

SAR 辐射定标中角反射器 RCS 的快速求解

翁寅侃¹ 李松¹ 杨晋陵¹ 易洪¹ 王虹² 马跃³

1 武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉, 430072

2 昆明理工大学理学院, 云南 昆明, 650500

3 山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东 青岛, 266590

摘要: 角反射器雷达截面积的快速准确解算是顺利开展合成孔径雷达辐射定标工作的重要基础。用于合成孔径雷达辐射定标的角反射器为电大尺寸, 因此, 宜采用高频近似法进行雷达截面积的仿真计算。本文利用几何光学对入射波和反射波进行射线追迹以确定每次入射场及其相对应的照明区域, 然后采用 Gordan 面元积分法对每个照明区域求散射场并累加得到角反射器的雷达截面积, 通过与文献、电磁仿真软件 FEKO (FEldberechnung für körper mit beliebiger oberfläche) 的仿真结果比较, 证明该方法有效且简单快捷, 尤其适用于电大尺寸平板角反射器雷达截面积的快速求解。

关键词: 合成孔径雷达; 辐射定标; 雷达截面积; 角反射器

中图法分类号: TP751

文献标志码: A

目前, 合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)已经由定性遥感时代跨入了定量遥感时代^[1-3], 定标是实现 SAR 对地定量观测的不可缺少的技术^[4], SAR 辐射定标可以构建图像与地物后向散射系数的精确关系, 是 SAR 定量化应用的前提^[5]。通常, 辐射定标场内布设一定数量的有源和无源设备来实现 SAR 辐射定标。角反射器具有相对稳定的、较大的雷达截面积(radar cross section, RCS), 并且表现出与波长和尺寸无关的 3dB 波束宽度, 因此, 它成为 SAR 辐射定标中常用的无源定标设备^[6-8]。

由于作为 SAR 辐射定标的角反射器尺寸较大, 一般为电大尺寸, 因此, 宜采用高频近似法。高频近似法如射线弹跳法(shooting and bounding ray, SBR)^[9-10]、高斯波束法(Gaussian beam, GB)^[11-12] 和复射线法(complex ray, CR)^[13-14], 分别要求的射线密度为 $350/\lambda^2$ 、 $25/\lambda^2$ 和 $4/\lambda^2$, 其公式繁琐且计算效率低下。电磁仿真软件 FEKO 的做法也是对平板以 $\lambda/8$ 大小的三角面元进行剖分后应用物理光学法(physical optics, PO)计算 RCS, 其效率也较低, 同时消耗了大量的计算机内

存。FEKO 的多层快速多极子技术(multilevel fast multipole method, MLFMM)虽进一步提高了其效率, 但在计算电大尺寸目标的 RCS 时其仍很耗费时间和内存。

针对平板结构的角反射器, 本文通过结合几何光学(geometrical optics, GO)和 Gordan 面元积分法^[15]提出了一种角反射器 RCS 的快速计算方法, 可分为以下两步:(1) 利用 GO 对入射波和反射波进行射线追迹以确定每次入射场及其相对应的照明区域;(2) 利用 Gordan 面元积分法对每个照明区域求散射场并累加得到总 RCS。该方法的主要优点:首先照明区域的确定简单快捷;其次无需对照明区域进行任何剖分, 只需知道照明区域的轮廓就可以应用 Gordan 的围线积分进行该区域的 RCS 计算, 然后对每个照明区域的 RCS 直接累加即可得到总的 RCS。该方法容易实现且计算效率高, 最终对比结果表明其准确有效。

1 理论方法

RCS 平方根的物理光学表达式为:

收稿日期: 2014-03-30

项目来源: 国家“十二五”民用航天预先研究资助项目(固体地表要素获取遥感载荷数据处理关键技术研究); 国家自然科学基金资助项目(40901165); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(274470); 国家测绘地理信息局测绘地理信息公益性行业专项资助项目(20142007)。

第一作者: 翁寅侃, 博士生, 从事合成孔径雷达图像的辐射定标和几何校正研究。E-mail: wengyinkan2005@163.com

通讯作者: 李松, 博士, 教授。E-mail: wuhanpeople@126.com

$$\sqrt{\sigma} = -j \frac{k}{\sqrt{\pi}} \int_s \hat{n} \times \hat{e}_r \times \hat{h}_i e^{jkr \times (\hat{i}-\hat{s})} ds \quad (1)$$

式中, σ 表示 RCS; k 表示波数; S 表示散射体的照明区; \hat{n} 表示表面的外法向矢量; \hat{e}_r 表示接收机的电极化方向单位矢量; \hat{h}_i 表示入射波的磁场方向单位矢量; \hat{r} 表示场点的位置矢量; \hat{i} 和 \hat{s} 分别表示入射方向和散射方向的单位矢量。

考虑目标照亮区内一小块平板面元的散射, 如图 1 所示。建立局部坐标系 $o-x_1x_2x_3$, 如图 2 所示, 使坐标轴 ox_3 沿面元的外法线方向 \hat{n} , ox_1x_2 位于面元内, 不失一般性, 原点 o 取在面元的中心处。

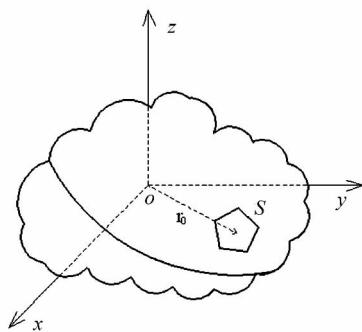


图 1 标照亮区的坐标系

Fig. 1 Coordinate System of the Illuminated Area

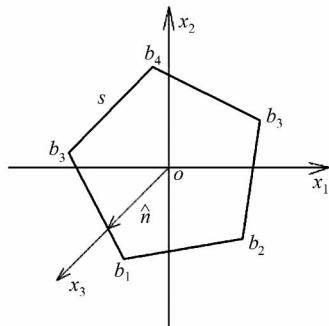


图 2 平板面元的局部坐标系

Fig. 2 Local Coordinate System of the Surface Element

设 $r = r_0 + x$, r_0 是局部坐标系原点的位置矢量, $x = x_1 \hat{x}_1 + x_2 \hat{x}_2$ 为源点在面元上的位置矢量, 则式(1)变成:

$$\sqrt{\sigma} = -j \frac{k}{\sqrt{\pi}} \hat{n} \cdot \hat{e}_r \times \hat{h}_i e^{jkw \cdot r} \int_s e^{jkw \cdot x} ds \quad (2)$$

式中, $w = \hat{i} - \hat{s} = w_1 \hat{x}_1 + w_2 \hat{x}_2 + w_3 \hat{x}_3$ 。

应用格林定理和欧拉公式可将式(2)中的面积分化成线积分。设面元为 N 边形, 第 n 个顶点的位置矢量为 b_n , 并设 $b_{N+1} = b_1$, $\Delta b_n = b_{n+1} - b_n$, $n = 1, 2, \dots, N$ 。令 $r_n = \frac{b_{n+1} + b_n}{2}$, 表示第 n 条边中点的位置矢量; $a_n = \Delta b_n$, 表示第 n 条边的长度和

方向。可得平板面元的 RCS 平方根表达式:

$$\sqrt{\sigma} = -\frac{\hat{n} \cdot \hat{e}_r \times \hat{h}_i}{\sqrt{\pi} T} e^{jkr_0 \cdot w} \sum_{n=1}^N (\hat{p} \cdot a_n) e^{jkr_n \cdot w} \cdot \frac{\sin\left(\frac{1}{2} kw \cdot a_n\right)}{\frac{1}{2} kw \cdot a_n} \quad (3)$$

式中, $T = \sqrt{w_1^2 + w_2^2}$, 为 w 在平面上的投影长度; $\hat{p} = \frac{w \times \hat{n}}{|w \times \hat{n}|} = \frac{w_2 \hat{x}_1 - w_1 \hat{x}_2}{\sqrt{w_1^2 + w_2^2}}$ 。

注意到, 当因子 $T = 0$ 时, 表达式(3)会出现奇异性。这就意味着在平板平面上没有 $(\hat{i} - \hat{s})$ 的分量, 因此, 这个表面与从源点到远场观察点逐渐延迟的等相位面相重合。换言之, 表面上的相位并没有变化, 因此, 式(2)中的积分式就化为平板小面元的面积 A 。于是, 在 $T = 0$ 的情况下, 式(3)变为:

$$\sqrt{\sigma} = -\frac{jkA}{\sqrt{\pi}} \hat{n} \cdot \hat{e}_r \times \hat{h}_i e^{jkr_0 \cdot w} \quad (4)$$

当入射方向、散射方向与面元外法向重合时, 单站散射的表达式为:

$$\sqrt{\sigma} = -\frac{jkA}{\sqrt{\pi}} e^{jkr_0 \cdot \hat{i}} \quad (5)$$

这样, 只要求出每一块理想导体平板面元的含有相位信息的 RCS 平方根, 然后再直接相加, 取模的平方, 就可以得到散射体总的 RCS, 即

$$\sigma = \left| \sum_{i=1}^m (\sqrt{\sigma})_i \right|^2 \quad (6)$$

由上述推导分析可得:

1) 一般情况下, 即 $T \neq 0$ 时, 采用式(3)计算 RCS, 此时, 只需知道该多边形面元的所有顶点坐标及其外法向矢量 \hat{n} , 照亮该多边形面元的入射波方向和散射方向的单位矢量 (\hat{i} 和 \hat{s}), 还有入射波磁场方向和接收机电极化方向的单位矢量 (\hat{h}_i 和 \hat{e}_r);

2) 当 $T = 0$ 时, 意味着在平板平面上没有 $(\hat{i} - \hat{s})$ 的分量, 即入射波方向与散射方向满足镜面反射, 如垂直照射平板时可直接采用式(5)计算 RCS; 还有当照射一个直角型的二面角反射器时, 第一个面的反射波入射到第二个面也会导致 $T = 0$, 此时须采用式(4)计算 RCS, 只需知道该多边形面元的面积 A 即可。

针对直角型二面角反射器, 如图 3 所示, 已知 P_1 (四边形 $ABOE$) 和 P_2 (四边形 $OCDE$) 面的所有顶点坐标, 利用 GO 确定照明区域。

1) P_1 和 P_2 面受直接来波 \hat{i} 的一次照射。运用 Gordan 面元积分法分别对整块 P_1 、 P_2 平板

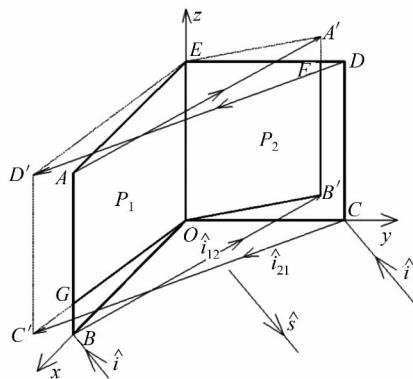


图 3 利用 GO 确定照明区域

Fig. 3 Determination of Illuminated Area by the GO

(四边形 $ABOE$ 和四边形 $OCDE$) 应用式(3)进行计算得到 RCS 的平方根 $\sqrt{\sigma_1}$ 和 $\sqrt{\sigma_2}$;

2) P_2 面受到 P_1 面反射波 \hat{i}_{12} 的二次照射。利用 GO 依次确定 P_1 平板上各个顶点(O, B, A 和 E)在 P_2 面上的投影点 O, B', A' 和 E , 顺序连接这些点得到一个多边形 $OB'A'E'$, 然后求得多边形 $OB'A'E'$ 与 P_2 面的交集(多边形 $OB'FE$)。同理, P_1 面受到 P_2 面反射波 \hat{i}_{21} 的二次照射时, 多边形 $OEAG$ 为最终照射区域。然后对这两个多边形($OB'FE$ 和 $OEAG$)应用式(4)进行 RCS 计算得到 $\sqrt{\sigma_{12}}$ 和 $\sqrt{\sigma_{21}}$;

3) 利用 GO 可出现的最大反射次数小于或等于 π/α (α 为二面角) 的最大整数^[16]。因此, 当二面角在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 时, 至多发生二次反射, 但当二面角在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 时, 会出现三次反射;

4) 最后应用式(6)把所有反射情况下的 RCS 平方根直接累加, 取模的平方即可得到二面角反射器总的 RCS。

上述步骤可类推至三面角反射器的 RCS 计算, 只是三面角反射器存在着 15 种反射情况。

2 仿真结果验证

本文采用上述方法对二面角反射器和三面角反射器分别进行了 RCS 计算。二面角反射器如图 4 所示, x 轴为二面角 α 的角平分线, z 轴与 OE 重合, \hat{s} 为散射方向, 入射波 \hat{i} 垂直于 z 轴, 与 x 轴夹角为 θ 。 $OB=OC=OE=1$ m, 二面角 $\alpha=90^\circ$, 频率为 2 GHz, 在 VV 极化下的仿真结果如图 5 所示。将本文与 FEKO 仿真结果进行了比对, 对应的偏差均值分别是 $-0.53 \text{ dB} \cdot \text{m}^2$ 和 $-0.94 \text{ dB} \cdot \text{m}^2$ 。若 $OB=45/k$ m, $OC=30/k$ m, $OE=0.5$ m, $k=2\pi/\lambda$, 二面角 $\alpha=100^\circ$ 和 $\alpha=88^\circ$,

频率为 9.4 GHz, 在 HH 极化下的仿真结果如图 6 所示, 图 6(a) 将 Knott^[17] 方法与本文方法的结果进行了比对, 两者的偏差均值几乎为 0 dBsm; 图 6(b) 将 FEKO 与本文方法的结果进行比对, 两者的偏差均值是 -0.11 dBsm 。从图 5~图 6 中也可以看出, 二面角无论是直角、钝角或锐角, 本文方法与 FEKO、文献^[17]结果都基本吻合。

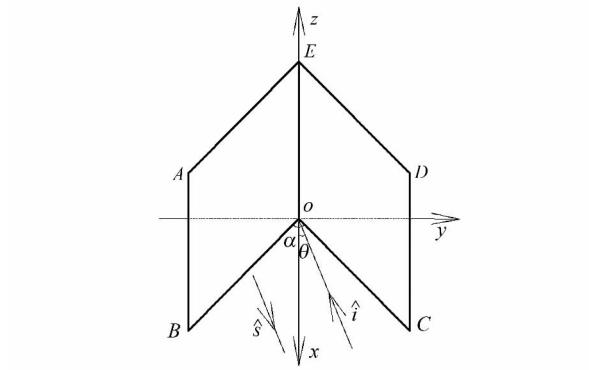
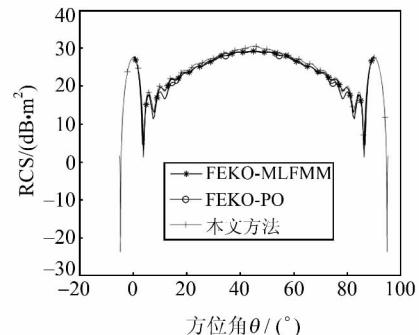


图 4 二面角反射器几何示意图

Fig. 4 Geometric Sketch of the Dihedral Reflector

图 5 二面角 $\alpha=90^\circ$ 时 VV 极化下的 RCS 曲线对比图Fig. 5 Comparsion of the RCS: $\alpha=90^\circ$, VV Polarization

作为 SAR 辐射定标中最常用的三角形三面角反射器, 本文的计算方法同样适用于计算其 RCS。对于 3 个二面角都是 90° 的三面角反射器, 存在着 15 种反射情况($P_1, P_2, P_3, P_1P_2, P_1P_3, P_2P_3, P_3P_2, P_3P_1, P_2P_1, P_1P_2P_3, P_1P_3P_2, P_2P_1P_3, P_2P_3P_1, P_3P_1P_2$ 和 $P_3P_2P_1$)。其几何结构如图 7 所示, $OA=OB=0.2$ m, $OC=0.22$ m, 分别与 x 轴、 y 轴和 z 轴重合, \hat{s} 为散射方向, 入射波 \hat{i} 与 z 轴的夹角为 φ , 其在 xoy 平面上的投影与 x 轴夹角为 θ , 频率为 16 GHz。固定方位角 $\theta=45^\circ$, 仰角 φ 取 $0^\circ \sim 90^\circ$, 其仿真结果如图 8 所示, 将 MLFMM、PO 和本文方法的结果进行比对, 对应的偏差均值分别是 $0.3 \text{ dB} \cdot \text{m}^2$ 和 $-0.61 \text{ dB} \cdot \text{m}^2$, 可见两者结果基本一致。

在验证了本文方法有效性的同时进行了计算

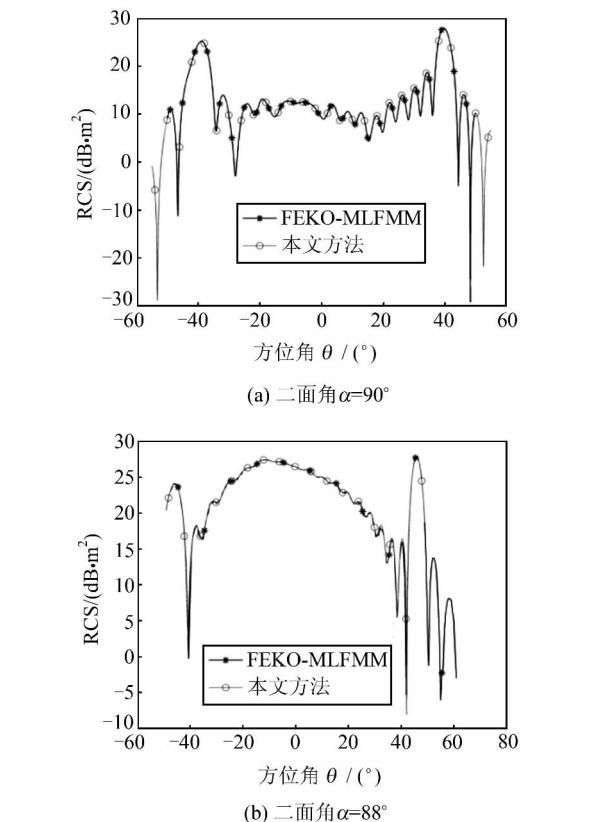


图 6 HH 极化下的 RCS 曲线对比图

Fig. 6 HH Polarization

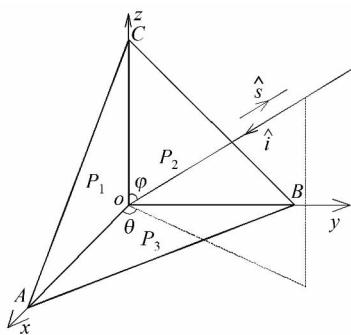
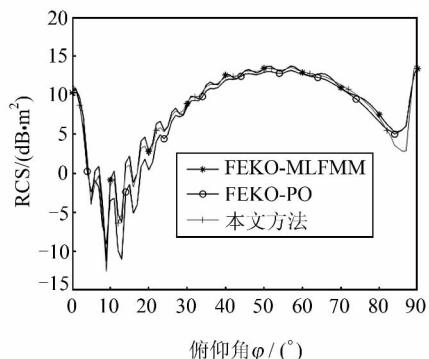


图 7 三面角反射器几何示意图

Fig. 7 Geometric Sketch of the Corner Reflector

时间的比对,以本文描述的两种类型角反射器为例,三条边长分别为 $OB=OC=OE=1$ m,频率为 2 GHz 的二面角反射器在 FEKO 中剖分后产生 17 162 个三角形面元;三条棱长 $OA=OB=0.2$ m, $OC=0.22$ m,频率为 16 GHz 的三面角反射器则经剖分后产生 34 184 个三角面元。由于本文未对平板做任何剖分,因而其 RCS 计算效率较高,计算时间的比对如表 1 所示,本文方法比 FEKO 中 MLFMM 和 PO 算法的计算时间分别缩短了近 413 倍、4 696 倍(二面角反射器)和 383 倍、9 174 倍(三面角反射器),且本文方法占计算机资源极少,而本文所列的 FEKO 仿真结果均在 8 核

图 8 方位角 $\theta=45^\circ$ 时 HH 极化下的 RCS 曲线对比图Fig. 8 Comparsion of the RCS: $\theta=45^\circ$, HH Polarization

CPU 和 32 GB 内存下运行计算。可见,本文方法大大节约了计算时间,减小了内存消耗,显著地提高了仿真效率。

表 1 计算时间比对

Tab. 1 Computation Time Comparsion

计算时间	本文方法	FEKO	
		MLFMM	PO
二面角反射器	2.3 s	0.264 h	3 h
三面角反射器	3.1 s	0.33 h	7.9 h

3 结语

采用本文介绍的方法对二面角反射器、三面角反射器等 SAR 定标体进行 RCS 计算,通过与文献、电磁仿真软件 FEKO 的仿真结果比较,可以看出其效果良好,大大缩短了计算时间,为后续通过大量仿真计算优化设计专用于 SAR 辐射定标的角反射器提供了便利。由于该方法基于射线追迹,因而较适用于电大尺寸平板角形结构多次反射的情形,例如常见的二面角反射器和三面角反射器,但对处于低频区 RCS 计算误差较大。

参 考 文 献

- [1] Chen Erxue, Li Zengyuan, Tian Xin, et al. Terrain Radiometric Correction Model and Its Validation for Space-borne SAR Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(3): 322-327 (陈尔学, 李增元, 田昕, 等. 星载 SAR 地形辐射校正模型及其效果评价[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(3): 322-327)
- [2] Liu Jiayin, You Hongjian, Hong Wen. Modified Orbit Algorithm with Sparse Ground Control Points for Geo-rectification of Space-borne SAR Image[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(3): 262-265 (刘佳音, 尤红建,

- 洪文. 用于星载 SAR 图像几何校正的稀疏控制点修轨方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(3): 262-265)
- [3] Xu Caijun, He Ping, Wen Yangmao, et al. Crustal Deformation Monitoring of Xianshuihe Fault by CR-InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(3): 302-305(许才军, 何平, 温扬茂, 等. 利用 CR-InSAR 技术研究鲜水河断层地壳形变[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(3): 302-305)
- [4] Ding Yan. Resarch on In-orbit Measurements of SAR Radiometric Calibration Constant and Antenna Pattern by the Marine Field[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2010(丁岩. 利用海洋场在轨测量 SAR 辐射定标常数和天线方向图方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010)
- [5] Li Liang, Hong Jun, Ming Feng, et al. An Approach for Ionospheric Effects Correction on Spaceborne SAR Calibration Based on Active Radar Calibrator[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(5): 1 096-1 101(李亮, 洪峻, 明峰, 等. 一种基于有源定标器的电离层对星载 SAR 定标影响校正方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(5): 1 096-1 101)
- [6] Freeman A. SAR Calibration: An Overview[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 1992, 30(6): 1 107-1 121
- [7] Gray A L, Vachon P W, Livingstone C E, et al. Synthetic Aperture Radar Calibration Using Reference Reflectors[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 1990, 28(3): 374-383
- [8] Liu Chen, Sandirasegaram N, English R A, et al. MarCoPola Polarimetric SAR Trial: Signatures of Multiple Vessels with Aligned Operating Conditions [R]. Defence Research and Development Canadaotawa, Ontario, 2005
- [9] Ding Jianjun, Liu Zhiwei, Xu Kan, et al. Application of High Frequency Methods for Scattering Analysis of Electrically Large Objects [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(11): 2 309-2 312(丁建军, 刘志伟, 徐侃, 等. 基于高频方法分析电大尺寸目标的散射[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(11): 2 309-2 312)
- [10] Tao Yubo, Lin Hai, Bao Hujun. GPU-Based Shooting and Bouncing Ray Method for Fast RCS Prediction[J]. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 2010, 58(2): 494-502
- [11] Wang Yunhua, Zhang Yanmin, Guo Lixin. Investigation of the Scattered Field from a Two-dimensional Dielectric Target Above the Planar Surface with a Guass Beam Incidence[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(9): 5 529-5 535
- [12] Li Qiuming, Vernon R. J. Theoretical and Experimental Investigation of Gaussian Beam Transmission and Reflection by a Dielectric Slab at 110 GHz[J]. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 2006, 54(11): 3 449-3 457
- [13] Wu Nan, Chen Jiong. Discussion on the RCS Simulation Test of Naval Ships on Water Surface[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2012, 7(5): 103-106(吴楠, 陈炯. 舰船目标 RCS 水面模拟试验及其应用探讨[J]. 中国舰船研究, 2012, 7(5): 103-106)
- [14] Gao Fei, Ma Fengguo, Zhang Hongxia, et al. Analysis of Cavity Scattering Based on Complex Rays Method[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2000, 15(2): 244-247(高飞, 马凤国, 张红霞, 等. 利用复射线法分析腔体的散射场[J]. 电波科学学报, 2000, 15(2): 244-247)
- [15] Gordan W B. Far Field Approximation of the Kirchoff-Helmholtz of Scattered Fields[J]. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 1975, 23(5): 864-876
- [16] Ruan Yingzheng. Radar Cross Section and Stealth Technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998: 75-76(阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 75-76)
- [17] Knott E. RCS Reduction of Dihedral Corners[J]. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 1977, 25(3): 406-409

Fast Solution to the RCS of Corner Reflector for the SAR Radiometric Calibration

WENG Yinkan¹ LI Song¹ YANG Jinling¹ YI Hong¹ WANG Hong² MA Yue³

1 Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China

2 School of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

3 College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

Abstract: Fast and accurate solution of a corner reflector's radar cross section is the important foundation of synthetic aperture radar radiometric calibration. Since a corner reflector used in radiometric

calibration is usually electrically large, its backscatter field is appropriately analyzed with a high frequency approximation method; a fast and accurate solution is proposed in this paper. The incident field and its corresponding illuminated area are determined by a ray tracing of a incident wave and reflected wave, then the backscatter field of each illuminated area is computed by the Gordan surface integral method respectively and added up for the total RCS of a corner reflector. Simulation results agreed well with the results from the references and from the electromagnetic computing software FEKO. So the method proposed in this paper was demonstrated to be accurate and efficient, and especially suitable for fast radar cross section computation of corner reflectors composed of large size plates.

Key words: SAR; radiometric calibration; radar cross section; corner reflector

First author: WENG Yinkan, PhD candidate, specializes in SAR geometric and radiometric calibration. E-mail: wengyinkan2005@163.com

Corresponding author: LI Song, PhD, professor. E-mail: wuhanpeople@126.com

Foundation support: The Research Project in Advance of Civil Space in National 12th Five-year; the National Natural Science Foundation of China, No. 40901165; the Fundamental Research Fundation for the Central Universities, No. 274470; the Special Public Welfare Project for National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Application Index Demonstration and Key Technology of Subsequent Optical Satellite for Surveying and Mapping , No. 201412007.

+++++(上接第 1538 页)

Anisotropic Diffusion on Complex Tensor Fields for PolSAR Image Filtering

XIA Guisong^{1,2} XUE Nan^{1,2} WANG Zifeng^{1,2} ZHANG Liangpei^{1,2}

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Each pixel of a tensor image is usually characterized by a 3-order positive definite matrix. Currently, existing methods of denoising tensor images usually regard the data as multi-channel images, which is likely to destroy the structure of positive definite matrices of the image and some information will be missed possibly. This paper addresses the problem of denoising complex tensor images. More precisely, we extend the anisotropic diffusion model, also known as P-M model, from scalar or vector images to complex tensor ones. The proposed method can be applied to remove speckle noises in PolSAR images. In contrast with existing denoising algorithms, our method is better at suppressing the effects of speckles while preserving edges.

Key words: image denoising; PDE; PolSAR images; manifolds; tensor images

First author: XIA Guisong, PhD, associate professor, specializes in image processing and computer vision. E-mail: guisong.xia@whu.edu.cn.

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 91338113, 41501462; the Open Projects Program of National Laboratory of Pattern Recognition, No. 201306301.