

利用微波辐射计观测计算云衰减

段苗苗^{1,2} 马盈盈¹ 龚 威¹ 王伦澈³

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 河北省第二测绘院,河北 石家庄,050000

3 中国地质大学(武汉)地球科学学院,湖北 武汉,430074

摘要:在地-空路径传播过程中,云衰减对无线电卫星通信系统的高频率信号有着不可忽略的影响。利用HATPRO型微波辐射计观测反演获得的云中液态水密度廓线等信息,提出了一种适用于中纬度地区的精确计算云衰减的方法,得出了地-空路径信号传播过程中,云衰减对信号的影响随着频率增大急剧扩大的结论;具体表现为,在高频波段,99.99%的链路可用时间内云衰减超过10 dB。将微波辐射计计算所得的云衰减与云中液态水总量建立“线性关系”,与ITU-R(国际电联无线电通信部门)模型结果对比。结果表明:由于ITU-R模型低估了武汉地区的云中液态水总量,导致该模型低估了武汉地区的云衰减影响。

关键词:HATPRO型微波辐射计;云中液态水密度;云衰减;云中液态水总量;ITU-R模型

中图法分类号:P237; P422 **文献标志码:**A

随着无线电卫星通信系统向更高频率的应用扩展,对流层大气对地-空路径通信传播的削减作用越来越大。因此,在卫星通信链路信号的传播过程中,许多因素的影响变得不容忽视。云的高頻性和广泛覆盖性使得云衰减成为影响卫星通信链路信号传播的一项非常重要的因素^[1-3]。湖北省武汉市位于长江和汉水的交汇处,区域内有全国最大的城中湖东湖,云覆盖的频率很高,是典型的中纬度亚热带季风性湿润气候地区^[4]。因此,针对该地区的云衰减研究计算对无线电卫星通信系统的设计和运行的优化意义重大。

相比于雨衰减对信号传播的影响研究,针对云衰减的研究一直较少^[5, 6]。Salonen等较早地提出了一种以温度和湿度作为输入数据,适用于中纬度地区的计算云衰减的新方法^[7]。Das等将Salonen模型方法改进并推广,得出热带地区的云衰减影响研究计算方法,已经可以较精确地计算出热带地区的云衰减情况^[8-10]。国际电联无线电通信部门(ITU-R)第3J工作组将Salonen模型方法用于ITU-R模型,并在全球范围内计算云衰减,其结果在较大范围、平均状态上效果明显,有很好的适用性,但由于数据的精度有限,对某一

较小区域精确的云衰减计算的效果不够理想^[11]。杨瑞科等对我国西安地区云衰减进行了初步研究^[2, 3, 12],但由于采用基于云系的方法来进行云衰减计算,即利用云类型不同来笼统地确定云中液态水密度,导致云衰减结果精确性欠佳。云衰减与云的类型有关,错误地估计云类型将使最终结果产生较大误差,而利用云中液态水的密度廓线和温度廓线等高精度、可量测的信息来描述云特性,则可有效避免基于云系的方法对云衰减计算造成的影响。

本文利用武汉地区HATPRO型微波辐射计获得的云中液态水的密度廓线和温度廓线,以及仪器配套的IR红外温度辐射计测得的云底高等数据,对云衰减进行研究计算。随后,建立了云衰减值与ILWC(云中液态水总量)之间的“线性关系”。最后,将微波辐射计计算所得结果与ITU-R模型结果比较,得出ITU-R模型低估了武汉地区的云衰减影响的结论。究其原因,主要是该模型低估了武汉地区的ILWC。由于实验区域具有典型性,因此,本文结论可以推广至其他中纬度亚热带季风性湿润气候地区的云衰减影响研究。

收稿日期:2015-07-01

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41401498, 41127901);教育部创新团队发展计划资助项目(IRT1278);教育部博士点基金资助项目(20120141120040);晨光计划资助项目(2014070404010198)。

第一作者:段苗苗,硕士,现从事大气光学遥感研究。E-mail:miaomiaoduan@whu.edu.cn

通讯作者:马盈盈,博士,副教授。E-mail:yym863@gmail.com

1 数据和原理

1.1 地区和数据

湖北省省会武汉市位于江汉平原东部,东经 $113^{\circ}41' \sim 115^{\circ}05'$,北纬 $29^{\circ}58' \sim 31^{\circ}22'$ 。武汉是长江与其最大的支流汉水的交汇处,属亚热带季风性湿润气候,夏季受西太平洋东南季风影响,冬季受西伯利亚寒流影响,全年雨量充沛,年降水量为 1100 mm ^[4]。因此,武汉地区全年云量偏多,云衰减的精确计算将对此地区以及类似区域的卫星通信信号在地-空路径传播中的影响提供可靠依据。

实验地点位于武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室($30^{\circ}31' \text{N}$, $114^{\circ}21' \text{E}$),是武汉市城区中心地带,周边围绕分布城市建筑,能够代表较典型的城市下垫面类型。实验采用的仪器地基多通道微波辐射计是由德国 Radiometer Physics GmbH 公司生产的,国际上较为先进的 RPG-HATPRO 型微波辐射计。微波辐射计本身不发射电磁波,通过接收来自大气一定波段的微波辐射来探测反演大气温度、相对湿度、水汽以及液态水的垂直廓线^[13,14]。RPG-HATPRO 在 K 波段水汽窗口($22.24 \sim 31.4 \text{ GHz}$)和 V 波段氧气窗口

($51 \sim 58 \text{ GHz}$)分别有 7 个通道,共计 14 通道。其中,辐射计直接测量的辐射能量信息并不是亮温值,而是对应的电压强度值。仪器的数据处理系统通过一定的转换方法将电压转换为亮温,并进一步利用辐射传输方程,应用神经网络等算法,反演出地表参数、大气温度、湿度和液态水等产品信息。仪器在两个波段的亮温误差及分辨率在 K 段为 $\pm 0.10 \text{ K rms}$ (1 秒积分时间),在 V 波段为 $\pm 0.20 \text{ K rms}$ 。仪器对于云中液态水含量的反演精度能够达到 $\pm 0.4 \text{ g/m}^3 \text{ rms}$ 。另外,微波辐射计配套安装有 IR 红外温度辐射计测量云底高以及气象传感器观测地面气象参数。微波辐射计系统能够利用温湿度廓线、云底高数据以及地面气象参数,在假设单层云的情况下反演计算云中液态水廓线和液态水总量^[15,16]。

本文研究计算的基础数据为 RPG-HATPRO 微波辐射计观测反演的从地面到高空 10 km 内的垂直温度廓线、云中液态水廓线以及液态水总量。图 1 展示的为该仪器 2012 年 1 月 2 日 UTC(世界标准时间)全天观测反演的温度垂直廓线伪彩色图。图 2 为该仪器同一天观测反演的云中液态水密度垂直廓线的伪彩色图。

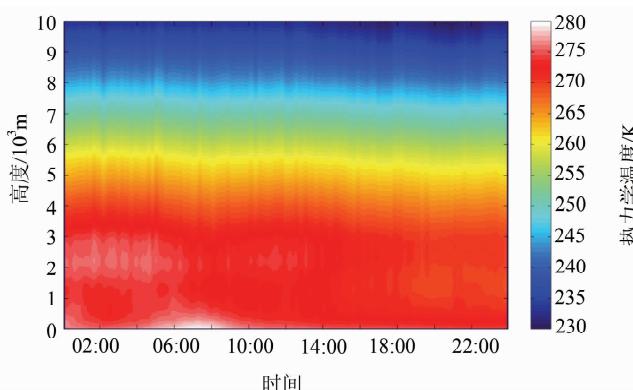


图 1 微波辐射计温度垂直廓线伪彩色图

Fig. 1 Pseudo-color Image of Temperature Profiles from Microwave Radiometer

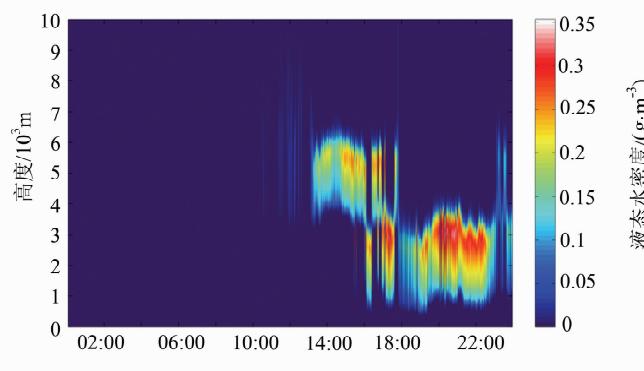


图 2 微波辐射计液态水密度垂直廓线伪彩色图

Fig. 2 Pseudo-color Image of Liquid Water Density Profiles from Microwave Radiometer

由此可知,微波辐射计具备全天时、全天候自动观测,时间分辨率高(每几秒采集一次数据),空间分辨率高(温度廓线的垂直分辨率最高达到10 m,液态水密度廓线的垂直分辨率最高达到20 m)等优点^[17,18]。因此可统计RPG-HATPRO在2012年全年的观测反演数据,对武汉地区云衰减进行计算与分析。

1.2 原理

悬浮在天空的云由许多细小的水滴或冰晶组成,典型的云粒子在0℃及以上是水的形式,而在-20℃~-40℃间是冰的形式,在水与冰粒子的中间温度范围内是冰水的混合形式。冰云粒子对微波波段的衰减可以忽略,但研究信号去极化效应时,冰云粒子的去极化效应很重要。因此计算云对微波信号的衰减作用时,只需重点考虑云中液态水的影响^[3]。

云中液态水的云粒子半径一般在1~30 μm之间,最大半径为25~50 μm,粒子大小主要集中在3~6 μm。由于云滴粒子很小,云滴的吸收截面远大于散射截面,因此研究微波波段的云衰减时,应用Rayleigh近似对于云衰减的预测精度已足够忽略散射影响,从而将云衰减过程简化为云吸收过程。另外,早期研究表明,云的吸收系数只与云的含水量有关而与云滴的大小和分布无关^[19]。由此可知,云衰减计算是以云中液态水密度作为主要的输入参数。单位云衰减值只与云中液态水密度和云的比衰减系数有关^[11]:

$$\alpha_c(h) = K_l \omega(h) \quad (1)$$

式中,在高度h处,单位云衰减值 $\alpha_c(h)$ 的单位为dB/km,液态水密度 $\omega(h)$ 的单位为g/m³,云的比衰减系数 K_l 的单位为(dB/km)/(g/m³),它是频率f和水的复介电常数 ϵ 的函数:

$$K_l = \frac{0.819f}{\epsilon''(1 + \eta^2)} \quad (2)$$

式中,

$$\eta = \frac{2 + \epsilon'}{\epsilon''} \quad (3)$$

$$\epsilon = \epsilon' + i\epsilon'' \quad (4)$$

式中,水的复介电常数 ϵ 是频率和温度的复杂函数,可以由双德拜模型求得^[20]:

$$\epsilon''(f) = \frac{f(\epsilon_0 - \epsilon_1)}{f_p[1 + (f/f_p)^2]} + \frac{f(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{f_s[1 + (f/f_s)^2]} \quad (5)$$

$$\epsilon'(f) =$$

$$\frac{\epsilon_0 - \epsilon_1}{[1 + (f/f_p)^2]} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{[1 + (f/f_s)^2]} + \epsilon_2 \quad (6)$$

式(5)、(6)中, $\epsilon_1 = 5.48$; $\epsilon_2 = 3.51$; $\theta = 300/T$;

$$\epsilon_0 = 77.6 + 103.3(\theta - 1) \quad (7)$$

频率f的单位为GHz,温度T的单位是K,主要和次要弛豫频率 f_p 、 f_s 分别为:

$$f_p = 20.09 - 142(\theta - 1) + 294(\theta - 1)^2 \quad (8)$$

$$f_s = 590 - 1500(\theta - 1) \quad (9)$$

通过以上推导可知,某一频率信号的云衰减值是云中液态水密度和温度的函数,单位云衰减值会随着不同高度处的不同云而变化。因此,有液态水密度廓线和温度廓线,地-空路径上总云衰减值由积分可得:

$$A = \frac{1}{\sin\theta} \int_{Hb}^{Ht} K_l \omega(h) dh \quad (10)$$

式中, Hb 和 Ht 分别是云底高和云顶高, θ 是地-空路径传播的角度,即卫星高度角。

2 结果和验证

2.1 云衰减计算结果

统计处理HATPRO型微波辐射计2012全年的液态水密度廓线数据,并利用§1.2所述方法计算,得出全年0~100 GHz频率范围内,地-空路径上云衰减的超越概率统计结果(图3)。如图3所示,在99.99%的链路可用时间内,云衰减从15 GHz的仅约1 dB,达到95 GHz约15 dB。结果表明:卫星通信信号在传播过程中,云衰减随着频率的增大而显著增大,在高频信号中表现尤为明显,已不能再被简单忽略。

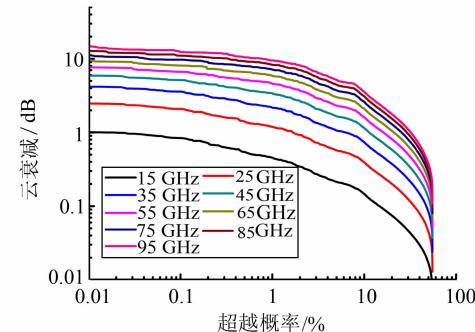


图3 利用HATPRO计算所得不同频率云衰减超越概率图

Fig. 3 Cloud Attenuation Exceedance Probability Calculated by HATPRO in Different Frequencies

图3所得的云衰减是由HATPRO观测反演的云中液态水密度廓线计算而得。然而,大部分情况下的液态水密度廓线无法直接获得。相对来说,ILWC可获得的途径较多。因此,建立云衰减与ILWC之间的“线性关系” $A = m \cdot ILWC$,以便

在缺少液态水密度而已知 ILWC 的情况下计算云衰减。需要注意的是,虽然本文将其简化称之为线性关系,但实际上云衰减与 ILWC 之间并非简单的一般线性关系,斜率系数 m 是信号频率 f 的二次函数。信号频率越高,云衰减影响越大,因而两者“线性关系”的斜率随频率的增大而增大^[7]。如图 4 所示,将斜率拟合为频率的二次函数,得出斜率 m 与频率 f 之间的函数关系:

$$m = 0.0001f^2 + 0.0267f - 0.3292 \quad (11)$$

2.2 对比验证

ITU-R 第 3J 工作组致力于对无线电波传播的对流层效应做出评估。该研究组在全球范围内对无线电信号在大气传播中云雾衰减产生的效应进行研究计算。ITU-R P.839-4 建议书提供了预测地对空路径上云雾引起的衰减的方法^[11]。该研究组通过无线电探空仪探测和放射性测量,给出平均每年的 ILWC 年度值 L (单位为 kg/m^2)。其中,无线电探空仪提供的数据虽然丰富,但时间分辨率非常有限,仅能适用于天顶路径。ILWC 值可通过沿所需路径适当频率上的放射性测量得出,其纬度和经度的分辨率均为 1.125° ;地球表面其他所需位置的 ILWC 需要通过插值方法得出。ITU-R 模型利用这些 ILWC 数据最终计算出各地的云衰减值。由此可以看出,ITU-R 模型对于 ILWC 结果的获取存在很大的不确定性,尤其是对于没有实际观测通过内插而得的结果值。ILWC 值的不确定性将在很大程度上干扰云衰减的准确计算。

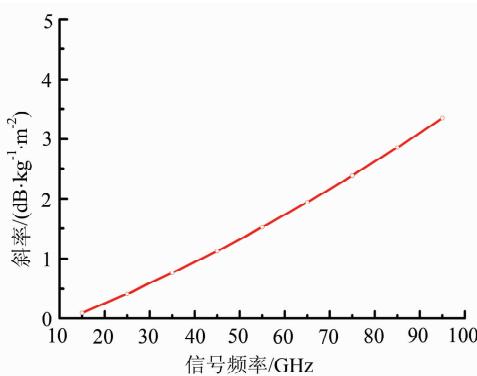


图 4 云衰减与液态水总量“线性关系”的斜率
关于频率的二次曲线图

Fig. 4 Slope of Linear Relation Between Attenuation and ILWC for Different Frequencies

将微波辐射计计算的云衰减与 ITU-R 模型计算结果对比,在此以云衰减对 45 GHz 信号传播的影响为例。如图 5 所示,两者云衰减趋势一致,但 ITU-R 模型计算结果低估了武汉地区的云

衰减影响。图 5 中两者的差异最大处在于,微波辐射计实测计算结果表明全年有 20% 的时间内云衰减值大于 0.47 dB ,而 ITU-R 模型计算结果表明全年有 20% 的时间内云衰减值大于 0.12 dB ,两者相差达到 0.35 dB 。

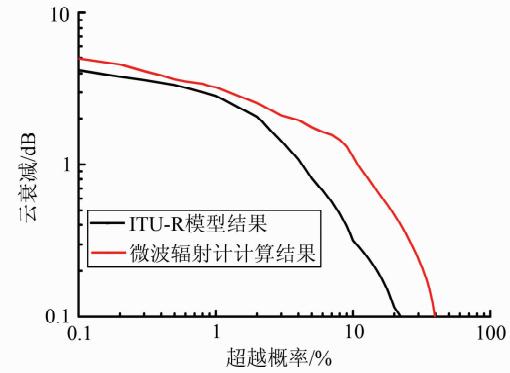


图 5 微波辐射计和 ITU-R 模型计算的云衰减
对比(信号频率 45 GHz)

Fig. 5 Comparison of Cloud Attenuation Between Microwave Radiometer and ITU-R Model in the Frequency of 45 GHz

ITU-R 模型的云衰减值是由模型统计的 ILWC 年度值 L 计算所得,由此推测云衰减被低估的原因可能与两者 ILWC 的差异有关。进一步将微波辐射计和 ITU-R 模型获得的 ILWC 统计结果进行对比,如图 6 所示。图 6 中两者的趋势一致,但 ITU-R 模型低估了武汉地区云液态水总量。而两者差异最大处为:微波辐射计实测计算结果表明全年有 20% 的时间内 ILWC 大于 $0.277 \text{ kg}/\text{m}^2$,而 ITU-R 模型计算结果表明全年有 20% 的时间内 ILWC 大于 $0.072 \text{ kg}/\text{m}^2$,两者相差一个数量级。并且由图 6 可知,微波辐射计反演的 ILWC 值在 $0 \sim 4 \text{ kg}/\text{m}^2$ 之间,能基本适用于中纬度所有天气条件。

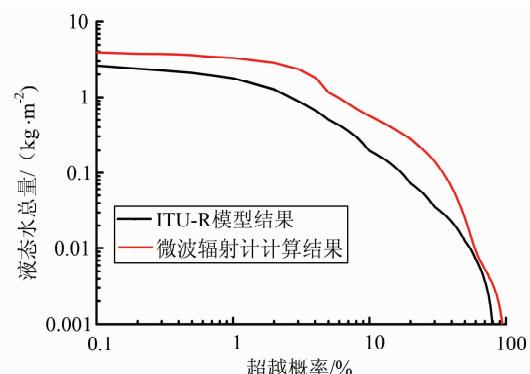


图 6 微波辐射计和 ITU-R 模型液态水总量对比
Fig. 6 Comparison of Integrated Liquid Water Content Between Microwave Radiometer and ITU-R Model

同理,建立起ITU-R模型所得云衰减与模型的ILWC年度值为 L 之间的“线性关系” $A = m_{\text{ITU}} \cdot L$,得出斜率 m_{ITU} 与频率 f 的二次函数关系:

$$m_{\text{ITU}} = 0.0002f^2 + 0.0346f - 0.3369 \quad (12)$$

微波辐射计计算结果所建立的云衰减与ILWC之间“线性关系”的斜率,与ITU-R模型的斜率对比,如图7所示。可得出ITU-R模型斜率比实测计算斜率偏大,并且随着频率的增大,偏大程度随之增大的结论。

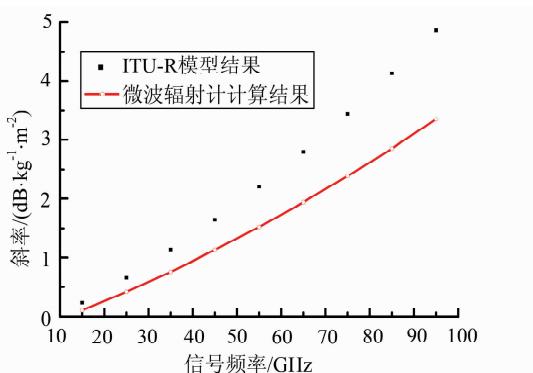


图7 云衰减与液态水总量“线性关系”的斜率对比

Fig. 7 Comparison of the Slope of Linear Relation Between Cloud Attenuation and ILWC

综合图5~图7中ITU-R模型计算结果与微波辐射计实测计算结果比较,得出结论:ITU-R模型低估了武汉地区的ILWC,却高估了云衰减与ILWC“线性关系”的斜率,最终结果表明ITU-R模型还是低估了云衰减。由此可见,ITU-R模型较大程度上低估了ILWC,这一点与图7的结果分析是一致的。

综上比较,ITU-R模型由于兼顾全球,所得的ILWC和云衰减结果都精度欠佳;用微波辐射计精确测量并反演的云中液态水密度和温度廓线等数据计算而得的云衰减结果精度较高,更符合武汉地区实际情况。对比结果表明,ITU-R模型较大程度上低估了武汉地区的ILWC,导致最终低估了云衰减。

3 结语

本文利用HATPRO型微波辐射计全年实时观测反演的高精度数据(尤其是云中液态水密度廓线),对武汉地区微波无线电信号传播中的云衰减进行年度统计与计算分析,并将微波辐射计计算结果与ITU-R模型结果对比验证,得出以下结论。

1) 随着频率增大,云衰减的影响显著增加。在99.99%的链路可用时间内,云衰减值从15GHz时约1dB达到95GHz时约15dB。

2) 为便于后续的云衰减研究,建立云衰减与ILWC的“线性关系” $A = m \cdot \text{ILWC}$,斜率 m 随频率增大而增大,拟合为频率的二次函数。

3) 对比分析表明,ITU-R模型低估了武汉地区的云衰减影响。差异最大处在于,在80%的链路可用时间内,ITU-R模型计算的云衰减为0.12dB,而实测计算结果为0.47dB。

4) 进一步对比验证,ITU-R模型低估了武汉地区的ILWC,却高估了云衰减与ILWC“线性关系”的斜率,但最终结果仍然低估了该地区的云衰减;可知ITU-R模型对ILWC的低估程度较高。最大差异处为在80%的链路可用时间内,ITU-R模型所得ILWC大约为0.072kg/m²,而HATPRO实测计算结果大约为0.277kg/m²。

HATPRO型微波辐射计可实时获得云中液态水密度廓线、温度廓线、云底高等高精度数据,为研究武汉地区云衰减对地-空路径通信信号传播的影响提供了原始数据,由此计算的云衰减为卫星通信系统的设计和运行中考虑大气影响的相关研究提供了实测依据。未来应该结合无线电探空数据对所得结果进一步验证和改进,得出更精确、更切合实际的云衰减结果。同时,可以将该方法扩展应用到其他中纬度亚热带季风性湿润气候地区,并在此结果基础上继续研究和推进。

参 考 文 献

- [1] Rytir M. Radiowave Propagation at Ka-band (20/30 GHz) for Satellite Communication in High-Latitude Regions[D]. Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2009
- [2] Su Zhenling. Research on Atmospheric Combined Attention Effect on Millimeter Wave System[D]. Xi'an: Xidian University, 2008(苏振玲. 大气复合衰减对毫米波系统的影响研究[D]. 西安电子科技大学, 2008)
- [3] Yang Ruike. Research on Several Electromagnetic (Optical) Wave Propagation Problems on Earth-space Paths in Troposphere Atmosphere[D]. Xi'an: Xidian University, 2003(杨瑞科. 对流层地-空路径电磁(光)波传播的若干问题研究[D]. 西安电子科技大学, 2003)
- [4] Wang L, Gong W, Ma Y, et al. Analysis of Ultra-violet Radiation in Central China from Observation and Estimation[J]. Energy, 2013, 59: 764-774
- [5] Altshuler E E, Marr R A. Cloud Attenuation at

- Millimeter Wavelengths[J]. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 1989, 37 (11): 1 473-1 479
- [6] Dintelmann F, Ortgies G. Semiempirical Model for Cloud Attenuation Prediction[J]. *Electronics Letters*, 1989, 25(22): 1 487-1 488
- [7] Salonen E, Uppala S. New Prediction Method of Cloud Attenuation[J]. *Electronics Letters*, 1991, 27 (12): 1 106-1 108
- [8] Omotosho T V, Mandeep J S, Abdullah M. Cloud Cover, Cloud Liquid Water and Cloud Attenuation at Ka and V bands over Equatorial Climate[J]. *Meteorological Applications*, 2014, 21(3): 777-785
- [9] Das S, Chakraborty S, Maitra A. Radiometric Measurements of Cloud Attenuation at a Tropical Location in India[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013, 105: 97-100
- [10] Maitra A, Chakraborty S. Cloud Liquid Water Content and Cloud Attenuation Studies with Radiosonde Data at a Tropical Location[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2009, 30 (4): 367-373
- [11] Recommendation ITU-R. Attenuation due to Cloud and Fog[J]. *ITU-R P*, 2009, 4: 840
- [12] Mao Tianpeng, Zhou Dongfang, NiuZhongxia, et al. The Calculation Model of the Attention Due to Clouds or Fog and the Analysis of Its Characteristic [J]. *Wireless Communication Technology*, 2004, 3: 51-54(毛天鹏, 周东方, 牛忠霞, 等. 毫米波云雾衰减计算模型及特性分析[J]. 无线通信技术, 2004, 3: 51-54)
- [13] Lian Yi, Chen Shengbo, Meng Zhiguo, et al. Distribution of Microwave Radiation Brightness Temperature on the Lunar Surface Based on Chang'E-2 MRM Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(6): 732-737(连懿, 陈圣波, 孟治国, 等. 利用嫦娥二号微波辐射计数据计算月球表面微波辐射亮度温度[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(6): 732-737)
- [14] Wang Yongqian, Shi Jiancheng, Liu Zhihong, et al. Passive Microwave Remote Sensing of Precipitable Water Vapor over Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on AMSR-E[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(4): 479-486(王永前, 施建成, 刘志红, 等. 利用微波辐射计 AMSR-E 的京津冀地区大气水汽反演[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(4): 479-486)
- [15] Macke A, Kalisch J, Zoll Y, et al. Radiative Effects of the Cloudy Atmosphere from Ground and Satellite Based Observations[C]. *EPJ Web of Conference*, EDP Sciences, France, 2010
- [16] Rose T, Crewell S, Löhner U, et al. A Network Suitable Microwave Radiometer for Operational Monitoring of the Cloudy Atmosphere[J]. *Atmospheric Research*, 2005, 75(3): 183-200
- [17] Löhner U, Maier O. Operational Profiling of Temperature Using Ground-based Microwave Radiometry at Payerne: Prospects and Challenges[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5(5): 1 121-1 134
- [18] Löhner U, Turner D D, Crewell S. Ground-based Temperature and Humidity Profiling Using Spectral Infrared and Microwave Observations. Part I: Simulated Retrieval Performance in Clear-sky Conditions[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(5): 1 017-1 032
- [19] Zhou Xiuli. *Atmospheric Microwave Radiation and Principles of Remote Sensing*[M]. Beijing: Science Press, 1982(周秀骥. 大气微波辐射及遥感原理[M]. 北京: 科学出版社, 1982)
- [20] Liebe H J, Hufford G A, Manabe T. A Model for the Complex Permittivity of Water at Frequencies Below 1 THz[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1991, 12(7): 659-675

A Method of Radiometric Measurements of Cloud Attenuation

DUAN Miaomiao^{1,2} MA Yingying¹ GONG Wei¹ WANG Lunche^{1,3}

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

2 The 2nd Institute of Surveying and Mapping of Hebei Province, Shijiazhuang 050000, China

3 School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Cloud attenuation has a non-negligible impact on radio waves propagating over an earth-space path, especially in high frequency signals of the satellite communication system. A precise cloud attenuation method that has mid-latitude regions applicability is presented in this paper, using the

HATPRO microwave radiometer's data particularly cloud liquid water density profiles. The result indicates that the effect of cloud attenuation enlarges rapidly as the frequency increases. More than 10 dB is caused due to cloud for 99.99% link availability at high bands. It is useful to relate the calculated cloud attenuation to integrated liquid water content, and the relationship is modeled by solid line. Predictions made with the method are compared with cloud attenuation data calculated by ITU-R (The ITU Radio communication sector) model, suggesting that the ITU-R model underestimates the effect of cloud attenuation in Wuhan area, resulting from the model's underestimation of integrated liquid water content.

Key words: HATPRO microwave radiometer; cloud liquid water density; cloud attenuation; integrated liquid water content; ITU-R

First author: DUAN Miaomiao, postgraduate, specializes in optical remote sensing of atmosphere. E-mail: miaomiaoduan@whu.edu.cn

Corresponding author: MA Yingying, PhD, associate professor. E-mail: yym863@gmail.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41401498, 41127901; Program for Innovative Research Team in University of Ministry of Education of China, No. IRT1278; Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China, No. 20120141120040; Cheng Guang Project of Wuhan, No. 2014070404010198.

(上接第 1559 页)

space and regarded as three particles, three particle considered one object, through the comprehensive study of centroid of the object to measure the impact of three particles on the coherence between the images, and then build a new master image optimization selection model. Respectively, using the proposed model and the integrated correlation coefficient model to take master image selection experiment for 28 scene images acquired by ENVISAT ASAR from 2003 to 2009 over Beijing. To verify the master image selection by different model, separately use the two selected result to interfere with the other images, take the interferograms generated and mean correlation coefficient as quantitative evaluation. The results show: Compared with integrated correlation coefficient model, the master image selected by this method proposed to is more reasonable, and the overall interference between other auxiliary images is better, meanwhile, and the model proposed is stable.

Key words: temporal baseline; space vertical baseline; Doppler centroid frequency; master image; integrated correlation coefficient measure

First author: LIU Limin, PhD candidate, specializes in PolSAR and InSAR image processing. E-mail: xiaoliulimin@163.com

Corresponding author: YU Jie, PhD, professor. E-mail: yuj2011@whu.edu.cn

Foundation support: The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) No. 2011AA120404; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41130744, 41171335; the National Key Basic Research Development Program of China (973 Program), No. 2012CB723403; Scientific Research Base Development Program of the Beijing Municipal Commission of Education.