

旋转目标 RCS 的二维成像*

阮成礼** 梁淮宁

(电子科技大学应用物理所, 电子工程学院 成都 610054)

【摘要】应用标量克希霍夫积分定理分析了旋转目标 RCS 的二维成像问题, 获得在双天线测量系统中成像剖面包含从雷达到目标的轴线和成像剖面垂直于收发天线的连线。收发天线的连线与成像剖面垂直时可得到目标 RCS 的二维成像; 当收发天线连线与成像剖面平行时仅能得到目标 RCS 的一维成像。该结论为旋转目标 RCS 二维成像系统设计提供了理论基础。

关键词 目标特性; 雷达截面; 克希霍夫积分定理; 二维成像
中图分类号 TN958.1; TN958.94

1 标量克希霍夫积分定理

本文应用标量克希霍夫积分定理分析旋转目标 RCS 的二维成像原理与方法, 它与常规高分辨雷达中所用的 Doppler 频移和相关积分方法不同^[1~4], 能给出 RCS 二维成像条件和成像系统设置方法。置于转台上的目标被均匀平面波照射, 目标将入射波散射到各个方向。散射波携带了目标特征的全部信息, 将散射波接收后就能得到目标散射特性(RCS)的像, RCS 二维成像的基础是标量克希霍夫积分定理^[5]。

在有源区域波动方程为非齐次的 Helmholtz 方程如下

$$\nabla^2 u(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} u(\mathbf{r}, t) = -g(\mathbf{r}, t) \quad (1)$$

对式(1)作 Fourier 变换得

$$\nabla^2 u(\mathbf{r}, \mathbf{w}) - k^2 u(\mathbf{r}, \mathbf{w}) = -f(\mathbf{r}, \mathbf{w}) \quad (2)$$

其中

$$u(\mathbf{r}, \mathbf{w}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} u(\mathbf{r}, t) \exp(-j\mathbf{w}t) dt \quad (3)$$

$$f(\mathbf{r}, \mathbf{w}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} g(\mathbf{r}, t) \exp(-j\mathbf{w}t) dt \quad (4)$$

式(2)的频域解为

$$u(\mathbf{r}, \mathbf{w}) = \frac{1}{4\pi} \int_V f(\mathbf{r}', \mathbf{w}) \left(\frac{\exp(-jkR)}{R} \right) dV + \frac{1}{4\pi} \oint_S \left[\left(\frac{\exp(-jkR)}{R} \right) \nabla' u(\mathbf{r}', \mathbf{w}) - u(\mathbf{r}', \mathbf{w}) \nabla' \left(\frac{\exp(-jkR)}{R} \right) \right] ds \quad (5)$$

式(5)是本文讨论的基础。

2 测量系统的设置

在雷达目标 RCS 成像测量中假定:

1999年6月10日收稿

* 电子部预研基金资助项目

** 男 56岁 博士 教授 博士生导师

1) 目标位于雷达远区场中, 且距坐标原点很近, 目标中心坐标为 $(0, 0, z)$, $z < L$, L 为目标最大线度, 雷达收发天线的坐标为 $(-R_0, 0, h \pm d)$ 。

2) $R_0 \gg h, 2d, a, L$, 其中 h 是天线架设高度, $2d$ 是收发天线的距离, a 是天线口径, 因此天线可看成点源, 在目标区入射波可近似为平面波。

3) 本文采用的是双天线 RCS 测量系统, 收发天线之间有良好的隔离, 发射雷达波不能直接从发射天线窜入接收天线。

4) 雷达位置和目标中心位置是相对固定的, 目标在转台上以均匀角速度 \mathbf{w}_q 旋转, 在整个测量过程中雷达发射机是稳定的, 在 B 点的发射天线辐射场强仅与频率有关, 为 $u_b(\mathbf{b})$, $\mathbf{b} = \mathbf{w}/c$ 。

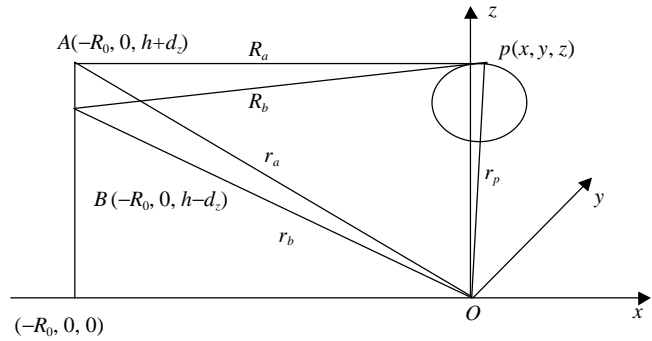


图1 天线沿铅垂方向设置的测试系统

整个雷达目标 RCS 二维成像测量系统的设置如图1所示, 两天线沿垂直方向设置。

3 目标 RCS 二维成像的理论分析

在图1所示的系统设置条件下, 从发射天线到达目标上一点 $p(x, y, z)$ 的辐射场强为

$$\frac{u_b(\mathbf{b})}{4\pi R_b} \exp(-j\mathbf{b}R_b) \quad \mathbf{b} = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{l} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} R_b = |\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_b| = \sqrt{(R_0 + x)^2 + y^2 + (z - h + d)^2} \\ x = r \cos(\mathbf{j} - \mathbf{q}) \\ y = r \sin(\mathbf{j} - \mathbf{q}) \\ \mathbf{q} = \mathbf{w}_q t \end{cases} \quad (7)$$

式中 (r, \mathbf{j}, z) 是 p 点在圆柱坐标系中的坐标, \mathbf{w}_q 是转台旋转的角速度。显然 p 点处的散射截面与频率 \mathbf{b} 和 \mathbf{q} 角有关, 表示为 $\mathbf{s}(\mathbf{r}_p, \mathbf{b}, \mathbf{q})$, 散射波场强为

$$u_p(\mathbf{b}, \mathbf{q}) = \frac{u_b(\mathbf{b})}{4\pi R_b} \mathbf{s}(\mathbf{r}_p, \mathbf{b}, \mathbf{q}) \exp(-j\mathbf{b}R_b) \quad (8)$$

因为收发天线是理想隔离的, 没有其他杂波, 因此到达接收天线 A 的仅是经目标反射的波, 目标表面成为二次辐射的源, 应用式(5)有

$$u_a(\mathbf{b}, \mathbf{q}) = \frac{1}{4\pi} \oint_s \left[\frac{\exp(-j\mathbf{b}R_a)}{R_a} \nabla' u_p(\mathbf{b}, \mathbf{q}) - u_p(\mathbf{b}, \mathbf{q}) \nabla' \left(\frac{\exp(-j\mathbf{b}R_a)}{R_a} \right) \right] ds = \frac{u_b(p)}{(4\pi)^2} \oint_s \mathbf{s}(\mathbf{r}_p, \mathbf{b}, \mathbf{q}) \frac{\exp[-j\mathbf{b}(R_a + R_b)]}{R_a R_b} \left[j\mathbf{b}(\nabla'R_a - \nabla'R_b) + \left(\frac{\nabla'R_a}{R_a} - \frac{\nabla'R_b}{R_b} \right) + \frac{\nabla'\mathbf{s}}{\mathbf{s}} \right] ds \quad (9)$$

式中 $R_a = |\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_a| = \sqrt{(R_0 + x)^2 + y^2 + (z - h - d)^2}$ 。

对于远区场可作如下近似处理
在分母中

$$R_a \approx R_b \approx R_0 \quad (10)$$

在相位项

$$R_a + R_b \approx 2R_0 + 2x + \frac{d^2 + (z-h)^2}{2R_0} + \frac{y^2}{R_0} \quad (11)$$

又有

$$\begin{aligned} \nabla' R_a - \nabla' R_b &= \frac{R_a}{R_a} - \frac{R_b}{R_b} \approx \frac{2d}{R_0} z \\ \frac{\nabla' R_a}{R_a} - \frac{\nabla' R_b}{R_b} &\approx \frac{2d}{R_0^2} z \end{aligned}$$

其中 z 是单位矢量, 在远区场略去 $\frac{2d}{R_0^2} z$ 等高阶项, 式(10)变为

$$u_a(\mathbf{b}, \mathbf{q}) = \frac{u_b(\mathbf{b})}{(4\delta R_0)^2} \exp \left[-j\mathbf{b} \left(2R_0 + \frac{d^2 + (z-h)^2}{2R_0} \right) \right] \oint_S \mathbf{s} \exp \left[-j2\mathbf{b} \left(x + \frac{y^2}{2R_0} \right) \right] \left(j\frac{2d\mathbf{b}}{R_0} z + \frac{\nabla' \mathbf{s}}{\mathbf{s}} \right) d\mathbf{s} \quad (12)$$

令

$$u_0(R_0, \mathbf{b}) = \frac{j\mathbf{b}d}{8\delta^2 R_0^3} \exp \left[-j\mathbf{b} \left(2R_0 + \frac{d^2 + (z-h)^2}{2R_0} \right) \right] \quad (13)$$

$$u(\mathbf{b}, \mathbf{q}) = \int_{S'} \mathbf{s}(\mathbf{r}_p, \mathbf{b}, \mathbf{q}) \exp(-j2\mathbf{b}x) z d\mathbf{s} \quad (14)$$

$$u_{er}(\mathbf{b}, \mathbf{q}) = u_b(\mathbf{b}) u_0(\mathbf{b}, \mathbf{q}) \int_{S'} \exp(-j2\mathbf{b}x) \nabla' \mathbf{s} d\mathbf{s} \quad (15)$$

$$u_a(\mathbf{b}, \mathbf{q}) = u_b(\mathbf{b}) u_0(R_0, \mathbf{b}) u(\mathbf{b}, \mathbf{q}) + u_{er}(\mathbf{b}, \mathbf{q}) \quad (16)$$

当

$$\left| \frac{\nabla' \mathbf{s}}{\mathbf{s}} \right| \ll \frac{2\mathbf{b}d}{R_0} \quad (17)$$

时, 式(15)表示的 $u_{er}(\mathbf{b}, \mathbf{q})$ 项可以略去, \mathbf{s} 可由式(14)和式(16)给出的关系求出。式(14)中是 S' 目标外表面 S 在 xy 平面上投影区域。在 S' 区域内, \mathbf{s} 是平行于 z 轴的直线与 S 面的两个交点散射截面之和, 这是因为式(9)中为封闭面积分。在圆柱坐标系中式(14)表示为

$$u(\mathbf{b}, \mathbf{q}) = \int_{S'} \mathbf{s}(\mathbf{r}, \mathbf{j}) \exp[-j2\mathbf{b}r \cos(\mathbf{j} - \mathbf{q})] r dr d\mathbf{j} \quad (18)$$

这是二维 Fourier 变换形式, 因此

$$\mathbf{s}(\mathbf{r}, \mathbf{j}) = \int_{S_{bq}} u(\mathbf{b}, \mathbf{q}) \exp[-j2\mathbf{b}r \cos(\mathbf{j} - \mathbf{q})] r dr d\mathbf{q} \quad (19)$$

式(18)和式(19)是二维 Fourier 变换对, 利用式(19)可把 $\mathbf{s}(\mathbf{r}, \mathbf{j})$ 的测量变换为在频率和转角平面上场强的测量

$$u(\mathbf{b}, \mathbf{q}) = \frac{u_a(\mathbf{b}, \mathbf{q})}{u_b(\mathbf{b}) u_0(R_0, \mathbf{b})} \quad (20)$$

造成式(19)误差的因素包括:

1) $\frac{\nabla' \mathbf{s}}{\mathbf{s}}$, 即忽略了散射截面梯度变化对测量的影响;

2) $\frac{y^2}{R_0} \leq \frac{L^2}{4R_0}$, L 为目标横向线度, 雷达波并非象真正平面波那样照射目标;

3) 如果进一步略去 $\mathbf{b} \frac{d^2 + (z-h)^2}{2R_0}$, 而且 $h_f = h$, 即目标高度和天线高度相同, 则有

$$\mathbf{b} \frac{d^2 + (z-h)^2}{2R_0} \leq \frac{\mathbf{b} d^2}{2R_0} + \frac{\mathbf{b} l^2}{4R_0}, \quad l \text{ 为垂直线度。给定允许的最大相位误差, 可求出所需要的远场测}$$

试距离 R_0 。

式(18)、(19)把 (\mathbf{r}, \mathbf{j}) 平面(即 x, y 平面)与 (\mathbf{b}, \mathbf{q}) 平面联系起来, 即在频率 \mathbf{b} 和转角 \mathbf{q} 平面上测量电场 $u(\mathbf{b}, \mathbf{q})$, 然后利用式(19)得到水平面内 $\mathbf{s}(\mathbf{r}, \mathbf{j})$ 的像。

4 双天线水平设置

在双天线测试系统中, 也可以把两副天线水平放置, 如图2所示, 则有

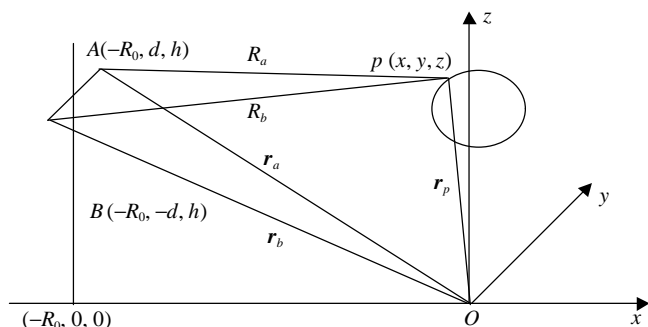


图2 两天线水平放置的测量系统

$$R_a = |\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_a| = \sqrt{(R_a + x)^2 + (y - d)^2 + (z - h)^2} \quad (21)$$

$$R_b = |\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_b| = \sqrt{(R_a + x)^2 + (y + d)^2 + (z - h)^2} \quad (22)$$

作近似处理, 在分母中

$$R_a \approx R_b \approx R_0$$

在相位项

$$R_a + R_b \approx 2 \left(R_0 + \frac{y^2 + d^2}{2R_0} \right) + 2 \left(x + \frac{(z - h)^2}{2R_0} \right)$$

又有

$$\nabla' R_a - \nabla' R_b \approx \frac{2d}{R_0} \mathbf{y} \quad (23)$$

$$\frac{\nabla' R_a}{R_a} - \frac{\nabla' R_b}{R_b} \approx \frac{2d}{R_0^2} \mathbf{y}$$

$$\mathbf{y} d\mathbf{s} = d\mathbf{x} d\mathbf{z}$$

将式(21)~(23)代入式(9)可得

$$u_a(\mathbf{b}, \mathbf{q}) = u_b(\mathbf{b}) u_1(R_0, \mathbf{b}) u_h(\mathbf{b}, \mathbf{q}) \quad (24)$$

$$u_1(R_0, \mathbf{b}) = j \frac{\mathbf{b} d}{8\delta^2 R_0^3} \exp \left[-j2\mathbf{b} \left(R_0 + \frac{y^2 + d^2}{2R_0} \right) \right] \quad (25)$$

$$u_h(\mathbf{b}, \mathbf{q}) = \int_{S_y} \mathbf{s}(x, y, z) \exp(-j2\mathbf{b}x) d\mathbf{x} d\mathbf{z} = \int \mathbf{s}(x) \exp(-j2\mathbf{b}x) d\mathbf{x} \quad (26)$$

其中 $\mathbf{s}(x) = \int \mathbf{s}(x, 0, z) dz$, S_y 是封闭面 S 在 $y=0$ 的坐标平面上的投影。 $\mathbf{s}(x)$ 是 $x=\text{常数}$ 的全部点上散射截面 $\mathbf{s}(x, y, z)$ 的总效应。由式(26)可得

$$\mathbf{s}(x) = \int u_h(\mathbf{b}, \mathbf{q}) \exp(j2\mathbf{b}x) d\mathbf{b} \quad (27)$$

式(26)、(27)构成一维 Fourier 变换对。即在频域内测量 $u_h(\mathbf{b}, \mathbf{q})$ 。通过一维 Fourier 变换可得目标散射特性的一维像函数, 且从特定角度 \mathbf{q} 照射时目标得到的 $\mathbf{s}(x, \mathbf{q})$ 。从这里可以看出当目标在小角度内旋转所测得的“像”并非 RCS 的二维成像, 而是不同角度 $\mathbf{s}(x, \mathbf{q})$ 的机械组合。

5 讨论

假定雷达天线是任意设置的, 既不是沿垂直方向, 也不是沿水平方向, 如图3所示, 发射天线坐标为 $B(-R_0 - d_x, -d_y, h - d)$, 接收天线坐标为 $A(-R_0 + d_x, d_y, h + d_z)$, 则

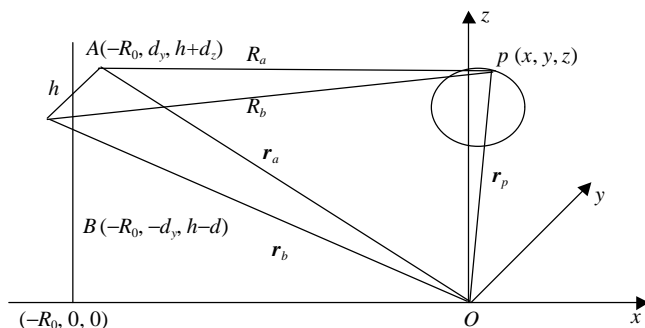


图3 任意设置雷达天线

$$\mathbf{R}_a = \mathbf{r}_a - \mathbf{r}_p$$

$$\mathbf{R}_b = \mathbf{r}_b - \mathbf{r}_p$$

$$\mathbf{R}_a - \mathbf{R}_b = \mathbf{r}_d$$

$$|\mathbf{R}_a| - |\mathbf{R}_b| \approx 2R_0 + 2x$$

这时有

$$u(\mathbf{b}, \mathbf{q}) = \int_{S_{rd}} \mathbf{s}(\mathbf{r}_p, \mathbf{b}, \mathbf{q}) \exp(-j2\mathbf{b}x) \mathbf{r}_d ds$$

式中 S_{rd} 为目标外表面在垂直 \mathbf{r}_d 平面上的投影。由此可以得出如下结论：1) 成像剖面包含 x 轴(即雷达座到目标转台座的连线)；2) 成像剖面垂直于 \mathbf{r}_d (即从发射天线指向接收天线的单位矢量)；3) 从式(17)可以看出，提高频率和增大天线之间的距离有利于测量精度的提高。由结论1)和2)可知，仅当收发天线联线与成像剖面垂直时可得到 RCS 的二维成像。

本文的结论为旋转目标 RCS 二维成像测量系统的设计提供了理论基础。

参 考 文 献

- 1 Wether D R. High resolution radar. New York:Artech House, 1987
- 2 黄培康. 小角度旋转目标微波成像. 电子学报, 1992, 20(6): 54~58
- 3 张直中. 微波成像. 北京: 科学出版社, 1990
- 4 冯 林, 阮颖铮. 天线 RCS 减缩技术研究的新进展. 电子科技大学学报, 1995, 24(增): 23~26
- 5 吴多龙. 目标特性测量技术. [硕士论文]. 成都: 电子科技大学, 1995

RCS 2D-imaging of Rotating Targets

Ruan Chengli Liang Huaining

(Inst. of Applied Physics, Institute of Electronic Eng., UEST of China Chengdu 610054)

Abstract In this paper, RCS 2D-imaging of rotating targets is analyzed using Kirchhoff integral theorem. It is shown that the imaging section includes the axle from radar stage to rotating stage and the imaging section is vertical to the line connecting two antennas. That is, when the line and the imaging section are coplanar, only a RCS 1D-imaging of rotating targets can be obtained, and when the line is vertical to the imaging section, a RCS 2D-imaging of rotating targets can be gotten. The results obtained in this paper give a theory base for the system design of RCS 2D-imaging of rotating targets.

Key words target characteristic; radar cross section; Kirchhoff integral theorem; 2D-imaging

雷达散射截面 (RCS) 分析培训课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面 (Radar Cross Section, 简称 RCS) 是雷达隐身技术中最关键的概念, 也是电磁理论研究的重要课题, 使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起, 系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授, 边操作边讲解, 直观易学。

HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程, 其中: 《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程, 帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用; 《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面, 包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义, 实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程, 专家讲授, 从零讲起, 直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

更多培训课程:

- **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>