

风云三号（03 批）气象卫星地面应用系统工程

G 星降水测量雷达

KuR 产品使用说明

（V0.0.0）

编写： 吴琼

校对： 吴琼

会签： 寿亦萱

审核： 陈林

批准： 谷松岩

国家卫星气象中心

2023 年 9 月

文档修改记录

版本号	日期	修改者	修 改 描 述
V0.0.0	2023 年 7 月 12 日	苏豆豆	初始版本
	2023 年 7 月 13 日	吴琼	修改和进一步完善版本
	2023 年 10 月 9 日	吴琼	增加发布数据的统计结果
	2023 年 11 月 2 日	苏豆豆	进一步完善版本

目 录

1	产品定义.....	1
2	产品规格和格式.....	1
2.1	产品规格.....	1
2.2	产品文件.....	1
2.3	产品科学数据集	2
2.4	数据维数介绍.....	5
2.5	数据集介绍	5
3	产品算法原理和处理流程	13
3.1	算法基本原理.....	13
3.2	处理流程.....	18
4	产品示例.....	20
5	产品合理性评估	23
5.1	产品合理性评估方法和数据	23
5.2	产品合理性评估结果	23
6	产品使用说明.....	25
6.1	产品使用说明.....	25
6.2	应用限制条件.....	25
7	产品制作及技术支持.....	25
7.1	产品技术责任人	25
7.2	文档引用方式和建议引用文献	25

1 产品定义

风云三号 G 星是我国首颗、也是国际上继 1997 年发射的 TRMM、2014 年发射的 GPM 以及 2018 年发射的降水立方星 RainCube 以后**第四颗降水测量专用气象卫星**，于 2023 年 4 月 16 日在酒泉卫星发射中心成功发射。风云三号 G 星上携带了降水测量雷达、降水型微波成像仪、降水型中分辨率光谱成像仪和全球导航卫星掩星探测器 4 台业务载荷以及高精度定标器和短波红外偏振多角度成像仪 2 台试验载荷。其中，降水测量雷达（PMR）是降水测量卫星上的主载荷，包括 **Ku 和 Ka 两部雷达**，是我国首次实现星载主动的降水探测，其探测优势在于可以获得降水系统内部的三维结构信息。两部雷达采用全匹配的扫描模式，**扫描角是正负 20 度**，星下点空间分辨率 5Km，垂直分辨率 250m，Ku 雷达的设计灵敏度是 18dBZ，Ka 雷达的设计灵敏度是 12dBZ。

FY-3G 降水测量雷达的二级产品按照雷达以及轨道进行划分，分为 **Ku 雷达升轨、Ku 雷达降轨、Ka 雷达升轨、Ka 雷达降轨以及 DPR 升轨和 DPR 降轨**。二级产品里包含了亮带检测、降水分类，三维滴谱廓线、三维降水率廓线以及三维等效雷达反射率因子廓线等。轨道产品未做投影处理，为原始轨道分辨率。

表 1-1 FY-3G PMR Ku 雷达产品列表

序号	产品名称	业务/试验
1	FY-3G PMR Ku雷达L2轨道产品	业务

2 产品规格和格式

2.1产品规格

表 2-1 FY-3G PMR Ku 雷达产品规格列表

产品名称	投影方式	覆盖范围	空间分辨率	更新频次
FY-3G PMR Ku 雷达 L2 轨道产品	无	±52°	水平：星下点 5km 垂直：250m	轨道

2.2产品文件

表 2-2 FY-3G PMR Ku 雷达产品数据文件列表

序号	文件名称	格式	周期	产品描述	关键词
1	FY3G_PMR--_ORBA_L2_KuR_MLT_ NUL_YYYYMMDD_HHmm_5000M_	HDF	轨道	FY-3G PMR Ku 雷达 L2 轨道升轨产品	升轨

序号	文件名称	格式	周期	产品描述	关键词
	V0.HDF				
2	FY3G_PMR--_ORBD_L2_KuR_MLT_NUL_YYYYMMDD_HHmm_5000M_V0.HDF	HDF	轨道	FY-3G PMR Ku 雷达 L2 轨道降轨产品	降轨

2.3 产品科学数据集

表 2-3 FY-3G PMR Ku 雷达产品科学数据集

科学数据集				
序号	模块名	数据名	数据英文描述	数据中文描述
1	Geo_Fields 地理信息模块	Latitude	Latitude	纬度
2		Longitude	Longitude	经度
3		DayOfMonth	Day of Month	当月日计数
4		DayOfYear	Day of Year	当年日计数
5		Hour	Hour	小时计数
6		MilliSecond	MilliSecond	毫秒
7		Minute	Minute	分钟
8		Month	Month	月份
9		Second	Second	秒
10		SecondOfDay	Second of Day	当天的秒数
11		Year	Year	年
12		SatFlag	Flag of satellite flight maneuvering status.	卫星平台飞行机动状态标识
13	CSF 分类模块	binBBBottom	Range bin number for the bottom of bright band	亮带底距离库
14		binBBPeak	Range bin number for the peak of bright band	亮带峰值距离库
15		binBBTop	Range bin number for the top of bright band	亮带顶距离库
16		flagBB	Flag of bright band	亮带标识
17		flagHeavyIcePrecip	Flag of heavy ice precipitation	强的冰态降水标识
18		flagShallowRain	Flag of shallow rain	浅雨标识
19		heightBB	Height of bright band	亮带高度
20		typePrecip	Precipitation type	降水类型
21		widthBB	Width of bright band	亮带宽度

22	DSD 滴谱模块	phase	Phase state of the precipitation	降水相态
23	PRE 数据预处理模块	height	Height	海拔高度
24		binClutterFreeBottom	Range bin number for clutter free bottom	无杂波底距离库
25		binRealSurface	Range bin number for real surface	实际地表距离库
26		binStormTop	Range bin number for the storm top	风暴顶距离库
27		flagPrecip	Flag of precipitation	降水标识
28		flagSigmaZeroSaturation	Flag of sigma Zero Saturation	回波功率饱和标识
29		heightStormTop	Height of storm top	风暴顶高度
30		landSurfaceType	Land surface type	地表类型
31		localZenithAngle	Local zenith angle of each ray	天顶角
32		ellipsoidBinOffset	Distance between the ellipsoid and a center range bin of binEllipsoid	地球椭球表面到距离 单元 binEllipsoid 中心 的距离
33		sigmaZeroMeasured	Surface back scattering cross section without attenuation correction	测量的地表后向散射 截面
34		snRationAtRealSurface	Signal/Noise ratio at real surface range bin	实际地表距离库信噪 比
35		zFactorMeasured	Vertical profile of reflectivity factor without attenuation correction	测量的雷达反射率因 子
36	VER 环境参数模块	binZeroDeg	Range bin number with 0 degrees C level	0°C 距离库
37		attenuationNP	Vertical profile of attenuation by non-precipitation particles	非降水粒子衰减系数
38		piaNP	Path integrated attenuation caused by non-precipitation particles	非降水粒子路径积分 衰减

39		sigmaZeroNPCorrected	Surface backscattering cross section with attenuation correction only for non-precipitation particles	非降水粒子衰减订正后的地表后向散射截面
40		heightZeroDeg	Height of freezing level	0°C 高度
41	SLV 反演模块	paramDSD	Parameters of the drop size distribution	滴谱分布参数
42		piaFinal	The final estimates of path integrated attenuation caused by precipitation particles	降水粒子路径积分衰减
43		sigmaZeroCorrected	Surface backscatter cross section with attenuation correction	衰减订正后的地表后向散射截面
44		zFactorCorrected	Vertical profile of reflectivity factor with attenuation correction	衰减订正后的雷达反射率因子
45		zFactorCorrectedESurface	Reflectivity factor with attenuation correction at estimated surface	估计地表衰减订正后的雷达反射率因子
46		zFactorCorrectedNearSurface	Reflectivity factor with attenuation correction at near surface	近地表衰减订正后的雷达反射率因子
47		paramNUBF	NUBF parameter	非均匀波束订正参数
48		precipRate	Precipitation rate	降水率廓线
49		precipRateNearSurface	Precipitation rate for the near surface	近地表降水率
50		precipRateESurface	Precipitation rate for the estimated surface.	估计地表降水率
51		phaseNearSurface	Phase state of the precipitation at the Near-surface level	近地表降水相态
52		phaseESurface	Phase state of the precipitation at the estimated surface.	估计地表降水相态
53		epsilon	The adjustment away from the initial drop size distribution	滴谱分布调节因子

54		qualitySLV	Data quality of retrieval	反演的数据质量
55		precipWater	The amount of precipitable water	降水量廓线
56		precipWaterIntegrated	Precipitation water vertically integrated.	降水总量
57	FRE 频率修正模块	zFactorFrequencyCorrectionS	S band vertical profile of reflectivity factor after frequency correction	频率修正后 S 波段的雷达反射率因子
58		zFactorFrequencyCorrectionC	C band vertical profile of reflectivity factor after frequency correction	频率修正后 C 波段的雷达反射率因子
59		zFactorFrequencyCorrectionX	X band vertical profile of reflectivity factor after frequency correction	频率修正后 X 波段的雷达反射率因子

2.4 数据维数介绍

PMR 二级产品文件中很多数据集为多维数组，其维数说明和数值如表 2-4 所示。

表 2-4 FY-3G/PMR L2 数据维数说明

名称	数值	说明
nscan	可变量	扫描行数
nray	59	每条扫描行中的角度单元数
nbin	400	垂直方向的距离库单元数

2.5 数据集介绍

2.5.1 Geo_Fields

2.5.1.1 纬度（Latitude，float32，维数：nscan×nray×2）

瞬时视场中心的地球纬度。为每个波束分别计算了地球椭球表面（第一维）和地球椭球之上约 18km 高度（第二维）两个位置的纬度。纬度为南负北正。有效值范围是-90 到 90 度。特殊值定义有：-9999.9（填充值）。

2.5.1.2 经度 (Longitude, float32, 维数: nscan×nray×2)

瞬时视场中心的地球经度。为每个波束分别计算了地球椭球表面（第一维）和地球椭球之上约 18km 高度（第二维）两个位置的经度。经度为西负东正。有效值范围是-180 到 180 度。特殊值定义有：-9999.9（填充值）。

2.5.1.3 当月日计数 (DayOfMonth, int8, 维数: nscan)

当月的日计数。有效值范围是 1 到 31。特殊值定义有：-99（填充值）。

2.5.1.4 当年日计数 (DayOfYear, int16, 维数: nscan)

当年的日计数。有效值范围是 1 到 366。特殊值定义有：-9999（填充值）。

2.5.1.5 小时计数 (Hour, int8, 维数: nscan)

当天的 UTC 小时数。有效值范围是 0 到 23。特殊值定义有：-99（填充值）。

2.5.1.6 毫秒 (MillSecond, int16, 维数: nscan)

毫秒。有效值范围是 0 到 999。特殊值定义有：-9999（填充值）。

2.5.1.7 分钟 (Minute, int8, 维数: nscan)

分钟。有效值范围是 0 到 59。特殊值定义有：-99（填充值）。

2.5.1.8 月份 (Month, int8, 维数: nscan)

当年的月份。有效值范围是 1 到 12。特殊值定义有：-99（填充值）。

2.5.1.9 秒 (Second, int8, 维数: nscan)

秒数。有效值范围是 0 到 59。特殊值定义有：-99（填充值）。

2.5.1.10 年 (Year, int16, 维数: nscan)

年份。特殊值定义有：-9999（填充值）。

2.5.1.11 卫星平台飞行机动状态标识 (SatFlag, uint8, 维数: nscan)

卫星平台飞行机动状态标识。为每个扫描行分别记录了卫星平台飞行机动状态标识。各个值代表意义：0 卫星正飞；1 卫星正飞下自动偏航中；2 卫星正飞下横滚机动中；3 卫星正飞下俯仰机动中；4 卫星正飞下偏航 90° 机动中；5 卫星正飞下机动返回中；6 卫星正飞下轨控中；7 卫星正飞下滚动机动到位；8 卫星正飞下俯仰机动到位；9 卫星正飞下偏航 90° 机动到位；10 卫星正飞下未知机动状态；20 卫星倒飞；21 卫星倒飞下自动

偏航中; 22 卫星倒飞下横滚机动中; 23 卫星倒飞下俯仰机动中; 24 卫星倒飞下偏航 90° 机动中; 25 卫星倒飞下机动返回中; 26 卫星倒飞下轨控中; 27 卫星倒飞下滚动机动到位; 28 卫星倒飞下俯仰机动到位; 29 卫星倒飞下偏航 90° 机动到位; 30 卫星倒飞下未知机动状态; -88 卫星俯仰角或偏航角超出阈值; -99 填充值。

2.5.2 CSF

2.5.2.1 亮带底距离库 (binBBBottom, int16, 维数: nscan×nray)

亮带底所在的距离库。有效值范围是 1 到 400, 特殊值定义有: -9999 (填充值), -1111 (无降水)。

2.5.2.2 亮带峰值距离库 (binBBPeak, int16, 维数: nscan×nray)

亮带峰值所在的距离库。有效值范围是 1 到 400, 特殊值定义有: -9999 (填充值), -1111 (无降水)。

2.5.2.3 亮带顶距离库 (binBBTop, int16, 维数: nscan×nray)

亮带顶所在的距离库。有效值范围是 1 到 400, 特殊值定义有: -9999 (填充值), -1111 (无降水)。

2.5.2.4 亮带标识 (flagBB, int32, 维数: nscan×nray)

有无亮带的标识。有效值范围是 0 到 1, 特殊值定义有: -9999 (填充值), -1111 (无降水), 0 (没有探测到亮带), 1 (探测到亮带)。

2.5.2.5 强的冰态降水标识 (flagHeavyIcePrecip, int8, 维数: nscan×nray)

该标识表示探测到强的冰相降水。有效值范围是 0 到 12, 特殊值定义有: -99 (填充值)。

2.5.2.6 浅雨标识 (flagShallowRain, int32, 维数: nscan×nray)

有无浅雨的标识。有效值范围是 0 到 1, 特殊值定义有: -9999 (填充值), -1111 (无降水), 0 (无浅雨), 1 (浅雨)。

2.5.2.7 亮带高度 (heightBB, float32, 维数: nscan×nray)

亮带的高度。特殊值定义有: -9999.9 (填充值), -1111.1 (无降水)。

2.5.2.8 降水类型 (typePrecip, int32, 维数: nscan×nray)

降水类型标识, 1 为层状降水, 2 为对流降水。有效值范围是 1 到 2, 特殊值定义有: -9999 (填充值), -1111 (无降水)。

2.5.2.9 亮带宽度 (widthBB, float32, 维数: nscan×nray)

亮带的宽度, 单位为 m。特殊值定义有: -9999.9 (填充值), -1111.1 (无降水)。

2.5.3 DSD

2.5.3.1 降水相态 (phase, uint8, 维数: nscan×nray×nbin)

降水的相态。有效值范围是 50 到 250。相态的整数值/100=, 0-固态; 1-混合态; 2-液态。特殊值定义有: 255 (填充值)。

2.5.4 PRE

2.5.4.1 海拔高度 (height, float32, 维数: nscan×nray×nbin)

每个距离单元的海拔高度。为每个距离单元中心分别计算了海拔高度。有效值范围是-100 到 20000 米。特殊值定义有: -9999.9 (填充值)。

2.5.4.2 无杂波底距离库 (binClutterFreeBottom, int16, 维数: nscan×nray)

不受杂波干扰的距离单元底部单元号。为每个波束分别计算了不受杂波干扰的距离单元底部单元号。有效值范围是 1 到 400。特殊值定义有: -9999 (填充值)。

2.5.4.3 实际地表距离库 (binRealSurface, int16, 维数: nscan×nray)

实际地表的距离单元号。为每个波束分别计算了实际地表的距离单元号。有效值范围是 1 到 500。特殊值定义有: -9999 (填充值)。

2.5.4.4 风暴顶距离库 (binStormTop, int16, 维数: nscan×nray)

风暴顶部的距离库号。为每个波束分别计算了风暴顶部的距离库号。有效值范围是 1 到 400。特殊值定义有: -9999 (填充值)。

2.5.4.5 降水标识 (flagPrecip, int8, 维数: nscan×nray)

降水标识。为每个波束分别计算了降水标识。各个值代表意义: 0 无降水; 1 有降水; 2 可能有降水; -99 填充值。

2.5.4.6 回波功率饱和标识 (flagSigmaZeroSaturation, int8, 维数: nscan×nray)

在 sigmaZeroMeasured 所计算的距离单元内判断回波功率是否处于饱和状态的标志。为每个波束分别计算了 sigmaZeroMeasured 所计算的距离单元内判断回波功率是否处于饱和状态的标志。各个值代表意义：0 未饱和；1 可能饱和；2 饱和；-99 填充值。

2.5.4.7 风暴顶高度 (heightStormTop, float32, 维数: nscan×nray)

风暴顶部的海拔高度。为每个波束分别计算了风暴顶部的海拔高度。有效值范围是 0 到 20000 米。特殊值定义有：-9999.9（填充值）。

2.5.4.8 地表类型 (LandSurfaceType, int16, 维数: nscan×nray)

测量点的地表类型。为每个波束分别计算了测量点的地表类型。有效值范围是 1 到 5。各个值代表意义：0 海洋；1 陆地；2 水陆边界；3 内陆水体；-99 填充值。（在 HDF 文件里, Description 标注不正确, 0-99 海洋; 100-199 陆地; 200-299 水陆边界; 300-399 内陆水体）

2.5.4.9 天顶角 (localZenithAngle, float32, 维数: nscan×nray)

每个波束的本地天顶角。为每个波束分别计算了本地天顶角。有效值范围是 0 到 90 度。特殊值定义有：-9999.9（填充值）。

2.5.4.10 地球椭球表面到距离单元 binEllipsoid 中心的距离 (ellipsoidBinOffset, float32, 维数: nscan×nray)

地球椭球表面到距离单元 binEllipsoid 中心的距离。为每个波束分别计算了地球椭球表面到距离单元 binEllipsoid 中心的距离。有效值范围是-25 到 25 米。特殊值定义有：-9999.9（填充值）。

2.5.4.11 测量的地表后向散射截面 (sigmaZeroMeasured, float32, 维数: nscan×nray)

无衰减校正的地表后向散射截面。为每个波束分别计算了无衰减校正的地表后向散射截面。特殊值定义有：-9999.9（填充值）。

2.5.4.12 实际地表距离库信噪比 (snRatioAtRealSurface, float32, 维数: nscan×nray)

实际表面距离库的信噪比。为每个波束分别计算了实际表面距离库的信噪比。特殊值定义有：-9999.9（填充值）。

2.5.4.13 测量的雷达反射率因子(zFactorMeasured, float32, 维数: nscan×nray×nbin)

无衰减校正的反射率因子垂直剖面。为每个波束的距离单元分别计算了无衰减校正的反射率因子垂直剖面。特殊值定义有: -9999.9 (填充值)。

2.5.5 VER

2.5.5.1 0°C 距离库 (binZeroDeg, int16, 维数: nscan×nray)

0°C 层的距离库。有效值范围 1 到 401。特殊值定义有 -9999 (填充值), 401 (地表的温度低于 0°C)。

2.5.5.2 非降水粒子衰减系数 (attenuationNP, float32, 维数: nscan×nray×nbin)

非降水粒子衰减系数, 单位为 dB/Km。特殊值定义有: -9999.9 (填充值)。

2.5.5.3 非降水粒子路径积分衰减 (piaNP, float32, 维数: nscan×nray×4)

非降水粒子路径积分衰减, 单位为 dB, 有效值范围 0 到 1。特殊值定义有: -9999.9 (填充值)。第一维表示总衰减, 第二维表示水汽的衰减, 第三维表示氧气的衰减, 第四维表示云中液态水的衰减。

2.5.5.4 非降水粒子衰减订正后的地表后向散射截面 (sigmaZeroNPCorrected, float32, 维数: nscan×nray)

非降水粒子衰减订正后的地表后向散射截面, 单位为 dB。特殊值定义有: -9999.9 (填充值)。

2.5.5.5 0°C 高度 (heightZeroDeg, float32, 维数: nscan×nray)

0°C 高度, 单位为 m。特殊值定义有: -9999.9 (填充值)。

2.5.6 SLV

2.5.6.1 滴谱分布参数 (paramDSD, float32, 维数: nscan×nray×nbin×2)

滴谱的分布参数, 第一个索引对应的粒子数浓度 dBNw, 有效值范围为 0 到 70; 第二个索引对应的是粒子直径 Dm, 单位为 mm, 有效值范围为 0.1 到 5。特殊值定义有: -9999.9 (填充值)。

2.5.6.2 降水粒子路径积分衰减 (piaFinal, float32, 维数: nscan×nray)

降水粒子的路径积分衰减, 单位为 dB, 有效值范围为 0 到 50。特殊值定义有: -9999.9

（填充值）。

2.5.6.3 衰减订正后的地表后向散射截面（sigmaZeroCorrected, float32, 维数：nscan × nray）

衰减订正后的地表后向散射截面，单位为 dB。特殊值定义有：-9999.9（填充值）。

2.5.6.4 衰减订正后的雷达反射率因子（zFactorCorrected, float32, 维数：nscan × nray × nbin）

衰减订正后的雷达反射率因子，单位为 dBZ，有效值范围 0 到 70。特殊值定义有：-9999.9（填充值）。

2.5.6.5 估计地表衰减订正后的雷达反射率因子（zFactorCorrectedESurface, float32, 维数：nscan × nray）

估计地表衰减订正后的雷达反射率因子，单位为 dBZ，有效值范围 0 到 70。特殊值定义有：-9999.9（填充值）。

2.5.6.6 近地表衰减订正后的雷达反射率因子（zFactorCorrectedNearSurface, float32, 维数：nscan × nray）

近地表的衰减订正后的雷达反射率因子，单位为 dBZ，有效值范围 0 到 70。特殊值定义有：-9999.9（填充值）。

2.5.6.7 非均匀波束订正参数（paramNUBF, float32, 维数：nscan × nray）

非均匀波束订正参数，有效值范围 0 到 0.25。特殊值定义有：-9999.9（填充值）。

2.5.6.8 降水率廓线（precipRate, float32, 维数：nscan × nray × nbin）

三维降水率廓线，单位为 mm/hr，有效值范围 0.0 到 300.0。特殊值定义有：-9999.9（填充值）。

2.5.6.9 近地表降水率（precipRateNearSurface, float32, 维数：nscan × nray）

近地表的降水率，单位为 mm/hr，有效值范围 0.0 到 300.0。特殊值定义有：-9999.9（填充值）。

2.5.6.10 估计地表降水率（precipRateESurface, float32, 维数：nscan × nray）

估计地表的降水率，单位为 mm/hr，有效值范围 0.0 到 300.0。特殊值定义有：-9999.9（填充值）。

2.5.6.11 近地表降水相态 (phaseNearSurface, uint8, 维数: nscan×nray)

近地表的降水相态, 有效值范围 50 到 250。特殊值定义有: 255 (填充值)。

2.5.6.12 估计地表降水相态 (phaseESurface, uint8, 维数: nscan×nray)

估计地表的降水相态, 有效值范围 50 到 250。特殊值定义有: 255 (填充值)。

2.5.6.13 滴谱分布调节因子 (epsilon, float32, 维数: nscan×nray×nbin)

epsilon 是初始滴谱分布的调节因子, epsilon 为 1 代表无调节。有效值范围 0.2 到 5.0。特殊值定义有: -9999.9 (填充值)。

2.5.6.14 反演质量 (qualitySLV, int32, 维数: nscan×nray)

qualitySLV 是 SLV 模块降水反演数据的质量码, qualitySLV 为 0 代表质量优。qualitySLV 为 1 表示质量差。特殊值定义有: -9999.9 (填充值)。

2.5.6.15 降水量廓线 (precipWater, float32, 维数: nscan×nray×nbin)

降水量廓线, 单位为 g/m^3 。特殊值定义有: -9999.9 (填充值)。

2.5.6.16 降水总量 (precipWaterIntegrated, float32, 维数: nscan×nray×2)

降水总量, 单位为 mm。特殊值定义有: -9999.9 (填充值)。第一维表示液态水总量 (相态大于等于 200), 第二维表示非液态水总量 (相态小于 200)。

2.5.7 FRE

2.5.7.1 频率修正后 S 波段的雷达反射率因子 (zFactorFrequencyCorrectionS, float32, 维数: nscan×nray×nbin)

经过频率修正后的 S 波段等效雷达反射率因子, 单位为 dBZ。特殊值定义有: -9999.9 (填充值)。

2.5.7.2 频率修正后 C 波段的雷达反射率因子 (zFactorFrequencyCorrectionC, float32, 维数: nscan×nray×nbin)

经过频率修正后的 C 波段等效雷达反射率因子, 单位为 dBZ。特殊值定义有: -9999.9 (填充值)。

2.5.7.3 频率修正后 X 波段的雷达反射率因子(zFactorFrequencyCorrectionX, float32,

维数: $nscan \times nray \times nbin$)

经过频率修正后的 X 波段等效雷达反射率因子, 单位为 dBZ。特殊值定义有: -9999.9 (填充值)。

3 产品算法原理和流程

3.1 算法基本原理

3.1.1 亮带检测

亮带 (Bright band, BB) 是由于固态粒子融化导致介电常数增加而引起的雷达反射率因子增大的现象, 从雷达图像上看, 在零度层的回波会显得比其上下都异常明亮, 所以称为“亮带”。根据研究经验和雷达观测结果表明, Ku 波段亮带峰值的平均值出现在 0°C 高度以下约 0.5km 处。

亮带检测通常采用垂直法 (Vertical Profiling Method, V-method), 也就是使用非降水粒子衰减订正后的雷达反射率因子廓线来进行垂直方向的识别。用 0°C 来设置亮带的搜索窗口, 窗口范围从 0°C 上 1Km 到 0°C 层下 2Km, 如果该区间内雷达反射率因子的分布满足表征亮带的某些条件, 则确定存在亮带。在 Ku 波段, 如果在雷达反射率廓线中观察到尖锐的亮带峰, 则表示存在亮带。

当检测到亮带时, 需要确定亮带的上边界 (binBBTop) 和亮带的下边界 (binBBBottom)。首先检测亮带的下边界, 亮带的下边界定义为亮带峰值正下方区域中雷达反射率因子斜率变化最大的点; 亮带的上边界通过 A 和 B 两点来确定, 其中 A 点为亮带峰值上部区域雷达反射率因子斜率变化最大的位置, B 点为从亮带峰顶向亮带上部检查时, 雷达反射率因子首次小于亮带下边界处的雷达反射率因子。

当点 A 和 B 相同时, 点 A 为亮带上边界。当点 A 和 B 不同时, 更接近亮带峰值的 A 或 B 为亮带上边界。

亮带宽度 (widthBB) 通过以下经验公式计算:

$$widthBB = [(rangeBBBottom - rangeBBTop) \times 125 - L \sin(\theta_z)] \cos(\theta_z)$$

其中 θ_z 是局部天顶角, L 如下所示:

$$L = L_0 F / \cos^2(\theta_z)$$

其中 $L_0 = 5000m$ ，为天线波束的覆盖区大小， $F = 0.5$ 为经验系数。当上述等式 $widthBB < 250 \cos(\theta_0)$ 时，宽度设置为 $widthBB = 250 \cos(\theta_0)$ 。

3.1.2 降水分类

降水分类通过两种方法进行反演：一种是垂直廓线反演方法（V 方法），另一种是水平模式法（H 方法）。先分别利用 V 方法和 H 方法将降水分为三类：层状、对流和其它。最后将这两种方法判断的降水类型进行统一。

3.1.2.1 垂直廓线法（V-method）

在垂直廓线法中，首先检测层状降水。

- 当检测到亮带时，降水类型一般为层状降水。当满足以下两个条件时，检测到亮带时也会判断为对流型降水：

1) $Z_{\max_below} > conv_th_{BB}$ （Ku 波段取 46dBZ）

2) $Z_{\max_below} > Z_{BBPeak}$ ，

其中， Z_{\max_below} 是无杂波区域中高度小于或等于亮带底下 0.375 km 范围内的雷达反射率因子的最大值， Z_{BBPeak} 是亮带中雷达反射率因子的最大值。

- 当未检测到亮带时，如果满足以下条件之一，则降水类型为对流型。否则，降水类型为其它。
 - a) 从雨顶到无杂波底，雷达反射率因子大于 40dBZ；
 - b) 风暴顶高度>15km。

3.1.2.2 水平模式法（H-method）

在水平模式法中，计算每个有雨的 pixel 中雷达反射率因子的最大值 Z_{\max} 。当满足以下条件之一时，该像元是对流中心，

- a) Z_{\max} 超过对流阈值（40dBZ）；
- b) Z_{\max} 明显比周围区域的均值来的大。

如果对流中心的降水类型是对流型，那么与对流中心相邻像元的降水类型也为对流型。如果降水类型不是对流型，并且 Z_{\max} 较小，但是又不是噪声，则降水类型为层状降水。如果 Z_{\max} 非常小且几乎等同于噪声，则降水类型是其它类型。

3.1.2.3 浅雨和小尺度降水

当满足以下条件时，判断为浅雨：

雨顶高<0℃ 层高-1000m

小尺度降水被认为是降水尺度比较小的降水，不超过 2 个像元。

3.1.2.4 降水类型统一

垂直廓线法和水平模式法需统一降水类型，输出的降水类型包括层状、对流和其它类型。单频降水类型的统一按以下方式进行。

表 3-1 FY-3G PMR Ku 雷达降水类型统一

降水类型统一方法		H-method		
		层状	对流	其它
V-method	层状+亮带	层状+亮带	层状+亮带	层状+亮带
	对流+亮带	对流+亮带	对流+亮带	对流+亮带
	对流	对流	对流	对流
	其它	层状	对流	其它

在上述降水类型判断中，有以下例外情况：

- a) 所有的浅层雨均为对流降水；
- b) 所有小尺寸雨均为对流型；
- c) 当检测到 HIP 时，并且未检测到亮带，降水类型为对流型。

3.1.3 降水相态

降水相态根据亮带检测结果以及 0℃ 层信息，分为固态、液态以及混合相态三类。

3.1.4 降水率

雷达发射无线电波脉冲并接收来自物体的回波。降水雷达的目标是单位体积内的雨滴分布。在距离雨滴距离 r 处接收到的功率 P_r 与视在雷达反射率因子 $Z_{m0}(r)$ 成正比。

$$P_r(r) = \frac{C|K|^2}{r^2} Z_{m0}(r) \quad (3.1.4-1)$$

其中 C 是雷达常数， K 是散射粒子的复折射率 m 的函数，公式如下

$$K = \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \quad (3.1.4-2)$$

当 C 、 K 以及距离 r 给定时，测量的雷达反射率因子 Z_{m0} 可以由 P_r 计算。电磁波在传输过程中受到衰减，受衰减的影响，测量的雷达反射率因子 Z_{m0} 与等效雷达反射率因子 Z_e 之间满足：

$$Z_{m0}(r) = A(r)Z_e(r) \quad (3.1.4-3)$$

其中 A 是衰减因子。等效雷达反射率因子 Z_e 可以用直径为 D 的降水粒子的后向散射截面 $\sigma_b(D)$ 和滴谱分布函数 $N(D)$ 来表示:

$$Z_e = \frac{\lambda^4}{\pi^5 |K|^2} \int \sigma_b(D) N(D) dD \quad (3.1.4-4)$$

其中 λ 是电磁波的波长, 降水率 R 也可以用 $N(D)$ 表示,

$$R = 0.6\pi \int v(D) N(D) D^3 dD \quad (3.1.4-5)$$

其中 $v(D)$ 是雨滴下落速度。

雷达的衰减包括降水和非降水两个部分, 非降水粒子主要包含水汽、氧气以及云中液态水, 通常基于数值预报或者再分析资料提供的温度、湿度以及云中液体水的廓线来进行订正。雨衰系数 k 则根据滴谱分布函数 $N(D)$ 和总消光截面 $\sigma_e(D)$ 由下式给出

$$k = c_k \int \sigma_e(D) N(D) dD \quad (3.1.4-6)$$

其中 $C_k = 0.01/\ln(10)$ 。如果 k 单位用 dB/km 表示, $\sigma_e(D)$ 则用 mm^2 表示, $N(D)$ 则用 $mm^{-1}m^{-3}$ 表示。 r 表示距离库与雷达之间的距离。路径积分衰减(PIA)定义为从雷达到地面的降水粒子引起的衰减。如若在地表 $r = r_s$, PIA 如下所示,

$$PIA = -10 \log_{10} A_P(r_s) = 2 \int_0^{r_s} k(s) ds \quad (3.1.4-7)$$

PMR 的降水反演思路是用基于前向的迭代反演算法从回波顶开始反演滴谱参数 $N(D)$ 的廓线, 并计算路径积分衰减, 再和 PIA 的约束量进行比较从而选择调节因子的最佳值。在此基础上, 利用滴谱廓线进行积分, 得到等效雷达反射率因子和降水率。

3.1.5 迭代计算步骤和流程图

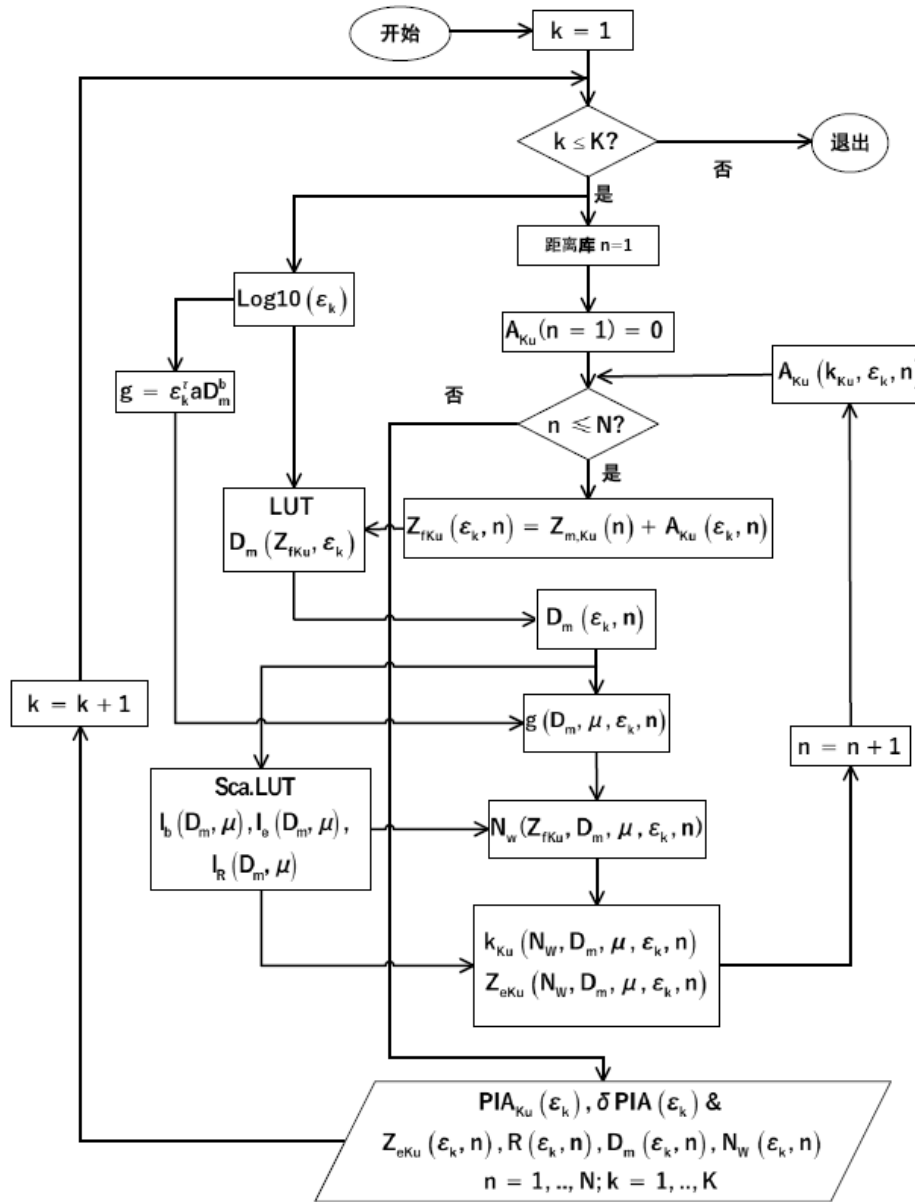


图 3.1 迭代计算流程图

迭代计算从回波顶开始，假设 Z_e 等于 Z_m ，通过设置调节因子从 0.2 到 5 之间变动来控制迭代计算的次数。调节因子设置的意义是对初始的滴谱参数进行调整，从而使得实际反演的滴谱和雷达探测的结果相吻合。

3.1.6 $R - D_m$ 关系

$R - D_m$ 关系是基于全球统计平均的 $Z - R$ 关系推导出来的，相比之前常用的 $k - Z_e$ 关系，可以较好的避免降水反演中遇到的一值多解的问题。 $R - D_m$ 关系根据降水类型的

不同，分为层云和对流两种。 $R - D_m$ 关系与调节因子相关联，调节因子 ε 最初是 $k - Z_e$ 的调整因子。针对不同的调节因子（0.2-5.0）或不同的 $R - D_m$ 关系进行多次反演，通过检查计算的PIA和约束的PIA之间的差来选择最佳调节因子或最佳 $R - D_m$ 关系。

3.1.7 查找表

反演的过程中需要用到两个核心查找表，一个是LUT，是调节因子和滴谱参数 D_m 以及雷达反射率因子之间的查找表，便于在已知调节因子以及雷达反射率因子的情况下，检索出 D_m ，另外一个Sca.LUT，是粒子谱参数 D_m 和散射、衰减以及降水函数之间的关系，便于在已知 D_m 后，快速计算雷达反射率因子以及衰减。

3.2 处理流程

3.2.1 产品输入

表 3-2 FY-3G PMR Ku 雷达产品输入列表

序号	名称	文件格式	周期	数据来源	描述
1.	PMR L1 轨道数据	HDF	轨道	IOCS	提供经纬度、扫描角、扫描时间、测量的雷达反射率因子、降水标识以及PIA _{SRT} 等
2.	数值预报数据	Raw	1 小时	IOCS	提供温度、湿度、云中液态水等环境参数信息
3.	调节因子动态反演查找表	HDF	静态	预置	
4.	Ku 查找表	HDF	静态	预置	
5.	S/C/X 散射查找表	HDF	静态	预置	
6.	云中液态水廓线库	HDF	静态	预置	开发中
7.	DSD 数据库	HDF	静态	预置	开发中

3.2.2 处理流程

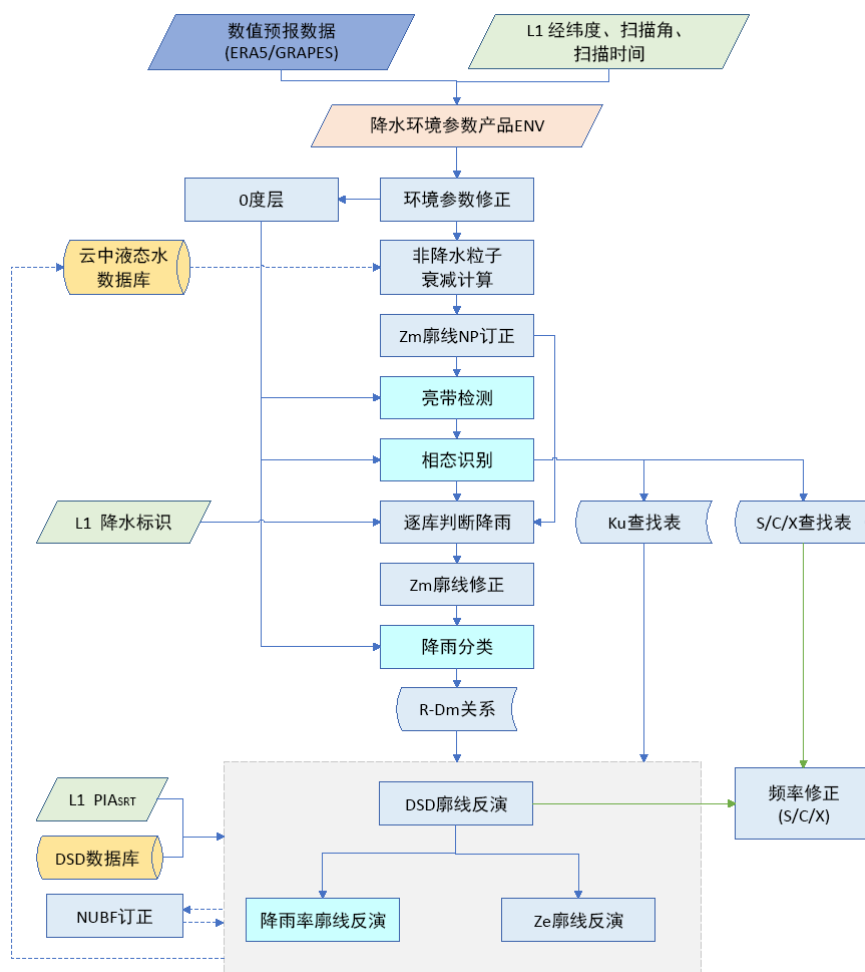


图 3-2 FY-3G PMR Ku 雷达产品处理流程图

产品处理流程如上图所示。算法整体上分两次循环。第一次循环先从 L1 读取经纬度、扫描角、扫描时间，并从数值预报读取温度、湿度、云中液态水等环境参数，时空匹配以后插值得到和 PMR Ku 雷达三维观测相匹配的降水环境参数文件 ENV。在此基础上，判断 0°C 层的位置，并结合 L1 测量的雷达反射率因子 $zFactorMeasured$ 和降水标识 $flagPrecip$ ，逐库判断是否存在降水并对雷达反射率因子廓线进行逐库修正。修正完后结合 ENV 文件对测量的雷达反射率因子进行非降水粒子的衰减订正。衰减订正结束后，依次进行亮带检测、相态识别和降水分类。最后，假设降水均匀并联合 L1 的路径积分衰减 $PIASRT$ 、DSD 数据库、Ku 查找表、 $R - D_m$ 关系等辅助数据进行三维滴谱参数的反演，再通过滴谱积分获得降水率廓线和等效雷达反射率因子廓线，并计算非均匀波束订正因子 NUBF。第二次循环开始，先结合第一次循环计算的地面降水率从云中液态水的廓线库中

选出对应的廓线进行非降水粒子的衰减订正、再进行亮带检测、相态识别和降水分类，并结合第一次循环计算的 NUBF，进行滴谱参数的反演。循环结束后，结合 S/C/X 波段散射查找表，进行相应的频率修正。

4 产品示例

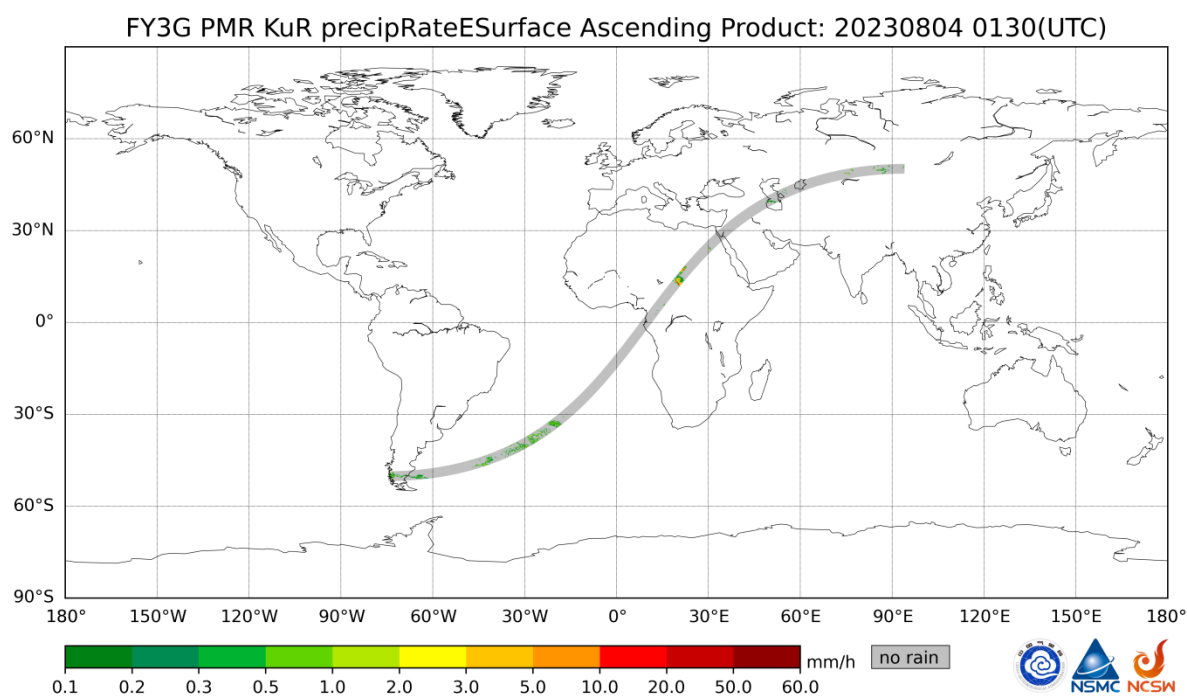


图 4-1 FY-3G PMR Ku 雷达升轨快视图

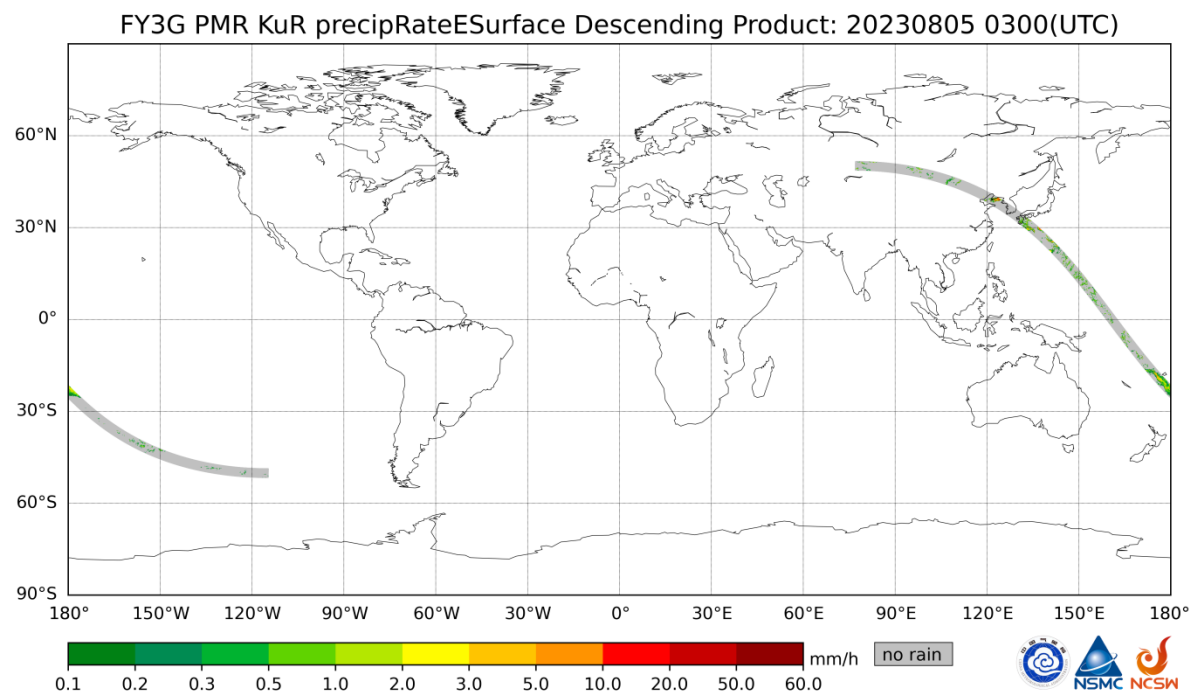


图 4-2 FY-3G PMR Ku 雷达降轨快视图

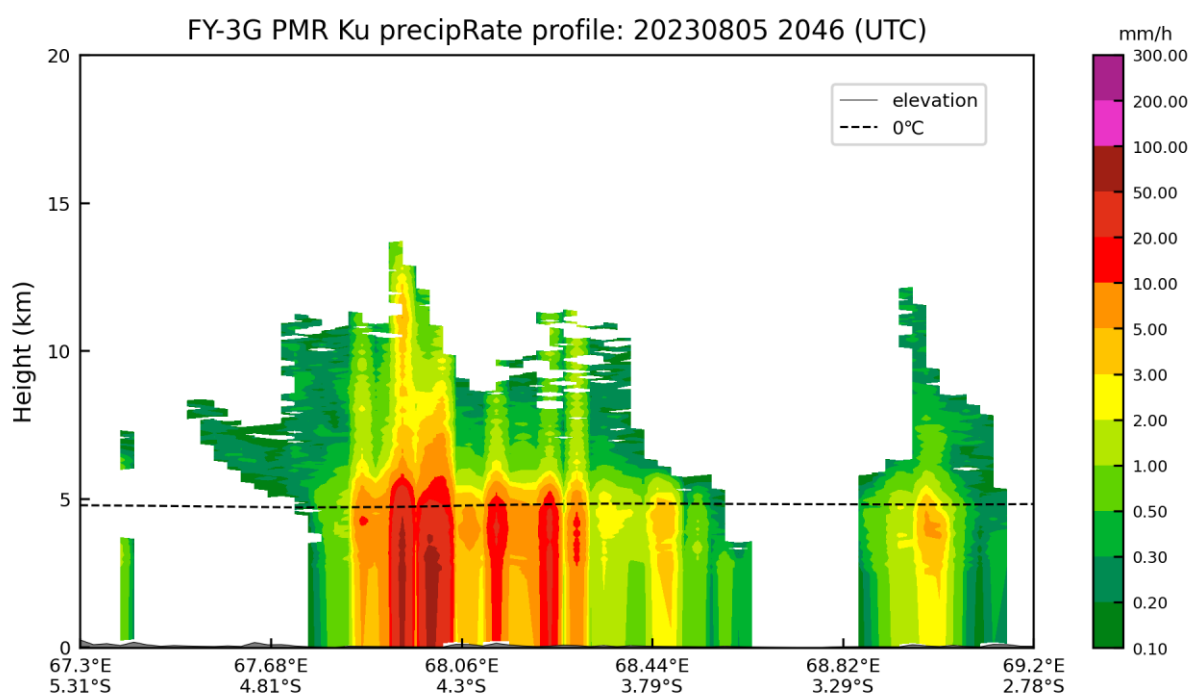


图 4-3 FY-3G PMR Ku 雷达降水率垂直剖面图

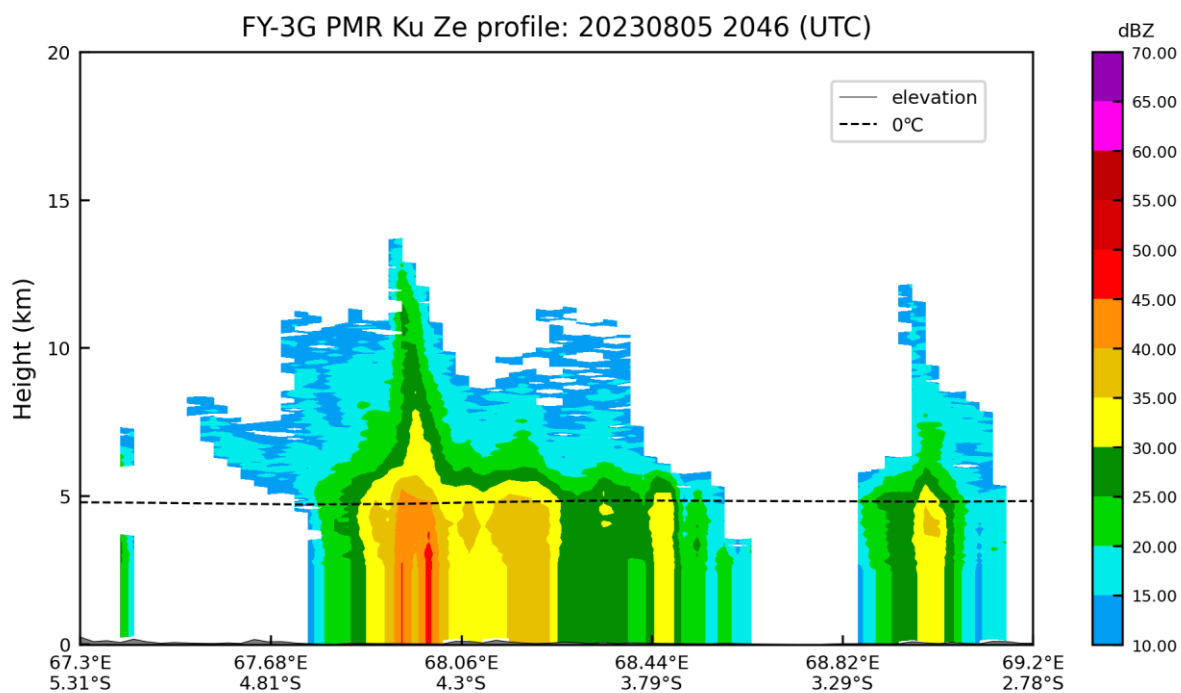


图 4-4 FY-3G PMR Ku 雷达 Ze 垂直剖面图

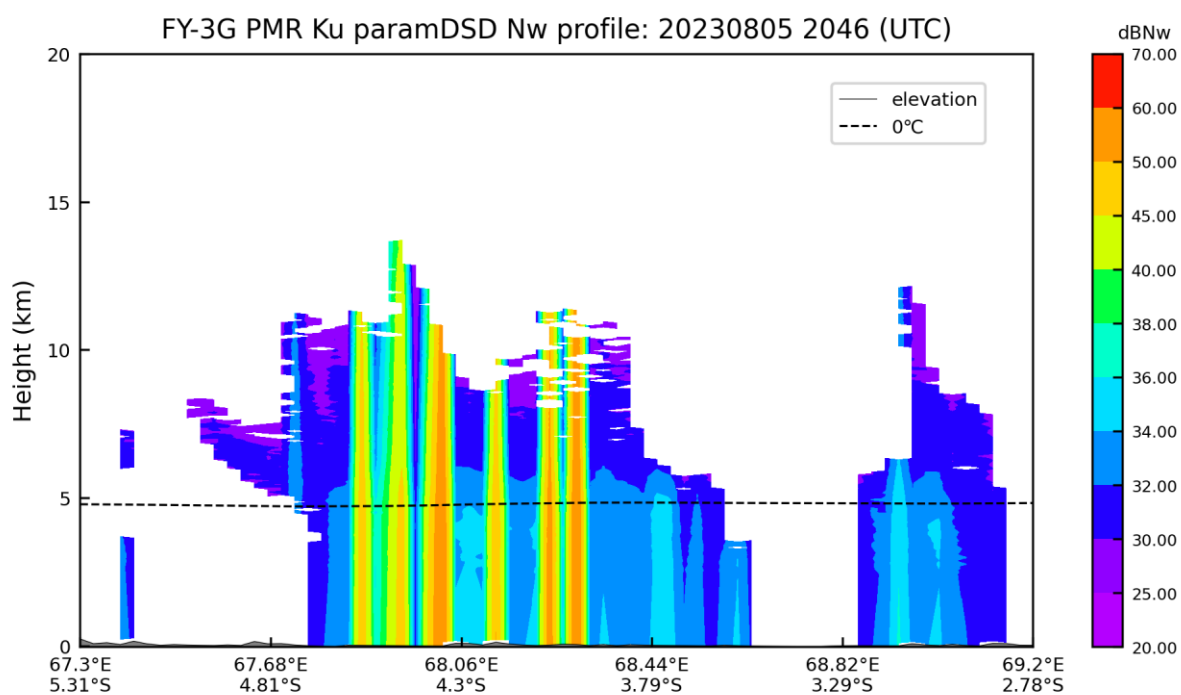


图 4-5 FY-3G PMR Ku 雷达滴谱参数 dBW 垂直剖面图

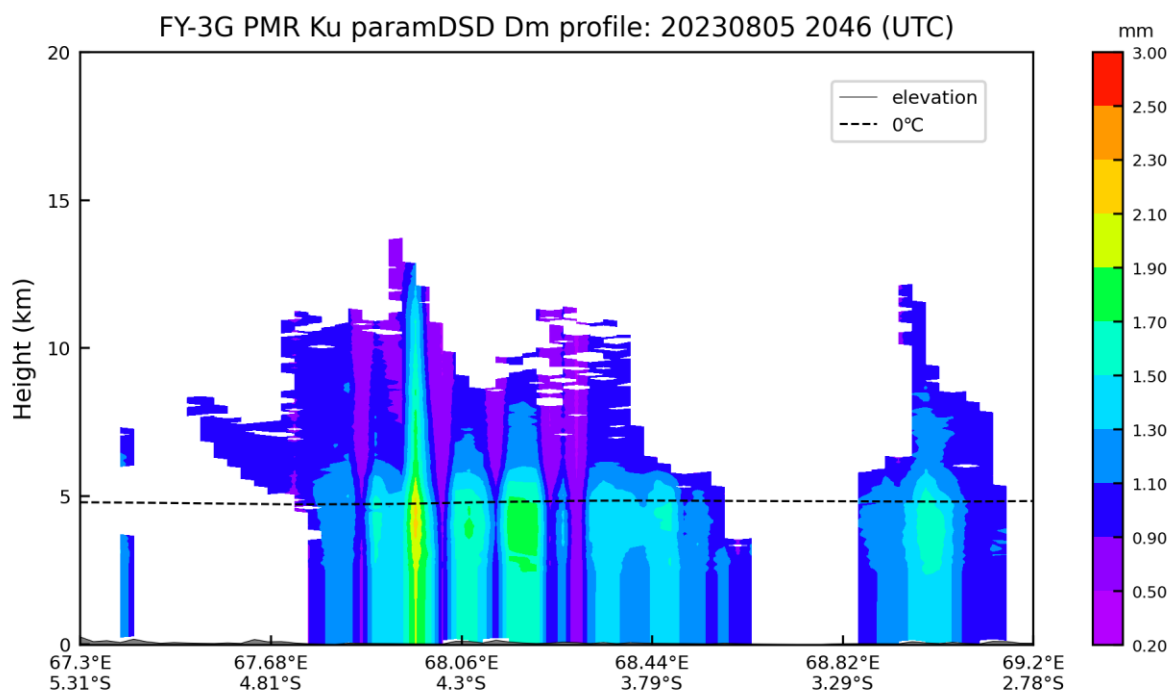


图 4-6 FY-3G PMR Ku 雷达滴谱参数 Dm 垂直剖面图

5 产品合理性评估

5.1 产品合理性评估方法和数据

产品合理性评估的方法主要是看反演产品的数值范围是否合理。统计的数据范围是 2023 年 8 月 1 日到 2023 年 8 月 5 日 PMR Ku 雷达的二级产品，共 5 天，156 轨。统计的变量以及参考值有效范围如下表所示：

表 5-1 降水参数有效值参考范围

序号	模块名	数据名	参考值有效范围
1	SLV	paramDSD	dBNw:<70; Dm: 0.2-5mm
2		zFactorCorrected	<70dBZ
3		precipRate	<300mm/h

5.2 产品合理性评估结果

经过评估，156 轨二级产品的数值都在有效值范围之内，下表列出了 8 月 1 号所有升轨文件 SLV 模块相关变量的统计情况。

表 5-2 8 月 1 日所有升轨文件 SLV 模块的统计情况

轨道时间	precipRate(mm/h)		zFactorCorrected (dBZ)		dBNw		Dm(mm)	
	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小 值	最大 值
202308010055	0.061	35.313	10.078	48.010	26.241	59.991	0.38	2.79
202308010228	0.059	98.765	10.048	54.998	15.834	57.386	0.41	4.06
202308010400	0.077	64.704	10.109	50.333	27.434	43.940	0.60	2.66
202308010533	0.038	127.486	9.919	55.378	13.926	65.989	0.28	4.27
202308010706	0.051	136.391	9.963	52.327	15.219	62.708	0.36	3.13
202308010838	0.048	218.097	9.929	56.720	6.810	66.700	0.28	5.00
202308011011	0.038	299.626	9.769	58.980	8.738	66.718	0.30	4.70
202308011143	0.034	135.818	9.937	55.216	8.178	66.815	0.29	5.00
202308011316	0.049	127.157	9.859	55.497	9.159	65.852	0.28	5.00
202308011449	0.053	299.898	9.819	62.670	9.343	64.786	0.31	5.00
202308011621	0.048	296.642	9.742	59.611	8.886	67.414	0.28	4.03
202308011754	0.026	297.972	9.876	56.866	10.700	66.096	0.29	5.00
202308011926	0.045	299.543	9.749	60.137	10.038	66.187	0.28	3.75
202308012059	0.045	295.828	9.678	55.602	12.760	65.222	0.31	3.32
202308012232	0.053	299.388	9.737	62.120	9.017	67.162	0.30	4.85
202308010055	0.061	35.313	10.078	48.010	26.241	59.991	0.38	2.79

6 产品使用说明

6.1 产品使用说明

- 1、本次发布的数据中使用的环境参数来自于 ERA5 再分析资料；
- 2、本次数据只保证反演变量的合理性，还未开展详细的精度评估；
- 3、产品处理流程图是一个输入输出的示意，和最终版可能有所出入；
- 4、频率修正模块 FRE 中，如果等效雷达反射率因子 `zFactorCorrected` 为有效值，但是频率修正后为填充值，有两种可能，一种是对应的相态不是液态，另外一种虽然相态是液态，但是该位置对应的降水只是可能有降水，而不是确定有降水；
- 5、降水雷达二级产品按照产品体系设计要求，分为 KuPR、KaPR 和 DPR 三类，本次 5 天试用数据只发布 KuPR 2023 年 8 月 1 号-8 月 5 号的 L2 产品，其他产品暂不发布；
- 6、后期在 SLV 模块中还将增加降水量 `precipWater` 以及降水总量 `precipWaterIntegrated` 两个 SDS。
- 7、在轨测试从 5 月正式启动，到 11 月产品发布，历时六个月，不足之处还请多提宝贵意见。

6.2 应用限制条件

- 1、`qualitySLV` 为 1 表示质量差，`qualitySLV` 为 0 表示质量优，请优选选用 `qualitySLV` 为 0 的数据。

7 产品制作及技术支持

7.1 产品技术责任人

表 7-1 产品技术责任人列表

序号	姓名	单位	联系电话	电子邮箱	角色
1	吴琼	国家卫星气象中心	68407027 转 801	wuqiong@cma.gov.cn	产品负责人

7.2 文档引用方式和建议引用文献

- 1、吴琼.2023.FY-3G 降水测量雷达 L2 产品使用说明文档.Wu Qiong.2023. FY-3G PMR level-2 product instructions document(in chinese)

2、吴琼, 仰美霖, 陈林等. 2023. 一种星载降水测量雷达和地基天气雷达的频率修正方法. 气象学报, 81(2): 353-360. Wu Qiong, Yang Meilin, Chen Lin, et al. 2023. A frequency correction algorithm for spaceborne precipitation measurement radar and ground-based weather radar. Acta Meteor Sinica, 81(2):353-360(in chinese)