

文章编号: 2095-4980(2019)05-0845-05

一种实波束扫描雷达回波建模方法

邱德厚

(中国电子科技集团公司 第三十八研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 提出一种实波束扫描雷达前视成像回波建模方法。使用实波束扫描实现雷达平台正前视区域二维高分辨成像。根据雷达波束掠过成像扇区的时间先后关系, 将成像扇区方位向回波数据表征为天线主瓣波束采样序列与目标反射率分布函数沿成像扇区方位向采样序列之间卷积的形式。最后, 通过仿真数据验证了本建模方法的有效性。

关键词: 前视成像; 回波建模; 卷积反演; 目标检测

中图分类号: TN958.7; O451 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201905.0845

An echo modeling method of real beam scanning radar

QIU Dehou

(The 38th Research Institute, China Electronic Technology Corporation, Hefei Anhui 230031, China)

Abstract: A method is presented for echo modeling of real beam scanning radar. Aiming at application requirement of two-dimensional high resolution imaging in the forward area of radar platform, a technical approach is put forward by using real beam scanning radar platform. The basic idea is to convert the azimuth echo data to the convolution form of main lobe antenna beam sampling sequence and the target reflectivity sampling sequence along the imaging sector orientation, according to radar beam scanning time for imaging sector. Finally, the effectiveness of the modeling method is verified by simulation results.

Keywords: forward vision imaging; echo modeling; deconvolution algorithm; object detection

雷达平台正前视区域二维高分辨成像技术, 在对地搜索、对海探测与成像、飞机盲降、地形匹配、对地攻击、导弹末制导领域有着迫切的应用需求^[1-2]。扫描雷达根据天线波束掠过成像场景的时间先后关系, 并融合空间目标散射特性的先验信息, 使用计算数学的方法处理成像扇区回波信号, 实现雷达正前视探测区域的二维高分辨成像^[1-5]。扫描雷达前视区域的距离向分辨率, 可通过脉冲压缩的方式提高。扫描雷达方位向分辨率受发射信号波长和天线孔径的制约: 降低信号波长会受雨衰等因素的影响, 导致雷达系统性能的降低; 若增加天线口径, 提高雷达方位分辨率, 会限制雷达对平台的适应性^[6]。因此, 需要寻找新的技术途径, 突破系统参数对扫描雷达成像方位分辨率的限制。

雷达前视成像距离维的高分辨可通过发射宽带信号实现, 而方位维高分辨成像在实现上则有不同的技术途径。为有效提高方位向高分辨力, 国内外专家学者进行了前期研究, 主要针对雷达观测目标的视角变化情况, 提出实孔径和合成孔径两类技术途径^[6]。合成孔径成像技术的主要局限是只能对飞行器侧视区域成像, 其原因是该技术以雷达观测目标的视角存在变化为前提, 导致其无法实现雷达平台正前视区域成像^[7-9]。这是因为前视成像时, 雷达观测目标的视角并没有明显变化。为实现前视成像, 利用实波束扫描获得成像扇区方位向回波数据, 再通过适当的信号处理, 可以显著改善雷达角分辨率或改善孤立目标的显示效果, 其主要途径有: 单脉冲锐化^[10]、阵列处理^[11]和卷积反演^[12-15]。

将扫描雷达方位回波建模为类卷积过程, 经过适当处理, 使其转化为卷积过程, 然后使用卷积反演方法, 实现前视区域方位向高分辨成像是雷达前视二维高分辨成像的一个新的技术途径。因此, 建立相应的回波模型成为研究雷达前视成像方法的基础, 这包括前视成像的几何模型和信号模型。

研究成像模型, 即根据信号传播过程, 构建距离历史表达式, 并以此导出雷达回波信号的解析表达式。在此基础上, 研究雷达前视成像理论和方法, 将雷达方位向回波信号建模为天线与目标散射系数的卷积过程, 为

使用卷积反演方法, 实现雷达前视区域二维高分辨成像提供前提条件。针对雷达前视成像的应用需求, 开展了基于广义逆滤波方法的前视超分辨成像研究^[3]。随着凸优化方法在雷达信号处理领域的广泛应用, 基于卷积反演实现雷达前视超分辨成像成为该领域的研究热点^[6-9]。这些方法在实现雷达前视成像时, 假设了方位向回波数据是天线主瓣采样序列与成像扇区目标散射率分布函数沿方位向采样序列的类卷积运算结果^[12]。这种回波建模方法虽能在一定程度上反映方位向回波数据的获取过程, 但无法准确描述前视成像扇区边缘目标散射系数对回波数据获取过程的影响。基于文献[1]已取得的成果, 本文建立实波束扫描雷达前视成像回波精细模型。

1 扫描雷达前视成像几何模型

雷达系统工作模型如图 1 所示。假设在 $t=0$ 时刻, 雷达平台位于 A 点, 雷达与成像区域内目标初始距离为 R_0 , 扫描角为 θ_0 , 目标方位角为 φ_0 , 擦地角为 ϕ 。经时间 t 后, 雷达平台运动至 B 点, 雷达与成像场景内目标距离为 $R(t)$ 。在 $\triangle ABP_1$ 中, 根据余弦定理可计算出距离历史 $R(t)$ 为:

$$R(t) = \sqrt{R_0^2 + (Vt)^2 - 2R_0Vt \cos \varphi_0 \cos \phi} \quad (1)$$

式中 V 为雷达平台速度。

式(1)含有根式, 给实际的雷达回波信号处理带来了计算上的困难。为此, 首先对距离历史 $R(t)$ 在 $t=0$ 处进行泰勒展开, 展开后的距离历史表达式为:

$$R(t) = R_0 - (V \cos \phi \cos \varphi_0)t + \frac{V^2 \sin^2 \phi \sin^2 \varphi_0}{2R_0} t^2 + o(t) \quad (2)$$

式中 $o(t)$ 为时间变量的高阶无穷小。

在实波束扫描雷达前视成像时, 雷达平台速度 V 与时间 t 的乘积远小于距离 R_0 , 即 $Vt \ll R_0$ 。此条件下, 式(2)中关于时间变量 t 的二次项及其高次项可忽略不计。距离历史可表示为:

$$R(t) \approx R_0 - (V \cos \phi \cos \varphi_0)t \quad (3)$$

从式(3)可以看出, 距离历史 $R(t)$ 与时间变量 t 之间是严格的线性关系。同时式(3)还表示了雷达平台与目标之间的距离走动轨迹与时间变量之间的线性关系, 即在雷达前视成像扇区内, 不同目标点的斜距的斜率近似相等。雷达平台在运动过程中, 天线波束沿平台正前视区域的方位向进行扫描, 瞬时扫描角度和初始扫描角度 θ_0 的关系为:

$$\theta = \theta_0 + \omega t \quad (4)$$

从图 1 中可以得出瞬时扫描角和擦地角的关系为:

$$\cos \theta = \cos \varphi \cos \phi \quad (5)$$

由式(4)、式(5), 可以得出时间变量和扫描角度之间的关系为:

$$t = \frac{\theta - \theta_0}{\omega} = \frac{\varphi - \varphi_0}{\omega} \cos \phi \quad (6)$$

将式(6)代入距离历史表达式, 可得

$$R(t) = -\frac{V \cos \varphi_0 \cos^2 \phi}{\omega} \varphi + \frac{V \cos^2 \phi \cos \varphi_0}{\omega} \varphi_0 + R_0 \quad (7)$$

由式(7)可知, 雷达平台与 $R(t)$ 是关于瞬时扫描角度 φ 的一次函数, 其斜率为 $-\frac{V \cos \varphi_0 \cos^2 \phi}{\omega}$ 。这种关系表明, 位于不同方位角度目标的多普勒质心与角度 φ 为线性关系。另一方面, 由于雷达成像扇区小, $|\varphi| \leq 10^\circ$, 即 $\cos \varphi \approx 1$ 。此时, $R(t)$ 可近似表示为:

$$R(t) \approx -\frac{V \cos^2 \phi}{\omega} \varphi + \frac{V \cos^2 \phi}{\omega} \varphi_0 + R_0 \quad (8)$$

因此, 当成像扇区满足 $|\varphi| \leq 10^\circ$ 时, 位于不同方位角目标的多普勒质心近似相等。

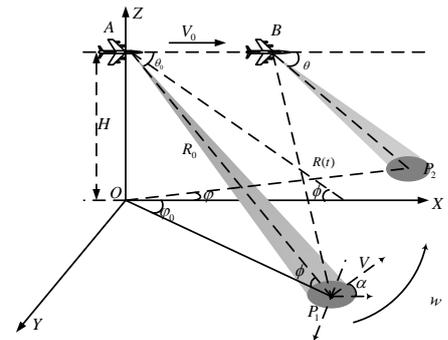


Fig.1 Geometry relationship of scanning radar
图 1 雷达与目标几何关系示意图

$$\begin{bmatrix} g_1 \\ \vdots \\ g_k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & \cdots & h_{-m} & & 0 \\ & \ddots & \ddots & & \\ & & h_m & \ddots & \\ & & & \ddots & h_{-m} \\ & & & & \vdots \\ & & & & h_m & \cdots & h_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_{k-1} \\ f_k \end{bmatrix} \tag{18}$$

对比式(17)和式(18)可以发现，成像扇区边缘目标散射系数对回波数据的影响可通过卷积矩阵加以表征。式(17)中的卷积矩阵通过镜面变换，表征成像扇区目标散射系数分布的连续性；式(18)中的矩阵表征成像扇区边缘以外的目标散射系数全为零，其在物理意义上表征成像扇区以外目标散射系数对于回波数据没有影响，这种假设将会导致后续成像处理时，成像扇区边缘目标信息的丢失。

3 仿真验证

使用 Matlab 软件，通过仿真数据验证本文提出的建模方法。仿真参数中，天线波束扫描速度为 70 %s，天线扫描范围为 $-10^\circ \sim +10^\circ$ ，天线主瓣宽度为 3° ，信号载频为 9.6 GHz，信号带宽为 1.5 MHz，雷达平台速度为 100 m/s，脉冲重复频率为 2 000 Hz，雷达与目标初始斜距为 70 km，雷达平台高度为 2.5 km。成像扇区目标反射率分布函数剖面如图 2 所示。雷达天线主瓣如图 3 所示。根据文中给出的卷积矩阵构造方案，首先将天线主瓣采样点构成的序列排成式(15)中等式右边的矩阵形式，对应的矩阵二维、三维图分别如图 4、图 5 所示。在此基础上，按文中给出的技术路径，将式(15)变换成式(17)中等式右边的矩阵，其对应的二维、三维矩阵分别如图 6、图 7 所示。在此基础上，将变换后的卷积矩阵乘以图 2 中对应的向量，并叠加 15 dB 的噪声，得到的回波图像如图 8 所示。

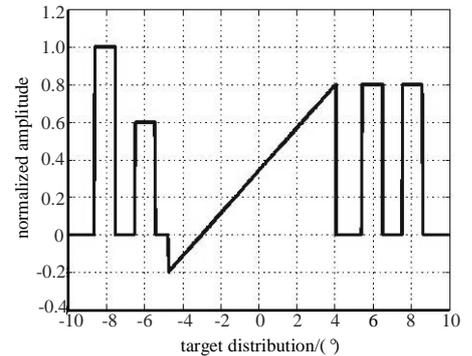


Fig.2 Location of targets in the simulated scene
图 2 成像扇区目标散射系数分布剖面

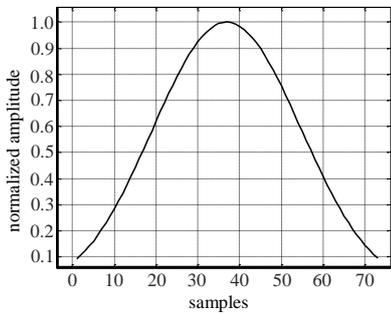


Fig.3 Antenna pattern
图 3 天线方向图

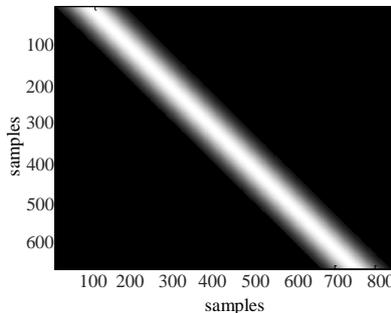


Fig.4 Two dimensional image of the antenna pattern before transformation
图 4 变换前的天线方向图(二维)

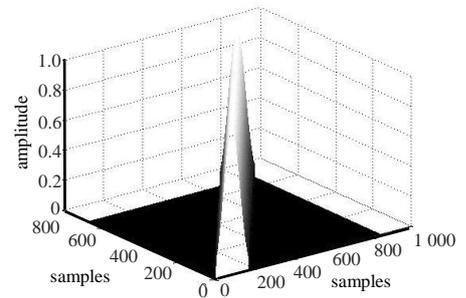


Fig.5 Three dimensional image of the convolution matrix before transformation
图 5 变换前的卷积矩阵图像

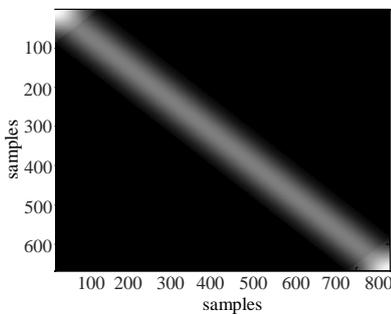


Fig.6 Two dimensional image of the antenna pattern after transformation
图 6 变换后的天线方向图

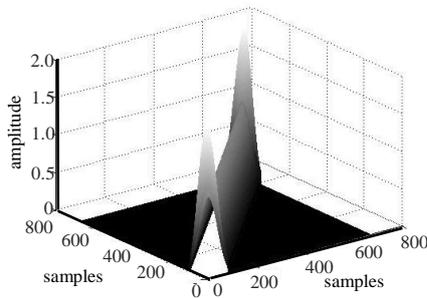


Fig.7 Three dimensional image of the antenna pattern after transformation
图 7 变换后的天线方向图(三维)

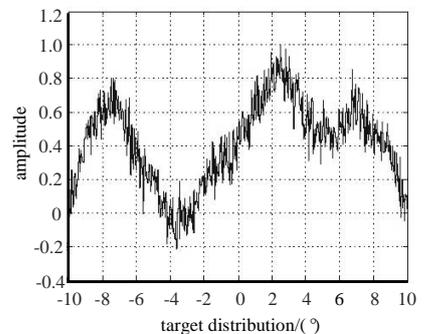


Fig.8 Profile of echo data
图 8 回波数据剖面

4 结论

本文提出一种实波束扫描雷达前视成像回波建模方法。根据前视成像时，成像扇区边缘目标散射系数对回

波数据的影响，分别对卷积矩阵进行变换，再将变换后的卷积矩阵与目标反射率采样序列进行运算。这种方法能够准确描述成像扇区目标散射系数分布的连续性，同时可提高成像扇区边缘目标分辨力。

参考文献：

- [1] 查月波. 基于凸优化的雷达超分辨成像理论与方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2016. (ZHA Yuebo. Radar super-resolution imaging theory and methods study based on convex optimization[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2016.)
- [2] 杨建宇. 双基地合成孔径雷达技术[J]. 电子科技大学学报, 2016,45(4):482-501. (YANG Jianyu. Bistatic synthetic aperture radar technology[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2016,45(4):482-501.)
- [3] ZHA Y,HUANG Y,YANG J. Augmented Lagrangian method for angular super-resolution imaging in forward-looking scanning radar[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2015,9(1):096055.
- [4] 李少东,杨军,陈文峰,等. 基于压缩感知理论的雷达成像技术与应用研究进展[J]. 电子与信息学报, 2016,38(2):495-508. (LI Shaodong,YANG Jun,CHEN Wenfeng,et al. Overview of radar imaging technique and application based on compressive sensing theory[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016,38(2):495-508.)
- [5] 丁义元,杨建宇,张卫华,等. 改进实孔径雷达角分辨力的广义滤波方法[J]. 电子学报, 1993(9):15-19. (DING Yiyuan,YANG Jianyu,ZHANG Weihua,et al. Improvement of angular resolution of real aperture radar via generalized inverse filtering[J]. Acta Electronica Sinica, 1993(9):15-19.)
- [6] 查月波,黄钰林,夏永红,等. 扫描雷达角超分辨成像方法:CN 103487802 A[P]. 2014. (ZHA Yuebo,HUANG Yulin,XIA Yonghong,et al. An angular super-resolution imaging method for scanning radar:CN 103487802 A[P]. 2014.)
- [7] ZHA Y,HUANG Y,YANG J. An iterative shrinkage deconvolution for angular super-resolution imaging in forward-looking scanning radar[J]. Progress in Electromagnetics Research B, 2016,65(1):35-48.
- [8] ZHA Y,ZHANG Y,HUANG Y,et al. Bayesian angular super resolution algorithm for real-aperture imaging in forward-looking radar[J]. Information, 2015,6(4):650-668.
- [9] ZHA Y,HUANG Y,SUN Z,et al. Bayesian deconvolution for angular super-resolution in forward-looking scanning radar[J]. Sensors, 2015,15(3):6924-6946.
- [10] 李悦丽,梁甸农,黄晓涛. 一种单脉冲雷达多通道解卷积前视成像方法[J]. 信号处理, 2007,23(5):699-703. (LI Yueli, LIANG Diannong,HUANG Xiaotao. A multi-channel deconvolution based on forward-looking imaging method in monopulse radar[J]. Signal Processing, 2007,23(5):699-703.)
- [11] 马晓峰,沈爱松,盛卫星,等. 可控测角精度和范围的数字阵列单脉冲和差波束优化[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(12):3107-3113. (MA Xiaofeng,SHENG Aisong,SHENG Weixing,et al. Sum and difference patterns optimization for digital array with controllable accuracy and range of angle estimation[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2016,38(12):3107-3113.)
- [12] ZHA Y,HUANG Y,YANG J,et al. An improved Richardson-Lucy algorithm for radar angular super-resolution[C]// 2014 IEEE Radar Conference. Cincinnati,OH,USA:IEEE, 2014:0406-0410.
- [13] LI D,HUANG Y,YANG J. Motion platform forward-looking real-beam radar echo modeling[C]// Proceedings of 2011 IEEE CIE International Conference on Radar. Chengdu,China:IEEE, 2011:1370-1373.
- [14] 张寅,王月,黄钰林,等. 一种基于稀疏约束的实波束扫描雷达角超分辨成像方法:CN 104950305 B[P]. 2017. (ZHANG Yin,WANG Yue,HUANG Yulin,et al. An angular super-resolution imaging method for real beam scanning radar based on sparse constrain:CN 104950305 B[P]. 2017.)
- [15] 张寅,王月,黄钰林,等. 一种海杂波背景下前视海面目标角超分辨成像方法:CN 104950306 B[P]. 2017. (ZHANG Yin,WANG Yue,HUANG Yulin,et al. An imaging method of forward-looking angular super-resolution for sea surface target in sea clutter background:CN 104950306 B[P]. 2017.)

作者简介：



邱德厚(1975-), 男, 辽宁省北镇市人, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为雷达系统工程与总体. email:qiudeh007@163.com.