

分析圆柱油罐目标合成孔径雷达图像的新方法

张月婷^{*①②④} 丁赤彪^{①③} 王宏琦^{①②} 胡东辉^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190)

^③(微波成像技术国家重点实验室 北京 100190)

^④(中国科学院研究生院 北京 100190)

摘要: 该文提出了一种针对油罐目标的合成孔径雷达(SAR)图像的分析方法。该方法根据圆柱油罐具有圆型边缘和圆柱型外形的几何特点,利用物理光学法(Physical Optics, PO)和增量绕射长度(Incremental Length Diffraction Coefficients, ILDC)理论建立了油罐目标的散射模型,并基于该模型推导了圆柱油罐的散射中心分布特征,同时引入投影映射算法(Mapping and Projection Algorithm, MPA)建立了成像模型,有效利用了单一视角的散射数据进行 SAR 图像模拟,仿真结果与实际 SAR 图像散射特征吻合,验证了方法的有效性。同时,利用 45 组实测数据得到了 SAR 图像散射中心的特征,并根据建立的散射模型和成像模型,分析和总结了油罐目标 SAR 图像的主要散射特征,为 SAR 图像中基于油罐目标的识别领域提供了理论依据。

关键词: 油罐; SAR 图像; SAR 图像仿真; 散射中心; 散射特征

中图分类号: TN959

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2012)02-0190-06

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20020

A New Algorithm for Analyzing the SAR Image of the Cylindrical Oil Tank

Zhang Yue-ting^{*①②④} Ding Chi-biao^{①③} Wang Hong-qi^{①②} Hu Dong-hui^{①②}

^①(Institute of Electronics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Key Laboratory of Spatial Information Processing and Application System Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^③(The National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100190, China)

^④(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In this paper, a new approach for the understanding of the SAR image of the cylinder oil tank is presented. In the approach, the Physical Optics (PO) and the theory of Incremental Length Diffraction Coefficients (ILDC) are employed to set up the scattering model of the oil tank according to the circle edges and cylinder geometry futures, and the position of the main scattering centers are deduced. The SAR image of the tank is simulated through the scattering model and the imaging model based on Mapping and Projection Algorithm (MPA). The real SAR data and the simulation test the validity of the approach. Furthermore, the scattering centers are detected with 45 groups of the measured data. According the scattering model and the imaging model in the approach proposed, the main scattering characteristics of the cylindrical oil tank are interpreted and summarized. It is hoped that the work in this paper could provide some useful guidelines for the identification of the oil tank in the SAR images.

Key words: Oil tank; SAR image; SAR image simulation; Scattering center; Scattering characteristics

1 引言

油罐目标的 SAR 图像和它的光学图像有较大

的区别,光学图像中油罐目标有规则的圆周外形,而在雷达图像中油罐的圆周轮廓断断续续,并且,油罐目标的散射中心的分布与油罐的几何形状存在着较大的差别。

然而,目前雷达图像油罐目标的自动识别多数是采用同光学图像相同的识别方法,利用油罐目标

2012-03-29 收到, 2012-06-07 改回; 2012-06-13 网络优先出版

国家自然科学基金(40871209)资助课题

*通信作者: 张月婷 zhangyueting06@mails.gucas.ac.cn

的椭圆几何特征进行识别,该方法虚警率较高^[1]。油罐目标的有效识别的基础是针对油罐目标 SAR 图像中主要特征的散射机理的有效分析,而 SAR 图像仿真是对图像理解的有效途径。目前,尽管 SAR 图像仿真方法众多,但针对仿真图像开展目标特征分析的相关文献很少^[2-3]。针对油罐目标而言,需要一种根据油罐目标的结构特点建立的 SAR 图像特征分析方法以理解油罐目标的 SAR 图像特征,为后续的油罐目标识别和信息提取提供依据。本文针对这个问题提出了一种分析油罐目标 SAR 图像的方法,通过该方法对油罐目标的散射特征以及罐顶圆周的散射中心分布进行了研究。

本文根据圆柱油罐的圆周边缘和圆柱外形的几何特点,利用物理光学法(Physical Optics, PO)和增量绕射长度理论(Incremental Length Diffraction Coefficients, ILDC)建立了油罐目标的近似电磁散射模型,在该散射模型建立的基础上,引入了映射投影(Mapping and Projection Algorithm, MPA)的 SAR 成像仿真方法完成了针对油罐目标的 SAR 图像仿真,同时,利用得到的仿真 SAR 图像与实际数据比对,结合散射模型的构建过程分析和归纳了油罐目标 SAR 图像的主要特征,解释了油罐目标 SAR 图像中的显著细节的产生过程,指明了主要特征对应的散射机理,为油罐目标的识别和信息提取提供了理论的依据。

本文第 2 节给出了针对油罐目标的 SAR 图像仿真方法,包括成像模型、散射模型的分析及具体实现的主要步骤;在此基础上,第 3 节计算和仿真了圆柱型油罐的 SAR 图像,结合实际数据验证了仿真图像的有效性,同时针对散射模型分析和解释了油罐目标的主要特征;最后,第 4 节给出了本文研究的结论。

2 圆柱油罐目标 SAR 图像仿真方法

本节依次给出了油罐目标的成像模型,散射模型和 SAR 图像仿真的主要步骤。

2.1 基于 MPA 的 SAR 成像模型

2006 年, Feng Xu 等在文献[3]中提出了一种基于映射投影(MPA)的复杂地面场景极化 SAR 成像模拟算法,该算法采用了根据分辨率划分网格的思路将目标分解为若干散射单元,有效实现了植被场景和建筑物场景的 SAR 图像模拟,该算法利用单角度的散射数据模拟 SAR 图像,避免了传统方法的 2 维散射数据的计算,节省了计算量。

MPA 算法的计算过程如下:在成像模拟中把整个场景沿方位向的每个像素间隔划分为行,对每一

行独立计算散射系数,最后获得整个场景的散射系数图,然后与雷达系统冲激响应 2 维卷积获得 SAR 图像。在具体的实现中,该算法将划分成网格的各个区域内的散射场强投影到斜距平面,再经过累加得到每个像素内的散射强度值。文献[3]中对自然目标和规则建筑物目标进行仿真,取得了很好的效果。

根据 MPA 算法^[3],散射场的计算由下式得到

$$S_{n,i} = \sum_{m=m_n}^{m_{n+1}-1} \sum_{p=p_i}^{p_{i+1}-1} \sum_{q=0}^{Q-1} \prod_{p'=0}^p \mathbf{E}_0^+(m, p', q) \mathbf{S}(m, p, q) \cdot \prod_{p'=p}^0 \mathbf{E}_0^-(m, p', q) \quad (1)$$

$S_{n,i}$ 表示像素单元的后向散射强度, $\mathbf{S}(x_1, y_1, z_1)$ 为目标总散射场的空间分布, \mathbf{E}_0^+ , \mathbf{E}_0^- 分别对应着后向和前向的衰减系数^[3]。

油罐目标在雷达图像中多为规则排列的油罐组,对于一个油库基地而言,在雷达图像中,它不同于大场景的自然目标,在油罐目标的成像区域,雷达聚焦深度变化微小,本文针对这个特点,将相同距离向弧线的叠加近似为直线叠加,并通过建立两个坐标系实现散射系数的斜距累加,简化了成像模型。

首先:定义场景坐标系(y_1, z_1 分别取雷达轨迹方向和垂直地面向上的方向)和成像坐标系(x_1, y_2 分别取雷达波束方向和雷达轨迹方向),如图 1 所示。

考察场景目标尺寸远远小于景中心斜距的条件下,雷达波束到达目标不同处的局部入射角近似相同,在这种近似条件下,相应的散射场系数的斜距分布函数 $F(x_2, y_2)$ 满足下面的等式:

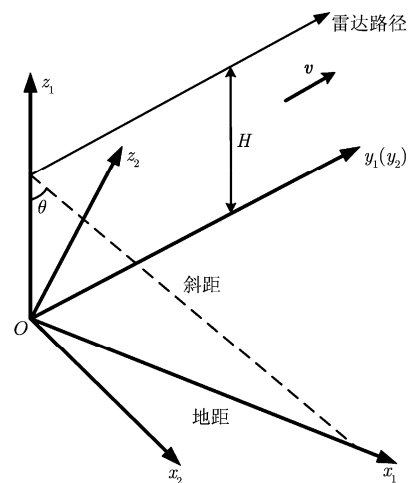


图 1 场景坐标系和成像坐标系

$$F(x_2, y_2) = \int S[(x_1, y_1, z_1)T] dz_2 \quad (2)$$

其中, T 为场景坐标系到成像坐标系的坐标变换矩阵。于是, 式(1)变为:

$$S_{n,i} = \prod_{p'=0}^p E_0^+[(x,y,z)T] S_0[(x,y,z)T] \prod_{p'=p}^0 E_0^-[(x,y,z)T] \quad (3)$$

得到散射矩阵之后, SAR 图像可以通过 SAR 景中心点目标响应 h 和散射矩阵 S 的 2 维卷积获得^[4]:

$$G(x', r') = \iint S(x, r) h(x' - x, r' - r) \quad (4)$$

景中心点目标响应的计算方法详见文献[5]。

2.2 圆柱型油罐散射模型

油罐按建造材料分为金属油罐和非金属油罐, 按照形状分为立式油罐和卧式油罐, 本文主要研究卧式油罐, 卧式油罐是由圆筒型的油罐壁和罐顶组成的油罐, 如图 2 所示。

为了建立油罐目标的散射模型, 本文针对主要散射结构进行了分析。如图 2 所示, 在油罐目标与电磁波相互作用时, 对散射场起主要贡献的结构为: 油罐侧壁以及罐顶部圆周外缘 ABC , 圆周内缘 $A'B'C'$, 罐底圆周 DEF 。

首先分析油罐壁的散射, 通常, 罐顶内圆周结构低于外圆周, 即: $A'B'C'$ 低于 ABC , 因此油罐外壁和部分油罐内壁产生散射。被照射的油罐内壁贡献较小, 近似用抛物面形(平面与柱面的交线)内壁的散射代替油罐内壁的散射。

在如图 2 所示的场景坐标系下, 令入射波在 $\varphi = 0$ (φ 为 xoy 平面中与 x 轴夹角)的平面, 电场为水平极化。则入射波矢 k 为 $(\sin \theta, 0, \cos \theta)$, 令 n 为局部法向量, r 为局部的方向矢量, 根据文献[6], 利用 PO 理论, 散射场 E^s 为:

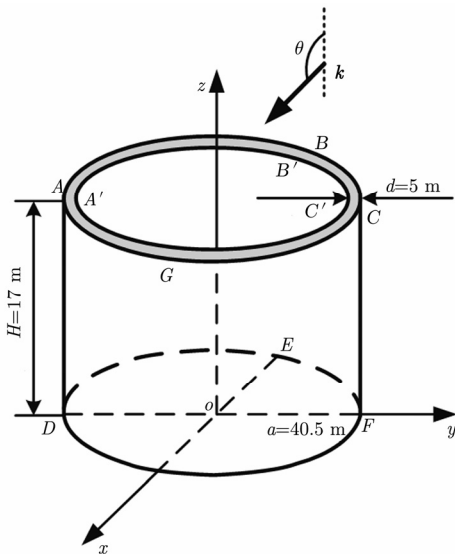


图 2 几何关系图

$$E^s = \frac{-jk e^{jkR}}{2\pi R} \int_s [(\mathbf{e}_\perp \cdot \mathbf{e}_i)^2 \Gamma_\perp + (\mathbf{e}_\parallel \cdot \mathbf{e}_i)^2 \Gamma_\parallel] (\mathbf{n} \cdot \mathbf{k}) \cdot e^{j2kr \cdot \mathbf{k}} ds \quad (5)$$

其中 k 为波数, Γ_\perp 和 Γ_\parallel 分别对应垂直极化和水平极化下的反射系数, 令:

$$f(\varphi) = [(\mathbf{e}_\perp \cdot \mathbf{e}_i)^2 \Gamma_\perp + (\mathbf{e}_\parallel \cdot \mathbf{e}_i)^2 \Gamma_\parallel] (\mathbf{n} \cdot \mathbf{k}) \quad (6)$$

$$f(\varphi) = A(\varphi) \exp(jB(\varphi)) \quad (7)$$

$f(\varphi)$ 与油罐材质有关。散射场可以写成下面的形式:

$$E^s = \frac{-jk e^{jkR}}{2\pi R} \int_s A(\varphi) e^{j[2kr \cdot \mathbf{k} + B(\varphi)]} ds \quad (8)$$

将式(8)代入式(5), 有:

$$E^s = a \frac{-jk E_0 \exp(-jkr)}{2\pi r} \sin \theta \cdot \theta \int_{-\pi/2}^{\pi/2} A(\varphi') \exp(jB(\varphi')) \exp\{2jk a \sin \theta \cos \varphi'\} d\varphi' \cdot \int_{z(\varphi')}^H \exp\{2jk z' \cos \theta\} dz' \quad (9)$$

其中, θ 为圆柱坐标系下的方向矢量, 并且:

$$z' = \begin{cases} H - a(1 + \cos \varphi') \tan \theta, & \text{内侧壁} \\ 0, & \text{外侧壁} \end{cases}$$

回顾式(8), 相位项的特点为: $2kr \cdot \mathbf{k} \gg B(\varphi)$, $A(\varphi)$ 的变化大大小于相位包络的变化(后续数值计算结果给出)。计算式(9)的积分, 当 $z'(\varphi) = 0$ 时,

$$E^s = \theta \frac{E_0 a \tan \theta \exp(-jkr)}{4\pi r} I \cdot [\exp(2jkH \cos \theta) - 1] \quad (10)$$

其中,

$$I = \int_{\pi/2}^{3\pi/2} f(\varphi') \exp(2jk a \sin \theta \cos \varphi') d\varphi' \quad (11)$$

根据驻定相位原理(Principle of Stationary Phase, POSP)^[5], 求得: 驻相点 $\varphi' = \pi$ 。

$$I = -\left(\frac{\pi}{jk a \sin \theta}\right)^{1/2} \exp(-2jk a \sin \theta) A(\pi) \quad (12)$$

求得散射场为:

$$E^s = \theta \frac{E_0 a \tan \theta \exp(-jkr)}{4\pi r} \left(\frac{\pi}{jk a \sin \theta}\right)^{1/2} A(\pi) \cdot \exp(-j2k a \sin \theta) \cdot [\exp(2jkH \cos \theta) - 1] \quad (13)$$

同理可得, 当 $z'(\varphi) = H - a(1 + \cos \varphi') \tan \theta$ 时, 散射场为:

$$E^s = \theta \frac{E_0 a \tan \theta \exp(-jkr)}{4\pi r} \left(\frac{\pi}{jk a \sin \theta}\right)^{1/2} A(\pi) \cdot \exp(-j2k a \sin \theta) \exp(2jkH \cos \theta) \cdot \left\{ -\left(\frac{\pi}{jk \cos \theta}\right)^{1/2} A(\pi) - \int_{-\pi/2}^{\pi/2} f(\varphi') d\varphi' \right\} \quad (14)$$

观察式(13)和式(14),可以得到以下的散射模型:

物理光学法近似下非金属油罐和金属油罐的散射特点是相似的,油罐外壁会产生两个位于图2中B点和E点的散射中心,坐标分别为: $(-a, 0, 0)$, $(-a, 0, H)$,内壁局部的散射会产生一个位于 $(a, 0, H)$ 的散射中心,且散射强度小。

以上的计算过程直接建立了油罐壁的散射模型,接下来考虑油罐主要圆周结构的散射模型。

油罐目标主要包含3段主要的圆周边缘,如前文所述。本文对这些圆周边缘进行线元建模,应用Incremental Length Diffraction Coefficients,即:ILDC理论^[7],计算它们的散射。在后向散射的情况下,应用ILDC理论推导出每个线元的散射场为:

$$\mathbf{E}^s = l \frac{\exp[j(kr - \pi/4)]}{\sqrt{2\pi r}} \exp(2jkr_c \cdot \mathbf{k}) \cdot \text{sinc}(kl\mathbf{p} \cdot \mathbf{k}) \bar{d} \cdot \mathbf{E}^i \quad (15)$$

其中, \mathbf{p} 为线元方向矢量, \mathbf{r}_c 为线元中心位置矢量, \bar{d} 为绕射系数。在计算过程中,归一化外劈角 n 的数值是1.5^[7],此时,在如图2中A,C,D,F4个点对应位置的散射计算过程会出现奇异性,针对这个问题,本文利用临近点的散射强度代替奇异处的散射值。

2.3 SAR 图像仿真的流程

根据前两节的分析,在SAR图像模拟前首先设置雷达工作参数和载入油罐模型;主要的参数包括:雷达工作频率,方位角,入射角,成像分辨率以及油罐的几何参数和介电常数。油罐模型可以用这样的方法建立:油罐顶部内外圆周棱边和底部被照射棱边分成 N 个线元,根据弹射线理论射线密度大小^[6],线元长度为 $\lambda/10$ 数量级,每个线元对应一组向量,该向量记录线元起点终点坐标,线元所属平面法向量等信息。首先根据雷达参数计算景中心点目标响应 \mathbf{h} ^[5],接着计算场景坐标系到成像坐标系的坐标变换矩阵 \mathbf{T} 。之后,建立散射矩阵 \mathbf{S} ,根据前文建立的散射模型和散射计算方法计算线元的散射和罐壁的散射,根据计算得到的散射场矢量更新散射矩阵,直到所有线元计算完成。在获得散射矩阵之后,根据地距斜距关系进行几何校正^[8],最后输出油罐目标的仿真SAR图像。

以上建立的仿真油罐目标SAR图像的算法的具体步骤如下:

- (1) 设置雷达参数,建立油罐模型;
- (2) 建立场景坐标系和成像坐标系,计算景中心点目标响应 \mathbf{h} 和坐标变换矩阵 \mathbf{T} ;
- (3) 读取下一个圆周边缘结构线元参数;
 - (a) 计算第 i 个线元中心坐标 $\mathbf{P}_{\text{cen}_i}$;

(b) 计算散射场 \mathbf{E}^s ;

(c) 计算成像坐标系中位置矢量 $\mathbf{P}'_{\text{cen}_i}$;

(d) 根据分辨率计算 $\mathbf{P}'_{\text{cen}_i}$ 在散射矩阵中的索引;

(e) 更新散射矩阵 \mathbf{S} ;

(4) 重复(3)直到所有线元计算完毕;

(5) 获取油罐壁散射强度,更新散射矩阵 \mathbf{S} ;

(6) 根据式(4)计算获取斜距图像 \mathbf{G} ;

(7) 几何校正,获取模拟油罐图像。

3 数值计算结果和散射特征分析

本节给出了混凝土油罐实验仿真结果,同时与相应参数的机载雷达图像进行了对比,并针对45组实际SAR图像进行了散射特征的分析。

实验选择混凝土油罐目标的几何尺寸为:高17 m,半径:40.5 m;如图2所示。雷达工作频率L波段,电场为水平极化。主要参数见表1。

表1 雷达参数

参数	数值
飞行高度	5000 m
分辨率	5 m×5 m
工作频率	1.2 GHz
飞行速度	150 m
过采样率	1.2
波束入射角	36°

下面分析和讨论主要的数值计算结果。

(1) 景中心点目标响应。

根据表1的参数,计算得到的 \mathbf{h} 的主要指标参数见表2。

表2 点目标指标

指标	距离向	方位向
分辨率(m)	5	5
扩展比	0.906	0.907
峰值旁瓣比(dB)	-13.496	-13.375
积分旁瓣比(dB)	-10.821	-9.329

(2) 油罐壁散射模型中积分项 $A(\varphi)$ 随位置的变化。

图3所示曲线为 $A(\varphi)$ 随罐顶线元变化曲线,实验选择了混凝土3种典型介电常数值,式(7)中相位随角度的变化率在1000量级,对比图3的曲线可以判断 $A(\varphi)$ 随角度的变化远远小于式(7)中相位随角

度的变化,这验证了本文所述的应用驻定相位原理的可行性。

(3) 圆周缘结构的散射。

图4为罐顶面圆周缘散射强度幅值的变化曲线,虚线表示外圆周散射强度随位置的变化,实线表示内外圆周散射叠加后的散射强度。从图4中可以看到以下几个特征:

- (a) 外圆周缘的散射主要出现了5个峰值。
- (b) 圆周缘散射场出现了闪烁现象。散射强度的波瓣宽度小于0.1度,与实际SAR图像中边缘断断续续的特征^[1]吻合。
- (c) 距离电磁波照射的最近点和最远点的周围散射强度较大,两个点位置对应图2中B、G两点。
- (d) 仿真SAR图像。

图5为仿真得到的油罐目标的SAR图像,图6是基于仿真图像散射中心的分析示意图。图6示意了仿真图像中的散射中心位置。观察图5和图6,油罐目标的散射特征主要有:

- (a) 在罐顶圆周圆心位置所处的方位向,3个“月牙”型散射中心沿距离向一字分布,结合数值计算结果,“月牙”中心分别对应图2中B、E、G3

点。3个强散射中心沿距离向排列,由近到远分别对应图2的B、E、G3点,而图2中对应的A、C、D、F点处并没有形成较强的散射中心。

(b) 罐顶圆周不连续。

实验将3个散射中心所处的方位向剖面进行8倍sinc插值,并与实际信号的平均值(实验选取了45组油罐SAR图像)进行了对比,如图7所示。图7中两条曲线的主要峰值基本吻合,验证了本文方法的有效性。

(5) 实际SAR图像的散射中心的提取。

实验选取了45组实测数据得到的SAR图像,利用文献[9]的方法提取了罐顶圆周缘的散射中心,并计算了每个散射中心与圆心形成向量的幅角,利用幅角信息进行了分析,以10°为一个区间统计了各区间内的散射中心的位置分布信息,表3给出了包含散射中心数目最多的5个角度区间的计算结果。实验发现,散射中心集中幅角为40°~50°, -50°~-40°, 100°~110°, -110°~-100°4个角度区间内,相应区间内计算得到的4个均值量与图4的数值计算显示的峰值位置基本吻合。

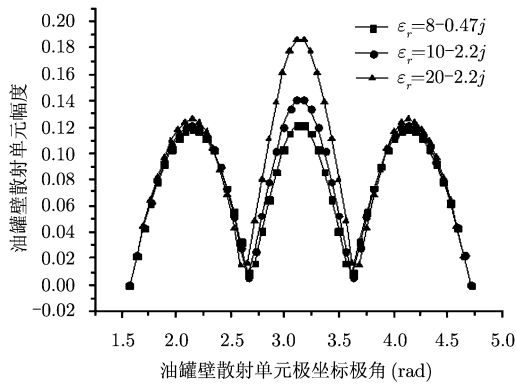


图3 散射强度 $A(\varphi)$ 随角度变化曲线

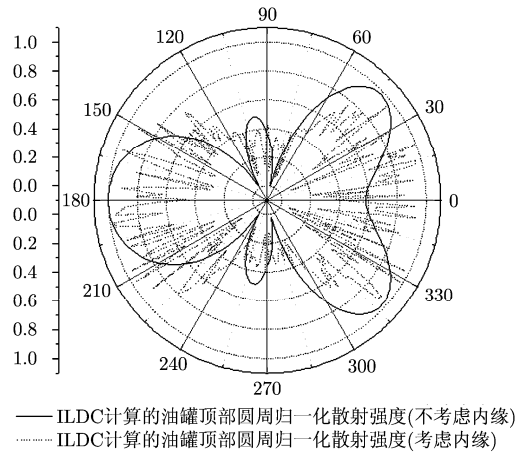


图4 罐顶散射场变化曲线

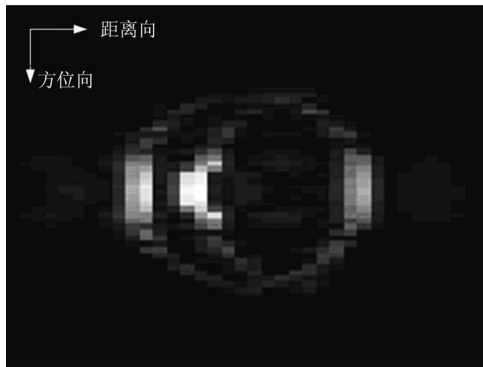


图5 仿真油罐SAR图像

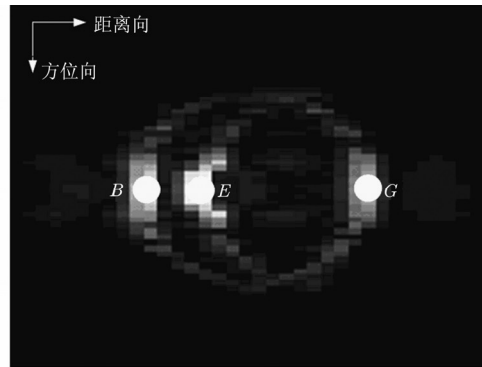


图6 散射中心分析示意图

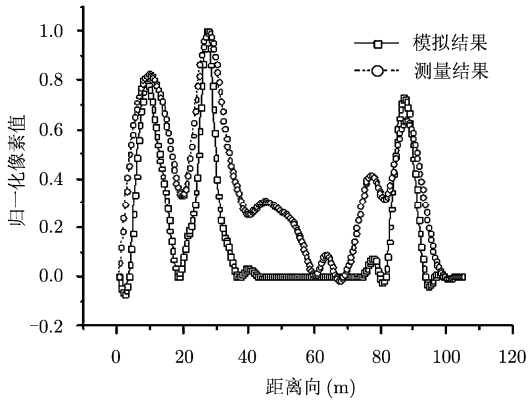


图 7 罐顶中心所处方位向剖面的像素对比

表 3 实际 SAR 图像罐顶散射中心分布

角度区间(°)	存在散射中心的油罐目标数	散射中心角度均值(°)	散射中心角度方差
[-40, -50)	23	-46.9	22.45
[100, 110)	20	106.35	10.66
[40, 50)	19	46.63	14.91
[-110, -100)	18	-105.17	18.38
[70, 80)	9	71.11	4.86
[-120, -110)	6	-116.5	25.1

4 结束语

本文提出了一种分析圆柱油罐目标合成孔径雷达图像的新方法，该方法根据油罐目标的结构特点建立了散射模型和成像模型，并据此给出了圆柱型油罐目标的 SAR 图像的仿真方法。实验表明，仿真 SAR 图像与实际雷达图像的特性吻合，验证了模型的有效性。同时，根据建立的散射模型和成像模型，分析和总结了油罐目标 SAR 图像的主要散射特征，指明了各个主要特征对应的电磁散射机制。

本文方法为 SAR 图像中油罐目标特性的提取工作提供了一种有效的研究途径，同时，文中得到的油罐目标的主要散射特征为油罐目标的信息提取

作者简介



张月婷(1983-), 女, 中国科学院电子学研究所读博士生, 主要从事 SAR 图像仿真和 SAR 图像理解领域的研究。

丁赤飏(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 现任中国科学院电子学研究所副所长, 主要从事合成孔径雷达、遥感信息处

提供了理论依据。此外, 该方法的研究思路: 根据目标的几何特点建立散射模型以分析其 SAR 图像主要特征的散射机理, 也可以用于其它人工目标的 SAR 图像理解工作中。

参考文献

- [1] 夏昕. SAR 图像典型目标特征提取与识别方法研究[D]. [硕士学位论文], 四川大学, 2006, 第 1 章.
Xia Xin. Study of feature extraction and recognition of typical targets in SAR images[D]. [Master dissertation], Sichuan University, 2006, Ch. 1.
- [2] Wang Yuanxun and Ling Hao. Radar signature prediction using moment method codes via a frequency extrapolation technique[J]. *IEEE Transactions on Antenna Propagation*, 1999, 47(6): 1008-1014.
- [3] Xu Feng and Jin Ya-qiu. Imaging simulation of polarimetric SAR for a comprehensive terrain scene using the mapping and projection algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(11): 3219-3234.
- [4] Franceschetti Giorgio and Schirrinzi Gilda. A SAR processor based on two-dimensional FFT codes[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 1990, 26(2): 356-366.
- [5] Cumming Ian G and Wong Frank H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. London: Artech House, 2005, Ch. 5.
- [6] Ling H, Chou R, and Lee S W. Shooting and bouncing rays: calculating RCS of an arbitrary cavity[J]. *IEEE Transactions on Antenna Propagation*, 1989, 37(2): 194-205.
- [7] Shore Roben A and Yaghjian Anhur D. Incremental diffraction coefficients for planar surfaces[J]. *IEEE Transactions on Antenna Propagation*, 1988, 36(1): 55-70.
- [8] 王新赛, 张天序, 桑农. 实孔径雷达景象模拟研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2002, 21(1): 54-58.
Wang Xin-sai, Zhang Tian-xu, and Sang Nong. Simulation of real aperture radar scene[J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2002, 21(1): 54-58.
- [9] Rihaczek August W and Hershkowitz Stephen J. Theory and Practice of Radar Target Identification[M]. London: Artech House, 2000, Ch. 2.

理和应用系统等领域的研究工作, 先后主持多项国家 863 重点项目和国家级遥感卫星地面系统工程建设项目, 曾获国家科技进步一等奖、二等奖各一项。

王宏琦(1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 长期从事信息处理及相关技术的科研工作, 曾经参与的研究工作主要涉及地下探测雷达、遥感图像典型目标探测技术和遥感数据地面处理系统等方面。目前研究领域主要为遥感图像处理及目标识别。

胡东辉(1970-), 男, 副研究员, 主要从事合成孔径雷达成像处理领域的研究。