

文章编号:1001-9014(2005)01-0039-06

三轴稳定平台下提高线列探测器光学遥感仪 图像空间分辨率的方法研究

郭强^{1,2,3}, 许健民², 陈桂林³

(1. 中国气象科学研究院,北京 100081;2. 国家卫星气象中心,北京 100081;
3. 中国科学院上海技术物理研究所,上海 200083)

摘要:提出了通过改变线列探测器像元摆放方式并适当增加系统过采样率来提高三轴稳定平台下线列探测器光学遥感仪图像空间分辨率性能的技术实现方案.在建立系统工作模型的基础上,对基本递推算法和由此引入的误差扩散效应进行了量化分析,并初步给出图像信噪比和图像空间分辨率之间的量化关系.该方案技术出发点的可行性已在 SPOT-5 HRG 专利技术中得到证实.在现有条件下,该技术有望率先在极轨卫星平台下得到应用.

关键词:图像空间分辨率;过采样率;探测器摆放;误差扩散;图像信噪比

中图分类号:TN216 **文献标识码:**A

STUDY ON IMPROVING IMAGE SPATIAL RESOLUTION OF OPTICAL INSTRUMENTS WITH LINEAR SENSORS IN THREE-AXIS BODY-STABILIZED PLATFORM

GUO Qiang^{1,2,3}, XU Jian-min², CHEN Gui-lin³

(1. Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100083, China;
2. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100083, China;
3. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academic of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The method of improving image spatial resolution of the optical instruments with linear sensors in the three-axis body-stabilized platform was proposed by changing the sensors' relative positions as well as increasing the over-sampling ratio in some degrees. The basic iterative algorithm and the error spreading induced by the method were quantitatively analyzed, and the certain relationship between the image spatial resolution and the image SNR was also presented. The technological feasibility of the method was proved by the patent technology of SPOT-5 HRG. This technology can be applied in the polar-stationary satellite platform under the current conditions.

Key words: image spatial resolution; over-sampling ratio; sensors' positioning; error spreading; image SNR

引言

就空间对地观测技术发展而言,高光谱、高空间分辨率一直是遥感仪发展的方向.从经典的仪器设计理论出发,遥感仪自身的空间分辨能力,在满足一定信噪比的前提下,主要由仪器的瞬时视场角(IFOV)来确定,因此,从这个意义上来说,仪器的光学物理特性决定了遥感仪的空间分辨率;另一方面,对于成像型遥感仪来说,地面应用更关注于所获得的遥感图像的空间分辨率,即经过预处理后的图像象

素的分辨能力.

随着现代高精度扫描控制技术及其高速数字信号处理技术飞速发展,对于同步轨道遥感仪的二维扫描机构而言,其在轨的控制精度可达5微弧(urad)以内(实验室环境下甚至可以达到1urad).结合现有技术条件,本文提出了通过改变线列探测器的象元摆放形式、适当提高系统的过采样率(over-sampling ratio),并采用地面数字化处理来增强图像空间分辨率的方法,在给出严格数学模型的基础上,根据相关的应用实例和仿真结果,对该方法的

收稿日期:2004-02-21,修回日期:2004-07-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40275007)

作者简介:郭强(1975-),男,福建福州人,博士后,电子科学与技术学科工学博士,主要从事遥感卫星资料预处理和量化应用研究.

Received date: 2004-02-21, revised date: 2004-07-24

技术可行性进行了分析.

1 关于两个基本概念的解析

(1) 遥感仪的空间分辨率

遥感仪的空间分辨率是星载仪器的重要工作参数之一,它表征了遥感仪按照地面景物几何特征(尺寸和形状)和空间分布,即在形态学基础上识别和分类目标的能力.从概念上说,空间分辨率可以理解为遥感仪能把两目标作为两个清晰的实体记录下来的两目标间的最小距离,常用瞬时视场角来表征.遥感仪的瞬时视场定义为在给定的瞬时上探测器在系统第二主点上限定的角对边.对于扫描型的遥感仪而言,由于限制探测器的孔径通常是矩形,所以,IFOV一般有两个值,一个值沿扫描方向,另一个垂直于扫描方向.

(2) 遥感图像的空间分辨率

遥感图像的空间分辨率可以理解为:对于一幅给定的遥感图像,如果存在某个象素点与某个探测目标对应,且在图像中能将目标和背景进行有效的区分,则这些地物的最小尺寸就是图像的空间分辨率.需要指出的是,图像的空间分辨率已经不完全依赖于遥感仪的指标,它更多的体现了系统的综合能力.理论分析和应用结果均表明,它与仪器的空间分辨率在数量上不存在必然的量化关系.

2 基本数学模型及其算法分析

2.1 基本数学模型

这里主要是考虑对于长线列探测器,当采用不同摆放方式、不同过采样率时,由于空间采样位置改变而导致的图像空间分辨率的变化.

假定线列探测器的探测元数为 $N \times 1$, 单个像元尺寸为 $X_e \times Y_e$, 系统扫描方向自西向东(X 方向), 且 X 方向上的过采样率为 τ . 不失一般性, 这里以 $N \times 1$ 元探测器的单列和双列摆放, 且 τ 取 2 为例进行分析, 并最终给出一般性结论. 图 1 给出了 $N \times 1$ 元线列探测器单双列摆放示意图. 下面来推导在 2 倍过采样、双列重叠的情况下, 系统的空间分辨率. 假定单个像元的瞬时视场角为 $IGFOV_p \times IFOGV_p$, 将每个像元划分为 4 个子块, 各子块具有对应的权重, 且在所获得的图像信号已经去除了暗电流、非线性、非均匀性以及暗像元等因素的影响, 则每个像元的采样值表示如下:

$$S_k(i, j) = \frac{1}{\sum_{n=0}^3 W(n)} W \cdot A_k^T(i, j) \quad k=0, 1, 2, 3, \quad (1)$$

式(1)中,

$$W = [W(0) \quad W(1) \quad W(2) \quad W(3)] \quad (2-1)$$

$$A_0^T(i, j) = [A(i-1, j-1) \quad A(i-1, j) \quad A(i, j-1) \quad A(i, j)]^T \quad (2-2)$$

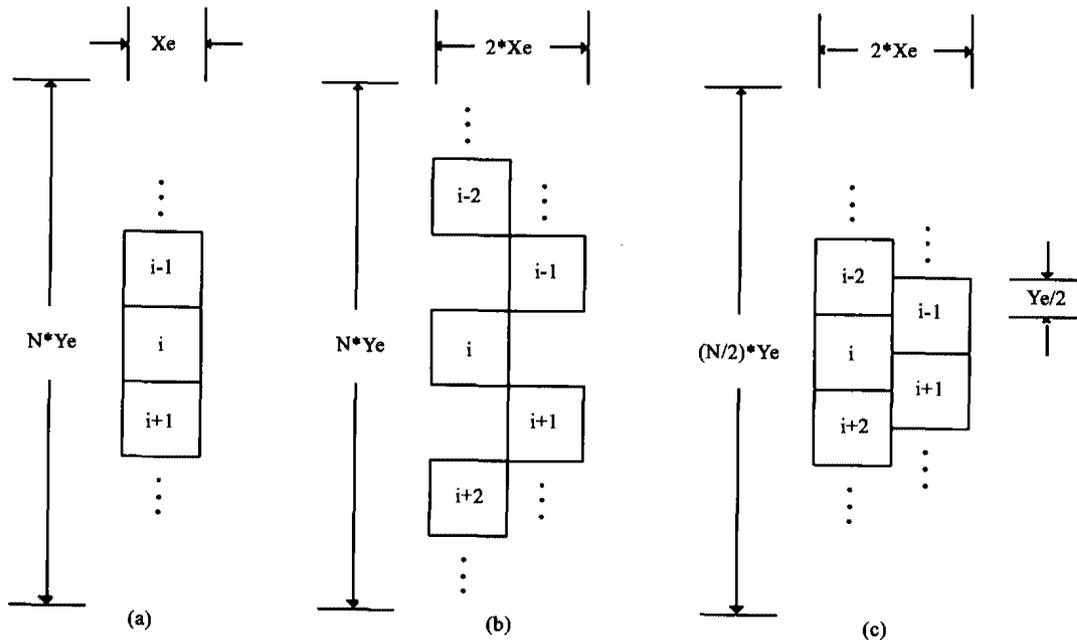


图 1 像元单双列摆放示意图(a)单列;(b)双列交错;(c)双列重叠

Fig. 1 Sketch of one or two columns positioning (a) single column; (b) two columns interleaving; (c) two columns overlapping

式中, $\|D\|_F$ 是矩阵 D 的 Frobenius 范数, 即

$$\|D\|_F = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij}^2 \right)^{1/2} = \text{trace}(D^H D) \quad (12)$$

式(11)、(12)中, $\text{range}(\cdot)$ 和 $\text{trace}(\cdot)$ 分别代表矩阵的值域和迹. 需要说明的是, 在对方程(10)采用总体最小二乘求解时, 假定了模型误差和测量误差都是高斯型, 这在大多数情况下是基本满足的. 但是, 当图像中的杂散光影响较大时, 见文献[5], 则此时必须采用鲁棒(robust)分析方法来求解, 由于篇幅所限这里就不再具体展开, 可参阅文献[1].

2.2.2 矩阵方程(3)的边界递推求解

考虑到 \bar{W} 是一个稀疏矩阵, 且几乎成对角带状分布, 很显然, 如果可以得到方程(3)的有效边界条件, 则可以通过递推、迭代来得到其数值解. 结合系统成像的物理过程, 可以从扫描起始位置开始, 例如外太空相对均匀的背景等, 来作为方程(10)的边界初始值, 并采用类似经典线性方程组求解中的列选主元高斯消去法来逐步迭代得到最终的结果. 同时, 在具体求解过程中可采用一个数组来存放求解每次扫描得到数据所需的权重系数, 从而可以节约大量的存储空间和与零权重相关的不必要的运算操作.

在具体的边界值估计过程中, 考虑到仪器自身工作性能以及定标误差, 可以假定冷空间是一个慢速变化的背景信号, 同时参考局部测量值, 可以得到所需的边界条件.

2.2.3 矩阵方程(3)递推算法的误差分析

对于一个探测系统而言, 探测误差是一定存在的. 由于这里采用了迭代求解算法, 因此, 不可避免的存在着探测误差的扩散, 下面将从这个角度来考察算法的稳定性.

取图像右上角为位置原点, 且坐标沿水平和垂直方向递增, 为了讨论问题的方便, 这里假定探测器的感光面是均匀的, 即 $W_i = W_j$ $i, j \in \{0, 1, \dots, \tau^2 - 1\}$, $i \neq j$, 且探测器像元的总体输出误差均值 \bar{E} (包括系统误差、测量误差等) 是非时变的, 则单位区域的误差 $\bar{e} = \bar{E}/\tau^2$. 下面首先考虑位置 (i_0, j_0) 单位区域的误差 e_0 在位置 (i, j) $i, j \in \{i > i_0, j > j_0\}$ 上产生的迭代误差归一化矩阵可以描述如下:

$$e_{i_0 j_0}(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{\tau^2} & i \leq \tau - 1, j \leq \tau - 1 \\ \frac{\tau - 1}{\tau} \cdot e_{i_0 j_0}(i, j - 1) & i \leq \tau - 1, j > \tau - 1 \\ \frac{\tau - 1}{\tau} \cdot e_{i_0 j_0}(i - 1, j) & i > \tau - 1, j \leq \tau - 1 \\ \frac{1}{\tau^2} \sum_{k=i-\tau+1}^i \sum_{l=j-\tau+1}^j e_{i_0 j_0}(k, l), \forall (k, l) \neq (i-1, j-1) & i > \tau - 1, j > \tau - 1 \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中, (i, j) 是相对 (i_0, j_0) 的坐标, 当 $(i_0, j_0) = (0, 0)$ 时, 归一化矩阵记为 \bar{e}_0 .

根据线性系统叠加原理, 在对方程(3)进行迭代求解过程中, 所有采样点上的误差在位置 (i, j) 上的总体作用误差为:

$$E_{total}(i, j) = \frac{\bar{E}}{\tau^2} \cdot \sum_{k=0}^i \sum_{l=0}^j e_0(k, l) \quad (14)$$

很显然, 在式(13)中, 当 i, j 足够大时, $e_0(i, j) \rightarrow 0$, 且由于数字系统有限字长效应的影响, 以 10 比特量化系统为例, 当 $e_0(i, j) < 0.001$ 时, 取 $e_0(i, j) = 0$, 因此式(14)的总体作用误差存在上界, 即 $\forall (i, j) \in \{0 \leq i \leq N, 0 \leq j \leq 2M + 1\}$, 有 $E_{total}(i, j) \leq Max$ 恒成立. 对式(14)分别取 $i, j \rightarrow \infty$ 时的极限, 可得 Max 的粗略估计, 并有

$$E_{total} |_{i, j \rightarrow \infty} = \frac{\bar{E}}{\tau^2} \cdot \left(\sum_{k=0}^{\tau-1} \sum_{l=0}^{\infty} e_0(k, l) + \sum_{k=0}^{\tau-1} \sum_{l=\tau}^{\infty} e_0(k, l) + \sum_{k=0}^{\tau-1} \sum_{l=0}^{\tau-1} e_0(k, l) \right) + \frac{\bar{E}}{\tau^2} \cdot \left(\sum_{k=\tau}^{\infty} \sum_{l=\tau}^{\infty} \left(\frac{1}{\tau^2} \cdot \sum_{m=k-\tau+1}^k \sum_{n=l-\tau+1}^l e_0(m, n) \right) \right) < \frac{\bar{E}}{\tau^2} \left(1 + \frac{2(\tau-1)}{\tau} + V_{\tau} \cdot P_{\tau}^2 \right) \quad (15)$$

式(15)中, 假定系统的量化精度为 10 比特, 则 P_{τ} 、 V_{τ} 确定如下:

$$\frac{1}{\tau^2} \left(\frac{\tau-1}{\tau} \right)^{P_{\tau}} < \frac{1}{2^{10}} \Rightarrow P_{\tau} > \frac{3 - 2\lg(\tau)}{\lg(\tau) - \lg(\tau-1)} \text{ 且 } P_{\tau} > \tau, \quad (16-1)$$

$$V_{\tau} = \frac{(\tau+2)(\tau-1)^2}{\tau^5}, \quad (16-2)$$

图 2 给出了不同过采样率下, 由迭代算法所引入的误差扩散曲线示意图. 此外, 式(15)、(16)给出了对误差扩散上限的粗略估计, 并与仿真结果进行了比对, 具体数据参见表 1.

表 1 中的仿真/估计相对值是相对没有误差扩散情况而言的, 且由仿真得到的稳定后的误差扩散相对值 (τ 取 2、3、4 时) 均小于过采样率 τ 的平方. 理论和仿真数据表明, 虽然对方程(3)采用边界条件

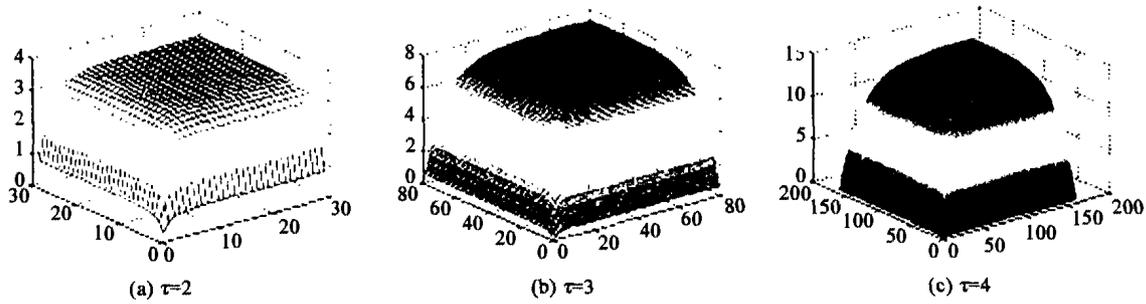


图2 不同过采样率误差扩散示意图
Fig.2 Errors spreading sketch for different τ

表1 不同过采样率误差扩散数据对比
Table 1 Data contrast of errors spreading for different τ

过采样率 τ	仿真数据		估计数据	
	收敛步长	仿真相对值	P_r	估计相对值
2	30	3.25	8	8.0
3	80	7.33	11	12.2
4	160	13.72	15	14.36

进行递推求解会引起探测误差的扩散,但它在很小的距离上(如表1中的 P_r 值所示)就收敛于一个随 τ 变化的稳定值,因此该算法在误差扩散意义上是数值稳定的。

3 技术方案的可靠性验证

从经典的仪器设计理论出发,遥感仪的空间分辨率决定了所获得图像的空间分辨率,然而,正如前文所分析的一样,通过精确的扫描控制系统和地面实时处理电子学,完全有可能提高图像的空间分辨率,一个典型的例子就是法国的 SPOT-5 卫星。它搭载了高分辨率几何成像仪(High Resolution Geometric Imaging Instrument, HRG),并采用了全新的 Supermode 工作方式,利用两幅 5 米分辨率的图像生成一幅 2.5 米分辨率的图像产品,其基本工作原理是:在 HRG 成像仪的同一焦平面上放置两个 12000 个像元的线阵 CCD 传感器,且这两个线列传感器的相对位置有严格的几何限定,即在沿卫星飞行方向和垂直于飞行方向均相互错开 1/2 个像元。这与本文所讨论的探测器摆放方式及其 1/2 像元重叠采样的技术出发点是完全相同的,只是在合成高分辨率图像时采用的方法不同而已。

此外,为了验证表1中有关误差扩散分析结果的可靠性,这里对 FY-2(B) 部分时次的可见光通道采用低采样率合成处理,通过比较不同合成比处理后图像信噪比(定义参阅文献[5])的变化来佐证之。这里选择了 FY-2(B)2000 年 11 月到 2001 年 1

月间的两幅可见光通道图像,并将其进行低采样率合成来模拟空间采样率降低。对于 $\frac{1}{N}$ 采样率合成,具体做法如下:对图像进行 $N \times N$ 窗口的加权平均,当忽略探测器以及扫描控制系统的非均匀性时,可简单地用几何平均来代替。

图3给出了可见光通道不同低采样率合成下图像信噪比变化曲线。需要说明的是,由于地球目标的可见光通道 3dB 平均带宽约为 109.5KHz,考虑到自旋稳定卫星的转速不均匀等因素影响,为了保证采集到的信息不丢失并与星上基准时钟同步,该通道采样率被设定为 437.5KHz,约为通道带宽的 4 倍^[6],图3中横坐标就是通道采样率和通道带宽的比值 β 。由采样定理可知,对于低通型信号而言,当采样率为信号带宽的 2 倍($\beta = 2$)时,刚好可以无失真的恢复原始信号。从信号恢复角度而言,此时滤波器的带宽是最佳的,即引入的噪声最小,信噪比最高,如图3所示,此时的过采样率 $\tau = 1$ 。当采样频率到达信号带宽的 4 倍($\beta = 4$)时,如图3最右侧的两个数据点,此时 $\tau = 2$,图像信噪比下降约 10 ~ 13dB;另一方面,假定系统的误差主要来自扩散误差,结合表1中给出的 $\tau = 2$ 时扩散误差的稳定值,则系统误差均值可以简单地表示为:

$$E_{total} = 3.25 \times \bar{e} \quad (17)$$

结合文献[5]中图像信噪比的定义,则当 $\tau = 2$ 时,则图像信噪比增量可以表示为:

$$\begin{aligned} \Delta SNR &= 20 \times \lg\left(\frac{\bar{S}}{\bar{e}}\right) - 20 \times \lg\left(\frac{\bar{S}}{E_{total}}\right) \\ &= -20 \times \lg(3.25) \approx -10.2 \text{dB} \quad (18) \end{aligned}$$

式(18)中的负号表示图像信噪比的下降, \bar{S} 为随机图像信号的均值,且理论上分析的图像信噪比下降与图3中的数据比较吻合,这在一定程度上佐证了本文分析结果的正确性;另一方面,这也表明:对于

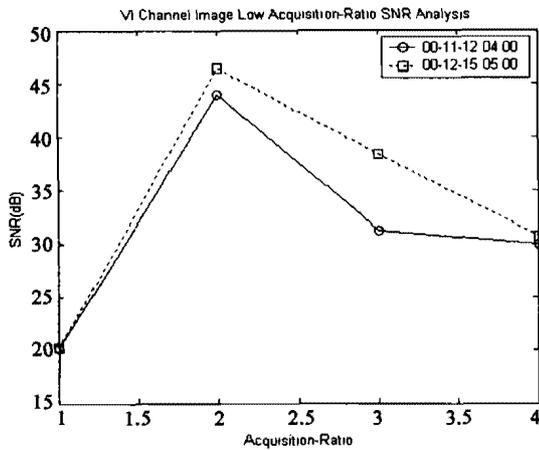


图3 可见光通道不同低采样率合成下图像信噪比对比图

Fig. 3 SNR contrast of different low composed ratio of VIS channel images

特定的光学成像系统而言,无论采用何种方法来提高来图像的空间分辨率,都是已牺牲一定的信噪比为代价的。

4 技术方案的可行性讨论

很显然,制约该技术方案实现的关键因素有两个方面:系统信噪比和扫描控制精度,下面就这两个方面的内容分别进行讨论。

一方面,将长行列探测器分多列交错摆放,并采用过采样的扫描控制方式,利用地面处理可以提高成像系统的图像分辨率,但它是以降低一定的系统信噪比为代价的,因此,该方法更适合于有较高信噪比的情况。当探测器的探测度(D_A^*)和IGFOV一定时,由于极轨卫星的平台高度仅为地球同步轨道卫星平台高度的 10^{-2} 量级,在不考虑大视场杂散光的影响时,则在极轨卫星平台下到达探测器的能量比到达同步轨道卫星平台的信号能量约高40dB,很显然,从这个意义上来说该技术更易于在极轨卫星平台下实现;

另一方面,从扫描控制角度出发,以地球同步轨道卫星平台为例,由于目前扫描控制的绝对精度为 $4 \sim 5$ urad,而可见光通道的IGFOV为约30urad,当过采样率 $\tau \geq 2$ 时,此时位置控制的相对精度已经大于30%,误差较大,技术实现的可行性不大;但对于极轨卫星平台,由于其在相同空间分辨率的情况下,

IGFOV是前者的100倍,当扫描控制和姿态控制水平相当时,该提高系统图像空间分辨率的技术仍然是可行的。

综合上述分析,本文所给出的在三轴稳定平台下提高行列遥感仪图像空间分辨率的技术方案,在现有技术条件下在极轨卫星平台下实现的可能性更大,具体的过采样率(τ)的取值需要根据实际情况和需要来定,即需要在系统信噪比和空间分辨率之间做折中的选择。

5 结语

本文着重讨论了3轴稳定平台下,通过改变行列探测器的摆放形式,增加系统的空间过采样率,借助高速数字处理技术等来实现提高地面所获得图像空间分辨率的一种可行技术途径,且技术出发点的有效性在SPOT-5 HRG的专利技术中已中得到证实。同时,本文还对基本迭代算法以及由此给系统带来的误差扩散效应做了详细分析并给出了量化的结果,为仪器设计提供了依据。因此,在现有条件下,该技术有望率先在极轨卫星平台下得到应用。

REFERENCES

- [1] ZHANG Xian-Da. *Modern Signal Process* [M]. Beijing: Tsinghua University Press. (张贤达. 现代信号处理. 北京: 清华大学出版社), 1995: 5.
- [2] Shea James J, On-orbit MTF measurements [C]. *SPIE*, 1996, 2812: 221—228
- [3] Candell L M, Weitz D M, Electronics considerations for a geostationary interferometer sounder [C]. *SPIE*, 1996, 2812: 446—452
- [4] GUO Qiang, CHEN Gui-Lin. A fast algorithm of earth-edge detection for space remote sensing Images under strong noises [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (郭强, 陈桂林. 强噪声背景下在遥感云图中提取地球圆盘的快速算法, *红外与毫米波学报*), 2003, 22(5): 368—372.
- [5] GUO Qiang. Study on the real-time evaluation for the qualities of images of the geostationary meteorological satellites [D]. Shanghai Institute of Technical Physics, C. A. S. Ph. D. Dissertation (郭强, 静止气象卫星图像质量实时评价技术研究. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所博士学位论文), 2003.
- [6] GUO Qiang. Study on the high-speed acquisition and pre-process for the images of the geostationary meteorological satellites [D]. Shanghai Institute of Technical Physics, C. A. S. Master Dissertation (郭强, 静止气象卫星图像高速采集和预处理研究. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所硕士学位论文), 2001.