

УДК 629.7

А. Г. Меланченко, А. А. Синча

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепропетровск

АВТОНОМНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СЕАНСОВ НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ МАНЕВРЕННОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Предложен алгоритм итерационного локального поиска, который обеспечивает формирование последовательности сеансов наблюдения Земли с качеством, близким к оптимальному, за фиксированное время, и который подходит для автономной реализации на борту маневренного космического аппарата. Эффективность алгоритма подтверждена моделированием. Применение предложенного алгоритма итерационного локального поиска позволяет снизить накладные расходы, обусловленные получением информации наблюдения, невостребованной потребителем.

Ключевые слова: автономное формирование наблюдений, маневренный КА, локальный поиск.

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения экономической эффективности космической системы (КС) оптического наблюдения Земли (ОНЗ) желательным является снижение накладных расходов, обуславливаемых получением выходной информации, не соответствующей запросам потребителей.

Есть ряд причин, вызывающих накладные расходы, одна из которых — закрытие поверхности Земли облаками во время проведения съемки. Такие расходы могут быть существенно уменьшены за счет формирования последовательности сеансов наблюдения автономно на борту космического аппарата (КА) с учетом оперативной информации о состоянии облачного покрова над районами наблюдения. Однако в связи с быстрым устареванием указанной информации такой подход накладывает временные ограничения на формирование последовательности сеансов [1].

Есть космические аппараты, для которых формирование последовательности сеансов наблюдения (ПСН) определяется функцией одной переменной — угла отклонения качающегося зеркала от направления в нади́р (например «Spot» или «Січ-1М»). Такие КА выполняют съемку параллельно трассе (с нулевым углом азимута), что приводит к дополнительным накладным расходам в случае, когда потребителю необходимо получение изображений полигонов, произвольно ориентированных по отношению к трассе КА. В данном случае накладные расходы обусловлены тем, что значительная часть площади получаемого изображения не соответствует заявке потребителя. Однако в связи с тем, что поле зрения целевой аппаратуры таких КА описывает достаточно простой маршрут, пространство поиска оптимальной ПСН, доставляющей максимум функции качества формируемой последовательности, невелико. Следовательно, для таких КА не требуются специальные подходы к формированию ПСН, даже если она формируется автономно в условиях ограниченного времени.

Вышеуказанное справедливо и для КА, наводимых на объекты съемки посредством разворота самого аппарата при неподвижном поле зрения съемочной аппаратуры (например КА «Січ-2»), для которых формирование ПСН также определяется функцией единственной переменной — угла разворота КА вокруг оси крена либо, в случае стереосъемки, оси тангажа.

Будем рассматривать КА, для которого формирование ПСН определяется функцией трех переменных — угла азимута, времени начала съемки (которое, в свою очередь, зависит от допустимых углов разворота КА) и направления движения мгновенного поля зрения целевой аппаратуры (будем условно называть такой КА «маневренным»).

Маневренный КА обеспечивает съемку полигонов, произвольно ориентированных относительно трассы с минимально избыточной площадью. Однако для маневренного КА, в связи с большим количеством возможных способов съемки заданных участков, значительно увеличивается пространство, а значит и время поиска оптимальной ПСН. Следовательно, для такого КА в условиях ограничения по времени необходимо использовать специальные подходы к формированию ПСН.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть задан априорный план съемки (АПС) R , сформированный на Земле на основе заявок потребителей, и содержащий набор r сеансов наблюдения ($r \in R$) объектов и полигонов (для случая площадной съемки), которые доступны (попадают в полосу обзора КА) и валидны (срок действия соответствующих заявок еще не истек) на том интервале наблюдения, на котором этот план должен быть реализован, хотя бы частично. Каждый сеанс наблюдения порождает один снимок. При этом изображение объекта наблюдения содержится в одном снимке, а полигона — в одном или нескольких прилегающих друг к другу снимках, возможно различной длины, получаемых на одном или нескольких интервалах наблюдения.

Каждый сеанс i в АПС будем характеризовать следующими параметрами: E_i — самое раннее возможное время начала сеанса, L_i — самое поз-

днее возможное время начала сеанса, D_i — продолжительность сеанса, W_r — определяемый на Земле весовой коэффициент, который отражает ценность сеанса для потребителя. Каждой паре сеансов i, j ($i \neq j$), будем присваивать параметр $m(i, j) > 0$ — минимальное время между окончанием сеанса i и началом сеанса j .

Для строгого формулирования условий формирования ПСН введем дополнительные обозначения: B — множество пар снимков (i, j) , получаемых для одного и того же участка поверхности Земли при двух противоположных азимутах движения мгновенного поля зрения целевой аппаратуры, S — множество пар снимков (i, j) , получаемых для синтеза стереоскопических изображений. Также введем две функции Хэвисайда $H_1(i)$ и $H_2(i, j)$, $i, j \in I$, где функция $H_1 = 1$, если сеанс i включен в последовательность, и $H_1 = 0$ в противном случае, а функция $H_2 = 1$, если сеанс i в последовательности предшествует сеансу j , и $H_2 = 0$ в противном случае.

Определим глобальную целевую функцию Q , характеризующую эффективность сформированной ПСН, как сумму весовых коэффициентов W_r сеансов, включенных в последовательность. При формировании глобальной целевой функции будем также учитывать функцию частичного веса сеанса площадной съемки $P(x)$, которая отражает ценность для потребителя изображения части заданного полигона при неполной реализации заявки на площадную съемку на планируемом интервале наблюдения. Аргумент указанной функции

$$x = \sum_{i=r} \frac{A_i}{A_r} H_1(i)$$

характеризует степень выполнения площадной съемки (A_i — площадь, отснятая в процессе выполнения сеанса i , A_r — площадь полигона r). Значение глобальной целевой функции в такой формулировке имеет размерность W_r ; будем полагать его безразмерной величиной.

Тогда задача формирования ПСН $I \subset R$, которая будет доставлять максимум глобальной целевой функции Q , представляет собой задачу частично-целочисленного программирования вида $Q_{\max} = \max \sum_{r \in R} W_r P(x)$, с учетом условий

$$\forall i, j \in I^*: \sum H_2(i, j) = \sum H_2(j, i) = H_1(i), H_1(0) = 1, I^* = I \cup \emptyset, t_\emptyset = 0, \quad (1)$$

$$\forall i, j \in I: (H_2(i, j) = 1) \Rightarrow (t_i + D_i + m(i, j) \leq t_j), \quad (2)$$

$$\forall (i, j) \in B: H_1(i) + H_1(j) \leq 1, \quad (3)$$

$$\forall (i, j) \in S: H_1(i) = H_1(j). \quad (4)$$

Здесь I^* — последовательность I , дополненная фиктивными сеансами \emptyset , добавляемыми в ее начале и в конце. Условие (1) означает, что если некоторый сеанс включен в ПСН, то ему предшествуют и за ним следуют конкретные сеансы; сеанс, не включенный в последовательность, не имеет ни предшествующих, ни последующих сеансов. Смысл условия (2) заключается в том, что сеанс i предшествует сеансу j , если между временами начала указанных сеансов укладывается длительность сеанса i и время перехода между сеансами i и j . Условие (3) означает, что в каждом сеансе съемка выполняется при одном направлении движения мгновенного поля зрения. Выражение (4) означает, что если один сеанс стереосъемки включен в ПСН, в нее также должен быть включен и второй сеанс.

Задача формирования ПСН в описанной постановке сводится к известной задаче поиска пути максимальной длины на ориентированном графе, вершинами которого являются сеансы из АПС. Такая задача является NP-сложной — для нее время поиска оптимального решения растет экспоненциально с увеличением размерности априорного плана съемки.

Есть два подхода к решению NP-сложных комбинаторных задач. Общепринятым подходом является программирование в ограничениях (ПО), позволяющее получить оптимальный результат за достаточное время, одно из преимуществ которого — наличие специальных средств моделирования [3]. Однако в условиях временных ограничений при автономном формировании ПСН на борту маневренного КА, необходимо использование алгоритмов, удовлетворяющих условию отсечения по времени и обеспечивающих получение не оптимального, но достаточно качественного результата [2]. Таким требовани-

ям удовлетворяет предложенный алгоритм итерационного локального поиска (ИЛП).

АЛГОРИТМ ИТЕРАЦИОННОГО ЛОКАЛЬНОГО ПОИСКА

В процессе формирования ПСН, сеанс наблюдения выбирается из АПС с вероятностью, прямо пропорциональной его весовому коэффициенту. Далее проверяется возможность добавления указанного сеанса в последовательность в соответствии с (2). Если добавление сеанса возможно, он включается в последовательность. В противном случае из АПС выбирается другой сеанс. В процессе добавления в ПСН каждому сеансу в соответствии с (3) присваивается одно из двух возможных направлений движения мгновенного поля зрения целевой аппаратуры и учитывается условие (4).

В случае успешного добавления сеанса в ПСН вероятность того, что следующей операцией также будет добавление сеанса, повышается. В противном случае повышается вероятность того, что следующей операцией будет удаление сеанса из ПСН. Указанные операции добавления/удаления сеанса циклически реализуются в течение заданного временного интервала.

В процессе реализации ИЛП первоначально формируется исходная ПСН посредством добавления сеансов из АПС. Затем после ряда неудачных операций добавления сеансов исходная ПСН корректируется путем удаления из нее сеансов (с вероятностью, обратно пропорциональной их весовым коэффициентам) и последующих операций добавления сеансов из АПС. Перед удалением сеанса ПСН и значение ее целевой функции запоминаются в качестве наилучшего полученного результата. Если по результатам корректировки значение целевой функции увеличивается, в качестве наилучшего полученного результата запоминается откорректированная ПСН и значение ее целевой функции, в противном случае происходит возвращение к исходной ПСН. Если время, отведенное на формирование ПСН, еще не истекло, последовательность подвергается дальнейшей корректировке. Это обеспечивает монотонное неубывание значения глобальной целевой функции ПСН.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

При проведении моделирования рассматривались шесть вариантов АПС с различным количеством объектов и полигонов, а также долей стереосъемки, характеристики которых приведены в табл. 1. Весовые коэффициенты сеансов наблюдения были заданы случайными целочисленными значениями в диапазоне от 1 до 5 (сеансы с весовым коэффициентом 5 включались в ПСН безусловно).

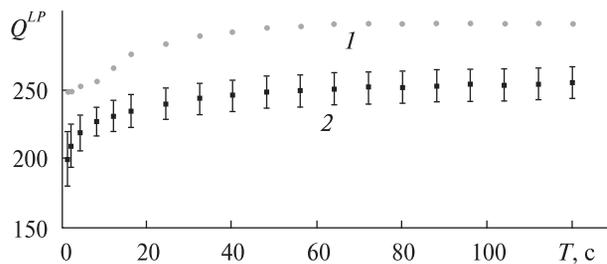
В процессе моделирования сначала по методу ПО формировалась оптимальная ПСН; для нее фиксировалось значение глобальной целевой функции и время решения задачи. Затем ПСН формировалась с использованием ИЛП за время, равное 120 с; для нее также фиксировалось значение глобальной целевой функции. Поскольку ИЛП не дает детерминированного результата, для каждого варианта АПС моделирование выполнялось по сто раз, после чего определялись статистические характеристики результатов. С

Таблица 1. Параметры априорного плана съемки

| Вариант априорного плана съемки | Количество объектов в плане | Количество полигонов в плане | Количество сеансов для реализации плана | Доля сеансов стереосъемки в плане, % |
|---------------------------------|-----------------------------|------------------------------|---|--------------------------------------|
| 1 | 64 | 4 | 212 | 23 |
| 2 | 206 | 12 | 590 | 26 |
| 3 | 308 | 28 | 966 | 26 |
| 4 | 346 | 29 | 1068 | 26 |
| 5 | 133 | 17 | 684 | 69 |
| 6 | 54 | 23 | 294 | 71 |

Таблица 2. Результаты моделирования

| Вариант АПС | Q_{opt} | T_{opt} , с | Q_{max}^{LS} | Q_{avg}^{LS} | Q^{CP} |
|-------------|-----------|---------------|----------------|----------------|----------|
| 1 | 603 | 321 | 490 | 414 | 241 |
| 2 | 843 | 458 | 490 | 446 | 350 |
| 3 | 1022 | 593 | 592 | 516 | 439 |
| 4 | 1028 | 615 | 561 | 455 | 410 |
| 5 | 482 | 357 | 298 | 255 | 149 |
| 6 | 204 | 346 | 156 | 145 | 125 |



Зависимость глобальной целевой функции Q^{LS} от времени T решения задачи при использовании алгоритма ИЛП (статистическая обработка 100 реализаций для пятого варианта априорного плана): 1 — максимальные значения, 2 — средние значения и стандартные отклонения

целью корректного оценивания эффективности ИЛП для каждого варианта АПС выполнялось формирование ПСН по методу ПО за фиксированное время (120 с).

Результаты моделирования представлены в табл. 2, где для каждого варианта АПС приведено оптимальное значение глобальной целевой функции Q_{opt} ПСН, сформированной по методу ПО, время ее формирования T_{opt} , а также максимальное Q_{max}^{LS} и среднее Q_{avg}^{LS} значения глобальной целевой функции ПСН, сформированной с помощью ИЛП, которые были получены при статистической обработке результатов работы алгоритма. Также приведены значения глобальной целевой функции Q^{CP} для ПСН, сформированных по методу ПО за фиксированное время.

Из табл. 2 видно, что в условиях ограниченного времени для каждого варианта АПС ИЛП обеспечивает лучшее по сравнению с ПО качество ПСН. Это качество является достаточно высоким — на уровне 50–70 % от оптимального в зависимости от размера АПС.

Для иллюстрации сходимости алгоритма ИЛП были построены графики зависимости значения глобальной целевой функции от времени формирования ПСН. Такой график для пятого варианта АПС представлен на рисунке, где наряду с максимальным Q_{max}^{LS} и средним Q_{avg}^{LS} значениями целевой функции показана ее дисперсия (горизонтальные штрихи, соединенные вертикальной линией). Для более наглядного отображения характера изменения Q_{max}^{LS} и Q_{avg}^{LS} на начальном

этапе формирования ПСН был использован переменный шаг точек по времени.

Из графика видно, что вначале наблюдается быстрое увеличение глобальной целевой функции, что связано с успешными добавлениями сеансов в исходную, изначально пустую ПСН. С увеличением количества сеансов в последовательности растёт и количество неудачных операций добавления сеансов, выбранных из АПС, что обуславливает снижение скорости нарастания значений глобальной целевой функции. Пологие участки кривых (приблизительно с тридцатой секунды после начала реализации ИЛП), обусловлены незначительным приращением значения глобальной целевой функции в процессе коррекции сформированной ПСН.

При этом разница между максимальным и средним значениями глобальной целевой функции не превышает 15 %, а дисперсия сравнительно невелика. Глобальная целевая функция является монотонной и неубывающей, а это значит, что предложенный алгоритм ИЛП удовлетворяет условию отсечения по времени.

ВЫВОДЫ

Предложен алгоритм итерационного локального поиска, который обеспечивает формирование ПСН с близким к оптимальному качеством и хорошей сходимостью.

Предложенный алгоритм удовлетворяет условию отсечения по времени, что позволяет использовать его для автономного формирования ПСН в условиях ограниченного времени.

1. *Меланченко А. Г., Синча А. А.* Планирование спутниковых съёмок в условиях неопределённости // Шестой Белорусский космический конгресс. Матер. конгресса: В 2 т. — Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2014. — Том 1. — С. 327—330.
2. *Aarts E., Lenstra J. K.* Local Search in Combinatorial Optimization. — John Wiley & Sons, 1997. — 324 p.
3. *ILOG OPL Studio 3.7 Language Manual.* — ILOG S.A., 2003. — 400 p.

Стаття надійшла до редакції 09.09.15

REFERENCES

1. *Melanchenko A. G., Sincha A. A.* Planning of satellite imagery under the uncertainty conditions (Planirovanie sputnikovyh s'emok v uslovijah neopredelennosti). *Shestoj Belorusskij kosmicheskij kongress. Mater. kongressa*, Vol.1, P. 327—330 (OIPINAN Belarusi, Minsk, 2014) (Vols. 1-2; Vol. 1) [in Russian].
2. *Aarts E., Lenstra J. K.* Local Search in Combinatorial Optimization, 324 p. (John Wiley & Sons, 1997).
3. *ILOG OPL Studio 3.7 Language Manual*, 400 p. (ILOG S.A., 2003).

О. Г. Меланченко, О. О. Синча

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

АВТОНОМНЕ ФОРМУВАННЯ ПОСЛІДОВНОСТІ СЕАНСІВ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗЕМЛІ ДЛЯ МАНЕВРЕНОГО КОСМІЧНОГО АПАРАТА

Запропоновано алгоритм ітераційного локального пошуку, що забезпечує формування послідовності сеансів спостереження Землі з якістю, близькою до оптимальної за фіксований час та який підходить для автономної реалізації на борту маневреного космічного апарата. Ефективність запропонованого алгоритму підтверджена моделюванням. Застосування алгоритму ітераційного локального пошуку дозволяє знизити накладні витрати, обумовлені отриманням інформації, що незатребувана споживачем.

Ключові слова: автономне формування спостережень, маневрений КА, локальний пошук.

O. G. Melanchenko, O. O. Sincha

Yangel Yuzhnoye State Design Office, Dnipropetrovsk

AUTONOMOUS FORMING OF EARTH OBSERVATION SESSIONS SEQUENCE FOR A MANEUVERABLE SPACECRAFT

Iterative local search algorithm is proposed, which provides forming of Earth observation sessions sequence with a nearly optimal quality for a limited time and is suitable for an autonomous implementation on-board maneuverable spacecraft. Effectiveness of the algorithm is confirmed by the simulation. Application of the algorithm of iterative local search allows decreasing the overheads caused by obtaining information that is unclaimed by a customer.

Key words: autonomy forming of observations, maneuverable spacecraft, local search.