



## 基于通讯信号塔RCS建模的SAR影像绝对辐射定标

李佳楠, 李玉, 赵泉华, 姜昊男, 洪勇

引用本文:

李佳楠, 李玉, 赵泉华, 等. 基于通讯信号塔RCS建模的SAR影像绝对辐射定标[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(11): 1746–1755.

LI Jianan, LI Yu, ZHAO Quanhua, et al. SAR Image Absolute Radiometric Calibration Based on RCS Modeling of Communication Tower[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(11): 1746–1755.

## 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

### 联合全极化SAR和IRI估计三维电子密度分布

Estimation of Three-Dimensional Electron Density Distribution Using Polarimetric SAR and IRI Observations

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(11): 1677–1685 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210061>

### 利用方向相位特征进行多源遥感影像匹配

A Multi-source Remote Sensing Image Matching Method Using Directional Phase Feature

武汉大学学报·信息科学版. 2020, 45(4): 488–494 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180445>

### 川藏铁路沿线Sentinel-1影像几何畸变与升降轨适宜性定量分析

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1450–1460 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210130>

### InSAR双向矩形角反射器阵列形变监测精度评估与验证

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1471–1477, 1488 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210101>

### 多模态序列遥感影像的洪涝灾害应急信息快速提取

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1441–1449 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210465>



# 基于通讯信号塔 RCS 建模的 SAR 影像 绝对辐射定标

李佳楠<sup>1</sup> 李 玉<sup>1</sup> 赵泉华<sup>1</sup> 姜昊男<sup>2</sup> 洪 勇<sup>2,3</sup>

1 辽宁工程技术大学遥感科学与应用研究所,辽宁 阜新,123000

2 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

3 武汉光谷信息技术股份有限公司,湖北 武汉,430206

**摘 要:**针对合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)影像辐射定标中角反射器布设受限等问题,提出一种利用通讯信号塔辅助求解 SAR 影像绝对辐射定标常数的方法。首先根据信号塔独特的几何结构特征,分别对上下两部分建立等效简化模型;然后利用物理光学法求解两部分等效模型的雷达截面积(radar cross section, RCS),并叠加得到信号塔模型整体 RCS;最后根据信号塔整体 RCS,使用积分法求解 SAR 影像中信号塔脉冲响应能量及绝对辐射定标常数。为了验证所提方法的准确性,选取了4类常见类型的信号塔分别建立对应的等效简化模型并求解其对应 RCS,同时利用 FEKO 软件仿真这4类信号塔。将所提方法实验结果与 FEKO 软件仿真结果进行对比,发现所提方法能够节约大量仿真所需时间,提升计算效率;对真实 SAR 影像进行绝对辐射定标常数求解,并与标称定标常数进行对比,结果表明,所提方法具有可行性和有效性。

**关键词:**合成孔径雷达;通讯信号塔;角反射器;雷达截面积;绝对辐射定标

**中图分类号:**P237

**文献标志码:**A

近年来,随着越来越多携带高分辨率合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)系统的遥感卫星发射升空,微波遥感已由定性遥感时代跨入了定量遥感时代。特别是 SAR,因其不受云、雾、降雨、降雪等干扰,可以大面积、长时间、连续地对地面进行观测,已成为众多目标检测的重要手段<sup>[1]</sup>。定标是实现 SAR 成像系统量化对地观测不可缺少的技术手段,测量绝对辐射定标常数(以下简称定标常数)对于 SAR 系统的辐射校准至关重要。通过 SAR 影像辐射定标,可以构建其光谱测度与地物雷达截面积(radar cross section, RCS)或后向散射系数的精确关系,是 SAR 成像系统量化应用的前提<sup>[2-3]</sup>。传统辐射定标技术通常在均匀且低噪声的实验场地布设一定数量的角反射器,已知 RCS 具有较高的辐射测量精度,利用相关的辐射定标模型,可实现定标工作。但角反射器布设受很多因素的影响,导致其布设区域有限,不便于运输且角反射器布置和维修费用价格昂贵,在整个 SAR 生命周期只能

用几次,同时也会对定标精度的稳定性造成一定影响。除此之外,很多研究人员选择利用亚马逊热带雨林来进行定标<sup>[4-5]</sup>,因为亚马逊热带雨林是一个较为稳定、方位各向同性的分布目标。文献[6]的测量结果表明,如果在亚马逊地区选择合适的区域,则 C 波段 SAR 中雨林的后向散射系数标准偏差小于 0.3 dB。但是亚马逊雨林地理位置特殊,无法保证稳定的测量频率。除了人工校准器和雨林外,有关定标的研究主要集中在沙漠和海洋上<sup>[7-9]</sup>。文献[10]的研究表明,沙漠具有较为稳定的后向散射系数,可以用来进行定标处理,然而沙漠的后向散射稳定性主要取决于地表地形和土壤湿度。通过建立海洋反向散射系数与风速关系的经验模型,也可求得定标常数。例如文献[11]在欧洲空间局的第二颗资源遥感卫星(European remote sensing satellite 2, ERS-2) SAR 影像定标时,精度约为 0.5 dB,然而这种方法需要大量的影像来拟合模型,从而获得模型参数,因此其准确性受数据集数量和选择的影响。这两种方法都

收稿日期:2021-01-28

项目资助:国家自然科学基金青年基金(42001286,41801368)。

第一作者:李佳楠,博士生,主要研究方向为遥感影像处理与应用研究。1743896188@qq.com

通讯作者:李玉,博士,教授,博士生导师。liy@Intu.edu.cn

不能解决区域限制的问题,准确性较低。通讯信号塔具有结构独特、分布广泛等特点,且其金属材料对雷达波的后向散射特性较强,在时序上是较稳定的地物目标。依据通讯信号塔的这些特点,在缺少角反射器条件下,可利用其辅助实现 SAR 影像定标常数的测量<sup>[12-14]</sup>。

正确、有效地计算定标体的 RCS 是 SAR 定标常数测量中的首要问题。对于常见角反射器 RCS 求解技术目前已经相对成熟,但对于复杂目标体 RCS 估计的方法却存在较大局限性,因为针对结构复杂且差异大的目标,其散射性能也存在较大差异。例如,文献[15]提出采用 FEKO 软件仿真计算战斗机的 RCS,这也是较为热门的求解目标 RCS 的方法,但是利用软件进行电磁仿真计算时对计算资源的强烈需求,尤其是内存大小问题极大地限制着求解问题规模,且软件包含的不同算法针对不同目标模型有不同程度的约束,不便于灵活处理所有复杂目标。为了准确求解目标 RCS,文献[16]以舰船目标为例,提出了一种基于渐近方法的模型来计算复杂目标的 RCS,该模型考虑了阴影效应和边缘效应,但该研究仅对简单的舰船目标进行了说明。文献[17]综合利用物理光学和区域投影的混合算法构建了三面角反射体全向 RCS 模型,并对模型各参数进行了详细分析,但从实验结果来看,该方法并不适用于结构复杂的角反射体的散射特性分析。

基于上述分析,本文提出了利用通讯信号塔辅助求解 SAR 影像定标常数的方法。首先对通讯信号塔独特的几何结构展开研究,建立简化等

效模型,并对各部分模型分别求解 RCS;然后与 FEKO 软件仿真结果对比,验证本文简化模型求解结果的准确性,该模型也可应用于其他类似柱状目标的求解。

## 1 信号塔建模

### 1.1 信号塔模型分析

信号塔多为金属材质,结构类型大致相同,且分布相对均匀,数量充足,基本不受时间和空间上的影响,满足 SAR 影像定标的要求,因此本文将作为稳定目标。图 1 展示了最为常见的几种信号塔及其等效简化模型,由于信号塔结构种类众多,为了更加精确表示信号塔 RCS,选取了 4 类代表性结构外形的信号塔,但整体差异不大,因此可通过求若干信号塔 RCS 的均值来作为后续信号塔 RCS 的准确值。虽然某些信号塔的顶端安装有照明装置,但因其不属于强反射体,而且不是所有的信号塔都安装该装置,所以在计算信号塔 RCS 时,本文中所用到的几种信号塔均忽略该部分。第一类和第二类顶端的金属板块与主干垂直相接,但不完全对接,当电磁波照射到信号塔时,将在塔顶端发生散射,因此将顶端的金属板块与圆柱相连接的部位近似地建模为等效二面角反射器;塔的主干部分是最主要的散射体,其几何结构为粗细相对均匀的圆柱体,因此将塔身建模为等效圆柱体散射器。第三类与第四类由于顶部没有金属板块与主干垂直的结构,未构成二面角散射模型,因此将这两类直接建模为等效圆柱体。

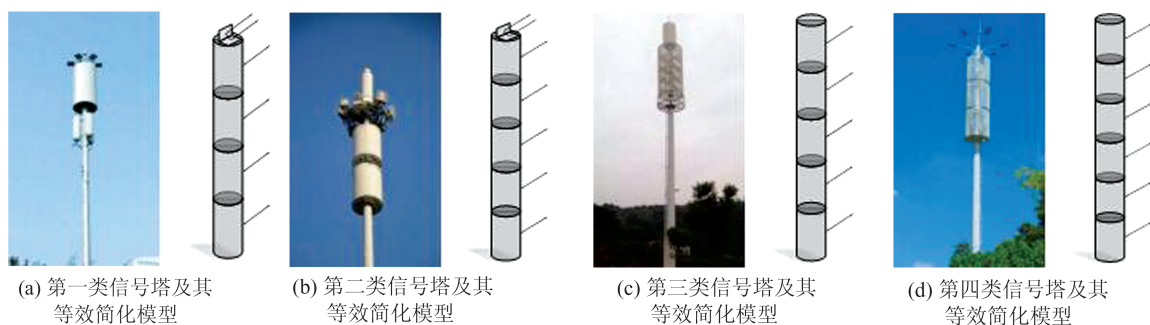


图 1 常见信号塔类型及对应等效简化模型

Fig.1 Common Tower Types and Their Corresponding Equivalent Simplified Models

为了进一步分析等效圆柱体散射器的散射特征,假设其高为  $L$ ,为了提高计算精度,将其分为  $n$  个等高的独立小圆柱体,每个小圆柱的高为  $l, l = L/n$ 。但不同类别的信号塔天线金属罩数量不同,增大散射截面的程度也不同,所以不能

一概而论。第一类和第二类分别有一截和两截天线金属罩,第三类有一截相对长的镂空天线金属罩,同时顶端还有一截短小的金属柱装置,第四类有 3 截镂空天线金属罩。

依据上述分析,首先假设第一类有  $n$  个等效小



圆柱体,则第二类可以建模为 $n+1$ 个,第三类较长的镂空金属罩和短小金属柱装置增大散射截面程度近似等效于2个金属罩,因此建模为 $n+1$ 个,第四类建模为 $n+2$ 个等效小圆柱体。然后分别求解等效二面角反射器与每个小圆柱体散射器RCS,求和得到等效简化信号塔塔身RCS,再叠加两部分RCS可得到信号塔模型整体RCS。由于在实际SAR强度影像中,信号塔的像素数较少,可以看作亮的点目标,因此,在利用信号塔辅助求解SAR定标常数的过程中,可以将信号塔视为点目标。本文仅考虑信号塔自身的散射结构,并未对信号塔塔身和地面是否构成近似二面角及其散射情况进行分析。

### 1.2 等效二面角反射器模型

本文利用物理光学法计算等效二面角反射器RCS<sup>[18-20]</sup>。图2为等效二面角反射器的几何结构。对于反射波贡献,除了面1、面2的反射波贡献 $S_1$ 、 $S_2$ 外,还有由面1反射到面2、由面2反射到面1的相互反射波贡献 $S_3$ 、 $S_4$ 。因此,等效二面角反射器RCS可以认为是4个散射面反射波贡献的RCS总和。

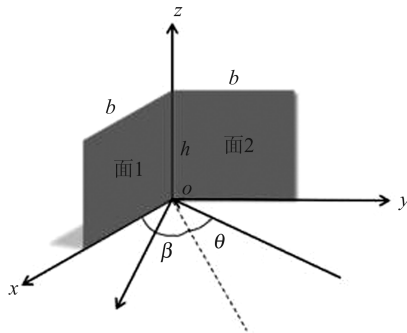


图2 等效二面角反射器几何结构

Fig.2 Equivalent Dihedral Reflector Geometry

设等效二面角反射器两平面的宽均为 $b$ ,高为 $h$ ,面1和面2的夹角为 $2\beta$ ,雷达波的入射角为 $\theta$ ,因此等效二面角反射器总RCS计算如下:

$$\sigma = \frac{\lambda^2}{\pi} |S_1 + S_2 + S_3 + S_4|^2 \quad (1)$$

式中, $\sigma$ 为总RCS; $\lambda$ 为雷达入射波长<sup>[21]</sup>。

利用物理光学计算RCS平方根,有:

$$\sqrt{\sigma} = -j \frac{k}{\sqrt{\pi}} \int_s \mathbf{m} \times (\mathbf{e}_r \times \mathbf{h}) e^{j\mathbf{k} \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{s})} d\mathbf{s} \quad (2)$$

式中, $j$ 表示模为1的复数; $k$ 为波数; $\mathbf{m}$ 表示表面的外法向矢量; $\mathbf{e}_r$ 表示极化方向单位矢量; $\mathbf{h}$ 表示入射波的磁场方向单位矢量; $\mathbf{r}$ 表示散射体表面面元 $d\mathbf{s}$ 的位置矢量; $\mathbf{i}$ 和 $\mathbf{s}$ 分别表示入射方向和散射方向的单位矢量。

假设入射角 $-\beta \leq \theta \leq \beta$ , $\beta$ 为两个面夹角的一半,则:

$$S_1 = -jkb_1 \frac{h}{\lambda} \sin(\beta + \theta) e^{-jkb_1 \cos(\beta + \theta)} \times \sin c[kb_1 \cos(\beta + \theta)] \quad (3)$$

$$S_2 = -jkb_2 \frac{h}{\lambda} \sin(\beta - \theta) e^{-jkb_2 \cos(\beta - \theta)} \times \sin c[kb_2 \cos(\beta - \theta)] \quad (4)$$

式中, $b_1$ 和 $b_2$ 分别为面1和面2的反射波宽度; $c$ 为真空中光速。对于面间的相互反射波贡献 $S_3$ 和 $S_4$ ,由于入射波方向的问题,并不是完全照射到两个平面上,所以用射线追踪法可得到 $S_3$ 和 $S_4$ 的真实照明宽度 $b_3$ 和 $b_4$ 。计算公式为:

$$b_3 = \begin{cases} 0, \theta \leq -\alpha \\ b_2 \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin(3\beta - \theta)}, \theta \geq \gamma - \alpha \\ b_1, -\alpha < \theta < \gamma - \alpha \end{cases} \quad (5)$$

$$b_4 = \begin{cases} 0, \theta \geq \alpha \\ b_1 \frac{\sin(\beta + \theta)}{\sin(3\beta + \theta)}, \theta \leq \gamma - \alpha \\ b_2, \gamma - \alpha < \theta < \alpha \end{cases} \quad (6)$$

由此得到等效二面角反射器两个面之间的相互反射波贡献 $S_3$ 和 $S_4$ 为:

$$S_3 = -jkb_4 \frac{h}{\lambda} \sin(3\beta + \alpha) e^{-jkb_4 \cos 2\beta \cos(\beta + \theta)} \times \sin c[kb_4 \cos 2\beta \cos(\beta + \theta)] \quad (7)$$

$$S_4 = -jkb_3 \frac{h}{\lambda} \sin(3\beta - \alpha) e^{-jkb_3 \cos 2\beta \cos(\beta - \theta)} \times \sin c[kb_3 \cos 2\beta \cos(\beta - \theta)] \quad (8)$$

式中, $\alpha = \pi - 3\beta$ ;  $\tan \gamma = b_2 \sin 2\beta / (b_1 - b_2 \cos 2\beta)$ 。则进一步即可得到等效二面角反射器的总RCS。

### 1.3 等效圆柱体散射器模型

依据圆柱体的结构,在每个等效小圆柱体内建立极坐标系 $(r, \varphi, z)$ ,如图3所示,圆柱高为 $l$ ,半径为 $a$ ,利用式(2)物理光学法进行分析求解。

已知等效小圆柱体的表面面元为:

$$dS = a d\varphi dz \quad (9)$$

式中, $dS$ 为圆柱体表面任意一点面元; $a$ 为圆柱体半径。表面位置矢量 $\mathbf{r}_c$ 为:

$$\mathbf{r}_c = \mathbf{r}_0 + z\mathbf{Z} + a\mathbf{m} \quad (10)$$

式中, $\mathbf{Z}$ 为沿圆柱体轴向的单位矢量; $\mathbf{r}_0$ 为某一点到圆柱中心点的位置矢量;其他字母含义同前。

将式(9)、(10)代入式(2),得到RCS平方根为:



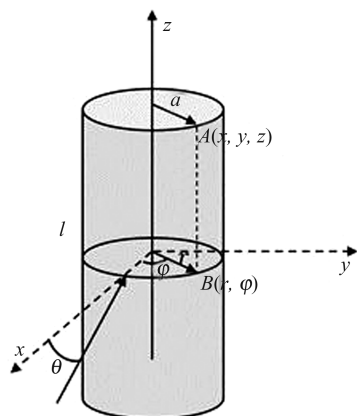


图 3 等效小圆柱体几何结构

Fig.3 Geometry of Equivalent Small Cylinder

$$\sqrt{\sigma} = -j \frac{ak}{\sqrt{\pi}} \int_s \mathbf{m} \times (\mathbf{e}_r \times \mathbf{h}) \cdot e^{jk(r_0 + zZ + am) \cdot (i-s)} d\varphi dz \quad (11)$$

将轴向和圆周方向积分变量代入式(11)得:

$$\sqrt{\sigma} = -j \frac{ak}{\sqrt{\pi}} I_z I_\varphi e^{jkr_0 \cdot (i-s)} \quad (12)$$

$$I_z = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} e^{jkz \cdot (i-s)} dz \quad (13)$$

$$I_\varphi = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \mathbf{m} \times (\mathbf{e}_r \times \mathbf{h}) e^{jkam \cdot (i-s)} d\varphi \quad (14)$$

式中,  $I_z$  和  $I_\varphi$  分别为轴向和圆周方向积分变量。

根据式(13)可知,对于长度为  $l$  的圆柱,其轴向积分  $I_z$  的计算如下:

$$I_z = l \frac{\sin\left[\frac{1}{2} jkl \cdot (i-s)\right]}{\frac{1}{2} jkl \cdot (i-s)} \quad (15)$$

采用驻定相位法,则圆周方向积分  $I_\varphi$  的计算为:

$$I_\varphi = \mathbf{m} (\mathbf{e}_r \times \mathbf{h}) e^{jkam \cdot (i-s)} e^{-\frac{j\pi}{4}} \cdot \left[ \frac{a}{\lambda} \mathbf{m} \cdot (i-s) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

因此,将式(15)、(16)代入到式(12),则可简化为:

$$\sqrt{\sigma} = -jl \sqrt{kam_0 \cdot i} \frac{\sin(klz \cdot i)}{klz \cdot i} \cdot e^{j2kr_0 \cdot i} e^{j2kam_0 \cdot i} e^{-\frac{j\pi}{4}} \quad (17)$$

将式(17)两端取平方,得到等效小圆柱体的 RCS 为:

$$\sigma = kal^2 \left| \cos\theta \cdot \frac{\sin(kl \sin\theta)}{kl \sin\theta} \right|^2 \quad (18)$$

再将各个小圆柱 RCS 累积求和,得到整个圆柱体,即信号塔塔身的近似 RCS 值:

$$\sigma = \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (19)$$

式中,  $\sigma_i$  为每个等效小圆柱体的 RCS;  $n$  为小圆柱体的个数。

#### 1.4 求解信号塔定标常数

在 SAR 影像辐射定标中,需对 SAR 影像中每个像素所代表的实际目标的反射特性进行精确标定。而目标的反射特性与其对应影像上像素值之间的关系可以用传递函数表示。对稳定的 SAR 成像系统,传递函数为一个常数,称为定标常数  $K$ 。

本文使用积分法提取信号塔响应能量。由于积分法对系统的聚焦性不敏感,在对系统进行稳定的定标或系统存在非线性的相位误差时,积分法不需要已知点目标脉冲响应的精确信息,而且算法误差与系统的聚焦性、成像处理器的部分相干性等因素无关<sup>[22]</sup>。假设信号塔在强度影像中是一个以峰值点为中心的  $N \times N$  的像素区域,标准的积分区域结构和尺寸如图 4 所示。

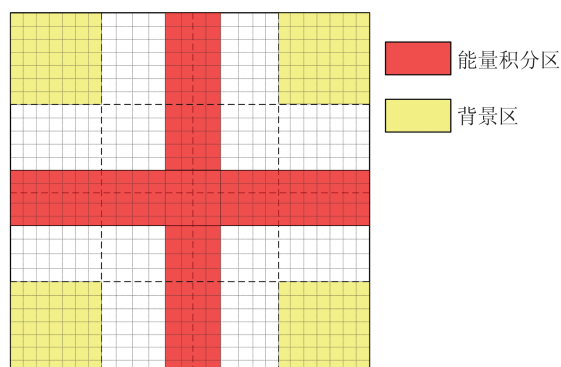


图 4 积分法积分区域示意图

Fig.4 Schematic Diagram of Integral Area of Integral Method

假设图 4 中的每个小方格代表一个像素,其中红色区域为积分区域,黄色区域为背景区域。设点目标能量积分区域为  $A$ ,其像素数为  $N_A$ ,像素间隔为  $\delta_a$ ;背景区域为  $B$ ,其像素数为  $N_B$ ,像素间隔为  $\delta_r$ ,则信号塔点目标响应能量表示为:

$$\epsilon = \left( \sum_{i=1}^{N_A} D_i^2 - \frac{N_A}{N_B} \sum_{i=1}^{N_B} D_i^2 \right) \delta_a \delta_r \quad (20)$$

式中,  $D_i^2$  表示第  $i$  个像素的强度值。对于稳定的 SAR 系统,定标常数  $K_i$  的计算如下:

$$K_i = \frac{\epsilon_i}{\sigma \cdot \sin\theta_i} \quad (21)$$

式中,  $\sigma$  为信号塔的 RCS 值;  $\theta_i$  为本地入射角。为了提高定标结果的精度,以各信号塔对应的测量值的

平均值作为最终定标常数的结果,计算如下:

$$K = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m K_i \quad (22)$$

式中,  $m$  为有效信号塔点目标数。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 实验数据

为了验证本文方法的有效性 & 普适性, 选取

3 种分辨率不同传感器的影像数据进行实验, 分别为中国国产 C 波段卫星高分三号 (GF-3) 影像三景、德国宇航局 X 波段卫星 TerraSAR-X 影像一景、欧洲宇航局 C 波段卫星哨兵一号 (Sentinel-1) 影像一景。

实验所需参数从记录卫星系统参数的头文件中获取, 具体参数见表 1。同时使用 Google Earth 获取信号塔在光学影像上对应的位置及周围背景目标分布情况。

表 1 数据关键参数

Tab.1 Key Parameters of Data

数据类别	影像区域	获取时间	影像大小/像素	波长/m	分辨率/m	入射角/(°)	极化方式	工作频率/GHz	方位向像素间隔/m	距离向像素间隔/m
GF-3	阜新市	2017-11-05	22 045×17 620	0.05	3	40.60~42.20	HH	5.4	1.727 143	1.124 222
GF-3	沈阳市	2017-10-27	22 385×17 042	0.05	5	44.87~47.39	VV	5.4	2.819 660	2.248 443
GF-3	本溪市	2017-10-19	21 934×13 013	0.05	5	33.34~36.47	HH	5.4	2.604 368	2.248 443
TerraSAR-X	天津市	2009-04-18	29 795×15 180	0.03	3	22.30~25.60	HH	9.6	7.079 069	2.192 447
Sentinel-1	大连市	2020-04-26	13 072×67 677	0.05	3×20	35.70~39.14	VH	5.4	13.928 080	2.329 562

注: HH(horizontal horizontal)表示水平发射水平接收的同向极化方式; VV(vertical vertical)表示垂直发射垂直接收的同向极化方式; VH(vertical horizontal)表示垂直发射水平接收的交叉极化方式

### 2.2 求解信号塔 RCS 实验

为了验证本文方法的可行性和有效性, 在 Windows10 Intel Core i7-4790 3.6 GHz/8 GB/Matlab 2010b 环境下, 分别对几种类型信号塔进行求解实验。实验中选取 4 种常见类型的信号塔, 塔高为 40 m, 顶端直径约为 0.5 m, 底端直径约为 1 m, 材质为金属圆柱体。实验不考虑每个信号塔的地形差异等外在条件问题, 且假设每个信号塔高度规格都相同。实验中模拟的等效二面角反射器和圆柱体散射器根据实际情况设置的相关参数如表 2 所示。

表 2 实验参数设置

Tab.2 Experimental Parameter Setting

相关参数	数值
$b/m$	0.2
$h/m$	0.2
$\beta/(^\circ)$	45
$a/m$	0.5
$l/m$	1
$n$	40
$\lambda$	0.05

将表 2 所列参数代入到式 (3)、(4)、(7) 和 (8) 中, 计算得到二面角反射器的散射回波贡献总值为 -134.3 dB, 再由式 (1) 计算得到二面角反射器的 RCS 值为 14.35 dBsm。利用式 (18) 计算各个

小圆柱体的 RCS 值为 0.74 dBsm, 再利用式 (19) 将小圆柱体求和, 得到整个圆柱体散射器的 RCS 值。第一类和第二类信号塔模型需加上二面角反射器 RCS 值, 因此, 得到第一、二、三、四类信号塔模型 RCS 值分别为 43.950 dBsm、44.690 dBsm、30.340 dBsm 和 31.080 dBsm。

利用 FEKO 软件对本文信号塔简化模型求解结果进行仿真对比。FEKO 仿真实验是在超级计算机环境下进行的, 超级计算机硬件配置为: Intel Xeon E5-4650 CPU, 80 GB 运行内存, 搭载 NVIDIA Tesla K40 GPU 图形处理器。FEKO 软件包含物理光学法和矩量法等多种算法<sup>[23]</sup>。采用 FEKO 软件进行求解时, 首先利用 CADFEKO 模块建立信号塔模型, 并设置相应参数; 然后在 POSTFEKO 模块运行显示结果。具体步骤如下: (1) 建立仿真模型。首先在 CADFEKO 中进行建模, 分别建立 4 类信号塔模型并保存。其中, 信号塔的主干部分圆柱体散射器半径均为  $a = 0.5$  m。4 类信号塔模型如图 5 所示。(2) 参数设置。分别设置频率、入射角度、相位等相关参数。入射频率设置为 5.4 GHz, 方位角为  $0^\circ \sim 90^\circ$ 。(3) 划分网格。在 Mesh 菜单中进行划分, 通常边长都设置为波长的  $1/10$ , 即  $\frac{1}{10}\lambda$ 。(4) 选择求解方法。FEKO 的默认求解方法为矩量法, 但该方法主要用于计算电小目标, 在计算电大目标

时,通常应用物理光学法。(5)显示结果。在 POSTFEKO 中运行计算结果,并自定义二维图像

的名称。表 3 列出了本文方法与 FEKO 软件仿真结果。

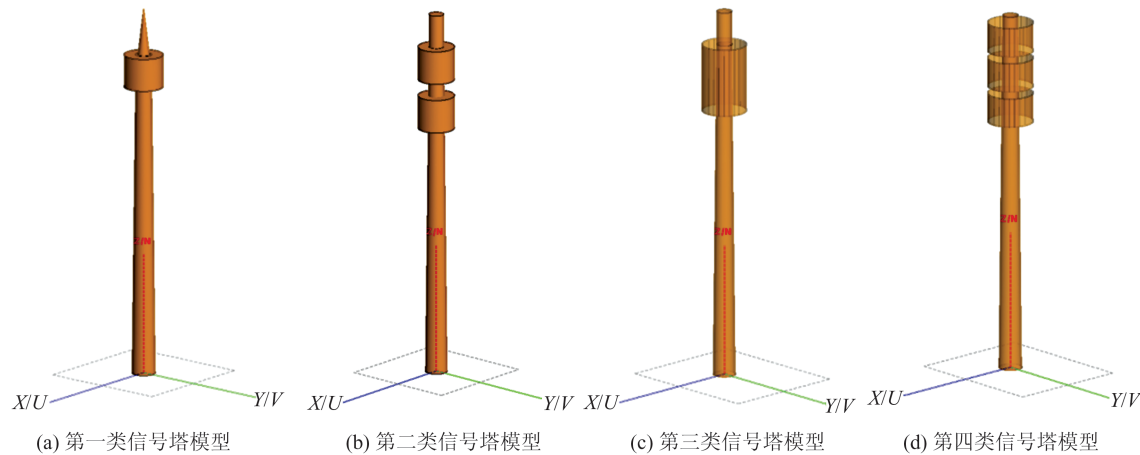


图 5 FEKO 软件中信号塔模型  
Fig.5 Models of Signal Tower in FEKO Software

表 3 本文结果与 FEKO 仿真结果对比/dBsm Tab.3 Comparison of Simulation Results of Our Proposed Method and FEKO /dBsm			
信号塔类型	本文方法结果	FEKO 仿真结果	差值
第一类	43.950	44.390	0.44
第二类	44.690	45.040	0.35
第三类	30.340	30.460	0.12
第四类	31.080	31.170	0.09
均值	37.515	37.765	0.25

由表 3 可知,当以 FEKO 软件仿真结果为标准参考值时,本文方法所得结果与 FEKO 软件仿真结果差值为 0.25 dBsm,虽然本文方法与 FEKO 软件仿真结果相比存在一定偏差,但差值结果较小,满足在工程应用中的误差范围。而且本文方法计算方便快捷、计算量小,而采用 FEKO 软件仿真,需要占用非常大的内存,耗费时间长。本文方法 4 类信号塔平均所耗时间为 90.32 s,而 FEKO 软件仿真虽然利用了超级计算机,但用时很长,为 23 400 s。上述结果验证了本文简化模型求解的优越性和准确性。

**2.3 信号塔辅助求解绝对辐射定标常数实验**  
将 RCS 结果应用于 5 景 SAR 影像的定标常数求解实验,为了方便处理,首先对各影像进行 Frost 滤波、斜地矩转换和地理编码等预处理。以其中一景影像对实验过程进行详细说明,图 6 为阜新市 SAR 影像中信号塔目标选点图,其中黑色点白色数字对应的点为受背景干扰较大的目标,白色点黑色数字对应的点为有效目标。为了避免背景因素干扰,应尽量选取空旷区域的目标。

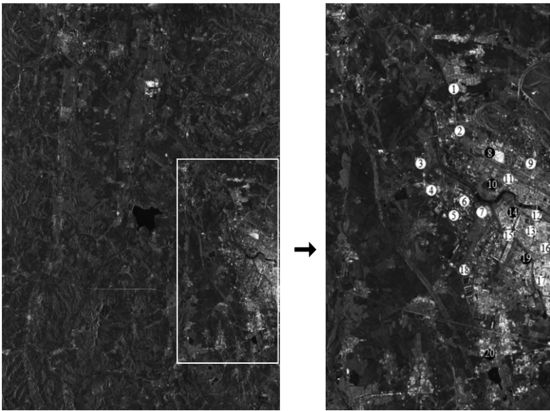


图 6 阜新市 GF-3 SAR 影像信号塔目标选点图  
Fig.6 Target Selection of GF-3 SAR Image Signal  
Tower in Fuxin City

部分信号塔目标及其在 Google Earth 的对应位置如图 7 所示,图 7(a)~7(e)分别为 1 号、2 号、5 号、6 号、9 号信号塔,这部分信号塔分布在较空旷地区,受背景干扰较小,信号塔的后向散射,基本不受到杂波反射影响;图 7(f)~7(j)分别为 8 号、10 号、14 号、19 号、20 号信号塔,这部分信号塔分布于城市建筑密集区,背景杂波影响较大,加上 SAR 影像强烈的斑点噪声影响,导致信号塔目标与背景杂波无法区分,故将这部分目标去除。

利用剩余受背景干扰较小的 15 个信号塔进行实验。使用积分法提取信号塔响应能量,并依据式(21)、(22)计算定标常数,实验结果见表 4。

由表 4 可知,15 个信号塔点目标的响应能量平均值为 15.24 dB,本文方法辐射定标常数均值为 23.19 dB,该结果与 GF-3 元数据中提供的定标常



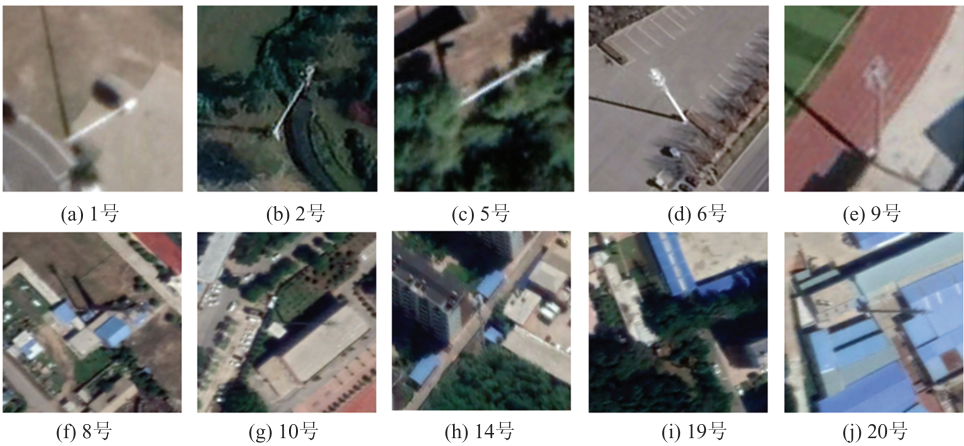


图7 部分信号塔目标及其在 Google Earth 的对应位置

Fig.7 Part of the Signal Tower Targets and Corresponding Position in Google Earth

表 4 阜新市 SAR 影像辐射定标结果

Tab.4 Radiation Calibration Results of SAR Images in Fuxin City

点号	类型	响应能量/dB	本文方法辐射定标常数/dB	标称辐射定标常数/dB	差值/dB
1	第一类	15.66	23.84	23.60	0.24
2	第二类	14.98	22.80	23.60	-0.80
3	第二类	15.84	23.12	23.60	-0.48
4	第一类	15.70	22.90	23.60	-0.70
5	第三类	14.10	23.47	23.60	-0.13
6	第三类	16.39	23.95	23.60	0.35
7	第一类	15.69	23.88	23.60	0.28
9	第四类	15.28	23.27	23.60	-0.33
11	第一类	14.80	22.53	23.60	-1.07
12	第三类	15.14	23.05	23.60	-0.55
13	第四类	14.99	22.82	23.60	-0.78
15	第三类	16.03	23.40	23.60	-0.20
16	第四类	14.56	23.16	23.60	-0.44
17	第二类	14.34	22.83	23.60	-0.77
18	第二类	15.03	22.88	23.60	-0.72
平均值		15.24	23.19	23.60	-0.41

数差值为-0.41 dB,满足实际工程应用中的误差要求(1 dB以内)。实验结果表明,利用信号塔可以实现求解定标常数的辅助实验,验证了本文方法的可行性。

为了进一步验证本文方法的普适性,分别对其他 4 景 SAR 影像辐射定标常数进行求解。每景影像内各选取 8 个有效信号塔目标,通过光学影像确认其地理位置,如图 8 所示。图 8(a)、8(b)、8(c)、8(d)分别为沈阳市区 GF-3 VV 极化影像、本溪市 GF-3 HH 极化影像、天津市 TerraSAR-X HH 极化影像及大连市 Sentinel-1 VH 极化影像,以及该地区的一个信号塔目标在影像内位置及光学影像上的对应位置。

由图 8 可知,沈阳和本溪市区的 GF-3 影像、

天津市区的 TerraSAR-X 影像中信号塔目标表现为较明显的点目标,而分辨率较低的大连市区 Sentinel-1 SAR 影像内信号塔散射细节不明显,很容易消失在背景杂波中。按照上述定标常数求解过程,分别对 4 景 SAR 影像进行实验,结果见表 5。

由表 5 可知,GF-3 和 TerraSAR-X 影像的定标常数与元数据提供的定标常数相比,误差绝对值均在 1 dB 范围内,满足工程应用中的误差范围,而 Sentinel-1 影像定标常数求解结果存在较大误差。因为在低分辨率 SAR 影像内,目标散射细节不明显,且信号塔自身占地面积很小,导致信号塔目标消失在斑点噪声内。由此可以证明,本文方法对高分辨率 SAR 影像辐射定标常数的求解取得了较好的效果,但在普通分辨率或较低分

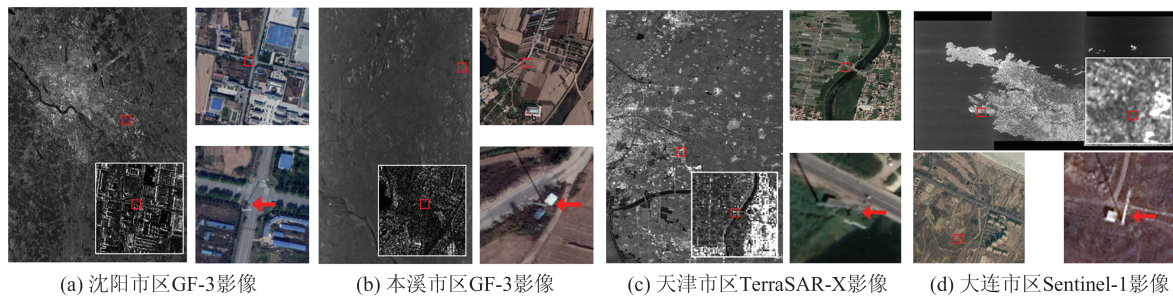


图 8 不同 SAR 数据原始影像及对应信号塔的位置

Fig.8 Original Images of Different SAR Data and Locations of the Corresponding Communication Towers

表 5 辐射定标结果

Tab.5 Results of Radiation Calibration

数据类别	影像区域	点数	响应能量均值/dB	本文方法辐射定标常数/dB	标称辐射定标常数/dB	差值/dB
GF-3	沈阳市	8	13.67	22.34	21.85	0.49
GF-3	本溪市	8	16.23	23.96	24.85	−0.89
TerraSAR-X	天津市	8	15.05	1.62	1.01	0.61
Sentinel-1	大连市	8	35.52	2.59	1.00	1.59

辨率影像中还有待提高,不同数据源也验证了本文方法的普适性。

3 结 语

本文提出以人工目标信号塔为稳定研究对象代替角反射器求解 SAR 定标常数,以多景不同传感器的 SAR 影像为例进行实验。结果表明,高分辨率影像计算得到的定标精度均满足误差范围标准,较低分辨率影像下还有待提高,证明了本文方法对高分辨率 SAR 影像定标常数求解的可行性和准确性。结合信号塔的几何结构特征,建立了通讯信号塔的等效简化模型,通过对等效简化模型 RCS 求解,得到整体信号塔的近似 RCS,相比于 FEKO 软件仿真,本文的简化模型方法更加方便快捷,节约了时间成本,提升了计算效率。该方法实现了在缺少角反射器等定标器情况下的 SAR 定标常数的准确获取,具有较高的实际应用价值,为 SAR 系统定标常数求解提出了新的技术手段。今后工作重点将放在信号塔目标的自动提取方面,从多极化角度分析信号塔的散射特征情况,实现自动化提取,节省时间和工作量,为下一步工作奠定基础。

参 考 文 献

[1] Zhao Quanhua, Wang Xiao, Li Yu, et al. Ship Detection Optimization Method in SAR Imagery Based on Multi-Feature Weighting [J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(3): 91-101 (赵泉华, 王肖,

李玉, 等. 基于多特征加权的 SAR 影像舰船检测优化方法[J]. *通信学报*, 2020, 41(3): 91-101)

[2] Weng Yinkan, Li Song, Yang Jinling, et al. Fast Solution to the RCS of Corner Reflector for the SAR Radiometric Calibration [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(11): 1 551-1 556 (翁寅侃, 李松, 杨晋陵, 等. SAR 辐射定标中角反射器 RCS 的快速求解[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2015, 40(11): 1 551-1 556)

[3] 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)

[4] Yun Risheng, Guo Wei, Wei Mo. Spaceborne SAR Antenna Pattern Measurement Based on Amazon Tropic Rain Forest[J]. *Radar Science and Technology*, 2007, 5(2): 139-143 (云日升, 郭伟, 魏莫. 亚马逊热带雨林星载 SAR 辐射定标算法[J]. *雷达科学与技术*, 2007, 5(2): 139-143)

[5] Bhowmick S A, Kumar R, Kiran K A S. Cross Calibration of the OceanSAT -2 Scatterometer with QuikSCAT Scatterometer Using Natural Terrestrial Targets[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(6): 3 393-3 398

[6] Luscombe A P. Radiometric Calibration Information from RADARSAT-1 Amazon Measurements[C]// The 2001 CEOS SAR Workshop, Tokyo, Japan,

- 2001
- [7] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8-20
- [8] D'Aria D, Ferretti A, Monti Guarnieri A, et al. SAR Calibration Aided by Permanent Scatterers[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2 076-2 086
- [9] Guccione P, Scagliola M, Giudici D. Low-Frequency SAR Radiometric Calibration and Antenna Pattern Estimation by Using Stable Point Targets [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(2): 635-646
- [10] Ridley J, Strawbridge F, Card R, et al. Radar Backscatter Characteristics of a Desert Surface [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 57(2): 63-78
- [11] Horstmann J, Lehner S. A New Method for Radiometric Calibration of Spaceborne SAR and Its Global Monitoring[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toronto, Canada, 2002
- [12] Duan Y N, Yan L, Yang B, et al. Outdoor Relative Radiometric Calibration Method Using Gray Scale Targets[J]. *Science China Technological Sciences*, 2013, 56(7): 1 825-1 834
- [13] Shimada M. Model-Based Polarimetric SAR Calibration Method Using Forest and Surface-Scattering Targets[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(5): 1 712-1 733
- [14] Jiao S, Yu J, Simic M A, et al. Assessing the Impact of Building Volume on Land Subsidence in the Central Business District of Beijing with SAR Tomography[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2017, 43(2): 177-193
- [15] Zhao Leiming, Li Deyin, Liu Hao. Simulation of RCS of Battleplan by the Software FEKO [J]. *Computing Technology and Automation*, 2010, 29(4): 93-96 (赵雷鸣, 李德银, 刘昊. 基于 FEKO 软件仿真计算战斗机的 RCS[J]. 计算技术与自动化, 2010, 29(4): 93-96)
- [16] Bennani Y, Comblet F, Khenchaf A. RCS of Complex Targets: Original Representation Validated by Measurements—Application to ISAR Imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(10): 3 882-3 891
- [17] Zhang Jun, Hu Shengliang, Wang Pin, et al. RCS Model Construction and Analysis for Corner Reflector Based on PO/AP Algorithm [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(7): 1 478-1 485 (张俊, 胡生亮, 王聘, 等. 基于 PO/AP 的角反射体 RCS 模型构建及分析[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(7): 1 478-1 485)
- [18] Danoon L R, Brown A K. Modeling Methodology for Computing the Radar Cross Section and Doppler Signature of Wind Farms [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(10): 5 166-5 174
- [19] Ahmed S. The Study of the Radar Cross Section of Perfect Electromagnetic Conductor Strip [J]. *Optik*, 2015, 126(23): 4 191-4 194
- [20] Karaev V Y, Panfilova M A, Jie G. Influence of the Type of Sea Waves on the Backscattered Radar Cross Section at Medium Incidence Angles [J]. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, 52(9): 904-910
- [21] Gao M, Yang F, Yan F, et al. An Efficient Method for Calculation the Physical Optics Integral by Using Complex Source Beam for Electrically Large Reflector Antenna Applications [J]. *Electromagnetics*, 2017, 37(1): 17-26
- [22] Zheng Chen, Huang Lei, Chen Quan. Accuracy of Airborne SAR Radiometric Calibration with Point Target [J]. *Remote Sensing Information*, 2015, 30(4): 14-19 (郑晨, 黄磊, 陈权. 点目标的机载 SAR 辐射定标实验精度分析[J]. 遥感信息, 2015, 30(4): 14-19)
- [23] Tang B, Chen H, Huang L, et al. Modelling of Two-Dimensional Scattering Centre of Wind Turbine Based on FEKO [J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019(16): 2 410-2 413



## SAR Image Absolute Radiometric Calibration Based on RCS Modeling of Communication Tower

LI Jianan<sup>1</sup> LI Yu<sup>1</sup> ZHAO Quanhua<sup>1</sup> JIANG Haonan<sup>2</sup> HONG Yong<sup>2,3</sup>

1 Institute for Remote Sensing Science and Application, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

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

3 Wuhan Optics Valley Information Technologies Co.Ltd, Wuhan 430206, China

**Abstract: Objectives:** Aiming at the problems of the limited setting of corner reflectors in synthetic aperture radar (SAR) image radiation calibration, a method of using communication towers to assist in measuring the absolute radiation calibration constants of SAR images is proposed. **Methods:** Firstly, an equivalent simplified model is established for the upper and lower parts according to the unique geometric structure characteristics of the signal tower which are the equivalent dihedral angle and the cylinder scatterer, respectively. Secondly, on this basis, we use the physical optics method to calculate the radar cross section (RCS) of each part and superimpose the overall RCS of the communication tower model. Finally, according to the overall RCS, the pulse response energy and the absolute radiometric calibration constant of the communication tower in SAR image are solved using the integral method. **Results:** Experimental results of the simplified model are compared with the simulation results of FEKO in order to prove the accuracy of the proposed method. It saves the time required for simulation and therefore greatly improves computational efficiency. **Conclusions:** The absolute radiation calibration constants of real SAR images are calculated and compared with the nominal parameters, the proposed method is feasible and effective.

**Key words:** synthetic aperture radar (SAR); communication tower; angle reflector; radar cross section (RCS); absolute radiometric calibration

**First author:** LI Jianan, PhD candidate, specializes in remote sensing data processing and application. E-mail: 1743896188@qq.com

**Corresponding author:** LI Yu, PhD, professor. E-mail: liyu@Intu.edu.cn

**Foundation support:** Youth Foundation of the National Natural Science Foundation of China (42001286, 41801368).

**引文格式:** LI Jianan, LI Yu, ZHAO Quanhua, et al. SAR Image Absolute Radiometric Calibration Based on RCS Modeling of Communication Tower[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(11):1746-1755. DOI:10.13203/j.whugis20210052(李佳楠, 李玉, 赵泉华, 等. 基于通讯信号塔 RCS 建模的 SAR 影像绝对辐射定标[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(11):1746-1755. DOI: 10.13203/j.whugis20210052)