

空基遥感观测系统仿真技术与应用

张鹏 张焱 张迺强

空基遥感观测系统仿真技术通过模拟无人机、浮空器或卫星平台的遥感探测过程，生成遥感观测的科学数据，该技术既能够为观测平台与载荷研制方提供卫星设计指标的分析与验证手段，也能够为遥感数据应用提供模拟数据生产源。观测系统仿真中该技术应用于对地观测卫星遥感系统正向设计与地面系统联调联试，极大提高了设计与联调的效率与有效性。

随着遥感观测载荷光学与电子学技术的发展，近年来遥感观测在空间分辨率和光谱分辨率上有了突飞猛进的进展。遥感产品的质量不仅与遥感处理的算法有关，同时也与遥感观测的数据质量有密切关系。遥感观测过程中的部件性能直接决定了遥感探测原始数据的质量，因此有必要对这些部件进行建模和分析。总体上，遥感观测系统可以分为观测平台、观测载荷、数据链路等几部分硬件，以及观测背景和观测目标等观测对象。卫星遥感观测系统仿真需要对以上部件进行建模，并对遥感观测过程进行仿真，进而能够在仿真过程中调整部件的性能指标，并在观测数据上验证修改后的指标对最终探测数据的影响。

本文利用针对空基遥感观测仿真（SRSOS）系统，利用系统仿真技术建立一套对地观测仿真系统服务于观测系统研制、遥感数据处理支撑和地面处理系统研制等领域。例如卫星平台和载荷研制人员可以利用SRSOS系统调整部件的性能指标来验证其指标是否满足应用要求，观测系统业主在可行性研究阶段可以利用该仿真技术来选择合适的光谱波段，载荷搭载的选择同样也可以利用仿真技术来实现不同载荷观测效果的预先呈现。在遥感应用方面，遥感观测仿真生成的数据可用来作为反演处理的输入数据来使用，使用观测仿真生成数据支持遥感算法的改进、误差评估和新算法的调试。在遥感卫星地面应用系统研制过程中，遥感平台发射前，地面系统的联合调试需要提供载荷的观测数据，特别是针对没有在轨载荷的光谱波段，只能依赖遥感观测仿真的手段模拟生成数据。本文将SRSOS的关键技术展开论述，并以卫星遥感观测为例，展示该技术的应用方法和效果。

1 SRSOS系统简介

SRSOS框架由4部分组成，分别是仿真管理、遥

感观测背景仿真、遥感观测平台仿真和遥感观测载荷仿真。在真实世界中遥感观测数据的生成是观测平台搭载选定的载荷，在飞行状态下对目标物进行遥感探测的过程，因此建立仿真系统也是针对探测过程中的各个相关环节建模后实现仿真的功能。

仿真管理是系统运行的中枢，负责完成仿真假定的配置、各分系统仿真的初始化设置、仿真过程的运行监视和结果的查看等功能。遥感观测背景仿真模拟遥感观测系统观测内容的辐射特性，目前支持卫星平台和无人机平台两种通用平台的对地球观测背景模拟，综合利用数值预报与快速辐射传输技术来实现不同光谱波段的观测辐射能量计算。辐射传输的处理与平台的飞行高度、关注光谱波段和目标特征都有强关联性，正文将就这方面的技术展开论述。遥感观测平台仿真是利用数字化建模的方法建立遥感观测平台的数字模型，生成观测时刻的平台运动学和动力学参数，为观测数据的生产提供必要的输入。目前常用的对地球遥感观测平台有无人机平台、卫星平台，本文针对这两种平台进行关键技术介绍。最后是遥感观测载荷仿真技术，遥感观测载荷根据观测任务不同其设计也有诸多变化，在扫描方式、光谱波段、光学特性上都有独特的特点，下文针对这些特点来阐述载荷建模的方法。

2 遥感观测背景建模与仿真

无论对于平流层飞行器还是地球遥感卫星而言，其观测的主体都是地球上的对象，但观测位置过高（例如地球同步轨道卫星或者大椭圆轨道卫星）时，遥感观测系统的观测视场内就会出现冷空间、临边空间、恒星、月球等地球以外的对象。对于在大气层内飞行器而言，其视场范围内一定是地球上的某一区域。遥感观测背景仿真就是要对遥感观测范围内的对

象的辐射能量特性进行仿真模拟，所以观测背景的仿真以地球为核心再加上临近空间和视场中出现的冷空间和恒星。

2.1 地表与动态大气环境仿真

对地球进行遥感探测产生科学数据是遥感载荷对地球大气、地表、海洋等环境的变化特定感知形式。因此，对地表、海洋和大气环境进行模拟，是计算其辐射能量分布的必要步骤。

地表和海洋的能量在不同光谱谱段来自于自身的温度辐射和对太阳能量的反射，因此，对地球表面辐射能量进行仿真的关键问题可以归结为两个方面，首先，获取地球不同表面类型的发射率和反射率是建模的核心问题，其次是能量到观测载荷路径上的辐射传输问题。地球不同表面类型的发射率和反射率可以使用已有地表反射率的产品，海洋表面反射和辐射率在行星尺度上是均一的，可根据海水的反射和发射特性来确定。除了地球表面外，地球上瞬息万变的大气环境也是行星视角观测范围内的重要内容。动态大气环境的建模可以利用两种手段来实现，一种是利用气象观测站点和设备的探测数据，另外一种是利用数值预报模式演算未来时刻的大气环境状态。利用气象观测站点和设备，可以综合世界上各个国家的气象探测和环境探测站点，例如全球自动观测网（AERONET）。该网络现已经覆盖了全球主要的区域，目前全球共有500多个站点，利用CIMEL自动太阳光度计（SPAM）作为基本观测仪器，网络站点分布图如图1所示，其站点部署只覆盖陆地，密度较低，并且站点覆盖不均匀，其数据分布不利于正演处理使用。



图1 AERONET站点分布图

另外一种方法是利用数值天气预报（NWP）系统构建动态大气环境仿真系统。NWP计算模式是根据大气的初始状态以及模拟区域的边值状态和下垫面状态，通过时间积分迭代计算求解未来时刻的大气状态。以WRF模式为例，WRF是中尺度的数值预报模式，其输出数据集可调整大气分层最多至101气压

层，水平网格空间分辨率理论上精确到米级（实际运用中范围为3~100 km），大气环境要素包括风矢量、温度、湿度等常规参数和云微物理特性，这些数据集的特性都很好地支撑了辐射传输计算。WRF模式运行与计算过程中需要解决运算时效问题。运行时效依赖于大规模计算集群或大型计算机作为硬件基础，运行并行化模式开展解算。其具体的运行时效也与计算任务中网格的规模和分辨率与迭代周期有关。以中分辨率遥感观测为例，星下点观测分辨率为100 m，那么数值天气预报输出数据场网格分辨率要高于100 m，其观测区域取决于平台运行轨道和载荷观测视角。

2.2 快速辐射传输建模与计算

辐射传输是对地观测能量定量计算的关键环节。辐射传输的计算过程要考虑载荷的光谱谱段、云粒子的相态和大小、大气中气体含量。太阳反射波段对辐射传输的贡献可以认为是基本由地球表面和云顶以及气体吸收三部分组成，热红外发射波段解算则还需要考虑在光谱范围内实体自身发射的能量贡献。

辐射传输计算以地球空间环境参数、观测几何参数、光谱响应函数作为输入量，开展解算。传统基于LBL的辐射传输计算运算效率较低，难以在工程实施中使用，因此我们采用基于FTRM方法的快速辐射传输模型来实现辐射传输解算。

辐射传输的处理流程，其主要操作步骤为：

- 1) 大气环境参数获取；
- 2) 地球表面特征参数获取；
- 3) 观测几何参数获取；
- 4) 光谱响应函数及大气透过率参数获取；
- 5) 气溶胶大气透过率计算；
- 6) 可见光红外宽通道辐射传输模拟。

前4个参数为静态输入或前置步骤计算得出，后两个步骤为实际辐射传输处理步骤。FTRM模式针对太阳反射波段能够计算输出大气层顶的表现反射率，针对热红外发射波段能够计算出辐射亮度。为节省计算时间在模拟之前基于离散纵坐标法的辐射传输模型DISORT处理，得到不同光学厚度条件下和粒子有效半径条件下云粒子的径向反射比和透过率的分布状态并建立查找表，在实际快速模式计算中通过查找表来完成计算，大大提高计算效率。对于没有云和气溶胶的区域，只考虑气体吸收作用，采用CKD方法计算分层透过率最终得到观测区域的大气总透过率。用光谱范围内吸收系数 $k(\nu)$ 的概率分布函数来表示透过率，可以写为

$$T_{ch} = \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} e^{-k(\Delta\nu)u} d\nu = \int_{k_{min}}^{k_{max}} e^{-ku} f(k) dk, \quad (1)$$

式中, $f(k)$ 为吸收系数的归一化概率分布函数。考虑通道的光谱响应, 式(1)可变为

$$T_{ch} = \frac{1}{S} \int_{\Delta\nu} S(\nu) e^{-k(\nu)u} d\nu, \quad (2)$$

式中, S 为归一化因子, 是相应载荷的光谱响应函数。累积概率函数分别可以由下式表示

$$f_s(k_i) = \frac{1}{S} \sum_{m=1}^M \frac{s(v_m) \delta v}{\delta k} W[k_{i-1} \leq k_i], \quad (3)$$

$$g_s(k_i) = \frac{1}{S} \sum_{m=1}^M s(v_m) \cdot \delta v W[k_v \leq k_i] \\ = \sum_{j=1}^i f_s(k_j) \cdot \delta k, \quad (4)$$

式中, W 为吸收系数分组的权重系数。由式(5)可以计算得到不同高度上对应的 a , b 及 c 的值

$$\ln[l(g, p_0, T)] = a(g, p_0) + b(g, p_0) \cdot (T - 260) + c(g, p_0) \cdot (T - 260)^2 \quad (5)$$

将CKD模型高度上的 a , b , c 插值到输入的数值预报数据高度场后可以计算得到大气各气压层在该谱段的吸收系数并最终得到大气透过率。

3 遥感观测平台建模与仿真

遥感观测平台仿真可分解为平台姿态轨道仿真和载荷仿真两部分。两部分在物理上是连接在一起的, 例如无人机及其搭载的相机、卫星平台及其有效载荷、平流层飞艇与其吊舱内的载荷等。两部分共同完成遥感成像的任务。

3.1 平台姿态轨道建模与仿真

对平台的位置和姿态等对遥感成像有影响的运动特性进行仿真, 以遥感观测卫星为例, 需要对卫星平台位置、速度、姿态变化以及控制过程进行模拟。遥感观测平台的参数为相机仿真提供真实的位置、姿态, 并为平台上预处理仿真、地面系统仿真等提供模拟的卫星位置、姿态测量数据。

平台姿态轨道控制又可划分为动力学仿真、轨道仿真、平台姿控等几部分。动力学仿真模拟卫星姿态动力学和运动学, 仿真卫星所受的各种空间环境干扰力矩的影响; 仿真载荷运动与星体的耦合动力学; 仿真太阳帆板步进以及挠性附件振动与星体的耦合动力学; 仿真遥感观测平台姿态变化; 实时仿真卫星轨道位置、速度变化并计算含测轨误差的轨道数据; 仿真轨道递推、轨道保持和轨道机动等, 并给出太阳在惯性系下的位置及坐标系转换矩阵。

3.2 遥感载荷建模与仿真

载荷观测仿真反映相机视场、成像周期、光学分

辨等参数变化。总体上载荷仿真可以分为光学和电子学两部分。值得注意的是, 载荷工作在卫星平台上, 卫星平台的位置和姿态也对成像过程有影响, 关于卫星平台的仿真有诸多的论述成果, 这里不再展开。下面从光学仿真和电子学仿真两部分展开论述。

光学仿真模拟光路传导过程, 光线的轨迹模拟分为正向和逆向。正向光线追迹是解算观测对象在探测器上的实际位置, 如图2所示, 图中target为观测对象, SW为焦平面。

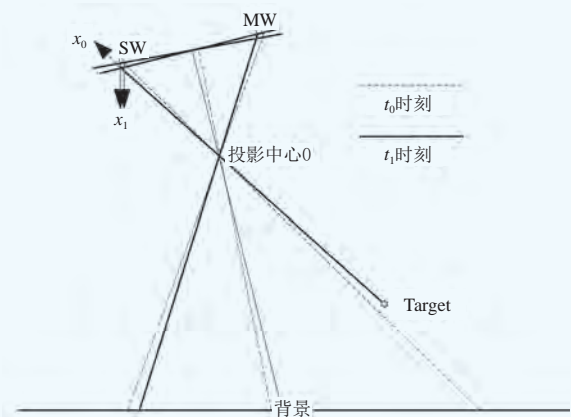


图2 正向光线追迹示意图

逆向光线追迹(图3)通过一系列坐标系间的转换, 建立背景与像点之间的对应关系, 根据共线方程可以建立几何关系进而计算出目标 L 的地理坐标。

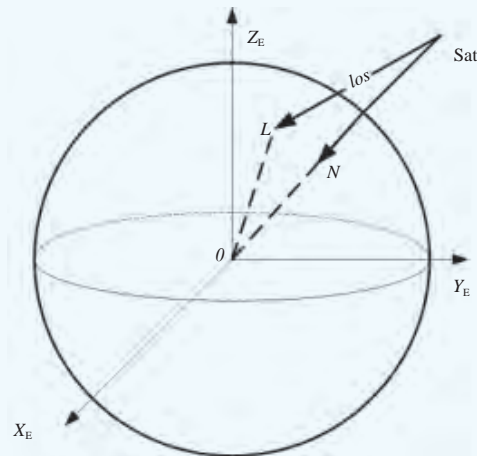


图3 逆向光线追迹示意图

电子学仿真模拟入瞳辐射能量转化为探测器电子信号的过程。按照相机工作原理可以将该过程分为光学系统响应、探测器响应和信息获取电路系统响应。光学系统响应包括光学系统的MTF和离焦MTF引起的空间退化。其中, 光学MTF可由光学设计软件计算输出得到, 而离焦MTF根据光学系统参数计算得到。

4 仿真应用

基于本文对SRSOS系统各个组成模块的建模与仿真，以卫星遥感观测仿真的应用为例，建立一套通用的卫星遥感观测仿真系统框架（图4）。

卫星平台、相机仿真和链路仿真可根据卫星设计

参数调整系统配置完成对卫星的建模和修订，观测背景需要根据载荷的特征参数进行离线或在线数据模拟（根据系统运行时效和观测区域范围决定），二目标特性仿真与星上预处理则可根据卫星的组成特点进行裁剪。

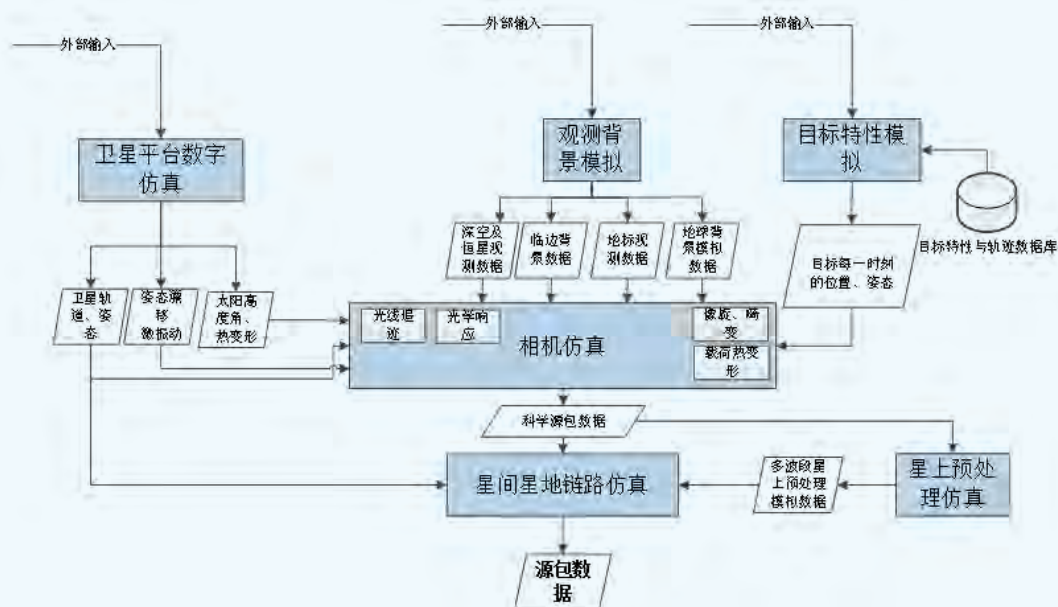


图4 卫星遥感观测系统通用框架示意图

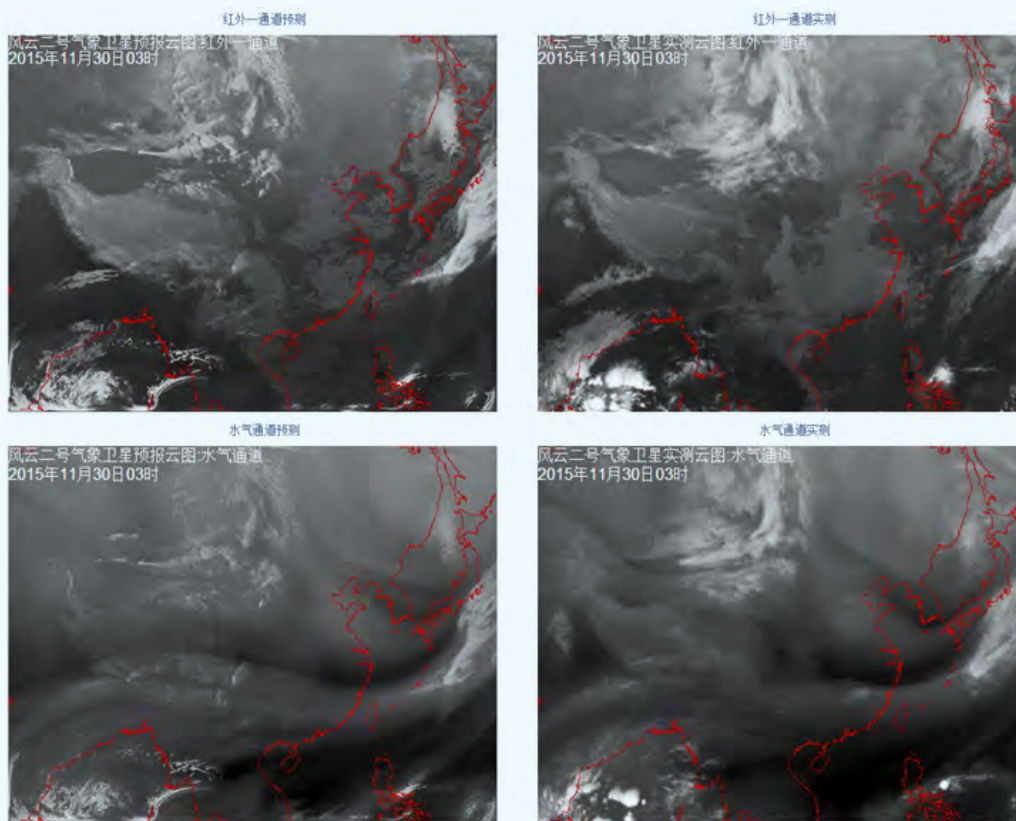


图5 风云二号E星红外与水汽通道模拟与观测中国域云图

在实际的应用中, 卫星遥感观测系统仿真技术已经应用到我国多个型号遥感卫星的研制过程, 为卫星指标论证与设计提供必要的仿真支撑, 并为新一代静止轨道气象卫星风云四号A星的地面系统的建设提供了模拟数据支持。特别是在风云四号A星地面系统建设过程中, 在发行前地面应用系统联合调试时, 地面没有可以参考的数据可以使用, 无论从分系统间接口调试还是从遥感应用调试角度, 都无法完成有实际物理意义的数据处理。引入遥感观测仿真技术后, 针对导航与配准和产品生成系统的需求, 按照实际地球大气环境模拟生成全天24 h的104.5°E位置中国区域的多通道成像仪模拟数据, 为联调联试的顺利进行提供了数据保障。

同时, 利用风云二号模拟云图与观测云图对比分析仿真有效性。以2015年11月30日03时数据为例, 分别利用对地观测模拟技术和风云二号E星业务系统处理生成中国区域IR1通道和水汽通道的云图, 图5为模拟云图与实际观测云图。经过数据统计可以发现, 观

测与模拟云图的数据动态范围一致, 在大片云系中, 模拟云图的云量偏少, 经分析发现是数值预报模式输出数据的栅格化数据不连续导致。经过静态图像相关性分析, 在均匀云区模拟与观测数据的相关性高于75%。

深入阅读

- Liu X, Smith W L, Zhou D K, et al., 2006. Principal component-based radiative transfer model for hyperspectral sensors. Appl Opt, 45:201-209
- Liu Y, Wu W, Jensen M P, et al., 2011. Relationship between cloud radiative forcing, cloud fraction and cloud albedo, and new surface-based approach for determining cloud albedo. Atmospheric Chemistry and Physics, 11: 7155-7170.
- 崔伟光, 杨海峰, 杨晶, 等, 2015. 卫星分系统仿真测试平台设计与实现. 计算机测量与控制, 23(10): 3264-3266.
- 娄树理, 周晓东, 2011. 基于光学厚度的云红外辐射计算. 应用光学, 32(2): 343-347.

(作者单位: 北京华云星地通科技有限公司)

WindAnalyzer-50H扫描式脉冲激光测风雷达

舒仕江 李佳



WindAnalyzer-50H激光测风雷达系统是典型的主动三维测风遥感雷达, 由北京敏视达雷达有限公司自主研发, 采用先进的激光技术、基于激光脉冲多普勒频移原理, 根据空气中颗粒(灰尘、盐晶体、云雾水汽、污染颗粒等气溶胶)的激光后向散射回波, 连续测量风速、风向、三维风廓线等信息, 实时获得高时空分辨率、高精度的风场数据。该系统性能安全稳定, 最大探测距离达5 km, 可有效探测机场跑道附近近地面的风场、风切变以及飞机尾涡。

WindAnalyzer-50H扫描式脉冲激光测风雷达由激光收发系统、探测系统、扫描系统、采集及信号处理系统、产品生成和显示系统、温控系统、配电及附属设备等组成。

该系统具有如下特点:

- 完全自主研发, 掌握关键核心系统技术;
- 核心光源器件采用先进脉冲光纤激光器, 稳定易维护, 对人眼安全;
- 测量性能优秀稳定, 速度探测范围广、测量精度高且稳定可靠;
- 模块化设计, 结构紧凑轻便, 快速安装使用, 可用于地面固定式或移动式测量;
- 全自动数据采集与处理软件系统, 提供多种数据产品;
- 无人值守、远程控制设计;
- IP65防护等级。

(作者单位: 北京敏视达雷达有限公司)