

评述

中国科学院学部 科学与技术前沿论坛 对地观测与导航专题

# 高分辨率对地观测的若干前沿科学问题

李德仁<sup>①</sup>, 童庆禧<sup>②</sup>, 李荣兴<sup>③</sup>, 龚健雅<sup>①\*</sup>, 张良培<sup>①</sup>

① 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079;

② 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101;

③ 同济大学空间信息与可持续发展研究中心, 上海 200092

\* 联系人, E-mail: geogjy@vip.tom.com

收稿日期: 2012-01-28; 接受日期: 2012-05-11

国家重点基础研究发展计划(编号: 2012CB719906)资助



**摘要** 简要回顾了国际高分辨率对地观测领域近十年来的发展, 介绍了我国高分辨率对地观测领域发展的现状与规划, 系统论述了从观测数据到空间信息和地学知识自动转化的机理与过程, 归纳凝练出对地观测传感网、高精度自主定位、影像理解与信息提取和聚焦服务等方面急需解决的关键科学技术问题, 为我国高分辨率对地观测系统从“量”到“质”、从面向中国到面向全球、从提供产品到提供服务的转变提出了思路。

**关键词**

高分辨率对地观测  
传感网  
遥感影像精确处理  
影像自动解译  
空间信息聚焦服务

目前, 航空航天遥感正向高空间分辨率、高光谱分辨率、高时间分辨率、多极化、多角度的方向迅猛发展. 国际商业遥感卫星 GeoEye 的空间分辨率已达到 0.41 m, 美国光学侦察卫星 KH-12 空间分辨率达 0.1 m; 美国 NASA 发射的 EO-1 对地观测卫星搭载的 HYPERION 超光谱成像仪共有 220 个谱段, 光谱分辨率为 10 nm, Proba 小卫星携带的 CHRIS 超光谱成像仪光谱分辨率最高达 1.2 nm; 微波遥感实现了全天时、全天候的对地观测, 星载 SAR 的分辨率也达到 1 m 的水平, 差分雷达干涉测量测定相对位移量的精度可达厘米至毫米级; 先进的卫星系统都具备大角度侧摆观测的能力, 使得重访周期大幅缩短.

我国已成功发射了近百颗卫星, 初步形成了资源环境、气象、海洋三个系列的遥感卫星体系. 正在运行的资源卫星, 如中巴地球资源卫星系列、“北京一号”卫星、环境与灾害监测预报小卫星星座等. 2012

年 1 月 9 日, 我国又成功发射了首颗民用立体测绘卫星“资源三号”. 在气象卫星方面, 发射了太阳同步轨道 FY 卫星系列, 最新发射的 FY-3 卫星的气象监测能力已达到世界先进水平, 我国计划发射的下一代极轨气象卫星, 将具备全球、全天候大气探测的能力. 海洋卫星方面, 已发射了海洋探测卫星系列 HY-1A, HY-1B 等. 正在实施的国家重大专项“高分辨率对地观测系统”提出, 要建立天基、临近空间、空基对地观测系统, 具备准实时、全天候获取各种空间数据的能力, 形成集高空间、高光谱、高时间分辨率和宽地面覆盖于一体的对地观测系统.

面临国内外高分辨率遥感对地观测技术蓬勃发展的热潮<sup>[1-5]</sup>, 各国所关心的是: 什么是高分辨率对地观测领域的前沿科学问题? 要准确回答这一问题是非常困难的, 其原因在于遥感科学技术是电子、计算机、地学、航空航天、制造等几十个学科所

综合形成的交叉学科, 在一篇论文中很难面面俱到地对高分辨率对地观测领域的所有前沿科学问题进行论述. 受中国科学院地学部的委托, 近期笔者主持和参加了“对地观测与导航”前沿科学与技术研讨会. 借此机会, 本文试图以满足地球科学的重大应用需求为驱动, 着眼于如何充分发挥已有的高分辨率对地观测系统的效能为主线<sup>[6-8]</sup>, 特别撰文讨论高分辨率光学遥感领域相关的前沿科学问题.

## 1 若干前沿科学问题

### 1.1 高分辨遥感影像的精确处理

高分辨率遥感影像的精确处理包含辐射精确处理和几何精确处理.

#### 1.1.1 高分辨率遥感影像的辐射精确处理

高分辨率遥感影像的辐射处理包括辐射质量改善与辐射质量提升. 质量改善的含义是处理不同因素引起的影像降质, 从而达到或接近理想条件下传感器的观测指标; 质量提升则是指要超越传感器的硬件限制, 获得更高质量的影像数据.

##### 1.1.1.1 传感器因素的辐射质量改善

任何影像传感器都会存在一定的观测误差, 在外空环境对地球进行连续观测的遥感传感器更是如此, 获取的影像经常出现噪声、模糊、死像元等现象. 虽然这些问题广受研究, 但仍然存在一些尚未解决的难题:

###### (1) 保持物理特性的遥感影像去噪

对遥感影像进行去噪, 在满足人眼视觉需求的同时, 为了避免对后续的地物识别与定量应用产生影响, 必须保持影像固有的物理特性<sup>[9]</sup>. 例如, 对多/高光谱遥感影像进行去噪, 需要尽量保持目标的光谱曲线形状, 对 SAR 影像去噪, 应该有效地保持其原有的散射与极化信息, 这些都是当前亟待深入研究的方向.

###### (2) 传感器 MTF 的自动测量与快速精确补偿

调制传递函数(MTF)是光学传感器的重要性能指标之一. 通过铺设地面靶标的方式一般可实现较为精确的量测, 然而, 在无地面靶标的条件下则需要人工选取用于 MTF 测量的刃边区域, 不仅费时费力还受到人为因素的影响. 因此, 通过对影像自身的统

计计算, 自动确定最优的刃边区域将会成为新的研究热点<sup>[10-12]</sup>. 另外, 在 MTF 补偿方面, 如何解决复原算法的精确性与运行效率之间的矛盾仍然值得进一步研究.

###### (3) 大面积坏死像元的修复

探测元件损坏问题在遥感传感器中较为常见, 而且一旦损坏将很难从硬件上进行修复, 导致影像中出现死像元现象<sup>[13]</sup>. 常规的基于内插的像元修复方法, 仅适合小面积丢失区域的修复, 对大面积的坏死像元无能为力. 近年来出现的一些信号处理新技术如压缩感知、Bandlet 变换等, 在坏死像元的修复方面展现出强大的应用潜力. 另外, 要实现连续、大面积死像元的高精度修复, 一般还需借助不同波段、不同时相数据的互补信息<sup>[14]</sup>.

#### 1.1.1.2 非传感器因素的辐射质量改善

除了传感器本身以外, 光照、大气、地形等因素都可能在一定程度上影响高分遥感影像的质量, 当前亟待解决的问题包括:

###### (1) 阴影的自动检测与去除

在高分辨率遥感影像中, 大量的阴影不仅影响了影像的视觉效果, 也加大了地物识别的难度. 当前, 无论是基于光谱信息还是基于空间信息的阴影检测方法, 都还不能实现阴影区域的全自动、高精度提取. 在阴影去除方面, 如何消除阴影去除带来的“边缘效应”、保持原有的纹理与色彩、提高处理效率等, 仍然需要进行进一步的深入研究. 实现阴影的快速自动检测与有效去除, 是提升高分遥感影像视觉效果和可辨识度的一个重要方向<sup>[15,16]</sup>.

###### (2) 高保真云雾去除

云和雾是影响遥感影像辐射质量的重要因素. 对于厚云的处理, 一般需借助多源、多时相影像数据进行信息的修补, 在处理过程中如何实现云区与非云区亮度和色彩的自然过渡是一个难题. 对于薄云、雾的处理一般通过影像自身的统计计算就可以实现, 但现有的处理方法仍然存在一定的局限性, 如不能实现自动的云雾区域检测、处理后云雾区的色彩出现偏差、非云雾区的辐射特性难以保持等, 这些都是值得关注的前沿问题<sup>[17,18]</sup>.

#### 1.1.1.3 超越传感器限制的辐射质量提升

为了超越传感器的硬件限制实现影像质量的提

升, 一般需要融合多个影像中的互补信息, 例如, 全色-多光谱影像融合技术已在遥感领域进行了广泛应用. 实现遥感影像辐射质量提升的前沿技术包括:

#### (1) 影像超分辨率重建

影像超分辨率重建是通过多幅具有互补信息的低分辨率影像进行处理, 重构一幅高分辨率影像的技术. 该技术的产生最早来源于处理多时相遥感影像的设想, 但由于时空不一致与场景多变等问题, 其在遥感领域一度发展较为缓慢. 近几年国内外学者已经证明了实现多时相影像超分辨率的可行性<sup>[19]</sup>. 另外, 随着三线阵、多角度观测平台的出现, 充分挖掘不同角度观测影像中的互补信息并实现分辨率的提升, 也是一个颇具潜力的研究方向.

#### (2) 时空信息融合

高空间分辨率的卫星观测系统往往时间分辨率较低, 为地球陆表的动态监测带来一定的限制. 为了缓解此矛盾, 遥感时空信息融合技术逐渐受到遥感学者的关注<sup>[20]</sup>, 即通过对高空间分辨率、低时间分辨率的遥感传感器影像与高时间分辨率、低空间分辨率的传感器影像进行处理, 生成时间相对连续的高空间分辨率影像序列. 该技术可以在不改变现有观测系统的条件下提高遥感影像的空间分辨率和时间分辨率, 在诸多领域具有重要的应用价值.

#### (3) 多时-空-谱遥感影像的一体化融合

除了全色-多光谱影像融合、影像超分辨率重建、时空信息融合技术以外, 高光谱-多光谱影像融合、多尺度影像融合也逐渐被应用于遥感影像. 然而, 由于各项技术的相对独立发展并缺乏统一的理论框架, 使得现有的融合方法只能处理某些特定类型的观测序列, 不能适应当前多传感器组网对地观测的发展趋势. 因此, 一个重要的发展方向是多时-空-谱遥感影像的一体化融合, 即同时顾及影像序列的多波段、多时相、多角度、多尺度等特点, 建立一体化的计算框架实现对多种观测数据的共同描述与信息融合.

### 1.1.2 高分辨率遥感影像的几何精确处理

由于传感器畸变、轨道姿态变化、地球曲率及旋转、地形起伏、大气折射等多种因素的影响, 遥感观测系统获取的影像中不可避免地存在几何畸变, 因此在数据应用之前需要进行影像的几何校正.

#### 1.1.2.1 高精度的传感器几何检校

传感器自身的成像变形, 特别是光学相机的镜头畸变、CCD 器件的几何变形等对最终的影像几何精度影响甚大. 此外, 在遥感数据获取过程中, 气压、温度、湿度等条件都会对传感器性能产生影响, 初始内方位元素等几何参数会发生改变. 尽管如此, 由于长期以来缺少高分辨率对地观测系统几何定标场支持, 在对遥感影像进行几何校正时很少考虑传感器本身误差对成像几何精度的影响, 这些误差包括: 内方位元素的误差、成像比例尺不一致系数和坐标轴间的不正交系数等. 为了提高高分辨率遥感影像几何校正的精度, 应该重视传感器几何参数的检校, 基于几何定标场进行严密成像模型和误差模型的构建, 这是实现遥感影像精密几何定位不可忽略的前提. 我们的试验研究表明, 基于几何定标场的严密标定, 我国高分辨率卫星遥感影像也能达到 0.5 像元的几何精度<sup>[21,22]</sup>.

#### 1.1.2.2 地形复杂地区的几何校正

常规的多项式几何校正方法在地形平坦地区能够有效消除影像的几何变形, 但由于没有考虑地形起伏对影像几何形变的影响, 在地面高度变化较大的复杂地区经常会产生严重的误差. 顾及地形起伏的多项式几何校正方法, 主要思路是结合影像地区的数字高程模型, 利用多项式或有理函数模型建立像点与真实三维地理坐标之间的函数关系<sup>[23,24]</sup>, 从而进行高精度的几何校正, 当前在最优函数模型的选择方面仍需要进行深入研究.

对于高分传感器常用的星载推扫式光学传感器, 影像系统校正产品的几何模型基本是用仿射变换进行表示, 忽略了系统几何校正过程中高程引起的影像变形, 因此有必要深入研究推扫式光学卫星影像系统几何校正产品的三维几何模型, 通过三维几何模型对于成像过程中的高程变形规律加以表示, 以利于利用控制点等数据进行后续的处理, 从而提高几何校正精度.

#### 1.1.2.3 稀少地面控制点的几何校正

常规几何校正方法在稀少控制点的情况下会产生较大的几何误差, 相应的前沿技术主要包括无地面控制或少量地面控制点的高精度几何校正方法.

对于完全没有地面控制点信息的情况,国际上经常使用高阶 INS 误差模型的 GPS/INS 组合定位方法获取成像瞬间的传感器外方位元素;对于同时有空中控制信息和少量地面控制点信息的情况,使用基于空中控制和少量地面控制点的外方位元素快速精密求解方法,可以结合几何定标场传感器检校获取的内方位元素,使用基于共线条件方程的严格成像模型对影像进行高精度几何校正<sup>[25]</sup>。

#### 1.1.2.4 无控制点高分辨率影像自主定位

高分辨率卫星影像在实际应用中常常面临着无法获取一定数量的高精度控制点问题,因此需要发展无控制点高分辨率影像自主定位方法。采用多传感器卫星遥感影像联合平差技术是一项可行的技术,可以充分利用已有的大量多时相高分辨率卫星遥感影像,通过多源多时相的重复观测提高自主定位精度。然而,在无控制点联合平差中,由于平差基准的缺失,联合平差的设计矩阵变为秩亏方程,导致经典的最小二乘平差不能收敛。但可以通过采用统一的多源卫星遥感影像成像几何模型,建立相对位置固定、绝对位置浮动的图形参考系,进行自由网平差,实现无控制点的遥感影像定位<sup>[26]</sup>。

### 1.2 遥感影像理解与信息提取

随着遥感影像分辨率的提高,高分辨率遥感影像呈现了大量的新特点,如几何、结构、纹理特征丰富,光谱精细化,地物目标多尺度化等等,使得传统的基于光谱解译的低分辨率遥感信息解译体系陷入困境,无法有效地解译高分辨率遥感影像。当前高分辨率遥感影像信息提取已逐步从像素层的光谱解译、结构层的基元纹理分析、以及面向对象的分割处理向规则知识、语义识别和场景建模等影像高层理解与认知的方向发展,研究的前沿是面向对象处理、多尺度分析和场景理解,其中,对象的提取与分割是基础,多尺度分析是手段,场景理解与认知是最终的目标。

#### 1.2.1 面向对象的影像处理

面向对象分析的核心思想是把对象(Object)作为影像特征提取和分析的最小处理单元。由于中分辨率影像上存在大量的混合像元,所以研究人员往往更多的关注混合像元分解和亚像元信息提取。然而,随着高分辨率卫星影像中展现了大量的细节信息和

纯净像元,使得像素在空间的聚合以及整体分析成为可能。一个典型代表就是 eCognition 商业软件的出现及其提出的面向对象分析的思想。面向对象的核心思想是把影像对象而不是像元作为最小处理单元,它的核心技术是影像分割与特征空间聚类。

近年来,面向对象分析在高分辨率遥感图像处理领域得到了广泛的应用,在高分辨率影像处理与分析领域有取代传统的面向像素方法的趋势<sup>[27-35]</sup>,但也存在很多不足,比如,尺度参数的问题,高分辨率影像是一个多尺度地物分布的复杂统一,不能用单一的尺度来描述其特性;而且,不同的尺度会出现不同的特征,一个较小的尺度不适合提取对象的结构形状特性,这些参数都需要人为的确定,有时甚至需要目视解译修改对象的属性等。

#### 1.2.2 多尺度影像处理

多尺度特征处理之所以成为研究热点完全是由高分辨率遥感影像的新特点所带来的,主要原因是:第一,从地物目标的特点上来看,地理信息要素在遥感影像上表现为一种多尺度的统一,既有大尺度、同质性的地物,如水体、草地、森林、农田,有中尺度的,具备局部均一性的目标,如屋顶、小路、花园、道路、阴影等,同时,也存在较小尺度的,引起局部信号突变的,如汽车、交通标记等。由于高分辨率遥感影像能够提供非常详细的地面特征,因此地理信息的多尺度特性在高分辨率影像上表现得更为明显;第二,在高分辨率影像中,同类地物的内部更具变化性,由于地面细节信息的充分展现,即使是同质性区域也存在着明显的光谱差异,于是造成了类别内部方差变大,光谱域的可分性减少。因此,需要在减小同质性区域内部光谱变化的同时,保护其边缘和细节信息。区域同质性增强和细节、边缘保护,需要考虑多尺度的表达和融合;第三,人眼观察和确定目标的机理是采用目标-环境-背景的多尺度模式,因此,为了模拟人眼的视觉观察方式,需要考虑影像在不同尺度层的特征<sup>[36-40]</sup>。

#### 1.2.3 多层影像场景认知模型

遥感影像解译模型经历了像元解译、局部结构特征提取、面向对象解译的发展历程。在像元解译阶段,模式识别与分类依靠光谱特征,无法解决光谱解译带来的同物异谱和异谱同物问题,而且容易产生椒

盐效应;随着分辨率的提高,研究人员提取影像局部的纹理、结构、形状等空间特征,用来补充光谱特征空间的不足,区分光谱相似的地物;然而,空间特征的提取受限于参数的设置,比如空间邻域单元的大小、尺度、方向等,另外,光谱与空间特征的叠加,会造成特征解译的不确定性;在面向对象的解译方面,影像分割是一个关键技术,然而,分割的质量直接影响面向对象分类的精度,由于地理空间的复杂性,很难自适应选择分割尺度.因此,如何利用有限的关于目标、场景、传感器的先验知识,由影像特征推断完整的复杂目标、建立层次化的场景解析模型是高分辨率对地观测领域中涉及模式识别、计算机视觉、生物智能计算和人类感知认知的多学科交叉的科学问题<sup>[41-45]</sup>.

为了建立可计算的高分辨率影像认知与机器理解模型,需要以目标特征模型为基础,利用多尺度对象的分割、影像目标的特征匹配等方法,根据“像素-对象-目标-场景”的逐层关联过程模型,将影像的机器理解问题转换为顾及上下文多重语义关系描述模型的场景理解问题,实现影像目标识别、场景解译和信息转化.目前,主要研究思路是:

(1) 像素层: 主要包括影像的光谱信息.

(2) 结构层: 以局部结构为处理单元,提取多尺度、多方向的结构、形状特征;同时,对像素层的光谱信息和结构层的方向-尺度信息进行多特征联合解译,识别光谱相似性目标.

(3) 对象层: 用对象层的形状、语义特征增强像素-结构层的结果,进一步减少解译的不确定性.

(4) 场景层: 以对象形成的区域和景观为目标,在对象层解译的基础上,利用知识和规则,对场景的属性、功能进行分析与识别.

### 1.3 对地观测传感网与聚焦服务

随着大量的高分辨率遥感卫星的运行,基于有线或无线传感器的地基观测技术也迅速发展,各种地基观测系统的数量呈指数递增.然而,单纯地增加传感器资源,仍然难以有效满足地球陆表监测综合性、应急性等多样化的需求,主要原因在于:① 卫星观测系统不能协同;② 空天地异构传感器缺乏耦合机制;③ 观测与决策服务缺乏关联.

对地观测传感网是对地观测领域出现的新方法,它是将具有感知、计算和通信能力的传感器以及传

感器网络与万维网相结合而产生的<sup>[46,47]</sup>,具备大规模网络化观测、分布式信息高效融合和实时信息服务的能力,目前已经在加州森林野火<sup>[48]</sup>、泰国洪水检测<sup>[49]</sup>、南极雪冰自动提取<sup>[50]</sup>等方面进行了初步应用.空天地一体化对地观测传感网(Earth Observation Sensor Webs)(如图1所示)由协同观测系统和聚焦服务系统组成.

协同观测系统是由许多分布式资源组成的协同观测网,分散资源通过网络整合成一个独立、自主、任务可定制、动态适应并可重新配置的观测系统<sup>[51]</sup>,它能够充分利用观测系统多平台动态耦合、多传感器信息互补、多资源联合观测的优势,更加充分合理、有效地利用观测资源,全面地提高对地观测的能力,满足日益多样的观测需求.

聚焦服务系统(如图2所示)在互联网环境下,通过一系列标准接口来提供自动化的传感器规划与调度<sup>[52]</sup>、异构观测数据获取<sup>[53]</sup>及在线数据处理<sup>[54]</sup>等服务,从而实现网络环境下多传感器资源的动态管理<sup>[55]</sup>、事件智能感知、按需观测<sup>[56]</sup>、观测融合、数据同化和智能服务<sup>[57]</sup>,从已有的地球空间信息(4A—Anytime, Anywhere, Anything, Anyone)服务能力转变为灵性(4R—Right Time, Right Information, Right Place, Right Person)服务水平<sup>[58-61]</sup>.

空天地一体化对地观测传感网的构建,需要解决多传感器协同观测、传感网数据同化与信息协同处理以及时空信息聚焦服务模型等关键科学问题.

#### 1.3.1 事件感知与多传感器协同观测

由于卫星、航空、地面等传感器系统在观测模式、成像机理、应用目的和处理方式等方面存在很大的不同,观测平台、接收系统、处理系统和分发系统之间大多是封闭、孤立和自治的,空天地观测系统缺乏关联<sup>[62]</sup>、传感器没有统一规划、观测数据很难共享<sup>[63]</sup>,无法满足陆表监测的综合性、快速应急响应的需求,需要在统一的流程<sup>[64]</sup>下构造事件、传感器、观测和决策模型相互关联的观测系统体系,提供空天地传感器的最优布局.

#### 1.3.2 对地观测传感网数据同化与信息协同处理

在对地观测传感网环境下,可实时获取多时-空-谱尺度的地基、空基和天基观测数据,为陆表参数信息提取与变化分析提供了基础数据保证.然而,由

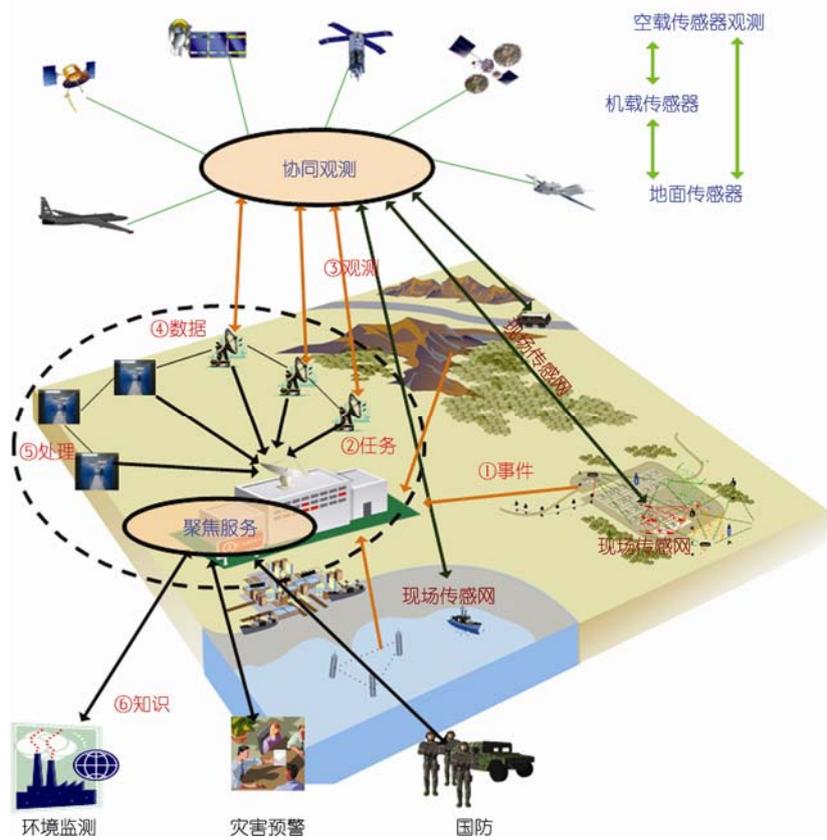


图 1 空天地一体化对地观测传感网概念图

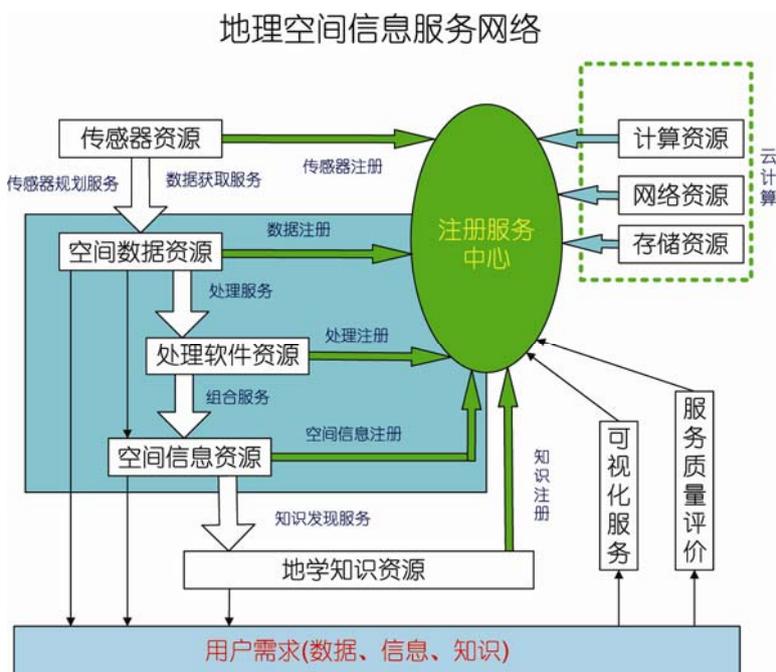


图 2 基于空天地一体化对地观测网的地理空间信息服务网

于各种空天地传感器的成像机理千差万别, 观测性能各不相同, 传统的对地观测数据处理方法不能耦合具有超强时-空-谱异质特性的多源观测数据, 不能有效地综合利用对地观测传感网中的多维互补信息. 另外, 传感网中的空间观测数据仅能表达观测参量之间的隐含关系, 无法表达各参量的时空连续分布及其转换机制. 因此, 需要在分布式网络环境下, 实现空天地数据融合<sup>[65]</sup>、同化与协同信息处理<sup>[66]</sup>, 快速、精确、全面地提供复杂时空环境多变信息.

### 1.3.3 任务驱动的时空信息聚焦服务模式

现有的决策支持和服务模型基本上采用单一的传感器数据源, 局限于孤立地获取特定的、有限的信息, 不能结合多平台、多传感器数据源提供事件监测所急需的多种时空现势信息, 不适应分布、协作、可扩展的网络化环境, 无法根据任务对传感器资源、数据资源、计算资源和决策资源进行高效聚集, 不能满足用户的多样化需求. 在对地观测传感网环境下, 传感器观测数据具有实时化、多源化特点, 数据处理和信息提取分布在不同的服务节点上, 决策模型需要主动发现<sup>[67]</sup>更多来源的相关信息参数; 面向不同应用领域用户的多样化任务需求, 需要聚合相对分散的传感器资源、时空数据、信息处理资

源、决策模型, 提供适应对地观测传感网环境的决策支持和服务模型. 因此, 需要智能聚合<sup>[68]</sup>对地观测传感网资源和模型, 实现从传感器观测、数据处理、信息提取到决策模型的无缝连接, 建立面向任务的空天地一体化对地观测传感网时空信息聚焦服务<sup>[69]</sup>, 从不同层次、不同角度向不同需求的用户提供及时、可靠、主动的信息服务, 从而满足各种综合性、区域性和专题性的分析决策需要.

## 2 结束语

本文从国内外已有的高分辨率遥感对地观测的发展现状出发, 结合我国经济建设和国防建设的需求, 提出了高分辨率遥感对地观测领域中若干亟待解决的前沿科学问题. 笔者认为, 我国高分辨率遥感对地观测系统的发展, 一定要以能够实现对自然、环境、灾害和安全重大事件的快速响应和精准服务为目标, 科学地构建和优化高分辨率对地观测系统的布局, 实现任务驱动下的多平台、多分辨率、多传感器系统的集成与聚焦服务. 只有合理地解决了本文提及的若干前沿科学问题, 才能使高分辨率遥感对地观测系统充分发挥效益, 满足国家的重大需求.

## 参考文献

- 1 李德仁. 摄影测量与遥感学的发展展望. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33: 1211-1215
- 2 李德仁, 黄俊华, 邵振峰. 面向服务的数字城市共享平台框架的设计与实现. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33: 881-885
- 3 李德仁. 信息化测绘的本质是服务. 测绘通报, 2008, 5: 1-4
- 4 李德仁. 多学科交叉中的大测绘科学. 测绘学报, 2007, 36: 363-365
- 5 李德仁, 马洪超. 空间对地观测技术研究新进展. 见: 中国科学院. 高技术发展报告. 北京: 科学出版社, 2007
- 6 李德仁. 地球空间信息学及在陆地科学中的应用. 自然杂志, 2005, 27: 316-322
- 7 李德仁. 论广义空间信息网格和狭义空间信息网格. 遥感学报, 2005, 9: 513-519
- 8 李德仁. 地球空间信息学的机遇. 武汉大学学报(信息科学版), 2004, 29: 753-756
- 9 Li H F, Zhang L P, Shen H F. A perceptually inspired variational method for the uneven intensity correction of remote sensing images. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2011, doi: 10.1109/TGRS.2011.2178075
- 10 Pan J, Wang M, Li D R, et al. A robust approach for repairing color composite DMC images. *Photogramm Eng Remote Sens*, 2009, 75: 201-210
- 11 Pan J, Wang M, Li D R, et al. Automatic generation of seamline network using area voronoi diagrams with overlap. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2009, 47: 1737-1744
- 12 潘俊, 王密, 李德仁, 等. 基于刀刃曲线分层定位的 DMC 影像修复方法. 中国科学 F 辑: 信息科学, 2009, 39: 742-750
- 13 Shen H F, Zeng C, Zhang L P. Recovering reflectance and radiance of AQUA MODIS band 6 based on within-class local fitting. *IEEE J Sel Top Earth Observ Remote Sens*, 2011, 4: 185-192
- 14 Shen H F, Zhang L P. A MAP-based algorithm for destriping and inpainting of remotely sensed images. *IEEE Trans Geol Remote Sensing*, 2009, 47: 1492-1502

- 15 Huang W, Zhang L P, Furumi S, et al. Topographic effects on estimating net primary productivity of green coniferous forest in complex terrain using Landsat data: A case study of yoshino mountain. *Japan Int J Remote Sensing*, 2010, 31: 2941–2957
- 16 Liao M S, Wang T, Lu L J, et al. Reconstruction of DEMs from ERS-1/2 tandem data in mountainous area facilitated by SRTM data. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2007, 45: 2325–2335
- 17 宋小刚, 李德仁, 单新建, 等. 基于 GPS 和 MODIS 的 ENVISAT ASAR 数据干涉测量中大气改正方法研究. *地球物理学报*, 2009, 52: 1457–1464
- 18 宋小刚, 李德仁, 单新建, 等. 基于 GPS 和大气传输模型的 InSAR 大气改正方法研究. *地球物理学报*, 2009, 52: 1156–1164
- 19 Shen H F, Ng M K, Li P X, et al. Superresolution reconstruction algorithm to MODIS remote sensing images. *Comput J*, 2009, 52: 90–100
- 20 Wang Z, Ziou D, Armenakis C, et al. A comparative analysis of image fusion methods. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2005, 43: 1391–1402
- 21 李德仁, 张过, 江万寿, 等. 缺少控制点的 SPOT-5 HRS 影像 RPC 模型区域网平差. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2006, 31: 377–381
- 22 张过, 李德仁, 袁修孝, 等. 卫星遥感影像的区域网平差成图精度. *测绘科学技术学报*, 2006, 23: 239–241
- 23 Zhang G, Fei W B, Li Z, et al. Evaluation of the RPC model for spaceborne SAR imagery. *Photogramm Eng Remote Sens*, 2010, 76: 727–733
- 24 Zhang G, Qiang Q, Luo Y, et al. Application of RPC model in orthorectification of spaceborne SAR imagery. *The Photogramm Rec*, 2012, 27: 94–110
- 25 Zhang G, Fei W B, Li Z, et al., Evaluation of the RPC model as a replacement for the spaceborne InSAR phase equation. *Photogramm Rec*, 2011, 26: 325–338
- 26 Zhang G, Li Z, Pan H B, et al. Orientation of spaceborne SAR stereo pairs employing the RPC adjustment model. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2011, 49: 2782–2792
- 27 Huang X, Zhang L P. An adaptive mean-shift analysis approach for object extraction and classification from urban hyperspectral imagery. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2008, 46: 4173–4185
- 28 Su W, Li J, Chen Y, et al. Textural and local spatial statistics for the object-oriented classification of urban areas using high resolution imagery. *Int J Remote Sens*, 2008, 29: 3105–3117
- 29 Wang L, Sousa, W P, Gong P. Integration of object-based and pixel-based classification for mapping mangroves with IKONOS imagery. *Int J Remote Sens*, 2004, 25: 5655–5668
- 30 Yu Q, Gong P, Clinton N, et al. Object-based detailed vegetation classification with airborne high spatial resolution remote sensing imagery. *Photogramm Eng Remote Sens*, 2006, 72: 799–811
- 31 Kettig R L, Landgrebe D A. Classification of multispectral image data by extraction and classification of homogeneous objects. *IEEE Trans Geosci Electron*, 1976, 14: 19–26
- 32 Paul T, Philip H. High spatial resolution remote sensing data for forest ecosystem classification: An examination of spatial scale. *Remote Sens Environ*, 2000, 72: 268–289
- 33 Sotaro T, Toshiro S. Cover: A new frontier of remote sensing from IKONOS images. *Int J Remote Sens*, 2001, 22: 1–5
- 34 Volker W. Object-based classification of remote sensing data for change detection. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2004, 58: 225–238
- 35 Roger T S, Georges S, Jean L. Using color, texture, and hierarchial segmentation for high-resolution remote sensing. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2008, 63: 156–168
- 36 黄昕, 张良培, 李平湘. 基于多尺度特征融合和支持向量机的高分辨率遥感影像分类. *遥感学报*, 2007, 11: 48–54
- 37 Binaghi E, Gallo I, Pepe M. A cognitive pyramid for contextural classification of remote sensing images. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2003, 41: 2906–2992
- 38 Bruzzone L, Carlin L. A multilevel context-based system for classification of very high spatial resolution images. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2006, 44: 2587–2600
- 39 Hay G J, Blaschke T, Marceau D J, et al. A comparison of three image-object methods for the multiscale analysis of landscape structure. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2003, 57: 327–345
- 40 Huang X, Zhang L P. Comparison of vector stacking, multi-SVMs fuzzy output, and multi-SVMs voting methods for multiscale VHR urban mapping. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2010, 7: 262–266
- 41 周成虎, 骆剑承. 高分辨率卫星遥感影像地学计算. 北京: 科学出版社, 2009
- 42 Huang X, Zhang L P. A multilevel decision fusion approach for urban mapping using very-high-resolution multi/hyper-spectral imagery. *Int J Remote Sens*, 2012, 33: 3354–3372
- 43 Song M, Civco D. Road extraction using SVM and image segmentation. *Photogramm Eng Remote Sens*, 2004, 70: 1365–1371

- 44 Aksoy S, Koperski K, Tusk C, et al. Learning bayesian classifiers for scene classification with a visual grammar. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2005, 43: 581–589
- 45 Liénou M, Maître H, Datcu M. Semantic annotation of satellite images using latent dirichlet allocation. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2010, 7: 28–32
- 46 Butler D. 2020 computing: Everything, everywhere. *Nature*, 2006, 440: 402–405
- 47 Bulter D. Agencies join forces to share data. *Nature*, 2007, 446: 354
- 48 Chen N, Di L, Yu G, et al. Geo-Processing workflow driven wildfire hot pixel detection under sensor web environment. *Comput Geosci*, 2010, 36: 362–372
- 49 Kridskron A, Chen N, Peng C, et al. Flood detection and mapping of the Thailand Central plain using RADARSAT and MODIS under a sensor web environment. *Int J Appl Earth Obs GeoInf*, 2012, 13: 245–255
- 50 Chen N, Li D R, Di L, et al. An automatic SWILC classification and extraction for the AntSDI under a sensor web environment. *Can J Remote Sens*, 2010, 36(Suppl.): 1–12
- 51 NASA. Report from the earth science technology office (ESTO) advanced information systems technology (AIST) Sensor Web meeting, 2–3 April 2008, Orlando, FL. GreenBelt. MD: NASA Earth Science Technology Office, 2008
- 52 Chen Z, Chen N, Di L, et al. A flexible Data and Sensor Planning Service for virtual sensors based on Web Service. *IEEE Sens J*, 2011, 11: 1429–1439
- 53 Chen N, Di L, Chen Z, et al. An efficient method for near-real-time on-demand retrieval of remote sensing observations. *IEEE J Sel Top Appl Earth Observ Remote Sens*, 2011, 4: 615–625
- 54 Chen N, Di L, Gong J, et al. Automatic on-demand data feed service for autoChem based on reusable geo-processing workflow. *IEEE J Sel Top Appl Earth Observ Remote Sens*, 2010, 3: 418–426
- 55 Chen N, Di L, Yu G, et al. Use of eBRIM-based CSW with SOSs for registry and discovery of remote-sensing observations. *Comput Geosci*, 2009, 35: 360–372
- 56 Chen Z, Di L, Yu G, et al. Real-time on-demand motion video change detection in the sensor web environment. *Comput J*, 2011, 54: 2000–2016
- 57 Chen N, Di L, Yu G. A flexible geospatial sensor observation service for diverse sensor data based on Web service. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2009, 64: 274–282
- 58 John D, Thomas U, Gerald S, et al. An open distributed architecture for sensor networks for risk management. *Sensors*, 2008, 8: 1755–1773
- 59 Simonis I. The Sensor Web: GEOSS's Foundation Layer. In: GEO Secretariat, ed. *The Full Picture*. Geneva: Tudor Rose, 2007. 61–63
- 60 Foster I. Service-oriented science. *Science*, 2005, 308: 814–817
- 61 Sheth A, Henson C, Sahoo S S. Semantic sensor web. *IEEE Internet Comput*, 2008, 12: 78–83
- 62 Van-Zyl T L, Simonis I, McFerren G. The Sensor Web: Systems of sensor systems. *Int J Digit Earth*, 2009, 2: 16–30
- 63 Craglia M, Bie K, Jackson D, et al. Digital Earth 2020: Towards the vision for the next decade. *Int J Digit Earth*, 2012, 5: 4–21
- 64 Yang C, Chen N, Di L. Restful based heterogeneous geoprocessing workflow interoperation for sensor web service. *Comput Geosci*, 2012, doi: 10.1016/j.cageo.2011.11.010
- 65 Zhang J. Multi-source remote sensing data fusion: Status and trends. *Int J Image Data Fusion*, 2010, 1: 5–24
- 66 李新, 黄春林, 车涛晋, 等. 中国陆面数据同化系统研究的进展与前瞻. *自然科学进展*, 2007, 17: 163–173
- 67 Chen N, Chen Z, Hu C, et al. A capability matching and ontology reasoning method for high precision Open GIS Service discovery. *Int J Digit Earth*, 2011, 4: 449–470
- 68 Yue P, Di L, Gong J Y, et al. Integrating semantic web technologies and geospatial catalog services for geospatial information discovery and processing in cyberinfrastructure. *Geoinformatica*, 2011, 15: 273–303
- 69 李德仁, 朱庆, 朱欣焰, 等. 面向任务的遥感信息聚焦服务. 北京: 科学出版社, 2010