

Coverage Effectiveness Evaluation of Remote Sensing Satellite System Based on AHP-FCE

Yong Pan, Fan Yang, Yuan Wu

School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan Hubei
Email: panyong_study@163.com

Received: Mar. 30th, 2015; accepted: Apr. 18th, 2015; published: Apr. 27th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

It is significant to establish a scientific coverage capability assessment model in the top-level designing and rational planning of remote sensing satellite system. The paper established a hierarchical index system of coverage effectiveness evaluation, and the analytic hierarchy process (AHP) was used in index weights designing. Then, a new simulation computing process of coverage feature was proposed, and the fuzzy vector of index was calculated based on fuzzy comprehensive evaluation (FCE). Finally the paper put forward a complete effectiveness evaluation process of remote sensing satellite system based on AHP-FCE. Evaluation experiment using the typical domestic and foreign remote sensing satellites verified the effectiveness of the method.

Keywords

Remote Sensing Satellite System, Coverage Effectiveness, Analytical Hierarchical Process, Fuzzy Comprehensive Evaluation

基于AHP-FCE的遥感卫星系统覆盖效能评估

潘勇, 杨帆, 巫远

武汉大学遥感信息工程学院, 湖北 武汉
Email: panyong_study@163.com

收稿日期: 2015年3月30日; 录用日期: 2015年4月18日; 发布日期: 2015年4月27日

摘要

针对遥感卫星系统的顶层设计与合理规划,建立科学的卫星系统覆盖能力评估模型具有重要意义。为此,建立了层次化的覆盖效能评估指标体系,采用层次分析法(AHP)设计指标权重;提出了一种新的覆盖特性仿真计算流程,基于模糊综合评判法(FCE)计算了评估指标的单因素模糊向量;最终提出了一个完整的基于AHP-FCE方法的遥感卫星系统覆盖效能评估技术流程,以多颗国内外典型遥感卫星进行了评估实验,验证了方法的有效性。

关键词

遥感卫星系统, 覆盖效能, 层次分析法, 模糊综合评判法

1. 引言

随着信息时代的来临,空间信息获取能力受到人们的高度重视。由于多平台多传感器系统能够大幅度扩展时间、空间、光谱范围,大幅度增强对目标区域或突发事件获取影像的时效性,并提供多方面的丰富信息源[1]。因此遥感卫星系统的设计,也随着现代微小卫星技术的迅猛发展产生了革命性的变化,部署空间分布式多卫星遥感体系成为诸多国家追求的目标。为优化设计这样的复杂系统,其覆盖效能的评估成为迫切需要解决的关键问题[2]。通过覆盖效能评估能够找出设计方案的优势和不足,为方案的制定和改进提供科学的决策信息。建立一套科学、合理的遥感卫星系统覆盖能力评价方法,将遥感卫星系统的规划、建设、应用与发展产生至关重要的意义。

覆盖效能是表征卫星系统效能最重要的测度之一[3]。目前对卫星系统覆盖能力的研究主要着眼于覆盖性能分析,通过建立覆盖几何模型进行仿真,并采用网格点分析法计算得到覆盖性能指标值。文献[4]建立了单颗卫星对地覆盖分析模型,分析了卫星轨道参数对卫星覆盖性能的影响;文献[5]提出了基于地心角的空间覆盖性能仿真分析方法;文献[6]研究了对地观测任务的轨道选择与星座设计的基本方法,分析了设计星座对目标区域的覆盖特性;文献[7]分析了当前星座状态下北斗卫星导航系统的服务区覆盖性;文献[8]提出了根据星座覆盖时刻集计算覆盖性能指标的方法;文献[9]提出了一种低轨星座覆盖性能的通用评价准则。上述研究对卫星系统覆盖能力的评价大多局限于仿真计算得到覆盖特性数据,再以单个覆盖特性数据为出发点进行敏感性分析,得到该特性数据对卫星系统覆盖能力的影响,且没有进一步从整体上对卫星系统的覆盖效能进行评估。因此,只有通过效能评估模型将单个效能指标有效地进行综合,才能更好地从整体上表征卫星系统的覆盖效能。

本文结合遥感卫星覆盖特点,建立了遥感卫星系统覆盖效能评估指标体系,结合层次分析法(AHP, Analytical Hierarchical Process)和模糊综合评判法(FCE, Fuzzy Comprehensive Evaluation)提出了一种覆盖效能评估模型,简称 AHP-FCE,运用 AHP 法进行权重设计,使用 FCE 法求取指标模糊向量,通过多级模糊综合评价得到最终的遥感卫星系统覆盖效能评估结果。

2. 评估指标体系建立

在对遥感卫星系统的覆盖效能进行评估时,建立评估指标体系是非常重要且意义重大的。覆盖统计特性是表征卫星系统覆盖能力的总体度量,也称覆盖时效特性,以前多用的指标包括:覆盖百分比、连续覆盖的次数、最大连续覆盖时间、平均连续覆盖时间、连续覆盖的时间平均数、总的连续覆盖时间、平均响应时间等[10]。以上指标虽然具有较为明确的物理特性,但指标涵义不清晰,难以理解。因此,本

文结合遥感卫星覆盖的特点，建立了一套易于理解的遥感卫星系统覆盖效能评估指标体系。

对卫星系统覆盖特性的描述通常从空间和时间两个维度进行，覆盖空间特性表征卫星系统在特定时段内对特定区域的空域观测能力，覆盖时间特性表征卫星系统在特定时段内对特定区域的时域观测能力。因此，本文将遥感卫星系统覆盖效能划分为覆盖空间效能和覆盖时间效能，覆盖空间效能分别从累积观测和同时刻多星对相同区域观测两个角度分析，提炼出 2 个指标：累计覆盖面积百分比、多重覆盖面积百分比；覆盖时间效能分别从覆盖时长和覆盖间隔时长两个角度分析，提炼出 5 个指标：时间覆盖百分比、平均覆盖时长、最大覆盖时长、平均覆盖时间间隔、最大覆盖时间间隔。由以上指标构成了遥感卫星系统覆盖效能评估指标体系，如图 1 所示。

3. 层次分析法和模糊综合评判法相结合的评估模型

遥感卫星系统是一个复杂大系统，涉及很多模糊因素，定量指标不具备相同的量纲，须借助模糊隶属度函数将其无量纲化[11]。同时，从图 1 可看出，遥感卫星系统覆盖效能评估指标体系是分层次的，应考虑到不同层次指标在效能评估中所占的权重。利用这种层次化的评估指标体系，将覆盖空间效能底层指标和覆盖时间效能底层指标由下至上逐层进行模糊合成运算，最终得到遥感卫星系统覆盖效能的评分。基于遥感卫星系统评估缺少一种有效地度量评分其覆盖效能的方法，本文提出使用层次分析法和模糊综合评判法，建立评估模型，这种多级模糊综合评判法的流程如图 2 所示。

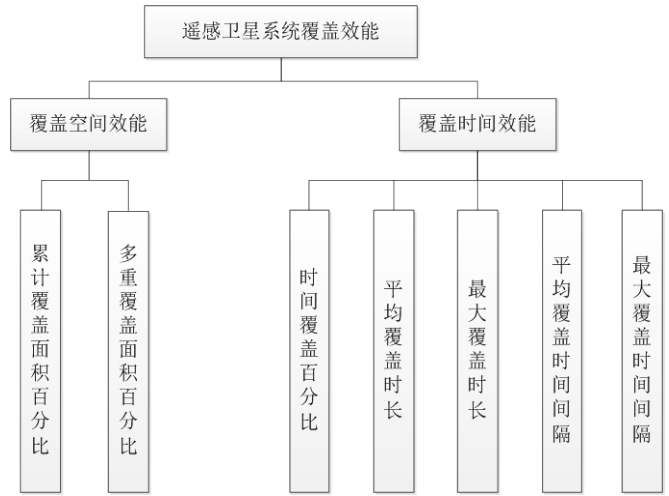


Figure 1. Index system of coverage effectiveness evaluation
图 1. 覆盖效能评估指标体系

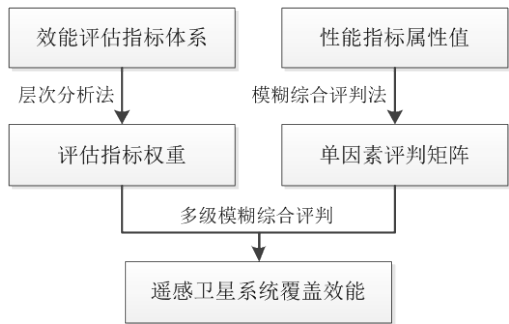


Figure 2. Multi-level fuzzy comprehensive evaluation process
图 2. 多层次模糊综合评判流程

3.1. AHP 法指标权重设计

遥感卫星系统覆盖效能评估指标体系中的各个指标的权重一般情况下是不同的，这就需要根据指标的重要性确定其权重。在一般的评价方法中，通常是通过专家打分确定指标权重，具有很大的主观性。层次分析法是多层次多因素权重确定的有效工具[12]，该方法通过判断矩阵确定各个因素相对重要性的总顺序，使权重在定性的基础上得以量化，结果更为客观。因此，本文利用层次分析法来确定指标的权重，尽量消除权重确定方法中的人为影响，保证指标权重的有效性和实用性。

遥感卫星系统的覆盖效能评估指标可以按照支配关系形成如图 1 所示的层次结构。权重设计主要分构造判断矩阵、权重计算、判断矩阵一致性检验三个步骤：

步骤 1 相对权重构造权重判断矩阵

为了将各指标之间进行比较并得到量化的判断矩阵，采用目前应用比较广泛的 1-9 标度方法[13]。

从层次结构模型的第 2 层指标集合{覆盖空间效能，覆盖时间效能}开始，对于从属于上一层每个因素的同层诸因素，用成对比较法构造成对比较阵，直到最下层指标集合{累计覆盖面积百分比，多重覆盖面积百分比}和{时间覆盖百分比，平均覆盖时长，最大覆盖时长，平均覆盖时间间隔，最大覆盖时间间隔}。

权重判断矩阵具体形式如下：

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， $a_{i,j}$ 表示指标 a_i 相对于指标 a_j 的相对权重。

步骤 2 由权重判断矩阵确定指标权重

层次分析法中指标权重的计算，主要是求取判断矩阵的特征向量和最大特征值，本文使用方根法进行指标权重计算。

1) 计算矩阵A的每一行元素的乘积 M_i

$$M_i = a_{i1}a_{i2} \cdots a_{in} = \prod_{j=1}^n a_{ij} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (2)$$

2) 计算 M_i 的 n 次方根 $w_i^{(0)}$

$$w_i^{(0)} = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

3) 对向量 $w^{(0)} = (w_1^{(0)}, w_2^{(0)}, \dots, w_n^{(0)})^T$ 作归一化处理，即

$$w_i = \frac{w_i^{(0)}}{\sum_{i=1}^n w_i^{(0)}} \quad (4)$$

从而得到向量 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ ，为所求特征向量的近似值，即各评估指标的相对权重。

4) 计算A的最大特征根 λ_{\max}

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \left[\frac{\sum_{j=1}^n a_{1j}w_j}{w_1} + \frac{\sum_{j=1}^n a_{2j}w_j}{w_2} + \cdots + \frac{\sum_{j=1}^n a_{nj}w_j}{w_n} \right] \quad (5)$$

步骤 3 权重判断矩阵的一致性检验

当判断矩阵的最大特征根 λ_{\max} 大于判断矩阵阶数 n 时，判断矩阵不具有有一致性，计算得到的权重向量将无法准确地反映指标的重要程度。定义衡量不一致程度的数量指标 CI:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

当 $CR < 0.1$ 时，认为判断矩阵具有一致性，否则，则不满足一致性，定义

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

式中 RI 为平均随机一致性指标[13]。

若判断矩阵具有一致性，则可以认为指标的权重设计是合理的，可以参与进一步的评估运算，否则必须重新构造判断矩阵，直至得到合理的指标权重。

3.2. FCE 法指标模糊向量确定

模糊综合评判法是随着模糊数学的诞生而逐步发展起来的一种系统效能评估方法[11]。该方法适用于存在模糊因素且评价指标集之间具有一定等级关系的综合系统。本文提出的遥感卫星系统覆盖效能评估指标全为定量指标，有效地规避了定性指标不能用精确的数学表达式来表示的问题，使评判流程更为简明。

为了求取定量指标的模糊向量，须确定定量指标的模糊满意度。首先，由领域专家根据单项指标的数据变化范围，给出与各满意度级别相对应的模糊隶属函数[12]。比如累计覆盖面积百分比，它是越大越好型指标，设满意度级别有五个，为 $V = \{\text{差, 一般, 中等, 良好, 优秀}\}$ 。本文采用三角模糊数为隶属度函数求取各个指标的隶属度，其隶属度函数如公式(8)、(9)、(10)所示。

其次，由专家给出相应的隶属函数参数值，根据公式(8)、(9)、(10)计算出每一个指标的模糊向量。比如越大越好型指标“累计覆盖面积百分比”，若其隶属函数的参数分别为 $m_1 = 0$ ， $m_2 = 0.25$ ， $m_3 = 0.5$ ， $m_4 = 0.75$ ， $m_5 = 1$ 。如果仿真计算得到的累计覆盖面积百分比为 64.5%，代入公式(8)、(9)、(10)可以计算出“累计覆盖面积百分比”的模糊满意隶属度，则其模糊向量为 $\{0, 0, 0.42, 0.58, 0\}$ 。仿照上述方法可以计算其余指标的隶属度和模糊向量。

$$S_1(x) = \begin{cases} \frac{m_2 - x}{m_2 - m_1}, & m_1 \leq x \leq m_2 \\ 0, & m_2 \leq x \leq m_5 \end{cases} \quad (8)$$

$$S_i(x) = \begin{cases} 0, & m_1 \leq x \leq m_{i-1} \\ \frac{x - m_{i-1}}{m_i - m_{i-1}}, & m_{i-1} \leq x \leq m_i \\ \frac{m_{i+1} - x}{m_{i+1} - m_i}, & m_i \leq x \leq m_{i+1} \\ 0, & m_{i+1} \leq x \leq m_5 \end{cases} \quad (i = 2, 3, 4) \quad (9)$$

$$S_5(x) = \begin{cases} 0, & m_1 \leq x \leq m_4 \\ \frac{x - m_4}{m_5 - m_4}, & m_4 \leq x \leq m_5 \end{cases} \quad (10)$$

3.3. 模糊综合评价

上文介绍了如何使用模糊综合评判法计算得到的各底层指标的模糊向量，但若仅得到各底层指标的模糊向量是无法表征卫星系统的覆盖效能的，必须进行模糊综合评价，才能得出最终的卫星系统的覆盖效能评估结果。因此，本文采用由下至上逐层对各指标权重和模糊向量进行模糊合成运算的方法[14]，计算覆盖效能评估结果。将同层指标的权重 $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ 与该层各指标模糊向量 $\delta_i = (\gamma_{i1}, \gamma_{i2}, \dots, \gamma_{im})$ ，按照下面的公式(11)进行模糊合成运算。

$$B = A \cdot R = A \cdot \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_n \end{pmatrix} = (a_1, a_2, \dots, a_n) \cdot \begin{pmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \dots & \gamma_{1m} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \dots & \gamma_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \dots & \gamma_{nm} \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中， B 即为模糊合成运算结果，这里的模糊算子采用是乘法算子。

4. 仿真实验

假设以 LANDSAT-7、GF-1、SPOT-6 为观测资源组成遥感对地观测卫星系统，以中国为目标区域，仿真时间段为 2014-9-1 4:00:00 到 2014-9-7 4:00:00，仿真步长为 60 秒。首先按照覆盖效能指标仿真计算流程，进行仿真计算。然后在仿真计算所得各底层指标属性值的基础上，按照 AHP-FCE 评估流程进行覆盖效能评估。

4.1. 覆盖特性仿真

目前，对地覆盖主要通过构建通用高效的覆盖特性仿真方法，建立各种覆盖几何模型进行仿真[15]，并采用网格点分析方法对覆盖特性数据进行统计运算。但该流程考虑因素繁杂、实施难度大。因此，针对遥感卫星系统覆盖效能评估，本文提出了一种卫星系统覆盖特性数据仿真计算流程，仿真计算流程如图 3 所示。在保证仿真计算结果精确、合理的基础上，有效地降低了仿真计算的复杂度。首先根据卫星传感器覆盖条带数据，绘制出卫星传感器覆盖条带图层，再通过与其它图层之间的空间叠置分析，计算得到覆盖特性数据。

按照上文所描述的仿真计算流程，可计算得到覆盖特性数据。其中，各卫星载荷属性及仿真起始轨道六根数如表 1 所示。

各卫星单独观测及 3 星联合观测仿真计算得到的覆盖特性数据如表 2 所示。

4.2. AHP-FCE 综合评估

1) AHP 法指标相对权重确定

根据 3.1 中权重设计方法来计算各层指标的权重，并将权重进行归一化处理，可得各指标的权重结果，权重设计结果如下所示。其中 A 为第二层指标相对第一层指标的权重， A_1 、 A_2 分别为覆盖空间效能、覆盖时间效能下层指标的权重。

$$A = (0.6, 0.4)$$

$$A_1 = (0.4, 0.6)$$

$$A_2 = (0.05, 0.6, 0.2, 0.1, 0.05)$$

2) FCE 法指标模糊向量确定

假设 $U = \{U_1, U_2\}$ ，其中 U 代表遥感卫星系统覆盖效能， U_1 、 U_2 分别代表覆盖空间效能和覆盖时间

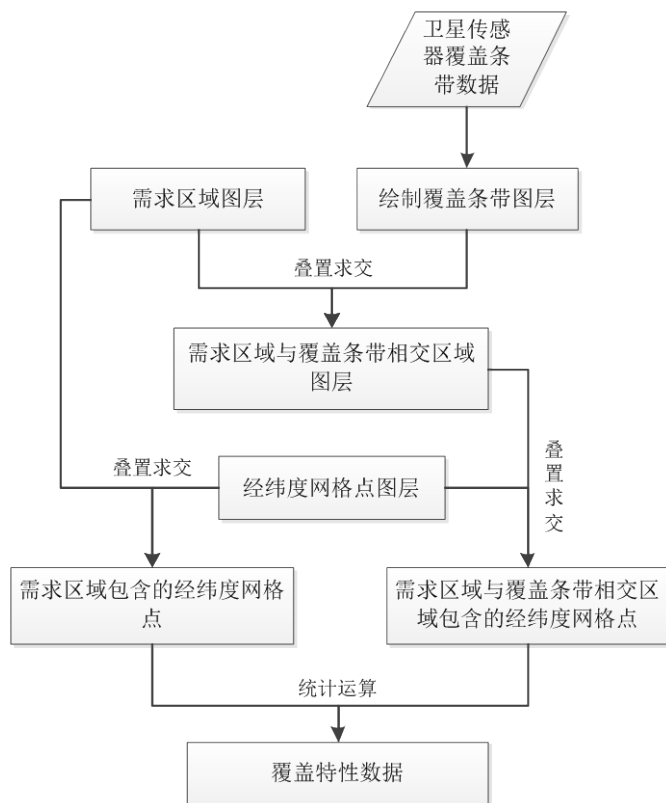


Figure 3. Simulation computing process of coverage feature
图 3. 覆盖特性仿真计算流程

Table 1. Satellite payload property and initial orbital parameters

表 1. 卫星载荷属性及起始轨道参数

卫星	CCD 地面覆盖宽度(km)	是否考虑侧摆	a (km)	e	i (°)	Ω (°)	ω (°)	M (°)
LANDSAT-7	185	否	7080	0.00011	98.219	222.411	8.442	103.125
GF-1	60	否	7019	0.00202	98.025	324.628	94.842	265.508
SPOT-6	60	否	7076	0.00014	98.192	312.185	88.512	271.622

Table 2. Data of coverage feature

表 2. 覆盖特性数据

	累计覆盖面积百分比(%)	多重覆盖面积百分比(%)	时间覆盖百分比(%)	平均覆盖时长(min)	最大覆盖时长(min)	平均覆盖时间间隔(min)	最大覆盖时间间隔(min)
LANDSAT-7	52.18	—	0.88	5.43	10	557.92	1381
GF-1	14.66	—	0.81	4.38	8	568.6	1361
SPOT-6	18.4	—	0.86	4.62	9	568.6	1378
3星联合观测	67.26	1.74	2.51	4.93	11	195.02	958

效能。则其下属指标可以表示为如下形式： $U_1 = \{U_{11}, U_{12}\}$ ， U_{11}, U_{12} 分别代表累计覆盖面积百分比、多重覆盖面积百分比； $U_2 = \{U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{24}, U_{25}\}$ ， $U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{24}, U_{25}$ 分别代表时间覆盖百分比、平均覆盖时长、最大覆盖时长、平均覆盖时间间隔、最大覆盖时间间隔。根据 3.2 中所述方法，计算得到其评价矩阵如下：

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.14 & 0.86 \\ 0 & 0 & 0.74 & 0.26 & 0 \end{pmatrix}$$

$$R_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0.69 & 0.31 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.54 & 0.46 & 0 \\ 0 & 0 & 0.51 & 0.49 & 0 \\ 0 & 0 & 0.87 & 0.13 & 0 \\ 0 & 0 & 0.85 & 0.15 & 0 \end{pmatrix}$$

3) 二级模糊综合评价

在计算得到各指标模糊向量的基础上，根据 3.3 中所述方法，进行模糊综合评价。

$$B_1 = A_1 \cdot R_1 = (0.4, 0.6) \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.14 & 0.86 \\ 0 & 0 & 0.74 & 0.26 & 0 \end{pmatrix} = (0, 0, 0.444, 0.212, 0.344)$$

$$B_2 = A_2 \cdot R_2 = (0.05, 0.6, 0.2, 0.1, 0.05) \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0.69 & 0.31 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.54 & 0.46 & 0 \\ 0 & 0 & 0.51 & 0.49 & 0 \\ 0 & 0 & 0.87 & 0.13 & 0 \\ 0 & 0 & 0.85 & 0.15 & 0 \end{pmatrix} = (0, 0.0345, 0.571, 0.3945, 0)$$

用 B_1 ， B_2 构造单因素评价矩阵，考虑权重因素，进行二级模糊综合评价[12]。

$$B = A \cdot R = A \cdot \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} = (0.6, 0.4) \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.444 & 0.212 & 0.344 \\ 0 & 0.0345 & 0.571 & 0.3945 & 0 \end{pmatrix} = (0, 0.0138, 0.4948, 0.285, 0.2064)$$

其最大隶属度为 0.4948，根据最大隶属原则，该遥感卫星系统的覆盖效能属于“中等”。

5. 结束语

本文基于 AHP-FCE 法建立了覆盖效能评估模型，设计了一套完整、有效的遥感卫星系统度量评分技术流程，得到了比较满意的卫星系统覆盖效能评分结果，对设计人员进行卫星系统的合理规划具有一定意义。与传统卫星对地覆盖分析研究相比，本文构建了一套物理特性明显、指标涵义清晰的评估指标体系，由下至上逐层进行合成运算，最终从整体上对卫星系统覆盖能力进行了评分；提出了一种低复杂度的覆盖特性数据仿真计算流程，大大降低了覆盖特性仿真的难度。通过多颗典型遥感卫星评估实验，得到了整体覆盖效能评估结果，验证了方法的简单可操作性。后续将对覆盖特性仿真进行更深入的研究，获得更丰富、更合适的指标数据，并运用到覆盖效能评估模型中去。

基金项目

民用航天“十二·五”预先研究项目基金(No. 2013669-7)资助。

参考文献 (References)

- [1] Zhou, G.Q. and Kafatos, M. (2002) Future intelligent earth observing satellites. *FIEOS 2002 Conference Proceedings*, 10 -14 November 2002, USA.
- [2] 于小红, 王杰娟 (2010) 基于均匀设计的空间目标监视卫星覆盖能力仿真分析. *宇航学报*, **12**, 2801-2806.
- [3] 顾行发 (2009) 天地一体化遥感系统综合论证. *遥感学报*, **15**, 34-37.
- [4] 孟凡坤, 党同心, 张俊华, 刘伟 (2010) 卫星组网对地区覆盖效能分析. 国防空天信息技术前沿论坛论文集.

- [5] 余二永, 徐学文 (2010) STSS 星座空间覆盖效能分析方法研究. *计算机仿真*, **6**, 103-106.
- [6] 王启宇, 袁建平, 祝战霞 (2006) 对地观测小卫星星座设计及区域覆盖性能分析. *西北工业大学学报*, **4**, 427-430.
- [7] 韩雪峰, 张海忠, 郑广伟 (2014) 区域卫星导航系统覆盖性能分析. *测绘与空间地理信息*, **3**, 149-151.
- [8] 韩潮, 邓丽, 徐嘉 (2005) 星座覆盖性能评估的改进网格点仿真法. *计算机仿真*, **12**, 21-23.
- [9] 李勇军, 赵尚弘, 吴继礼 (2014) 一种低轨卫星星座覆盖性能通用评价准则. *宇航学报*, **4**, 410-417.
- [10] 白鹤峰 (1999) 卫星星座的分析设计和控制方法研究. 硕士论文, 国防科技大学研究生院, 长沙.
- [11] 安雪滢, 赵勇, 等 (2006) 基于模糊理论的卫星系统效能评估仿真研究. *系统仿真学报*, **8**, 2334-2337.
- [12] 杨军 (2004) 基于模糊理论的卫星导航系统综合效能评估研究. *宇航学报*, **2**, 26-30.
- [13] Saaty, L. (1980) *The analytical hierarchical process*. McGraw-Hill, New York.
- [14] 贺东雷, 李国平, 侯宇葵 (2014) 天基对地观测系统效能评估初探. *中国空间科学技术*, **1**, 18-25.
- [15] 翁慧慧 (2006) 遥感卫星对地覆盖分析与仿真. 硕士论文, 解放军信息工程大学, 郑州.