

FY-3 微波成像仪仪器性能及业务化产品介绍

杨虎 施建成 武胜利 张晔萍 游然 李小青 林吉东

国家卫星气象中心, 北京 100081

Email: yanghu@nsmc.cma.gov.cn

摘要

风云三号卫星 FY-3 是实现全球、全天候、三维、定量、多光谱遥感的我国第二代极轨气象卫星系列。风云三号气象卫星资料中含有丰富生态环境变化信息, 既可以用于对水、火、冰、雪等灾害的监测, 也可以用于对植被、土地利用、气溶胶参量的分析。这些结果将会对农业、林业、环境、市政、交通以及政府决策部门提供有效的决策服务。其中搭载的微波成像仪 (MicroWave Radiation Imager, MWRI) 为我国第一个星载微波遥感仪器, 其设计频率为 10.65GHz, 18.7 GHz, 23.8 GHz, 36.5 GHz, 89 GHz, 150 GHz, 每个频率有 V, H 两种不同极化模式, 相应的星下点空间分辨率分别为 51x85km, 30x50km, 27x45km, 18x30km, 9x15km, 7.5x12km。根据 FY-3 微波成像仪传感器参数特性, 目前发展了可进行工程业务化的大气和陆、海表共 6 类定量产品, 包括: 降水和云水, 海上大气可降水, 雪深和雪当量, 地表土壤体积含水量, 洪涝、干旱指数和陆表温度, 以及海表温度和风速产品。本文首先介绍了微波成像仪仪器参数和观测几何特性、定标, 在此基础上介绍了微波成像仪大气和地表参数业务化产品和产品精度, 最后对微波成像仪产品应用进行探讨。

1. 微波成像仪仪器特性概述

FY-3 微波成像仪设计频率为 10.65GHz, 18.7 GHz, 23.8 GHz, 36.5 GHz, 89 GHz, 150 GHz, 每个频率有 V, H 两种不同极化模式, 相应的星下点空间分辨率分别为 51x85km, 30x50km, 27x45km, 18x30km, 9x15km, 7.5x12km。微波成像仪仪器如下图所示。

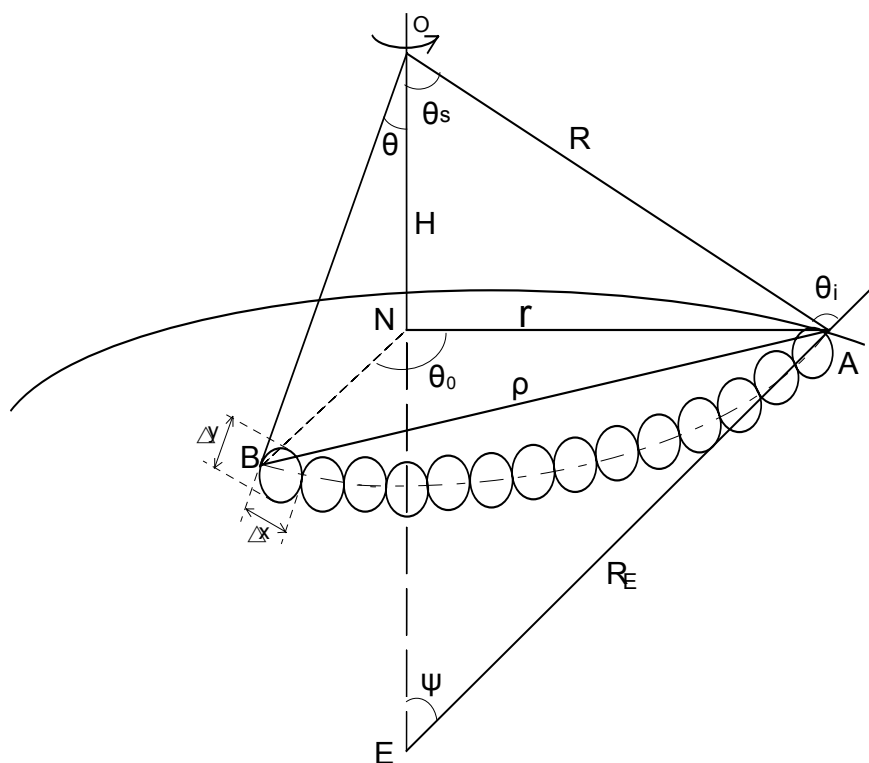


微波成像仪具体技术指标见表 1。

表 1 FY-3 微波成像仪主要系统参数

| | | | | | |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 频率 (GHz) | 10.65 | 18.7 | 23.8 | 36.5 | 89 |
| 极化 | V/H | V/H | V/H | V/H | V/H |
| 带宽 (MHz) | 180 | 200 | 400 | 900 | 4600 |
| 波束宽度 | 2.03/2.01 | 1.17/1.18 | 1.17/1.18 | 0.62/0.62 | 0.29/0.29 |
| 灵敏度 (K) | 0.5 | 0.5 | 0.8 | 0.5 | 1.0 |
| 定标误差 (K) | 1.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 |
| 地面分辨率 <=(kmxkm) | 51x85 | 30x50 | 27x45 | 18x30 | 9x15 |
| 扫描方式 | 圆锥扫描 | | | | |
| 天线视角 (o) | 45 ± 0.1 | | | | |
| 幅宽 (Km) | 1400 | | | | |

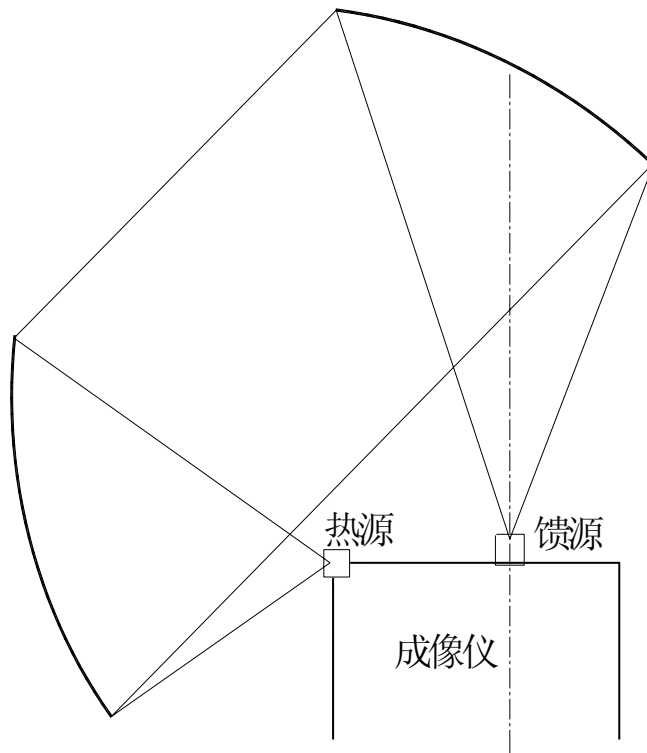
微波成像仪采用前向圆锥扫描方式，观测角为 45° ，地面观测角度范围为卫星轨道方向左右 52° ，地面入射角为 53° 。微波成像仪扫描几何如下图所示：



微波成像仪产品生成过程包括几个关键步骤，包括：仪器定标定位、通道分辨率匹配、产品生成。

1.1 定标

微波成像仪采用全功率周期定标方式工作，利用冷热定标源进行两点定标。冷定标源是利用冷空反射镜反射冷空辐射信号，热定标源包括热辐射源和热反射镜。区别于国外同类微波成像仪热定标源，微波成像仪的一个显著特点就是热定标源由热辐射源+热反射镜两部分组成。如下图所示：



微波成像仪热定标系统结构示意图

由于热反射镜口径和热辐射源尺寸的限制，热辐射源/热反射镜系统的热辐射传递效率并不是 100%。地面定标需要确定热辐射源和热反射镜所组成系统的辐射传递效率。地面热真空定标实验和实验室定标结果表明，微波成像仪定标精度在 2K 以内。

1.2 通道分辨率匹配

微波成像仪采用分置馈源、共用偏置抛物面天线的观测方式。即按照排列顺序，在主反射镜焦点上安置 10.65, 18.7/23.8, 89, 36.5 频点馈源，其中 89 馈源在抛物面天线焦点，其他馈源以一定的距离排列两侧，18/23 频点共用一个馈源。成像仪这种分馈观测方式，由于不同频点观测波束之间有夹角，使得不同频率的地面观测足迹不在同一个位置，而地面应用往往需要多个频点的观测共同使用，这就要求必须对原始观测数据进行通道分辨率匹配处理，使得处理后不同频率的观测像素具有相同的观测位置和瞬时视场分辨率。

微波成像仪在设计当中，为了补偿分馈造成的地面足迹位置差别，采用扫描时序的方法对观测位置偏差进行补偿。即根据不同频点观测波束的夹角和仪器扫描周期、卫星高度、卫星运动速度对不同频点观测设计合理的扫描时序，这样能够保证不同频点观测中心点基本重合。为了使不同频点观测具有相同分辨率，微波成像仪在数据处理过程中采用 Bakus-Gilbert 通

道分辨率匹配算法, 算法的目的是通过重采样产生瞬时视场一致的不同频率图象。通过模拟不同频率的增益模式, 使重采样产生的数据尽可能接近真实的地表观测数据。BG 算法概述如下:

在天线波束地表观测点 ρ_0 处, 天线亮温可以表示为地表观测亮温和天线增益的卷积:

$$\overline{T_{Bi}} = \int T_B(\rho)G_i(\rho)dA \quad 1-1$$

上式中, $T_B(\rho)$ 为地表某一位置处的辐射亮温, $G_i(\rho)$ 为观测时的天线增益。则该位置处构造的亮温定义为实际观测亮温的权重和:

$$\hat{T}_B = \sum_{i=1}^n a_i \overline{T_{Bi}} = \int T_B(\rho) \sum_{i=1}^n a_i G_i(\rho) dA \quad 1-2$$

L2A 算法的关键是在 6.6.2-2 式中找到一组系数 a_i , 使构造的天线增益 $\sum_{i=1}^n a_i G_i(\rho)$ 尽可能接近

真实天线增益, 同时使噪声最小化。参考国外同类微波辐射计通道匹配处理算法, 本文选用 Backus-Gilbert 算法来计算权重系数 a_i 。

B-G 算法可用下式表示:

$$Q = Q_0 + e^2 w \beta \quad 1-3$$

其中, $Q_0 = \int \left[\sum_{i=1}^n a_i G_i(\rho) - F(\rho) \right]^2 J(\rho) dA$, e^2 为天线亮温误差造成的构造观测亮温值的

误差。 β 为平滑参数, w 为尺度因子。由 1-1—1-3 式, 使 1-2 式最小化的权重系数可由下式表示:

$$a = V^{-1} \left[v + \left(\frac{1 - u^T V^{-1} v}{u^T V^{-1} u} \right) u \right] \quad 1-4$$

其中, $V = G + wE\beta$, $u_i = \int G_i(\rho) dA$, $v_i = \int G_i(\rho) F(\rho) J(\rho) dA$, $G_{ij} = \int G_i(\rho) G_j(\rho) J(\rho) dA$ 。

在地面测量各频率天线增益已知的情况下, 权重系数 a 可由 1-4 式得到。根据地面测量天线方向图和微波成像仪轨道和扫描几何模拟, 得到扫描方向每一个像素的分辨率匹配权重系数。微波成像仪通道匹配分辨率设计两种: 以 10.65GHz 观测为目标, 其他频点降低分辨率到该分辨率; 以 37GHz 观测为目标, 低频进行分辨率增强, 高频进行降低分辨率到该频点。

2. 业务化产品介绍

微波成像仪产品包括大气和地表共 6 类定量产品，可用于气候变化、灾害预警、生态环境监测等研究领域。标准产品为 HDF 格式，产品具体情况列表如下：

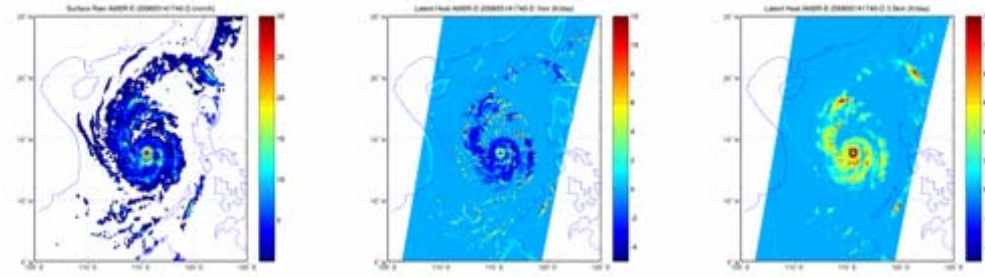
表 1-2 微波成像仪产品列表及其主要技术指标

| 产品名称 | 覆盖范围 | 分辨率 (km) | 信息量 | 精度 | 频次 (日) |
|------|------|----------|------|--------------|--------|
| 降雨率 | 区域 | 18X30 | 20M | 30% | 2 次 |
| | 全球 | 18X30 | 200M | 30% | 2 次 |
| 云水含量 | 区域 | 18X30 | 20M | 30% | 2 次 |
| | 全球 | 18X30 | 300M | 30% | 2 次 |
| 可降水量 | 区域 | 27X45 | 20M | 30% | 2 次 |
| | 全球 | 27X45 | 300M | 30% | 2 次 |
| 积雪深度 | 区域陆地 | 30X50 | | 30%或 10cm | 2 次 |
| | 全球陆地 | 25 | 40M | 30%或 10cm | 2 次 |
| 雪水当量 | 区域陆地 | 30X50 | | 30%或 2cm | 2 次 |
| | 全球陆地 | 25 | 40M | 30%或 2cm | 2 次 |
| 陆表温度 | 区域陆地 | 50X85 | | 3K | 2 次 |
| | 全球陆地 | 25 | 10M | 3K | 2 次 |
| 地表湿度 | 区域陆地 | 50X85 | | 5% | 2 次 |
| | 全球陆地 | 25 | 10M | 5% | 2 次 |
| 干旱指数 | 区域陆地 | 50X85 | | | 2 次 |
| | 全球陆地 | 25 | 10M | | 2 次 |
| 洪涝指数 | 区域陆地 | 50X85 | | | |
| | 全球陆地 | 25km | 10M | | 2 次 |
| 海面温度 | 区域洋面 | 50X85 | 30M | 2k | 2 次 |
| | 全球洋面 | 50X85 | 300M | 2k | 2 次 |
| 海面风速 | 区域洋面 | 30X50 | 30M | 3m/s | 2 次 |
| | 全球洋面 | 30X50 | 300M | 3m/s | 2 次 |

2.1 降水和云水产品

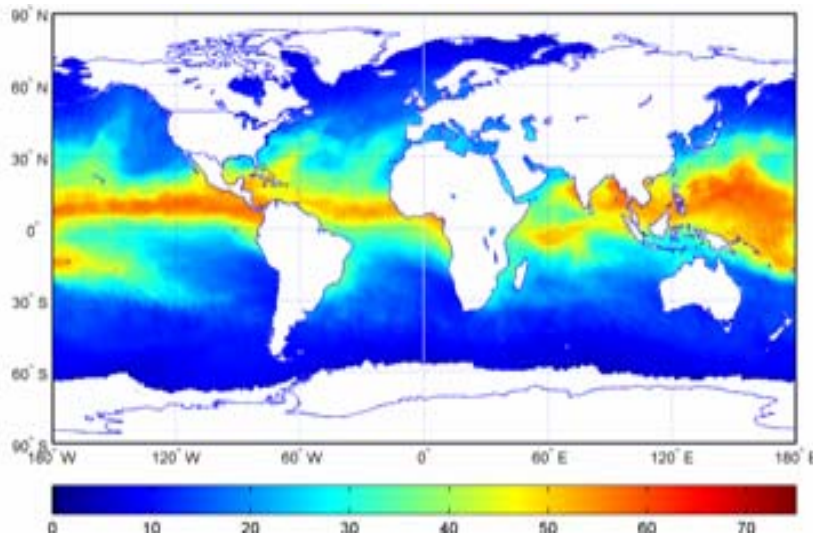
微波降水产品是风云三号地面应用系统的业务产品，包括降雨率和云水含量两个定量参数。降雨率参数是在像元覆盖范围内的平均地面雨强，单位为 mm/hr。云水含量参数是只考虑直径小于 100um 液态水滴得到的云单位体积的平均含水量，单位 mg/m³。微波降水产品示例如

下图。下图从左至右为降水 and 不同高度的潜热。



2.2 海上大气可降水产品

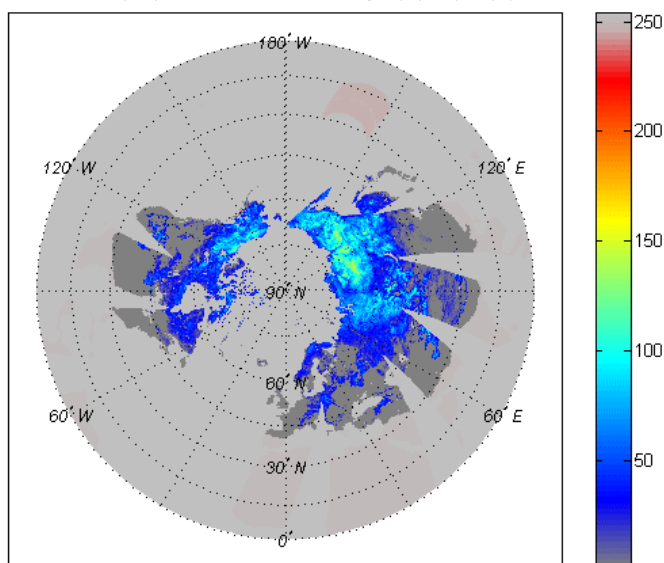
大气可降水 (TPW): 由多通道微波亮温组合反演得到的大气可降水。单位 mm。大气可降水产品分为全球产品和区域产品, 每日生成 2 次。此外还将生成多种空间分辨率的候、旬、月平均大气可降水产品。海上大气可降水产品示例如下:



2.3 雪深和雪当量产品

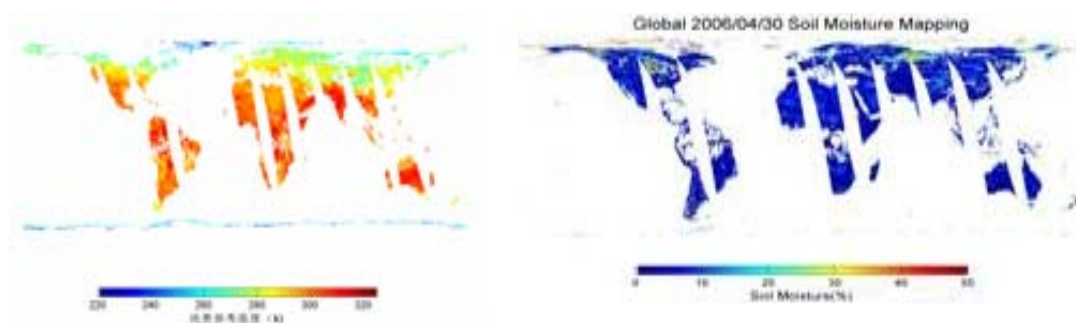
微波成像仪反演雪深是指地表之上有积雪覆盖时, 地表与积雪界面至积雪与大气界面之间雪层的厚度, 雪深的单位为厘米。雪水当量为单位面积上 (1 平方厘米) 具有某深度的积雪全部溶化后, 在同样单位面积上这些雪水的深度, 雪水当量的单位为毫米。雪深和雪当量参数反演采用微波成像仪(MWRI)投影综合数据集文件, 提取微波成像仪 10.65、18.7、23.8、36.5、89.0 GHz 各极化通道观测数据, 以物理统计反演算法为主算法、经验统计反演算法为备用算法, 获取雪深和雪水当量参数, 生成方位角等面积投影的微波成像仪积雪产品。积雪产品按空间尺度分全球和中国区域产品; 按时间尺度分日、候、旬、月产品。产品示例如下

2006年1月9日AMSR-E全球雪水当量图



2.4 地表土壤水份产品

微波地表土壤水分产品是观测像元范围内土壤体积含水量，单位为%。土壤水份参数反演利用微波成像仪获取的 5 个频段共 10 个通道经过定标定位的亮温数据，利用不同频率和不同极化通道观测辐射亮温对地表介电常数/土壤水分的响应特性，在微波地表辐射传输模型模拟地表辐射特性的基础上，建立反演模型得到地表土壤体积含水量和陆表温度参数定量产品。产品示例如下：



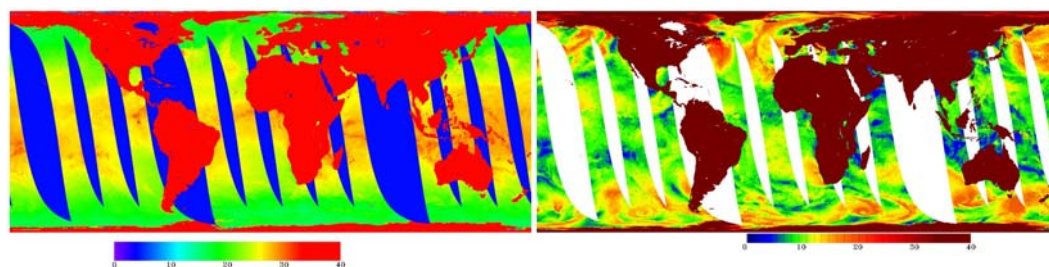
2.5 洪涝指数产品

微波洪涝指数为微波成像仪低频通道（10GHz 和 18GHz）极化亮温差与极化亮温和之比（PR）； $PR = (TB_v - TB_h) / (TB_v + TB_h)$ ；为无量纲参数。

2.6 海表产品

风云三号微波成像仪海表产品，是利用风云三号卫星搭载的微波成像仪，通过 10.65GHz，

18.7 Ghz, 23.8 Ghz, 310.5 Ghz, 89GHz, 五个频率的十个通道, 探测反演海表温度和海表风速。该产品包含两项内容, 分别为海面温度和海面风速。产品包括轨道产品, 日产品, 以及周、月平均合成产品。生成的 2 级产品空间分辨率, 海表温度是 50×85 km, 海表风速是 30×50 km, 产品精度, 海表温度控制在 2.5k, 海表风速控制在 3m/s。3 级产品在 $16\text{km} \times 16\text{km}$ 圆柱等距网格上生成。产品示例如下:



海面温度产品

海面风速产品

3. 结论

微波成像仪是我国第一个星载高灵敏度被动微波成像探测仪器。除微波成像仪外, FY3 卫星还装载有微波温度计和湿度计, 用以进行大气温湿度廓线反演。这些微波仪器与 FY3 卫星上光学探测仪器的综合观测结果, 对灾害监测、气候变化、生态环境监测都有十分重要的作用。尤其是微波仪器探测结果, 对气候模式具有不可替代的作用。由于 FY3 微波成像仪结构的复杂性, 尤其是定标系统的独特设计, 使得在轨定标必须考虑各种环境辐射的影响, 建立精确的定标模型才能达到要求的定标精度。考虑到业务化运行的需要, 微波成像仪产品算法都是在成熟算法的基础上, 综合考虑微波成像仪观测参数特性进行算法改进建立的。算法精度利用国外同类卫星数据经过了前期初步验证, 产品精度进一步验证结果需要到卫星在轨测试结束后得到。此外, 卫星在轨测试阶段, 还要根据 FY3-MWRI 实际观测数据对产品算法进行调整。

参考文献:

1. 《风云三号产品生成系统初步设计技术报告》, 国家卫星气象中心, 2006
2. 《FY-3(01 批)探测仪器技术指标要求》, 国家卫星气象中心, 2003
3. 《微波成像仪正样研制报告》, 上海航天通信技术研究所, 2004