

风云二号卫星地球观域修正算法

钱 云

(国家卫星气象中心,北京 100081)

摘 要

风云二号静止气象卫星在获取图像时,必须使扫描辐射计的观域对准地球。卫星在轨道上受到各种摄动力的作用,使轨道和姿态改变,扫描辐射计的地球观域随之发生变化。卫星扫描辐射计对地球观域的偏差会影响图像定位的精度,因此对准观域的工作是日常业务工作的一部分,不仅在卫星定点之初启动观测时,而且在业务运行的过程中,都需要通过地面遥控指令进行修正。该文提出了一种风云二号静止气象卫星扫描辐射计地球观域修正量和调整方向的算法,以替代人工目测卫星原始云图进行的卫星观域调整控制决策。这种算法的实施可以提高风云二号气象卫星云图获取作业的可靠性。

关键词: 静止气象卫星;扫描辐射计;地球观域;修正算法

引 言

本文介绍风云二号静止气象卫星的地球观域修正算法。静止气象卫星在获取图像时,必须使扫描辐射计的观域对准地球。静止气象卫星相对于地球并非绝对静止。受到各种摄动力的作用,卫星的轨道和姿态在不断地改变,扫描辐射计的地球观域也随之发生变化^[1]。因此对准观域的工作是日常业务工作的一部分,不仅在卫星定点之初,观测启动之时,而且在业务运行的过程中,都需要不断通过地面遥控指令进行修正。风云二号气象卫星地球观域自动修正算法的实施,可以提高风云二号气象卫星云图获取作业的可靠性。

1 自旋稳定静止气象卫星云图观测原理

风云二号静止气象卫星定点在约 36000 km 的地球赤道上空。在这个高度上,卫星与地球自转同步,相对于地球静止。星载扫描辐射计每半小时可以获得一幅地球全景云图,约覆盖地球的三分之一。风云二号卫星扫描阶段所获取的可见光、红外、水汽原始观测数据,尚不能组成可用的图像,它们被实时传输至地面应用系统,由地面应用系统处理成一幅相当于在卫星所在位置直视地球所看到的可用图

像,并处理出各种定量产品,为用户提供服务。

在自旋静止气象卫星上进行云图观测,要解决观域对准、图像配准、图像定位 3 个问题:观域对准,即扫描辐射计要对准地球开机;图像配准,即在获取一幅图像的 25 min 内,在卫星、地球、太阳都在不断运动的条件下,要将组成一幅图像的各条扫描线准确地拼接成一幅地球影像图,与卫星在太空静止不动地对地球观测所拍摄的照片一样;图像定位,即对图像上的每一个观测像元,确定其地理位置^[2]。本文讨论其中的第一个问题。

风云二号是自旋稳定的静止气象卫星。卫星自旋周期为 600 ms。安装在卫星圆柱体侧面的扫描辐射计利用卫星的自旋进行扫描。卫星每自旋一周,扫描辐射计获取一组扫描线。自旋一周以后,卫星沿自旋的垂直方向步进一步,进行下一条扫描线的观测。获取一幅图像约须扫描 2500 行,历时 25 min。图像上的每个像元,观测时间都不同,但是已知。另外,在整幅图像的获取过程中,必须确保在每一条扫描线里都含有地球,从地球的左边缘到右边缘都必须包含在扫描线里。从静止高度上看,地球的张角约为 17° 。为了确保整个地球被观测到,实际观测范围设计为 20° ,其余 340° 卫星指向外空不进行观测^[3]。也就是说,扫描辐射计随卫星自旋进行扫描观测,只在面向地球的时候才开机。

卫星除自旋以外,还在围绕地球以每天大约一

周的角速度公转。为了补偿地球公转,使图像扫描仪保持在面向地球时进行观测,每过 70.4 条扫描线,扫描仪要提前 $292.57 \mu\text{s}$ 打开。在卫星自旋周期为标称值 600 ms 的情况下, $292.57 \mu\text{s}$ 的角度当量为 0.1755° ^[4]。采取这个措施,一方面可以确保每一条扫描线中都包含地球的完整影像,另一方面可以精确地把卫星的时钟信号传递给地面,供地面系统将逐条扫描线配准成图像。这就需要设立一个信号基准,利用这个基准,卫星控制扫描辐射计按预定时间开、关机,这个基准是由太阳提供的。

卫星每自旋一周,不仅看到地球一次也看到太阳一次。卫星用太阳作为参照物,对准对地观测的各条扫描线。这是因为太阳光非常强,卫星对太阳的位置可以观测得非常准。在卫星圆柱体的侧面,不仅安装了对地观测的扫描辐射计,还安装了太阳敏感器。卫星每自旋一周,扫过太阳一次,太阳传感器产生一个精太阳脉冲信号,其精度相当于十分之一一个对地观测的可见光像元。卫星在把精太阳脉冲信号传到地面的同时,还产生一组定时信号,用于控制扫描辐射计开机。扫描辐射计总是在太阳脉冲获得以后 $292.57 \mu\text{s}$ 整数倍的瞬间打开。提前观测的次数用计数值 N 控制,每天更新一次。在一天的初始, N 赋以一天里需要调整的总次数 2051,逐步递减至 0,再开始另一天的计数。在太阳脉冲获得以后 $292.57 \mu\text{s}$ 整数倍的瞬间打开扫描辐射计这个措施,既保证扫描辐射计在一天的时段内每一条扫描线里都包含完整的地球,又通知地面系统太阳脉冲到达的精确时间。

卫星产生的开机定时信号与辐射计扫过地球的时间(或空间角度)关系如图 1 所示。定时信号是一组有序的脉冲信号,由扫描辐射计定时角度发生器计数译码产生。定时角度发生器是一个 12 位二进制循环计数器,其输入时钟频率为精太阳脉冲频率的 2^{12} 倍。定时信号译码时钟频率的角度当量是 $292.57 \mu\text{s}$ 角度当量的一半; $360^\circ/2^{12}=0.0878906^\circ$ ^[5-7]。

图 1 示意地表示,辐射计必须在观测到地球中心之前一定的时间开机,扫描线中才能包含完整的地球。从图 1 中可以分别看到星下点所在行的各种标志位置离地球中心位置的提前角度当量。这些标志位置包括:云图边缘开始、扫描同步检测码(Scan Synchronous Detector, SSD)、扫描线数据开始、扫描线数据开始预告、通用数据调制器(Versatile Data Modulator, VDM)信号开始等。

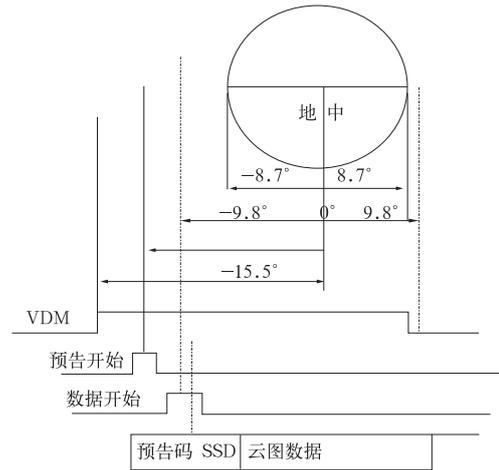


图 1 卫星定时信号与辐射计扫描地球的关系示意图

Fig. 1 Relationship between satellite timing signal and radiometer scanning the Earth

太阳脉冲用两个信道传送给地面系统:一个宽带信道,一个窄带信道。由于信道资源的限制,太阳脉冲用一个窄信道传送给地面。地面系统接收到的太阳脉冲是用窄信道传送的,虽然精度不高,但是正确、可靠的。宽带信道就是对地观测数据传输信道,它是窄带信道的补充,为了在不太准确的窄带信道范围内,进一步确定太阳脉冲发生的具体瞬间,还要利用宽带太阳脉冲传输给地面的信息。一组扫描线的对地观测数据,用一个宽带信道传送给地面,不仅传输了大量的数据,而且精确地通知地面,扫描辐射计是在哪一些可能的瞬间之一开的。太阳脉冲只能发生在从扫描辐射计打开瞬间向前推 $292.57 \mu\text{s}$ 整数倍的若干个离散瞬间之一^[8]。将窄带太阳脉冲告诉地面的大体时间与宽带扫描同步检测码(SSD)相叠合,地面系统可以判断精确的太阳脉冲在卫星上发生的准确时间^[9]。

在自旋一周的过程中,从看到太阳至看到地球的夹角定义为 β 。只要卫星的位置和姿态已知, β 是一个天文参数,可以精确求出。卫星在观测到太阳脉冲以后,再经过 β 这个角度,就可以观测到地球中心^[10-11]。根据地面系统恢复出的太阳脉冲在卫星上发生的准确时间和 β 角参数,逐条扫描线被拼接成一幅完整的地球观测图像。扫描辐射计必须在观测到地球中心以前开机^[12]。这个时间提前量的设置,不仅是为了保证在扫描辐射计开机时间里观测到完整地球影像,也保留了在扫描线开始时从卫星向地面传递必要信息的时间。

2 卫星发射定点之初观域修正角的设定

卫星发射定点之初,辐射计、精太阳敏感器和同步器开机以后,它们各自的时序脉冲出现时刻与精太阳脉冲之间的关系是随机的。也就是说,地面发遥控指令,使辐射计加电进行观测之时,辐射计有可能正面向外空。如果辐射计在没有扫过地球,或部分扫过地球时开机,地面就得不到,或只能部分得到地球图像。因此地面系统需要求出一个补偿角 δ ,用以对卫星的观域进行修正,使光学镜筒正好在扫描地球的这段时间里工作。

如果卫星的位置和姿态精确已知,那么从卫星上看太阳与地球之间的夹角 β 是可以精确算出的。精确的 β 角预报用于图像配准。在观域对准阶段,只要用 β 角的近似值就足够了。设卫星的轨道高度

比地球离太阳的距离小得多(日地平均距离约为地球半径的 2.35 万倍),并且卫星的自旋轴与地球的自转轴平行,那么从卫星上看太阳与地球之间的夹角 β 可以近似地记为:

$$\beta \approx 360^\circ - [15^\circ \times (t_{\text{北京时}} - 1)] \quad (1)$$

式(1)中^[12], 360° 为 105°E 本地时间 00:00 的 β 值, 15° 为每小时 β 角的变化量, $(t_{\text{北京时}} - 1)$ 为 105°E 的地方时,负号表示 β 角随时间增加而减小。

指令和数据接收站(Command and Data Acquisition Station, CDAS)的同步数据缓冲器既接收了宽带信道中的扫描同步检测码(SSD),又接收了窄带太阳脉冲,可以测得二者的 N 值之差 ΔN 。根据 ΔN 值,可以计算得到窄带太阳脉冲与宽带信道中数据开始信号在天球空间中的夹角 α :

$$\alpha = \Delta N \times 0.175543^\circ \quad (2)$$

理想地说,窄带太阳脉冲与宽带信道中数据开

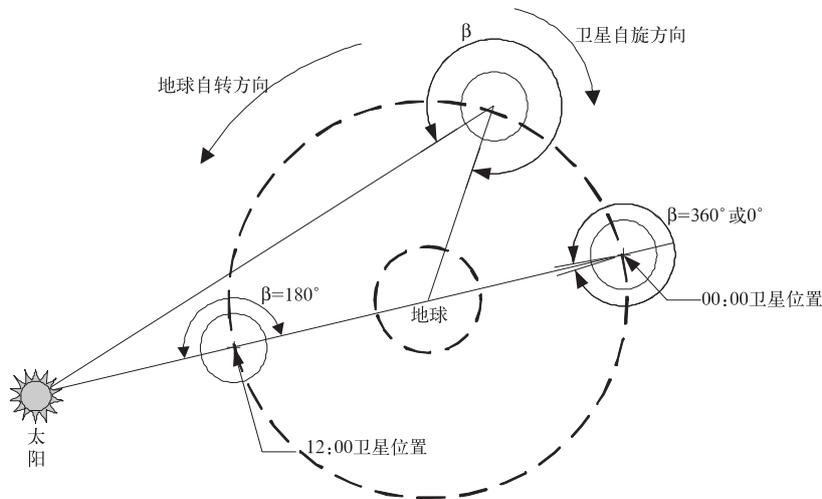


图 2 卫星、地球、太阳三者关系的 β 角示意^[12]

Fig. 2 Angle β formed by Satellite, the Earth and the Sun^[12]

始信号在天球空间中的夹角 α 应该等于从卫星上看太阳与地球之间的夹角 β 。实际上,两者并不完全相等。它们之间的差别可以写为:

$$\alpha - \beta = -9.8^\circ + \alpha_0 - \delta \quad (3)$$

式(3)中, 9.8° 是地球中心线与图像边缘之间的夹角,地球的最大半宽度 8.7° 加 1.1° 的余量; α_0 为辐射计与太阳传感器沿星体圆周上的安装角度差,如果辐射计安装在太阳传感器沿自旋方向的前(后)方, α_0 为负(正)。 δ 为辐射计观域调整角^[13]:

$$\begin{aligned} \delta &= -\alpha + \beta - 9.8^\circ + \alpha_0 \\ &= -(\Delta N \times 0.175543^\circ) + \{360^\circ - \\ &\quad [15^\circ \times (t_{\text{北京时}} - 1)]\} + \alpha_0 - 9.8^\circ \quad (4) \end{aligned}$$

地面系统控制扫描辐射计产生计数译码的方式是在计数器输入时钟序列中增加或减少脉冲,使循环计数器提前或延时达到与定时信号对应译码值。地面向卫星发送数据注入指令,在定时信号发生器的输入时钟序列中加减脉冲,改变定时信号产生的角度,就改变了辐射计沿东西方向扫描行开始位置在天球中的位置,从而改变了辐射计的观域。

地面遥控数据注入指令向定时角度发生器输入时钟加减脉冲数 m ,用以调整观域。

$$m = \frac{\delta}{0.0878906^\circ} \quad (5)$$

每个脉冲对观域调整的角度当量为 0.0878906° ,相

当于 $292.57 \mu\text{s}$ 的一半。观域调整量为:

$$\delta = m \cdot 0.0878906^\circ \quad (6)$$

当 δ 为正数,且 $|\delta| > 180^\circ$ 时,减 N' 个脉冲;当 δ 为正数,且 $|\delta| < 180^\circ$ 时,加 N' 个脉冲;当 δ 为负数,且 $|\delta| > 180^\circ$ 时,加 N' 个脉冲;当 δ 为负数,且 $|\delta| < 180^\circ$ 时,减 N' 个脉冲。

3 常规业务过程中图像观域调整的判据与算法

在常规业务过程中,卫星的实际轨道和姿态受到各种摄动力的作用发生变化,使地球逐渐漂离卫星的观域。一旦地球漂离卫星观域的中心点,就要对观域进行调整,使扫描辐射对准地球。业务运行中每隔 3~5 d 需要对辐射计的地球观域进行修正。

风云二号卫星上安装有两个地球感应器,这两个地球感应器分别安装在卫星圆柱体侧面离扫描辐射计 $\pm 90^\circ$ 的地方。感应北(南)半球的地球感应器比扫描辐射仪早(晚) 90° 感应到地球。将扫描辐射仪的开机时间与地球感应器观测到地球中点的时间进行比对,一旦两者之间偏差超过 $292.57 \mu\text{s}$ 的半角度当量,即 0.0878906° ,就对地球观域进行修正^{①②③}。修正判据记为 $\Delta\beta_N$ 或 $\Delta\beta_S$ 。

$$\Delta\beta_N = 360^\circ \times t_N / T - 99.8^\circ$$

$$\text{或 } \Delta\beta_S = 360^\circ \times t_S / T - 279.8^\circ \quad (7)$$

式(7)中, $\Delta\beta_N$ 为北地中两面角偏差, $\Delta\beta_S$ 为南地中两面角偏差, T 为卫星自旋周期, t_N 为扫描同步脉冲前沿至北红外地中脉冲前沿的时间间隔, t_S 为扫描同步脉冲前沿至南红外地中脉冲前沿的时间间隔。

当 $|\Delta\beta_N|$ 或 $|\Delta\beta_S|$ 大于 0.0878906° 时,地面业务运行控制系统需要发扫描同步器 A 机或扫描同步器 B 机 β 角修正脉冲串指令,使辐射计光轴对准地球观域摄取图像。地面通过遥控指令对卫星辐射计的图像观域进行修正,指令的脉冲个数 N' 可以通过卫星模拟遥测数据或 CASD 同步数据缓冲器测得的 N 值进行计算获取。

① 调整量从卫星模拟遥测数据中计算获取

首先计算卫星模拟遥测数据 T, t_N, t_S 的值,求

出 $\Delta\beta_N$ 或 $\Delta\beta_S$; $N'_{\text{计算}} = |\Delta\beta_N| / 0.0878906^\circ$ 或 $N'_{\text{计算}} = |\Delta\beta_S| / 0.0878906^\circ$,经四舍五入后取整^{①②③}。

从卫星地方时午夜到中午的时段里,即当 $N' \leq 2048$ 时,若 $\Delta\beta_N$ 或 $\Delta\beta_S > 0$,在观域调整脉冲量指令前先发减脉冲修正指令,使辐射计光轴东移对准地球;若 $\Delta\beta_N$ 或 $\Delta\beta_S < 0$,先发加脉冲修正指令使辐射计光轴西移对准地球。执行脉冲 N' 约等于计算值 $N'_{\text{计算}}$ 。从卫星地方时中午到午夜的时段里,即当 $N' > 2048$ 时,若 $\Delta\beta_N$ 或 $\Delta\beta_S > 0$,在观域调整脉冲量指令前先发加脉冲修正指令使辐射计光轴西移对准地球; $\Delta\beta_N$ 或 $\Delta\beta_S < 0$,先发减脉冲修正指令使辐射计光轴东移对准地球,观域修正指令的脉冲个数 N' 等于 $4096 - N'_{\text{计算}}$ 。

② 利用同步数据缓冲器的 N 值计算

原始云图中的扫描同步检测码(SSD)与定时信号中的数据开始脉冲相关联,二者出现在天球中的角度差最大为 0.1755° 。指令数据接收站(CDAS)的同步数据缓冲器同时接收 SSD 和精太阳脉冲,并且测得二者之间的 N 值。同步数据缓冲器测得的 N 值与 β 角和 T (卫星自旋周期)的理论值对应关系如表 1 所示(6 h 为一周期,以此类推)。

表 1 卫星定点于 105°E 时 β 角修正脉冲量的执行个数^{①②③}

Table 1 Executed number of β angle compensation pulse quantum (locating 105°E only)

时间 (地方时)	22:00	23:00	00:00	01:00	02:00	03:00
$\beta/(\circ)$	45	30	15	360	345	315
N	1046	961	875	790	704	533
T	0.3061	0.2811	0.2561	0.2311	0.2061	0.1561

N 和 β 角每小时减小量 $\beta = 15^\circ, \Delta N = 85.449$; N 和 β 角每分钟减小量 $\beta = 0.25^\circ, \Delta N = 1.424$ (随时间增加, N 和 β 总是递减); $N = (\beta + 148.5^\circ - 9.8^\circ) / 0.175543$; $T = (\beta + 148.5^\circ - 9.8^\circ) / 360^\circ \times 0.6$, 单位: s。

观域调整脉冲量指令约执行 1.977 次, N 变化 1^{①②③}。实际上,地面同步数据缓冲器测得的 $N_{\text{实测}}$ 值(在数传态)与表 1 中同时间的 N 值在角度上是稍有偏差的,实测值反映了辐射计的实际指向^[14];

① 中国空间技术研究院. 552 工程技术手册 风云二号卫星分册(内部). 1997.

② 中国航天科技集团第八研究院. 风云二号 B 卫星使用手册(内部). 2000.

③ 中国航天科技集团第八研究院. 风云二号 C 卫星使用手册(内部). 2005.

T 为卫星自旋周期,也可以从卫星模拟遥测数据计算获得,但由于空间环境、通信传输及地面设备等偶发因素,实测的模拟遥测数据有时会与理论值发生偏差。 $N_{\text{实测}}$ 乘以 1.977 取整,即观域修正量脉冲个数 N' 。若 $N_{\text{实测}} > N$,则采用减脉冲修正;若 $N_{\text{实测}} < N$,则采用加脉冲修正; N 是以 2051 为周期,2051 递减到 1,周而复始变化,观域调整脉冲量指令最多执行 4096 次。

4 小 结

卫星扫描辐射计对地球观域的偏差,影响图像定位的精度。风云二号 A 星在轨业务运行时,运行控制中心采用上述算法编制了辐射计观域调整判别和计算程序,在模拟遥测数据传输正确状态下,观域调整方向和注入指令脉冲量都正确,尤其在每次卫星扫描同步器关机,精太阳脉冲中断的情况下,准确计算出辐射计对准地球观域的修正量。风云二号 B 星采用故障模式运行后,其观域调整由运控中心操作人员和指令数据接收站操作人员配合,目测原始云图是否在正中来决策观域调整方向及调整量。同步器关、开机后辐射计扫描太空,无法目测,需要发多次脉冲修正量指令逐渐寻找图像观域。

2004 年 10 月和 2006 年 12 月风云二号 C、D 星分别成功发射,两颗静止气象卫星在我国东、西部上空同时进行对地观测业务,气象业务需要卫星提供连续、稳定的观测资料,不能有任何中断。随着卫星的可靠性在增加,卫星遥测数据精确、稳定,在风云二号静止气象卫星双星观测业务系统中,宜采用自动观域调整算法,以减少人为判据偏差因素增加对卫星的控制动作以确保卫星安全,减轻操作人员工

作负担,增强系统自动化运行能力。

致 谢:辐射计观域调整方法和计算程序是在风云二号卫星总师李卿和应用系统副总师张青山的指导下完成的。感谢风云二号卫星应用系统李希哲副总师对本文有关卫星轨道和图像获取理论方面的指点和建议。

参 考 文 献

- [1] 肖峰. 人造地球卫星轨道摄动理论. 湖南:国防科技大学出版社,1997.
- [2] 许健民. 风云二号静止气象卫星的数据处理. 上海航天, 2005, (增刊):82-86.
- [3] 王玉花. FY-2C 星云图成像技术. 上海航天, 2005, (增刊): 16-20.
- [4] 章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制. 北京:北京航空航天大学出版社,1998.
- [5] Oliver Montenbruck, Eberhard Gill. Satellite Orbits-Models, Methods, and Applications. Springer, 2000.
- [6] Nakamura. Meteorological Satellite Center. GMS User's Guide, Third Edition, JMA, 2002.
- [7] Rao K. Weather Satellite System, Data and Environmental Application. American Meteorological Society, 1990.
- [8] 童铠. 风云二号气象卫星指令与数据获取站 // 童铠院士文集. 北京:中国宇航出版社,2007:317-326.
- [9] 刘林. 人造地球卫星轨道力学. 北京:高等教育出版社, 1992.
- [10] Shea James J. On-orbit MTF measurements. SPIE, 1996: 220-229.
- [11] Ruffino G, Accardo D. Enhancement of the controlling algorithm for star tracker measure refinement. Acta Astronautics, 2003, 53(2): 572-575.
- [12] 陈桂林, 栾炳辉. FY-2C 星多通道扫描辐射计及其在轨运行. 上海航天, 2005, (增刊):21-27.
- [13] 郭强, 陈桂林. 静止气象卫星图像高速采集和预处理研究. 量子电子学报, 2001, (增刊):10-15.
- [14] 冯小虎, 夏景林, 张志清. FY-C 星地面应用系统指令与数据获取. 上海航天, 2005, (增刊):111-116.

Adjusting Methods of Earth Observation Field of FY-2 Meteorological Satellite

Qian Yun

(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

As the most significant achievement of remote sensing detection for Earth surface and atmosphere, China's capability of weather forecast, prevention from various kinds of weather disasters as well as environment protection is improved by geostationary meteorological satellites.

FY-2 series is the first generation of Chinese geostationary meteorological satellites. It can be used for continuous real-time observation on the variation of weather over China and its surrounding area, and an important role is also played in accurate medium- and long-term weather forecast.

FY-2D satellite is launched successfully in Dec 2006, and two geostationary meteorological satellites locating west and east over China are realized, their image dissemination coverage are very wide. The composite observation is not only extremely significant to China's weather forecast, hazard reduction, global climate change observation, but also meteorological service is provided to East Asia, South Asia and even Australia and part of Africa. China becomes one of the most important countries of meteorological satellite in the world.

Geostationary satellite is only relatively still to the Earth. When FY-2 geostationary meteorological satellite is located to operational position, observation area must be adjusted before their original image acquisition in order to target at Earth medially. Due to the action of Earth's rotation and other impetuses, the actual satellite orbit and attitude vary continuously, the raw images received may have shifts between east and west. The precision of framing could be influenced by the warp of scan radiometer of FY-2 meteorological satellites for the Earth observation field. Therefore, once the Earth drifts away from the center of the satellite observation field, adjusting should be taken in order to control the scan radiometer aiming at the Earth. Therefore, it is part of the daily task not only in the satellite original image acquisition period, but also frequently in its whole operational lifetime. Adjusting of observation field is done by sending several data-injected telecommands to the satellite from the ground station.

A kind of self-correcting arithmetic is proposed by which the adjusting numbers and orientation for controlling scan radiometer can be calculated. That is to say that a result of the arithmetic can be used to choose data-injected telecommands and its pulse number instead of man-made decision. The data of arithmetic could be acquired by using the value of N , which comes from Synchronizer Data Buffer within CDAS (Commands and Data Acquisition Station) or using simulated telemetry data of FY-2 satellite. It is one of the software programs in Satellite Control Center correctly used for FY-2A and FY-2B when they are in normal operational mode and during their eclipse. It will be adopted to double satellites operational system to reduce satellite controlling man-made mistakes, to ensure security of satellites, to enhance its automatic operational abilities, and to increase the reliability of image obtained task of FY-2 meteorological satellite.

Key words: FY-2 meteorological satellite; scan radiometer; Earth observation field; adjusting arithmetic