

# 星载SAR降水反演研究简介

孙逢林 覃丹宇 游然

(中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 国家卫星气象中心, 北京 100081)

**摘要:** 降水是水循环的主要组成部分之一, 具有重要的气象学、气候学与水文学意义。对降水及其区域和全球分布进行精准测量, 一直是一个颇具挑战的科学问题。星载微波遥感器提供的数据, 可以有效减少卷云对降水反演精度的影响。经过近50年的发展, 星载微波遥感器的降水反演算法也逐渐发展成熟起来。简要回顾了几代被动与主动星载微波降水测量仪器。针对实孔径低分辨率微波遥感器探测的降水场动态范围变小的问题, 介绍了利用高分辨率SAR数据进行降水探测的前向物理模型以及修正的沃尔塔积分降水反演方法与基于统计的反演方法。

**关键词:** 星载微波遥感, 合成孔径雷达, 降水, 反演算法

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.017

## Brief Introduction to Research on Spaceborne Synthetic Aperture Radar Retrieval of Precipitation

Sun Fenglin, Qin Danyu, You Ran

(Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

**Abstract:** Precipitation is a fundamental component of the global water cycle. It is a key hydrologic variable of the water cycle in meteorology. Accurate observation of precipitation for regional and global distributions has always been a challenging scientific goal. Spaceborne Microwave data may carry precipitation information suppressing the impact of Cirrus. With five-decade development of spaceborne sensors, the approaches to retrieving precipitation are prosperously developed. A brief review of generations of passive and active precipitation microwave sensors is given. More recently, forward physical model and the inversion techniques named Volterra Integral Equation (VIE) approach and model-oriented statistical (MOS) methodology to quantitatively derive precipitation by spaceborne Synthetic Aperture Radar measurements are presented to enhance spatial resolution and improve the statics of precipitation fields and dynamics of rain rate.

**Keywords:** spaceborne microwave remote sensing, SAR, rain rate, retrieval algorithms

### 0 引言

降水是水循环的重要组成部分。从物理机制角度看, 降水与潜热释放的大气环流运动相关, 并影响着海水的盐度、江河湖泊以及地下水资源。另外, 降水与生物生存以及人类社会经济的发展也息息相关。极端灾害事件伴随着不同类型的降水过程如洪水、泥石流等对人类生命与财产构成严重的威胁。降水的精确测量能够加深我们对水汽循环、大气循环和中尺度风暴特征的理解, 有助于我们认识极端天气系统的发展过程, 并对其灾害性影响做出预测与估计<sup>[1-3]</sup>。

目前, 测量全球尺度降水率分布的唯一可行方法是借助于卫星遥感技术, 星载遥感手段能够提供较

大范围覆盖的降水测量<sup>[4-5]</sup>。早期的遥感降雨反演主要依赖于被动遥感, 包括地球静止卫星和近地轨道卫星可见光和红外遥感器<sup>[6-7]</sup>, 同时也发展了一系列可见光/红外降雨反演算法<sup>[8-9]</sup>。微波遥感器提供的卫星数据, 可以有效减少卷云对降雨反演精度的影响<sup>[10]</sup>。在降水探测方面, 微波波段提供的信息与可见光和红外波段相比具有补充作用<sup>[11]</sup>。微波能够穿透厚云与降水, 其涵盖的信息是云内部的响应, 与降水机制息息相关。星载微波辐射计观测降水时, 由于水凝物等对电磁波谱具有强烈的衰减作用, 因此, 被动微波遥感能够提取到降水信息。在过去的三十年中, 被动微波辐射计从单通道低分辨率的ESMR (Electronically Scanning Microwave Radiometer) 发展到高分辨多频率通道的AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observation System)。自从DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) 搭

收稿日期: 2015年8月31日; 修回日期: 2015年12月29日

第一作者: 孙逢林 (1986-), E-mail: sunfl@cma.gov.cn

资助信息: 国家高技术研究发展计划 (201402KY042)

载的SSM/I成功发射，微波辐射计成为降水反演的主要仪器。TRMM卫星搭载了降雨雷达（PR）以及微波成像仪（TMI），掀开了雷达测量降水新的一页。利用星载降水雷达观测降水时，利用水凝物对电磁波谱强烈的散射以及双程衰减信息反演降水更为直接。同时利用PR获得的降水信息也加速了被动微波遥感降水算法的发展。作为TRMM的延续与发展，GPM（Global Precipitation Measurement Mission）搭载了双频降雨雷达DPR（Dual-frequency Precipitation Radar）以及微波成像仪GMI（GPM Microwave Imager），能够更精确地提供中高纬度降水信息<sup>[12]</sup>。

但利用星载微波资料反演降水，仍然存在着巨大的挑战。传统微波仪器采用的是真实孔径天线，其空间分辨率由天线口径尺寸决定。Marzano等<sup>[13]</sup>的分析结果表明，不仅仅是降水率的均值，整个降水场的统计特性都会因实孔径天线方向图决定的点扩散函数加权平均而改变。实孔径测雨雷达与辐射计波束的不均匀性填充将引入一定的误差，并使得测量的降水率动态范围变窄<sup>[14-15]</sup>。相控阵雷达可以提高一定的分辨率，但不能有质的提高，并且其电扫描视场有限。去除大气以及目标运动降质影响，SAR可能是唯一可以提供百米量级空间分辨率对降水观测的星载微波遥感器。SAR采用多普勒频率锐化来提高方位向（顺轨）分辨率，通过脉冲压缩（一般是Chirp线性调频信号）的方法提高距离向（交轨）分辨率<sup>[16]</sup>。当SAR系统的工作频率提升时，可以明显地观测到地面成像受到强降水的干扰。

SAR作为新型的相干型主动微波仪器，可以大幅度提高空间分辨率，但需要建立比较精确的模型才能在降水探测中发挥重要作用<sup>[13]</sup>。Moore等<sup>[17-18]</sup>首先针对用于全球降水监测的SAR，从雷达方程的信噪比与可测降水率最小值等方面进行了验证；针对SAR降水率反演研究，Pichugin等<sup>[19]</sup>提出了沃尔塔积分反演算法并对算法进行了验证，该算法数学推导严谨，精度高，但运算量巨大；Weinman等<sup>[20-21]</sup>提出了面向模型的统计方法（model of statistics, MOS），以及分析了将球面波简化为平面波的误差影响，并将基于MOS的反演算法和VIE算法进行了对比；Marzano等<sup>[13]</sup>进一步论证了X波段SAR测雨的能力，并且给出了根据雨区衰减补偿回波图像的方法。

目前国内学者也开展了不少SAR降水反演的研究。陈嘉琪等<sup>[22]</sup>对降水粒子电磁特性与SAR成像进行了仿真研究。彭华等<sup>[23]</sup>针对不同粒子属性，利用离散偶极子快速仿真SAR降水粒子雷达散射截面。王欣

等<sup>[24]</sup>针对降水对C波段SAR散射截面的影响进行了分析。谢亚楠等<sup>[25]</sup>提出了MOS的改进方法并通过对雨滴形状的分析来提高X波段SAR图像—降水率分布反演精度。

## 1 SAR降水探测回波模型

为防止目标模糊，SAR测量采用的是侧视观测模式，因此不可避免的发生掩叠等问题（如图1所示的是SAR平面波降雨探测模型，一个回波距离门单元包含了降雨体散射与下垫面散射叠加的信息），需要根据降雨体对SAR回波信号进行精确建模。

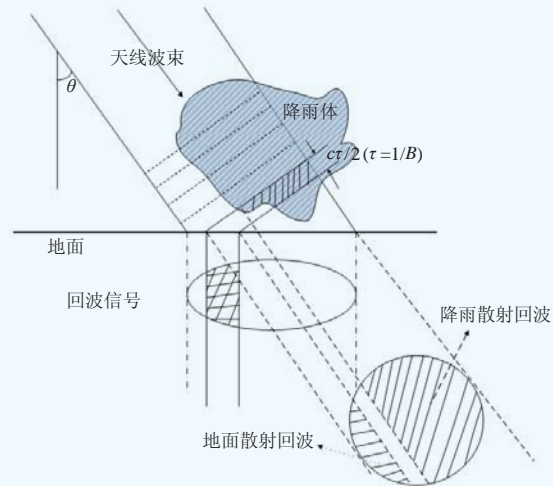


图1 SAR降水雷达回波信号掩叠现象示意图  
Fig. 1 A depiction of a precipitation SAR imaging scenario which illustrates the layover effect

真实的雷达反射率被用来反演降水垂直分布廓线。真实的雷达反射率 $Z_c$ 与测量的雷达反射率 $Z_m$ 之间存在以下关系：

$$Z_m(r) = A(r)Z_c(r) + \delta_{Z_m}(r) \quad (1)$$

其中， $r$ 表示目标到雷达的距离； $\delta_{Z_m}$ 表示测量值存在的误差； $A$ 是衰减系数：

$$A(r) = e^{0.11 \ln(10)PIA(r)} \quad (2)$$

其中， $PIA$ 是双向路径积分衰减，具体可表示为：

$$PIA(r) = 2 \int_0^r [k_p(s) + k_{CLW}(s) + k_{WV}(s) + k_{O_2}(s)] ds \quad (3)$$

其中， $k_p$ 、 $k_{CLW}$ 、 $k_{WV}$ 、 $k_{O_2}$ 分别表示降水、云液态水、水汽、氧气吸收系数。

## 2 SAR降水归一化雷达散射截面模型

SAR图像—降水率前向模型如图2所示。为简化模型，入射波假设为角度为 $\theta$ 的平面波；降水分为冰层与降水层两层，高度分别为 $z_h$ 与 $z_0$ ；测量的归一化雷达散射截面 $\sigma_{SAR}$ 由两部分组成：地表的后向散射 $\sigma_{srf}$ 以及降水体散射 $\sigma_{vol}$ ，表示为

$$\sigma_{SAR}(x, y) = \sigma_{srf}(x, y) + \sigma_{vol}(x, y) \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{srf}}(x) = \sigma^0(x) \exp \left\{ -2 \int_{x-z_h \tan \theta}^x k[x_1, (x-x_1)/\tan \theta] \frac{dx_1}{\sin \theta} \right\} \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{vol}}(x) = \sin \theta \int_x^{x+z_h/\tan \theta} \eta[x_t, (x_t-x)\tan \theta] e^{-2 \int_{x_1-X(x,\theta)}^{x_t} k[x_k, z_h-x_1/\tan \theta] \frac{dx_k}{\sin \theta}} \frac{dx_t}{\cos \theta} \quad (6)$$

式(5)中,  $k(\text{km}^{-1})$ 表示消光系数,  $\sigma^0(x)$ 表示地表归一化散射截面。式(6)中,  $\eta(\text{km}^{-1})$ 表示雷达反射率(或者是体散射系数);  $x_1, x_k, x_t$ 表示 $x$ 方向变量,  $X(x, \theta) = (z_h - x_1 \tan \theta) \tan \theta$ 。

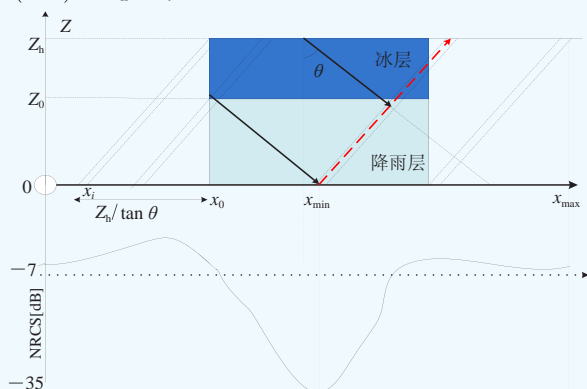


图2 降水分层模型与SAR归一化雷达散射截面响应  
Fig. 2 Schematic view of the precipitation SAR model and NRCS response

### 3 SAR降水反演方法

降水垂直分布廓线的反演算法可分为两步。首先,由测得的垂直廓线 $Z_m$ 估算 $Z_e$ ,这一步相当于对雷达信号衰减进行校正。然后,再建立 $Z_e$ 与降水率 $R_r$ 之间的模型关系,即

$$z_e = aR_r^b \quad (7)$$

根据该经验模型,可以建立 $k(x, z)$ 以及 $\eta(x, z)$ 与 $R_r(x, z)$ 之间的关系(图3)<sup>[26]</sup>。系数 $a$ 与 $b$ 取决于粒子尺寸分布、形状、以及成分。为简化模型,避免微观物理参数的严格选取过程,一般采用经验的回归模型:

$$k(x, z) = aR_r^b(x, z) \quad (8)$$

$$\eta(x, z) = \frac{\pi^5 |K|^2}{\lambda^4} Z_g(x, z) = \frac{\pi^5 |K|^2}{\lambda^4} cR_r^d(x, z)$$

其中,  $Z_g$ 为瑞利等效反射因子,  $K$ 为粒子复介电因子( $|K|^2$ 对于水取值为0.93,对于冰取值0.19),参数

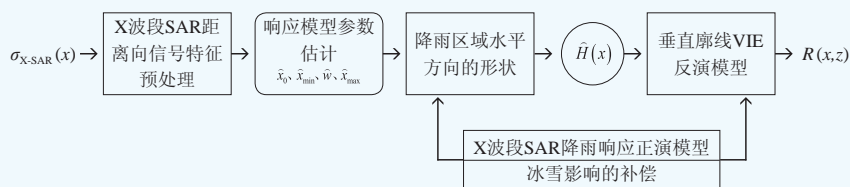


图4 降水率分布的修正VIE反演框图  
Fig. 4 Schematic view of the modified VIE algorithm

$a, b, c, d$ 为经验系数取决于波长与季节降水特征。对于X波段SAR以及典型的陆地对流降水云条件下系数如表1所示<sup>[27]</sup>。

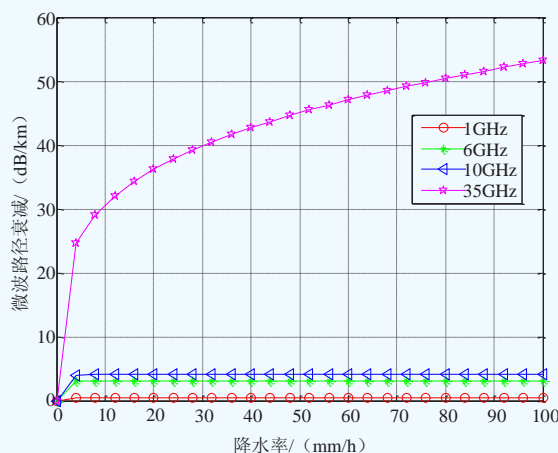


图3 微波路径衰减与降水率ITU模型(圆极化)  
Fig. 3 Specific attenuation given versus the rain rate in units of mm/hr after the ITU Model

表1 降水与雪的经验系数

Table 1 Summary of constants for rain and snow

类型	$a$	$b$	$c$	$d$
降水	$2.6 \times 10^{-3}$	1.11	300	1.35
雪	$5.6 \times 10^{-3}$	1.6	182	1.6

#### 3.1 修正的沃尔塔积分方程反演方法

SAR降水的沃尔塔积分方程反演方法是针对式(5)一式(8),引入了函数:

$$f(u) = \exp \left( -2 \int_u^v k(v) \frac{dv}{\sin \theta} \right) \quad (9)$$

将式(8)按式(9)进行变量替换,联立式(4)得到第二类的沃尔塔积分方程,通过对方程的求解最终得到降水率的分布。修正的沃尔塔积分方程反演方法流程图如图4所示。沃尔塔积分方程求解方法需要多次数值积分计算,且受到计算科特斯

系数的限制, 进行数值积分的点不宜多, 通过插值的方法获得的降水率分布精度容易受损。

### 3.2 基于 MOS 的降水反演方法

基于MOS的降水反演方法利用SAR归一化散射截面计算二维分布的降水率, 建立降水率分布模型, 采用变量分离的方法:

$$R_r(x, z) = H(x)V(z) \quad (10)$$

其中, 降水率分布垂直方向分解模型 $V(z)$ 采用的是CFAD (Contoured Frequency by Altitude Diagrams) 模型<sup>[28]</sup>:

$$V(z) = \begin{cases} V(0)[0.85 + 0.15(1 - z/z_0)^{0.62}], & 0 \leq z \leq z_0 \\ V(z_0) \left( \frac{z_h - z}{z_h - z_0} \right)^p, & 0 \leq z \leq z_0 \end{cases} \quad (11)$$

参数 $P$ 定义了冰层等效降水率。降水率分布水平方向分解模型 $H(x)$ 采用对称的三角形、梯形或者高斯分布。基于空间分布模型的降水率反演核心算法通过SAR回波数据预处理, 得到降水起点、回波最小值、降水区域宽度等参数, 在某个区域分别采用修正MOS模型 (流程图如图5所示) 获取降水垂直分布的形状和降水速率等信息。

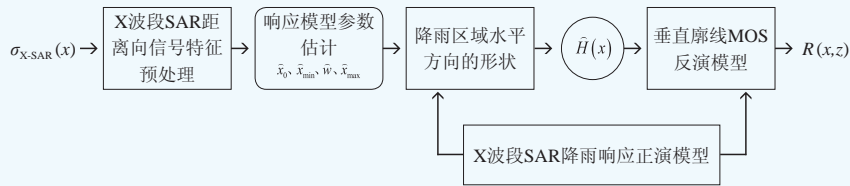


图5 降水率分布的修正MOS反演框图  
Fig. 5 Schematic view of the MOS algorithm

图6给出了地面S波段气象雷达数据、TerraSAR-X数据、PR数据以及TMI数据降水率反演结果<sup>[13]</sup>。各仪器的一维分辨率信息如下: TerraSAR-X以及地面S波段气象雷达的分辨率大概为0.5km, 而PR对应的分辨率为4km, TMI (37GHz) 的分辨率为15km。PR与TMI反演结果由S波段气象雷达数据反演结果通过对应的天线波束卷积核卷积而成。对比各仪器反演结果可

知: 降水场存在不均匀性, 空间梯度较大; 在这样的情况下, TMI与PR由于波束较宽 (卷积核较宽), 产生了强烈的波束填充效应, 与地面气象雷达降水率结果对比, 其反演降水场的动态范围减小, 降水率极值地区不能精确地估计 (TMI较PR更为严重); SAR数据反演的降水率与地面气象雷达降水率结果较吻合, 波束填充效应明显减弱。

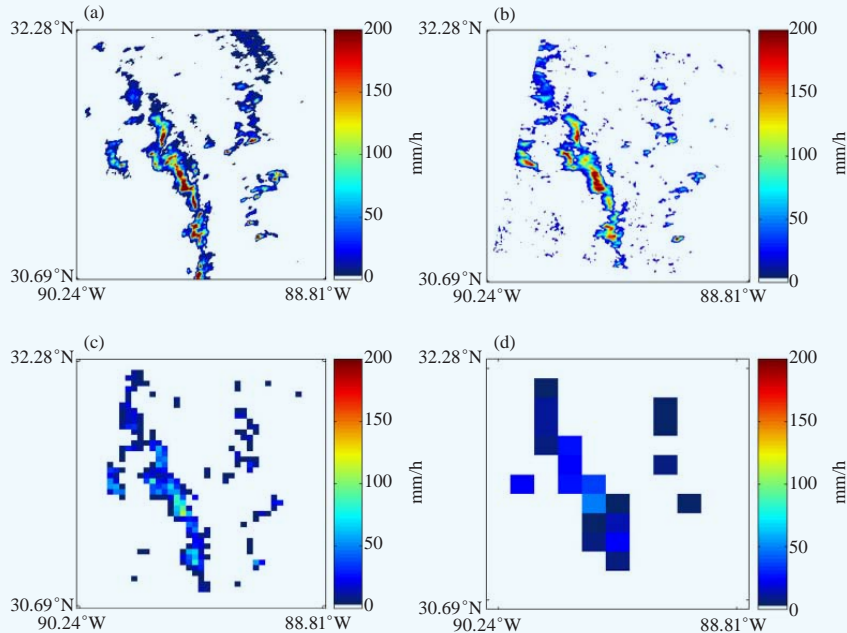


图6 各仪器降水反演对比 (单位: mm/h): (a) 地面气象雷达NEXRAD Z-R关系反演的降水率; (b) TerraSAR-X修正MOS降水率反演结果; (c) PR观测数据降水率反演结果; (d) TMI观测数据降水率反演结果  
Fig. 6 Rain-rate obtained by different sensors(mm/h): (a) map of measured rain-rate obtained by standard NEXRAD Z-R, (b) map of TSX estimated rain-rate, (c) map of PR-like estimated rain-rate, and (d) map of TMI-like estimated rain-rate

#### 4 总结与展望

本文对SAR降水反演算法进行了简要介绍。目前的各反演算法都是为仪器以及其资料量身定做，具有各自的优缺点。从反演结果看，降水SAR在PR基础上，能够提供足够的分辨率，能够在一定程度上减轻降水反演非均匀性波束充塞效应。但目前提出的SAR反演降水率分布的方法都建立在如下假设条件基础上<sup>[29-30]</sup>：1) 降水区域下垫面贡献恒定的散射截面，通过无降水时测量得到；2) 降水中粒子组成、尺寸等与微波的关系已知，并且可以通过模型建立；3) 降水分布垂直方向与水平方向独立。这些假设条件比较粗糙，可能并不完全符合实际情况，对算法反演精度造成影响。对这三个假设条件的修正将是后续工作需要重点解决的问题。

#### 参考文献

- [1] Xie P, Arkin P A. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(11): 2539-2558.
- [2] Trenberth K E. Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 2011, 47(1): 123-138.
- [3] Mueller B, Seneviratne S I. Hot days induced by precipitation deficits at the global scale. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(31): 12398-12403.
- [4] Engman E T, Gurney R J. *Remote sensing in hydrology*. Chapman and Hall Ltd, 1991.
- [5] Stephens G L, Kummerow C D. The remote sensing of clouds and precipitation from space: A review. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 64(11): 3742-3765.
- [6] Ba M B, Gruber A. GOES multispectral rainfall algorithm (GMSRA). *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(8): 1500-1514.
- [7] Griffith C G, Woodley W L, Grube P G, et al. Rain estimation from geosynchronous satellite imagery-visible and infrared studies. *Monthly Weather Review*, 1978, 106(8): 1153-1171.
- [8] Kidd C. Satellite rainfall climatology: A review. *International Journal of Climatology*, 2001, 21(9): 1041-1066.
- [9] Levizzani V, Bauer P, Turk F J. *Measuring precipitation from space: EURAINSAT and the future*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [10] Kummerow C, Hong Y, Olson W, et al. The evolution of the Goddard Profiling Algorithm (GPROF) for rainfall estimation from passive microwave sensors. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(11): 1801-1820.
- [11] Michaelides S, Levizzani V, Anagnostou E, et al. Precipitation: Measurement, remote sensing, climatology and modeling. *Atmospheric Research*, 2009, 94(4): 512-533.
- [12] Hou A Y, Kakar R K, Neeck S, et al. The Global Precipitation Measurement (GPM) mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95: 701-722.
- [13] Marzano F S, Mori S, Chini M, et al. Potential of high-resolution detection and retrieval of precipitation fields from X-band spaceborne Synthetic Aperture Radar over land. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2010, 15(3): 859-875.
- [14] Tanelli S, Im E, Durden S L, et al. The effects of nonuniform beam filling on vertical rainfall velocity measurements with a spaceborne Doppler radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(7): 1019-1034.
- [15] Durden S, Tanelli S. Predicted effects of nonuniform beam filling on GPM radar data. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 2008, 5(2): 308-310.
- [16] 卡明, 东辉. 合成孔径雷达成像: 算法与实现. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [17] Moore R, Mogili A, Fang Y, et al. Rain measurement with SIR-C/X-SAR. *Proceedings of the 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'96)*. Nebraska, USA: 1996.
- [18] Atlas D, Moore R K. The measurement of precipitation with synthetic aperture radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1987, 4(3): 368-376.
- [19] Pichugin A, Spiridonov Y G. Spatial-distribution of rainfall intensity recovery from space radar images. *Soviet Journal of Remote Sensing*, 1991, 8(6): 917-932.
- [20] Weinman J, Marzano F. An exploratory study to derive precipitation over land from X-band synthetic aperture radar measurements. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47(2): 562-575.
- [21] Weinman J, Marzano F, Plant W, et al. Rainfall observation from X-band, space-borne, synthetic aperture radar. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2009, 9(1): 77-84.
- [22] 陈嘉琪, 陈如山, 彭华, 等. 降雨粒子电磁特性分析及雨区目标成像. *电波科学学报*, 2011, 26(5): 888-893.
- [23] 彭华. 高频电磁快速仿真及降雨粒子散射特性分析. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [24] 王欣, 邵伟增, 沙远红, 等. 降雨对 SAR 后向散射截面的影响. *海洋湖沼通报*, 2014, 2: 15-22.
- [25] 谢亚楠, 万智龙, 刘文渊. 基于SAR测量的改进型VIE降雨反演算法. *上海大学学报(自然科学版)*, 2012, 18(5): 464-469.
- [26] ITU-R P.838-3-8, Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. ITU, Geneva, Switzerland, 2008.
- [27] Smith P L. Equivalent radar reflectivity factors for snow and ice particles. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, 23(8): 1258-1260.
- [28] Yuter S E, Houze Jr R A. Three-dimensional kinematic and microphysical evolution of Florida cumulonimbus. Part II: Frequency distributions of vertical velocity, reflectivity, and differential reflectivity. *Monthly Weather Review*, 1995, 123(7): 1941-1963.
- [29] Ahamad A. Limitation on the use of a spaceborne SAR for rain measurements. NASA contractor report NASA CR-196486.
- [30] Marzano F S, Weinman J A. Inversion of spaceborne X-Band synthetic aperture radar measurements for precipitation remote sensing over land. *Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on*, 2008, 46(11): 3472-3487.