

雷达目标三维散射中心位置正向推导和分析

张磊^① 何思远^{*①} 朱国强^① 张云华^① 殷红成^② 闫华^②

^①(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)

^②(电磁散射重点实验室 北京 100854)

摘要:为了更好地将散射中心与目标结构联系起来,该文基于目标几何模型给出一种在单次和2次耦合散射机理下雷达目标部件级3维散射中心位置正向推算方法。重点探究了2次耦合散射机理下强散射情况的射线等效位置确定原理及方法。对其他弱散射情况,应用等价变换等效为强散射情况。最后,使用此位置推算方法推导并分析了直角二面角,钝角二面角,SLICY, T72坦克模型的部件级3维散射中心位置,并与相应的仿真或实测SAR图像进行比对以验证此位置推算方法的正确性。

关键词: 散射中心; 位置参数; 正向推导

中图分类号: TN955

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)12-2854-07

DOI: 10.11999/JEIT180115

Forward Derivation and Analysis for 3-D Scattering Center Position of Radar Target

ZHANG Lei^① HE Siyuan^① ZHU Guoqiang^① ZHANG Yunhua^①

YIN Hongcheng^② YAN Hua^②

^①(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

^②(National Electromagnetic Scattering Laboratory, Beijing 100854, China)

Abstract: To link better scattering centers with target structures, a forward method is presented to deduce the component-level 3-D scattering center position of radar target under the mechanisms of single and double scattering based on target geometric model. Under the mechanism of double scattering, the principle and method for determining the ray equivalent position is introduced especially under the situation of strong scattering. As for other weak scattering situations, the equivalent transformation is used to transform the weak scattering situations to the strong one. Finally, this position derivation method is applied to the models of right dihedral angle, obtuse dihedral angle, SLICY and T72 tank to deduce and analyze their component-level scattering center positions. The corresponding simulated or actual SAR images are used for contrast to validate the accuracy of the position derivation method.

Key words: Scattering center; Position parameter; Forward derivation

1 引言

在高频区,电大尺寸目标的电磁散射可以被很好地近似为一系列独立的强散射结构的回波之和,这些强散射结构被称为散射中心。散射中心模型^[1-4]使用函数公式表征散射中心,能够给目标物理特性提供简洁且贴切的描述,因此在数据压缩^[5]、合成孔径雷达自动目标识别^[6](SAR ATR)等方面有重要

的应用。散射中心模型中的位置参数作为反映目标散射结构空间位置的参量,对目标识别起着关键性的作用。目前,对散射中心参数的获取一般是采用基于SAR频率域或图像域数据的参数估计方法^[7-10]。这类方法从观测数据出发,实际上也就是从目标电磁散射的“结果”出发建立目标的散射中心模型,与目标几何结构的对应关系不明确,由此构建的散射源(散射中心)的散射机理与实际目标结构的散射机理可能不一致,这意味着此散射中心模型的物理意义不清晰,给目标解译识别带来困难。近年来,随着SAR成像分辨率的不断提高,基于散射中心模型的目标局部特征识别已引起关注与研究^[11-14],这更对散射中心与目标结构的对应性提出要求。鉴于

收稿日期: 2018-01-26; 改回日期: 2018-07-05; 网络出版: 2018-07-20

*通信作者: 何思远 siyuanhe@whu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61571333)

Foundation Item: The National Natural Science of China (61571333)

此, 本文基于目标几何模型给出了一种部件级3维散射中心位置正向推算方法。通过这种正向方法, 可以建立起散射中心与目标几何结构清晰的对应关系, 这将给扩展工作条件下的目标局部结构解译识别带来希望。

本文的结构安排如下: 首先给出扩展的3维属性散射中心参数化模型形式。其次分别对单次和2次耦合散射机理下3维散射中心位置做具体的推导, 给出推导原理及方法。之后使用此位置推算方法对几类目标进行散射中心位置推导和分析。最后给出总结与展望。

2 3维属性散射中心参数化模型

Potter等人^[2]提出的2维属性散射中心模型使用散射中心在成像面上的投影位置描述相位项, 投影位置所在的坐标系及投影位置均随姿态角改变而不断变化, 使得在不同角度下散射中心位置无法得到统一。鉴于此问题, 本文采用扩展的3维属性散射中心模型^[14]:

$$E_i(f, \theta, \phi; r) = A_i(\varphi, \theta) \left(j \frac{f}{f_c} \right)^{\alpha_i} \cdot \text{sinc} [kL_i \sin(\varphi - \bar{\varphi}_i)] \cdot \exp [-j2k(x_i \cos \varphi \cos \theta + y_i \sin \varphi \cos \theta + z_i \sin \varphi)] \quad (1)$$

其中, (x_i, y_i, z_i) 描述的是第*i*个散射中心在目标坐标系下的3维位置, 其余参数与2维模型中的参数一致。此3维模型使用目标坐标系下散射中心真实3维位置及姿态角表征相位项, 散射中心位置得到统一。接下来的章节将基于此3维模型进行3维散射中心(等效)位置的正向推导。

3 散射中心位置正向推导

本文的研究基于一种类似于弹跳射线法(SBR)的混合几何光学-物理光学(GO-PO)高频区电磁计算方法。该方法将目标表面离散为小三角面元并用光学射线表示雷达入射波。射线条数与被照亮的三角面元的个数相同, 即每条射线照亮且仅照亮一个面元, 并且射线在目标表面的作用点为面元的几何中心。之后, 基于几何光学反射定律在目标表面进行射线追踪并对追踪路径上与射线作用的最后一个面元使用物理光学法计算该条射线路径的散射场贡献。最后, 所有射线散射场叠加得到总的散射场。

3.1 单次散射作用散射中心位置推导

在单站雷达系统下, 由于单次散射作用下入射射线只与目标表面(相应的三角面元)发生一次作用, 该射线产生散射贡献的3维位置就是其与目标

发生作用的位置, 即相应的三角面元中心位置。

理想情况下, 若某一部件对应的散射中心的贡献仅来源于一条射线, 则它的位置就是该射线的3维位置。但实际情况中散射中心的贡献来源于多条射线的叠加, 那么它的位置应该与所有这些射线的3维位置相关, 并且应该与散射贡献最强的那条射线的3维位置最接近。因此, 本文使用射线位置感应电流加权平均法^[15]来推算最终的部件级3维散射中心位置, 其公式为

$$\bar{x} = \frac{\sum_n x_n \cdot w_n}{\sum_n w_n}, \bar{y} = \frac{\sum_n y_n \cdot w_n}{\sum_n w_n}, \bar{z} = \frac{\sum_n z_n \cdot w_n}{\sum_n w_n} \quad (2)$$

其中, $w_n = |J_s(Q_n)|$ 是第*n*个三角面元上激励出的PO电流。 $Q_n(x_n, y_n, z_n)$ 是第*n*条射线 r_n 的(等效)3维位置, $\bar{Q}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 是最终部件级3维散射中心的等效位置。

3.2 2次耦合散射作用散射中心位置推导

对于2次耦合散射作用, 由于入射射线先后与目标表面(相应的两个三角面元)发生两次作用, 射线3维位置需要由这两个三角面元等效确定。如果射线等效3维位置确定下来, 就可以用与单次散射作用同样的方法确定部件级3维散射中心位置。所以下文重点研究2次耦合散射作用下射线位置等效问题。

2次散射作用可由二面角散射过程描述, 所以本文以二面角为例正向推导其2次散射作用射线等效3维位置。在单站雷达系统下, 当入射射线沿着垂直于直角二面角棱边的角度照射任一直角二面角时, 基于几何光学定律的射线在发生两次作用后可以沿着入射方向返回雷达, 此时产生的回波贡献最强, 本文称为强散射情况。而当入射射线不垂直于二面角棱边或者二面角为钝角或锐角二面角时, 基于几何光学定律的射线在发生两次作用后都不会严格沿着入射方向返回, 此时沿着入射方向返回雷达的回波贡献基于物理光学法获得, 回波贡献相对较小, 本文称为弱散射情况。

3.2.1 强散射情况 图1(a)给出垂直入射直角二面角棱边情况下2次耦合散射过程俯视示意图。图中一条射线在直角二面角表面发生两次作用后回到雷达, 射线路径可以标记为 $a-b-c$ 。 Q_a 和 Q_b 分别是直角二面角上射线先后作用的两个三角面元 S_a 和 S_b 的几何中心。设三角面元 S_a, S_b 所在的平面为 P_a, P_b , 射线路径 $a-b-c$ 所在平面为 P , 平面 P_a, P_b, P 的交点为 $\bar{Q}$, $\bar{Q}$ 到雷达的距离为 d , 入射射线与平面 P_a 的夹角为入射角 α 。

基于高频近似的射线追踪理论, 本文将入射场以射线形式表征(如上所述)。射线路径决定着射线散射场的相位, 同时由3维属性散射中心参数化模型公式可知, 射线散射场的相位又取决于射线(等效)位置, 所以射线等效位置可通过推导射线等效路径的方式获得: 即将2次耦合散射作用下经过两次反射的3条射线路径 $a-b-c$ 等价于单次散射作用下只经过一次反射的两条射线路径, 等价后的反射点即为射线等效位置。本文基于等效光程差理论^[16]及射线空间关系确定出射线等效路径的3个限制条件, 进而推导出射线等效反射点所在的3个平面, 从而唯一地确定出射线等效反射点(射线等效位置)。下面详细介绍推导过程。

(1)根据反射定律可推出入射路径 a 与出射路径 c 平行(即 $a \parallel c$), 且直角二面角给出 $\angle Q_a \bar{Q} Q_b = 90^\circ$, 再加上反射定律所约束的角度关系, 容易证明 $a+b+c=2d$ 。根据等效光程差理论, 该2次耦合射线的等效位置应与雷达相距为 d 。所以射线等效位置应在过 $\bar{Q}$ 点且与 d 垂直的平面上(记为平面 P_1)。

(2)在保证垂直入射直角二面角棱边的条件下, 改变入射角为 $\beta = \alpha + \Delta (\Delta \neq 0)$, 如图1(b)所示。此时, 入射射线同样在直角二面角表面发生两次作用后回到雷达。入射射线先经 Q_a 点反射, 再经 Q_c 点反射回到雷达, 射线路径为 $a'-b'-c'$ 。该射线路径下同样容易证明 $a'+b'+c'=2d'$ 。根据等效

光程差理论, 该角度下2次耦合射线的等效位置应与雷达相距为 d' 。所以射线等效位置应在过 $\bar{Q}$ 点且与 d' 垂直的平面上(记为平面 P_2)。

(3)根据射线传播过程所经过的空间路径约束, 此2次耦合射线的等效位置还应在射线传播路径 $a-b-c$ 所确定的平面上, 也即 P (记为 P_3)。

所以, P_1, P_2, P_3 这3个平面的交点 $\bar{Q}$ 即为此2次耦合射线等效3维位置。该等效位置点同时也是平面 P_a, P_b, P 的交点。通过上述方法确定出直角二面角所有2次耦合射线的等效位置点后使用射线等效位置感应电流加权平均法来推算其最终3维散射中心位置。可以预期到, 此情况下直角二面角所有2次散射作用射线等效位置均匀分布在其棱边上, 且对整体的散射贡献大小相同。所以应用射线等效位置感应电流加权平均法后可得直角二面角对应的散射中心等效位置应位于棱边的中点, 并且在可以产生2次耦合散射的入射角度范围内, 此等效位置始终不变。

3.2.2 弱散射情况 图2(a)给出了垂直入射钝角二面角棱边这一弱散射情况下2次耦合散射过程俯视示意图, 图中符号含义与图1(a)中相同。但需要指出的是在本文的混合GO-PO电磁计算方法中, 对与射线作用的最后一个三角面元 S_b 使用物理光学法计算该条射线路径的散射场贡献。所以路径 $b-c$ 不再遵循反射定律, 但是在单站雷达系统下, 仍然满足 $a \parallel c$ 。

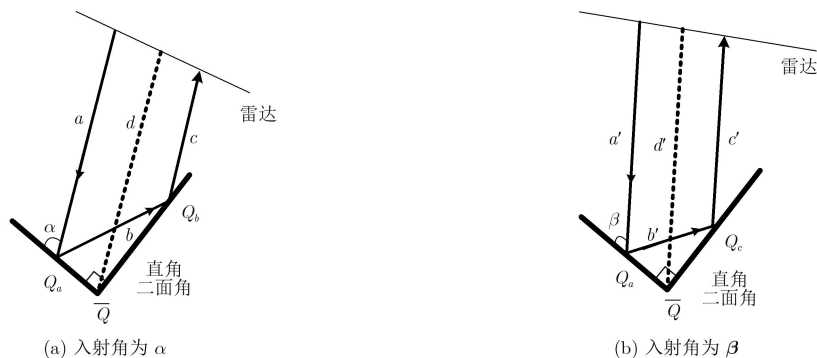


图1 不同入射角下垂直入射直角二面角棱边俯视示意图

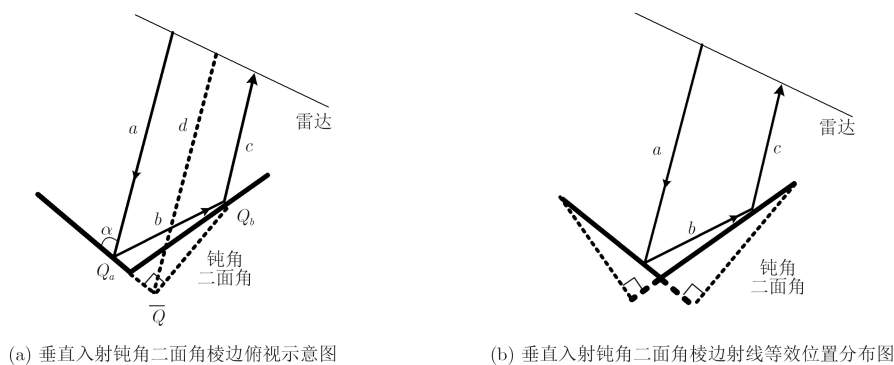


图2 垂直入射钝角二面角棱边示意图及射线等效位置分布图

我们固定 Q_b 点并转动三角面元 S_b 使得到的 S'_b 满足 S'_b 所在的平面 P'_b 与平面 P_a 垂直且入射方向与 P_a , P'_b 交线垂直。此时面元 S_a , S'_b 为平面 P_a , P'_b 构成的直角二面角上的两个面元, 射线路径 $a-b-c$ 可等价于垂直入射直角二面角棱边情况中作用于直角二面角上面元 S_a , S'_b 的射线路径, 所以可以采用 3.2.1 节推算垂直入射直角二面角棱边射线等效位置的方法来计算此射线路径的等效位置。设 $\bar{Q}$ 为平面 P_a , P'_b , P 的交点, 根据 3.2.1 节的分析可知 $\bar{Q}$ 点就是该 2 次耦合射线的等效位置。可以预期到, 此情况下钝角二面角上所有 2 次散射作用射线等效位置均匀分布在钝角二面角部分延长面上, 且其对整体的散射贡献大小相同。并且由于射线路径不可逆, 需要对钝角二面角两个面分别做等价变换。图 2(b) 给出垂直入射钝角二面角棱边情况下所有射线等效位置分布图, 图中粗虚线为射线等效位置的分布。可以看出钝角二面角射线等效位置均匀分布在两个斜平面上, 应将其看做两个分布型散射中心。使用射线等效位置感应电流加权平均法推算其两个散射中心位置应分别为两斜平面的中心点。

对垂直入射锐角二面角棱边、非垂直入射直角二面角棱边及其他更一般的弱散射情况可做同样的等价转化来推算其 2 次耦合射线等效位置和位置分布。需要指出的是, 对于此类弱散射情况, 偏离强散射情况越多, 2 次散射机理下的后向散射能量越小, 射线等效位置分布也会越分散, 所以实际中仅需考虑近似垂直入射直角二面角棱边的情况。

4 实例验证

下文针对直角二面角, 钝角二面角, SLICY, T72 坦克目标正向推算其部件级散射中心位置, 并结合相应的仿真或实测 SAR 图像给出验证分析。

4.1 直角二面角

图 3 给出一直角二面角几何模型图, 构成此直角二面角的两个正方形边长均为 1 m。此直角二面角竖直立于 xoy 平面上, 且棱边与 z 轴重合, 电磁波沿着 x 轴负方向照射此直角二面角, 其中一条射线路径如图 3 中密虚线所示。根据 3.2.1 节的推导分析可知, 此直角二面角对应的散射中心等效位置应位于棱边的中点, 坐标为 $(0, 0, 0.5)$ 。图 4 给出此直角二面角在上述姿态角下的仿真 SAR 图像, 图像右侧为强度标尺。将推得的 3 维位置投影到此 2 维 SAR 图像成像面上得其投影位置为 $(0, 0)$, 与图 4 仿真 SAR 图像中亮点(散射中心)位置相一致。

真实目标产生的二次散射作用大多是空间分离的面间的作用, 为进一步验证此位置推算方法的普

适性, 下面给出面分离的直角二面角的验证分析。图 5 给出面分离的直角二面角的几何模型图, 此模型是将图 3 中直角二面角的两个面分别沿着 y 轴左右平移 1 m 得到。电磁波仍沿着 x 轴负方向照射此模型, 其中一条射线路径如图 5 中密虚线所示。根据射线等效位置推导过程可知, 此模型上所有 2 次散射作用射线等效位置均匀分布在此面分离的直角二面角虚拟棱边上, 且其对整体的散射贡献大小相同。所以应用射线等效位置感应电流加权平均法后可得其散射中心位置应位于虚拟棱边的中点, 坐标为 $(-1.0, 0, 0.5)$ 。图 6 给出此面分离的直角二面角在上述姿态角下的仿真 SAR 图像, 图像右侧为强度标尺。将推得的 3 维位置投影到此 2 维 SAR 图像成像面上得其投影位置为 $(0, 1)$, 与图 6 仿真 SAR 图像中亮点(散射中心)位置相一致。

4.2 钝角二面角

图 7 给出面分离的钝角二面角几何模型图, 此模型是将图 5 中面分离的直角二面角两个面分别向 x 轴正负方向旋转 5° 得到(即两个面的夹角为 100°)。

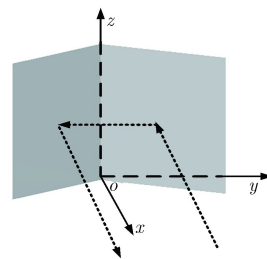


图 3 直角二面角几何模型图

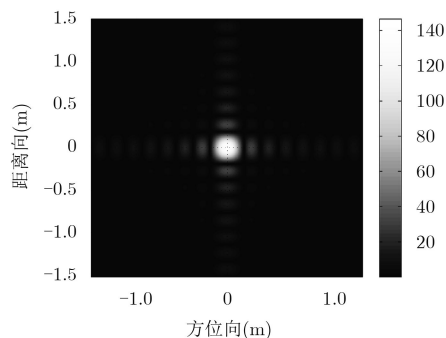


图 4 直角二面角仿真 SAR 图像

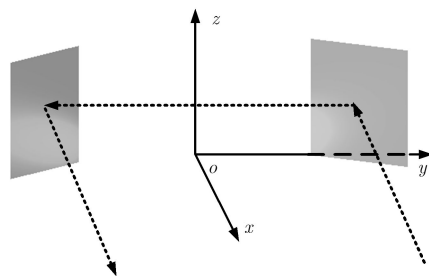


图 5 面分离的直角二面角几何模型图

电磁波同样沿着 x 轴负方向照射此模型,其中一条射线路径如图7中密虚线所示。根据3.2.2节的推导分析可知,此面分离的钝角二面角对应的两个散射中心等效位置应分别位于其两个面部分延长面的中心点,坐标分别为 $(-1.0964, -0.3067, 0.5000)$ 和

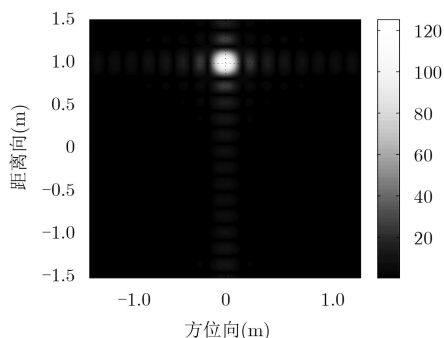


图6 面分离的直角二面角仿真SAR图像

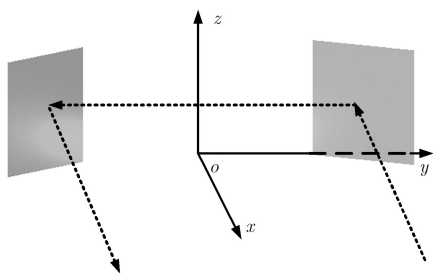


图7 面分离的钝角二面角几何模型图

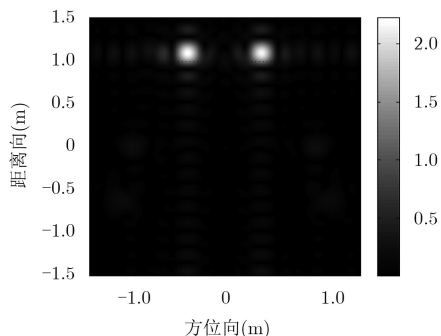


图8 面分离的钝角二面角仿真SAR图像

$(-1.0964, 0.3067, 0.5000)$ 。图8给出此面分离的钝角二面角在上述姿态角下的仿真SAR图像,图像右侧为强度标尺。需要指出的是,由于此面分离的钝角二面角两个面的夹角仅偏离直角 10° 且两个面均不大,射线位置的分布不明显,其形成的散射中心可看做局部型散射中心。所以采用八邻域峰值提取方法提取图8中仿真SAR图像的峰值点作为散射中心位置,得到其散射中心位置为 $(-0.4120, 1.0975)$ 和 $(0.4032, 1.0975)$ 。将推得的3维位置投影到此2维SAR图像成像面上得其投影位置为 $(-0.3067, 1.0964)$ 和 $(0.3067, 1.0964)$,与仿真图像提取得到的峰值位置基本一致。此外,从图像强度标尺可以看出虽然此面分离的钝角二面角只与直角二面角相差 10° ,但其2次散射作用幅值已经降低几十倍,散射贡献相对较小。

4.3 MSTAR SLICY

图9(a)给出按照MSTAR库中的SLICY构建的几何模型图。电磁波沿着俯仰角 30° ,方位角 40° 照射目标模型。此姿态角下3个主要强散射中心由模型前右方直角三面角3次散射作用及模型上方两圆柱分别与底面组成的两个顶帽2次散射作用产生,射线路径如图9中虚线所示。采用本文位置推算方法得到其3维散射中心位置坐标分别为: $(0.9275, 0.7718, 0.4396)$, $(-0.1242, -0.3752, 0.7193)$, $(-0.0663, 0.8174, 0.7118)$ 。其中第1个位置点选取为直角三面角顶点(由等效光程差理论证得)。图9(b)给出MSTAR库中此模型在上述姿态角下的实测SAR图像(经过插值处理)。将推得的3维位置投影到此2维SAR图像成像面上得其投影位置为 $(-0.0043, -1.2648)$, $(-0.1798, -0.0683)$, $(0.5791, -0.7669)$ 。对实测图像采用八邻域峰值提取方法提取图9(b)实测SAR图像中3个最强的峰值点作为散射中心位置,得到其散射中心位置为 $(-0.2641, -1.4757)$, $(-0.4875, -0.1213)$, $(0.4063, -0.7884)$ 。由于实测图像是从较大场景SAR图像中截取出来的,峰值位置较推算的

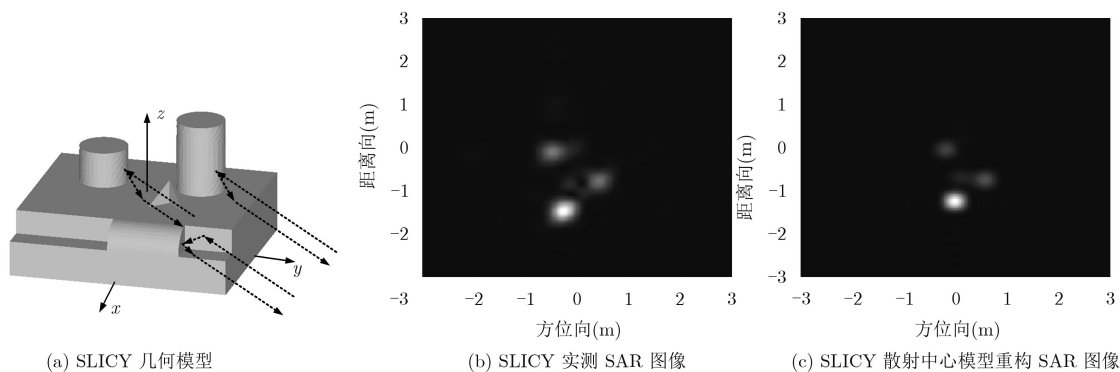


图9 SLICY几何模型及实测SAR图像与散射中心模型重构SAR图像对比图

投影位置存在一定的偏移, 所以根据最小均方差理论, 将实测图像峰值点整体在方位向平移0.2468 m, 距离向平移0.0951 m, 使其与推算的投影位置尽可能对齐。表1给出实测图像峰值点平移修正后的位置与本文方法推算的投影位置的比较结果。从位置误差结果来看, 实测图像峰值位置与本文推算的位置基本一致。图9(c)给出在上述姿态角下由SLICY散射中心模型重构的SAR图像(散射中心其他属性参数由文献[7]中方法获得)。从图像对比也可以看出, 两幅SAR图像相似度很高, 峰值位置基本一致。

4.4 T72坦克

图10(a)给出T72坦克的几何模型图。电磁波沿着俯仰角15°, 方位角180°照射目标模型。图10(b)给出此模型在上述姿态角下的仿真SAR图像(经过插值处理), 图10(c)给出此姿态角下由T72坦克散射中心模型重构的SAR图像。从图像对比可以看出, 两幅SAR图像相似度很高, 峰值位置基本一致。由于目标中间区域散射中心存在耦合, 散射中心位置不易对比分析, 所以主要对此姿态角下T72坦

克模型后方的两个燃料桶的单次散射作用和后方两个挡板的单次散射作用形成的4个强散射中心进行对比分析, 射线路径如图10(a)中虚线所示。表2给出此4个强散射中心在仿真图像中峰值点位置与本文方法推算的投影位置的比较结果。从位置误差结果来看, 实测图像峰值位置与本文推算的位置基本一致。

5 结束语

本文详细介绍了单次散射及2次耦合散射机理下部件级3维散射中心等效位置正向推导原理和方法并针对直角二面角, 钝角二面角, SLICY, T72坦克模型进行了具体推导和分析, 结果表明应用本文位置推算方法得到的散射中心位置与仿真或实测SAR图像上亮点(散射中心)位置存在着良好的对应关系, 验证了本文位置推算方法的正确性。进一步地, 本文给出的位置正向推算方法整个过程机理清晰, 建立起了目标结构与相应散射中心的联系, 相比于基于数据的散射中心参数估计方法, 本文基于部件散射机理正向推导散射中心位置参数, 有效解决了逆向估计方法与目标几何结构对应关系不明确

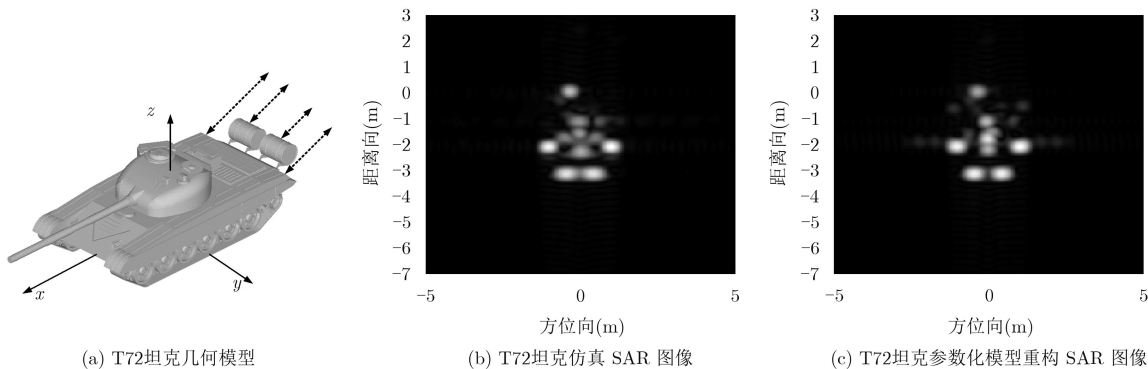


图 10 T72坦克几何模型及仿真SAR图像与散射中心模型重构SAR图像对比图

表 1 SLICY实测SAR图像峰值位置与本文方法推算位置对比表

散射源编号	1	2	3
部件	三面角(前右)	顶帽(矮)	顶帽(高)
机理	3次耦合散射	2次耦合散射	2次耦合散射
实测图像八邻域峰值提取位置(m)	(-0.0173, -1.3806)	(-0.2407, -0.0262)	(0.6531, -0.6933)
本文方法推断投影位置(m)	(-0.0043, -1.2648)	(-0.1798, -0.0683)	(0.5791, -0.7669)
位置误差(m)	(0.0130, 0.1158)	(0.0609, 0.0421)	(0.0740, 0.0736)

表 2 T72坦克仿真SAR图像主要峰值位置与本文方法推算位置对比表

散射源编号	1	2	3	4
部件	燃料桶(右)	燃料桶(左)	后方挡板(左)	后方挡板(右)
机理	单次散射	单次散射	单次散射	单次散射
仿真图像八邻域峰值提取位置(m)	(1.0077, -2.0791)	(-1.0594, -2.0791)	(-0.4393, -3.1312)	(0.3876, -3.1312)
本文方法推断投影位置(m)	(1.0075, -2.1394)	(-1.0022, -2.1394)	(-0.4411, -3.1568)	(0.4328, -3.1568)
位置误差(m)	(0.0002, 0.0603)	(0.0572, 0.0603)	(0.0018, 0.0256)	(0.0452, 0.0256)

带来的散射中心散射机理与实际目标结构散射机理不一致等问题, 为后续进一步开展全局散射中心联合分析及最终目标结构解译研究提供基础。但同时本文推导的耦合散射中心等效位置只针对2次耦合散射作用, 对于更高阶次的耦合散射作用, 暂未做深入研究(直角三面角这类稳定强散射中心有一定的研究)。随着后续对散射中心模型精度要求的提高, 针对这类更高阶次耦合散射作用等效位置的研究将在后续进行。

参 考 文 献

- [1] POTTER L C, CHIANG D M, CARRIERE R, *et al.* A GTD-based parametric model for radar scattering[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1995, 43(10): 1058–1067. doi: [10.1109/8.467641](#).
- [2] POTTER L C and MOSES R L. Attributed scattering centers for SAR ATR[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(1): 79–91. doi: [10.1109/83.552098](#).
- [3] GERRY M J, POTTER L C, GUPTA I J, *et al.* A parametric model for synthetic aperture radar measurements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1999, 47(7): 1179–1188. doi: [10.1109/8.785750](#).
- [4] JACKSON J A, RIGLING B D, and MOSES R L. Canonical scattering feature models for 3D and bistatic SAR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(2): 525–541. doi: [10.1109/TAES.2010.5461639](#).
- [5] BHALLA R, LING H, MOORE J, *et al.* 3D scattering center representation of complex targets using the shooting and bouncing ray technique: A review[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1998, 40(5): 30–39. doi: [10.1109/74.735963](#).
- [6] CHIANG H C, MOSES R L, and POTTER L C. Model-based classification of radar images[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(5): 1842–1854. doi: [10.1109/18.857795](#).
- [7] 张静克, 计科峰, 邢相薇. SAR目标属性散射中心特征提取与分析[J]. 雷达科学与技术, 2011, 9(3): 207–212. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2011.03.003](#).
ZHANG Jingke, JI Kefeng, and XING Xiangwei. Feature extraction and analysis of attributed scattering centers on SAR targets[J]. *Radar Science and Technology*, 2011, 9(3): 207–212. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2011.03.003](#).
- [8] 段佳, 张磊, 邢孟道, 等. 合成孔径雷达目标特征提取新方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2014, 41(4): 13–19. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2014.04.003](#).
DUAN Jia, ZHANG Lei, XING Mengdao, *et al.* Novel feature extraction method for synthetic aperture radar targets[J]. *Journal of Xidian University*, 2014, 41(4): 13–19. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2014.04.003](#).
- [9] ZHOU Jianxiong, SHI Zhiguang, and FU Qiang. Three-dimensional scattering center extraction based on wide aperture data at a single elevation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 53(3): 1638–1655. doi: [10.1109/TGRS.2014.2346509](#).
- [10] KOETS M A and MOSES R L. Feature extraction using attributed scattering center models on SAR imagery[J]. *SPIE*, 1999, 3721: 104–115. doi: [10.1117/12.357628](#).
- [11] MA Conghui, WEN Gongjian, DING Baiyuan, *et al.* Three-dimensional electromagnetic model-based scattering center matching method for synthetic aperture radar automatic target recognition by combining spatial and attributed information[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2016, 10(1): 016025. doi: [10.1117/1.JRS.10.016025](#).
- [12] MA Conghui, WEN Gongjian, HUANG Xiaohong, *et al.* Scatterer-based approach to evaluate similarity between 3D em-model and 2D SAR data for ATR[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(2): 254–259. doi: [10.1049/iet-rsn.2016.0123](#).
- [13] DING Baiyuan, WEN Gongjian, ZHONG Jinrong, *et al.* A robust similarity measure for attributed scattering center sets with application to SAR ATR[J]. *Neurocomputing*, 2017, 219(C): 130–143. doi: [10.1016/j.neucom.2016.09.007](#).
- [14] 文贡坚, 朱国强, 殷红成, 等. 基于三维电磁散射参数化模型的 SAR目标识别方法[J]. 雷达学报, 2017, 6(2): 115–135. doi: [10.12000/JR17034](#).
WEN Gongjian, ZHU Guoqiang, YIN Hongcheng, *et al.* SAR ATR based on 3D parametric electromagnetic scattering model[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(2): 115–135. doi: [10.12000/JR17034](#).
- [15] HE Yang, HE Siyuan, ZHANG Yunhua, *et al.* A forward approach to establish parametric scattering center models for known complex radar targets applied to SAR ATR[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(12): 6192–6205. doi: [10.1109/TAP.2014.2360700](#).
- [16] HE Siyuan, DENG Fangshun, CHEN Haitao, *et al.* Range profile analysis of the 2-D target above a rough surface based on the electromagnetic numerical simulation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57(10): 3258–3263. doi: [10.1109/TAP.2009.2028632](#).

张磊: 男, 1991年生, 博士生, 研究方向为雷达目标特性及电磁仿真等。

何思远: 女, 1982年生, 教授, 主要研究方向为计算电磁学、雷达目标特性与目标识别等。

朱国强: 男, 1959年生, 教授, 长期从事目标电磁散射特性、天线理论与技术等方面的研究。

张云华: 男, 1981年生, 副教授, 主要研究方向为人工电磁材料设计与应用、新型天线理论与应用、电磁散射与目标特性等。

殷红成: 男, 1967年生, 研究员, 长期从事电磁散射、雷达目标特性、目标识别等方面的研究。

闫华: 男, 1981年生, 高级工程师, 主要研究方向为目标电磁散射建模与特性分析等。