976 年生, 博士生, 研究方向为阵列信号处理、雷达信号处理等。

张守宏: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 电子学会会士, 研究方向包括时频分布、雷达成像、阵列信号处理、高分辨信号处理等。