

关于航天遥感的若干问题

陈世平

(中国空间技术研究院, 北京 100081)

摘 要 文章对航天遥感的任务、航天遥感系统和遥感数据链及遥感信息链的组成、遥感数据质量和遥感解译质量的概念予以综述,对航天遥感面临的若干问题加以说明和讨论。

关键词 遥感系统 遥感任务 数据质量 解译质量 航天遥感

中图分类号: V41

文献标识码: A

文章编号: 1009-8518(2011)03-0001-08

Some Issues about Space Remote Sensing

Chen Shiping

(China Academy of Space Technology, Beijing 100081, China)

Abstract This paper gives a review and discussion on the missions of space remote sensing, the compositions of space remote sensing system and remote sensing data chain as well as information chain. The paper also introduces the concepts about the quality of remote sensing data and interpretations. Finally some problems faced by the space remote sensing and some discussions are illustrated.

Key words Remote sensing system Remote sensing missions Data quality Interpretation quality Space remote sensing

1 引言

遥感的作用是远距离获得客观世界(实体,即目标、区域和现象)的有关信息。遥感的基础是:电磁波与实体相互作用,使其载有实体的信息;获取载有实体信息的电磁波并进行处理,得到含有实体信息的遥感数据;通过遥感信息模型反演出实体所包含的信息。遥感的过程包括正演过程(即遥感数据的获取、测量和处理过程)和反演过程(即遥感数据解译过程,主要是应用遥感信息模型分析遥感数据,从而获得信息的过程)^[1]。遥感的任务是由遥感系统实现的。图 1 示出了遥感和遥感系统的概念。遥感系统由遥感数据获取系统和遥感数据反演系统共同组成,遥感系统的输入是载有实体信息的电磁波,输出是实体所含的有关信息。实体是客观实在,包含的信息是无限丰富的,而实际上由系统获取的只是与遥感任务有关的信息。通常将遥感系统称为端对端(End to End)系统,是指系统的输入和输出中所涉及信息具有相同部分。研究者试图用保真度描述遥感系统的性能,如使用保真度的概念将获取的遥感图像与其相应景物进行比较以说明遥感系统性能^[1-2]。由于景物所含的内容和信息是无限丰富的,其“保真度”的含义是需要严格界定的。

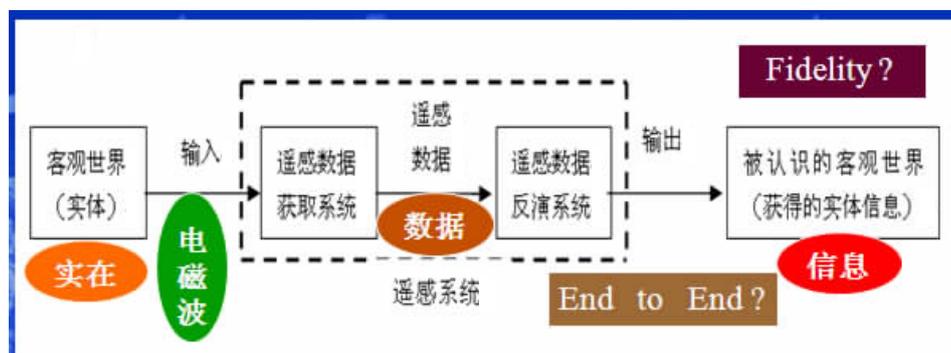


图1 遥感和遥感系统的概念

航天器平台承载传感器以实现航天遥感数据获取系统和航天遥感系统。航天遥感任务是由航天遥感系统完成的。本文对航天遥感的任务、航天遥感系统和遥感数据链及遥感信息链的组成,遥感数据质量和遥感解译质量的概念予以综述;对航天遥感面临的若干问题加以说明和讨论。

2 航天遥感的任务

自1959年2月美国发射“先锋2号”卫星首次获得地球陆地、海洋和云盖的图片,1959年10月苏联发射“月球3号”探测器首次拍摄月球背面的图片,航天遥感已经走过了50年的历史。50几年来,世界各国发射了大量用于航天遥感的航天器。航天遥感的任务概括来讲包括对地观测、天文观测和深空探测3部分。

(1) 对地观测

对地观测是航天遥感的主要任务,是指对地球的观测,包括对地球大气圈、水圈、岩石圈和生态圈的观测,也可以概括为对大气、水域和陆地的观测,以及军事应用等。

对大气观测的内容主要包括大气温度和水汽廓线、电离层电子密度、云图、风场、降水、闪电、中上层大气成分、臭氧含量及分布、气溶胶光学厚度、地球大气系统的辐射收支等^[3-4]。

对水域观测的内容主要包括流域形状和面积、水色、水温、水中叶绿素、滩涂、泥沙、水下地形、海流、大洋环流、波高、波谱、水面风场、冰雪、海面高度和拓扑等^[3-4]。

对陆地观测的内容主要包括地质、地貌、水文、土壤、植被和人工目标等土地覆盖内容,涉及在农业、林业、水文、地质、矿产、生态、城市等领域的广泛应用。

对大气、水域和陆地的观测都涉及到环境和灾害监测。

军事应用涉及侦察、预警、测地、空间目标监视和战场环境监测等。

(2) 天文观测

利用航天遥感进行天文观测是通过天文卫星实现的。天文卫星在距离地面数百千米或更高的轨道上观测,不受地球大气层的影响,可以更灵敏接收到宇宙天体辐射出来的各种波段,包括可见光、红外、紫外、X射线、 γ 射线等的电磁波,实现对宇宙天体和其他空间物质的观测。

(3) 深空探测

利用航天遥感进行深空探测是通过深空探测器实现的。深空探测器是飞经、环绕、硬着陆或软着陆在天体(指月球和月球以外的天体)上,主要利用遥感手段对天体进行观测的。

以上所述的航天遥感任务是针对航天遥感使命宏观而言的。对于每项具体的航天遥感工程,都需要明确规定它的具体航天遥感任务,任务的表征应该是定量的、可以测量的。

3 航天遥感系统、遥感数据链和遥感信息链

航天遥感的任务是由航天遥感系统实现的。图2示出航天遥感系统的组成,细化了图1的内容,突出了航天遥感系统的特点。图2还反映了航天遥感数据链和航天遥感信息链的组成。

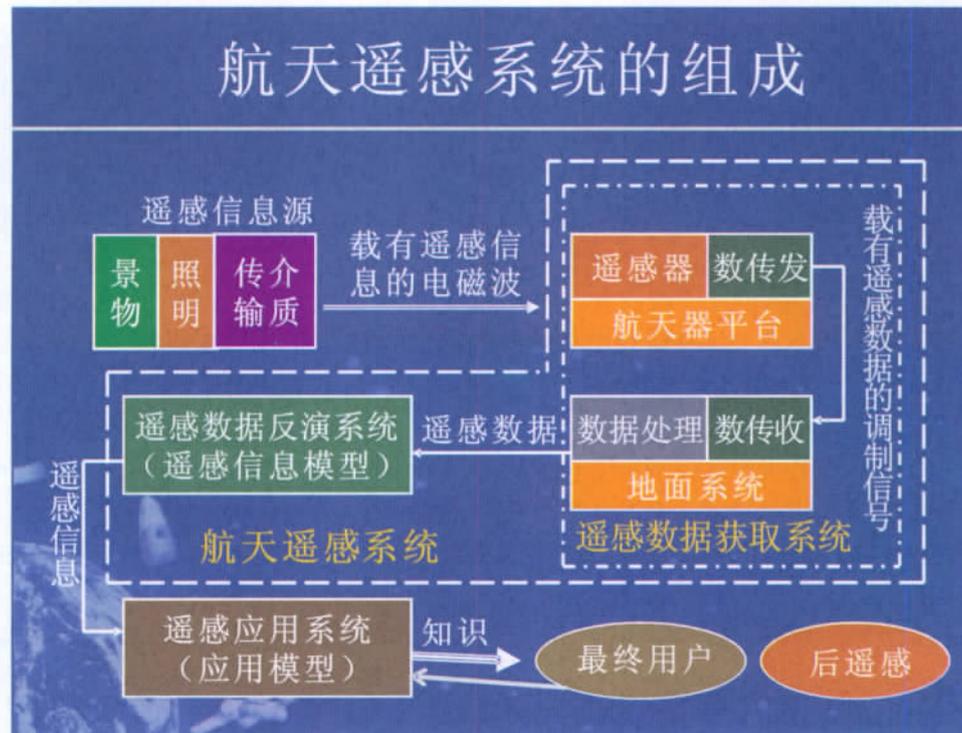


图2 航天遥感系统组成

(1) 航天遥感系统

航天遥感系统由航天遥感数据获取系统和航天遥感数据反演系统组成。在遥感数据获取系统中完成的是遥感的正演过程,在反演系统中完成的是反演过程。航天遥感数据获取系统包括载有遥感器的航天器系统和用于遥感数据接收和处理的地面系统,航天遥感系统的输入是载有景物(实体)信息的电磁波,输出是景物包含的有关信息。这些信息再送入遥感应用系统以获取有关知识,以满足航天遥感最终用户的任务需求。有研究者将这一部分称为后遥感应用技术,是指将遥感技术与各学科传统的方法和其他现代信息技术相结合,对遥感信息进行综合理解,全面挖掘和深入应用的技术^[5]。

为以下讨论方便起见,这里对正演和反演做简单必要的说明。以植被遥感为例,植被是遥感的对象,植被遥感的任务就是获取植被的有关信息。但是植物生长在地面(土壤)上,地面的状态和特性不仅影响到植物的生长状态,同时地面也直接参与了遥感的过程,地面不可避免地也成为景物的一部分。照明源是太阳,传输介质是大气。遥感数据获取系统由遥感器、平台、数据传输和处理、遥感数据生成等部分组成,分别用 $\{a\}$ 、 $\{b\}$ 、 $\{c\}$ 、 $\{d\}$ 和 $\{e\}$ 表示它们的特性和参数^[6]。

1) 植被 $\{a\}$:包括植被组分(叶、茎…)的光学参数(反射、透射…)、结构参数(几何形状、植株密度…)及环境参数(温度、湿度…)等。2) 地面 $\{b\}$:包括反射、吸收、粗糙度、含水量等。3) 照明源 $\{c\}$:包括阳光照射的谱密度、高度角等。4) 大气 $\{d\}$:包括大气组分及光学厚度等。5) 遥感数据获取系统 $\{e\}$:包括与景物的几何关系、响应、噪声、数据处理效果等。用 $\{R\}$ 表示遥感数据获取系统获得的遥感数据。 $\{ \}$ 表示特征及参数集合。

正演即由 $\{a\}$ 、 $\{b\}$ 、 $\{c\}$ 、 $\{d\}$ 和 $\{e\}$ 获得 $\{R\}$ 的过程。

$R=f(a,b,c,d,e)$ 即前向模型。

反演即由 $\{R\}$ 、 $\{b\}$ 、 $\{c\}$ 、 $\{d\}$ 和 $\{e\}$ 获得 $\{a\}$ 的过程。

$A=g(R,b,c,d,e)$ 即反演模型,也就是遥感信息模型。

以上所列的两个方程是遥感的正演过程和反演过程的理想表示,实际上要获得精确的模型是十分困难的。

(2) 航天遥感数据链

航天遥感数据链是对航天遥感数据生成过程的形象描述:其始端是景物,即客观实在(实体,即目标、区域和现象);其终端是遥感数据获取系统生成的遥感数据;其中间的组成环节包括照明和电磁波传播介质及遥感数据获取系统各组成部分。

无源光学遥感(包括可见光和红外)的照明源主要是太阳,微光条件下光学遥感的照明源表现为月光,实际上也与太阳有关。有源光学遥感的照明源是激光器,来自光学传感器自身。有源微波遥感的照明源是微波发射机,主要来自于微波传感器自身,对于双基地雷达或多基地雷达而言,照明源会来自于其它发射机,例如像利用GPS进行航天遥感的情况^[7]。一般认为,热红外和无源微波遥感不需要照明源,实际上,物体的温度是与太阳和其它条件有关的,只是在系统设计中不直接考虑照明源的作用。照明源辐射电磁波照射在景物上即照明,照明状态是辐射的电磁波尚未与景物相互作用时的状态。由于电磁波需要经过介质传播,因此照明不仅与照明源有关,还与电磁波传播介质有关。

在对地观测中,电磁波传播介质主要指地球大气,包括对流层、同温层和电离层等。传播介质既影响照明源到景物的辐射,又影响自景物到航天传感器的辐射。这种影响不仅表现为辐射强度的衰减,还产生天空光和背景光的影响^[8],以及电磁波折射和极化变化等。在深空探测中,传播介质涉及到被观测天体的环境,如火星大气。往往通过深空探测可以进一步测量和认识传播介质的状态和性能^[9]。

关于航天遥感数据获取系统各组成部分,包括航天器系统和地面系统组成部分,会因航天遥感任务不同而不同,特别是与航天传感器有密切关系,本文对此不再作进一步说明。

(3) 航天遥感信息链

航天遥感信息链是对航天遥感信息生成过程的形象描述:其始端是景物,即客观实在(实体,即目标、区域和现象);其终端是遥感数据反演系统生成的遥感信息;其中间的组成环节包括照明和电磁波传播介质及航天遥感系统各组成部分(遥感数据获取系统各组成部分和遥感数据反演系统各组成部分)。

航天遥感信息链所反映的遥感信息生成过程实际上就是遥感的正演与反演过程,其相关内容前面已经介绍。对于生成的遥感信息在遥感应用系统中的进一步处理以及相关知识的提取不属本文讨论的主要内容。

4 航天遥感数据质量

显然,首先应当关注的是航天遥感任务完成的质量(本文中的“质量”为“Quality”),也就是航天遥感系统的输出或者产品的质量。考虑到航天遥感系统的组成,航天遥感系统产品的质量不仅与遥感数据的质量有关,还与遥感数据反演系统的性能有关。从这个意义上讲,单独定义遥感数据的质量并非容易之事。宏观上,可以认为:遥感数据的质量表现为遥感数据在完成遥感任务中的应用价值,或者说表现为可从中提取信息的潜在能力^[1]。从遥感图像(图像是一种数据类型)质量的具体表征来看,目前有几种做法:一种是直接面向任务表征的,另一种是由成像系统(即遥感数据获取系统)性能表征的,还有一种是由图像(数据)自身的统计特性表征的^[1]。

典型的直接面向任务的遥感数据质量表征方法有美国的国家图像解译度评价标准(NIIRS)和墨尔本大学于2006年为测绘和制图业用户制定的正射图像分辨率及质量推荐标准^[10]等。此外,如目标发现概率、识别和确认概率、分类精度、以及测绘制图的比例尺等都属于这种表征。

基于遥感数据获取系统性能的遥感数据质量表征是应用数据获取系统的性能间接表征遥感数据质量的

方法。例如成像系统,一般是由辐射质量和几何质量,像地面采样距离(GSD)、调制传递函数(MTF)和信噪比(SNR)等表征的。

遥感数据质量的统计特性表征方法是通过运算得出遥感数据的特征统计量表征遥感数据质量的。像遥感图像的灰度均值、灰度方差、列信噪比、广义噪声、信息熵、清晰度、图像品质度量(Image Quality Measure, IQM)和图像信息密度(Information Density, ID)等,都属于统计特性表征。

目前,已建立了遥感数据质量不同表征量之间的某些关系。如通用图像质量方程(GIQE)可以反映 NIIRS 与 GSD、MTF 和 SNR 等之间的一定关系^[11-12],NIIRS 与 IQM 之间也已建立了一定的关系^[12]。

面向任务的遥感数据质量表征直接反映了遥感数据的应用价值,即反映了遥感任务完成的质量(遥感任务满足度);但是,遥感任务完成质量又包含了遥感数据反演系统的贡献,并不是遥感数据质量的单纯表示,面向任务的遥感数据质量评价往往是由解译工作者完成的,评价结果包含了解译的贡献。基于遥感数据获取系统性能的遥感数据质量表征可以单纯反映遥感数据质量;但是,因为遥感数据质量不仅与遥感数据获取系统性能有关,还与景物和遥感数据获取条件(如成像条件)有关,这种表征是不完善的,是需要附加条件的。遥感数据质量的统计特性表征方法提供的特征统计量值大小可以表示遥感数据质量(如图像质量)的相对优劣;但这些量值与遥感数据应用价值之间的关系往往是够直观的和不确定。虽然遥感数据质量不同表征量之间已建立了某些联系,但仍然是初步的和需要完善的。可以认为:如何准确定义航天遥感数据质量,如何定量表征航天遥感数据质量依然是一项需要努力研究的课题。

从航天遥感数据链的组成考虑,影响航天遥感数据质量的因素包括景物状态、照明以及电磁波传播介质状态和遥感数据获取系统性能和运行状态等。景物和电磁波传播介质状态一般都是不可控的,对无源遥感而言,暗含的照明状态往往也是不可控的。为确保航天遥感数据的质量,航天遥感数据获取系统的合理设计和性能实现,以及合理运行是至关重要的。有关内容可参见参考文献[8]。

5 关于航天遥感数据解译^[4,12-17]

(1) 遥感数据解译的目的和任务

遥感数据解译的目的是获取解译对象,即遥感实体所含的相关信息,以正确认识遥感实体。航天遥感数据解译是实现航天遥感任务的重要环节。

对于对地观测而言,遥感数据解译任务是获取地球大气圈、水圈、岩石圈和生态圈解译对象的特性和状态,主要分为两种:普通地学解译和专题解译。

普通地学解译主要为了获取一定地球圈层范围内的综合性信息,常见的是地理基础信息解译和景观解译。地理基础信息一般由地形信息、居民地、道路、水系、独立地物、植被、地貌和土质等构成;景观主要指多个地学要素有规律的地域结合。在地理基础信息解译中,地形解译(包括其他三维地物识别)对于地图编制和其他应用有重要贡献。专题解译可以分为许多类,用于提取特定要素或概念的信息,主要包括气象、水文、地质、农业、林业、环境和军事应用等解译内容,也就是本文第二节对地观测部分所涉及的有关内容。

(2) 遥感数据解译的过程

遥感数据解译是通过反演系统实现的,解译的过程就是遥感的反演过程。

航天遥感数据获取系统可以分为成像和非成像两类,航天遥感数据也相应地分为图像数据和非图像数据两类。对于对地观测而言,一般来说,具有较小地面采样距离,即空间分辨率较高的遥感数据获取系统获取的是遥感图像数据;反之,具有很大地面采样距离的遥感数据获取系统获取的往往是非图像数据。对于非图像数据解译,如应用红外辐射计和微波辐射计测量大气温度和湿度廓线,应用微波辐射计、散射计和高度计测量海面风场和波高,都是完全通过遥感信息模型,即反演模型实现遥感数据解译的。对于遥感图像数据解译,特别是定量遥感,也必须通过遥感信息模型得以实现。在遥感图像数据解译过程中,人(解译者)的因素的作用往往也是很重要的,这主要反映在遥感图像的目视解译中,也反映在遥感信息模型的人机交互运行中。

传统意义上,实现遥感数据反演的遥感信息模型有物理模型和统计模型两类。物理模型是面向实际物理过程的,基于物理定律的确定性模型,可以建立因果关系。统计模型是依据大量重复的遥感信息和其相应目标实际状态相互关系的统计结果得到的模型,一般都是有地域局限性的,不能解释其因果关系。在遥感研究中有一个新的趋势,就是建立统计与物理模型结合的混合模型,其根基还是来自于物理机制,由于自然界的影响因素太多,从一定时空尺度衡量,变化是随机的,模型反映了两者的结合。将不同类型模型综合、集成,加以发展,可以建立起更符合于实际的、可视化的遥感信息模型。

遥感图像数据解译的过程包括图像识别、图像量测和图像分析与专题特征提取。图像识别是根据遥感图像的光谱特征、空间特征、时相特征等,发现、识别和确认目标的过程。图像量测是指在图像上量测出目标的几何量和辐射量。图像分析与专题特征提取是指在图像量测、图像识别的基础上通过综合、分析、归纳,从目标物的互相联系中解译图像或提取专题特征信息,包括特定地物及状态的提取、指标提取和物理量提取等。遥感图像目视解译的能力与解译者的知识背景和水平关系密切,其解译要素主要包括形状、大小、色调、纹理、阴影、图案、位置、组合等。

(3) 遥感数据解译的质量

遥感数据解译的质量要素主要包括:

① 解译的完整性,指解译结果与给定任务的符合程度。它提供关于解译中获得的解译目标相关信息丰富程度的概念,例如,所描绘复杂地物要素的数量、要素状态的描述深度和细节特性等。对于监视与侦察任务(包括军事目标和民用目标),遥感图像数据解译的完整性,即任务完备度,是指在图像中出现的目标被正确发现的百分比。

② 解译的可靠性,指解译结果与实际的符合程度,或者说表示所完成解译工作在数量上的准确程度。它提供关于解译中获得的信息与解译目标所含相关信息“保真”程度的概念,其目标识别概率是重要的表征量。对于多种地物解译的可靠性,常用总体精度、Kappa系数、混淆矩阵和用户精度等表征。对于监视与侦察任务,有不同的任务性能层级,如发现、识别和确认等,其解译的可靠性一般用确认性能准确度表示,是指正确确认数与总确认判断数的比率。

③ 解译的及时性,指规定期限内解译任务完成情况。这也是一项重要的指标,对于某些任务,要求的解译时间很短。任务完备度与解译时间有关,一般不是线性的,文献[12]给出了某些研究数据。一个实例表明:对机场的判读完备度在25s时已达80%,50s时才达100%。

④ 解译结果的明显性,指解译结果便于理解和应用的程度。不同任务会有不同的要求。

影响遥感数据解译质量的因素不仅与解译方法和解译人员水平有关,还与遥感数据质量密切相关。

6 航天遥感面临的主要问题^[4,6,16,18-19]

航天遥感在取得显著成就的同时,也面临着许多问题。集中表现在:一方面大量的遥感数据仍未得到真正有效的利用,另一方面遥感应应用所需求的有效信息又十分匮乏。这两者实际上是从不同侧面反映了遥感数据应用的有效性。举例说明,气象遥感中,尽管卫星云图能够直观显示各种气团的运动趋势,为数值天气预报奠定基础,但中长期天气预报和全球大气环流模型还需要宏观、动态和精确的大气下垫面参数—包括影响地气温度的表面温度、反照率和影响气流运动的地表粗糙度、植被覆盖度及结构信息等,而目前遥感能够提供的相关参数非常有限。又如,农业遥感中,对作物生长过程监控需要的关键信息有叶面积指数、叶绿素含量、植物覆盖度、植物根系层的土壤水分、植冠水分和胁迫因子等参数,而目前遥感能够提供的仅有植被指数、植物缺水指数等较粗糙的参数,难以满足需求。同时,从获取的遥感数据中定量提取遥感信息的不确定度也往往不能全面满足遥感任务的需求。

航天遥感所面临问题的原因主要有以下几方面:

1) 遥感数据反映的是一种综合信息,数据和信息没有直接对应关系。遥感数据在宏观上是多种地理要

素,如地质、地貌、水文、土壤、植被、社会生态等的综合反映;在专题应用中也是多种相关要素的综合,例如海面后向散射系数是海面风场、波浪、温度和盐分等的综合反映。从综合反映各种信息的遥感数据中准确提取遥感任务所需的相关信息会具有极大的挑战性。

2) 往往希望获得的遥感信息(目标参数)并不是生成遥感数据的主导因子,或者说非敏感因子,因此遥感数据与希望获得的遥感信息(目标参数)可能是弱相关的。这就更增加了准确提取遥感信息的难度。

3) 本文第三节以植被遥感为例介绍了正演模型和反演模型,所列的公式是理想化的。实际上,植被和地面包含的信息是非常丰富的;阳光照射在植被和地面上并与其相互作用,其过程和机理是相当复杂的,未被完全认识的;反射的阳光也许并没有携带被照射植被和地面所含的全部信息;大气在阳光照射和反射传输路径中的作用是十分复杂的,人们对其认识是有限的;遥感数据获取系统获取遥感数据的过程显然是降质的。因此,无论要获得精确的正演模型还是反演模型都是相当困难的。此外,反演模型求解的必要条件是独立观测数据的个数需要大于所求参数的个数;否则,反演是病态的、无定解的。

4) 建立定量遥感反演模型目前面临的主要问题有:方向性问题(地物表面并非朗伯体、地物与电磁波的作用也非各向同性、反射的方向性信号中同时包含了地物的波谱特征信息和空间结构特征信息);尺度效应与尺度转换问题(不同遥感对象有不同的最佳观测尺度、立足于微观尺度上的基本物理定律用于较大遥感像元尺度时存在不适应性、真实性检验中的升尺度与降尺度、不同像元尺度遥感数据在应用中需要正确转换);地物波谱特征复杂性问题(“同物异谱”与“异物同谱”的存在、较大像元尺度混合像元的存在);反演策略与方法问题(针对观测数据所含信息量不足及相关性大、反演参数不敏感、不确定性大等问题,需要开展的研究)等。

5) 人们对遥感的认识尚具局限性,即对遥感过程、遥感机理、遥感对象特征和遥感数据特征及其之间的联系,还缺乏基础性的、深入的认识。如电磁波与实体相互作用是如何携带实体所含信息的?携带的信息量与所含的信息量有什么关系?对这些最基本的问题至今并没有满意的答案。这是影响遥感发展的重要障碍。近年来,量子遥感概念的提出,可能为人们更深入认识遥感机理、更深刻掌握遥感的物理和化学以及信息性能等规律,从而为利用这些规律服务于遥感理论、技术和应用开辟新的途径。

7 讨论

综上所述,可以认为:

1) 航天遥感是认识客观世界的重要手段,几十年来在对地观测、天文观测和深空探测等领域得到了广泛应用,获得了长足发展;与此同时,航天遥感也面临着前进中的许多问题,关键是进一步实用化、提高遥感数据应用的有效性。航天遥感的发展任重道远。

2) 航天遥感获取遥感信息是为了应用。如果将后遥感任务理解为遥感信息的深加工和获取知识作为遥感信息的应用,一般意义上定义的遥感系统的任务即是获取遥感信息(类似于近感系统获取的信息)。遥感系统由遥感数据获取系统和遥感数据反演系统即遥感信息模型组成。航天遥感数据获取系统由包含遥感的卫星系统和对卫星遥感数据进行接收与处理的地面系统共同组成。为了遥感信息的有效应用,需要提高遥感解译的质量,同时需要解决好遥感信息模型与遥感应用模型的连接问题。

3) 遥感解译的质量不仅与遥感解译性能,即解译方法和解译人员水平有关,还与遥感数据质量有关。目前,对于遥感数据质量和遥感解译质量都有所规定,也有一些不同的评价方法。但对于它们的定量表征仍不够完善,如何更科学地定义和表征它们、如何更严格地界定它们之间的关系和评价它们,是需要进一步认真研究的课题。关于如何进一步提高遥感数据质量和遥感解译质量是亟待解决的问题;提高遥感数据质量需要全面提高遥感数据获取系统的性能;提高遥感解译质量需要进一步提高遥感信息模型的性能。

4) 提高遥感数据应用有效性的关键在于提高定量遥感的水平,要努力提高从遥感数据中提取有用信息的能力。建立定量遥感反演模型目前面临的主要问题有:方向性问题、尺度效应与尺度转换问题、地物波谱

特征复杂性问题、反演策略与方法问题等。为解决反演模型的适定求解问题,要使遥感数据内涵更多的有效信息,减少虚假信息;需要获取尽量多的对所需遥感信息敏感的、且自身又是非相关或弱相关的遥感数据,尽量增加数据维数(多种空间分辨率、多角度、多谱段、多谱段和高谱段分辨率、多极化、多时相等),要提高信噪比、减少混叠和其他干扰影响。这不仅需要提高现有遥感数据获取系统的性能,包括传感器和数据处理的性能,还需要开发新的传感器和新的数据处理方法。

5) 无论对于遥感机理、遥感前向模型、反演模型、遥感数据质量和解译质量的深化研究,还是开发新的航天遥感系统,加强相关基础性研究是至关重要的。

参考文献

- [1] 陈世平.关于遥感图像品质的若干问题[J]. 航天返回与遥感,2009,30(2):10-17.
- [2] Park S K, Rahman Zia-ur. Fidelity Analysis of Sampled Imaging Systems[J]. Opt.Eng.,1999,38(5):786-800.
- [3] 许健民.卫星应用现状与发展(上册)[M]. 北京:中国科学技术出版社,2001.
- [4] 王桥,杨一鹏,黄家柱,等.环境遥感[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [5] 刘德长.后遥感应用技术研究[M]. 北京:中国宇航出版社,2007.
- [6] 赵英时.遥感应用分析原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [7] 陈世平,方宗义,林明森.利用全球导航定位系统进行大气和海洋遥感[J].遥感技术与应用,2005,(1):30-37.
- [8] 陈世平.景物和成像条件对遥感图像品质的影响[J].航天返回与遥感,2010,31(1):1-10.
- [9] 陈世平.“火星快车”的有效载荷[J].国际太空,2004,(7):26-31.
- [10] Poon J, Smith L. Clive Fraser Orthoimage Resolution and Quality Standards[OL]// www.crsci.com.cn.
- [11] Leachtenauer J C, Malila W, Irvine J, et al. General Image-Quality Equation, GIQE[J]. Applied Optics, 1997,36(32):8322-8328.
- [12] [美]利齐坎纳尔(Leachtenauer J C),德里格斯(Driggers R G). 监视与侦察成像系统(模型与性能预测)[M]. 陈世平,马文坡,周峰,等译. 北京:中国科学技术出版社,2007.
- [13] 关泽群,刘继琳,遥感图像解译[M]. 武汉:武汉大学出版社,2007.
- [14] Campbell J B. Introduction to Remote Sensing [M]. Third Edition, New York-London:The Guilford Press,2002.
- [15] Hoffman R R, Markman A B. Interpreting Remote Sensing Imagery: Human Factors [M]. New York: Lewis Publishers, 2001.
- [16] [美]梁顺林.定量遥感[M].范闻捷译. 北京:科学出版社,2009.
- [17] 马蔼乃.遥感信息模型[M].北京:北京大学出版社,1997.
- [18] 承继成,郭华东,史文中,等.遥感数据的不确定性问题[M].北京:科学出版社,2004.
- [19] 毕思文,韩继霞.量子遥感信息机理研究[J].科学导报,2006,(9):38-42.

作者简介

陈世平,男,1942年生,1965年毕业于中国科学技术大学,研究员,博士生导师,现从事卫星工程、卫星遥感、数据传输等方面研究工作。