

文章编号: 2095-4980(2022)03-0208-05

基于 RCS 静态宽带数据的雷达目标成像算法

郝晓军, 杨晓帆, 赵宏宇, 李廷鹏, 李金梁

(电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 河南 洛阳 471003)

摘要: 利用宽带雷达目标电磁散射特性数据可以实现雷达目标的一维距离像, 在二维像实现过程中, 传统做法需要利用雷达目标电磁回波的多普勒频率以实现雷达目标的方位像。探讨了基于宽带雷达散射截面(RCS)静态数据(没有多普勒频率)的二维成像算法, 突破了传统需要多普勒频移数据才能实现二维雷达像的限制。最后探讨了调整成像算法若干参数的不同成像效果。本文工作以期能够为不同雷达成像应用场景提供技术及理论支撑。

关键词: 雷达目标散射截面; 雷达成像; 聚焦

中图分类号: TN957

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021342

Radar target imaging algorithm based on RCS static broadband data

HAO Xiaojun, YANG Xiaofan, ZHAO Hongyu, LI Tingpeng, LI Jinliang

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effect on Electronics&Information System,
Luoyang Henan 471003, China)

Abstract: One-dimensional range profile of radar target can be realized by using wide band electromagnetic scattering characteristic data of radar target. In the process of realizing two-dimensional imaging algorithm, the Doppler frequency is required traditionally for azimuth imaging. In this paper, a two-dimensional imaging algorithm based on wideband Radar Cross Section(RCS) static data (without Doppler frequency) is discussed, which breaks through the traditional limitation that Doppler frequency shift data is necessary to realize two-dimensional radar imaging. Finally, several different parameters of imaging algorithm are adjusted for realizing different imaging effects. This work is expected to provide the technical and theoretical supports for different radar imaging application scenarios.

Keywords: Radar Cross Section(RCS); radar imaging; focus

在 SAR、ISAR 成像原理中, 通常依据距离—多普勒谱可以实现雷达目标强散射点的计算与成像^[1-2]。雷达随飞机运动而地面目标不动(SAR), 或者雷达在地面上固定不动, 目标相对于雷达运动(ISAR)。上述场景下, 通过距离压缩形成距离单元, 得到在距离向的分辨, 即一维距离像。在方位向, 同一距离单元内不同方位向的点可以通过不同的多普勒频移数据进行分辨。

上述算法均需要雷达目标回波的多普勒频移数据以实现雷达目标的二维成像, 但在很多场景中没有多普勒频域数据, 比如基于电磁计算而获取的雷达目标宽带 RCS 数据; 在微波暗室内, 静止雷达目标的宽带 RCS 测量数据。这些数据均不包含多普勒频率, 因此对于雷达目标的方位像需要另辟蹊径, 采用其他手段实现成像。

在利用静态宽带 RCS 数据实现雷达目标二维像的计算过程中, 可以利用宽带扫频数据实现雷达目标的一维距离像; 然后变换激励源相对于雷达目标的方位, 从另一个角度再次照射目标, 进而获取不同照射角度下的一维距离像。以此类推, 通过多角度一维距离像的聚焦处理, 最终实现雷达目标强散射点的计算与成像。

文章基于上述设计思路, 通过算法实现了基于静态宽带 RCS 数据的雷达目标二维成像。一维距离像实现、成像区域的数据聚焦处理以及不同成像参数的成像效果影响都在文章中做了较为详细的讨论, 以期加深对静态宽带 RCS 数据成像算法的理解。

1 雷达目标一维距离像实现

雷达成像模型实质上是多散射点定位模型，即利用目标回波估计出目标强散射点的幅度及其在二维平面上的分布。假设成像时目标与雷达的相对几何关系如图 1 所示。

XOY 为固定于目标上的直角坐标系，雷达视线 $RLOS$ 与 X 轴的夹角以 θ_m 表示，目标参考点 O 与雷达的距离以 R_{om} 表示，则第 K 个散射点 (x_k, y_k) 与雷达的距离表示为 r_{km} 。

一维距离像的实现是整个雷达目标二维成像的基础，以电磁计算宽带数据实现二维雷达目标成像为例：通过计算扫频宽带 RCS，可以获取特定角度 θ_m 下的复 RCS 序列。利用逆傅里叶变换，就可以得到成像区域的一维距离像，下面给出其基本原理。

首先根据目标 RCS 的复数定义^[3-4]，获取雷达目标远场的电磁散射数据，可得

$$R(\omega) = \frac{\sqrt{\sigma(\omega)}}{2\sqrt{\pi}} \tag{1}$$

式中 $R(\omega)$ 表示目标 RCS 的复值序列。具体算法实现时，可仅对 RCS 数值做开方处理，省去系数 $2\sqrt{\pi}$ 的处理。

应用 IFFT，实现一维距离像可表示为(省去不必要的繁琐系数)：

$$R(t) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} R(\omega) e^{j\omega t} d\omega \tag{2}$$

在具体算法实现过程中，可以利用现有的 IFFT() 函数快速实现一维距离像的计算。通常该函数的宽带数据输入的频率范围均从 0 Hz 开始(Matlab 就是如此)，满足 $BW = \omega_2 - \omega_1$ ，明显此类函数不能满足 $\omega_1 \rightarrow \omega_2$ 扫频信号逆傅里叶变换的需求。为应用现有成熟的 IFFT() 函数，以简化整个数学处理以及程序设计的复杂程度，可对式(3)做进一步变换，即

$$R(t) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} R(\omega) e^{j\omega t} d\omega e^{j\omega_1 t} \int_0^{\omega_2 - \omega_1} R(\omega) e^{j\omega t} d\omega = e^{j\omega_1 t} \text{IFFT}(\omega) \Big|_{\omega_2 - \omega_1} = e^{j\omega_1 t} R_0(t) \tag{3}$$

式中： $R_0(t)$ 为 $0 \rightarrow \omega_2 - \omega_1$ 宽带频域信号的逆傅里叶变换，即相应带宽频域信号对应的一维距离像； $e^{j\omega_1 t}$ 为相位修正项， ω_1 为宽带频域信号的起始频率。根据时频变换的相关理论^[5]，时域信号乘以指数函数，对应于频域的搬移。因此式(3)可看做上述理论的具体体现。

因此，雷达目标某角度下一维距离像的具体实现等效于相应带宽频域信号(起始频率为 0 Hz)的一维距离像与相位修正项(利用起始频率计算)的乘积。

2 基于不同角度一维距离像聚焦处理

通过数学变换，可以获取雷达目标一维距离像。改变雷达目标 RCS 入射波的角度，即从不同角度多次扫频，可以获取雷达目标不同角度的一维距离像。将得到的多帧雷达目标不同角度下的一维距离像进行聚焦处理，可实现雷达目标强散射点的计算及成像。计算示意图如图 2 所示。

计算过程中，首先划定目标成像区域，如图 3 所示，假定圆形区域半径为 R ，则一维距离像的空间尺度为 $2R$ 。

$$R = \frac{c}{2} \times \frac{N}{BW}$$

式中： c 为光速； N 为扫频频点数目； BW 为扫描带宽(Hz)。

应用平面波对成像目标进行照射，入射角度为 δ ，该角度 δ 下的一维距离像如图 3 中曲线所示，此处假设

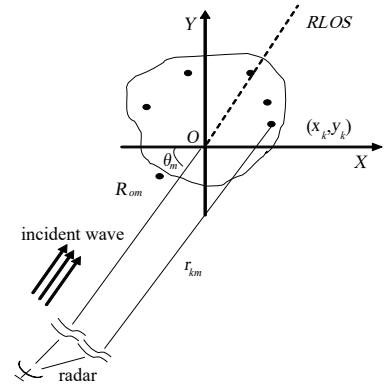


Fig.1 Relative geometric relationship between target and radar
图 1 目标与雷达的相对几何关系

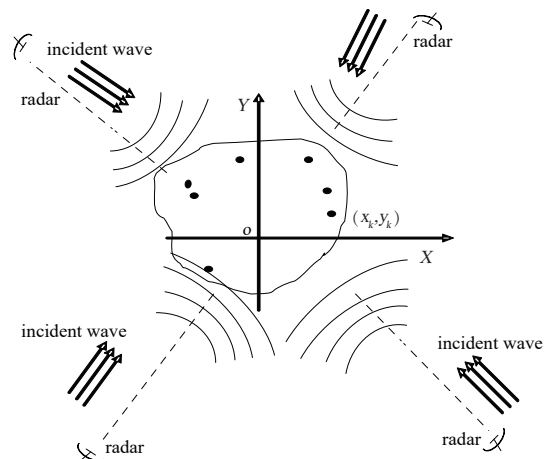


Fig.2 RCS calculation schematic at different angles
图 2 不同角度下的 RCS 计算示意图

一维距离像函数为 $RCS(L)$ ，即不同距离 L ，对应不同的强散射数值。

接下来需要将该一维距离像进行投影操作，由于是平面波照射，因此整个成像区域都对应于该入射角度的一维距离像，如图 3 中上下拓展的两个距离像。

依据几何关系，可知成像点 $P(x_p, y_p)$ 位于距离成像区域边缘长度为 L 的垂直线上，如图 3 中投影线 Line，根据一维距离像的定义，该线上的成像点应该具有相同的 RCS 数值。该投影线 Line 的几何方程可表示为：

$$y = -c \tan(\delta)x + R - L \sin \delta \quad (4)$$

代入投影点 $P(x_p, y_p)$ 的坐标值，可得一维距离像中的距离 L 表达式为：

$$L = R - (y_p + c \tan(\delta)x_p) \sin \delta \quad (5)$$

化简得：

$$L = R - (y_p \sin \delta + x_p \cos \delta) \quad (6)$$

因此，成像区域内的任何一个点 $P(x_p, y_p)$ ，对应入射角度 δ 的强散射数值可表示为 $RCS[R - (y_p \sin \delta + x_p \cos \delta)]$ 。

程序计算过程中，遍历所有成像区域的点。对不同入射角度的距离像进行累加处理。

用 Matlab 编程进行验证，静态雷达目标散射热点成像效果如图 4 所示。

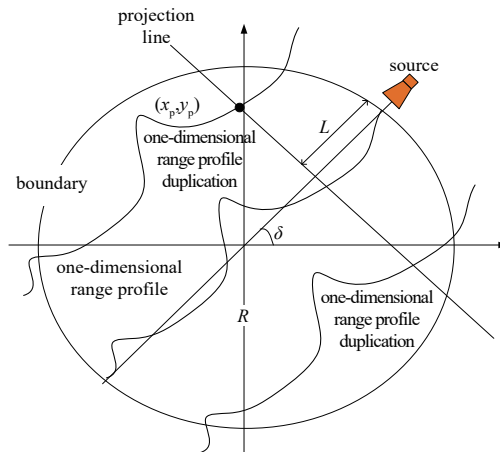


Fig.3 One-dimensional distance imaging focusing at different angles
图 3 不同角度下的一维距离像聚焦处理

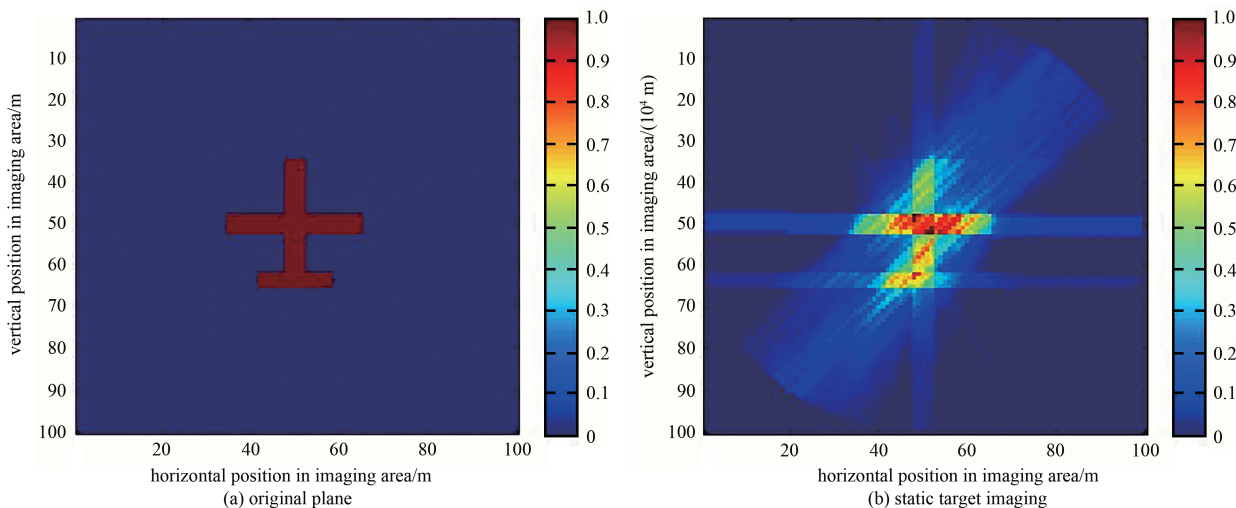


Fig.4 Imaging effect of static radar target
图 4 静态雷达目标成像效果图

3 不同成像参数成像效果讨论

通过分析及仿真计算，可以看出静态雷达目标成像的关键是一维距离像的实现及不同角度下一维距离像的聚焦处理。在一维距离像的实现过程中，主要分为两步：宽带频域数据(起始频率为 0 Hz)的一维距离像计算与相位修正。

针对雷达目标不同角度下一维距离像的两个部分，分别取相反数(程序实现中乘以“-1”)，某型坦克的最终成像效果如图 5 所示。

仿真条件为：中心频率 10 GHz，带宽 500 MHz，角度范围与扫频范围内均匀选取 51 个离散点。

首先一维距离像的取逆，可以理解为时域强散射点分布的对称翻转，因此对于图 5(b)的成像效果较为容易理解，即在一维距离像的成像方向对称翻转。

考虑基于傅里叶变换原理，一维距离像是以 $2R$ 为周期分布。因此相位补偿取逆，根据式(6)，可以理解为成像点关于原点对称处理，即 $p(x_p, y_p) \rightarrow p'(-x_p, -y_p)$ ；同时一维距离像的变换公式(3)变换为 $R(t) = e^{j\omega_0 t} R_0(-t)$ 。根据上文分析，一维距离像取逆等效于距离像对称翻转。综合上述两种变换效果，相位补偿取逆等效于一维距离像在方位向对称翻转，如图 5(c)所示。

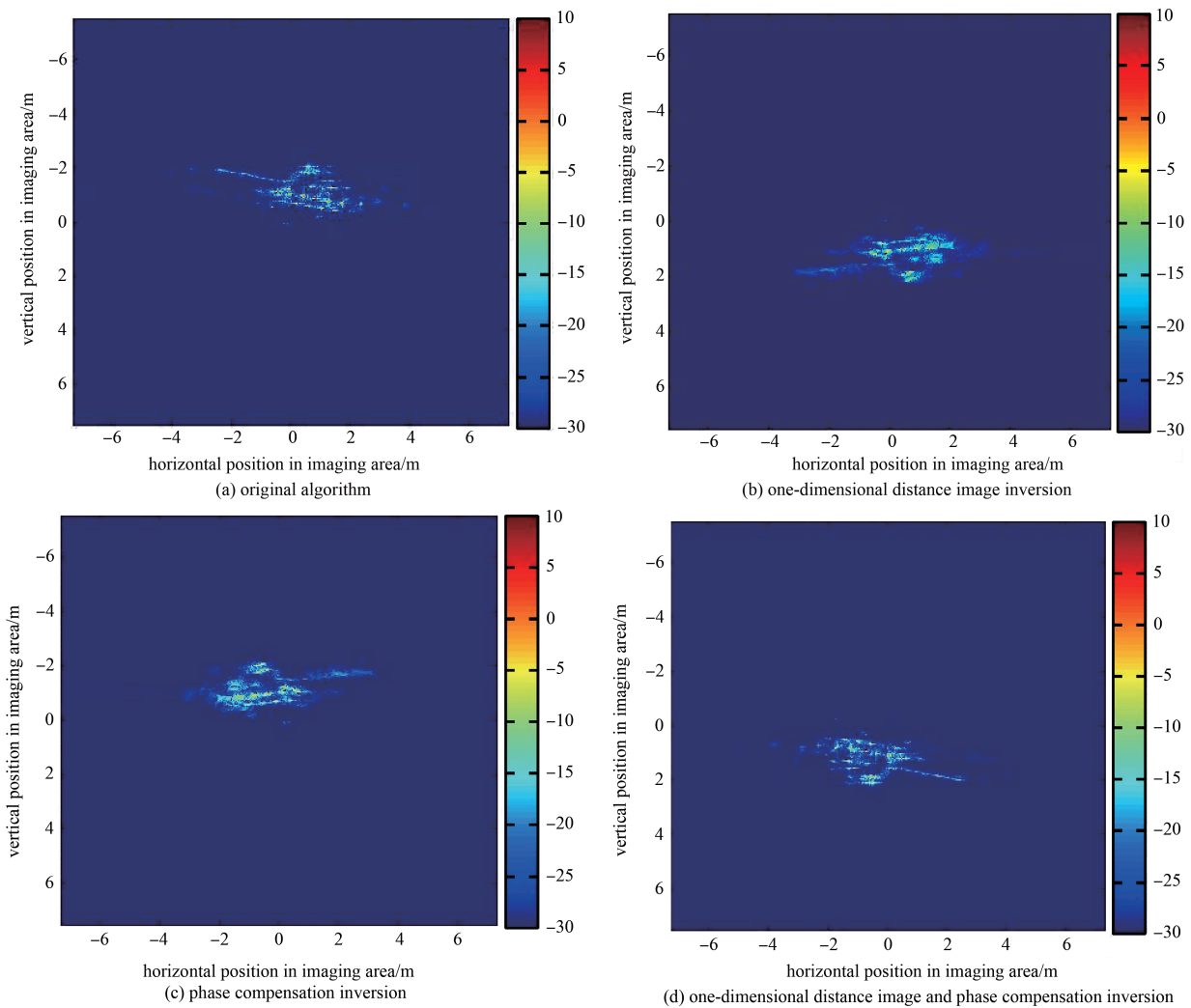


Fig.5 Comparison of imaging effects of static wideband radar targets under different parameters

图 5 不同成像参数下静态宽带雷达目标成像效果对比图

根据上述分析，一维距离像以及相位补偿同时取逆，则相当于雷达目标像关于原点对称翻转，如图 5(d)所示。算法的仿真计算步骤如图 6 所示。

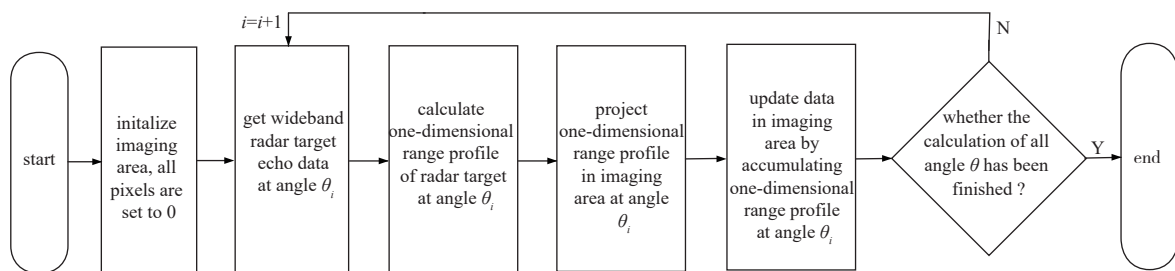


Fig.6 Flow of target imaging algorithm based on static broadband data

图 6 静态宽带数据雷达目标成像算法流程

4 结论

本文针对雷达目标静态宽带数据成像算法进行研究,通过一维距离像的实现以及不同角度一维距离像的聚焦处理,实现了雷达目标强散射中心的计算与成像,突破了雷达目标成像需要利用多普勒频移参数的限制。通过该算法的应用,可以在电磁计算领域,通过宽带 RCS 的计算,在缺少多普勒频移参数的前提下,实现雷达目标强散射热点的计算与成像。

该算法在生物医学电阻抗成像(Biological Electrical Impedance Imaging, BEII)中也有应用,通过身体不同部位施加激励,利用 IFFT 的一维距离像进行多角度聚焦,可以实现人体不同切面的医学成像^[6]。除此以外,该算法还可在大地探测等诸多领域有所应用^[7-8]。

本文仅仅是对宽带静态扫频数据成像算法做了初步探索,噪底处理、加窗滤波等还有待后续深入的研究。

参考文献:

- [1] 胡明春,王建明,孙俊,等. 雷达目标识别原理与实验技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2017. (HU Mingchun, WANG Jianming, SUN Jun, et al. Principle and experiments of radar target recognition technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017.)
- [2] CUELANDER J C, MCDONOUGH R N. 合成孔径雷达—系统与信号处理[M]. 北京:国防工业出版社, 2014. (CUELANDER J C, MCDONOUGH R N. Synthetic aperture radar: systems and signal processing[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.)
- [3] 南京电子技术研究所. 雷达手册[M]. 3版. 北京:国防工业出版社, 2020. (NRIET. Skolnik Radar Handbook[M]. 3rd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2020.)
- [4] 何国瑜,卢才成,洪家才,等. 电磁散射的计算和测量[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2006. (HE Guoyu, LU Caicheng, HONG Jiakai, et al. Calculation and measurement of electromagnetic scattering[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2006.)
- [5] 黄建国,刘树棠,张国梅. 离散时间信号处理[M]. 3版. 北京:国防工业出版社, 2015. (HUANG Jianguo, LIU Shutang, ZHANG Guomei. Discrete-time signal processing[M]. 3rd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.)
- [6] Electrical Impedance Tomography(EIT)[EB/OL]. [2022-03-07]. <http://mp.weixin.qq.com/s/YOlupGf4culZzEtNDmHEHw>.
- [7] 施云飞,宋千,金添,等. 基于时频原子分解的地雷目标特征提取及分类[J]. 国防科技大学学报, 2012,34(1):100-106. (SHI Yunfei, SONG Qian, JIN Tian, et al. Feature extraction and classification of landmine based on time-frequency atom decomposition[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012,34(1):100-106.)
- [8] 孙晓坤. 埋地地雷超宽带电磁散射特性及在目标检测中的应用[D]. 长沙:国防科技大学, 2008. (SUN Xiaokun. UWB electromagnetic scattering characteristic of buried landmine and its application in target detection[D]. Changsha, China: National University of Defense Technology, 2008.)

作者简介:

郝晓军(1978-), 男, 博士, 主要研究方向为复杂电磁环境效应、雷达信号处理. email:haoxiaojun790@sohu.com.

杨晓帆(1985-), 男, 博士, 主要研究方向为太赫兹波传播、信号处理.

赵宏宇(1986-), 男, 博士, 主要研究方向为雷达信号处理.

李廷鹏(1987-), 男, 博士, 主要研究方向为复杂电磁环境效应.

李金梁(1982-), 男, 博士, 主要研究方向为雷达信号处理、目标特性.