

FY-3 气象卫星可见光红外扫描辐射计冷空间基准 采样区观测到月球后的现象

张 镔^{1,2*}, 陈帅帅¹, 张里阳³

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院大学杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024;
3. 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: FY-3 气象卫星可见光红外扫描辐射计(VIRR)冷空间基准采样区在特定时刻观测到月球, 使该时刻遥感图像出现地球区信号码值减小甚至无码值的条带状异常区域, 对遥感数据产生影响。根据 VIRR 轨道运行特点、在轨工作模式和冷空间数据采样机理, 分析了 VIRR 冷空间采样区观测到月球并影响遥感数据的原因, 阐述了 VIRR 扫描镜像旋转引起冷空间采样时月球图像通道间配准错位的机理, 通过卫星轨道仿真计算了一年周期内出现此种现象的时间及规律, 对受影响的遥感数据提出了处理建议, 对数据修正作了初步尝试并对数据修正的可能性作了分析。

关键词: 可见光红外扫描辐射计; 冷空间; 基准采样; 月球

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A

The phenomena of lunar observation in cold space reference sampling area of Visible and Infrared Radiometer on FY-3 Meteorological Satellite

ZHANG E^{1,2*}, CHEN Shuai-Shuai¹, ZHANG Li-Yang³

(1. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China;
3. National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: The moon is observed at a specific time in the cold space reference sampling area of the visible infrared radiometer (VIRR) of FY-3 meteorological satellite, which makes the remote sensing image appear abnormal area of strip image with reduced or even no code value in the earth region at that time, which has an impact on the remote sensing data. Based on the characteristics of VIRR orbit operation, on orbit working mode and cold space data sampling mechanism, this paper analyzes the reasons why the moon is observed in the cold space sampling area of VIRR and affects the remote sensing data. The mechanism of registration dislocation between lunar image channels caused by the rotation of VIRR scanning image in cold space sampling is expounded. The time and regularity of this phenomenon in one year period are calculated by satellite orbit simulation. The processing suggestions for the affected remote sensing data are put forward. The preliminary attempt of data correction is made and the possibility of data correction is analyzed.

Key words: visible and infrared radiometer(VIRR), cold space, reference sampling, moon

PACS: 42. 79. Qx, 07. 05. Pj

收稿日期: 2020-06-19, 修回日期: 2020-09-10

Received date: 2020-06-19, Revised date: 2020-09-10

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFA0605501, 2018YFB0504900, 2018YFB0504901), 国家自然科学基金(41871249)

Foundation items: Supported by National Key R & D Projects (2018YFA0605501, 2018YFB0504900, 2018YFB0504901), National Natural Science Foundation of China(41871249)

作者简介(Biography): 张镔(1968-), 男, 浙江杭州人, 研究员, 博士, 主要从事空间光电遥感探测技术的研究

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: zeshcn@126.com

引言

可见光红外扫描辐射计(Visible and Infrared Radiometer, VIRR)是风云三号气象卫星前三颗星的基本配置,其历史可追溯至1988年我国发射的第一颗气象卫星风云一号,之后在1999年和2002年发射的风云一号C、D卫星上VIRR均实现了长寿命稳定业务运行。2008年开始发射的风云三号气象卫星上VIRR充分继承了风云一号C、D星的研制技术,入轨后一直稳定工作。VIRR在轨运行历史最久,获取的数据时间跨度最长,充分利用和分析VIRR获得的历史数据对研究长期的全球气候变化规律和趋势具有非常重要的意义。

回溯历史数据发现,由于气象卫星轨道设置和VIRR固有的工作模式使得VIRR在特定时间其冷空间基准采样区会观测到月球。因为VIRR的冷空间基准采样区工作机理使得该时刻获取的地球区遥感数据出现信号码值减小甚至无码值的条带状图像异常区域,同时由于VIRR采用的45°扫描镜产生像旋导致各探测通道在冷空间采样区配准出现错位,并引起各通道地球区码值异常区域配准错位,对遥感数据产生影响,本文对此现象做机理分析和研究。

1 VIRR冷空间观测到月球的图像数据表象

风云三号气象卫星VIRR具有10个探测通道,如表1所示:

在FY-3气象卫星B星VIRR 2012年3月4日21时05分的5分钟卫星遥感数据中,10个通道冷空间采样点观测到月球,如图1所示,图中由上至下为卫

表1 VIRR探测通道及探测光谱范围

Table 1 Detection channel and spectrum range of VIRR

探测通道	光谱范围/ μm
1	0.58~0.68
2	0.84~0.89
3	3.55~3.93
4	10.3~11.3
5	11.5~12.5
6	1.55~1.64
7	0.43~0.48
8	0.48~0.53
9	0.53~0.58
10	1.325~1.395

星飞行方向,从左至右依次为通道1-10图,各通道横向为VIRR扫描方向10个采样点。如图2所示,在对应时刻地球区遥感图像可见光图像中出现暗条;如图3所示,红外通道图像出现白条。图1中,飞行方向上CH7最先出现月球,CH3,6,8最后,各通道地球区数据出现条带扫描线位置与冷空间出现月球扫描线位置一致。扫描方向上每个通道各10个采样点,通道3,6,8最先扫描到月球,CH7最后。

要研究上述现象,需了解VIRR的工作模式及冷空间数据采样机理。

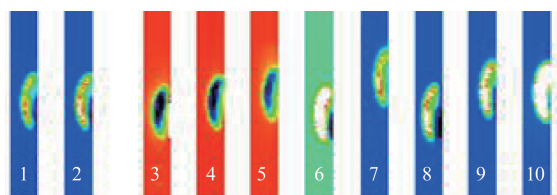


图1 VIRR 10个通道冷空间采样点
Fig. 1 10 channels cold space sampling points of VIRR

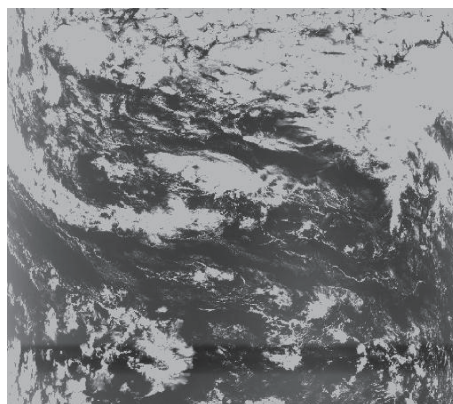


图2 VIRR可见光通道图像
Fig. 2 Visible channel image of VIRR

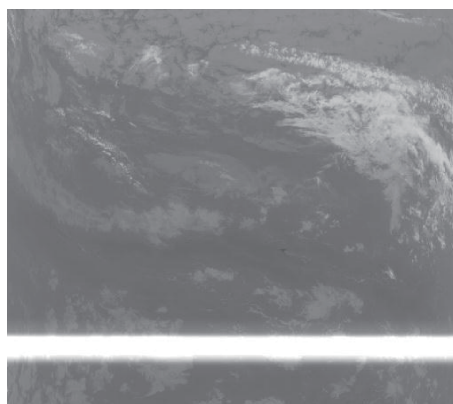


图3 VIRR红外通道图像
Fig. 3 Image of VIRR infrared channel

2 VIRR工作模式及冷空间数据采样机理

风云三号气象卫星运行轨道为近极地太阳同步轨道,以风云三号B星为例,轨道高度为836.4 km,升交点地方时13:40,轨道倾角 98.753° ,运行一轨周期为101.6 min,每天绕地球14.2圈,为非整数轨。卫星飞行姿态为三轴稳定,轨道平面自旋轴旋转方向和地球公转方向相同,通过轨道高度和倾角的设置,确定卫星升降点地方时和目标点的地方时,达到卫星每天以相同方向经过同一纬度的当地地方时相同,从而使相邻天内每天对同一被观察目标有较为一致的光照条件,用于区分目标特性的变化。

VIRR安装在卫星对地面背阳一侧,开口朝向地球,采用一块旋转扫描反射镜,转轴与镜面成 45° ,且与卫星飞行方向一致,当扫描镜转动时,辐射计以固定的1.32 mrad瞬时视场接收与轨道垂直平面内的目标辐射,扫描从背阳面开始扫入地球,借助于卫星绕地球的运动,获取地球的二维图像。

卫星在836.4 km轨道高度,对地球张角为 $124.28^\circ(\pm 62.14^\circ)$,因接近地球边缘图像的地面分辨率下降,实际采样的地球信息区域选取星下点两侧 $\pm 55.4^\circ$ 的地球景象。VIRR的 45° 扫描镜以6 r/s的转速旋转扫描,依靠旋转扫描获得星下点两侧地球区域目标信息的同时在确定的相对位置角获取如冷空间、星上黑体信号,并在适当的相位位置插入遥测信息,为此VIRR在星下点前 74° 位置设置位置传感器,产生一个相位指示脉冲,作为VIRR每圈扫描相位起始基准点来同步系统控制时序即每圈控制时序的 T_0 时刻,每圈同步触发一次,避免累计误差的产生,确保星下点位置正确。

不同风云三号卫星的轨道高度不同,对地球张角略有不同,为留出卫星姿态调整的 2° 余量,在星下点前 66.23° 冷空间作为直流恢复指令位置。

VIRR每条扫描线均按同样扫描时序进行,如图4所示。

为消除直流放大器中因本体背景辐射、减小直流漂移和探测器直流偏置电平的影响,信号采用交流耦合放大方式,为获得对应接收目标辐射(反射)强度的最终输出绝对信号电平幅值,在电路第三级采用直流恢复技术,即利用辐射计扫描一周从背阳面一侧扫入地球目标之前,利用温度4 K左右冷空间低温黑暗无目标的特点,测量地球区前冷辐射及暗反射作为恒定辐射基准,在此时刻,由扫描时序

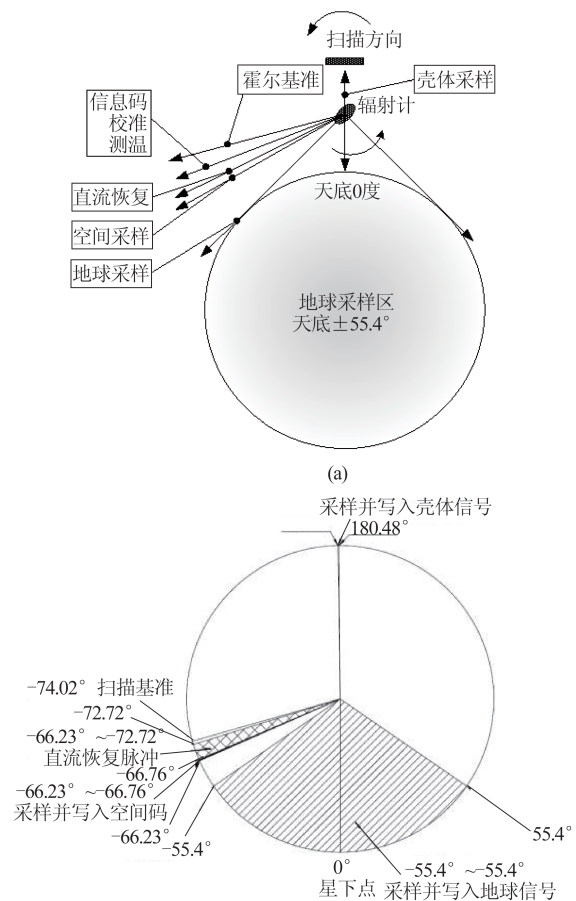


图4 (a)辐射计空间扫描几何关系示意图,(b)辐射计信号采集角度位置图

Fig. 4 (a) Diagram of radiometer spatial scanning geometry, (b) radiometer signal acquisition angle position diagram

产生直流恢复脉冲,对信号进行同步箝位,把此时的冷空间信号箝位在零电平,即在箝位电容 C 上建立起对应空间信号 V_0 电压,之后在远大于扫描周期的时间内保持,在观察地球期间将整个扫描帧周期内测得信号与箝位电压作模拟相减,得到目标绝对电压标度值,经采集处理后作为遥感数据计数值。

直流恢复脉冲宽度为3 ms,扫描时序中位于0.75~3.75 ms。在直流恢复脉冲结束前的0.25 ms即3.5~3.75 ms完成10个通道每通道10个点的采样并写入冷空间采样码。

VIRR通道放大电路设置与众不同,可见光及近红外通道输出信号计数值随光强增强而增大,而红外波段输出信号计数值随目标辐射增加而减小^[1]。

当VIRR冷空间观测到月球时,零电平基准能量增加,导致后续扫描地球区域能量与零电平能量间差值减小,在图像上体现为可见光近红外通道图

像计数值变小,图像变暗,红外通道的图像计数值变大,图像变亮。若后续扫描的地球区域能量小于零电平的基准能量,即后续扫描的地球区域能量与零电平的基准能量差值为负值,则地球区域采样点的计数值红外通道为1023,可见光近红外通道为0,在图像上体现为红外通道扫描方向呈现白条,可见光近红外通道呈现黑条。

月球经太阳照亮,表面温度可高达140~170℃,远高于地球表面温度,红外波段月球能量高于地球区能量。月球表面可见光波段反照率为9%,低于地球大多数亮目标的反照率^[2-3],因此冷空间基准区观测到月球,可见光近红外通道地球图像受到的影响多表现为图像条带区有目标细节但对比度下降,而红外通道大多出现白条,无目标细节。

VIRR冷空间观测到月球对遥感数据产生影响,其影响的频次和规律需要通过轨道仿真来获得。

3 轨道仿真

通过对VIRR进行轨道仿真,输入B星轨道信息,建立卫星坐标系,星下点为正Z轴方向,依据太阳,地球及月球的三者关系,仿真得到UTC:2012年3月4日21:05分月亮位于辐射计冷空间一侧,与星下点Z轴夹角66.2°处。

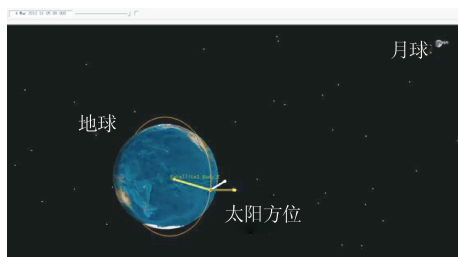


图5 地球、太阳、月球轨道位置仿真
Fig. 5 Simulation of orbit position of earth, sun and moon

仿真表明在扫描角-66.2°能观测到月球。对B星进行2011年9月到2012年9月一年周期的轨道仿真,如图7所示,月亮有规律地在农历每月的初九和十二日左右出现在扫描辐射计的冷空间,卫星位于南极附近,分别处于降轨和升轨运行状态,6月上旬到9月下旬期间不出现,次数大约为18次。

卫星升轨运行时VIRR扫描方向为东向西,降轨运行时则为西向东。农历初九和十二日月球月相分别为上弦月和凸月,月相相似,均位于VIRR冷空间一侧,VIRR观测到月球时分别处于降轨和升

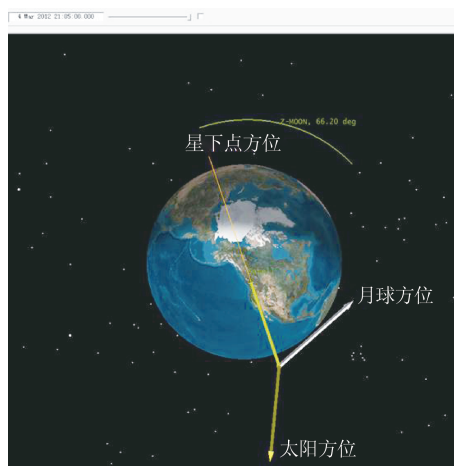


图6 月球与扫描辐射计星下点间角度仿真
Fig. 6 Simulation of the angle between the moon and the nadir of scan radiometer

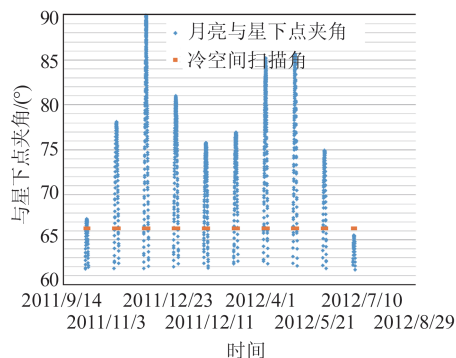


图7 卫星运行一年周期冷空间观测到月球的时间仿真
Fig. 7 Time simulation of the moon appearing in cold space in one year period of satellite operation

轨运行,扫描月球的进入方向相反,观测到的月球月相因此相反,如图8所示。

4 VIRR冷空采样数据分析

对VIRR冷空采样数据进行分析发现,观测到月球时冷空间采样数据在扫描维和飞行维各通道间视场配准出现错位,同时相应通道的地球数据出现条带区域计数值异常。以下从VIRR光学系统和电子学系统设计原理对原因进行分析。

4.1 冷空间观测到月球时各通道配准错位原因

VIRR采用45°旋转平面反射镜扫描方式,其反射面法线 n 与45°旋转扫描反射镜旋转轴成45°夹角。扫描镜旋转轴和系统光轴重合,且平行于仪器的飞行方向,通过45°旋转扫描反射镜的旋转作穿越轨道平面的扫描。借助于平台的前进运动,获取目标的二维图像。

如图9所示,当45°旋转扫描反射镜在 oyz 平面

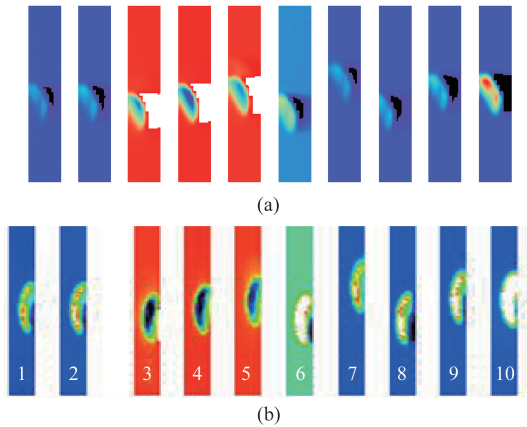


图8 VIRR 观测到的月相图(a)2012年3月1日 13:05 卫星降轨运行, (b)2012年3月4日 21:05 卫星升轨运行

Fig. 8 Phase diagram of the moon observed by VIRR (a) Descent orbit 13:05, March 1, 2012, (b) ascent orbit 21:05, March 4, 2012

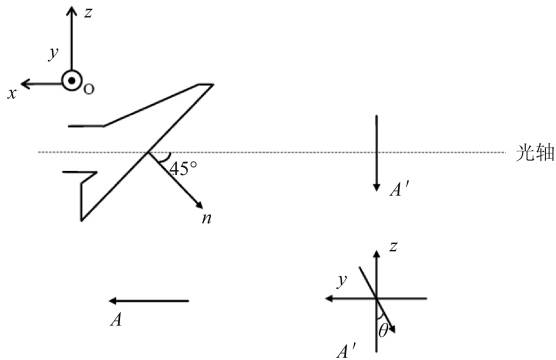


图9 45°旋转扫描镜扫描几何示意图
Fig. 9 Geometry diagram of 45° rotating scanning mirror scanning

内绕光轴(X轴)从Z轴向Y轴旋转 θ 角时,经45°旋转扫描反射镜反射的像A'也同时在 oyz 平面内绕光轴(X轴)从Z轴向Y轴旋转 θ 角^[4]。

FY-3 气象卫星 VIRR 的 10 个通道在探测器焦面上排列配准关系如图 10 所示。

10 个光谱探测通道分布在 4 个波段探测器上, 每个探测器光学中心轴重合, 保证轴上通道 CH1, 2, 4 重合, 其余通道通过采样时序控制实现与轴上通道重合配准。在星下点区域附近, 45°扫描镜的旋转角度接近于 0°, 像旋的影响可忽略, 各通道的视场配准能够保证。

当 VIRR 冷空间采集时, 45°旋转扫描镜相对于星下点转动 66.2°。由于 45°旋转扫描镜产生像旋转, 使得探测器原水平位置顺时针旋转 66.2°, 如图 11 所示。

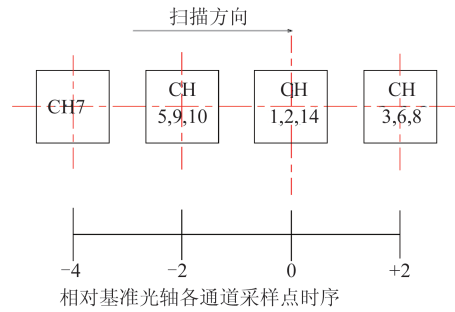


图 10 各通道配准及采样时序示意图
Fig. 10 Diagram of channel registration and sampling sequence

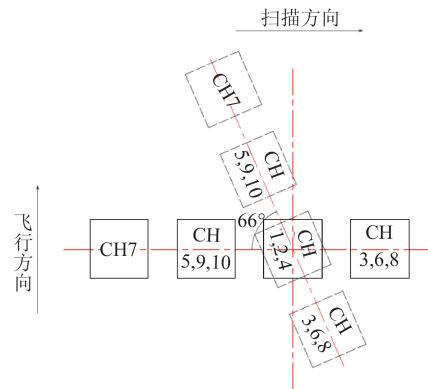


图 11 像旋转各视场配准关系示意图
Fig. 11 Diagram of FOV registration in image rotation

在飞行维方向由于像旋, 相对于轴上通道 1, 2, 4, 通道 7 领先 2.72 个瞬时视场, 通道 5, 9, 10 领先 1.36 个瞬时视场, 通道 3, 6, 8 滞后 1.36 个瞬时视场扫描到月球。

在扫描维时序上系统仍按星下点非像旋时设定的通道配准时序间隔量输出, 而实际上像旋后配准所需的间隔量缩小, 这导致月亮图像在扫描维配准出现偏离, 结果在扫描维方向上相对于轴上通道 1, 2, 4, 通道 7 延迟 1.8 个瞬时视场, 通道 5, 9, 10 延迟 0.9 个瞬时视场, 通道 3, 6, 8 则超前 0.9 个瞬时视场, 形成冷空间采样时刻各通道间配准位置关系如图 12 所示。

从获得的月球图像(如图 13 所示), 每个通道图横坐标均为 10 个采样点, 纵坐标均选取 1 300~1 800 扫描线范围, 符合上述分析。

从冷空间月球采样信号数据中分析发现, 在卫星飞行方向 CH7, 9, 2, 6 各通道观测月球时刻先后间隔约为 33 条扫描线, 各通道扫描月球约 170 条扫描线, 如图 14 所示。VIRR 瞬时视场为 1.32 mrad, CH7 在飞行维领先 CH9 约 1.36 个瞬时视场, 即领先

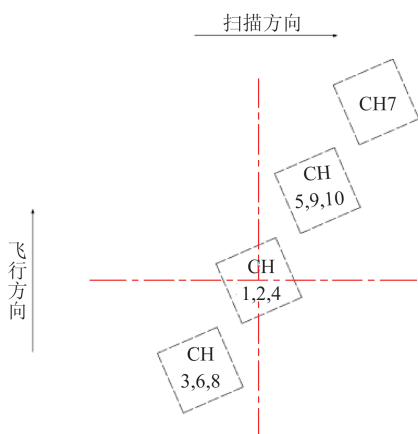


图12 像旋转后经采样时序处理后各视场配准关系示意图
Fig. 12 Registration relationship of each FOV after image rotation and sampling sequence processing

了 0.10° ,结合CH7领先CH9 33条扫描线,说明卫星飞行33条扫描线完成对月球方向 0.10° 的扫描,折算到扫描月球的170条扫描线相当于卫星飞行方向扫描了 0.51° 目标,这与卫星对月张角(星月平均距离为 3.844×10^5 km,月球直径3476 km)相符。VIRR冷空间通道配准错位由像旋引起,错位量保持长期稳定。

4.2 冷空间采样区的电子学处理

VIRR在冷空间采样区域采取直流恢复技术,由扫描时序产生直流恢复脉冲,对信号进行同步箝位,将此时冷空间信号箝位在零电平,即在箝位电容 C 上建立起对应空间信号 V_0 电压,之后在远大于扫描周期的时间内保持,如图15所示。

利用COMS4066模拟传输门作为箝位开关,直流恢复脉冲宽度为3 ms,脉冲发出后电容开始充电,充电的电平水平和冷空间采样到的能量相对应,正常是保持到3 ms脉冲结束,完成箝位。如果在3 ms完成前冷空间有能量进入,则电容充电电平被抬高,在3 ms结束时箝位电压 V_0 高于正常值,之后的信号电压与箝位电压 V_0 作模拟减,引起之后地球区信号计数值减小,可见光近红外通道图像变暗,红外图像变亮。如果出现负值,可见光近红外通道信号的计数值为0,图像出现黑条,红外通道为1023,图像出现白条。

5 冷空间观测到月球时地球区数据查找和处理

通过轨道仿真将冷空间观测到月球的时间段缩小,由卫星图像快视系统运行快速筛查,将地球区有条状异常区域的数据与该时刻的冷空间采样点数据进行比对,如果两者均异常即判为月球污染数据,作出质量标记,继而由人工进行数据判别和处理。

冷空被月球污染的数据针对污染的不同程度应做不同的处理^{[5][6][7]}。我们选取可见光通道1和红外通道4作数据分析,通道冷空间箝位观测到月球时刻与该通道地球区图像计数值减小时刻同步。对于可见光通道1在冷空间箝位出现月球时间段,地球区图像计数值变小,对比度下降。由于地球目标能量大于月亮能量,未出现负值,计数值未出现0,图像信息没有丢失,这种情况我们尝试采用一种

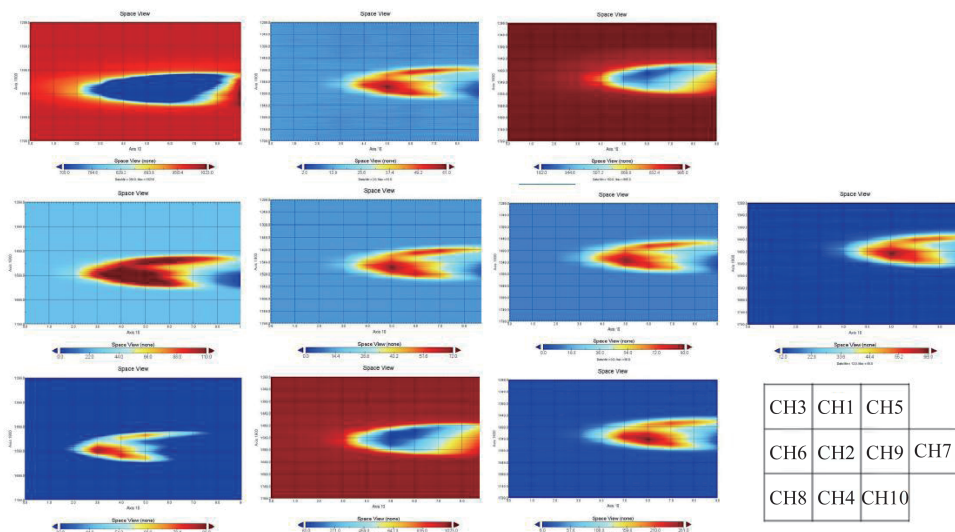


图13 各通道冷空间采样图像

Fig. 13 Cold space sampling image of each channel

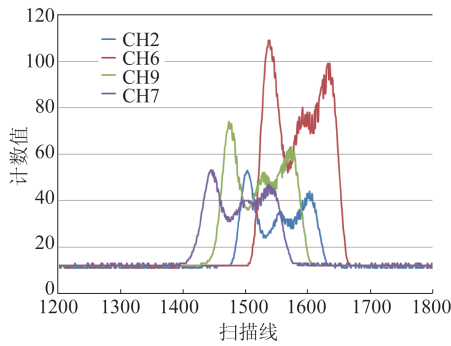


图14 通道7,9,6,2观测月球时刻飞行方向扫描线位置关系图

Fig. 14 Scanning line position diagram of flight direction of CH7, 9, 6, 2 at lunar observation time

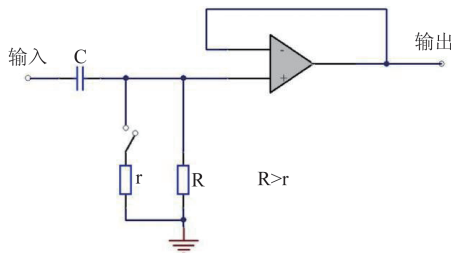


图15 直流恢复电路示意图

Fig. 15 Diagram of DC recovery circuit

图像空间域处理方法—图像灰度分布函数拟合法,它假设在同一观测背景下,VIRR探元在同区域目标所生成的图像应具有相同的概率分布函数,当统计的样本数量足够大时,近似满足这种关系。VIRR对地观测原始计数值的动态范围是 $[0, 1023]$,对其做图像概率分布函数拟合的方法如下:

设 r 和 s 分别为月亮干扰和正常探测器图像的计数值,且 $0 \leq r \leq 1023$, $0 \leq s \leq 1023$,统计其概率密度分布分别为 $P_r(r)$ 和 $P_s(s)$,然后分别计算二者的分布函数 $H(r)$ 和 $G(s)$,在离散情况下有

$$H(r) = \sum_{i=0}^r P_r(i), G(s) = \sum_{i=0}^s P_s(i) \quad (1)$$

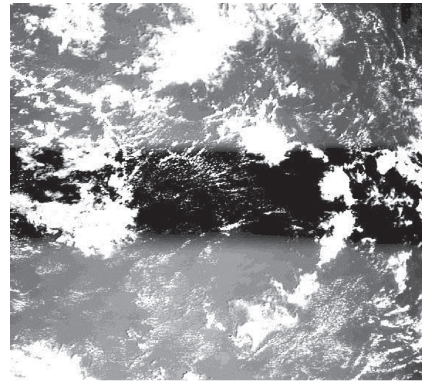
对 G 进行反变换,因为是离散值情况,在反映射中常常必须进行近似,对任意 $r=u$,对应于 $H(u)$,在 $s-G$ 域中寻找 $s=v$,使得 $|H(u)-G(v)|$ 最小,即

$$|H(u)-G(v)| = \min(|H(u)-G(s)| | s \in [0, 1023]) \quad (2)$$

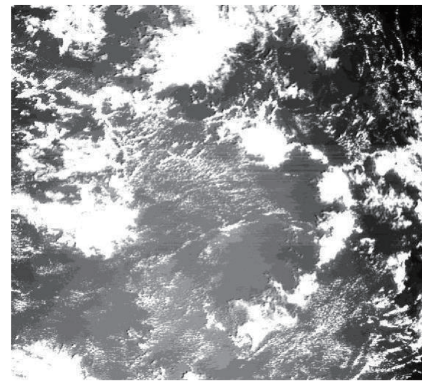
将 u 值映射为 v ,对 r 的每一取值根据同样的步骤找出其映射值。根据这些映射值重新分配像元,得到最终的校正结果。

图16为2012年3月4日21:05时FY-3B VIRR通道1的月亮干扰图像订正结果,图16(a)为原始图像,可以明显看出由于受到冷空观测月亮目标的干

扰,图像中出现了约170帧的暗条带,图16(b)为应用上述方法订正后的图像,暗条带效应显著改善^[8-9]。



(a)数据订正前



(b)数据订正后

图16 可见光通道1地球区图像(a)数据订正前,(b)数据订正后

Fig. 16 Earth area image of visible channel 1, (a)before data correction, (b)after data correction

对于像红外通道4,因为冷空间箝位处月球能量大于地球区能量,地球区能量与冷空间能量相减出现负值,计数值即出现1023,地球区信息缺失,这种情况数据无法进行订正和修复。这也符合之前月球在冷空间对VIRR的影响可见光近红外通道图像要远小于红外通道受到影响的分析^[10]。

6 结论

本文针对风云三号B卫星可见光红外扫描辐射计(VIRR)冷空间观测到月球时遥感数据产生的现象,从VIRR仪器的设计和工作模式入手,并通过轨道模拟仿真,分析了在轨现象出现的原因和规律。根据VIRR采用 45° 旋转扫描镜扫描方式从光学理论上找出了图像旋转后冷空间采样及地球区条带区域的错位原因,结合VIRR冷空间采样箝位机理,阐述了对地球区数据产生的影响,对数据修正作了

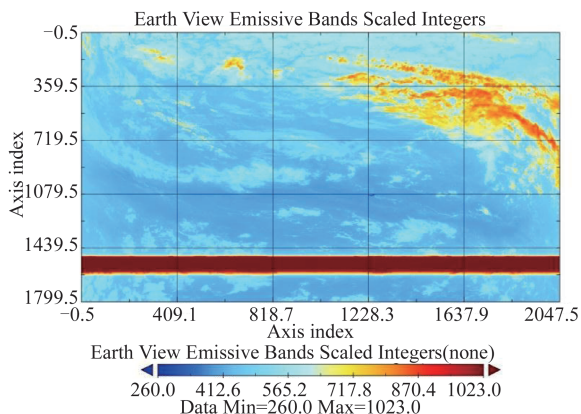


图17 红外通道4地球区图像

Fig. 17 Earth area image of IR channel 4

初步尝试并对数据修正的可能性作了分析。本文的分析和研究对风云一号和风云三号上所有的可见光红外扫描辐射计均适用。

References

- [1] GONG Hui-Xing, ZHENG Qin-Bo, WENG Chui-Jun, *et al.* 10-Band visible-IR scanning radiometer on Chinese FY-1C meteorological satellite [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (龚慧兴, 郑亲波, 翁垂俊, 等. FY-1C气象卫星上的10波段可见-红外扫描辐射计. *红外与毫米波学报*), 2000, **19**(5): 321-322.
- [2] ZHANG Lu, ZHANG Peng, HU Xiu-Qing, *et al.* Comparison of lunar irradiance models and validation of lunar observation on Earth [J]. *Journal of Remote Sensing* (张璐, 张鹏, 胡秀清, 等. 月球辐射照度模型比对及地基对月观测验证. *遥感学报*), 2017, **21**(06): 864-870.
- [3] WU Rong-Hua, ZHANG Peng, YANG Zhong-Dong, *et al.* Monitor radiance calibration of the remote sensing instrument with reflected lunar irradiance [J]. *Journal of Remote Sensing* (吴荣华, 张鹏, 杨忠东, 等. 基于月球反射的遥感器定标跟踪监测. *遥感学报*), 2016, **20**(02): 278-289.
- [4] ZHANG E, GONG Hui-Xing. Research and application of system for offsetting image rotation from 45° rotating scan mirror [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (张镨, 龚惠兴. 消除45°旋转扫描反射镜像旋转系统的研究及应用. *红外与毫米波学报*), 1998, **18**(2): 125-132.
- [5] Chen Y, Tremblay D, Wang L K. Improved lunar intrusion detection algorithm for the CrIS sensor data record [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, **58**(2): 1-12.
- [6] Lee S, Cao C. Soumi NPP VIIRS day/night band stray light Characterization and correction using calibration view data [J]. *Remote Sensing*, 2016, **8**(2): 138.
- [7] Shao X, Cao C Y, Liu T C, *et al.* Characterization and correction of stray light for NOAA-20 VIIRS day/night band [J]. *SPIE*, 2018, **10781**: 107810H-107810H-9.
- [8] Mills S, Weiss S, Liang C. VIIRS day/night band (DNB) stray light characterization and correction [J]. *SPIE*, 2013, **8866**: 88661P-88661P-18.
- [9] Qiu S, Shao X, Cao C Y, *et al.* Assessment of straylight correction performance for the VIIRS Day/Night Band using Dome-C and Greenland under lunar illumination [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, **38**: 5880-5898.
- [10] XU Han-Lie, HU Xiu-Qing, XU Na, *et al.* Discrimination and correction for solar contamination on mid-infrared band of FY-3C/VIRR [J]. *Optics and Precision Engineering* (徐寒列, 胡秀清, 徐娜, 等. FY-3C/可见光红外扫描辐射计中红外通道太阳污染的认识和修正. *光学精密工程*), 2015, **23**(07): 1874-1879.