

# FY-1C 可见光通道衰减分析及订正试验\*

谷松岩 邱 红 刘玉洁 范天锡

(国家卫星气象中心,北京 100081)

## 提 要

利用 FY-1C 连续两年的遥感资料,以敦煌辐射校正场为分析区,系统分析了 FY-1C 可见光、近红外通道的衰减特征,开展了通道衰减订正试验。分析结果表明,FY-1C 除可见光通道衰减强烈外,其它各可见光、近红外通道衰减性能稳定。利用统计分析法,可以建立定标系数衰减订正值随时间的变化关系。订正后的定标系数与 2000 年辐射校正场外定标实验结果一致性很好。更新后的定标系数可以有效克服通道衰减带来的通道反射率测值误差,提高 FY-1C 可见光、近红外通道遥感资料定量应用的精度。

关键词:扫描辐射计 通道衰减 订正

## 引 言

任何星载遥感仪器在轨使用期间,仪器性能上都存在不同程度的衰减。客观评价遥感仪器在轨衰减特性,及时调整定标系数,以便有效订正仪器衰减带来的误差,是一项十分必要的工作。FY-1C 已经在轨运行 2 年多,已超过设计寿命,积累了连续两年多的遥感资料。科学分析、客观评价 FY-1C 扫描辐射计可见光通道的衰减特性,有效订正衰减产生的误差,是 FY-1C 遥感资料定量化应用中的关键一步。

一般在轨卫星遥感仪器的衰减分析及定标校验可以通过地面辐射校正观测试验来完成。中国已在敦煌建立了辐射校正场(CRCS),并完成了多颗国产卫星的外定标试验。受条件制约,辐射校正试验不能常年实时进行,给在轨卫星遥感仪器的性能监测和分析带来不便。近年来,美国利用白沙靶场等均匀稳定的高反照率下垫面作为参照物,对星载可见光、近红外通道遥感仪器进行在轨仪器性能监测和衰减订正试验,取得了很好的应用效果<sup>[1]</sup>。国内直接利用长时间序列遥感数据的统计分析来完成遥感仪器通道衰减特性分析及衰减订正试验的工作,还不多见。这里我们以敦煌辐射校正场为分析区,统计分析了 FY-1C 可见光、近红外通道的衰减特性,进行了通道衰减订正试验。并将分析试验的结果与敦煌辐射校正场外定标的试验结果进行了对比分析,二者比较一致。衰减订正结果已通过国际互联网向用户提供,对今后 FY-1C 可见光、近红外通道遥感资料的定量应用会有帮助。

\* 国家 973 项目 G199809040909 资助。

2001-11-03 收到,2001-12-24 收到修改稿。

### 1 FY-1C 可见光 近红外通道衰减特性分析

一般星载遥感仪器可见光、近红外通道的通道衰减特性分析都是以物理特性均匀稳定、反射率比较高的地表下垫面为参照物,分析相同观测条件下,对同一目标观测时,通道反射率测值随时间的变化。大部分地表下垫面目标物都具有非朗伯体特性,目标的反射具有方向性。卫星观测到的地表下垫面目标反射率的大小受太阳天顶角和卫星扫描角等物理量影响。在进行 FY-1C 可见光、近红外通道衰减特性分析时,需要从卫星观测到的物理特性均匀稳定的地表下垫面目标分析区通道反射率测值中,滤除大气和地表非朗伯体特性的影响,有效提取仪器衰减产生的信号衰减变化量。数据分析处理时,选取敦煌辐射校正场 5 km × 5 km 分析区,从地标导航精确定位后的 FY-1C 1A.5 数据中提取分析区样本数据集。表 1 给出了 FY-1C 可见光、近红外通道的通道光谱宽度。

表 1 FY-1C 可见光、近红外通道光谱宽度

| 通道   | 1           | 2           | 6           | 7           | 8           | 9           | 10           |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 通道宽度 | 0.58 ~ 0.68 | 0.84 ~ 0.89 | 1.58 ~ 1.64 | 0.43 ~ 0.48 | 0.48 ~ 0.53 | 0.53 ~ 0.58 | 0.90 ~ 0.965 |

为了合理进行卫星扫描角订正,首先统计分析经过太阳高度角订正后晴空条件下的通道反射率测值随卫星扫描角的变化情况,尝试利用简单的统计订正方法进行相应的订正试验。以月为时间分析单元,选取不同卫星扫描角的晴空样本。得到 FY-1C 各可见光、近红外通道 2000 年逐月晴空条件下通道反射率测值随扫描角的变化曲线。星下点左右两个像素数为 1024 和 1025,大于 1025 时,扫描角定义为正;小于 1024 时,扫描角定义为负。这种定义条件下,卫星第 3 轨观测到敦煌辐射校正场时,扫描角为正;卫星第 2 轨观测到辐射校正场时,扫描角为负。样本分析结果表明:扫描角的绝对值小于 10° 接近星下点观测时,卫星通道反射率测值随扫描角变化不大;通道反射率随扫描角的变化特征因通道而异。因此在做 FY-1C 可见光通道衰减分析时,尽量选取扫描角小于 10° 的近星下点观测资料。每月样本数过少时,通过订正处理方法来扩大样本数,使每月分析样本的数量不少于 5 个,以保证分析样本统计意义上的代表性。图 1 和图 2 以通道 1 为例简述了

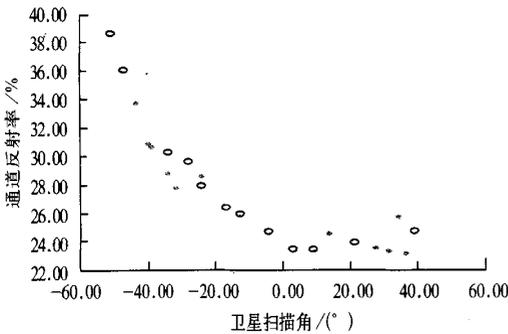


图 1 2000 年 1 月 FY-1C 通道 1 卫星扫描角统计订正数据选取简述图  
(黑圆圈标注数据为被选中的分析样本)

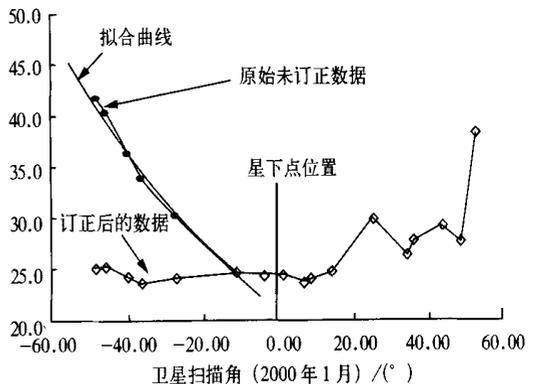


图 2 扫描角订正简视图

对第2轨资料进行扫描角订正的过程,选取图1中用圆圈标出的分析样本统计回归得到图2中的拟合曲线,进一步订正可减少扫描角的影响。拟合分析时,相关系数达到98.76%。

卫星扫描角订正处理后,为了有效滤除大气等其它非仪器衰减变化引起的资料变化,采用分析资料月平均处理以及对月平均资料进行拟合订正的处理方法,根据长时间序列遥感资料统计回归分析原理,按通道分别拟合,进行大气订正处理。可以根据数据的具体变化情况分别进行线性和非线性拟合。保留数据的脉动量,而订正其平均量。订正处理可以大大降低数据的离散度,有利于分析仪器的衰减特征。结合对数据所进行的云检测及滤波等处理后,实现分析数据的基本处理和质控。得到如图4所示的分析数据。图3为原始取样样本散点图,仅以通道1为例。其它通道具有类似的离散分布特征,但没有显著的衰减现象。

通道衰减分析选取2000年1月到2001年1月完整的1年时间段内,经质量控制等分析处理后的分析资料(如图2所示)进行。分别计算1年时段内的通道衰减量、通道平均月衰减率和1年分析时段内通道总的衰减率。分析结果如表2和表3所示。

通道衰减分析结果表明, FY-1C扫描辐射计除通道1衰减强烈外,其它通道的仪器性能比较稳定。通道1衰减特性突变点为2000年8月21日。衰减突变前,通道1反射率月平均衰减率为0.07%;突变后,通道反射率月平均衰减率为1.02%。其它通道月平均衰减率除通道7和通道8分别为0.29%和0.38%外,均不超过0.2%。

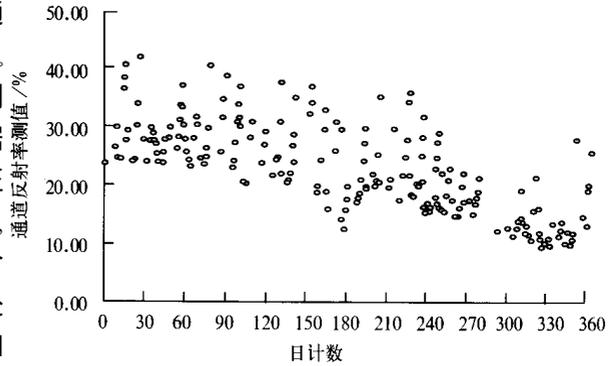


图3 2000年FY-1C通道1原始取样样本

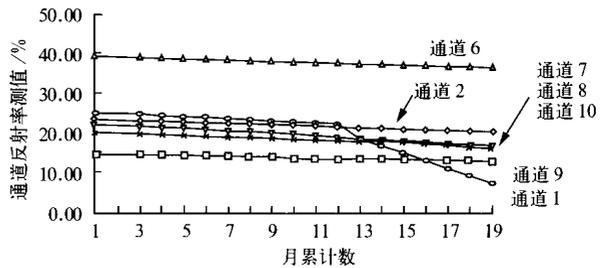


图4 FY-1C可见光、近红外通道分析处理及质量控制后通道反射率月平均值分析样本数据变化曲线 (从1999年9月算起到2001年3月)

表2 通道2、6、7、8、9和10衰减分析结果 %

|            | 通道2   | 通道6   | 通道7   | 通道8   | 通道9   | 通道10  |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2000年1月反射率 | 22.55 | 38.67 | 21.18 | 20.79 | 14.15 | 19.10 |
| 2001年1月反射率 | 20.51 | 36.84 | 16.63 | 17.37 | 12.90 | 17.01 |
| 总衰减量       | 2.04  | 1.83  | 4.55  | 3.42  | 1.25  | 2.09  |
| 月平均衰减量     | 0.17  | 0.15  | 0.38  | 0.29  | 0.104 | 0.17  |
| 衰减率        | 90.9  | 95.3  | 78.5  | 83.5  | 91.2  | 89.1  |

注:总衰减量 =  $R(2000年1月) - R(2001年1月)$ ; 月平均衰减量 =  $[(R(2000年1月) - R(2001年1月)) / 12]$ ; 衰减率(%) =  $R(2001年1月) / R(2000年1月)$ 。

表 3 通道 1 衰减分析结果

|          | 2000 年 1 月 | 2000 年 8 月 | 2001 年 1 月 |
|----------|------------|------------|------------|
| 通道 1 反射率 | 23.95      | 23.10      | 10.89      |
| 衰减量      | 0.85       | 12.21      |            |
| 月平均衰减量   | 0.07       | 1.02       |            |
| 衰减率      | 96.5       | 47.1       |            |

注:衰减量(2000 年 1 月至 2000 年 8 月) =  $R(2000 \text{ 年 } 1 \text{ 月}) - R(2000 \text{ 年 } 8 \text{ 月})$ ; 衰减量(2000 年 8 月至 2001 年 1 月) =  $R(2000 \text{ 年 } 8 \text{ 月}) - R(2001 \text{ 年 } 1 \text{ 月})$ ; 月平均衰减量(2000 年 1 月至 2000 年 8 月) =  $[R(2000 \text{ 年 } 1 \text{ 月}) - R(2000 \text{ 年 } 8 \text{ 月})] / 7$ ; 月平均衰减量(2000 年 8 月至 2001 年 1 月) =  $[R(2000 \text{ 年 } 8 \text{ 月}) - R(2001 \text{ 年 } 1 \text{ 月})] / 5$ ; 衰减率(2000 年 1 月至 2000 年 8 月)(%) =  $R(2000 \text{ 年 } 8 \text{ 月}) / R(2000 \text{ 年 } 1 \text{ 月})$ ; 衰减率(2000 年 8 月至 2001 年 1 月)(%) =  $R(2001 \text{ 年 } 1 \text{ 月}) / R(2000 \text{ 年 } 8 \text{ 月})$ 。

## 2 衰减订正试验

1999 年和 2000 年两次外定标试验中,对敦煌辐射校正场地物波谱的实地观测结果表明敦煌辐射校正场地物波谱特征的一致性很好,两年间未见明显变化。通过对 1999 年 7 月辐射校正场外定标同步观测数据进行的对比分析,可以从结果中看到除通道 6 和通道 9 以外,其它通道两种分析结果比较一致。与实际测量的地物波谱特性对比分析后可以断定 FY-1C 通道 6 和通道 9 发射前的定标结果有些偏差,两个通道分别偏高和偏低。FY-1C 可见光、近红外通道的衰减订正试验以 1999 年 7 月外定标结果为参考标准,进行各通道的衰减订正。通道反射率与通道记数值间的对应关系为:

$$N = \frac{(R - I_0)}{g_0}$$

其中  $N$  为通道记数值,  $I_0$  为定标系数中的截距,  $g_0$  为定标系数中的斜率。  $I_0$  和  $g_0$  取 1999 年外定标结果。经上式转换可得各通道逐月星上记数值。FY-1C 白天轨道外空记数值很稳定,两年来,只有个别轨道短时间内发生过一个记数值的脉动。衰减订正定标系数计算时,取两年来,外空记数值分析样本的众数。一般定标分析时认为传感器对外空观测时,反射率测值为 0,与分析数据结合,两点均满足定标方程,求解两元一次方程组可得新的订正定标系数为:

$$g = \frac{R_0}{N - N_s}$$

$$I = - \frac{R_0 \times N_s}{N - N_s}$$

其中  $R_0$  为参考点通道反射率,在我们的工作中,取 1999 年 7 月 7 日外定标观测到的各通道反射率测值经辐射传输计算后得到的入瞳表观反射率;  $N$  为星上实时观测到的与外定标观测时间一致的计数值;  $N_s$  为外空记数值,可从卫星存档 1B 数据中读取。据此可以得到各通道月平均定标系数。

美国 NOAA 卫星解决可见光、近红外通道衰减时,为便于应用,将定标系数的时变性,拟合为随时间变化的线性方程,得到随日计数而变的定标系数<sup>[2]</sup>。参照 NOAA 卫星的处理方法,将 FY-1C 更新后的定标系数表示为线性时变关系,得到如下公式。

$$g = g_0 + \delta g(\delta t) \quad I = I_0 + \delta I(\delta t)$$

其中  $g$  为各通道新定标系数的斜率;  $g_0$  为各通道 1999 年 7 月 7 日外定标得到的参考定标系数中的斜率, 是斜率衰减变化的参考值;  $\delta g(\delta t)$  为各通道随时间变量 ( $\delta t$ ) 变化的斜率订正量。  $I$  为各通道新定标系数的截距;  $I_0$  为各通道 1999 年外定标得到的参考定标系数中的截距, 是截距衰减变化的参考值;  $\delta I(\delta t)$  为各通道随时间变量 ( $\delta t$ ) 变化的截距订正量。

$\delta g(\delta t)$  和  $\delta I(\delta t)$  通过表 4 中的算式计算得到。

表 4 定标系数订正量随时间变化的关系式

|       |   |                                  |
|-------|---|----------------------------------|
| 通道 1  | $\delta g_1 = 0.0058177\delta t$                |                                  |
|       | $\delta I_1 = -0.0189922\delta t$               | (2000 年 8 月以前)                   |
|       | $\delta g_2 = 0.00450976\exp(0.242181\delta t)$ |                                  |
|       | $\delta I_2 = -0.0628689\exp(0.23353\delta t)$  | (2000 年 8 月以后)                   |
| 通道 2  | $\delta g = 0.00122757\delta t$                 | $\delta I = -0.0135196\delta t$  |
| 通道 6  | $\delta g = 0.00036982\delta t$                 | $\delta I = -0.00594312\delta t$ |
| 通道 7  | $\delta g = 0.00227466\delta t$                 | $\delta I = -0.0318568\delta t$  |
| 通道 8  | $\delta g = 0.0112695\delta t$                  | $\delta I = -0.012404\delta t$   |
| 通道 9  | $\delta g = 0.000913383\delta t$                | $\delta I = -0.0117871\delta t$  |
| 通道 10 | $\delta g = 0.00197862\delta t$                 | $\delta I = -0.023931\delta t$   |

注:表中关系式是根据图 2 中所示的 19 个月平均资料组成的分析样本统计回归得到的,回归曲线的相关系数均大于 96.0%。

根据上面关系可以得到指定时间的订正定标系数。其中通道 1 的分段定标系数拐点为 2000 年 8 月 21 日。在上面公式中,  $\delta t$  为时间变量, 是从 1999 年 7 月算起的月累积计数或日累积计数两个变量的函数。也可从日计数出发换算得到。具体换算方法如下:

已知月、日时, 设  $N_m$  为从 1999 年 7 月为起始点累积的月数、 $M_d$  为日数、 $I_{dm}$  为当月总日数,  $\delta t = N_m + M_d / I_{dm}$ 。例如, 2000 年 3 月 25 日, 时间变量可计算为  $\delta t = 9 + 25/31 = 9.806$ 。其中 9 为从 1999 年 7 月记起的总月数, 25 为 3 月中的日数, 31 为 3 月当月总日数。

已知日计数  $I_d$  时(例如已知  $I_d$  为 2001 年第 184 日), 时间变量计算如下

$$M_d = 184 - (31 + 28 + 31 + 30 + 31 + 30) = 3$$

$$N_m = 7(2001 \text{ 年中的月份}) + 12(2000 \text{ 年全年总月数}) + 5(1999 \text{ 年 } 7 \sim 12 \text{ 月月数}) \\ = 24$$

$$\delta t = N_m + M_d / I_{dm} = 24 + 3/31 = 24.097$$

将  $\delta t$  变量代入定标系数衰减订正计算公式, 可得相应时刻的订正定标系数。

如上的衰减分析及订正试验, 除通道 1 以外, 都是在对分析数据进行了—阶近似, 只考虑了线性变化量, 而忽略了非线性项的条件下得到的。仪器实际的衰减情况往往很复杂, —阶近似的处理方法会给分析结果带来误差, 对 FY-1C 通道 1 的—阶近似衰减分析, 就垫在这种情况下。2000 年 8 月通道 1 衰减突变之后的订正, 尝试使用了指数订正算法。等积累到更长的分析资料时间序列时, 可以进行进一步的多项式高阶近似分析。对于定量应用要求比较高的情况, 可以根据实测资料, 缩短分析数据的时间间隔, 在短时段内—

阶近似的精度要优于长时段内的一阶近似。可以改善衰减订正的效果。

### 3 衰减订正效果检验

图 5 是衰减订正前后通道 1 敦煌分析区 2000 年分析样本随时间的变化曲线。带 + 号的线为订正后的情况,圆点线为订正前的情况。可以看出,订正后敦煌分析区通道反射率测值随时间的变化趋于平缓,衰减被有效地订正了。衰减订正实验订正了长时间序列的平均变化量,而保留了时变数据的脉动量,一定程度上订正遥感仪器因通道衰减而产生的偏差。FY-1C 通道 1 仪器衰减率突变的拐点为 2000 年 8 月 21 日。长时间序列分析结果表明 2000 年 8 月 21 日之前,通道衰减稳定,之后衰减率发生突变,逐渐增加。

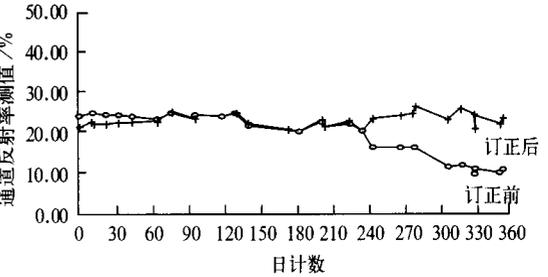


图 5 通道 1 衰减订正试验效果示意图  
(2000 年 1 月到 2000 年 12 月)

表 5 2000 年 7 月外定标结果与衰减订正分析结果的对比

|             |    | 通道 1    | 通道 2    | 通道 6    | 通道 7    | 通道 8    | 通道 9    | 通道 10   |
|-------------|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 外定标         | 斜率 | 0.1443  | 0.1117  | 0.0671  | 0.0740  | 0.0682  | 0.0948  | 0.1134  |
| (A)         | 截距 | -1.7321 | -1.2292 | -0.8050 | -1.0354 | -0.7499 | -1.2319 | -1.3612 |
| 衰减订正        | 斜率 | 0.1451  | 0.1170  | 0.0653  | 0.0804  | 0.0676  | 0.0997  | 0.0997  |
| (B)         | 截距 | -1.7409 | -1.2873 | -0.8485 | -1.1258 | -0.7437 | -1.2956 | -1.5284 |
| 误差偏差量       | 斜率 | 0.0007  | 0.0053  | -0.0018 | 0.0064  | -0.0006 | 0.0049  | -0.0137 |
| (B-A)       | 截距 | -0.0088 | -0.0581 | -0.0435 | -0.0904 | 0.0062  | -0.0637 | -0.0637 |
| 相对误差        | 斜率 | 0.49    | 4.7     | -2.7    | 8.65    | -0.88   | 5.17    | 12.08   |
| (B-A)/A (%) | 截距 | 0.5     | 4.7     | 5.4     | 8.7     | -0.82   | 5.17    | 5.2     |

表 5 是 2000 年敦煌辐射校正场外定标结果与在轨数据分析衰减订正结果的对比分析情况。结果表明,以在轨观测数据为基础,分析仪器衰减特征,可以得到与外定标结果比较一致的有效订正衰减量的效果。其中,通道 1 和通道 8 两种方法所得结果的一致性最好;通道 10 两种方法所得结果的一致性稍差。

### 4 结束语

本文通过 FY-1C 可见光、近红外通道的衰减分析及衰减订正试验,得到了各通道反射率衰减订正系数,通过定标系数的订正补偿,取得了一定订正效果。衰减分析最理想的特征区应为通道反射率测值比较高的均匀稳定下垫面。但我们只取到了下垫面特性为戈壁滩的敦煌分析区,敦煌分析区各通道的反射率测值并不很高,这会影响到订正定标系数的有效适用范围。同时,星载遥感仪器的衰减有时会出现非线性特性,也会给我们得到的定标订正结果的外推使用带来误差。总之,星载遥感仪器的衰减分析及订正,应该逐步成为业务实时监测内容。有效跟踪分析,会保证实时订正的效果,保证遥感资料的定量应用精度。

致谢：在完成上述工作过程中得到卫星气象中心张玉香、戎志国、胡秀清、刘诚、蔡彬、FY-1C 图集资料处理组等许多同志的帮助和指导，在此一并致谢。

### 参考文献

- 1 Tanhnk W R, Coakley J A. Improved calibration coefficients for NOAA-14 AVHRR visible and near-infrared channels. *Int. J. Remote Sensing*, 2001, **22**: 1269 ~ 1283.
- 2 Rao C R N, Chen J. Post-launch calibration of the visible and near-infrared channels of the AVHRR on NOAA-14 spacecraft. *Int. J. Remote Sensing*, 1996, **17**: 2743 ~ 2747.

## FY-1C VISIBLE CHANNELS' ALBEDO ATTENUATION ANALYSIS AND CORRECTION EXPERIMENT

Gu Songyan Qiu Hong Liu Yujie Fan Tianxi

( National Satellite Meteorological Center, Beijing, PRC, 100081 )

### Abstract

The remote sensing data of FY-1C visible channels in the Dunhuang test area in two years are used to analyze the channels' albedo attenuation. At the same time, some correction experiments have been conducted. Analysis results show that in most FY-1C channels the instrument functions well in orbit, except in Channel 1. By using a statistic method, a set of new calibration coefficients over time is obtained. There is a good coherence between experiment results and CRCS field observation.

**Key words:** Scanner Radiometer Channel attenuation Correction experiment