

## 航天侦察任务的关联度分析与去冗余方法\*

李志猛, 刘刚, 谈群

(国防科技大学 信息系统工程重点实验室, 湖南长沙 410073)

**摘要:**针对航天侦察需求响应中可能存在的任务重复产生问题,综合考虑任务的需求来源、质量要求、时间偏好及空间范围,提出一种基于任务关联度的任务冗余分析方法。对航天侦察的相关要素进行分析度量,给出了基于4类要素的任务关联度计算方法,提出了通过任务之间的关联度来降低可替代任务产生概率的具体算法,考虑了准确优先、公平优先以及混合等不同情况下的冗余度计算方法,给出一个应用示例,说明所述分析方法的有效性。研究表明,该方法具有良好的通用性,可为航天侦察任务的预处理提供有效支持。

**关键词:**航天侦察;任务;冗余分析;关联度

**中图分类号:**TN971 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2014)05-180-06

## A method for space reconnaissance task relevant degree analysis and redundancy deletion

LI Zhimeng, LIU Gang, TAN Qun

(Key Laboratory of Information System Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:**To solve the problem of redundant tasks in space reconnaissance demand, a method for space reconnaissance task relevant degree analysis was proposed, considering the sources of demand, requirements of quality, time preference and spatial range. The relevant elements of space reconnaissance were analyzed, and calculation method of task relevant degree was given based on these four elements. A specific algorithm to reduce probability of redundancy tasks was proposed with task relevant degree. An algorithm of redundancy analysis was considered in the case of accurate priority, justice and hybrid. An example was given to illustrate the effectiveness of this method. The results show that the method has good versatility, which can effectively support space reconnaissance missions preprocessing.

**Key words:** space imaging reconnaissance; task; redundancy analysis; relevant degree

航天侦察以其独特的时空范围、精度、可靠性等不可替代的优势在现代战场上扮演着重要的角色。在航天侦察任务的处理过程中,来自于不同作战单元的侦察任务需求汇聚在一起,容易出现侦察任务需求重复或部分重复的现象,如果能对相应任务进行综合归纳,消除侦察任务中的冗余部分,有望从整体上减少航天侦察资源的重复性工作,提高航天侦察效率。

当前直接针对航天侦察任务冗余分析的研究成果还比较少,文献[1]讨论了卫星成像侦察任务的分解与聚类问题,给出了在同类卫星平台上基于资源能力的聚类分析方法,但其研究并不涉及对用户层次任务的讨论;文献[2]研究了在用户需求层面的卫星成像侦察任务冗余问题,提出了一种基于分维切片的成像侦察任务流冗余分析

方法,其基本思想是对同一类任务需求的任务进行冗余消除,其中任务特征必须符合侦察目标一致、侦察时间区间一致、信息质量需求一致等条件。但在实际情况中,即使两个任务的时间、空间、质量属性不是完全相同,仍然有可能在一次侦察活动中完成,这需要对相关任务的要求进行更为细致的分析。针对这种情况,提出了一种更通用的思路,通过综合衡量完成一个任务同时也能够满足另一任务的可能程度(称为关联度),来进行任务集合的冗余分析,这一思路并不要求相关任务的完全一致性,能够对不同特征任务实施冗余消除,提高任务整体效率。

### 1 航天侦察任务的形式化描述

航天侦察任务是指在特定时空条件下,以天

\* 收稿日期:2014-03-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71271213)

作者简介:李志猛(1979—),男,安徽宿州人,讲师,博士,E-mail:zmli@nudt.edu.cn

基传感器为手段,为满足用户特定信息需求进行的侦察及相关活动。不同于用户提出的侦察需求,航天侦察任务是相对于某类侦察卫星一次过顶侦察能够完成的任务,用户提出的侦察需求一般还需要通过分解与匹配得到航天侦察任务<sup>[3]</sup>。

对航天侦察任务,可用4方面的要素来描述,即任务来源、质量要求、时间属性与空间属性。其中任务来源是对用户需求的说明,可用特征编码来表示。任务的质量要求是指本次侦察对传感器类型以及精度的要求,而时间属性和空间属性分别对应于航天侦察任务在时间区间和空间范围方面的具体要求。

### 1.1 侦察任务的质量要求描述

质量要求的描述主要有两种方法:一是关键参数描述法,如分辨力、对比度等,优点是直观、容易理解、可以与侦察系统的性能参数对应,缺点是这些关键参数不能完全反映图像信息中能够提取所需信息的程度;二是图像综合性能度量方法,典型代表是美国国家图像解译度分级标准(National Imagery Interpretability Rating Scale, NIIRS)<sup>[4]</sup>,优点是详细说明了不同类型、不同等级的图像中可以提取的情报信息,可以有效反映图像的效用,还可以反映不同类型的图像信息在获取不同目标时所具备的优势。采用NIIRS描述图像质量要求。

进一步,可以通过图像质量方程(General Image Quality Equation, GIQE)<sup>[4]</sup>来方便地近似计算获取图像信息的解译度,GIQE是一个经验模

型,是通过图像分析人员判断的统计分析开发出来的,GIQE可以较全面地反映传感器性能、目标背景、气象条件及图像处理过程对图像质量的影响。为简化研究问题,重点考察传感器性能对图像质量的影响,其他因素取平均水平,采用文献<sup>[5]</sup>给出的GIQE简化形式,如式(1)所示。

$$NIIRS \approx c - 3.32 \lg GSD_{GM} \quad (1)$$

其中 $c$ 是传感器类型的经验调节参数, $GSD_{GM}$ 是传感器对地面的采样距离,单位为英寸。

### 1.2 侦察任务的时间属性描述

卫星成像侦察任务时间属性的描述可用最早开始时间( $t_s$ )和最晚结束时间( $t_e$ )来描述,最早开始到最晚结束之间的时间段称为有效时间( $ET$ )。事实上,卫星成像侦察任务需求的时间属性可能很复杂,包括用户的时间偏好与有效时间的不确定性。在有效时间内,用户对侦察时间可能有偏好。有时需要尽可能快地对指定位置进行侦察才能取得较好效果,有时为了得到更实时的情报,希望卫星在某时间点之前尽可能晚地完成侦察,有时也可能希望侦察任务尽可能在某个时间点或时间段执行。即对于时间偏好的描述存在“无偏好”“越早越好”“越晚越好”“靠近中间”等多种类型,文献<sup>[6]</sup>给出了时间偏好函数的几种典型形式,如图1所示,其中 $Pre(t)$ 表示用户对满足其需求的侦察活动发生在有效时间内不同区间的偏好,且已经进行了规范化处理,使得在有效时间区间 $[t_1, t_2]$ 内偏好的总和为1。

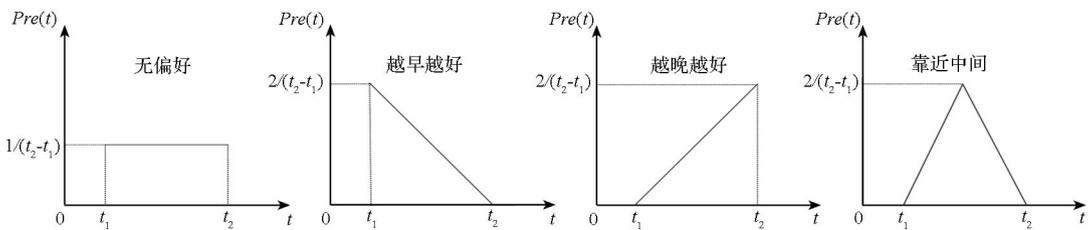


图1 侦察任务时间偏好函数示意图

Fig. 1 Time preference function for reconnaissance tasks

更一般地,可以定义一个表达用户希望其侦察任务需求在 $t$ 时刻被满足的时间偏好函数,记为 $g(t)$ ,反映了用户在不同时刻对资源的需求强度,如果侦察任务规划时能考虑用户的时间偏好,则时间偏好函数也能在一定程度上反映侦察活动在各时刻发生的可能性。 $g(t)$ 除了图1中 $Pre(t)$ 给出的几种类型,也可以定义为诸如高斯分布、泊松分布等其他概率密度函数,表示相应形式的偏好分布形态。

根据以上分析,侦察任务的时间属性描述可

以描述为有效时间区间以及时间偏好函数的组合,即将一项侦察任务需求的时间属性记为 $Time = \langle [t_s, t_e], g \rangle$ 。

### 1.3 侦察任务的空间属性描述

区分航天侦察任务为点目标与区域目标两类。点目标是指侦察对象面积较小,卫星一次成像即可覆盖,当点目标的位置确定时,其空间属性是简单的,即点目标的经纬度,描述为 $(x, y)$ 。对于区域目标来说,卫星不能够一次成像覆盖,通常的处理方法是将相应区域进行网格化处理<sup>[7]</sup>。

## 2 航天侦察任务的关联度

在实施航天侦察时,若完成任务  $A$  获得的图像有可能同时满足任务  $B$  的需要,称此可能性为任务  $A$  对任务  $B$  的关联度,记为  $H(A, B)$ 。

按照上面航天侦察任务的形式化描述,每一任务都可以用任务来源、质量要求、时间属性、空间属性 4 方面来表达,则任务关联度可用相应 4 方面的关联关系来度量,用  $sr$  表达任务来源方面的关联性,  $qa$  表示质量要求方面的匹配度,  $ta$  表示时间属性方面的相关性,  $sa$  表示空间属性方面的相关性,则两项任务的关联度可表示为:

$$H(A, B) = (1 - sr) \cdot qa \cdot ta \cdot sa \quad (2)$$

当然,也可以采用其他数学形式来表达,式(2)的形式较为简单,方便计算,也能较好体现各方面因素对任务相关性的影响,下面深入分析各因素与关联度之间的关系。

1) 任务来源。若侦察任务  $A, B$  来自不同的用户需求,定义  $sr = 0$ ; 若两项任务来自同一个用户需求,定义  $sr = 1$ , 得到  $H(A, B) = 0$ , 这是必然的。因为根据任务的定义,对用户需求进行任务分解的基本原则就是要使得分解后的单一任务对应不同次的侦察,即来自相同用户需求的任务必然完全不可替代。

2) 质量要求。考虑不同任务要求的传感器类型是否匹配,若某类传感器在有效时间内不满足另一项任务的要求,则取  $qa = 0$ 。另外考虑传感器适配情况下图像解译度的一致性程度,当传感器类型满足使用条件时,匹配度由其获取图像的解译度决定,可记为  $match(B. sor, A. sat)$ , 其中  $B. sor$  是指侦察任务  $B$  的质量需求,  $A. sat$  是指任务  $A$  使用传感器的解译度质量等级。

3) 时间属性。卫星侦察任务的时间关系有无关、等于、包含、相交 4 种,设侦察任务  $A, B$  的有效时间分别为  $[ts_A, te_A]$ ,  $[ts_B, te_B]$ , 有:

① 若  $ts_A \geq te_B$  或  $ts_B \geq te_A$ , 则  $A$  的有效时间与  $B$  无关,  $A$  对  $B$  的时间关联度  $ta = 0$ ;

② 若  $ts_A = ts_B, te_A = te_B$ , 则  $A$  与  $B$  的有效时间相等,  $ta = 1$ ;

③ 若  $ts_A \leq ts_B, te_A \geq te_B$  且至多只有一个取等号, 则  $A$  的有效时间包含  $B$ ,  $ta = \int_{ts_B}^{te_B} g_A(t) dt$ , 其中  $g_A(t)$  表示  $A$  的时间偏好函数, 若  $B$  的有效时间包含  $A$ ,  $ta = 1$ ;

④ 若  $ts_A \leq ts_B < te_A \leq te_B$ , 则  $A$  与  $B$  的有效时间相交,  $ta = \int_{ts_B}^{te_A} g_A(t) dt$ 。

4) 空间属性。首先根据任务的形式化描述,将任务  $A$  对应的网格记为  $(x_1, y_1, w_1)$ , 若  $B$  是点目标侦察任务,判断目标点是否在  $A$  对应的网格内,否则,判断  $B$  对应的网格是否包含于  $A$ 。

若  $B$  是点目标侦察任务 ( $Point\_Obj$ ), 目标点记为  $P_b$ , 若  $P_b$  包含在  $(x_2, y_2, w_2)$  中,  $A$  对  $B$  的空间关联度  $sa = 1$ , 否则  $sa = 0$ 。

若  $B$  不是点目标侦察任务,其对应网格记为  $(x_2, y_2, w_2)$ , 根据两者网格边长的关系分为以下三种情况:

① 若  $w_1 < w_2$ , 则  $A$  的网格小于  $B$  的网格,  $A$  对  $B$  的空间关联度  $sa = 0$ ;

② 若  $w_1 = w_2$ , 当  $x_1 = x_2$  且  $y_1 = y_2$  时,  $sa = 1$ , 否则  $sa = 0$ ;

③ 若  $w_1 > w_2$ , 当  $0 \leq x_2 - x_1 \leq w_1 - w_2$  且  $0 \leq y_2 - y_1 \leq w_1 - w_2$  时, 则  $A$  对应的网格包含  $B$ ,  $sa = 1$ , 否则  $sa = 0$ 。

由此得到任务关联度计算方法如算法 1 所示。

### 算法 1 侦察任务关联度计算算法

Alg. 1 Relevant degree calculation for reconnaissance tasks

```

H(A, B)
Begin
  if A. sor = B. sor return(0);
  qa = match(B. sor, A. sat);
  if A. ts ≥ B. te or B. ts ≥ A. te return(0);
  ta = ∫tsBteB gA(t) dt;
  if BisPoint_Obj
    if Pb ∉ (x1, y1) return(0);
    else return(qa · ta);
  if A. w < B. w return(0);
  if A. w = B. w
    if A. x ≠ B. x or A. y ≠ B. y return(0);
    else return(qa · ta);
  if 0 ≤ x2 - x1 ≤ w1 - w2 and 0 ≤ y2 - y1 ≤ w1 - w2 return(qa · ta);
  else return(0);
end

```

## 3 卫星侦察任务冗余分析算法

### 3.1 侦察任务冗余计算的基本方法

卫星侦察任务冗余分析的目的在于消除重复的任务,但侦察任务往往不是完全可替代,替代关系存在不同时空条件下的不确定性,不宜完全消除某个侦察任务,通过降低侦察任务的产生概率达到消除冗余侦察任务的目的。考虑侦察任务  $A$  对  $B$  的关联度,若关联度大于 0,则  $B$  以一定的概

率由  $A$  完成,这个概率与  $H(A, B)$  正相关,与  $A$  产生的概率正相关,将此概率记为  $Replace(B, A)$ ,有:

$$Replace(B, A) = \frac{A.pro \cdot H(A, B)}{1 + A.pro \cdot H(A, B)} \quad (3)$$

其中  $A.pro$  是任务  $A$  的产生概率,  $0 \leq pro \leq 1$ 。

对卫星成像侦察任务  $task_i \in ST$ ,可由其他侦察任务完成的概率为:

$$\begin{aligned} Replace(task_i) &= 1 - \prod_{task_j \in ST, j \neq i} [1 - Replace(task_i, task_j)] \\ &= 1 - \prod_{task_j \in ST, task_j \neq task_i} \frac{1}{1 + task_j.pro \cdot H(task_j, task_i)} \end{aligned} \quad (4)$$

将计算结果称为  $task_i$  的冗余度,经过冗余分析后,  $task_i$  的产生概率将下降,新的产生概率为:

$$task_i.pro \rightarrow task_i.pro \cdot [1 - Replace(task_i)] \quad (5)$$

其中,  $\rightarrow$  表示赋值运算,将式(4)代入得到:

$$task_i.pro \rightarrow task_i.pro \cdot \prod_{task_j \in ST, task_j \neq task_i} \frac{1}{1 + task_j.pro \cdot H(task_j, task_i)} \quad (6)$$

### 3.2 不同导向下的侦察任务冗余计算

在不同的时间消除冗余会得到不同的结果,由此形成两种冗余分析策略:一是分析完两个侦察任务之间的替代关系后马上改变两个侦察任务的产生概率;二是先用一个变量记录每个侦察任务不能被其他侦察任务完成的概率,最后统一更新所有侦察任务的产生概率。第一种策略在计算总任务量方面更加准确,第二种策略在先后遍历的侦察任务之间保持公平,因此将这两种算法分别称为准确导向和公平导向的冗余分析算法。准确导向的任务冗余分析算法如算法2所示。

#### 算法2 准确导向的侦察任务冗余分析算法

Alg.2 Precision-oriented redundancy analysis calculation

```

redundance_exactly(ST)
begin
  for i→1 to n
    for j→i+1 to n
      begin
        task[i].pro→task[i].pro/(1+task[j].pro·H(task[j],task[i]));
        task[j].pro→task[j].pro/(1+task[i].pro·H(task[i],task[j]));
      end
    end
  end
end

```

所示。

#### 算法3 公平导向的侦察任务冗余分析算法

Alg.3 Equity-oriented redundancy analysis calculation

```

redundance_fairly(ST)
begin
  for i→1 to n remain[i]→1;
  for i→1 to n
    for j→i+1 to n
      begin
        remain[i]→remain[i]/(1+task[j].pro·H(task[j],task[i]));
        remain[j]→remain[j]/(1+task[i].pro·H(task[i],task[j]));
      end
    end
  for i→1 to n task[i].pro→task[i].pro·remain[i]
end

```

综合这两种算法的优点,可形成一种混合算法,首先,用准确导向的算法计算出任务量,然后,用公平导向算法计算每个侦察任务的冗余度,最后根据之前计算的总任务量修正每个侦察任务的冗余度,并更新侦察任务产生概率,如算法4所示。

#### 算法4 侦察任务冗余分析的混合算法

Alg.4 Mixed redundancy analysis calculation

```

redundance_mixed(ST)
begin
  total 1→0, total 2→0;
  for i→1 to n pro[i]=task[i].pro;
  for i→1 to n
    for j→i+1 to n
      begin
        pro[i]→pro[i]/(1+pro[j]·H(task[j],task[i]));
        pro[j]→pro[j]/(1+pro[i]·H(task[i],task[j]));
      end
    end
  for i→1 to n total 1→total 1+pro[i];
  for i→1 to n remain[i]→1;
  for i→1 to n
    for j→i+1 to n
      begin
        remain[i]→remain[i]/(1+task[j].pro·H(task[j],task[i]));
        remain[j]→remain[j]/(1+task[i].pro·H(task[i],task[j]));
      end
    end
  for i→1 to n total 2→total 2+task[i].pro·remain[i];
  for i→1 to n task[i].pro→task[i].pro·remain[i]·total 1/total 2;
end

```

公平导向的任务冗余分析算法如算法3

### 4 实例

设在某次作战行动中使用 7 类成像卫星(参数见表 1)完成作战情报保障任务,计算每类卫星在一般条件下获取图像的 NIIRS 等级,设定 6:00 与 18:00 为昼夜交替的时间,如果任务需求时间段在[14,18]时间段内气象条件为多云,只能使用 SAR 成像侦察。

表 1 侦察卫星参数设定

Tab.1 Reconnaissance satellites parameters

卫星类型	传感器类型	分辨率(m)	成像幅宽(km)	NIIRS 等级
Sat <sub>1</sub>	可见光	10	100	0.57
Sat <sub>2</sub>	可见光	3	60	2.31
Sat <sub>3</sub>	可见光	1	40	3.89
Sat <sub>4</sub>	可见光	0.3	20	5.63
Sat <sub>5</sub>	红外	3	100	2.94
Sat <sub>6</sub>	红外	0.5	20	5.52
Sat <sub>7</sub>	SAR	3	60	3.62

考虑作战准备阶段、作战实施阶段以及打击效果评估等不同时间段内的航天侦察需要,分析不同侦察任务的质量要求、时间要求以及空间范围,通过侦察任务需求的分解共产生 85 个侦察任务,相关具体信息可参见文献[8],下面说明对于这 85 个侦察任务进行冗余分析的过程。

首先计算任务集中侦察任务之间的关联度,以表 2 所示的两个任务为例,分别将两个侦察任务记为 A,B,首先计算 A 对 B 的关联度 H(A,B),因为两个侦察任务的来源需求不同(分别来自 1001 号与 1003 号需求),因此来源关系 sr=0。

表 2 侦察任务关联度计算示例

Tab.2 Example of relevant degree calculation

任务编号	卫星类型	时间属性	空间属性	质量匹配度
10011(A)	Sat <sub>4</sub>	5,9	14,12	1.000
10032(B)	Sat <sub>2</sub>	4,8	13,10	0.286

其次,任务 A 对应的第 4 类成像卫星的图像质量全面高于任务 B 的卫星任务需求,即任务 A 对任务 B 的质量关联度:

$$qa = match(B.sor, A.sat) = 1$$

侦察任务 A 的有效时间确定,时间偏好函数为确定型常数函数,当  $5 \leq t < 9$  时,  $A.g(t) = 0.25$ ,因此 A 对 B 的时间关联度为:

$$ta = \int_5^9 A.g(t) dt = 0.75$$

侦察任务 B 是点目标任务,计算其在第 4 类成像卫星对应网格系统中的编号,得到侦察任务 A 对应的网格包含了 B,因此 A 对 B 的空间相关度为 sa=1。

综上所述,侦察任务 A 对 B 的关联度为:

$$H(A,B) = (1 - sr) \cdot qa \cdot ta \cdot sa = 0.75$$

类似计算,得到任意两个任务之间的关联度,通过关联度进行冗余分析,用式(4)~(6)计算不同任务的产生概率,得到如图 2 所示的任务产生概率,可见公平算法和混合算法较为有效,使得相应任务产生概率明显减少。

同时,从图 2 中可以看到,采用不同的冗余分析算法对分析结果有一定影响,由于这些任务是按照需求的重要性从大至小排序的,准确导向的算法分析结果受此排序影响明显,排序在前的侦察任务消除的任务量较大,后面的侦察任务几乎没有消除任务量。

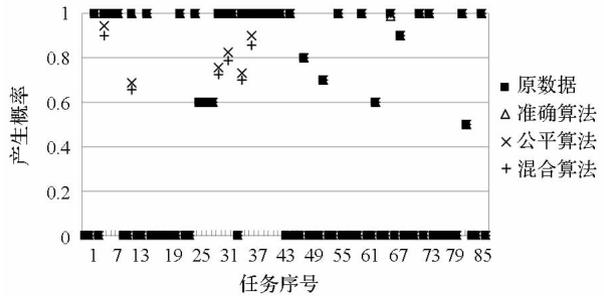


图 2 案例下航天侦察任务冗余分析结果

Fig.2 Reconnaissance tasks redundancy analysis result

考虑侦察任务产生概率的和为总任务量,那么容易算得 85 个侦察任务在冗余分析之前总任务量为 35.9,按照 3 种算法分析之后总任务量分别为 33.5、31.5、31.1,如图 3 所示,说明在此案例下,分别按照 3 种导向的分析算法,分析效果的排序分别是准确算法、公平算法以及混合算法。

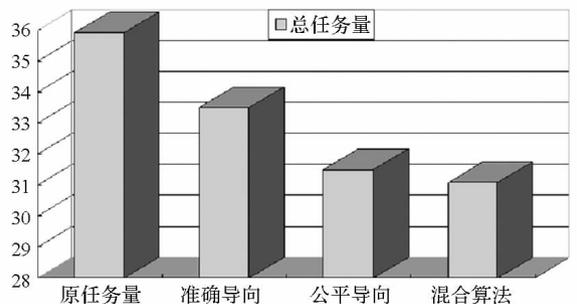


图 3 案例背景下几种冗余算法的对比

Fig.3 Result contrast of redundancy analysis calculation

## 5 结论

针对航天侦察任务的重复产生问题,提出一种基于任务可替代程度的任务冗余分析方法,并考虑了准确导向、公平导向以及混合导向等不同情况的航天侦察任务集冗余分析算法,案例研究表明,该方法可以降低任务的重复产生概率,减少总任务量,同时也表明,不同算法对于任务冗余分析的效率不同,混合算法体现出较大优势。

## 参考文献 (References)

- [1] 马满好. 卫星成像侦察任务分解与资源匹配方法研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2010.  
MA Manhao. Research on decomposition of earth observing satellite reconnaissance task and resource matching [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [2] 祝江汉. 航天成像侦察的任务流预测与任务规划方法研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2010.  
ZHU Jianghan. Research on the methods of task flow prediction and task programming in space imaging reconnaissance [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [3] 薛波. 卫星战术应用任务分解及资源匹配研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2008.  
XUE Bo. Research on task decompose and resource assign for satellite tactics application of tactics [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [4] Leachtenauer J C. Image quality equation and NIRS [M]. Taylor & Francis; Encyclopedia of Optical Engineering, 2003.
- [5] Lingel S, Rhodes C. Methodology for improving the planning, execution, and assessment of intelligence, surveillance, and reconnaissance operations [R]. RAND Corporation, 2008.
- [6] Qiu D S, Tan Q, Peng L, et al. A modeling method of space-based information system task-flow based on scenario [C]// Proceedings of International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management (CCCM2010), 2010: 712 - 717.
- [7] 慈元卓. 面向移动目标搜索的多星任务规划问题研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2008.  
CI Yuanzhuo. Multi-satellite mission planning for moving target search [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [8] 谈群. 卫星成像侦察任务需求的可执行度分析与评价技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2012.  
TAN Qun. Research on satellite imaging reconnaissance task requirements enforceability analysis and evaluation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)