

星载微光立体成像技术及实现

胡晓华*, 周晓中, 刘松涛, 张春华, 杨楠
(中国人民解放军61741部队, 北京100094)

摘要:为了监测夜间和晨昏时段的低云大雾,实现云的三维立体成像,对微光立体成像的关键技术进行了研究。首先,介绍了微光立体成像原理,分析了成像需要解决的宽视场覆盖和多镜头布局。然后,介绍了实现微光探测需要解决的低照度成像技术及其实现方法。最后,针对观测目标照度变化较大的问题,提出了动态范围拓展技术,介绍了后期数据处理中的云雾监测技术。仿真计算结果表明:采用电子倍增 CCD(EMCCD)探测器和推扫扫描成像模式、集成探测器组件以及多台相机拼接方案可有效实现微光立体成像,相机扫描幅宽超过2 800 km;高程分辨率<817.7 m。提出的成像技术可在低照度条件下监测低云大雾,获取高分辨率的三维立体云图,满足气象海洋探测的需求。

关键词:微光立体成像;低照度成像;低云大雾;立体云图

中图分类号:TP73 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20130605.0701

Spaceborne shimmer tridimensional imaging technology and its implementation

HU Xiao-hua*, ZHOU Xiao-zhong, LIU Song-tao, ZHANG Chun-hua, YANG Nan
(No. 61741 Troop, the Chinese People's Liberation Army, Beijing 100094, China)

* Corresponding author, E-mail: x. h. hu@163. com

Abstract: In order to detect low clouds and heavy fogs during nighttime and twilight, and to achieve three-dimensional imaging of the clouds, the key technologies of shimmer tridimensional imaging were discussed. First, the theory of shimmer tridimensional imaging was introduced, and the wide-field coverage and multi-lens layout for imaging were analyzed. Then, the low-light imaging technology and its implementation were introduced. Finally, aiming at the larger illuminance change of an observed target, the dynamic range expanding technology is presented, and detecting technology for clouds and fogs was introduced. Emulation calculation results indicate that the EMCCD detector and push-broom imaging mode, integrated detector assembly and the multi-camera stitching program can effectively realize shimmer tridimensional imaging. The camera swath is beyond 2 800 km and elevation resolution is less than 817.7 m. By using this imaging technology, we can detect the low clouds and heavy fogs in a low-light condition, and can get high-resolution three-dimensional imaging of the clouds, which satisfies the requirements of meteorological and oceanic detection.

Key words: shimmer tridimensional imaging; low-light imaging; low cloud and heavy fog; tridimensional cloud image

1 引言

低云大雾天气多产生于夜间和晨昏时段,是造成低能见度的主要天气现象,严重影响航海、航空、公路运输安全^[1]。对于军事活动来说,低云大雾严重影响作战行动,尤其是夜间和晨昏时段是作战的多发时段,此时红外云图不易区分低云大雾与地表,普通可见光成像设备又难以在低照度条件下工作,因此微光成像技术是监测夜间和晨昏时段低云大雾的最有效手段。此外,目前气象卫星观测到的都是云的水平分布,将三维立体成像技术应用到气象海洋卫星,在微光成像仪的基础上形成微光 CCD 立体相机,可以获得高动态范围和高空间分辨率的立体图像,更好地构造出云的三维模型,对天气系统的分析和准确预报具有重要意义^[2]。

世界上唯一用于微光云图探测的业务化微光成像载荷是美国国防气象卫星计划(DMSP) Block 卫星上的业务线扫描系统(OLS)^[3-4],它由两个光学望远镜和一个光学倍增管组成,可以获得夜间 1/4 月光条件下微光可见光云图,一定程度上弥补了传统夜间可见光通道无法探测的缺点。目前,我国在轨运行的气象卫星上尚未装载微光云图成像仪。中科院上海技术物理研究所和航科集团 508 所都完成了微光相机的预研工作,并研制了工程样机,可在 1/4 月光甚至星光照度条件下成像。

立体 CCD 相机目前多作为测绘卫星上的主要载荷,还没有气象海洋卫星搭载立体相机的先例^[5-6]。德国在 20 世纪 80 年代首先研制了多相机扫描立体成像系统,其中直视扫描仪的分辨率为 4.5 m,立体图像的高度分辨率为 12 m。日本的“月亮女神”、法国的 SPOT-5 卫星、美国国家航空航天局(NASA)的 STEREO 和“凤凰”火星探测器等卫星上都搭载了可以立体成像的传感器,这些传感器多采用线阵 CCD 探测器,以推扫模式扫描成像。我国探月卫星“嫦娥一号”上装载了 CCD 立体相机和激光高度计。CCD 立体相机以自推扫模式工作,卫星在飞行时沿飞行方向对月

表目标进行推扫,可获取月表同一目标星下点、前视 16.7°、后视 16.7° 3 幅二维原始数据图像,经辐射定标后重构月表三维立体影像。同时激光高度计测量卫星到星下点月球表面的距离,与卫星轨道参数相结合,可提供三维影像处理所需的参数。

目前,世界上还没有同时具备微光和立体成像能力的相机。鉴于微光成像技术和三维立体成像技术的日益成熟,将微光立体成像技术应用到气象海洋卫星,通过卫星的飞行运动进行扫描,经过数据匹配、三维重建,可以解算出云的数字高程模型,获得云顶高度等高线图 and 高分辨率三维立体云图,在多种光照条件下有效监测低云大雾。本文在研究国内外研究现状及发展趋势的基础上,对微光立体成像需要解决的关键技术做了仔细分析,提出了解决方法。载荷试验及仿真计算结果表明:给出的关键技术可有效实现微光立体成像,达到星载探测要求。

2 微光立体成像原理

月光、星光和大气辉光等微弱的“可见”光也就是夜间的可见光,统称微光^[4]。微光云图成像技术是指夜间和晨昏等低照度条件下获得可见光图像的相关技术。微光成像与可见光成像原理基本相同,只是在探测仪器的灵敏度和动态范围上具有更高要求。下面重点对立体成像原理进行介绍。

空间立体图像通常是靠空间体视效应实现的,其体视深度和分辨率取决于体视仪器的基线长度。为了增加体视深度和分辨率,就必须加大基线长度。目前星体的尺寸均在几米和十几米,在这样的长度范围内装置空间立体相机,其基线长度一般不会超过 10 m,这样的基线长度所达到的体视深度,远远满足不了立体成像的要求,实际上也得不到测量要求的立体图像。为了增加基线长度,一般在星体上采用前视、直视和后视的方式安装 3 个 CCD 扫描阵列(如图 1 所示)^[7-8],以达到一定的基高比。基高比越大,立体成像效果越好。目前世界上主要的空间立体相机的基高比

都大于0.6,有的达到1.0。

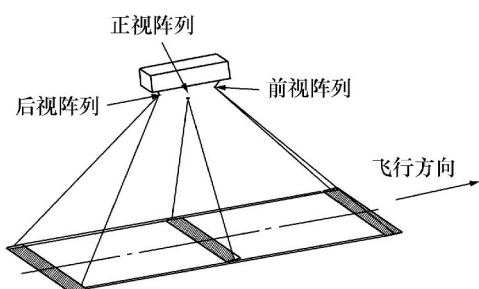


图1 线阵立体相机结构示意图

Fig.1 Sketch map of array stereo camera

这样卫星在飞行中依次对地面进行扫描,可以在3个相近时刻得到同一地面目标在3个不同视角下的图像。工作过程如图2所示。

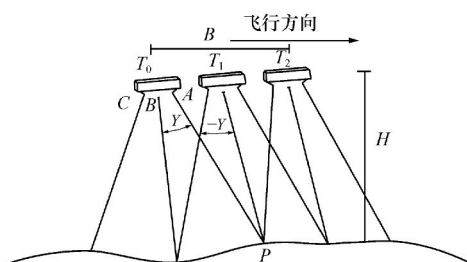


图2 在地物点P获取立体像对示意图

Fig.2 Sketch map of getting stereo pair at ground point P

在 T_0 时刻,前视阵列A在 $+Y$ 的倾角下获得地物目标P处的信息,当飞行到 T_1 时刻时,直视阵列B在直视下获得P的信息,飞行到 T_2 时刻时,后视阵列C在后倾角 $-Y$ 下获得P的信息。 T_0 和 T_2 时刻,两个摄影位置对同一地面进行摄影,获得一个立体像对,经过后期数据处理,可以得到立体图像。

3 成像系统关键技术及解决方案

要想在气象海洋卫星上实现微光立体成像,有效监测低云大雾,探测云的三维立体结构,需要大的刈幅宽度(卫星扫过的宽度)和有效立体观测技术,具有在低照度条件下的成像能力以及较宽的动态范围。

3.1 宽视场覆盖和多镜头布局

气象海洋预报保障要求卫星观测具有宽的探测范围,这就要求微光立体相机应具有宽视场覆盖能力。目前,对于推扫式成像仪实现宽视场覆盖技术的方案主要分为两大类。第一类是采用单个超广角光学系统和单个大规模长线列探测器构成的宽视场成像系统,但其成像性能(视场能量分布和像差校正)难以保证和提高,图像边缘的空间分辨率下降非常严重,大规模探测器的采购和成本均存在问题。第二类是采用较小视场光学系统和较小规模探测器构成成像模块,并由多个成像模块进行视场合成,实现宽视场覆盖, MERIS就是采用这种视场分割方案。此方案中的光学系统和探测器均可保证技术性能以及获取渠道。从实际结果来看,光学系统设计和装校简单,方案可行。

云的立体观测可以得到云高、云的形状和结构信息,有利于区分云和地表,增进对飓风和强风暴等的了解^[9]。但目前气象海洋卫星探测得到的云图都是单视角的二维平面云图,无法提取出高程信息。要想获得立体观测效果,可采用 $2n$ 个相同的中等视场的光学镜头,将其分为A、B两组,A组为前视相机,B组为后视相机,每组 n 个镜头,如图3所示。每组内的 n 个镜头在刈幅方向(卫星扫描方向)上依次按扇形排列,镜头之间的夹角按总视场等分设计。中间一个对中观测,其它 $n-1$ 个倾斜观测,每个成像模块中配置一片CCD(1024×1024)探测器。这样两组相机就形成 $\pm Y^\circ$ 的前视和后视立体成像角度,形成前视1线列(前视相机第1024行)、后视1线列(后视相机第1行)、星下点正视1线列(前视相机第1行)的3线列立体成像探测。这样的设计既实现了宽视场覆盖,又实现了空间立体观测。

微光立体 CCD 相机采用模块化设计方案:系统由 $2n$ 个性能完全相同的具有中等视场的成像模块,1个综合电子模块以及相机平台组成。微光立体 CCD 相机的系统总体功能框图如图4所示。

每个成像模块单独完成中等视场的低光照观测功能,输出数字图像信号。综合电子模块能够同步提供 $2n$ 个成像模块的驱动时序信号,控制成像模块的工作模式与通信,控制 $2n$ 个成像模块的

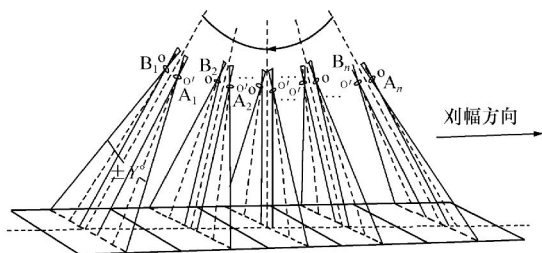


图3 立体相机视场覆盖示意图

Fig. 3 Sketch map of stereo camera coverage

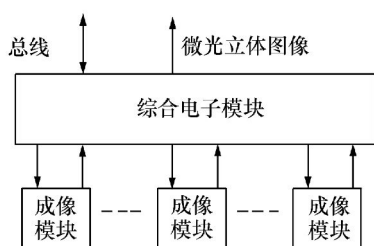


图4 立体相机总体框图

Fig. 4 Block diagram of stereo camera

通光口径并对数字图像输出进行数据处理。

3.2 低照度成像技术

空间微光成像的技术难点主要在两个方面,首先是探测技术,其次是成像模式。

3.2.1 探测器选取

根据探测要求,在低照度条件下获取较高信噪比的图像,要解决探测器的问题。低照度成像探测器主要分为真空成像器件和固态成像器件,真空成像器件曾在早期的云图电视摄像中广泛使用,OLS低照度成像通道中采用光电倍增管(PMT),但存在体积、功耗、寿命及可靠性等问题。固态成像器件中,电荷耦合器件(CCD)是适合低照度的成像器件,常用的具备低照度成像能力的CCD包括图像增强电荷耦合器件(IICCD)、电子轰击电荷耦合器件(EBCCD)、延时积分电荷耦合器件(TDICCD)及电子倍增电荷耦合器件(EMCCD)等^[10]。EMCCD是基于电子倍增原理的新型成像器件,结构与常规CCD相似,在读出寄存器和输出放大器间增加“倍增”寄存器,电荷转移在第2阶段势阱被一对电极取代,一电极加直流电平,另一电极由高电压时钟驱动。通过两电极的电势差形成对转移电荷的电离而产生新电

荷,经多次电离使电荷数迅速倍增。EMCCD信噪比高,图像质量好,因而选择了EMCCD作为低照度成像探测器^[11]。

探测器尺寸和光学焦距主要按式(1)来计算:

$$f = d \cdot H / R, \quad (1)$$

式中: H 为卫星高度, R 为地面像元分辨率, f 为焦距, d 为探测器相邻像元中心距,随着焦平面探测器的水平进步,填充因子能达到100%,可以认为探测器像元尺寸与相邻像元中心距相等。

由于 H 和 R 输入条件能完全确定,比较合理的途径是在有可能获得的探测器规格中,在中等地面分辨率情况下,选择像元尺寸较大,焦距相对较长的光学系统,从而降低光学设计难度,并且保证较高的像质。图5是选用的焦平面(FPA)探测器照片。

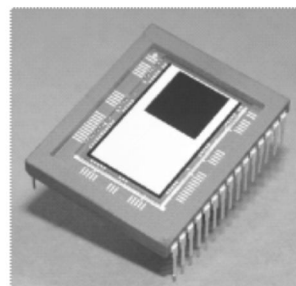


图5 焦平面探测器照片

Fig. 5 Picture of FPA detector

3.2.2 成像模式实现

要想实现低照度成像,其成像模式也很重要。空间光学遥感系统的成像模式分为凝视和扫描两大类,而扫描模式又分为光机扫描和推扫扫描。凝视成像模式结构简单,灵敏度高,但受到探测器和光学系统限制,实现宽视场扫描较为困难。与推扫成像模式相比,光机扫描模式虽然视场大,但运动机构的灵敏度、信噪比和可靠性均低于前者。采用EMCCD和推扫扫描成像模式相结合的技术途径,实现微光成像较为简单可靠。

综上所述,采取电子倍增EMCCD和推扫扫描成像模式相结合的技术路径,能够获得低照度微光云图信息。

3.3 动态范围拓展技术

微光立体CCD相机在实现低照度云图成像

的同时,观测目标的照度变化从星光延伸到亮黄昏,甚至直射日光,目标照度动态范围高达 10^7 ,因而实现宽的动态范围,必须从以下几方面入手。

3.3.1 探测器集成技术

从探测器角度考虑,常见 CCD 的动态范围为 $10^3 \sim 10^4$ 。以最高动态范围 10^7 考虑,仅依靠探测器动态范围是无法实现上述要求的,因此需要拓展的动态范围 $> 10^3$ 。目前多种技术路径可以实现低照度云图成像的动态范围拓展,这些技术手段包括:自动光圈、机电快门、集成探测器组件、梯度中性滤光片,其中集成探测器组件(1个 EMC-CD 和 2 个线阵 CCD,其中 1 个线阵 CCD 上镀有 100 倍衰减的中性滤光膜)是实现宽动态云图成像的最佳方案。

3.3.2 镜头通光口径控制

根据探测需求,除了 CCD 本身的动态范围 (10^4) 外,实际需要控制的动态范围为 10^3 左右。光学镜头中的可变光圈为 $1 \sim 34$ mm,动态范围 DR_{VOA} 达到 10^3 ,可以满足动态范围设计要求。CCD 的积分时间最大为 32 ms,在高光照条件下,即使降低积分时间到微秒级也难以实现饱和和抑制,因此必须采用自动光圈控制方法来控制通光量实现动态范围的扩展。

镜头的最大口径为 34 mm,光圈控制采用 6 挡调节,而不是均匀变化,调节挡数如表 1 所示。

表 1 相机镜头光圈的调节口径与通光量

Tab.1 Regulation caliber and amount of light in aperture

挡数	1	2	3	4	5	6
口径/mm	32	16	8	4	2	1
通光量	1 024	256	64	16	4	1

3.3.3 光圈控制的实现

光圈是安装在透镜之间的圆形机械装置,很薄的钢制光圈叶片重叠在一起组合成通光孔径。光圈叶片的形状为中间高两头低,并朝向通光孔径的中心。当许多片光圈叶片组合在一起时,通光孔径打开得很大时,光圈叶片就会形成一个圆,当通光孔径关闭时,光圈叶片的边缘就会比较明显。

相机获取曝光量测试信号并给小型伺服电动机发送电信号。小型伺服电机安装在驱动圈和固定圈的其中一个边缘,转动驱动圈。采用脉冲编码调制的方法,小型伺服电动机通过设定电流脉冲的长度从而立即旋转传动轴来传动驱动圈,把它转到一个精确的角度。光圈与驱动圈结构示意图如图 6 所示。

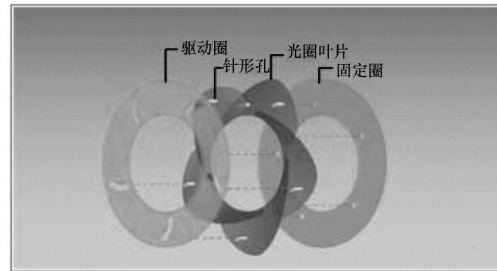


图 6 光圈与驱动圈结构示意图

Fig. 6 Sketch map of camera aperture and driving ring

小型伺服电动机的旋转也控制着通光孔径的大小。光圈中的每一片光圈叶片都有一个栓子插在驱动圈上,位于光圈叶片反面的栓子附着在驱动圈上,并且是固定的。当驱动圈旋转时,它会使光圈叶片的支点随着固定的针形孔转动。所有的支点都很一致地根据驱动圈转动的方向移动来控制通光孔径的宽窄变化。通光孔径的大小不仅对照片的正确曝光有重要影响,而且对图像清晰与否也有着决定性的影响。光圈打开与收缩示意图如图 7 所示。



图 7 光圈打开与收缩示意图

Fig. 7 Sketch map of camera aperture with opening and contraction

3.4 云雾监测技术

微光 CCD 立体云图数据经过匹配和三维重建可以解算出云的数字高程模型,由云的数字高程模型出发可获得云顶高度等高线图 and 高分辨率微光三维立体云图,三维立体云图图像清晰、细节丰富,大大提高了对云、雾的识别能力。为了充分

挖掘微光 CCD 立体云图的信息,可采用云顶三维模型构建技术,云图纹理特征分析技术和云图光谱特征三者相结合的方法,在多种光照条件下有效监测低云大雾。

3.4.1 云顶三维模型构建技术

在解算出的云的数字高程模型 DEM 的基础上,可采用移动曲面拟合法获得云的三维模型和云顶等高线分布。移动曲面拟合法是一种高程数据拟合算法,在进行数值高程模型插值中得到了较好的应用。该方法也是一种分区拟合的算法,在不同的插值点的小邻域范围内分别采用二次曲面进行拟合,邻域的半径则利用插值点到其周围点的平面距离来估计。每个数据点对待插值点的权可利用数据点到待插值点的距离来估计。数据点到插值点的距离越小,其高程贡献越大,相应的权值应适当增大;反之,距离越大,数据点对插值点的高程贡献越小,权值应相对减小。

3.4.2 云图纹理特征分析技术

重构后的微光立体云图图像清晰,纹理细节特征更加丰富,对微光立体 CCD 云图进行纹理分析,可提取出云、雾等目标的纹理特征。纹理是一种不依赖于颜色或亮度变化的反映图像中同质现象的视觉特征,刻画了图像像素邻域灰度空间分布的规律。一般来说,云的纹理较为粗糙,表面起伏变化大,而雾纹理均匀,云、雾的这种纹理特征的差异有助于区分云区和雾区。常用的纹理分析方法有 4 种:统计分析方法、结构分析方法、模型分析方法和频谱分析方法。

3.4.3 低云大雾监测技术

在采用立体 CCD 成像技术之前,获得的云图都是单视角的二维平面云图,无法提取出高程信息,所以低云大雾监测的难点之一就是低云和雾的分离,因为低云和雾的主要区别在于云底高度,一般来说低云的云底高度较高,而雾更接近于地面。采用立体 CCD 成像技术后,通过对立体 CCD 云图的数据解算可获得比较精确的云顶高程模型和云的三维模型,进而估计云底高度,再结合微光光谱特征,可获得对低云和雾分离及低云大雾的精细化监测功能。具体处理步骤如下:

(1) 选择微光通道的反照率 R_{chl} 作为判据,根据对微光云图资料的统计和分析,选定反照率的阈值 Th_1 ,低于此阈值的判定为地表、水体、植被等下垫面;高于此阈值的判定为云雾;

(2) 选用热红外通道的亮温 t_{bb} 作为判据,在这个波段,雾和其它不透明云的比辐射率接近于 1,雾比中高云更接近地面,因此雾的亮温比中高云高,确定一个阈值 (Th_2) 可以将中高云排除,高于此阈值的判定为低云和雾。

(3) 利用对立体 CCD 云图数据解算得到的云顶高程模型和云的三维模型进行云底高度估计,云底高度接近地面,则判定为雾,否则判定为低云。根据从云图中提取的纹理特征,纹理粗糙则判断为低云,纹理细致、均匀则判断为雾。将第二步得到的结果进行云、雾分离,最后生成雾样品。具体的方法流程图如图 8 所示。

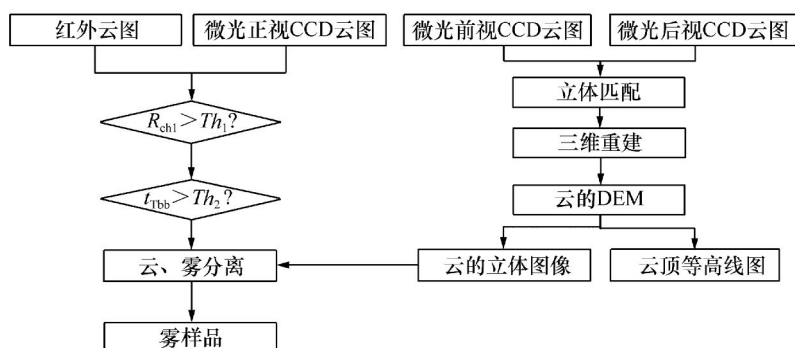


图 8 低云大雾监测流程图

Fig. 8 Flow chart of detecting low clouds and heavy fogs

4 仿真计算结果

4.1 视场覆盖结果

各类天气系统和海洋现象的特点是空间尺度大、发展变化快,大尺度天气系统的水平尺度在1 000~3 000 km,海洋中尺度现象的水平尺度为几十到几百千米。因此,为完整监测大尺度天气系统和海洋中尺度现象,气象海洋卫星仪器一般都要求观测幅宽较大。另外,幅宽大的仪器重复观测周期短,也有利于监测天气系统和海洋现象的发展变化。

刈幅宽度和总视场之间的关系由式(2)决定:

$$W = 2R_e \cdot \left[\arcsin \frac{(H + R_e) \sin \frac{FOV}{2}}{R_e} - \frac{FOV}{2} \right] \cdot \frac{\pi}{180}, \quad (2)$$

式中: W 为刈幅宽度, R_e 为地球半径, H 为卫星轨道高度,单位均为km。 FOV 为总视场角,单位为($^{\circ}$)。

表2 视场角与刈幅宽度实现结果

Tab.2 Results of field angle and swath (km)

计算次数	卫星高度	视场角		
		110 $^{\circ}$	115 $^{\circ}$	120 $^{\circ}$
1	600	1 929	2 189	2 528
2	650	2 117	2 412	2 808
3	700	2 310	2 647	3 110
4	750	2 511	2 893	3 439
5	800	2 718	3 153	3 804
6	850	2 934	3 430	4 222
7	900	3 160	3 729	4 727

表2是搭载微光立体相机的气象海洋卫星可实现的视场角和刈幅宽度。可以看出,卫星高度越高、视场角越大时,幅宽越宽。目前在轨运行的气象卫星光学成像载荷的幅宽都在2 800 km以上,因此,选择表2中灰色区域的卫星高度和立体视场角组合,可实现气象海洋探测需要的幅宽。

4.2 高程分辨率结果

高程分辨率 ΔH 决定了立体相机对于高程数

据的测量精度^[12],取决于3方面因素:基高比(B/H)、地面分辨率(GSD)和像点量测精度。

$$\Delta H = K \times GSD / (B/H), \quad (3)$$

式中: GSD 为地面分辨率, K 是立体像对重组时像点坐标量测精度的倒数,目前一般能够达到的像元坐标量测精度为0.5 pixel,即 $K=2$ 。基高比(B/H)是摄影基线 B 和航高 H 的比值。如图2所示,摄影基线 B 由下式决定:

$$B = 2H \times \tan Y. \quad (4)$$

因此,基高比为:

$$B/H = 2 \tan Y. \quad (5)$$

表3是不同立体角及地面分辨率对应的高程分辨率。可以看出,立体角 Y 在 $\pm 15 \sim \pm 20^{\circ}$,基高比 >0.6 ,是立体成像最佳配置要求,也是国际上大多数立体相机采用的基高比。目前气象海洋卫星光学仪器的白天可见光通道和红外通道的星下点分辨率最高可达250 m^[13]。因此,表3中立体角 $>17^{\circ}$ 时,基高比 >0.6 ,立体角越大,高程分辨率越高(数值越小),测量精度越高。如果地面分辨率优于当前星下点分辨率250 m,则高程分辨率 <817.7 m。

表3 高程分辨率实现结果

Tab.3 Result of elevation resolution (m)

计算次数	立体角/ ($^{\circ}$)	基高比	地面分辨率		
			200	250	300
1	15	0.535 9	746.4	933.0	1 119.6
2	16	0.573 5	697.5	871.9	1 046.2
3	17	0.611 5	654.2	817.7	981.3
4	18	0.649 8	615.5	769.4	923.3
5	19	0.688 7	580.8	726.1	871.3
6	20	0.727 9	549.5	686.9	824.2

常见的云高在几十公里以下,厚度为0~20 km,目前,美国专用云探测卫星Cloudsat上搭载的云廓线雷达垂直分辨率为500 m,高程分辨率为817.7 m,可以识别较厚的云层,尤其是对流云系。

5 结 论

本文根据晨昏及夜晚月光等微弱光照条件下监测低云大雾以及云三维立体成像的需求,提出

了星载微光立体成像技术,介绍了微光成像和立体成像的原理,研究了成像关键技术及解决方案。根据前期载荷试验和气象海洋卫星常用轨道数据进行仿真计算,结果表明:采用星载微光立体成像技术,微光立体相机的扫描幅宽达 2 800 km 以上,高程分辨率可达 817.7 m,可在低照度条件下监测低云大雾,获取高分辨率的三维立体云图,满足气象海洋探测的需求。

参考文献:

- [1] 蒋璐璐,魏鸣. FY-3A 卫星资料在雾监测中的应用研究[J]. 遥感技术与应用,2011,26(4):489-495.
JIANG L L,WEI M. Application of fog monitoring with FY-3A data[J]. *Remote Sensing Technology and Appl.*,2011,26(4):489-495. (in Chinese)
- [2] 申闰春,肖鹏,孙兴义. 基于卫星云图的三维立体云仿真[J]. 计算机仿真,2010,27(12):289-292.
SHEN Y CH,XIAO P,SUN X Y. Simulation of 3D clouds based on satellite cloud imagery[J]. *Computer Simulation*,2010,27(12):289-292. (in Chinese)
- [3] 周小珂,严卫,白衡,等. 基于 DMSP/OLS 数据的夜间低云大雾监测技术研究[J]. 遥感信息,2012,27(6):86-90.
ZHOU X K,YAN W,BAI H,*et al.* Detection of heavy fogs and low clouds during nighttime using DMSP-OLS data[J]. *Remote Sensing Information*,2012,27(6):86-90. (in Chinese)
- [4] 陈晋,卓莉,史培军. 基于 DMSP/OLS 数据的中国城市化过程研究[J]. 遥感学报,2003,7(3):168-175.
CHEN J,ZHUO L,SHI P J. The study on urbanization process in China based on DMSP/OLS data[J]. *J. Remote Sensing*,2003,7(3):168-175. (in Chinese)
- [5] 苗健宇,张立平,翟岩. 三线阵 CCD 立体测绘相机的集成装调[J]. 中国光学,2012,5(4):366-372.
MIAO J Y,ZHANG L P,ZHAI Y. Integrative assembly for three-line array CCD tridimensional mapping camera[J]. *Chinese Optics*,2012,5(4):366-372. (in Chinese)
- [6] 田铁印,王红,冯晟杰. 三线阵测绘相机光学系统的杂光分析与计算[J]. 中国光学,2012,5(6):583-589.
TIAN T Y,WANG H,FENG CH J. Analysis and calculation on stray light of three line array mapping camera[J]. *Chinese Optics*,2012,5(6):583-589. (in Chinese)
- [7] 王红,田铁印. 三线阵测绘相机光学系统的设计和公差分析[J]. 光学精密工程,2011,19(7):1444-1450.
WANG H,TIAN T Y. Design of three line array mapping camera and its tolerance analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*,2011,19(7):1444-1450. (in Chinese)
- [8] 武星星,刘金国. 三线阵立体测绘相机时间系统优化与实时检测[J]. 光学精密工程,2012,20(5):1022-1030.
WU X X,LIU J G. Optimization and real-time measurement of time system in-three-line stereo mapping camera[J]. *Opt. Precision Eng.*,2012,20(5):1022-1030. (in Chinese)
- [9] 李艳兵,黄思训,翟景秋. 云的立体观测研究进展[J]. 热带气象学报,2008,24(6):743-747.
LI Y B,HUANG S X,ZHAI J Q. A review of stereographic cloud observation[J]. *J. Tropical Meteorology*,2008,24(6):743-747. (in Chinese)
- [10] 谢剑锋,王英瑞. 微光 CCD 成像器件性能比较研究[J]. 红外与激光工程,2006,35(增刊):64-67.
XIE J F,WANG Y R. Compare and research imaging performances of low light CCD imaging devices[J]. *Infrared and Laser Eng.*,2006,35(Suppl.):64-67. (in Chinese)
- [11] 龚德铸,王立,卢欣. 微光探测 EMCCD 在高灵敏度星敏感器中的应用初探[J]. 红外与激光工程,2007,36(增刊):534-539.
GONG D ZH,WANG L,LU X. Detection of faint light EMCCD based on star sensor[J]. *Infrared and Laser Eng.*,2007,36(Suppl.):534-539. (in Chinese)
- [12] 张彩霞,杨勤科,段建军. 高分辨率数字高程模型的构建方法[J]. 水利学报,2006,37(8):1009-1014.
ZHANG C X,YANG Q K,DUAN J J. Method for establishing high resolution digital elevation model[J]. *J. Hydraulic Eng.*,2006,37(8):1009-1014. (in Chinese)
- [13] 杨何群,周红妹,尹球. FY-3 气象卫星 MERSI 数据快速预处理的 IDL 实现[J]. 遥感技术与应用,2012,27(4):566-574.

YANG H Q, ZHOU H M, YIN Q. Fast pre-processing of MERSI data on FY-3 meteorological satellite using IDL[J]. *Remote Sensing Technology and Appl.*, 2012, 27(4): 566-574. (in Chinese)

作者简介:



胡晓华(1981—),女,山西忻州人,博士,工程师,2001年、2004年、2007年于解放军理工大学气象学院分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事微光有效载荷在气象海洋方面的应用研究。E-mail: x. h. hu@163. com



张春华(1980—),女,山东梁山人,博士,工程师,2002年于海军潜艇学院获得学士学位,2005年于海军航空工程学院获得硕士学位,主要从事信号检测、图像处理研究。E-mail: xiaohua800506@163. com



周晓中(1961—),男,江苏灌南人,博士,高工,2010年于解放军理工大学气象海洋学院获得博士学位,主要从事气象海洋卫星遥感资料应用方面的研究。E-mail: zhouxiaozhong@163. com



杨楠(1984—),女,安徽阜阳人,学士,工程师,2007年于解放军外国语学院获得学士学位,主要从事气象海洋卫星资料应用研究。E-mail: yannannan@yahoo. com. cn



刘松涛(1980—),男,江苏南京人,硕士,工程师,2002年、2005年于解放军理工大学气象学院分别获得学士学位、硕士学位,主要从事气象海洋卫星资料应用研究。E-mail: liusongtaoen@yahoo. com. cn