

斜采样技术的混叠分析及分辨率计算

王 静, 徐丽燕, 夏德深

(南京理工大学计算机科学与技术学院, 江苏南京 210094)

摘 要: 斜采样技术通过将线阵探测器倾斜一定的角度并调节积分时间的方法, 利用较低成本实现了探测器的亚像元成像. 本文对单线阵斜采样及超模式斜采样方式的混叠及分辨率进行了研究. 通过对采样方式在频域对偶网格的分析, 建立了斜采样成像系统与混叠的关系, 在有效分辨率的意义下, 确定了混叠与噪声最小的最佳倒易晶胞, 将错位的频谱恢复到了正确的位置, 提高了分辨率. 实验结果表明, 通过最佳倒易晶胞去除混叠的斜采样技术有效地提高了线阵采样式光学遥感图像分辨率.

关键词: 斜模式采样; 超模式斜采样; 最佳倒易晶胞; 有效分辨率

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 05-1067-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.05.033

The Aliasing Analysis and Resolution Calculation of Tilting Sampling System

WANG Jing, XU Li-yan, XIA De-shen

(School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract: The tilting sampling which rotates the single array with a degree and reduces the sampling distance can get a better resolution with less hardware cost. This paper introduces tilting model and the super-tilting model sampling. Then the resolution under different sampling systems is discussed. Based on reciprocal cell in the frequency domain, the relation model of aliasing and tilting sampling is built. The effective resolution based optimal reciprocal cell is calculated to get the set of spectrum with less aliasing and noise. Experimental results indicate that tilting sampling mode with optimal reciprocal cell improves the resolution effectively.

Key words: tilting sampling; super-tilting sampling; optimal reciprocal cell; effective resolution

1 引言

遥感经过近 40 余年的发展, 逐渐形成了复杂多样的立体化对地观测遥感体系, 正在向更高的空间分辨率、光谱分辨率、辐射分辨率和时间分辨率的方向发展. 高分辨率的遥感图像对遥感影像信息的提取和分析是非常重要的. 研制更高分辨率的星载成像传感器是解决高分辨率对地观测的核心技术, 但是由于受到硬件制造工艺水平、卫星载荷的尺寸和重量等方面的多重限制, 要想在图像分辨率方面取得新的突破越来越困难. 因此, 研究基于图像处理的方法来提高遥感图像的分辨率就成为了一种可能的解决办法.

于 2002 年发射的法国 SPOT-5 光学遥感卫星首先采用了亚像元采样技术, 利用两排左右错开半个像元的线阵探测器获取图像, 在不改变探测元尺寸情况下使得卫星分辨率由 5m 提高到 2.5m^[1,2]. 亚像元采样技术在

SPOT-5 中的巨大成功给提高遥感图像分辨率带来了新的思路. 继 SPOT-5 之后, 德国宇航中心研制的红外传感器 HSR(Spot Recognition Sensors)^[3]和莱卡公司研制的数字航空相机 ADS40^[4]关于亚像元成像技术又提出了 Staggered Array 的概念.

亚像元成像技术通过提高采样式成像系统的空间和时间采样频率, 提高了传输型光学传感器图像空间分辨率. 由于亚像元成像技术本身并没有改变成像系统的截止频率, 而只是提高了采样频率, 造成了成像系统的混叠进一步加大, 而混叠对图像质量有严重的影响甚至会改变图像纹理的方向特性. 设计抗混叠滤波器^[5,6]可以达到降低混叠的目的, 但由于抗混叠滤波器本身的物理特性, 抗混叠滤波器在降低混叠的同时滤除了部分可用的图像高频信息, 这将导致图像模糊, 这一点在亚像元采样方式下尤其明显. 基于非均匀采样技术的去混叠方法^[7,8]是信号处理领域的研究热点, 但不适用于遥感

器成像阵列的设计.迟学芬等^[9]针对遥感图像捕捉系统,采取提高纵向扫描频率、改变数据结构的方法得到彼此有相对位移的采样图像从而降低混叠.钱霖等^[10]提出了一种面阵 CCD 成像的对角线错位合成方法,将两幅沿对角线方向错位采集的 CCD 图像叠加成一幅合成图像,将合成图像的分辨率提高到原来的 1.4 倍.周峰等提出了单线阵斜模式采样^[11]及超模式斜采样^[12],通过将线阵探测器倾斜 45°并改变积分时间采样,达到提高分辨率的目的.

本文通过对斜模式采样及超模式斜采样技术频域对偶网格的分析,建立了斜采样成像系统与混叠的关系,在有效分辨率的意义下,确定了最小混叠与最小噪声的倒易晶胞,将错位的频谱恢复到了正确的位置,减少了混叠,提高了分辨率.

2 亚像元采样成像系统中的混叠分析

2.1 混叠成因及影响

根据香农采样定理,当采样信号的最高频率大于奈奎斯特采样频率(Nyquist frequency)的一半时,超出的高频溢出叠加到低频部分,从而使得这些成分在空域中不能正确的表达,这种现象就称为“混叠”.

目前的采样式光学遥感器光学系统截止频率大于系统的奈奎斯特频率,属于欠采样系统,在没有噪声,且传递函数具有紧密支持的情况下,采样得到的图象仍没有紧密的频谱支持.因此在有限区域采样得到的图象将引入混叠.即倒易晶胞的支撑域小于图像频谱的支撑域,在倒易晶胞中必然会包含混叠.图 1 描述了在欠采样条件下,混叠是如何产生的.其中图 1(a)为原始图像频谱,图 1(b)显示了当不满足香农采样定理时倒易晶胞的覆盖,图 1(c)为采样后得到的频谱,其中点划线的部分即为混叠.

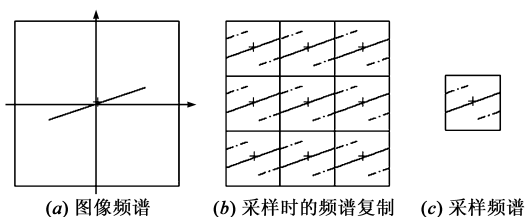


图1 欠采样示意图

由于亚像元成像技术本身并没有改变成像系统的截止频率,而只是提高了采样频率,造成了成像系统的混叠进一步加大.混叠是造成高分辨率遥感图像质量退化的重要因素之一,严重的混叠可能改变图像纹理的方向(图 2(b))、将光滑的曲线截断成点划线(图 2(d))、使光滑边缘变成锯齿状(图 2(f))等,这将影响判读和测绘的精度.

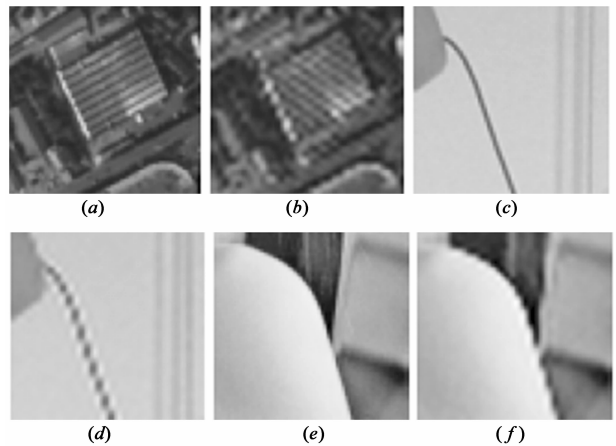


图2 混叠对图像的不良影响

2.2 基于二维周期采样的频域对偶网格分析

根据空间域与傅里叶域的对偶关系,空域采样网格在傅里叶域形成相应的对偶网格.如果采样网格在空域中以 $\mathbf{V}_1 = (v_{11}, v_{12})^T$ 和 $\mathbf{V}_2 = (v_{21}, v_{22})^T$ 为基进行延拓,那么傅里叶域中与之对应的对偶基为 $\mathbf{U}_1 = \frac{1}{\det \mathbf{V}} (v_{22}, -v_{21})^T$, $\mathbf{U}_2 = \frac{1}{\det \mathbf{V}} (-v_{12}, v_{11})^T$, 图像频谱在傅里叶域中以 $\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2$ 为基进行延拓.

目前常规的线阵采样式光学系统多为单线阵推扫成像,线阵方向与卫星飞行方向垂直,其采样网格为正方形.用 p 表示探测器像元中心距,扫描向采样间距也取为 p ,则空域采样网格基底为 $\mathbf{V}_1 = (p, 0)^T$, $\mathbf{V}_2 = (0, p)^T$, 其对偶基 $\mathbf{U}_1 = (\frac{1}{p}, 0)^T$, $\mathbf{U}_2 = (0, \frac{1}{p})^T$.

超模式采样技术在相机焦面放置了两排 CCD 器件,两排 CCD 器件的空间位置在 CCD 方向错开 $0.5p$, 在卫星飞行方向错开 $(K + 0.5)p$ (K 为正整数),探测器飞行方向的时间采样频率不变.其空域采样网格基底为 $\mathbf{V}_1 = (p, 0)^T$, $\mathbf{V}_2 = (\frac{p}{2}, \frac{p}{2})^T$, 对偶基为 $\mathbf{U}_1 = (\frac{1}{p}, -\frac{1}{p})^T$, $\mathbf{U}_2 = (0, \frac{2}{p})^T$.

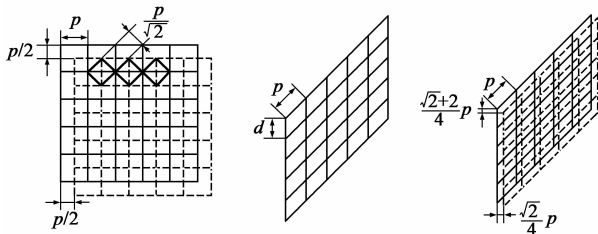
单线阵斜模式采样^[11]及超模式斜采样^[12]从另一个角度探索了实现亚像元采样的新方法.

单线阵斜模式采样把线阵列探测器倾斜一定角度,同时控制扫描方向采样间距进行图像数据采集,从而避开了两排 CCD 线阵制造困难、配准精度难以控制的问题.当线阵倾斜角度为 θ ,扫描方向采样间距为 d 时,单线阵斜模式采样网格的基底为 $\mathbf{V}_1 = (p \cos \theta, p \sin \theta)^T$, $\mathbf{V}_2 = (0, d)^T$, 其对偶基为 $\mathbf{U}_1 = (\frac{1}{p \cos \theta}, 0)^T$, $\mathbf{U}_2 = (-\frac{\tan \theta}{d}, \frac{1}{d})^T$.

超模式斜采样技术在超模式的基础上将两排 CCD

线阵倾斜一定角度,进一步提高了图像空间分辨率.该采样技术采用与超模式采样相同的两排 CCD 线阵,扫描向采样间距为 d ,其空域采样网格基底为 $V_1 = (\frac{\sqrt{2}}{4}p, (\frac{\sqrt{2}}{4} - \frac{1}{2})p)^T, V_2 = (0, d)^T$,对偶基为 $U_1 = (\frac{2\sqrt{2}}{p}, 0)^T, U_2 = (\frac{1}{d} - \frac{\sqrt{2}}{p}, -\frac{1}{d})^T$.

图 3 为超模式采样、单线阵 45°斜模式采样及 45°超模式斜采样方式的空域采样网格示意图.实线、虚线分别表示一列 CCD 成像形成的网格.



(a) 超模式采样 (b) 单线阵45°斜模式采样 (c) 45°超模式斜采样
图3 采样网格

3 基于有效分辨率的最佳倒易晶胞

3.1 标称分辨率

图像分辨率(Image Resolution)通常以每英寸的像素数(PPI, pixel per inch)或者每厘米的像素数(PPC, pixel per centimeter)来衡量.本文用 r_{nom} 表示单位面积的采样点数,称为标称分辨率,它代表了空间采样网格 Γ 的密度 $\rho(\Gamma)$.

考虑空域与傅里叶域的对偶关系,傅里叶域中对偶网格记为 Γ^* ,倒易晶胞记为 D^* , r_{nom} 可表示为:

$$r_{nom} = \rho(\Gamma) = \frac{1}{(2\pi)^2} \frac{1}{\rho(\Gamma^*)} = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{D^*} 1 \quad (1)$$

即 r_{nom} 与对偶网格倒易晶胞的面积成正比.

遥感成像中分辨率一般使用地面采样距离(GSD, ground sampled distance)的概念来描述,在卫星的轨道高度和相机的光学焦距确定的情况下,GSD 与探测器像元尺寸 p 成正比.本文用 R_{nom} 表示相邻采样点之间的距离,称为标称分辨距离:

$$R_{nom} = r_{nom}^{-1/2} \quad (2)$$

3.2 有效分辨率

由于成像是欠采样的,采样得到的图像频谱在不同点存在不同大小的噪声和混迭.所获得图像的傅立叶变换可以表示为:

$$\hat{g} = G + G_{alias} + \hat{n} \quad (3)$$

其中 G 表示真实的图像频谱; G_{alias} 表示混叠频谱; \hat{n} 表示噪声频谱,即采样得到的图像是真实图像频谱、混叠频谱和噪声频谱的叠加.

标称分辨率 r_{nom} 可看做倒易晶胞 D^* 中所有频域位置都被赋予了相同的权重 1,没有考虑混叠及噪声对图像质量的影响.用考虑混叠和噪声的权重函数 w 来代替公式(1)中的权重 1,可以使分辨率的测度更精确.由于真实的图像频谱是不可知的,这里使用相对混叠和相对噪声的概念,即 w 是相对混叠 $\frac{G_{alias}}{G}$ 和相对噪声 $\frac{\hat{n}}{G}$ 的函数,记为 $w(a, b)$.

权重函数 w 需要满足以下条件以便对高水平的噪声和混叠作出惩罚:

$$(1) w(a, b) \in [0, 1];$$

$$(2) w(0, 0) = 1;$$

$$(3) w(+\infty, b) = w(a, +\infty) = 0;$$

(4) $w(\cdot, b)$ 对所有的 b 都是非递增的, $w(a, \cdot)$ 对所有的 a 都是非递增的.

即权重函数的值在没有混迭和噪声时应接近于 1,而在混叠或噪声超过信号时接近 0,对相对混叠系数与相对噪声系数分别是递减函数,并且当有一个相对系数值很大时,权系数为 0.由此构造权重函数为:

$$w(a, b) = \left(1 - \frac{a}{\theta_{alias}}\right)^+ \left(1 - \frac{b}{\theta_{noise}}\right)^+ \quad (4)$$

其中, θ_{alias} 与 θ_{noise} 分别为相对混叠与相对噪声阈值.当 $a \geq \theta_{alias}$ 或 $b \geq \theta_{noise}$ 时(即噪声或混迭超过一定门限值时)就有 $w(a, b) = 0$.原则上应该设定 $\theta_{alias} \approx \theta_{noise} \approx 1$ 来表示当混迭或噪声大于真实信号的情况,此时傅立叶系数就可以忽略,因为它基本不含有有用的信息.但是,由于我们的感知系统能够容忍噪声的水平远远高于混迭,这里设定 $\theta_{alias} \approx 0.2, \theta_{noise} \approx 5$.假定使用相同的探测元,图 4 给出了在不同倾斜角度及采样间距的斜模式采样及超模式斜采样中权重 w 在倒易晶胞上分布的示意图.

那么新的分辨率度量,称之为有效分辨率 r_{eff} ,可定义为:

$$r_{eff} = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{D^*} w\left(\frac{G_{alias}}{G}, \frac{\hat{n}}{G}\right) d\xi \quad (5)$$

同样的,有效分辨距离可定义为:

$$R_{eff} = r_{eff}^{-1/2} \quad (6)$$

3.3 基于有效分辨率的最佳倒易晶胞

由于有效分辨率定义于倒易晶胞的范围内,那么可以根据有效分辨率的度量来调整倒易晶胞的形状,以获得更优的分辨率.定义最佳倒易晶胞:

$$D_{ORC}^* = \{\xi \in R^d : w_{ab}(\xi) > w_{ab}(\xi + \gamma), \text{ for all } \gamma \in \Gamma^*, \gamma \neq 0\} \quad (7)$$

根据有效分辨率的定义(5)可知,在最佳倒易晶胞内,基于权重 w_{ab} 的有效分辨率 r_{eff} 最大.权重 w_{ab} 可以看做倒易晶胞内不同位置上混叠与噪声的度量,最佳倒

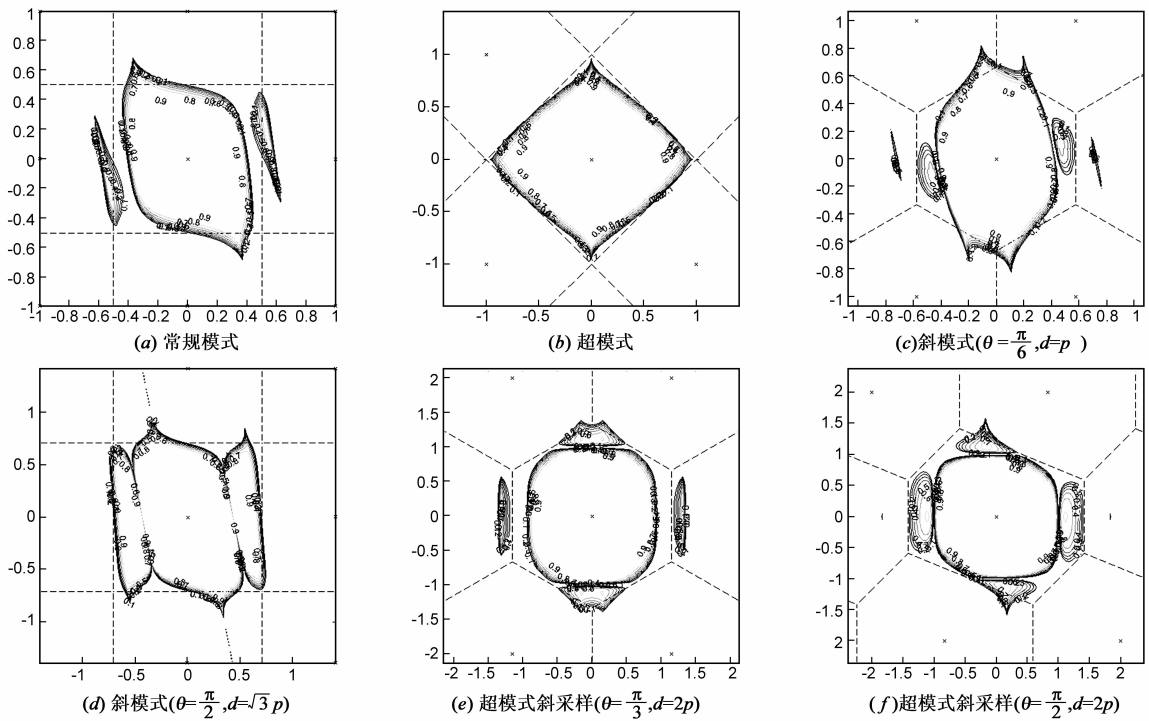


图4 有效分辨率权重示意图

易晶胞将错位频谱调整到了正确的位置上。

基于最佳倒易晶胞的有效分辨率则可定义为：

$$r_{ORC} = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{D_{ORC}^*} w\left(\frac{G_{alias}}{G}, \frac{\hat{n}}{G}\right) d\xi \quad (8)$$

同样定义基于最佳倒易晶胞的有效分辨距离为：

$$R_{ORC} = r_{ORC}^{-1/2} \quad (9)$$

4 实验结果与分析

实验选取了常规模式采样、超模式采样及斜采样的四组典型参数计算有效分辨率：

常规模式采样探测器边长与飞行方向采样间距均为 p ，采样网格为正方形；

超模式采样采用两排 CCD 线阵，并且 CCD 线阵方向错开 $0.5p$ ，在卫星飞行方向错开 $(K+0.5)p$ ，飞行方向采样间距为 p ；

斜模式采样方式 1 为单线阵 30° 斜采样，飞行方向采样间距为 p ；

斜模式采样方式 2 为单线阵 30° 斜采样，飞行方向采样间距为 $0.6p$ ；

斜模式采样方式 3 为单线阵 45° 斜采样，飞行方向采样间距为 $0.7p$ ；

斜模式采样方式 4 为单线阵 45° 斜采样，飞行方向采样间距为 $0.5p$ ；

超模式斜采样方式 1 为两排线阵倾斜 30° 采样，飞行方向采样间距为 p ；

超模式斜采样方式 2 为两排线阵倾斜 30° 采样，飞

行方向采样间距为 $0.7p$ ；

超模式斜采样方式 3 为两排线阵倾斜 45° 采样，飞行方向采样间距为 $0.7p$ ；

超模式斜采样方式 4 为两排线阵倾斜 45° 采样，飞行方向采样间距为 $0.5p$ 。

计算可得各种采样方式的分辨率如表 1：

表 1 中 r_{nom} 、 r_{eff} 、 r_{ORC} 分别为标称分辨率、有效分辨率及基于最佳倒易晶胞的有效分辨率，以 p^{-2} 为单位； R_{nom} 、 R_{eff} 、 R_{ORC} 分别为空间标称分辨距离、空间有效分辨距离及基于最佳倒易晶胞的空间标称分辨距离，以 p 为单位；最后一列给出了空间标称分辨距离与基于最佳倒易晶胞的空间有效分辨距离的比值。

从表 1 中数据可以看出几种亚像元采样技术均提高了分辨率。

单线阵斜模式采样方式避开了两排 CCD 线阵制造困难、配准精度难以控制的问题，仅通过调节线阵角度及采样间距的方法就能有效提高分辨率。对比超模式与单线阵斜模式采样方式 2、单线阵斜模式采样方式 3，三者的空间分辨距离同样减少到了常规采样的 0.7，单线阵斜模式采样的有效分辨距离比超模式采样的有效分辨距离略大，经过最佳倒易晶胞调整混叠频谱后，单线阵斜模式采样基于最佳倒易晶胞的有效分辨距离分别减少到了常规采样的 0.84 和 0.81，而超模式对应的该值为 0.8；需要注意的是提高飞行方向采样间距需要减少探测器积分时间，会造成获得图像的信噪比下降，同时斜模式采样需要对获得的图像进行纠偏工作，而

超模式采样不需要。

表 1 分辨率比较

采样方式	分辨率(p^{-2})			空间分辨距离(p)			$\frac{R_{nom}}{R_{ORC}}$ (%)
	r_{nom}	r_{eff}	r_{ORC}	R_{nom}	R_{eff}	R_{ORC}	
常规模式采样	1	0.66	0.71	1.00	1.23	1.18	84.54
超模式采样	2	1.56	1.56	0.71	0.80	0.80	88.27
斜模式采样 1 ($\theta = \frac{\pi}{3}, d = p$)	1.15	0.81	0.85	0.93	1.11	1.08	85.91
斜模式采样 2 ($\theta = \frac{\pi}{3}, d = 1/\sqrt{3}p$)	2	1.38	1.42	0.71	0.85	0.84	84.11
斜模式采样 3 ($\theta = \frac{\pi}{2}, d = 1/\sqrt{2}p$)	2	1.49	1.53	0.71	0.82	0.81	87.39
斜模式采样 4 ($\theta = \frac{\pi}{2}, d = 1/2p$)	2.82	1.76	1.77	0.59	0.75	0.75	79.05
超模式斜采样 1 ($\theta = \frac{\pi}{3}, d = p$)	2.31	1.64	1.65	0.66	0.78	0.78	84.65
超模式斜采样 2 ($\theta = \frac{\pi}{3}, d = 1/2p$)	4.62	2.66	2.72	0.47	0.61	0.61	76.75
超模式斜采样 3 ($\theta = \frac{\pi}{2}, d = p$)	2.82	1.71	1.74	0.59	0.77	0.76	77.78
超模式斜采样 4 ($\theta = \frac{\pi}{2}, d = 1/2p$)	5.65	2.89	2.93	0.42	0.59	0.58	72.02

超模式斜采样方式在单线阵斜模式采样的基础上进一步提高了分辨率.对比单线阵斜模式采样方式 4 与超模式斜采样方式 3,二者同样将空间分辨距离减少到了常规采样的 0.6 左右,但是由于超模式斜采样的采样网格呈扁长的矩形,两个方向的采样率差别较大,混叠较为严重,虽然经由最佳倒易晶胞调整,但有效分辨率的提高未能达到与单线阵斜模式采样方式相似的程度。

而随着标称分辨率的不断提高,有效分辨率的提高越来越有限,这是由于在不改变成像系统 MTF 的情况下,虽然倒易晶胞的支撑域变大了,但远离倒易晶胞中心的部分 MTF 已经远远低于可分辨的阈值,即在这部分范围中的频谱信息基本无效.这说明了亚像元采样方式对分辨率的提高是有限的。

5 结束语

亚像元成像技术是实现相机小型化及提高相机空

间分辨率的有效方法.斜采样技术通过将线阵探测器倾斜一定的角度并调节积分时间的方法,利用较低成本实现了探测器的亚像元成像.而基于有效分辨率的最佳倒易晶胞通过对频域倒易晶胞形状的调整,将错位的频谱恢复到了正确的位置,实验结果表明,采样间距降低到 $0.7p$ 的单线阵 45° 斜模式采样与超模式采样性能接近,具有基本一致的标称分辨率和有效分辨率;随着亚像元采样技术获得标称分辨率的不断提高,其图像的分辨率提高越来越有限,即在不改变探测元尺寸的情况下,仅使用亚像元采样技术对分辨率的提高是有限的。

参考文献

- [1] Spot5 Supermode[EB/OL].//www.spotimage.com.
- [2] Dh er t  P, Roug  B. Image de-blurring and application to SPOT5 THR satellite imaging[A]. Geoscience and Remote Sensing Symposium 2003[C]. Malakoff, France, 2003. 318 - 320.
- [3] Skrbek W, Lorenz E. HSRs: An infrared sensor for hot spot detection[A]. Infrared Spaceborne Remote Sensing VI[C]. San Diego, California, USA, 1998. 167 - 174.
- [4] Sandau R, Braunecker B, Driescher H. Design principles of the LH systems ADS40 airborne digital sensor[A]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam 2000[C]. Amsterdam, Netherlands, 2000. 258 - 265.
- [5] Yearly M B, Griswold N C. Adaptive IIR filter design for single sensor applications[J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(2): 259 - 267.
- [6] 高志文,陶然,单涛.外辐射源雷达互模糊函数的两种快速算法[J].电子学报, 2009, 37(3): 669 - 672.
Gao Zhiwen, Tao Ran, Shan Tao. Two fast algorithms of cross-ambiguity function for passive radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(3): 669 - 672. (in Chinese)
- [7] Masry E. Random sampling of deterministic signals: statistical analysis of fourier transform estimates[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(5): 1750 - 1761.
- [8] Kumar A, Ishwar P, Ramchandran K. Dithered A/D conversion of smooth non-bandlimited signals[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2010, 58(5): 2654 - 2666.
- [9] 迟学芬,韩昌元,金辉. CCD 推扫遥感成像中的欠采样噪声处理[J].电子学报, 2003, 31(9): 1323 - 1326.
Chi Xuefen, Han Changyuan, Jin Hui. Aliasing noise processing methods in push-broom CCD remote sensing imaging system [J]. Acta Electronica Sinica. 2003, 31(9): 1323 - 1326. (in Chinese)
- [10] 钱霖,叶燕.一种提高 CCD 像元分辨率方法的初步探讨[J].光学技术, 2002, 28(4): 374 - 375.
Qian Lin, Ye Yan. Primary investigation on improving spatial

resolution of CCD imaging [J]. Optical Technique, 2002, 28 (4):374-375. (in Chinese)

- [11] 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[J]. 宇航学报, 2006, 27 (2):227-232.

Zhou Feng, Wang Huaiyi, Ma Wenpo, et al. A study on a new method for improving image spatial resolution of sampled optical imager with single array [J]. Journal of Astronautics. 2006, 27(3):227-232. (in Chinese)

- [12] 周峰,王怀义,马文坡,等. 传输型光学遥感器超模式斜采样新方法研究[J]. 航天返回与遥感, 2005, 26(3):43-46.

Zhou Feng, Wang Huaiyi, Ma Wenpo, et al. Study on supermode&tilting mode sampling technology for EO. Spacecraft Recovery and Remote Sensing. 2005, 26(3):43-46. (in Chinese)

- [13] Yu X, Yang E, Wang H. Arbitrary ratio for image/video

transcoding [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2009, 18(1):75-89.

- [14] Konrad J, Agniel P. Subsampling models and anti-alias filters for 3-D automultiscopic displays [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(1):128-140.

- [15] Gajjar P P, Joshi M V. New learning based super-resolution: Use of DWT and IGMRF prior [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(5):1201-1213.

- [16] Chughtai M A, Khattak N. An edge preserving locally adaptive anti-aliasing zooming algorithm with diffused interpolation [A]. 3rd Canadian Conf. Comput Robot Vis [C]. Washington, DC, 2006. 49-55.

- [17] Almansa A, Durand S, Rouge B. Measuring and improving image resolution by adaptation of the reciprocal cell [J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2004, 21(3):235-279.

作者简介



王 静 女, 1985 年生于山西忻州. 南京理工大学计算机科学与技术学院博士研究生. 研究方向为图像处理、卫星遥感、模式识别等.

E-mail: wangjing1195@126.com



徐丽燕 女, 1983 年生于江苏无锡. 硕博连读博士研究生, 研究方向为图像处理、遥感信息系统、模式识别等.

夏德深 男, 1941 年生于江苏南京, 教授, 博士生导师, 研究方向为图像处理、卫星遥感、模式识别等.