

吴琼,商建,尹红刚,等,2025. FY-3 降水测量雷达外定标试验场的大气衰减特性分析[J]. 气象, 51(2):221-228. Wu Q, Shang J, Yin H G, et al, 2025. Analysis of atmospheric attenuation characteristics of FY-3 precipitation measurement radar external calibration test field[J]. Meteor Mon, 51(2):221-228(in Chinese).

# FY-3 降水测量雷达外定标试验场的大气衰减特性分析\*

吴 琼<sup>1,2,3</sup> 商 建<sup>1,2,3</sup> 尹红刚<sup>1,2,3</sup> 陈 林<sup>1,2,3</sup> 谷松岩<sup>1,2,3</sup>

1 国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心),北京 100081

2 许健民气象卫星创新中心,北京 100081

3 中国气象局遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室,北京 100081

**提 要:** 利用 2023 年锡林浩特国家高空气象观测站的全年探空资料,分析了风云三号降水测量雷达外定标试验场的大气衰减特性。通过挖掘大气可降水总量和路径积分衰减的关系,建立了一种快速估算大气衰减量的方法。结果表明,氧气衰减的年变化很小,水汽衰减则具有明显的季节特征。此外,水汽衰减和水汽总量密切相关,Ku 波段的水汽衰减在数值上约为水汽总量的 1/250,Ka 波段的水汽衰减约为 Ku 波段的 4 倍。并且,基于快速方法估算的衰减和常规方法计算的衰减相比,两者之间具有很好的一致性,表明快速方法合理可行。大气衰减的计算和分析可以为降水测量雷达外定标试验的顺利开展奠定基础。

**关键词:** 探空,降水测量雷达,外定标,大气衰减,大气可降水总量

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.102601

## Analysis of Atmospheric Attenuation Characteristics of FY-3 Precipitation Measurement Radar External Calibration Test Field

WU Qiong<sup>1,2,3</sup> SHANG Jian<sup>1,2,3</sup> YIN Honggang<sup>1,2,3</sup> CHEN Lin<sup>1,2,3</sup> GU Songyan<sup>1,2,3</sup>

1 National Satellite Meteorological Centre (National Centre for Space Weather), Beijing 100081

2 Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite (FYSIC), Beijing 100081

3 Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, CMA, Beijing 100081

**Abstract:** The atmospheric attenuation characteristics of the FY-3 precipitation measurement radar external calibration test field were analyzed based on sounding data from the National High Altitude Meteorological Observatory in Xilinhot throughout 2023. A quick method for estimating atmospheric attenuation has been established by exploring the relationship between total precipitation water and attenuation. The results indicate that the annual variation of oxygen attenuation is very small, while water vapor attenuation has obvious seasonal characteristics. In addition, the attenuation of water vapor is closely related to the total amount of water vapor. The attenuation of water vapor in Ku-band is numerically equivalent to approximately 1/250 of the total amount of water vapor, and the attenuation of water vapor in Ka-band is approximately 4 times that of the Ku-band. Moreover, there is good consistency between the attenuation estimated by the quick method and the attenuation calculated by the normal method, which indicates that the

\* 国家重点研发计划(2023YFB3905900、2023YFB3905903)、中国气象局青年创新团队项目(CMA2023QN12)和中国气象局创新发展专项(CXFZ2024J062)共同资助

2024 年 4 月 8 日收稿; 2024 年 10 月 8 日收修定稿

第一作者:吴琼,主要从事星载主动微波降水反演的相关研究. E-mail:wuqiong@cma.gov.cn

通讯作者:尹红刚,主要从事星载微波遥感技术研究. E-mail:yinhg@cma.gov.cn

quick method is reasonable and feasible. The calculation and analysis of atmospheric attenuation could lay a foundation for the smooth implementation of precipitation radar external calibration experiments.

**Key words:** sounding, precipitation measurement radar, external calibration, atmospheric attenuation, total precipitation water

## 引 言

风云三号 G 星(FY-3G)是我国首颗以测量降水为主要目的卫星,于 2023 年 4 月 16 日成功发射。FY-3G 上携带的主载荷——Ku(13.35 GHz)和 Ka(35.5 GHz)双频降水测量雷达使我国首次实现星载主动降水观测(Zhang et al, 2023; 谷松岩等, 2022; 2023; 尹红刚等, 2017)。降水测量雷达对雷达反射率因子的测量精度指标要求为优于 1 dB。为了评估星上雷达的测量精度,需要对其进行定标(袁梅等, 2024)。雷达定标是载荷系统中最重要的工作之一,它包括内定标和外定标两个部分。雷达内定标主要是通过内定标回路监测雷达接收机的性能,确定雷达接收功率与输出量之间的关系;除了需要内定标外,还需要监测雷达整个系统的性能,需要使用已知的外部参照目标进行绝对定标(陈洪滨等, 2020)。

降水测量雷达接收的回波强度,除了取决于海面/降水等目标的特性以及离开雷达的距离之外,还取决于雷达自身的发射功率、天线增益/指向、脉冲波形等多个参数。因此,为了对雷达的接收功率进行绝对定标,必须对涉及到的每个雷达参数进行准确的测量。

目前,星载雷达外定标的实现方法可分为无源定标方法和有源定标方法。无源定标方法包括无源点目标法和地面分布式目标法。无源点目标法使用标准参考反射器进行定标,需要反射器尺寸在 10 m 以上,难以加工。地面分布式目标法利用地面大面积的散射稳定目标进行定标,例如热带雨林、海冰等。国内外研究表明使用亚马孙雨林得到的星载微波散射计的定标精度可达到 1 dB 左右(Madsen and Long, 2016),但热带雨林的向后散射与波束入射角相关且随季节变化。因此,这些无源定标方法无法满足降水测量雷达的外定标要求。有源定标方法使用主动雷达定标器,可以对原始雷达信号进行时延、频移等处理,具有准确度高、天线波束宽、雷达散射

截面大、结构紧凑等优点,并且能够获得上述雷达参数的估计(Takahashi et al, 2003; Masaki et al, 2022)。因此,利用主动雷达定标器是 FY-3 主动微波载荷在轨外定标的必要手段。

外定标试验场为主动雷达定标器提供安装、测试和运行控制的场地,通过基础的供电和通信设施保障主动雷达定标器及配套设备长期稳定的电力供应和观测数据传输。FY-3 降水测量雷达采用跨轨电扫描体制,为满足测量天线峰值旁瓣的要求,同时解决测量幅宽和采样间隔之间的矛盾,需要布置多台主动雷达定标器。其中 1 台定标器固定布置,移动定标器则根据卫星每次过境的位置,在固定定标器周边调整布设,因而需要外定标试验场有方圆数千米的开阔空旷区域。

主动雷达定标器自身测量精度需要比星载雷达后向散射的测量精度高一倍才能满足在轨高精度外定标的要求。因此,主动雷达定标器需要通过内外校准保持自身的高度稳定。另外,由于星载雷达在外定标过程中既接收主动雷达定标器的转发信号又接收定标器所在位置的背景回波,所以需要在地表的雷达散射有严格的限制,从而抑制地面回波的影响,才能满足外定标精度的要求。对主动雷达定标器的时延转发工作模式而言,地表的归一化后向散射截面需要小于  $-5$  dB。这意味着 FY-3 主动载荷的外定标试验场地需远离城市区域。

此外,外定标试验场的地形变化需比较平缓,以避免地面后向散射突然增大,同时仰角  $10^\circ$  以上应无地形、建筑物和植被等的遮挡以保证主动雷达定标器信号的正常收发,且在定标器工作频率范围内无明显的电磁干扰(Wilson et al, 2010)。在气候条件方面,干旱少雨的地点为最佳选择,可以降低大气对电磁波衰减的影响。

综合考虑降水测量雷达对外定标试验场的需求、试验场地选址原则以及实地条件后确定内蒙古锡林浩特国家气候观象台为降水测量雷达外定标的固定站场地。

## 1 锡林浩特外定标场大气衰减特性分析

外定标期间,为减少衰减的影响,会尽可能选择晴朗少云的天气,因此外定标的大气衰减主要考虑氧气衰减和水汽衰减两种。衰减的大小和温度、气压、水汽密度以及雷达频点等有关(施红等,2022;王婉等,2023;程鹏等,2021)。探空是目前准确获取温湿压等气象参数的最有效途径(姚乐宝等,2024)。内蒙古锡林浩特国家气候观测台位于 44.1417°N、116.3315°E,海拔高度 1104.3 m。离它最近的探空站为锡林浩特国家高空气象观测站,该站也是全球气候观测系统高空基准观测网 GRUAN(GCOS Reference Upper Air Network)迄今为止在亚洲中东部地区的唯一站点。

探空数据选用美国国家气候数据中心发布的全球站点无线电探空数据集(IGRA)。截止到 2023 年,这套数据集包含了全球 2800 多个无线电探空和导航气球观测的多层次、多要素、长时间探空资料,最早的历史资料可以追溯到 1905 年。这套资料经过了质量控制处理,并提供免费的在线下载和技术支持,是目前全球范围内时空密度最高、资料最完整的一套高质量探空资料数据集(陈哲等,2013)。数据下载地址是: <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-balloon/integrated-global-radiosonde-archive>。

$$k_{\text{O}_2}(f) = 1.1 \times 10^{-2} f^2 \left( \frac{p}{1013} \right) \left( \frac{300}{T} \right)^2 \gamma \left[ \frac{1}{(f-f_0)^2 + \gamma^2} + \frac{1}{f^2 + \gamma^2} \right] \quad (3)$$

$$k_{\text{H}_2\text{O}}(f) = 2f^2 \rho_v \left( \frac{300}{T} \right)^{3/2} \gamma_l \left[ \left( \frac{300}{T} \right) e^{-\frac{644}{T}} \frac{1}{(494.4 - f^2)^2 + 4f^2 \gamma_l^2} + 1.2 \times 10^{-6} \right] \quad (4)$$

式中:  $p$  代表气压(单位: hPa),  $T$  代表温度(单位: K),  $f$  表示雷达频率(单位: GHz),  $\rho_v$  代表水汽密度(单位:  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $f_0$  是常数(60 GHz), 其中, 参数  $\gamma_l$  和  $\gamma$  计算如下:

$$\gamma_l = 2.85 \left( \frac{p}{1013} \right) \left( \frac{300}{T} \right)^{0.626} \times \left( 1 + 0.018 \frac{\rho_v T}{p} \right) \quad (5)$$

$$\gamma = \gamma_0 \left( \frac{p}{1013} \right) \left( \frac{300}{T} \right)^{0.85} \quad (6)$$

式(6)中  $\gamma_0$  是气压  $p$  的函数:

$$\gamma_0 = \begin{cases} 0.59 & p > 333 \text{ hPa} \\ 0.59[1 + 3.1 \times 10^{-3}(333 - p)] & 25 \text{ hPa} \leq p \leq 333 \text{ hPa} \\ 1.18 & p < 25 \text{ hPa} \end{cases} \quad (7)$$

锡林浩特国家高空气象观测站是 IGRA 所包含的 235 个中国站点里资料覆盖长度最长的站点之一(从 1954 年至今)。但是,早期的资料存在探测的温湿特性层数偏少、时间不连续以及探测精度不高等问题,直到 2022 年 7 月,随着探空设备的升级换代,特性层数开始明显增多,实现了从几层或者十几层到一两百层的跨越,并且资料稳定连续,同时该站还是 IGRA 全球约 800 个可以提供近实时数据的站点之一。探空站每天释放两次常规探空,探空时间固定在 00 时和 12 时(世界时,下同)。

### 1.1 衰减计算方法

雷达信号在传输过程中的双程路径积分衰减(PIA)(单位: dB)定义如下:

$$\text{PIA} = \sum_{i=1}^n 2k_i L \quad (1)$$

式中:  $k_i$  表示第  $i$  层的衰减系数(单位:  $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$ ), 由水汽衰减系数  $k_{\text{H}_2\text{O}}$  和氧气衰减系数  $k_{\text{O}_2}$  两部分组成:

$$k = k_{\text{H}_2\text{O}} + k_{\text{O}_2} \quad (2)$$

$L$  表示相邻两层之间的距离(单位: km)。  $k_{\text{O}_2}$  和  $k_{\text{H}_2\text{O}}$  的计算公式如下(Waters, 1976; Ulaby et al, 1981; Meneghini and Kozu, 1990; Iguchi et al, 2018; 张培昌和王振会, 1995):

### 1.2 衰减特性分析

选择 2022 年 7 月至 2023 年 12 月的探空数据,并剔除探空层数少于 65 层、地面相对湿度大于 95% 以及地面到 500 hPa 的水汽总量为缺测值的情况。先利用下式计算水汽密度:

$$\rho_v = e_s \frac{18}{8.31T} \quad (8)$$

式中:  $e_s$  表示水汽压(单位: Pa)。再利用式(1)~式(7)分别计算 Ku 和 Ka 波段雷达的氧气衰减、水汽衰减以及总衰减。2023 年 00 时 PIA 的变化情况如图 1 所示。

从图中可以看出,不管是 Ku 波段还是 Ka 波段,氧气衰减在不同季节的变化很小, Ku 波段氧气衰减均值仅为 0.0705 dB, Ka 波段氧气衰减均值为

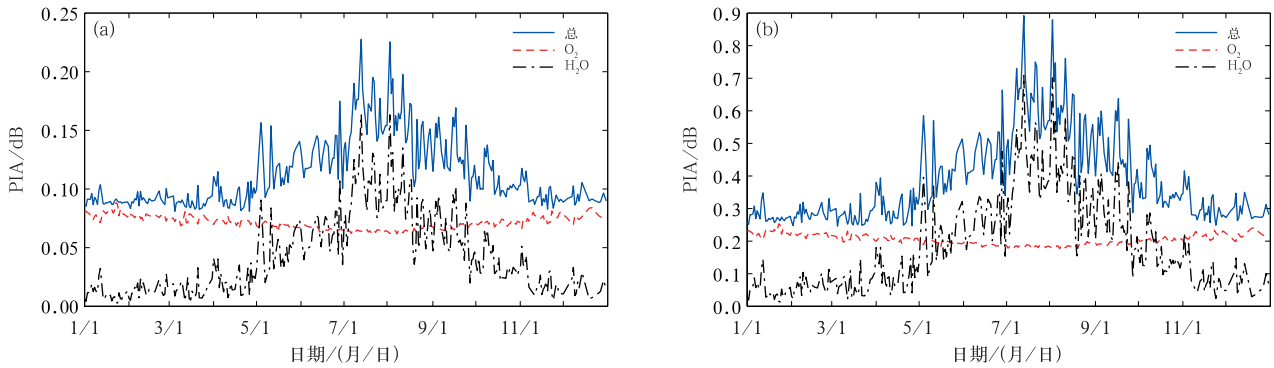


图 1 2023 年(a)Ku 波段和(b)Ka 波段的大气衰减变化

Fig. 1 Atmospheric attenuation changes of (a) Ku-band and (b) Ka-band in 2023

0.2020 dB。和氧气衰减不同,水汽衰减具有明显的季节特征,其中,5—9 月的水汽衰减大部分时候大于氧气衰减,尤其是 7、8 两个月份,Ka 波段在这两个季节的最大值甚至可以达到 0.7 dB 以上。相比较而言,锡林浩特的冬、春季(10—12 月以及 1—4 月)气候干燥,水汽稀薄,水汽衰减小于氧气衰减,有时甚至不足氧气衰减的一半,双程路径积分总衰减仅为 0.1 dB(Ku)和 0.3 dB(Ka)左右。

大气参数具有一定的日变化。图 2 是 2023 年全年 12 时 Ka 波段的大气衰减以及对应 00 时的对比。从图中可以看出,一天中 00 时和 12 时的水汽衰减具有一些差异,但是整体随季节的变化趋势一致。由此看来,从衰减的角度,冬、春季是开展外定标的最适宜季节。

## 2 快速估算大气衰减方法

### 2.1 估算方法

水汽衰减和水汽密度有关,水汽密度经过积分可以得到水汽总量(吴琼等,2020)。水汽总量和水汽密度之间的计算公式如下(Wentz,1997):

$$TPW = 10^{-3} \sum_{I=0}^{N-1} (h_{I+1} - h_I) \times \left( \frac{1}{4} \rho_{v,I} + \frac{1}{4} \rho_{v,I+1} + \frac{1}{2} \sqrt{\rho_{v,I} \rho_{v,I+1}} \right) \quad (9)$$

式中:TPW 表示水汽柱总量(单位:mm), $h$  表示高度(单位:m), $\rho_v$  表示水汽密度(单位: $g \cdot m^{-3}$ )。图 3 是 Ku 波段的水汽衰减  $PIA_{Ku,H_2O}$  和 TPW 之间的关系(包括 00 时和 12 时)。从图中可以看出,这两条曲线具有很好的吻合度。并且,经过线性拟合,

TPW 近似等于  $PIA_{Ku,H_2O}$  的 250 倍。

图 4 是 Ka 波段水汽衰减  $PIA_{Ka,H_2O}$  和 Ku 波段水汽衰减  $PIA_{Ku,H_2O}$  之间的关系。经过线性拟合, $PIA_{Ka,H_2O}$  近似等于  $PIA_{Ku,H_2O}$  的 4 倍。因此,在已知 TPW 的前提下,可以快速估算 Ku 和 Ka 波段的 PIA。具体步骤如下:先提取或计算水汽总量 TPW,再利用式(10)~式(13)计算 PIA。

$$PIA_{Ku,H_2O} = TPW/250 \quad (10)$$

$$PIA_{Ka,H_2O} = PIA_{Ku,H_2O} \times 4 \quad (11)$$

$$PIA_{Ka} = PIA_{Ka,H_2O} + 0.2020 \quad (12)$$

$$PIA_{Ku} = PIA_{Ku,H_2O} + 0.0705 \quad (13)$$

### 2.2 检验验证

选择 2022 年 7—12 月的数据作为检验数据,先按照同样的质量控制方法对数据进行筛选,再利用快速方法分别计算 Ku 和 Ka 波段的水汽衰减和总衰减,并和常规方法进行比较。结果如图 5 和图 6 所示。

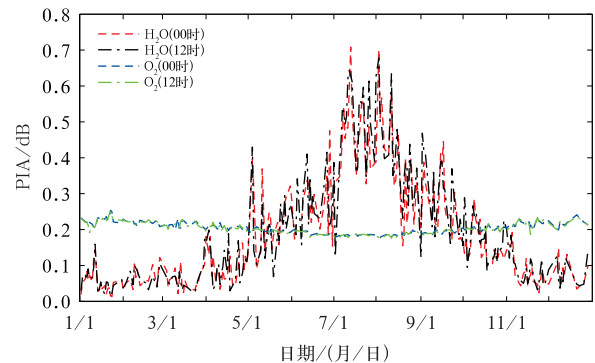


图 2 Ka 波段 2023 年 12 时和 00 时的大气衰减对比

Fig. 2 Atmospheric attenuation changes of Ka-band at 00:00 UTC and 12:00 UTC in 2023

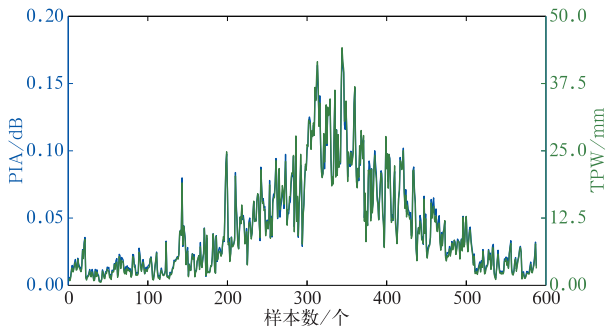


图 3 2023 年 Ku 波段水汽衰减(蓝线)和水汽总量(绿线)之间的关系

Fig. 3 Relationship between  $PIA_{Ku,H_2O}$  (blue line) and TPW (green line) in 2023

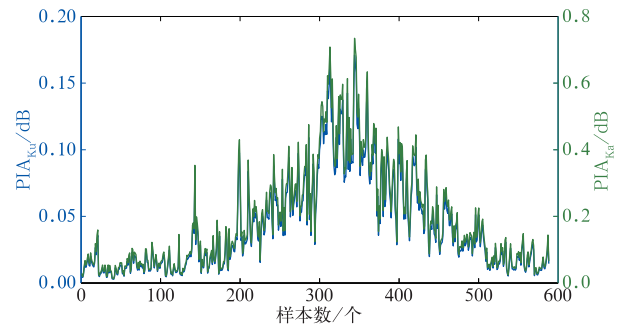


图 4 2023 年 Ku 波段水汽衰减(蓝线)和 Ka 波段水汽衰减(绿线)之间的关系

Fig. 4 Relationship between  $PIA_{Ku,H_2O}$  (blue line) and  $PIA_{Ka,H_2O}$  (green line) in 2023

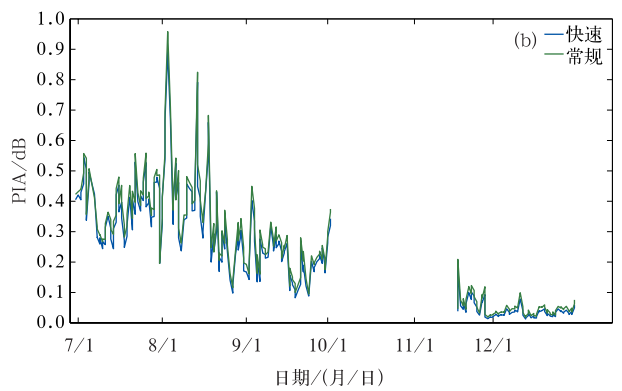
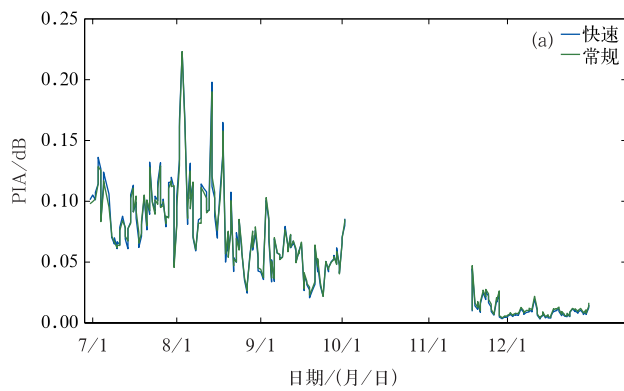


图 5 2022 年快速方法和常规方法计算的(a)Ku 波段,(b)Ka 波段水汽衰减对比

Fig. 5 Comparison of water vapor attenuation calculated by quick and normal methods in 2022

(a) Ku-band, (b) Ka-band

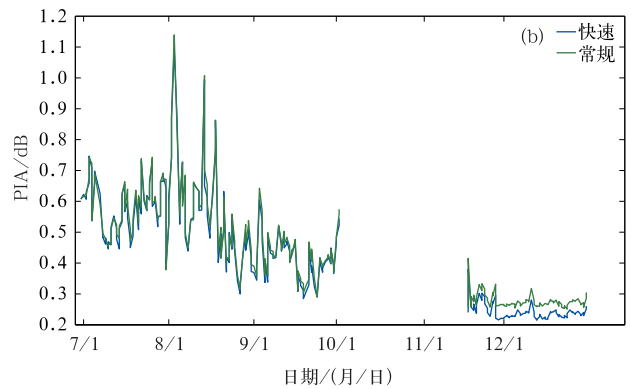
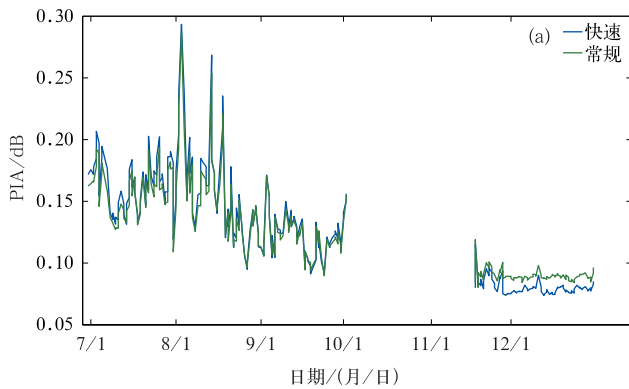


图 6 2022 年快速方法和常规方法计算的(a)Ku 波段,(b)Ka 波段总衰减对比

Fig. 6 Comparison of total attenuation calculated by quick and normal methods in 2022

(a) Ku-band, (b) Ka-band

从图 5、图 6 中可以看出,2022 年的探空资料从 10 月开始到 11 月中旬,有一段时间的缺失。使用快速方法计算的水汽衰减和常规方法相比(图 5),

两者差异很小,几乎可以忽略不计。但是,快速方法计算的总衰减和常规方法相比(图 6),还是显示出了一些差异,尤其是在 11 月中旬以后。这主要是因

为快速方法估算的氧气取的是 2023 年全年的平均值,而氧气衰减虽然变化很小,但是和温度负相关,表现为冬季大,夏季小。因此,当氧气衰减使用年平均值估算的时候,会出现类似图 6a 中夏季偏大,冬季偏小的现象。尽管如此,氧气估算误差仅小于 0.05 dB,快速方法计算总衰减是合理可行的。

需要指出的是,IGRA 也计算并提供了水汽总量。基于该水汽总量估算的衰减如图 7 所示。从图 7a 中可以看出,夏季估算的结果略优于图 6a。主要原因在于 IGRA 给出的水汽总量仅覆盖了从地表到 500 hPa 高度层(Durre et al,2009;Ross and Elliott,2001),小于整个探空路径的水汽总量,导致估算的水汽衰减偏小,同时因为氧气在夏季估算偏

大,因此在综合因素下,基于 IGRA 估算的  $PIA_{Ku}$  在夏季和常规方法更一致,冬季则因为气候干燥,500 hPa 以上更是水汽稀薄,因此在冬季估算的衰减和图 6a 相近。 $PIA_{Ka}$  则因为 Ka 波段夏季基于整层水汽积分估算的衰减和真值已经非常接近,当水汽总量变小以后(图 7b),估算的水汽衰减也随之变小,从而导致 Ka 波段在冬季估算的衰减和图 6b 相近,在夏季估算的结果则略差于图 6b。统计的精度指标如表 1 所示,估算的大气衰减和常规方法计算的大气衰减,相关系数均大于 0.99。整体而言,不管是利用整层的水汽积分还是利用 500 hPa 高度层以下的水汽积分,估算的衰减量误差都较小。

表 1 快速估算大气衰减方法的精度指标

Table 1 Accuracy indices for quick estimation of atmospheric attenuation methods

指标	Ku 波段		Ka 波段	
	整层水汽总量	500 hPa 水汽总量	整层水汽总量	500 hPa 水汽总量
偏差/dB	0.0050	-0.0014	-0.0113	-0.0371
绝对偏差/dB	0.0057	0.0032	0.0155	0.0372
相对偏差/%	3.488	-0.991	-2.143	-7.035
相关系数	0.9915	0.9907	0.9930	0.9919
均方根误差/dB	0.0936	0.0556	0.2491	0.5463

### 3 结论与讨论

外定标试验是卫星在轨测试的重要环节,可以

确定降水测量雷达的定量观测精度,为遥感仪器最终的性能评价和下一阶段的定量应用奠定坚实的基础。电磁衰减是影响定标精度的重要因素之一。利用 IGRA 提供的 2023 年全年的无线电探空数据,对

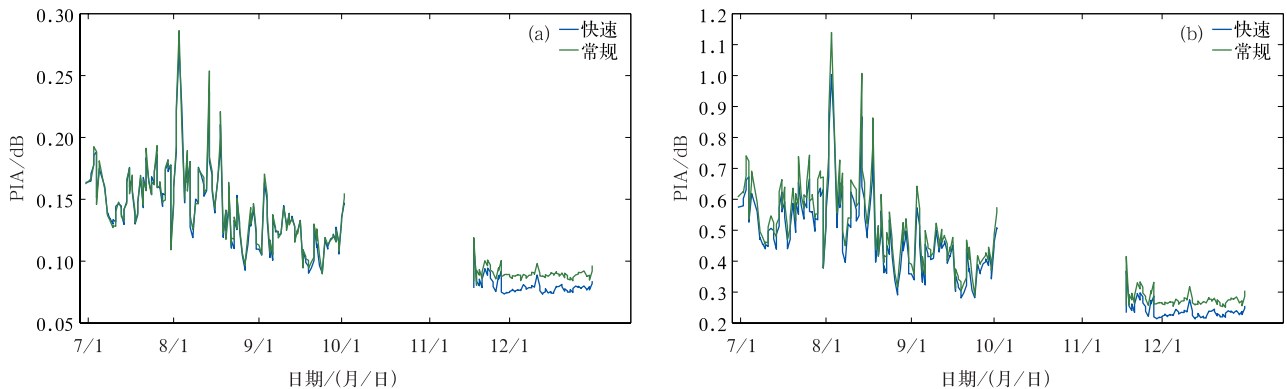


图 7 2022 年基于 IGRA 水汽总量利用快速方法和常规方法计算的 (a)Ku 波段,(b)Ka 波段总衰减对比

Fig. 7 Comparison of total attenuation based on IGRA total water vapor by quick and normal methods in 2022

(a) Ku-band, (b) Ka-band

FY-3星载降水测量雷达外定标场地——锡林浩特国家气候观象台的大气衰减特性进行了分析,并发展了一种可以快速准确估算大气衰减的方法。形成的结论与讨论如下:

(1)降水测量雷达外定标试验场地的冬、春季(10—12月以及1—4月)气候干燥,水汽稀薄,可以减少衰减对外定标的影响,适合开展外定标试验。

(2)水汽总量和水汽衰减之间存在一定的倍数关系并且氧气衰减年变化特征比较平稳,因此,在已知水汽总量的基础上,可以快速估算Ku和Ka波段的总衰减。结果表明,基于水汽总量估算的衰减和常规方法计算的衰减非常一致。

(3)基于大气水汽总量估算晴空条件下的Ku和Ka波段路径积分总衰减的方法是普适的,但是不同探空站点的温度、气压以及水汽特征不同,导致氧气衰减的平均值以及水汽总量和水汽衰减之间的倍数关系存在一些差异。比如,2023年北京南郊观象台Ku波段的氧气衰减均值为0.0829 dB,Ka波段为0.2376 dB,水汽总量近似等于Ku波段水汽衰减的220倍,Ka波段水汽衰减的55倍。

(4)业务探空一天只有两次观测,部分情况下无法满足卫星过境时地面同步观测的时间要求,相比之下,地基大气廓线微波辐射计可以跟踪卫星,并可以在很短时间内获得星地连线上大气的参数。因此,地基微波辐射计可以作为传统探空资料的有利补充。

## 参考文献

陈洪滨,尹红刚,何文英,2020.星载主动微波遥感云和降水技术与应用[M].北京:科学出版社:208. Chen H B, Yin H G, He W Y, 2020. Spaceborne Active Microwave Remote Sensing of Cloud and Precipitation Technology and Applications[M]. Beijing: Science Press:208(in Chinese).

陈哲,高杰,杨旭,2013.IGRA全球站点探空数据集及其资料质量状况分析[J].气象与环境学报,29(5):106-111. Chen Z, Gao J, Yang X, 2013. Introduction of IGRA dataset and analysis of its data quality[J]. J Meteor Environ, 29(5):106-111(in Chinese).

程鹏,罗汉,刘琴,等,2021.基于地基GPS的祁连山大气可降水量特征[J].气象,47(9):1135-1145. Cheng P, Luo H, Liu Q, et al, 2021. Characteristics of precipitable water vapor in Qilian Mountains based on ground-based GPS data[J]. Meteor Mon, 47(9):1135-1145(in Chinese).

谷松岩,卢乃锰,吴琼,等,2022.FY-3气象卫星降水探测能力分析与展望[J].海洋气象学报,42(2):1-10. Gu S Y, Lu N M, Wu Q,

et al, 2022. Analysis and prospect of precipitation detection capability of FY-3 meteorological satellites[J]. J Mar Meteor, 42(2):1-10(in Chinese).

谷松岩,张鹏,陈林,等,2023.中国首颗降水测量卫星(风云三号G星)探测能力概述与展望[J].暴雨灾害,42(5):489-498. Gu S Y, Zhang P, Chen L, et al, 2023. Overview and prospect of the detection capability of China's first precipitation measurement satellite FY-3G[J]. Torr Rain Dis, 42(5):489-498(in Chinese).

施红,顾松强,黄兴友,等,2023.上海浦东X波段双线偏振雷达衰减订正效果分析[J].气象,49(4):487-494. Shi H, Gu S Q, Huang X Y, et al, 2023. Analysis of attenuation correction to an X-band dual-polarization Doppler weather radar at Pudong, Shanghai[J]. Meteor Mon, 49(4):487-494(in Chinese).

王婉,聂皓浩,雷恒池,等,2023.基于183 GHz机载微波辐射计探测水汽和云中液态水反演算法研究[J].气象,49(5):542-550. Wang W, Nie H H, Lei H C, et al, 2023. Retrieval method of precipitation water vapor and cloud liquid water path based on 183 GHz airborne microwave radiometer[J]. Meteor Mon, 49(5):542-550(in Chinese).

吴琼,窦芳丽,郭杨,等,2020.FY-3C微波成像仪海上大气可降水产品质量检验[J].气象,46(1):73-79. Wu Q, Dou F L, Guo Y, et al, 2020. Validation of FY-3C MWRI total precipitable water products[J]. Meteor Mon, 46(1):73-79(in Chinese).

姚乐宝,沈丹,孟雪峰,等,2024.内蒙古区域数值预报对探空和地面观测资料的敏感性试验研究[J].气象,50(2):144-158. Yao L B, Shen D, Meng X F, et al, 2024. Experimental study on regional numerical forecast sensitivity to radiosonde and surface observation in Inner Mongolia[J]. Meteor Mon, 50(2):144-158(in Chinese).

尹红刚,商建,吴琼,等,2017.风云三号降水测量雷达技术性能分析[J].气象科技,45(5):795-803,824. Yin H G, Shang J, Wu Q, et al, 2017. Technical performance analysis of Fengyun-3 precipitation measurement radar[J]. Meteorol Sci Technol, 45(5):795-803,824(in Chinese).

袁梅,尹红刚,商建,等,2024.FY-3G降水测量雷达海洋定标精度检验与评估[J].应用气象学报,35(5):526-537. Yuan M, Yin H G, Shang J, et al, 2024. Validation and evaluation of ocean calibration accuracy of FY-3G precipitation measurement radar[J]. J Appl Meteor Sci, 35(5):526-537(in Chinese).

张培昌,王振会,1995.大气微波遥感基础[M].北京:气象出版社:412. Zhang P C, Wang Z H, 1995. Fundamentals of Atmospheric Microwave Remote Sensing[M]. Beijing: China Meteorological Press:412(in Chinese).

Durre I, Williams Jr C N, Yin X G, et al, 2009. Radiosonde-based trends in precipitable water over the Northern Hemisphere: an update[J]. J Geophys Res Atmos, 114(D5):D05112.

Iguchi T, Seto S, Meneghini R, 2018. GPM/DPR level-2 algorithm theoretical basis document[Z]. 127 pp.

Madsen N M, Long D G, 2016. Calibration and validation of the

- RapidScat scatterometer using tropical rainforests [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 54(5):2846-2854.
- Masaki T, Iguchi T, Kanemaru K, et al, 2022. Calibration of the dual-frequency precipitation radar onboard the global precipitation measurement core observatory [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 60:5100116.
- Meneghini R, Kozi T, 1990. *Spaceborne Weather Radar* [M]. Boston: Artech House:199.
- Ross R J, Elliott W P, 2001. Radiosonde-based Northern Hemisphere tropospheric water vapor trends [J]. *J Climate*, 14(7):1602-1612.
- Takahashi N, Kuroiwa H, Kawanishi T, 2003. Four-year result of external calibration for precipitation radar (PR) of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 41(10):2398-2403.
- Ulaby F T, Moore R K, Fung A K, 1981. *Microwave Remote Sensing: Active and Passive* [M]. Vol I. Norwood, MA: Artech House:456.
- Waters J W, 1976. Absorption and emission by atmospheric gases [J]. *Methods Exp Phys*, 12:142-176.
- Wentz F J, 1997. A well-calibrated ocean algorithm for special sensor microwave/imager [J]. *J Geophys Res*, 102(C4):8703-8718.
- Wilson J J W, Anderson C, Baker M A, et al, 2010. Radiometric calibration of the advanced wind scatterometer radar ASCAT carried onboard the METOP-A satellite [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 48(8):3236-3255.
- Zhang P, Gu S Y, Chen L, et al, 2023. FY-3G satellite instruments and precipitation products; first report of China's Fengyun rainfall mission in-orbit [J]. *J Remote Sens*, 3:0097.

(本文责编:俞卫平)