

星载双频云雷达的云微物理参数反演算法研究^{*}

吴 琼^{1,2,3} 仰美霖⁴ 窦芳丽³ 郭 杨³ 安大伟³

WU Qiong^{1,2,3} YANG Meilin⁴ DOU Fangli³ GUO Yang³ AN Dawei³

1. 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室,北京,100029

2. 中国科学院大学,北京,100049

3. 国家卫星气象中心,北京,100081

4. 中国气象局北京城市气象研究所,北京,100089

1. LAGEO, Institute of Atmosphere Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

4. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China

2017-03-17 收稿,2017-07-26 改回.

吴琼,仰美霖,窦芳丽,郭杨,安大伟. 2018. 星载双频云雷达的云微物理参数反演算法研究. 气象学报, 76(1):160-168

Wu Qiong, Yang Meilin, Dou Fangli, Guo Yang, An Dawei. 2018. A study of cloud parameters retrieval algorithm for spaceborne millimeter wavelength cloud radar. *Acta Meteorologica Sinica*, 76(1):160-168

Abstract Based on data simulated by satellite radar simulator unit, two frequencies have been chosen to study the dual-frequency retrieval algorithm of cloud microwave parameters. Results suggest that: (1) 94/220 GHz is sensitive to tiny changes in drop size, which is beneficial for the retrieval of cloud radar parameters. Based on the consideration of detective ability, attenuation and manufacturing level in the industrial sector, 94/220 GHz can be chosen as the detection frequency of spaceborne cloud radar in the future; (2) the relationship between dual wavelength ratio (DWR) and median volume diameter (D_0) relies on the particle density. DWR will increase with D_0 if the particle density changes with the diameter. Otherwise, DWR will fluctuate with D_0 when the particle density is a constant. Thereby the retrieval of a constant density is very difficult; (3) backward iteration retrieval algorithm of dual frequency can be applied by 94/220 GHz and the retrieval results are consistent with the true values. Furthermore, the precision of retrieval is influenced by system noise and calibration precision. Therefore, the noise and calibration precision should be controlled under 1 dBz in order to satisfy the requirement of retrieval precision.

Key words Satellite radar simulator unit, Space borne cloud radar, Dual-frequency retrieval algorithm, Crystal density

摘 要 使用星载雷达模拟器输出的模拟数据,为星载双频云雷达选择了最佳的频点组合,并开展了双频联合反演云微物理参数的算法研究。结果表明:(1)在位于大气窗口的6组频点组合中,94/220 GHz的组合对滴谱参数的微小变化较为敏感,有利于进行双频的联合反演。综合考虑不同频点的探测能力、衰减以及工业部门的制造水平后,认为94/220 GHz可以作为未来星载双频测云雷达的探测频点。(2)双频反演中最核心的双波长比(DWR)和体积中值直径(D_0)的关系与冰晶粒子密度相关。当密度随着粒子直径变化时,DWR随着 D_0 单调递增,当粒子密度固定不变时,DWR- D_0 曲线可能会出现非单调变化,从而使得固定密度时的反演比变密度时更加复杂。(3)后向迭代的双频反演算法同样适用于94/220 GHz进行云微物理参数的反演,并且对模拟数据的反演精度较高。此外,反演精度受到系统噪声以及定标精度的影响,为了满足反演精度的要求,

^{*} 资助课题:国家自然科学基金项目(41475030、61527805)。

作者简介:吴琼,主要从事星载主动雷达的相关研究。E-mail: wuqiong@cma.gov.cn

系统噪声和定标误差应该控制在 1 dBz 以内。

关键词 星载雷达模拟器, 星载云雷达, 双频反演算法, 冰晶密度

中图法分类号 P412.25

1 引言

云作为地球辐射收支系统的重要调节器,在大气能量循环、水汽循环以及地球气候系统中扮演着非常重要的角色。云通过辐射强迫影响着地球大气的运动状况和气候。在目前的大气环流模式中,对云强迫过程的描述主要是通过对云和辐射进行参数化来解决的。合理的参数化方案在气候模式中十分关键。但是,现有的参数化方案之间的差异很大,而这种差异所导致的气候敏感性的差异可以达到 3 倍(Cess, et al, 1996)。IPCC 在第 3 次评估报告中指出,气候模式大量的不确定性来源于气候模式中对云处理的不足以及缺乏实际的观测资料来验证云的参数化方案(IPCC, 2001)。因此,若能细致了解云的垂直分布以及微物理特征,对全球气候变化的研究来说非常重要。

雷达是测云的主要手段之一。毫米波雷达(波长为 1 到 10 mm,频率为 30 到 300 GHz)能够穿透含水量较多的厚云层及含水量较少的卷云,对非降水云及弱降水云的探测表现出一定的优势(Kropfli, et al, 1995)。由于云滴的后向散射截面随波长而变化,因此毫米波雷达对非降水云滴有很强的探测敏感性(Stokes, et al, 1994)。用毫米波测云雷达可以连续观测云的水平、垂直结构变化,获得准确的云内宏、微观参数,为更好地研究云的特性及其在气候变化中的重要作用提供支持。特别是星载毫米波雷达弥补了其他仪器无法透过高云探测不到其下云层的不足,已经成为毫米波雷达技术的一个重要发展方向。

2006 年发射了第一个搭载 94 GHz 云廓线雷达的 CloudSat 卫星,用来研究云的内部水平和垂直结构,为研究云辐射特性提供云内液态水和冰水的垂直廓线(仲凌志等, 2010)。中国毫米波雷达的研制起步比较晚。1979 年,中国科学院大气物理研究所和安徽井冈山机械厂合作研发了 X 波段(3 cm)和 Ka 波段(8.2 mm)双波长雷达,2006 年空军第 7 研究所与 38 所(安徽四创)联合研发了一部 8.6 mm 波长的测云雷达,主要用于监测云内积冰情况。

2007 年中国气象科学研究院与中国航天研究二院第 23 所联合研发出具有多普勒和极化功能的波长 8.6 mm 测云雷达,这是中国第一部用于气象探测的灵敏度较高的毫米波雷达。目前,中国电子科学集团公司第 14 研究所也成功开发了 35 GHz 毫米波云雷达。2014 年,安徽 38 所、中国航天科技集团九院 704 所成功研制了 94 GHz 毫米波云雷达,南京信息工程大学也已成功研制出硬件国产化的 94 GHz 测云偏振雷达。2015 年,中国航天科技集团公司五院和八院开展了 220 GHz 测云雷达原理样机总体方案的设计和研制工作,成功获得了中国 220 GHz 测云雷达的第一手宝贵资料(边明明等, 2015)。

在云微物理参数的反演方面,最常用的是经验统计法,比如冰水含量和雷达反射率因子(IWC- Z_e)的关系,使用这种方法的优点是简单易行,但是这种关系受时空变化的影响很大。因此,反演精度往往不高。有学者研究(Brown, et al, 1995b)表明,如果仅使用 94 GHz 的雷达探测资料时,对 0.01 g/m^3 冰水含量的反演误差为 +85% 到 -45%。但是,如果有辅助的云滴谱信息,这个反演误差可以缩小到 +50% 到 -35%。在现有的探测手段中,获得云滴谱的最有效手段是使用双频雷达。通过双频联合探测,从雷达反射率因子的差值中提取出云滴谱参数,继而进行反演,可以获得较高精度的云微物理参数。因此,双频的云雷达已经成为未来的发展方向。

总体看来,现有的研究主要侧重于云雷达的硬件技术,对双频云雷达微物理参数反演方面的研究还不多。目前,中国国家卫星气象中心正准备规划一颗云观测卫星,搭载的主载荷就是双频的测云雷达。本研究的主要目的是使用星载雷达模拟器构建的模拟数据,为星载测云雷达选择合适的频点组合,并开展反演试验,初步研究双频云雷达的微物理参数反演算法,为后续云雷达的发展奠定基础。

2 星载雷达模拟器

近年来,伴随着高精度和高灵敏度云和降水探测需求的提升,星载雷达模拟器也在不断发展。美国科罗拉多州立大学的 Haynes 等 2006 年开发了

Quickbeam 雷达模拟软件(Haynes, et al, 2007), 该软件简单易行, 但是它对处于融化状态的混合相态粒子没有模拟能力, 并且对冰晶粒子的模拟误差较大, 截止到 2008 年, 该软件已经停止更新。日本名古屋大学的 Masunaga 等 2007 年开发了 SDSU (Satellite Data Simulator Unit) (Masunaga, et al, 2010), SDSU 是一个集星载雷达模拟器、微波辐射计模拟器、可见光/红外成像仪模拟器于一体的卫星多传感器模拟器, 其中, 雷达模拟器的模拟能力相比 Quickbeam 有了明显的提升。2011 年, NASA 的 Toshi Matsui 在 SDSU 的基础上开发了 G-SDSU (Goddard Satellite Data Simulator)。G-SDSU 除了具备 SDSU 的基本功能以外, 还可以耦合 NASA 许多高精度大气模式(比如 WRF-SBM、NU-WRF、

MMF 等)的输出并且在原来只有球形米散射的基础上增加了计算椭球散射的 T-Matrix 和复杂形状粒子散射的 DDSAT 查找表。目前, G-SDSU 是最先进的星载雷达模拟器之一。

星载雷达模拟器通常将云模式输出的水凝物廓线(包括云水、雨水、雪、霰、雹以及云冰)和温、湿度廓线作为输入, 经过散射和衰减计算, 输出模拟的雷达反射率因子。通过比较模拟值和星载雷达 L1 级的实际观测值来客观评估雷达的性能。但是, 模拟器里面并没有输出降雨率、冰水含量等星载雷达 L2 级的定量产品, 并且也没有设置亮带模型以及降雨分类等信息, 因此不适合直接用于反演研究, 为此专门开发了一套新的星载雷达模拟器, 主要的输入、输出参数和计算流程如图 1。

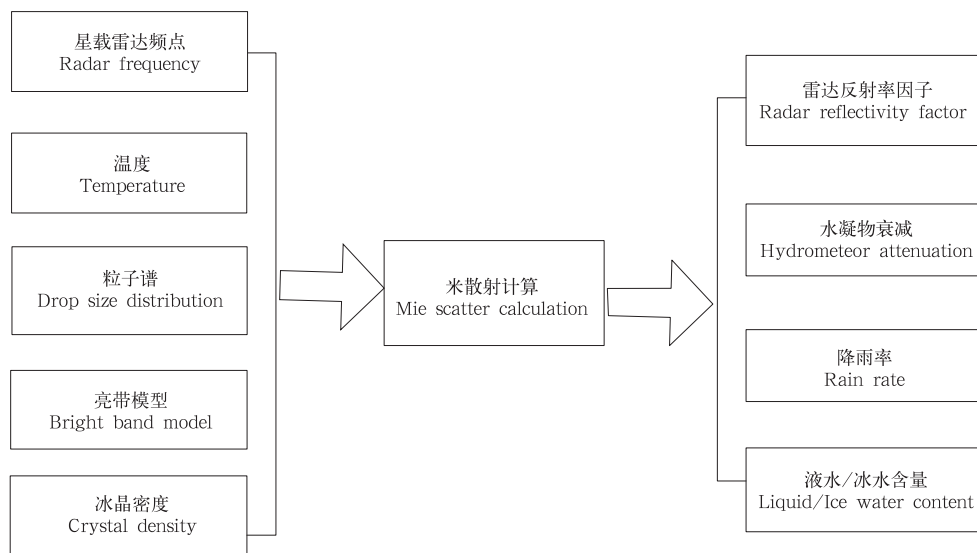


图 1 星载雷达模拟器的计算流程

Fig. 1 Schematic diagram of the space-borne radar simulator

该雷达模拟器的主要功能是建立不同降水类型、不同粒子相态、不同粒子谱参数等情况下云和降水的微物理参数与雷达反射率因子的定量关系, 比如 $Z-R$ 、 $Z-LWC$ 关系等。经过对比, 基于该模拟器生成的 $Z-R$ 和 $Z-K$ 关系的系数与 TRMM PR 的系数存在很好的一致性。当然, 因为该模拟器的核心模块是米散射计算, 因此对雨滴以及非降水云的液态云滴粒子的模拟比较有效, 而对复杂形状的冰晶粒子的模拟则不大适用。但是, 伴随着复杂形状的冰晶粒子的反演也更为复杂, 因此在目前算法研究的初级阶段, 先将云粒子简单近似成球形, 并假设其

服从 γ 分布(Kosarev, et al, 1991)

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp\left(\frac{-[3.67 + \mu]D}{D_0}\right) \quad (1)$$

式中, N_0 为数密度, D 为粒子直径, D_0 为体积中值直径, μ 为尺度因子。

等效雷达反射率因子可以表示为

$$Z_e = \frac{\lambda^4}{\pi^5 |K_w|^2} \int_0^\infty N(D) \sigma_b dD \quad (2)$$

式中, K_w 为水的复折射指数, λ 为波长, σ_b 为后向散射截面。在此基础上, 将两个波段雷达反射率因子的比值定义为

$$\text{DWR} = 10\lg\left(\frac{Z_{\text{low}}}{Z_{\text{high}}}\right) \quad (3)$$

式中, low 和 high 分别表示双频组合中的低频和高频。将式(1)、(2)带入式(3)后可发现, 在 μ 值固定的情况下, DWR(单位: dB) 和 N_0 无关, 只是 D_0 的函数, 这是双频联合反演滴谱的基本原理。

3 通道组合选择

理论上, 位于大气窗口的 35、94、140 和 220 GHz 都可以作为星载测云雷达的备选通道。因此, 可能存在的通道组合一共有 6 种, 分别是 35/94、35/140、35/220、94/140、94/220 和 140/220 GHz。使用双频联合的根本目的是要提高云微物理参数的反演精度, 因此不同通道组合对反演的影响是进行通道选择的重要依据。

利用星载雷达模拟器, 得到 6 种频段组合下 DWR 和 D_0 的关系曲线(图 2)。相应设置如下, 温度为 0℃, $\mu = 0$, 冰晶密度服从 $\rho = 0.07D^{-1.1} \text{ g/cm}^3$ 的分布(Brown, et al, 1995a), 介质介电常数的计算使用 Meneghini 改进过的 Maxwell-Garnet 公式(Meneghini, et al, 1996)。

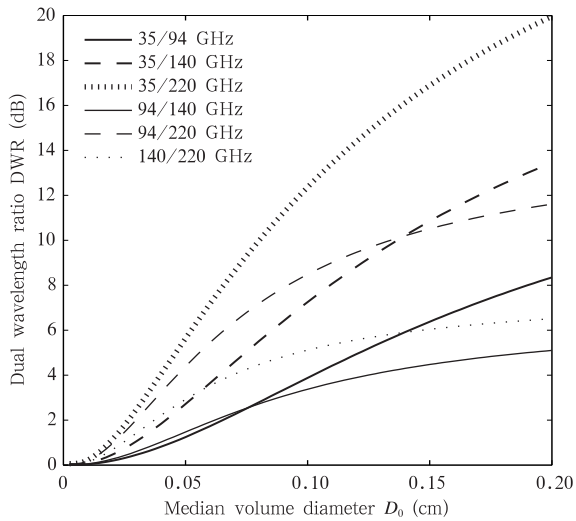


图 2 双波长比和体积中值直径的关系

Fig. 2 Dual-wavelength ratio as a function of median volume diameter

图 2 表明, 雷达频点的差异越大, 相同间隔的 D_0 所对应的 DWR 就越大, 对 D_0 微小的变化就越敏感。所以, 对反演而言, 雷达频点的差异越大, 对双频反演就越有利。在图中的 6 个频段组合中, 35/

220、94/220 和 35/140 GHz 组合的 DWR 最大值能超过 10 dB, 明显超出另外 3 个组合。其中, 35/220 GHz 在整个尺度范围内的 DWR 值都保持最大, 而 94/220 GHz 的 DWR 值只在 D_0 小于 0.15 cm 时大于 35/140 GHz, 在 D_0 大于 0.15 cm 时, 小于 94/220 GHz。说明 94/220 GHz 比较适用于探测小粒子, 而 35/140 GHz 比较适用于探测大粒子, 而大粒子一般以雨滴为主, 并不属于测云雷达的探测重点, 因此相比 35/140 GHz, 94/220 GHz 更加适合用来测云。

94/220 和 35/220 GHz 相比, 虽然 DWR 的动态范围不如 35/220 GHz 的大, 但是星载 35 GHz 一般对弱降水以及液态云滴的探测比较有效, 对细小冰晶颗粒的探测则不敏感, 因此更多的被用来探测降水, 比如全球降水测量任务(GPM)卫星(Hou, et al, 2014)上搭载的 Ka 波段雷达。星载 94 GHz 因为频点较高, 测云的敏感性要优于 35 GHz, 能观测到 35 GHz“看不到”的一些弱回波, 这也是 94/220 GHz 测云相比 35/220 GHz 的一个优势。当然, 在频段组合的选择中, 还需要考虑衰减的影响。引起衰减的因素很多, 包括水汽、氧气、液态水以及冰晶。衰减和雷达频点有关, 一般情况下, 雷达频点越高, 衰减越大。使用 Liebe(1989)的大气吸收模型以及热带的标准大气廓线(McClatchey, 1972)计算衰减后发现: 从大气顶到 0℃层, 35、94、140 和 220 GHz 的双程路径积分衰减分别为 0.2、0.8、1.5 和 2.0 dB。大气的衰减可以通过数值预报模式输出的温、湿度廓线来进行合理的衰减订正, 因此大气衰减的影响并不是很大。与大气衰减相比, 液态水对雷达回波衰减的影响则比较大, 比如 35 和 94 GHz 还有可能探测到低层的一些液态水云, 而高频的 140 和 220 GHz 则因为在湿空气的衰减很大, 并不适合用来进行水云的探测。冰晶的衰减要远远小于相同含量时液水的衰减并且随着频率的增加而显著增大, 这部分衰减可以通过双频的反演算法进行合理的订正。

综上所述, 对云的探测而言, 为了提高反演的精度, 需要尽可能选择频率差异比较大的两个频点, 不过高频雷达由于频点较高, 衰减也会相应增加, 所以像 140 和 220 GHz 这样的高频就不适合用来探测含水量较大的水云。另外, 从中国目前硬件的制造水平来看, 低频云雷达的技术已经比较成熟, 35 和

94 GHz 的灵敏度均能超过 -30 dBz, 而高频 140 和 220 GHz 雷达的研制则处于起步阶段, 雷达的灵敏度离 -30 dBz 还有一定的差距, 并且高频 140 和 220 GHz 雷达的发射功率还做不到很大, 暂时达不到星载雷达的要求, 这也是高频雷达在硬件技术上遇到的主要瓶颈。不过, 这有望在未来 5—10 年内有所突破。因此, 展望中国云雷达的发展, 94/220 GHz 仍是比较合适的频段组合, 该雷达将以探测冰云为主, 并最终为改进气候模式服务。

4 云参数的双频反演算法

对双频雷达反演算法的研究已经有 30 多年的历史了。但是研究的重点一直是天气系统中的降雨或者降雪, 相应的探测也大都集中在 C、X、Ku 和 Ka 波段, 对 W 及更高频段的 THz 波的反演研究并不多见。为此, 专门针对 94/220 GHz 的双频联合反演, 开展了模拟试验。

4.1 DWR- D_0 关系

DWR- D_0 关系是双频反演的核心, 在反演前, 需要建立以 D_0 作为因变量、DWR 作为自变量的函数关系或者查找表。在反演中, 一旦获知了 DWR 的值, 就能反演出 D_0 , 从而获得整个粒子谱的分布函数。在此基础上, 进一步通过积分计算求得有效粒子半径以及冰水含量。影响 DWR- D_0 关系的因素主要有两个, 一是粒子密度, 另外一个尺度因子 μ 。粒子密度一般有两种表达方式, 一种是固定密度, 另外一种一种是变密度。图 3 为 $\mu=0$ 时, 5 种固定密度以及 1 种变密度情况下的 DWR- D_0 关系。图 4 是密度服从 $\rho=0.07D^{-1.1}$ g/cm³ 分布时, 4 个不同 μ 值情况下的 DWR- D_0 关系。

从图 3 可以看出, 对 5 种固定密度的冰晶而言, 当 $D_0 < 0.05$ cm 时, 廓线基本重合。当 $D_0 > 0.05$ cm 时, DWR 廓线开始表现出差异。首先, 对于相同的 D_0 值, 较小的粒子密度对应较大的 DWR 值, 其次当粒子密度较小时, DWR 往往随着 D_0 单调递增, 但是随着粒子密度的增加, 曲线不再单调变化, 而是慢慢开始波动, 并且密度越大, 波动越剧烈。这在粒子密度 $\rho=0.8$ 和 $\rho=0.9$ g/cm³ 的曲线上尤为明显。这说明高频 94/220 GHz 的 DWR- D_0 关系严重依赖于粒子的密度。这和 Liao 等 (2005) 得到的低频时的情况完全不同。Liao 等 (2005) 指出, 对于 X-Ka 波段的组合而言, 粒子密度对 DWR- D_0 关系

基本没有影响。因此, 即使反演前没有粒子密度的确切信息, 对反演的影响也不会很大。但是粒子密度对于高频 94/220 GHz 的反演却是异常关键, 尤其是大密度情况下非单调变化的 DWR- D_0 关系, 往往会直接引起反演中的非适定问题。也就是对应一个确定的 DWR 值却能反演出若干个 D_0 值, 如果选择不当, D_0 值的反演误差就能超过 100%, 因此在反演前确定粒子的密度以及合理解决一值多解的问题是高频 94/220 GHz 反演固定密度冰晶微物理参数的关键。相比固定密度, 变密度情况下的

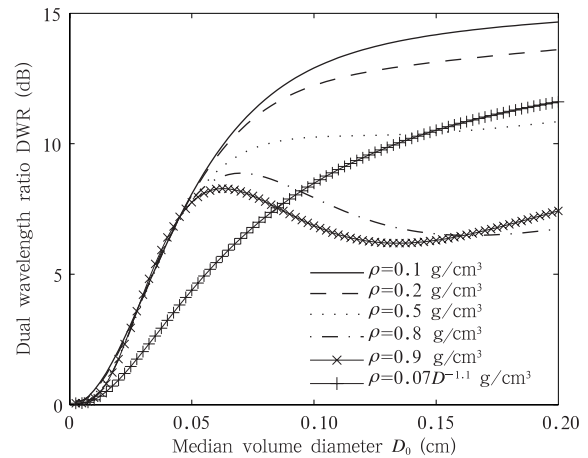


图 3 不同粒子密度情况下的双波长比和体积中值直径的关系

Fig. 3 Dual-wavelength ratio and median volume diameter under different densities

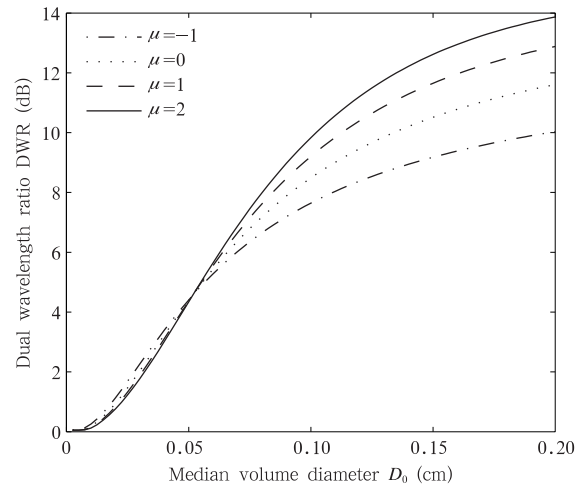


图 4 不同尺度因子情况下的双波长比和体积中值直径的关系

Fig. 4 Dual-wavelength ratio and median volume diameter under different scale factors

DWR- D_0 关系只是一个单调递增的函数,因此在实际反演时会相对简单。所以,下文仅针对变密度的情况进行了反演。

当 $D_0 < 0.05$ cm 时,尺度因子 μ 对 DWR- D_0 关系基本上没有影响(图 4),但是随着 D_0 的增大,DWR 的差异也逐渐增大。当 $D_0 = 0.2$ cm 时,不同 μ 值所对应的 DWR 的差异能达到 5 dB。并且尺度因子 μ 越大,对 D_0 的微小变化就越敏感。不过在整个云滴谱的反演中,一般将 μ 设为一个固定值, μ 确定以后,DWR- D_0 关系也就唯一确定了。为了简化计算,文中的 μ 值全设为固定值 0。

经过 9 阶拟合得到了图 3 中变密度情况下 D_0 和 DWR 的拟合公式(略),拟合曲线和实际曲线基本重合。反演中的 D_0 值都将基于该公式计算而来。

4.2 双频反演精度检验

为了检验算法的精度,利用星载雷达模拟器生成了一组模拟数据,模拟的云层高度为 4 km,距离分辨率为 250 m,每个距离库的 D_0 固定为 0.12 cm, N_0 固定为 10^6 cm⁻¹ m⁻³。由此生成的反射率因子廓线如图 5 所示。图中的 Z_e 表示等效雷达反射率因子, Z_m 表示经过冰晶衰减后测量的雷达反射率因子。

后向迭代的双频反演算法(Mardiana, et al, 2004)最早被用来反演降雨,它的优点是可以在不知道路径积分衰减量的情况下,假设一个初值,经过多次迭代后使反演的 D_0 逐渐逼近真值。当满足一定

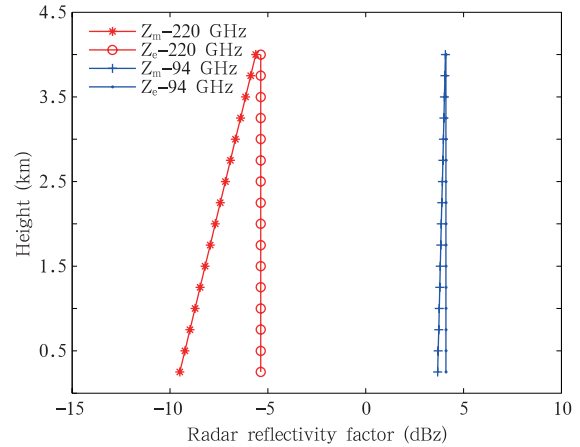


图 5 模拟的雷达反射率因子廓线

Fig. 5 Profiles of simulated radar reflectivity factor

的约束条件后,退出迭代运算,此时的 D_0 就是最终的反演值。

将 Z_m 廓线作为反演的输入,使用后向迭代的双频反演算法,进行了粒子谱参数、冰水含量以及有效粒子半径的反演。反演中,假设两个波段路径积分衰减量的初值均为 0 dB,经过 8 次迭代计算以后,得到的反演廓线如图 6 所示。

从图 6 可以看出,不管是粒子谱参数还是冰水含量,反演廓线和模拟廓线都非常重合,表明后向迭代的反演算法对 94/220 GHz 的高频也是适用的。当然,反演中还略微存在一些误差,比如 D_0 廓线的平均值是 0.1196 cm,标准偏差是 3.3169×10^{-4} cm, N_0 廓线的平均值是 9.9997×10^5 cm⁻¹ m⁻³,标准偏

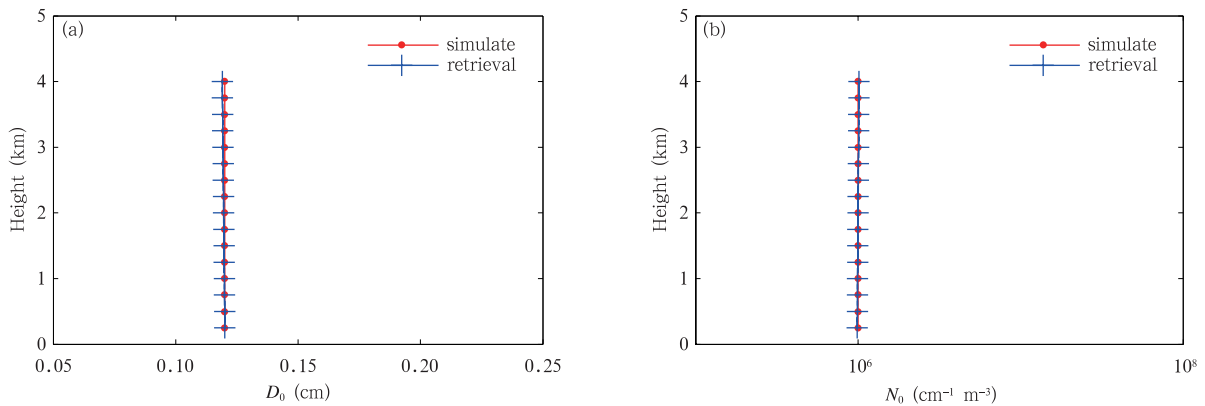
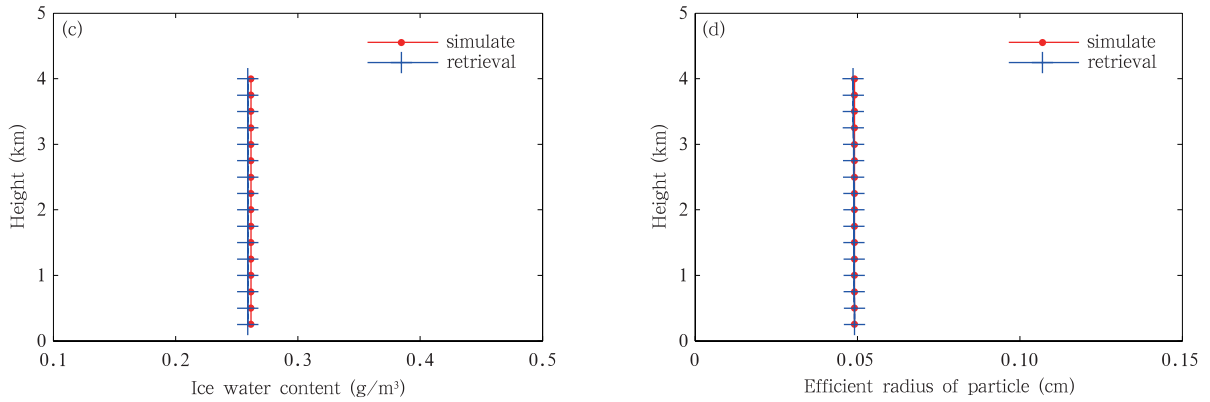


图 6 反演廓线和模拟廓线的对比

(a. 体积中值直径 D_0 , b. 数密度 N_0 , c. 冰水含量 IWC, d. 粒子有效半径 r_e)

Fig. 6 The retrieval profiles and simulate profiles

(a. the median volume diameter D_0 , b. the number density N_0 , c. ice water content IWC, d. effective particle radius r_e)



续图 6

Fig. 6 Continued

差是 $8.1096 \times 10^3 \text{ cm}^{-1} \text{ m}^{-3}$ 。当然云雷达实际探测的廓线远比图 5 中的复杂,不可避免地会存在系统噪声以及定标误差。因此,为了更好的评估双频反

演算法的性能,在图 5 的基础上,增加了 4 组均值为 0,标准偏差分别为 0.5、1.0、1.5 和 2.0 dBz 的高斯噪声,反演后得到冰水含量的廓线(图 7)。

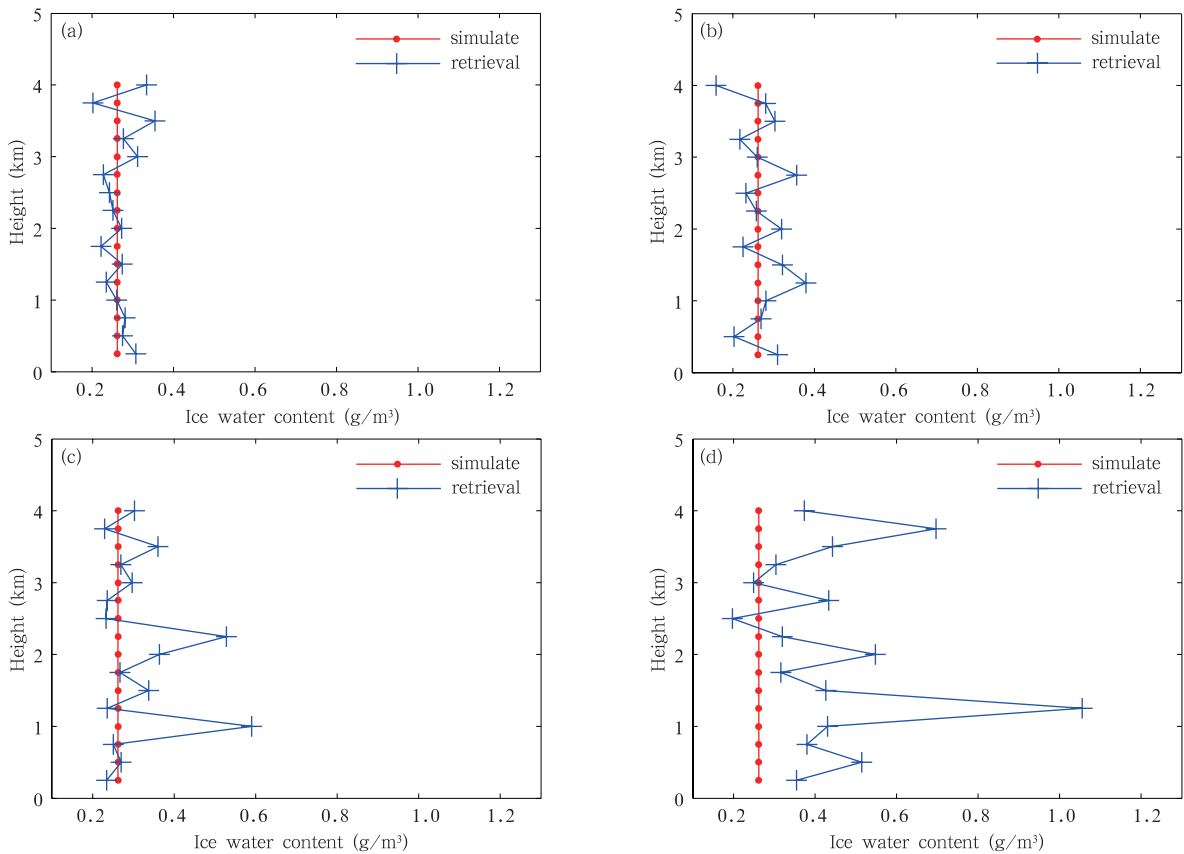


图 7 不同噪声情况下反演的冰水含量廓线和模拟廓线的对比

(a. 噪声标准偏差为 0.5 dBz, b. 噪声标准偏差为 1.0 dBz, c. 噪声标准偏差为 1.5 dBz, d. 噪声标准偏差为 2.0 dBz)

Fig. 7 The retrieval and simulate ice water content profiles under various noise conditons

(a. the noise standard deviation is 0.5 dBz, b. the noise standard deviation is 1.0 dBz,

c. the noise standard deviation is 1.5 dBz, d. the noise standard deviation is 2.0 dBz)

从图 7 可以看出,当存在噪声时,反演的廓线不像图 6 中那么平稳,而是出现明显的波动,波动的幅度越大,表示反演的误差越大。当噪声标准偏差为 0.5 dBz 时,大部分反演值和真值较为接近,但是当噪声标准偏差达到 2.0 dBz 时,冰水含量反演误差的平均值能达到 60%,最大的反演误差甚至超过 300%。因此为了保证所有冰水含量的反演误差小于 100%,系统噪声和定标误差应该控制在 1.0 dBz 以内。

综上所述,后向迭代的双频反演算法可以用来进行云微物理参数的反演,并且当系统噪声和定标误差在 1.0 dBz 以内时,反演结果满足反演精度要求。当然,上述假设的廓线都是理想化的,实际情况远比这复杂。因此,后续还将通过模拟以及开展同步观测试验来收集更多的数据,从而对反演算法展开进一步的研究。

5 结论与讨论

利用星载雷达模拟器,模拟了云雷达探测云层后得到的后向散射回波,从而进行了双频雷达最佳频点组合的选择以及双频云微物理参数反演算法的研究,主要结论如下:

(1) 雷达频点的差异越大,相同间隔的 D_0 所对应的 DWR 就越大,对 D_0 微小的变化就越敏感,因此对双频反演就越有利。就这点而言,在 35/94、35/140、35/220、94/140、94/220 和 140/220 GHz 共 6 组频点组合中,35/220 GHz 和 94/220 GHz 是最佳的两个组合。其中,94/220 GHz 相比 35/220 GHz 尽管 DWR 的动态范围小一点,但是因为频点较高,对细小云滴的探测更加敏感,加上星载 94 GHz 云雷达的发展较早,更为成熟。综合考虑不同频点的探测能力、衰减以及工业部门的制造水平后选择 94/220 GHz 作为未来星载双频云雷达的探测频点。

(2) 高频 94/220 GHz 组合的 DWR- D_0 关系和低频时不同,低频时的 DWR- D_0 关系基本上和粒子密度无关,而 94/220 GHz 的 DWR- D_0 关系则依赖于粒子的密度。当粒子密度随直径变化时,DWR 随着 D_0 单调递增。当粒子密度不随粒子直径变化时,不同密度的 DWR- D_0 曲线差异较大。粒子密度较小时(比如 $\rho = 0.1 \text{ g/cm}^3$),DWR- D_0 曲线表现出单调递增的规律,但是当粒子密度较大时(比如 $\rho =$

0.8 g/cm^3),DWR- D_0 曲线不再单调变化,而是出现较大幅度的波动,从而引起反演中一值多解的问题。

(3) 后向迭代的双频反演算法同样适用于 94/220 GHz 进行粒子谱参数以及冰水含量的反演,并且对模拟数据的反演精度较高。当存在系统噪声时,反演精度会明显降低。为了保证反演的冰水含量误差小于 100%,系统噪声和定标误差应该优于 1.0 dBz。

当然,真实条件下的云滴谱以及冰晶的形状远比假设的复杂,因此不管是对反演中 DWR- D_0 关系的建模还是反演算法的检验都需要进行更深入的分析 and 研究。未来的工作将主要围绕以下几个方面展开:非球形粒子的离散偶极子近似法(DDA)散射计算、固定密度时的一值多解问题以及外场校飞数据的反演验证。

参考文献

- 边明明, 王世涛, 胡伟东等. 2015. 星载太赫兹雷达测云散射特性及辐射源分析. 太赫兹科学与电子信息学报, 13(5): 712-717.
- Bian M M, Wang S T, Hu W D, et al. 2015. Radiation source and scattering characteristics analysis of space-borne terahertz cloud radar. J Terahertz Sci Electron Inform Technol, 13(5): 712-717 (in Chinese)
- 仲凌志, 刘黎平, 陈林等. 2010. 星载毫米波测云雷达在研究冰雪天气形成的云物理机制方面的应用潜力. 气象学报, 68(5): 706-716.
- Zhong L Z, Liu L P, Chen L, et al. 2010. A potential application of a millimeter-wavelength radar to studying the cloud physics mechanism for ice and snow weather. Acta Meteor Sinica, 68(5): 706-716 (in Chinese)
- Brown P R A, Francis P N. 1995a. Improved measurements of the ice water content in cirrus using a total-water probe. J Atmos Oceanic Technol, 12(2): 410-414
- Brown P R A, Illingworth A J, Heymsfield A J, et al. 1995b. The role of spaceborne millimeter-wave radar in the global monitoring of ice cloud. J Appl Meteor, 34(11): 2346-2366
- Cess R D, Zhang M H, Ingram W J, et al. 1996. Cloud feedback in atmospheric general circulation models: An update. J Geophys Res Atmos, 101(D8): 12791-12794
- Haynes J M, Luo Z, Stephens G L, et al. 2007. A multipurpose radar simulation package: Quick beam. Bull Amer Meteor Soc, 88(11): 1723-1727
- Hou A Y, Kakar R K, Neeck S, et al. 2014. The Global Precipitation Measurement mission. Bull Amer Meteor Soc, 95(5): 701-722
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis: Contribu-

- tion of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press
- Kosarev A L, Mazin I P. 1991. An empirical model of the physical structure of upper-layer clouds. *Atmos Res*, 26(3): 213-228
- Kropfli R A, Matrosov S Y, Uttal T, et al. 1995. Cloud physics studies with 8 mm wavelength radar. *Atmos Res*, 35(2-4): 299-313
- Liao L, Meneghini R, Iguchi T, et al. 2005. Use of dual-wavelength radar for snow parameter estimates. *J Atmos Oceanic Technol*, 22(10): 1494-1506
- Liebe H J. 1989. MPM: An atmospheric millimeter-wave propagation model. *Int J Infrared Milli Waves*, 10(6): 631-650
- Mardiana R, Iguchi T, Takahashi N. 2004. A dual-frequency rain profiling method without the use of a surface reference technique. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 42(10): 2214-2225
- Masunaga H, Matsui T, Tao W K, et al. 2010. Satellite data simulator unit: A multisensor, multispectral satellite simulator package. *Bull Amer Meteor Soc*, 91(12): 1625-1632
- McClatchey R A, Fenn R W, Selby J E A et al. 1972. Optical properties of the atmosphere, Air Force Cambridge Research Laboratories, Rep. No. AFCRL72-0497, L. G. Hanscom Field.
- Meneghini R, Liao L. 1996. Comparisons of cross sections for melting hydrometeors as derived from dielectric mixing formulas and a numerical method. *J Appl Meteor*, 35(10): 1658-1670
- Stokes G M, Schwartz S E. 1994. The Atmospheric Radiation Measurement (ARM) program: Programmatic background and design of the cloud and radiation test bed. *Bull Am Meteor Soc*, 75(7): 1201-1221

欢迎订阅 2018 年度《气象学报》

《气象学报》中文版创刊于 1925 年,是由中国气象局主管,中国气象学会主办的全国性大气科学学术期刊,主要刊载有关大气科学及其交叉科学研究的具有创新性的论文;国内外大气科学发展动态的综合评述;新观点、新理论、新技术、新方法的介绍;研究工作简报及重要学术活动报道;优秀大气科学专著的评介以及有关本刊论文的学术讨论等。

《气象学报》中文版 2003 年和 2005 年连续两次荣获中华人民共和国新闻出版总署颁发的第二届、第三届“国家期刊奖百种重点学术期刊”奖;2003—2007、2009、2016 年被中国科学技术信息研究所评为“百种中国杰出学术期刊”;2007—2011 年和 2015 年获得中国科学技术协会精品科技期刊工程项目的资助,2008、2011、2014、2017 年《气象学报》(中文版)被评选为“中国精品科技期刊”;2012、2013、2014、2015 年获评“中国最具国际影响力学术期刊”;2013、2015、2017 年入选国家新闻出版广电总局“百强报刊”;2016、2017 年获评“中国国际影响力优秀学术期刊”。

《气象学报》为大气科学研究提供了学术交流平台,一直致力于推动中国大气科学基础研究和理论研究的发展,服务于中国气象现代化建设事业。作者和读者对象主要为从事气象、海洋、地理、环境、地球物理、天文、空间及生态等学科的科研人员、高校师生。

《气象学报》中文版为双月刊,国内外发行。

2018 年全年共 6 期,定价 240 元/年。

邮发代号: 2-368(国内) BM329(国际)

通讯地址: 北京市中关村南大街 46 号 中国气象学会《气象学报》编辑部

邮政编码: 100081

联系电话: 010-68406942, 68408571(传真)

邮箱: cmsqxxb@263.net; qxxb@cms1924.org

期刊主页: http://www.cmsjournal.net/qxxb_cn

开户银行: 北京建行白石桥支行

户名: 中国气象学会

帐号: 11001028600059261046