DOI:10.19789/j.1004-9398.2015.01.016

超分辨率采样模式中的高模式和超模式对比研究

尹志达 周春平

(城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地; 资源环境与地理信息系统北京市重点实验室;
三维信息获取与应用教育部重点实验室; 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048)

摘 要

超分辨率技术用于提高卫星遥感影像分辨率已经在国际上得到了越来越多的关注和认可,高模式(hipermode)和超模式(supermode)是超分辨率技术中非常重要的两种采样模式. 本文对高模式和超模式进行了对比研究. 通过两种模式的采样原理、采样效果、采样数据分析等几个方面的对比,得出两种模式的优缺点并分析了在当前的技术环境下采用哪种模式具有更多的优势和性价比.

关键词: 超分辨率, 采样模式, 高模式, 超模式.
中图分类号: P237

0 引 言

卫星遥感具有覆盖面大、持续时间长、实时性强、不受国界地(水)域限制等独特优势,广泛地应用于资源开发、环境监测、灾害研究、全球变化分析等领域,深受各国的高度重视. 卫星图像的空间分辨率是衡量卫星遥感能力的一项主要指标,也是衡量一个国家航天遥感水平的重要标志[1]. 从民用角度来说,高分辨率民用遥感卫星在国民经济发展的各个领域,如森林防火、灾害预报、资源勘探等方面作用日益明显. 因此探讨一种既经济又可行的提高遥感相机地面像元分辨率的方法,既有理论意义又有工程应用价值[2]. 一方面由于CCD像元尺寸的限制,遥感成像系统焦平面探测器阵列的采样频率通常都远不能满足奈奎斯特条件,因而最后处理所得到的遥感图像会因高频混迭而使像质下降,这种欠采样现象在红外遥感成像系统中尤为常见; 另一方面,高分辨率CCD相机造价昂贵,体积和重量都很大. 因此,如果能够利用低分辨率CCD相机成像,再利用图像融合技术来重构高分辨率图像,便能够降低风险和成本[3]. 通过经典的非常规的采样模式——高模式和超模式采样来提高遥感影像分辨率的效果已经逐渐得到认可,本文目的就是对两种经典非常规采样模式从采样原理、采样效果、采样数据分析等几方面进行对比研究.

1991年,法国国家空间中心(CNES)在SPOT系列研制的框架中,开展了一项为期5年的工程研究. 这项研究从航天遥感相机的光学质量、CCD采样密度、星上数据存储、压缩和传输到图像地面预处理等方面,综合研究了为增加SPOT-5的空间分辨率而须采取的焦面CCD排列方法的最佳模式,并建立了完整的数学模型,最后得出了SPOT-5超分辨率(HTR)工作模式[2]. 国外研究超分辨率采样技术的典型代表还有德国宇航中心研制的红外遥感器HSRS(Hot Spot Recognition Sensors)和莱卡公司研制的数字航空相机ADS40[4]. 国内对于此技术的叫法并不统一,有的称为亚像元采样技术,有的称为高模式、超模式采样技术,还有的叫差分采样技术[5]. 但是无论如何叫法,其理论方法都可归结为两种: 一是改变采样模式的CCD阵列组合方式,二是改变采样模式的空间采样频率. 中国空间技术研究院508所遥感载荷专家乌崇德研究员在《提高卫星和CCD相机地面分辨率至优于5米的方案设想》[6]的报告

收稿日期: 2013-04-01

* 国家基金重点项目: 北京地区地面沉降三维形变及演化机理研究: (41130744/D0107); 国家自然基金: 地下水降落漏斗区动静载荷演化诱发地面沉降机理研究: (41171335/D010702); 973计划前期研究专项课题: 城市典型区域不均匀沉降信息获取与机理研究(2012CB723403); 北京市自然科学基金(重点): 地面沉降对京津高速铁路运行影响及调控方法研究(8101002).

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

中提出了两种提高遥感图像地面分辨率的方案设想. 一是通过采用小像元尺寸的 CDC 器件,二是采用类 SPOT－5 的亚像元成像技术①. 周春平、田越、季统凯等总结出在传输型 CCD 扫描卫星的星载相机上通过多排 CCD 的错位,同时进行地面数据融合,来提高图像空间分辨率的理论是可行的[7].

1 三种采样模式介绍

1.1 CCD 相机及常规采样模式

以 CCD 相机作为遥感成像设备具有: 时效性好、信息量丰富、图像信息容易处理等突出的特点和优点. 目前,光学传输卫星一般基于推帚式探测原理做成的空间遥感仪器,CCD 线阵列在垂直于卫星飞行轨道的方向上逐行获取图像,同时通过卫星的在轨运动来产生轨道方向上的纵向位移.

采样过程中选取合适的采样时间(这里和积分时间相等),使子卫星点的运动速度和采样时间的乘积等于投影在地面上的线阵像元尺寸,从而可得到一个正方形,也就是一个正交的采样网格. 这样由像元尺寸给定的线阵方向上的采样间隔和卫星速度方向上的采样间隔是相等的. 如图 1,在 SPOT－5 的一个成像装置的焦平面上同时放置两个 12 000 个像元 CCD 线阵的 5 m 分辨率的 CCD 阵列,阵元尺寸 p = 6.5 μm. 积分时间 = 采样时间 = Ti = 0.752 ms,常规的全色波段(0.48 μm ~ 0.71 μm)探测模式产生一个边长为 5 米的正交网格.(一般情况下,其中一个阵列时刻打开,接收常规的 5 m 全色影像. 当有 2.5 m 接收的需求时,地面控制中心会开启 2.3 节将详细介绍的超模式,同时接收的两幅 5m 影像,经过地面一系列处理后,可以得到 2.5 m 分辨率的影像[8].)

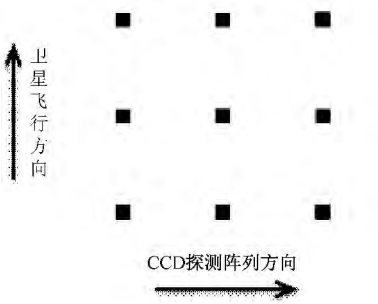


图 1 SPOT 传统的采样图

根据上表观测特点的参数可看出: 沿 CCD 线阵方向的地面采样间隔为:

$$\frac{pH}{f} = \frac{6.510 \times 832\,000}{1.082} = 5(\text{m})$$

在卫星运动的轨道方向采样间隔为:

$$v \cdot Ti = 6.6 \times 103 \times 0.752 \times 103 = 5(\text{m})$$

1.2 高模式采样模式(HIPERMODE)

以基本模式采样为 5 m × 5 m 为例,如图 2,高模式采样是在垂直于卫星飞行方向,两 CCD 线阵排列相差半个像元(SEMI-PIXEL),那么两个线阵列合并将产生一幅在行采样方向上间隔为 2.5 m,在列采样方向上间隔为 5 m 的矩形网格相对应的图像; 然后在卫星飞行方向等分采样时间,积分时间除 2(变为基本采样模式的一半),由此网格在列方向上间隔变为原来的一半,形成一幅由 2.5 m 正方形组成的网格. 由采样过程可知,高模式采样数据量是传统模式的四倍.

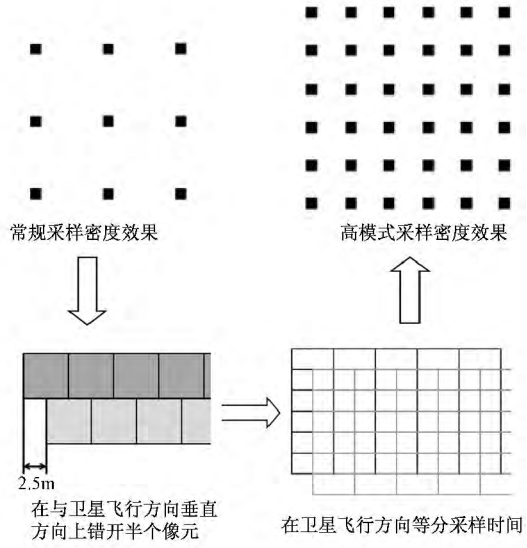


图 2 高模式采样原理图

1.3 超模式采样模式(SUPERMODE)

如图 3 所示,超模式排列为: 所使用的原始采样时间和基本模式一样,是高模式的 2 倍,形成 5 m × 5 m 正方形采样网格. 每一个线阵列产生一幅传统图象,这两个 5 m 的正方形网格在行、列采样方向上都偏移 2.5 m[9]. 两幅图象交叉得到一梅花型采样网格,此网格是一正方形但相对于轴(线阵列,速度方向)旋转了 45°,它的采样间隔是 $\sqrt{2} \times 2.5 = 3.53$ m,这种采样方式产生的数据量是传统方式的两倍.

① 乌崇德. 提高卫星和 CCD 相机地面分辨率至优于 5 米的方案设想. 508 所内部资料

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

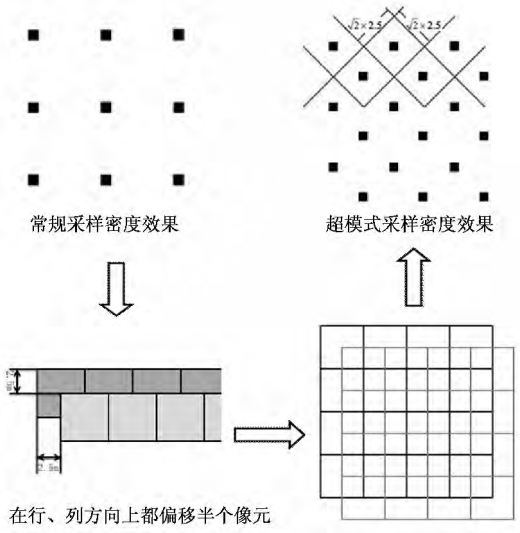


图 3　超模式采样原理图

2　高模式和超模式对比

高模式和超模式相比，超模式采样时间保持不变同基本模式相同，得到的信噪比和基本模式相同，但是高模式意味着积分时间是基本模式的一半，因此信噪比要减少. 同时超模式数据量小，是高模式的一半，有利于数据传输. 因此，法国人把两种模式经权衡比较后，认为采用超模式要好，SPOT5 就是采用了超模式[10].

下面我们通过用发展的观点和目前软硬件的现状通过如下几个方面来分析两种模式的优缺点:

2.1　从分辨率角度对比

从第二节分析两种采样模式的原理可知: 高模式可达到的理论最高分辨率是基本模式的 2 倍，而超模式可达到的理论最高分辨率是基本模式的$\sqrt{2}$倍. 以 SPOT 为例，基本模式为 5 m，高模式理论最高分辨率为 2.5 m，超模式理论最高分辨率为 3.53 m，如图 4 所示. 高模式的分辨率比超模式的高，是超模式的$\sqrt{2}$(1.414) 倍.

2.2　从数据传输角度对比

同样从采样原理出发，高模式用两个 CCD 阵列，每个阵列采样时间为常规模式的一半，也就是说数据量先后各增加了 1 倍，变为常规模式的 4 倍. 超模式只因增加了一个 CCD 阵列而增加了 1 倍，变为常规模式的 2 倍. 由此我们知道超模式数据量小，是高模式的一半，有利于数据传输. 但由于数据压缩技术和数据传输过程中应用的软硬件的发展，超模式的这一优势将不再突出.

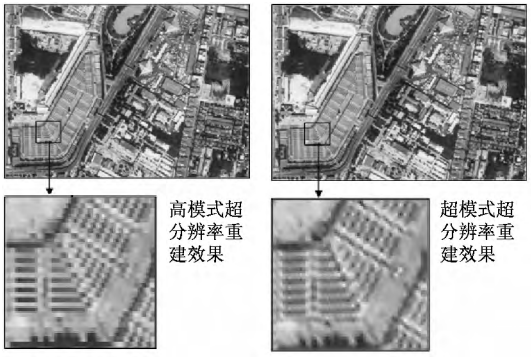


图 4　高模式、超模式图像重建后分辨率对比图

2.3　从 MTF 角度对比

高模式的 MTF 比超模式的 MTF 好. 高模式沿f_y轴的 MTF 和超模式情形相比会增加. 因为积分时间为原来的二分之一，高模式的 $\mathrm{MTF}_{\mathrm{motion}}$增加了. 用 D 表示探测器尺寸，用 Ti 表示原始的 SPOT5 积分时间，$\mathrm{MTF}_{\mathrm{motion}}$由下面的公式给出:

$$\mathrm{MTF}_{\mathrm{motion}}^{\mathrm{hiper\ mode}}(f_x, f_y) = \mathrm{sinc}\left(f_y \frac{vTi}{2}\right)$$

$$\mathrm{MTF}_{\mathrm{motion}}^{\mathrm{super\ mode}}(f_x, f_y) = \mathrm{sinc}(f_y vTi)$$

但是，为了改善 MTF 并且确保它们沿两轴对称，一种方法是减少积分时间(不改变采样时间) ，另一种方法是是减少像元的光敏区，这样光敏区比探测器要小，这两种情形都会恶化信噪比. 高模式意味着积分时间除 2，因此信噪比要减少，超模式却不变.

3　结　论

1) 从数据量角度考虑超模式比高模式更好. 法国国家宇航中心(CNES) 关于采用超模式的研究是从 1991 年开始的，SPOT-5 于 2002 年发射升空，90 年代通讯技术在数据传输、存储等方面的局限使得数据在传输过程中耗费大量财力物力. 所以在当时的情况下，SPOT-5 选择超模式更具优势.

2) 在现在的数据传输条件下，高模式比超模式更好. 从 1991 年到现在的 20 年当中，特别是进入 21 世纪以后的 10 年当中，数据传输方面相关软硬件发展很快，有些当年认为是困难的问题现在已经解决，数据量对两种模式的限制都大大减少，高模式的优势也逐步展现出来. 无论是分辨率还是 MTF 方面，高模式都比超模式更具优势.

3) 通过高模式和超模式的对比，我们还看到通过改变 CCD 阵列组合以及空间采样频率的方式可以很好的实现提高卫星遥感分辨率的效果，这两个方面的变化也会引起影像分辨率、数据量、数据处理

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

难度、MTF 方面的各种变化. 因此,结合这两种采样模式,在改变 CCD 阵列组合以及空间采样频率两个方面研究发展新的采样模式,也将是今后一段时间内超分辨率技术的突破点.

参 考 文 献

[1] 吴琼,田越,周春平,等. 遥感图像超分辨率研究的现状和发展. 测绘科学[J]. 2008,33(6):66 – 69.

[2] 周峰,乌崇德. 提高航天传输型 CCD 相机地面像元分辨率方法研究. 航天返回与遥感[J]. 2002,23(3):35 – 42.

[3] 徐杰. 提高星载成像传感器空间分辨率的方法研究. 硕士学位论文[D]. 西安:西安电子科技大学. 2009.

[4] 周峰,王怀义,马文坡,等. 提高线阵采样式光学遥感器图像空间分辨率的新方法研究. 宇航学报[J]. 2006,27(2):227 – 232.

[5] 蒋斌. 非常规采样及其图像恢复研究. 南京:南京理工大学. 硕士学位论文[D]. 2006.

[6] 周春平,田越,季统凯,等. 一种提高 CCD 成像卫星空间分辨率的方法研究. 遥感学报[J]. 2002,6(3):179 – 182.

[7] 周峰,王世涛,王怀义. 关于亚像元成像技术几个问题的探讨. 航天返回与遥感[J]. 2002,23(4):26 – 33.

[8] 李吉平. SPOT 5:沿袭和飞跃. 中国图象图形学报[J]. 2001,6(9):932 – 934.

[9] 周春平,吴胜利,石宇. 遥感卫星超分辨率技术研究[C],中国地理学会. 2004 环境遥感学术年会论文集. 长沙:中国环境遥感学,2004:295 – 302.

[10] Christophe Latry,Bernard Rouge. SPOT5 THR MODE[R]. San Diego,California: SPIE Conference on Earth Observing Systems Ⅲ, 1998.

Comparative Study of Two Super-Resolution Sampling Modes: Hipermode and Supermode

Yin Zhida Zhou Chunping

(State Key Laboratory Incubation Base of Urban Environmental Processes and Digital Simulation; Beijing Key Laboratory of Resource Environment and Geographic Information System; Key Laboratory of 3 – D Information Acquisition and Application, Ministry of Education; College of Resources, Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048)

Abstract

Using super-resolution technique to improve the resolution of satellite remote sensing image has gained more and more attention and recognition in the international community, hipermode and supermode are two important sampling mode in super-resolution technology. The hipermode and the supermode are compared in this paper. We compared this two sampling mode in three aspects: the principle of sampling, the sampling effect and the sampling data analysis. we obtained the advantages and disadvantages of the two sampling mode and studied which mode have more advantages and higher cost performance in the current technology environment.

Key words: super-resolution, sampling mode, hipermode, supermode.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net