

## МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ КЛАСТЕРАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ

*Рассмотрена комплексная проблема управления кластерами (компактными группами) космических аппаратов наблюдения Земли. Сформулированы основные задачи управления кластером и обоснована необходимость разработки синергетического метода решения этих задач, разнородных по своей природе, на основе принципов автономности и разделения ресурсов. Основное внимание уделено задаче автономного планирования сеансов наблюдения Земли, для которой предложен метод отыскания не оптимального, но достаточно близкого к нему решения.*

*Розглянуто комплексну проблему керування кластерами (компактними групами) космічних апаратів спостереження Землі. Сформульовано основні завдання керування кластером і обґрунтовано необхідність розроблення синергетичного методу вирішення цих завдань, різномірних за своєю природою, на підставі принципів автономності та розподілення ресурсів. Основну увагу приділено завданню автономного планування сеансів спостереження Землі, для якого запропоновано метод пошуку не оптимального, але досить близького до нього рішення.*

*An integrated control problem of clusters, or compact groups, of Earth observation spacecraft, examined. Primary tasks of cluster's control formulated and need of development a method of these inherent diverse tasks' solving based on autonomy and resource sharing principles. Much attention devoted to problem of autonomous planning and scheduling of Earth observation session for which a method of search of inexact solution but close to optimal one proposed.*

### Введение

В настоящее время в космическом сообществе быстро набирает популярность идея замены больших космических аппаратов (КА) кластерами (компактными группами) малых КА. Кластер представляет собой тип орбитальной группировки, состоящей из нескольких КА, состояние которых как динамических систем регулируется общим алгоритмом управления. В зависимости от поставленных перед кластером задач регулированию подлежат либо все параметры состояния динамики КА, либо некоторое их подмножество (например, параметры поступательного и (или) вращательного движения, положение и (или) скорость КА и т.д.). Основными свойствами кластера с точки зрения управления являются [1]:

1) по крайней мере, один КА кластера должен отслеживать изменение состояния динамики другого КА;

2) алгоритм управления должен, как минимум, учитывать состояние отслеживаемого КА.

Последнее свойство является крайне важным, поскольку позволяет отличить кластер от других типов орбитальных группировок КА. Например, в созвездии КА (широко распространенном типе группировок для создания космических систем связи и навигации) так же, как и в кластере, относительное положение КА строго регламентировано и поддерживается в

процессе эксплуатации. Однако общего алгоритма управления созвездием не существует, поэтому изменение состояния динамики одного КА не учитывает состояния динамики других КА созвездия и не оказывает никакого влияния на них.

Концепция кластера обладает такими очевидными достоинствами, как надежность (даже полный отказ одного КА в кластере не означает краха миссии в целом) и экономическая эффективность (кластер можно создавать, наращивать и восполнять постепенно). Кроме того, использование кластеров открывает новые горизонты в космических исследованиях. Например, в задачах радиолокационного наблюдения Земли с синтезированием апертуры возможна реализация метода интерферометрической съемки (ИРСА), когда с борта различных КА кластера выполняются две (или более) съемки одного и того же района [2]. В зависимости от ориентации интерферометрической базы относительно направления полета КА ИРСА позволит решать такие важные прикладные задачи, как построение цифровых профилей рельефа местности и мониторинг движения ледников.

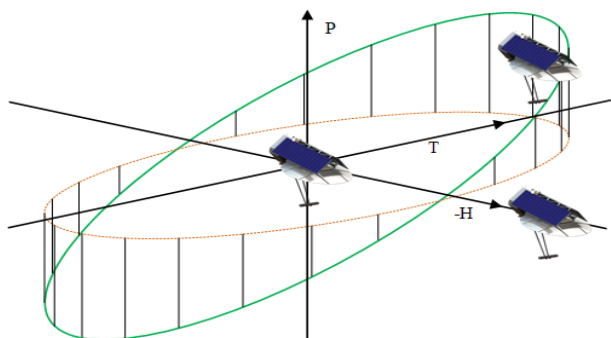


Рис. 1. Конфигурация кластера КА ИРСА с продольной и поперечной ориентацией интерферометрической базы

Чрезвычайно перспективной представляется концепция построения кластера КА с оптической целевой аппаратурой по принципу оптической системы с разреженной апертурой [3], что позволит достичь сверхвысокого разрешения без необходимости создания огромных уникальных КА с запредельно высокой стоимостью.

Однако, как следует из приведенного выше определения кластера, упрощение КА, предназначенного для использования в его составе, влечет за собой существенное усложнение управления как кластером в целом, так и отдельными КА в его составе. Каковы же основные задачи управления кластером? Это согласованное управление орбитальным движением и ориентацией КА кластера, планирование работы полезной нагрузки КА, обнаружение, локализация и парирование неисправностей на борту КА, информационное, в первую очередь – навигационное, обеспечение процессов управления.

Таким образом, проблема управления является проблемой междисциплинарной. По каждому из направлений опубликовано большое количество исследований, однако они практически не связаны между собой, что не позволяет на их основе перейти к проектированию реальной системы управления кластером. По-видимому, это обстоятельство является одной из причин того, что первые натурные эксперименты по управлению кластерами – DART (НАСА, 2005 г.), TechSat-21 (BBC США, 2006 г.) – оказались неудачными. Очевидно, что актуальной является разработка синергетического метода решения перечисленных выше разнородных по своей природе задач управления кластером.



Рис. 2. Основные задачи управления кластером КА наблюдения Земли

Необходимо также учитывать, что глобальным контекстом рассматриваемой проблемы является необходимость автономного подхода к ее решению. Прежде всего, традиционные, с опорой на средства наземного комплекса управления, подходы к управлению полетом КА неприменимы к задачам безопасного (исключающего столкновение) управления движением КА в составе компактного кластера, когда требуемое расстояние между ними (единицы километров) сопоставимо с точностью наземного прогноза параметров движения КА.

Кроме того, традиционные подходы являются весьма затратными: стоимость эксплуатации современной космической системы с одиночным КА составляет, по оценкам НАСА [4], до 40% ее суммарной стоимости. В случае системы с орбитальной группировкой КА эти затраты возрастают экспоненциально. Для принятой в Украине однопунктной технологии управления полетом КА автономность управления кластером приобретает особую актуальность, поскольку все КА кластера находятся в зоне видимости наземной станции управления практически одновременно.

Таким образом, различные задачи управления кластером (например, задачи управления движением и поддержания работоспособности КА) могут поддерживаться различными алгоритмами, однако они должны взаимодействовать между собой, исполняться в реальном времени и совместно использовать ограниченные ресурсы бортового компьютера КА. Выбор алгоритмов управления зависит от различных факторов (размерности кластера, требуемой точности управления, характера возмущений и т.п.), однако общими требованиями к ним являются [5]:

- минимальный объем входной информации;
- исполнение в реальном (как правило, в

"жестком" реальном) времени;

- экономное использование ресурсов бортового компьютера КА.

С точки зрения выполнения этих требований актуальной представляется задача автономного планирования работы полезной нагрузки КА кластера, особенно для перспективных кластеров типа систем с разреженной апертурой, КА которых обеспечивают быстрое перенацеливание целевой аппаратуры с одного объекта наблюдения на другой. Такой кластер может рассматриваться как "виртуальный" КА наблюдения Земли, поэтому задача планирования для него эквивалентна задаче планирования для одиночного КА.

В случае когда КА кластера используются независимо (кластер не эксплуатируется в режиме разреженной апертуры), возникает частная задача распределения объектов наблюдения между КА кластера. Однако, поскольку расстояние между КА в рассматриваемом случае существенно меньше, чем размер мгновенного поля зрения целевой аппаратуры, можно считать, что объекты наблюдения в равной степени доступны для любого КА кластера. Тогда вполне приемлемым представляется произвольное равномерное распределение объектов между КА. Эта задача является тривиальной и далее рассматриваться не будет.

### Постановка задачи

Рассмотрим кластер оптического наблюдения Земли как "виртуальный" КА, целевая аппаратура которого имеет линейный фотоприемник и неподвижное относительно КА поле зрения. Наведение КА на объект наблюдения осуществляется путем его разворота вокруг связанных осей крена, тангажа и рыскания. Известен априорный план  $R$ , сформированный на Земле на основе заявок потребителей и содержащий набор сеансов наблюдения  $r \in R$  объектов и районов, 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 (хотя бы частично) реализован. В качестве последнего будем рассматривать ту часть освещенной орбиты КА, где выполняются заданные для целевой аппаратуры светотехнические условия наблюдения. В плане наблюдения каждому сеансу соответствует весовой коэффициент  $W_r$ , определяемый при планировании работы КА, например, на основе приоритетности заявок на проведение наблюдений.

Процесс наблюдения состоит из последовательности сеансов, в результате которых формируются снимки – изображения прямоугольных участков поверхности, параллельных проекции вектора скорости КА на поверхность Земли; один сеанс порождает один снимок. При этом изображение объекта наблюдения содержится в одном снимке, а района – в одном или нескольких прилегающих друг к другу снимках, возможно, различной длины, получаемых на одном или нескольких (в зависимости от геометрии района и динамических характеристик КА) интервалах наблюдения. Для сеансов, включенных в план наблюдения для проведения площадной съемки (съемки района поверхности Земли), дополнительно задается параметр  $A_r$ , характеризующий долю площади района, покрываемую данным снимком. За счет возможности разворота КА каждый снимок может быть получен одним из двух способов – при движении мгновенного поля зрения целевой аппаратуры в направлении движения КА или в противоположном направлении. Таким образом, каждому сеансу наблюдения соответствуют два возможных варианта получения снимка.

Тогда задача планирования работы полезной нагрузки рассматриваемого "виртуального" КА может быть сформулирована следующим образом. Из множества возможных вариантов выполнения плана наблюдения необходимо синтезировать реализуемую последовательность сеансов  $I \subset R$ , удовлетворяющую ограничениям со стороны КА и доставляющую максимум критерию качества планирования.

Для строгого формулирования ограничений, налагаемых со стороны КА, введем дополнительные обозначения. Будем характеризовать каждый сеанс наблюдения  $i$ , который может быть включен в последовательность  $I$ , четырьмя параметрами:  $E_i$  – самое раннее возможное время начала сеанса;  $L_i$  – самое позднее возможное время начала сеанса;  $D_i$  – продолжительность сеанса и  $A_i$  – площадь участка поверхности Земли, отснятая в результате выполнения сеанса. Первые два параметра определяются допустимыми углами отклонения оптической оси целевой аппаратуры от направления в надира, а последние два – геометрическими характеристиками объекта – района, для наблюдения которого планируется данный сеанс. Исходя из динамических возможностей КА для каждой пары сеансов наблюдения

$(i, j), i \neq j$  определим параметр  $m(i, j) > 0$  – минимальное время между окончанием сеанса  $i$  и началом сеанса  $j$  (если переход от сеанса  $i$  к сеансу  $j$  невозможен, параметру  $m$  будем присваивать некоторое очень большое значение, равное, например, орбитальному периоду КА).

Для учета возможности проведения каждого сеанса двумя способами обозначим  $B$  множество пар снимков  $(i, j)$ , получаемых для одного и того же участка поверхности Земли при двух различных направлениях движения мгновенного поля зрения целевой аппаратуры; очевидно, что  $|I| = 2 \times |B|$ . Обозначим через  $S$  множество пар снимков  $(i, j)$ , получаемых для синтеза стереоскопических изображений. Относительная доля стереопар в последовательности сеансов  $2 \times |S|/|I| = |S|/|B|$ . Обозначим через  $t_i$  время начала сеанса  $i$ , если этот сеанс включен в последовательность. Введем также две функции Хевисайда  $H_1(i)$  и  $H_2(i, j)$ ,  $i, j \in I$ , определяющие включение сеансов наблюдения из плана  $R$  в синтезируемую последовательность и порядок сеансов в последовательности. Функция  $H_1$  принимает значение 1, если сеанс  $i$  включен в последовательность, и 0 в противном случае. Функция  $H_2$  принимает значение 1, если сеанс  $i$  в последовательности предшествует сеансу  $j$ , и 0 в противном случае.

С учетом введенных обозначений ограничения для синтеза последовательности сеансов можно сформулировать следующим образом:

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

$$\forall i \in I: (H_1(i) = 1) \Rightarrow (E_i \leq t_i \leq L_i); \quad (2)$$

$$\forall i, j \in I: (H_2(i, j) = 1) \Rightarrow (t_i + D_i + m(i, j) \leq t_j); \quad (3)$$

$$\forall (i, j) \in B: H_1(i) + H_1(j) \leq 1; \quad (4)$$

$$\forall (i, j) \in S: H_1(i) = H_1(j). \quad (5)$$

В (1) символом  $\emptyset$  обозначен фиктивный сеанс наблюдения, которым начинается и заканчивается синтезируемая последовательность сеансов; время начала такого сеанса равно нулю. В целом (1) означает, что если некоторый сеанс включен в последовательность, то ему предшествуют и за ним следуют конкретные сеансы. Если же некоторый сеанс в последовательность не включен, то он не имеет ни пред-

шествующего, ни последующего сеансов.

Критерий качества планирования  $Q$  определим как  $Q = \sum_{r \in R} W_r P(x)$ , где  $P(x)$  – функция частичного веса сеанса площадной съемки (рис. 3), отражающая ценность для потребителя изображения части заданного региона (при неполной реализации заявки на площадную съемку на планируемом интервале наблюдения). Аргумент этой функции

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

характеризует степень выполнения заявки: для площадной съемки это доля площади заданного в заявке района, покрываемая при выполнении сеансов, включенных в синтезируемую последовательность сеансов наблюдения. В частном случае функция  $P$  (и соответственно критерий качества планирования  $Q$ ) может быть линейной, т.е.

$$P(x) = x.$$

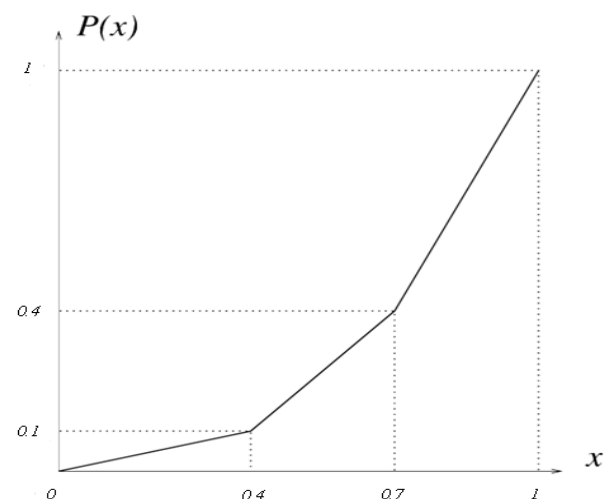


Рис. 3. Пример функции частичного веса сеанса наблюдения района поверхности Земли

### Алгоритмы решения задачи автономного планирования

В предложенной постановке задача автономного планирования работы полезной нагрузки рассматриваемого кластера как "виртуального" КА является NP-сложной задачей частично-целочисленного программирования, то есть относится к классу комбинаторных задач, в которых время поиска оптимального решения растет экспоненциально с увеличением размерности априорного плана наблюдения. Она сводится к известной задаче поиска пути максимальной длины на ориентированном графе при наличии ограничений. Вершинами этого

графа являются сеансы  $r$  из априорного плана наблюдения. Ориентированное ребро между двумя сеансами  $i$  и  $j$  на этом графе существует тогда и только тогда, когда между ними возможен переход  $m(i, j)$ . Ребра характеризуются двумя параметрами: длительностью перехода  $m$  и длиной, равной весовому коэффициенту  $W$  вершины, из которой исходит данное ребро. В свою очередь, вершины графа также характеризуются двумя параметрами: допустимым временным интервалом реализации соответствующего сеанса  $(E, L)$  и его длительностью  $D$ . Ограничениями же являются соотношения (2), (4) и (5).

Общепринятым подходом к решению сложных комбинаторных задач является программирование в ограничениях. Его важным преимуществом является также наличие специализированных средств моделирования [6], причем состав модели соответствует описанному выше при формулировании постановки задачи: входные данные, переменные и функции, используемые для принятия решения, ограничения и критерий оптимизации. Кроме того, данный метод является точным и при наличии достаточного времени гарантирует нахождение оптимального результата. Для сокращения времени поиска оптимального решения целесообразно дополнить модель некоторыми эвристическими правилами отбора вершин графа, позволяющими сузить пространство поиска решений. Для рассматриваемой задачи планирования представляется целесообразным ввести следующие два правила:

- исключить из рассмотрения сеансы наблюдения с малым весовым коэффициентом, поскольку они в наименьшей степени влияют на итоговый коэффициент качества планирования;

- исключить из рассмотрения сеансы наблюдения, переход к которым должен осуществляться в направлении, противоположном направлению движения КА, и иметь продолжительность, превышающую некоторый порог (даже если такой переход обеспечивается динамическими возможностями КА), поскольку вероятность появления таких переходов в оптимальной последовательности сеансов невелика.

Однако, как будет видно далее из результатов моделирования, даже с учетом введения дополнительных ограничений время, необходимое для получения строго оптимального решения, достигает десяти минут, что для задачи автономного планирования неприемлемо. По-

этому была исследована возможность применения для ее решения алгоритма, дающего за ограниченное время пусть и неоптимальное, но достаточно качественное решение. Такими свойствами при решении комбинаторных задач большой размерности обладают алгоритмы локального поиска [7].

В рассматриваемом случае идея алгоритма локального поиска достаточно проста: сеанс для включения в синтезируемую последовательность выбирается из ближайшего окружения ранее выбранного сеанса по максимуму весового коэффициента, заданного в априорном плане; если в окружении имеется несколько сеансов с равными весовыми коэффициентами, выбирается сеанс с минимальным временем перехода. Алгоритм реализуется несколько раз, причем в новую последовательность в первую очередь включаются сеансы, не вошедшие в предыдущую последовательность. После выполнения всех циклов выбирается последовательность сеансов, имеющая максимальный коэффициент качества планирования, она и считается наилучшей.

### Результаты моделирования

Для проведения моделирования были приняты следующие исходные данные. Рассматривался КА оптического наблюдения Земли [8], период обращения которого был принят равным 97,5 мин, а местное время в восходящем узле орбиты – 10:30. Светотехнические условия наблюдения по углу места Солнца (от 30 до 70 град) в этом случае выполняются в течение примерно 15 мин на каждом витке полета. Для сеансов наблюдения были приняты следующие значения параметров: среднее значение  $(L_i - E_i) - 70$  с, среднее значение  $D_i - 6$  с, минимальное время перехода между сеансами съемки двух объектов, разнесенных на 100 км, – 10 с, весовые коэффициенты сеансов – случайные целочисленные значения в диапазоне от 1 до 5 (сеансы с весовым коэффициентом 5 включались в синтезируемую последовательность безусловно). Всего было разработано шесть априорных планов наблюдения, их характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры априорных планов наблюдения для моделирования алгоритмов автономного планирования наблюдений

Вариант априорного плана	Количество объектов в плане	Количество районов в плане	Количество снимков 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

На первом этапе моделирования для каждого из априорных планов по алгоритму программирования в ограничениях были определены максимально достижимое значение критерия качества планирования и время, в течение которого было получено решение задачи. На втором этапе использовался описанный выше алгоритм локального поиска, а время решения задачи было ограничено двумя минутами. Поскольку локальный поиск по определению не может дать не только оптимальный, но и детерминированный результат, то для каждого варианта априорного плана наблюдения моделирование выполнялось по сто раз, после чего определялись статистические характеристики результатов (максимальное и среднее значения коэффициента качества планирования). Для более корректной оценки полученных результатов на третьем этапе моделирования опять использовался алгоритм программирования в ограничениях, однако время решения задачи было, как и на втором этапе, ограничено двумя минутами.

Результаты моделирования представлены в табл. 2. В ней для шести вариантов априорного плана наблюдения, описанных в табл. 1, приведен оптимальный коэффициент качества планирования  $Q_{opt}$ , полученный по методу программирования в ограничениях, и время его получения  $T_{opt}$  (первый эксперимент), максимальное  $Q_{max}^{ПП}$  и среднее  $Q_{avg}^{ПП}$  значения коэффициента качества планирования, полученные при статистической обработке результатов работы алгоритма локального поиска (второй эксперимент), и значения коэффициента качества планирования  $Q^{ПО}$ , полученные по мето-

ду программирования в ограничениях за фиксированное время.

Таблица 2

Результаты моделирования алгоритмов автономного планирования наблюдений

Вариант априорного плана	$Q_{opt}$	$T_{opt}, c$	$Q_{max}^{ПП}$	$Q_{avg}^{ПП}$	$Q^{ПО}$
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

Из табл. 2 отчетливо видно преимущество алгоритма локального поиска, который для всех вариантов априорного плана наблюдений обеспечил за ограниченное время получение лучших (хотя и неоптимальных) результатов, чем алгоритм программирования в ограничениях. Также подтверждается зависимость качества автономного планирования от размерности задачи: только в первом и последнем вариантах априорного плана приближенный результат находится на уровне 70% оптимального. В остальных вариантах, имеющих существенно большую размерность, качество локального поиска снижается примерно до 50% оптимального.

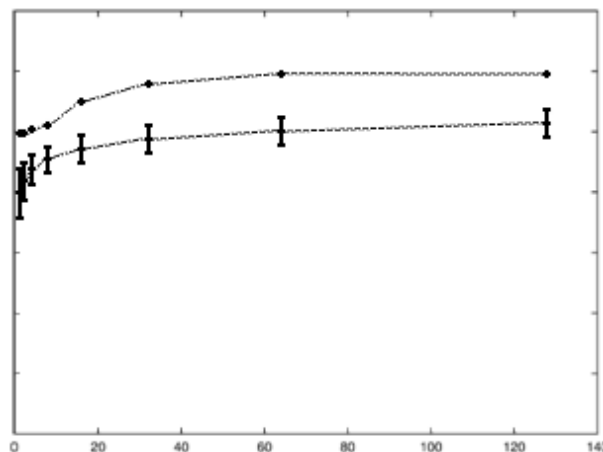


Рис. 4. Зависимость коэффициента качества планирования от времени решения задачи автономного планирования по методу локального поиска для пятого варианта априорного плана (статистическая обработка 100 реализаций)

Поскольку алгоритмы локального поиска, как отмечалось выше, не обеспечивают получение детерминированного результата, для оценки их эффективности были также построены графики зависимости коэффициента каче-

ства планирования  $Q$  от времени решения задачи, на которых наряду со средним и максимальным значениями коэффициента приводится также его дисперсия. Пример такого графика для пятого варианта априорного плана приведен на рис. 4. Из графика видно, что как максимальное, так и среднее значения коэффициента качества устанавливаются примерно через минуту, разница между максимальным и средним значениями не превышает 15%, а дисперсия коэффициента качества сравнительно невелика.

### Выводы

Результаты анализа задач управления кластером КА наблюдения Земли показывают необходимость создания синергетического метода их решения на основе алгоритмов, пригодных для автономной реализации непосредственно на борту КА.

Более подробно рассмотрена задача автономного планирования работы целевой аппаратуры КА. Предложены методы формирования оптимального в смысле выбранного критерия качества плана наблюдения, и "достаточно эффективного" плана с качеством, приближенным к оптимальному.

Результаты моделирования показали, что приближенный метод обеспечивает хорошую сходимость и получение приемлемого результата за ограниченное время, что позволит экономно расходовать вычислительные ресурсы бортового компьютера. Разработанные алгоритмы автономного планирования могут быть использованы для управления не только кластерами, но и одиночными КА наблюдения Земли.

### Список использованной литературы

1. Scharf D.P., Hadaegh F.Y., Kang B.H. A survey of spacecraft formation flying guidance // Proc. International Symposium on Formation Flying, Missions and Technologies. – 2002. – P. 27–56.
2. Меланченко А.Г. Концепция радиолокационного наблюдения Земли с использованием кластера автоматических космических аппаратов // Технологические системы. – № 3(64). – 2013. – С. 61–68.
3. Fienup J.R. Scaling laws for sparse-aperture imaging // Proc. OSA Workshop on Computational Optics and Imaging for Space Applications. – R. G. Lyon, Ed., NASA Goddard Space Flight Center, 2000. – P. 43–49.
4. Watso D.P., Scheldt D.H. Autonomous systems // Johns Hopkins APL Technical Digest. – Vol. 26, № 4 (2005). – P. 368–377.
5. Меланченко А.Г. Проблемы управления кластерами космических аппаратов наблюдения Земли // 13-а Українська конференція з космічних досліджень: Збірник тез, 2–6 вер. 2013 р. – С. 281.
6. ILOG OPL Studio 3.7 Language Manual // ILOG S.A. – 2003. – 400 p.
7. Aarts E., Lenstra J.K. Local Search in Combinatorial Optimization. – John Wiley & Sons, 1997. – 324 p.
8. Космическая система оптико-электронного наблюдения высокого разрешения: ЭП. Січ-Перспектива: Пояснительная записка, Ч. 1. Состав и основные характеристики космической системы Січ-Перспектива ПЗ 1. – ГП "КБ "Южное", 2012. – 146 с.

Статья поступила 31.01.2013