

文章编号: 2095-4980(2022)03-0195-05

前向散射雷达目标回波特性实验

徐志明, 王国玉, 郑雨晴, 张林宇, 艾小锋

(国防科技大学 电子科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 前向散射雷达是一种双基地角接近 180° 的特殊体制双基地雷达, 它通过捕获目标穿越基线时引起的回波起伏变化实现目标的检测, 因此对前向散射雷达目标回波特性的研究至关重要。以暗室实测的前向散射雷达回波数据为基础, 分析了球体、二面角、三面角、圆柱体雷达目标前向散射场与辐射场相干叠加的综合效应, 得出雷达目标进入前向散射区, 回波幅度先减小后小幅反弹的规律。该文可以增进对前向散射雷达目标回波特性的认知, 为目标检测与识别提供支撑。

关键词: 双基地雷达; 前向散射雷达; 暗室测量; 目标特性

中图分类号: TN974

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021339

Experimental study on target echo characteristics for forward scattering radar

XU Zhiming, WANG Guoyu, ZHENG Yuqing, ZHANG Linyu, AI Xiaofeng

(College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: Forward scattering radar is a particular bistatic radar scheme with the bistatic angle approaching 180° . According to the total field variation, the forward scattering radar can detect the target when targets pass through the baseline. Therefore, the research on echo characteristics of forward-scattering radar is of great significance. The effects of coherent superposition of scattering and radiation fields are analyzed based on the measurement data of metallic sphere, dihedral, trihedral, and cylinder radar targets in an anechoic chamber. It is summarized that when the radar target enters the forward scattering zone, the echo amplitude decreases firstly, and then rebounds slightly. This work helps to improve the knowledges about forward-scattering radar echo characteristics, and provides supports for the target detection and recognition technologies.

Keywords: bistatic radar; forward scattering radar; anechoic chamber measurement; target characteristics

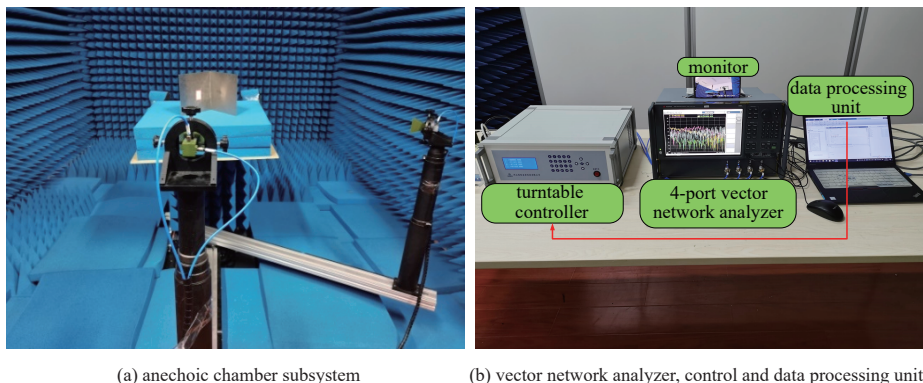
前向散射雷达是工作在目标前向散射区的一种特殊体制双基地雷达^[1]。前向散射雷达收/发天线分置, 具备天然的“抗干扰”和“抗摧毁”等优势^[2]; 由于工作在前向散射区, 目标的散射截面积与材料无关, 前向散射雷达具备出色的“反隐身”性能^[3]。因此, 前向散射雷达的研究越来越受到重视。目前, 前向散射雷达已广泛用于空中目标监视^[4-7]、地面目标分类^[8-10]等军事和民用领域。为充分发挥前向散射雷达的性能, 北京理工大学胡程教授团队^[11-12]研究了前向散射雷达的杂波分布特性以及抑制方法; 盛新庆教授团队^[13]利用电磁计算, 分析了目标散射场与辐射场矢量和随距离与方位的起伏特性。基于目前对前向散射雷达目标回波特性的认知, 目标穿越前向散射雷达基线, 天线接收到的回波能量降低, 信号波形出现“凹口”, 是前向散射雷达探测目标的基础。暗室环境中, 目标的位置、姿态、双基地角大小都可控, 可以更好地分析前向散射雷达回波特性。本文基于已获得的典型结构目标回波测量数据, 系统分析了前向散射雷达目标回波空域和时频域特性。

1 实验场景

电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室搭建了雷达目标双基地全极化散射测量系统。见图 1, 该系统由吸波材料、转台、目标支架以及矢量网络分析仪组成。其中吸波材料贴敷于移动隔离墙上, 可在室内自由

移动，灵活性较强；转台支持任意固定双基地角扫描和变双基地角扫描两种模式，角度控制误差小于0.2°；天线摇臂分别长为1.4 m和1.6 m，天线距离转台旋转中心的位置以及高度可手动调节，根据标尺还可通过旋转天线的方式实现任意倾角的线极化波；雷达目标采用平板型聚氨酯吸波材料支撑。

采用的雷达目标结构类型、尺寸参数、摆放角度见表1；测量参数见表2。



(a) anechoic chamber subsystem (b) vector network analyzer, control and data processing unit

Fig.1 Bistatic full-polarization scattering measurement system of radar targets
图1 雷达目标双基地全极化散射测量系统

2 数据分析

前向散射雷达探测过程中，目标散射回波和直达波的传播路径近似相等，难以从空域、时域和频域将两者分离。因此，前向散射雷达回波特性是散射波和直达波相干叠加后呈现的综合效应。本节重点分析前向散射雷达目标回波成分，以及双基地角增大过程中前向散射雷达目标回波的空域特性以及时频特性。

2.1 前向散射雷达目标回波成分

直达波和目标散射回波传播路径不同，传输时延不同，可以借助宽带信号的高分辨率特性，从距离维将直达波和目标散射回波两个分量分开，便于直观认识到两者的“共存性”以及强弱关系。

将金属球、二面角、三面角、圆柱体依次摆放在图1中二面角的位置，改变接收天线角度，实现双基地角 β 从0°到180°扫描。频率扫描范围为8~10 GHz，频率步进 Δf 为10 MHz。由于4类目标摆放位置相同，散射贡献较强的散射中心都位于同一个距离单元，因此4类目标在测量场景中均当作点目标处理。

对扫频数据进行逆快速傅里叶变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)，得到高分辨力一维距离像(High Resolution Range Profile, HRRP)：

$$y_i = \text{IFFT}[d_i(f)] \quad (1)$$

式中： y_i 为第*i*组扫频数据的HRRP； $d_i(f)$ 为频率扫描获得的目标散射场数据。

$$y_i(n) = \frac{1}{N} \text{sinc}\left(n\pi - \Delta f \frac{\pi RN}{c}\right) \exp\left(-j2\pi f_0 \frac{R}{c}\right) \exp\left[j \frac{N-1}{N} \left(n\pi - \Delta f \frac{\pi RN}{c}\right)\right] \quad (2)$$

式中： N 为扫频点数； f_0 为扫频的起始频率； c 为光速； R 为目标到发射天线和接收天线的“距离和”。

由式(2)可知，一维距离像的幅度服从sinc包络。当 n 取值为式(3)时， $y_i(n)$ 为极大值。

$$n = \frac{RN\Delta f}{c} \quad (3)$$

式(3)经过变形，得到 R ：

$$R = n \frac{c}{B} \quad (4)$$

式中 $B=N\Delta f$ 为频率扫描带宽。

表1 目标属性
Table 1 Target parameters

| target type | CAD model | size/cm | orientation |
|-------------|-----------|---------------------|---|
| sphere | | $R=6.15$ | $\theta=90^\circ$ $\varphi=0^\circ$ |
| dihedral | | $L=20$ | $\theta=90^\circ$ $\varphi=45^\circ$ |
| trihedral | | $R=20$ | $\theta=45^\circ$ $\varphi=45^\circ$ |
| cylinder | | $H=14.5$ $R=2.7$ | $\theta=90^\circ$ $\varphi=0^\circ$ |

表2 测量参数
Table 2 Measurement parameters

| f/GHz | frequency interval/MHz | azimuth angle of receiver/(°) | azimuth angle of transmitter/(°) | azimuth angle interval/(°) |
|----------------|------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| 8~10 | 10 | 0 | 0~180 | 1 |

根据式(4)，HRRP 每一个距离单元代表的距离“刻度”按照 c/B 进行标注。由于实验中频率扫描带宽为 2 GHz，因此对应的 HRRP 距离单元的最小刻度为 0.15 m。在双基地角扫描范围 $0^\circ\sim 180^\circ$ 内，对角度步进 1° 的 HRRP 按列排列，得到一维距离像序列 HRRPs，见图 2。

忽略噪声背景，图 2 中只存在目标散射回波和直达波两个分量，即前向散射雷达目标回波电场可表示为：

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_d + \mathbf{E}_s \quad (5)$$

式中： \mathbf{E}_d 为发射天线“泄露”到接收天线的直达波电场； \mathbf{E}_s 为目标散射电场。

随着双基地角增大，发射天线到接收天线的距离越来越远，对应于直达波分量的径向位置也逐渐增大；当双基地角 $\beta=180^\circ$ 时，直达波的空间传播距离与目标前向散射回波的传播距离相同，因此，直达波和目标散射回波的位置在 $\beta=180^\circ$ 重合。接收天线围绕旋转中心匀速旋转过程中，目标到发射天线的距离 $L_e=1.20$ m 以及到接收天线的距离 $L_r=1.10$ m 保持不变，测得的目标在 HRRPs 中的位置 2.40 m 保持不变，该测量值与传播距离理论值 2.30 m 的误差小于一个最小距离单元刻度，证明了测量的准确性。

2.2 前向散射雷达目标回波空域特性

连续调整接收天线与发射天线的夹角，步进 1° ，得到频率 $f=10$ GHz 前向散射雷达目标回波归一化幅度的动态变化。同时，给出 4 类目标前向散射回波的电磁计算数据用以验证测量值的准确性。

如图 3 所示，在电磁仿真计算中，目标的摆放角度与实验场景一致，激励源为电偶极子，距离目标 1.2 m；接收天线距离目标 1.1 m，方位角变化范围 $-60^\circ\sim 120^\circ$ 。

从图 4 可以看出，暗室测量数据和电磁仿真数据的变化趋势一致。随着双基地角增大，4 类目标前向散射雷达回波的幅度均会减小，然后到双基地夹角 $\beta=180^\circ$ 时，回波幅度再有小幅“反弹”。电磁仿真中激励源电偶极子方向图为水平全向，实验中采用的喇叭天线方向图水平主瓣为 30° 。当双基地角接近 180° 时，发射天线和接收天线主瓣方向“重合”，此时，实验和电磁仿真中天线模型的设置是等效的。随着双基地角缩小，实验中发射天线和接收天线的主瓣方向不再“重合”，直达波分量的信号幅度会下降；电磁仿真中，由于电偶极子方位方向图为全向，随着双基地角减小，接收天线仍位于发射天线主瓣内，直达波能量一直很强。综上，随着双基地角减小，电磁仿真信号归一化幅度会强于实验测量。

2.3 前向散射雷达目标回波时频特性

为了更真实地观察目标穿越基线时的回波起伏变化和多普勒效应，将接收天线和发射天线的夹角固定为 $\beta=180^\circ$ ，让金属球沿着平板型吸波材料的对角滚动，穿越基线。矢量网络分析仪自动存储回波数据，保证每组慢时间扫频数据的相参性。本次实验中，矢量网络分析仪每秒可以保存 57 组扫频数据，等效的脉冲重复频率为 57 Hz。小球滚动用时 1.58 s，共得到 91 组扫频数据。

将每个慢时间时刻所有频点的信号幅度求和，得到金属球滚动跨越基线时的回波幅度变化过程，见图 5(a)；对慢时间域频率为 10 GHz 的回波数据滤除直流分量后进行短时傅里叶变换，得到前向散射雷达目标回波的时频图，见图 5(b)。

基于多发多收的前向散射雷达网，仅利用估计的目标穿越基线时刻，就可以估计目标位置和运动参数。因此，准确估计目标穿越前向散射雷达基线的时刻至关重要。

根据图 4(a)金属球前向散射回波变化规律，可以确定图 5(a)中 $t=1.033$ s 时刻为金属球跨越基线的时刻。金属球跨越基线时的微多普勒为：

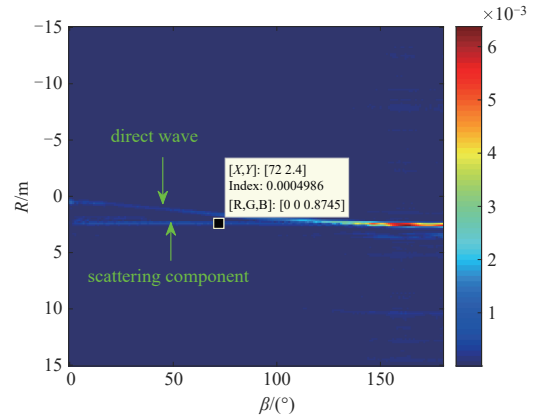


Fig.2 HRRPs of a metallic sphere
图 2 金属球一维距离像序列

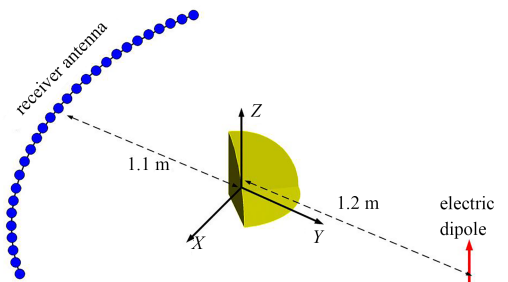


Fig.3 Setup of electromagnetic simulation
图 3 电磁仿真设置

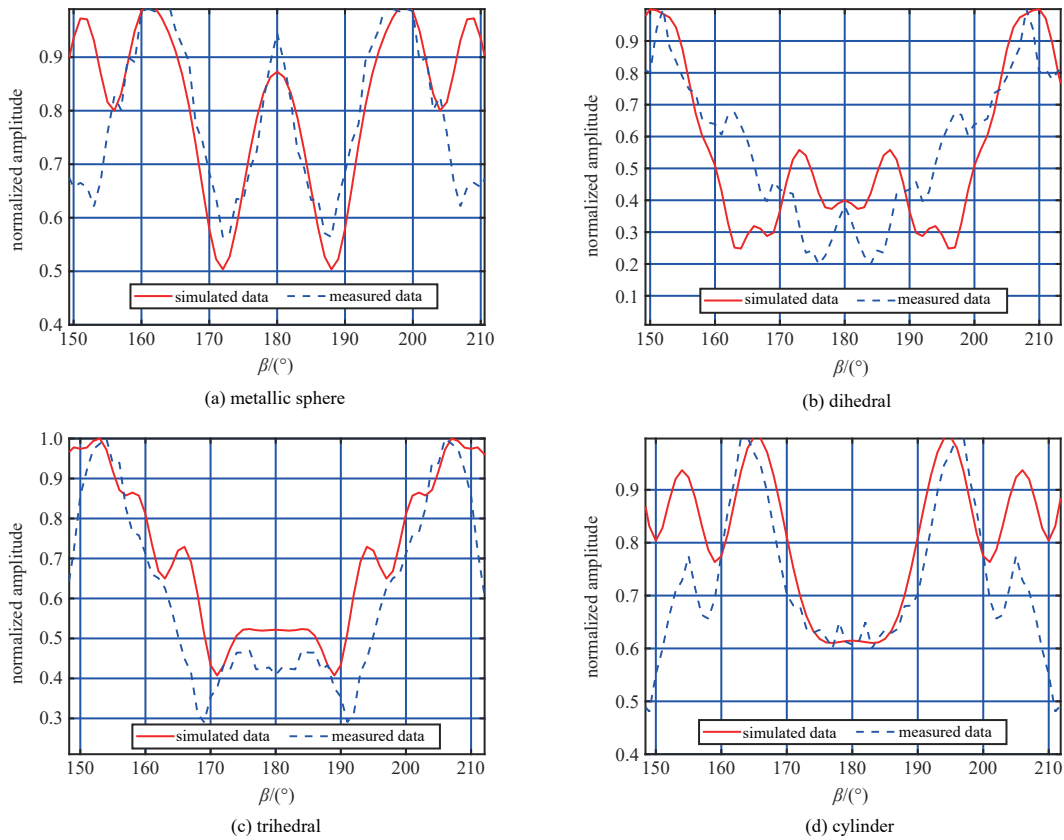


Fig.4 Normalized amplitude of forward scattering echoes with changes in bistatic angle($f=10$ GHz)
图 4 前向散射回波归一化幅度随双基地角的变化($f=10$ GHz)

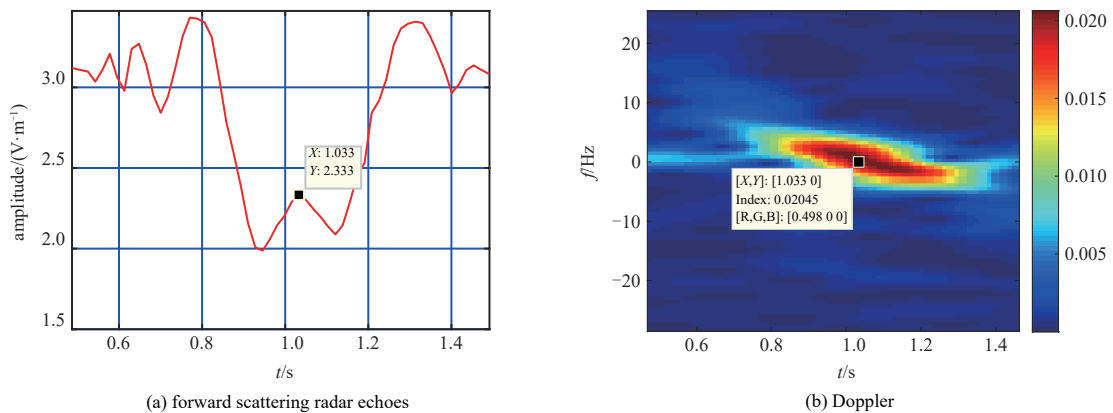


Fig.5 Forward scattering radar echoes and micro-Doppler effect of metallic sphere rolling across baseline
图 5 金属球跨基线滚动前向散射雷达回波与多普勒效应

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \cos \delta \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) \tag{6}$$

式中： v 为小球的运动速度； λ 为波长； δ 为速度方向与双基地角平分线的夹角。

金属球滚动过程中，双基地距离和先减小后变大，根据目标运动多普勒与距离变化的关系可知，金属球的多普勒分量由正到负；当金属球位于收/发天线中间时 $\beta=180^\circ$ ，双基地距离和最小，对应 $t=1.033$ s时刻多普勒为 0 Hz，该结论与图 5(b)结果一致。

3 结论

本文基于典型结构雷达目标双基地散射测量数据，系统分析了前向散射雷达目标回波随双基地角和频率的变化。当收/发天线夹角为 180° 时，将目标放入收/发天线之间，8~10 GHz 频率范围内 4 类目标的各频点回波幅度

均下降；4类雷达目标的前向散射回波幅度具有统一的变化规律，即“先减小再小幅反弹”。上述实验结果以及分析，可以帮助研究前向散射雷达目标检测、定位以及识别等算法的科研人员快速建立对雷达目标前向散射回波特性的认知。

参考文献：

- [1] 胡程,刘长江,曾涛. 双基地前向散射雷达探测与成像[J]. 雷达学报, 2016,5(3):229-243. (HU Cheng,LIU Changjiang,ZENG Tao. Bistatic forward scattering radar detection and imaging[J]. Journal of Radars, 2016,5(3):229-243.)
- [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] FALCONI M T,LOMBARDO P,PASTINA D,et al. A closed-form model for long-and short-range forward scatter radar signals from rectangular conductive targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020,56(2):1370-1390.
- [4] CONTU M,DE LUCA A,HRISTOV S,et al. Passive multifrequency forward-scatter radar measurements of airborne targets using broadcasting signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017,53(3):1067-1087.
- [5] HU C,LIU C,WANG R,et al. Detection and SISAR imaging of aircrafts using GNSS forward scatter radar:signal modeling and experimental validation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017,53(4):2077-2093.
- [6] SUBERVIOLA I,MAYORDOMO I,MENDIZABAL J. Experimental results of air target detection with a GPS forward-scattering radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012,9(1):47-51.
- [7] CLEMENTE C,SORAGHAN J J. GNSS-based passive bistatic radar for micro-Doppler analysis of helicopter rotor blades[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014,50(1):491-500.
- [8] CHERNIAKOV M,ABDULLAH R S A R,JANCOVIC P,et al. Automatic ground target classification using forward scattering radar[J]. IEEE Proceedings-Radar,Sonar and Navigation, 2006,153(5):427-437.
- [9] COLONE F,MARTELLI T,LOMBARDO P. Quasi-monostatic versus near forward scatter geometry in WiFi-based passive radar sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2017,17(15):4757-4772.
- [10] 陈新亮,胡程,曾涛. 一种基于前向散射雷达的车辆目标自动识别方法[J]. 中国科学:信息科学, 2012,42(11):1471-1480. (CHEN Xinliang,HU Cheng,ZENG Tao. Automatic vehicle classification based on forward scattering radar[J]. Scientia Sinica Informationis, 2012(42):1471-1480.)
- [11] HU C,LONG T,ZENG T. Statistic characteristic analysis of forward scattering surface clutter in bistatic radar[J]. Science China Information Sciences, 2010,53(12):2675-2686.
- [12] 胡程,刘长江,曾涛,等. 双基地前向散射雷达杂波分析与模拟方法[J]. 信号处理, 2013,29(3):293-303. (HU Cheng,LIU Changjiang,ZENG Tao,et al. Statistical analysis and simulation method of forward scattering clutter in bistatic radar[J]. JOURNAL OF SIGNAL PROCESSING, 2013,29(3):293-303.)
- [13] 赵晓彤,郭琨毅,盛新庆,等. 前向雷达目标回波成分与特性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2016,38(11):2523-2529. (ZHAO Xiaotong,GUO Kunyi,SHENG Xinqing,et al. Characteristics analysis on forward scattering radar echoes[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016,38(11):2523-2529.)

作者简介：

徐志明(1995-),男,山东省潍坊市人,在读博士研究生,主要研究方向为双基地雷达目标特性与特征提取、目标识别。email:zmxu_nudt@163.com.

艾小锋(1983-),男,四川省安岳县人,副研究员,博士,主要研究方向为双基地雷达成像、特征提取。