

# 基于空域稀疏性的雷达低仰角目标测高

陈希信<sup>1</sup>, 龙伟军<sup>2</sup>

(1. 南京工业职业技术大学 电气工程学院, 南京 210023; 2. 南京电子技术研究所, 南京 210039)

**摘要:**受地面多径反射的影响,常规单脉冲技术难以用来测量低仰角雷达目标的高度,因此测量低仰角目标的高度在雷达中是一个难题。文中提出了基于阵列接收信号空域稀疏性的低仰角目标测高新方法。该方法利用目标回波的空域稀疏性,首先将测高阵列接收信号进行稀疏表示,转化为压缩感知信号模型,然后用凸优化算法估计目标仰角,进而得到目标高度。雷达实测数据处理表明,该文方法的测量精度较高,显著优于常规单脉冲技术。

**关键词:**低仰角目标;高度测量;空域稀疏性;压缩感知;凸优化

**中图分类号:**TN957.51      **文献标志码:**A      **文章编号:**1004-7859(2020)09-0039-03

**引用格式:**陈希信,龙伟军. 基于空域稀疏性的雷达低仰角目标测高[J]. 现代雷达, 2020, 42(9): 39-41.

CHEN Xixin, LONG Weijun. Height measurement of low elevation radar target based on spatial sparsity[J]. Modern Radar, 2020, 42(9): 39-41.

## Height Measurement of Low Elevation Radar Target Based on Spatial Sparsity

CHEN Xixin<sup>1</sup>, LONG Weijun<sup>2</sup>

(1. Electrical Engineering College, Nanjing Vocational University of Industry Technology, Nanjing 210023, China)

(2. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

**Abstract:** Owing to the severe ground multipath reflections the conventional monopulse technique can hardly be applied to measure the height of low elevation radar target, therefore the height measurement of low elevation target is a difficult problem in the radar. A height measurement approach for low elevation target based on spatial sparsity of array receiving signal is presented in this paper. Using the spatial sparsity this approach firstly sparsely expresses the receiving signal of radar array and transfers it to the compressive sensing signal model, then the convex optimization algorithm is employed to estimate the target elevation and further the target height is obtained. The processing of meterwave radar data shows that the measurement precision of the presented method is high and remarkably better than that of the monopulse technique.

**Key words:** low elevation target; height measurement; spatial sparsity; compressive sensing; convex optimization

## 0 引言

低仰角是指目标的仰角位于地面水平线至水平线以上半个波束宽度的范围内,在低仰角情况下,目标回波以直达波和地面反射波两种传播方式进入天线波束内,此时常规波束形成不能分辨这两种回波,因此无法利用各种经典单脉冲测角方法测量低仰角目标的高度,除非能够预先在距离域或者多普勒域上区分两种回波。测量低仰角目标的高度在雷达工程中是一个难题。

从阵列信号处理出发,若要测量低仰角目标的高度,需要提高阵列的角度分辨能力,以分辨直达波和多径反射波,因此 MUSIC 类方法受到很大重视<sup>[1]</sup>,但是这类方法需要较多脉冲且计算量较大。在简单的平坦地面模型下,目标回波可认为通过一条直达波和一条地面反射波进入雷达天线,因此只要能区分这两条回波路径,就能测量目标高度。在该模型下,文献[2]

提出了一种相关高度分析方法,文献[3]研究了极大似然估计方法,在高斯白噪声下两种方法是等价的;文献[4]通过引入声呐目标定位中的匹配场概念提出了一种称为匹配阵波束形成的低仰角目标测高方法;考虑到地面 Fresnel 反射系数对仰角估计的影响;文献[5]进一步提出对反射系数进行搜索以提高测量精度。如果地面不够平坦,上述方法需要进行地形补偿,否则性能会降低。在地面不够平坦的情况下,由于沿不同路径到达雷达天线阵列的反射波的多普勒频率是不同的,因此可以利用 RELAX 算法<sup>[6]</sup>去除多径反射波,消除多径反射的影响,于是文献[7]提出了基于数据 RELAX 预处理的匹配阵波束形成米波雷达测高方法,该方法也需要较多相干脉冲。另外,针对 X 波段雷达文献[8]提出发射大带宽信号首先在距离上区分直达波和地面多径发射波,然后采用单脉冲技术估计目标仰角。

近年来空域稀疏性阵列信号处理技术受到了很大关注<sup>[9]</sup>,它对阵列覆盖空域进行离散采样得到完备阵列流形矩阵,将阵列接收信号在该矩阵上进行稀疏

通信作者:陈希信      Email: chenxixin2002@sina.com  
收稿日期:2020-04-23      修订日期:2020-06-29

表示,然后利用匹配追踪或者  $l_1$  范数重构算法得到空域离散网格上的空间谱图。研究表明,该技术在超分辨率能力、低信噪比与小样本适应能力等方面表现出了相对于 MUSIC 类方法的明显优势,而这些正是解决低仰角目标测高问题所需要的。因此,本文提出基于阵列接收信号空域稀疏性的低仰角雷达目标测高方法,并通过实测数据处理考察其测量性能

## 1 阵列信号模型

假设测高雷达阵为  $M$  元均匀垂直线阵,某个低仰角目标的  $K$  个多径回波  $s_k(l)$  ( $k=1,2,\dots,K;l=1,2,\dots,L$ ) 以直达波和地面反射波形式分别从方向  $\theta_k$  进入阵列,  $L$  为相干脉冲数,则  $M \times L$  维阵列接收信号为

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

式中:  $\mathbf{A}$  为  $M \times K$  维阵列响应矩阵;  $\mathbf{S}$  为  $K \times L$  维多径回波信号;  $\mathbf{N}$  为  $M \times L$  维高斯白噪声矩阵。测高问题描述为从阵列接收信号  $\mathbf{X}$  中估计目标直达波的入射方向,该方向在俯仰上通常高于地面多径反射波的方向。

式(1)中  $K$  个多径回波的方向只占感兴趣空域  $[-\theta_0, \theta_0]$  的一小部分,将该空域均匀离散化,得到方向集  $\{\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2, \dots, \bar{\theta}_I\}$ , 满足  $K \ll I, K < M < I$ , 每个  $\bar{\theta}_i$  代表一个潜在的多径回波方向。空域离散化密度与方向估计精度成正比,如果离散化足够密,则  $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K\} \subset \{\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2, \dots, \bar{\theta}_I\}$ , 当  $\bar{\theta}_i \in \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K\}$  时,该方向对应一个真实的多径回波;若离散化不够密,则会带来离散化估计偏差。

构造如下  $M \times I$  维过完备字典

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ e^{j\phi(\bar{\theta}_1)} & e^{j\phi(\bar{\theta}_2)} & \dots & e^{j\phi(\bar{\theta}_I)} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ e^{j(M-1)\phi(\bar{\theta}_1)} & e^{j(M-1)\phi(\bar{\theta}_2)} & \dots & e^{j(M-1)\phi(\bar{\theta}_I)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}(\bar{\theta}_1) & \mathbf{a}(\bar{\theta}_2) & \dots & \mathbf{a}(\bar{\theta}_I) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $\phi(\bar{\theta}_i) = 2\pi/\lambda d \sin(\bar{\theta}_i)$ ,  $\lambda$  为波长,  $d$  为阵元间距;  $\mathbf{a}(\bar{\theta}_i)$  ( $i=1,2,\dots,I$ ) 表示潜在多径回波的导向向量。

在式(2)的字典下,式(1)可以表示为

$$\mathbf{X} = \bar{\mathbf{A}} \bar{\mathbf{S}} + \bar{\mathbf{N}} \quad (3)$$

式中:  $\bar{\mathbf{S}}$  为  $I \times L$  维信号矩阵,当  $\bar{\theta}_i \in \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K\}$  时,矩阵  $\bar{\mathbf{S}}$  的第  $i$  行元素的值等于  $\mathbf{S}$  中该方向的回波信号值,否则该行元素都等于零,因此矩阵  $\bar{\mathbf{S}}$  是行稀疏的。  $\bar{\mathbf{S}}$  中的非零行及其在矩阵中的位置分别表征了多径回

波的幅度和方向信息。将  $\bar{\mathbf{A}}$  视作测量矩阵,它将  $I \times L$  维行稀疏矩阵  $\bar{\mathbf{S}}$  压缩为  $M \times L$  维矩阵  $\mathbf{X}$ , 因此式(3)实际是带噪情况下的压缩感知信号模型。

## 2 目标高度测量

求解式(3)中行稀疏矩阵  $\bar{\mathbf{S}}$ , 其中表示最大角度的非零行位置即目标的仰角  $\theta_t$ 。式(3)可以通过如下凸优化问题求解<sup>[10]</sup>

$$\begin{cases} \min \|\mathbf{N}\|_{\text{F}}^2 + r \|\mathbf{S}\|_{p,q}^p \\ \text{s. t. } \mathbf{X} = \bar{\mathbf{A}} \bar{\mathbf{S}} + \mathbf{N} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\|\cdot\|_{\text{F}}$  表示 F-范数;  $r$  为正则化因子,用于折中接收数据拟合误差和模型稀疏度,  $\|\mathbf{S}\|_{p,q}^p$  定义为

$$\|\mathbf{S}\|_{p,q}^p = \sum_{i=1}^I (\|\mathbf{S}(i, :)\|_q)^p = \sum_{i=1}^I \left( \sum_{l=1}^L |\mathbf{S}(i, l)|^q \right)^{\frac{p}{q}} \quad (5)$$

式中:  $q \geq 2, 0 < p \leq 1$ 。

考虑地球球面地面的影响,需要对估计角度进行修正,修正后的目标高度为<sup>[11]</sup>

$$H_t = R_1 \sin(\theta_t) + \frac{R_1^2}{2a_e} \quad (6)$$

式中:  $R_1$  为目标距离;  $a_e$  为有效地球半径,约为 8 500 km。

## 3 实测数据处理与分析

这一节通过实测数据处理检验所提出方法的性能。实测数据用一套米波测高试验系统获取,该系统由一部米波两坐标雷达和垂直测高天线两部分组成。两坐标雷达天线旋转扫描,发射线性调频相干脉冲串。垂直测高天线是由八木天线单元组成的 8 行 2 列均匀线阵,波束宽度约  $16^\circ$ , 天线架设在农田上,地势平坦, 30 km 外为大海。观测目标是上海与青岛间的民航机,目标距离 110 km ~ 190 km。在两坐标雷达天线旋转的每一圈中,测高天线都收到若干个重复周期的目标回波。对于任一圈中的所有接收回波,首先进行通道幅相误差修正和脉冲压缩,检测目标并获得目标距离,然后取出该距离上满足一定信噪比的所有周期,通过该文方法测量目标高度。图 1 示出了阵列接收数据的数字波束形成,可见目标回波是多径传播,包括潜在直达波和地面反射波,由该图测得目标高度为 13 000 m,实际目标高度为 9 770 m。图 2 示出了文中空域稀疏性方法得到的角度谱,可以看到两个强尖峰,由该图测得目标高度为 9 680 m,验证了该方法的性能。

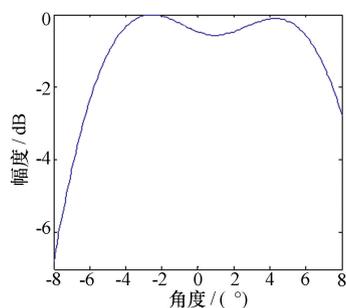


图1 常规波束形成测角

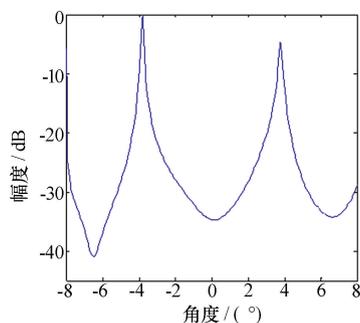


图2 空域稀疏法测角

图3是利用空域稀疏法测量的民航飞机的测高结果,图中“·”表示民航飞机携带的二次雷达测量的自身高度值,作为飞机的真实高度,“\*”表示利用空域稀疏法测量的民航飞机的高度。图4是高度测量误差。

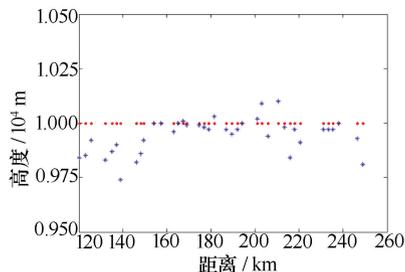


图3 米波实验雷达与二次雷达测高的比较

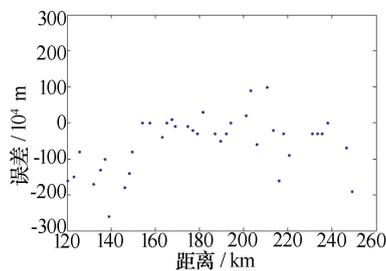


图4 目标高度测量误差

#### 4 结束语

受到地面多径反射的影响,利用单脉冲技术测量低仰角目标的高度,精度很低,而空域稀疏阵列信号处理在超分辨、低信噪比与小样本适应能力等方面的优势,正是低角测量雷达需要的。利用目标回波的空域稀疏性,该文将测高阵列接收信号进行稀疏表示,转化为压缩感知信号模型,然后利用优化算法估计目标仰角,进而得到目标高度。米波雷达试验数据处理表明,该文方

法的测量精度较高,显著优于常规的单脉冲技术。

#### 参考文献

- [1] BOSSE E, TURNER R M, RODY J. The use of propagation in MUSIC and maximum likelihood for low-angle tracking[C]// Proceedings of IEEE International Radar Conference. Pacific Grove, CA: IEEE Press, 1988: 193-198.
- [2] LITVA J. Use of highly deterministic model in signal-bearing estimation[J]. Electronics Letters, 1989, 25(5): 346-348.
- [3] LO T, LITVA J. Use of a highly deterministic multipath signal model in low-angle tracking[J]. IEE Proceedings of Radar and Signal Processing, 1991, 138(2): 163-171.
- [4] JAO J K. A matched array beamforming technique for low angle radar tracking in multipath[C]// Proceedings of 1994 National Radar Conference. Atlanta, GA: IEEE Press, 1994: 171-176.
- [5] 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.  
HU Xiaoqin, CHEN Jianwen, WANG Yongliang. Research on meter-wave radar height-finding multipath model[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(4): 651-657.
- [6] LI J, STOICA P. Efficient mixed-spectrum estimation with application to target feature extraction[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(2): 281-295.
- [7] 倪菁. 基于RELAX预处理的米波雷达低角测高[J]. 现代雷达, 2010, 29(5): 39-41.  
NI Jing. RELAX based height finding of meterwave radar low elevation target[J]. Modern Radar, 2010, 29(5): 39-41.
- [8] SHANG S, ZHANG S H. Investigation on low-angle tracking technique for tactical radar[C]// Proceedings of 2001 CIE International Conference on Radar. Beijing: IEEE Press, 2001: 633-636.
- [9] 刘章孟. 基于信号空域稀疏性的阵列处理理论与方法[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.  
LIU Zhangmeng. Spatial sparsity-based array signal processing theory and method[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [10] COTTER S F, RAO B D, KJERSTI E. Sparse solutions to linear inverse problems with multiple measurement vectors[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(7): 2477-2488.
- [11] SKOLNIK M I. 雷达手册[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2005.  
SKOLNIK M I. Radar handbook[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.

#### 作者简介:

陈希信 男,1972年生,博士,研究员级高级工程师,研究方向为雷达信号处理;

龙伟军 男,1979年生,博士,研究员级高级工程师,研究方向为机会阵雷达、雷达信号处理。