

УДК 629.7

А. А. Синча, А. Г. Меланченко

*Государственное предприятие «Конструкторское бюро “Южное”
имени М. К. Янгеля», г. Днепропетровск*

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАДАЧ НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ РАЗРЕЖЕННОГО КЛАСТЕРА НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассмотрена задача скоординированного распределения целевых задач для разреженного кластера космических аппаратов. Предложен метод, рассматривающий такой кластер как мультиагентную систему и обеспечивающий хорошую сходимость, а также получение приемлемого результата за ограниченное время.

Ключевые слова: космический аппарат, разреженный кластер, распределение задач.

Розглянуто задачу скоординованого розподілення цільових задач для розрідженого кластера космічних апаратів. Запропоновано метод, що розглядає такий кластер як мультиагентну систему та забезпечує хорошу збіжність результатів, а також отримання прийняттого результату за обмежений час.

Ключові слова: космічний апарат, розріджений кластер, розподіл завдань.

A task of coordinated task allocation for sparse cluster of spacecrafts is examined. Method which consider cluster as multiagent system and provides good results and receiving of admissible result for limited time is proposed.

Key words: spacecraft, sparse cluster, task allocation.

Введение. В работах [1–3] рассматривались методы целевого управления космическими аппаратами (КА) в составе компактного гомогенного кластера наблюдения Земли. Было показано, что в этом случае кластер может рассматриваться как виртуальный многоэлементный КА, и распределение целевых задач между КА кластера может осуществляться произвольным образом. Однако для решения ряда задач наблюдения Земли из космоса, например, построения трехмерных цифровых карт местности по данным синхронных стереоснимков необходимо увеличить расстояние между КА кластера до величины, существенно превышающей размеры объектов наблюдения (ОН). Будем называть такие кластеры разреженными.

Для разреженного кластера условия наблюдения одного и того же ОН различными КА могут различаться, что исключает произвольное распределение целевых задач между КА (то же справедливо для случая гетерогенного кластера, объединяющего КА различных типов (КА обзорного и детального наблюдения, КА с оптоэлектронной и радиолокационной полезной нагрузкой, КА – накопители и ретрансляторы информации и т.д.), вне зависимости от расстояния между КА). Для успешного достижения цели, поставленной перед разреженным кластером, необходимо скоординированное распределение целевых задач между КА, и такой кластер может рассматриваться как мультиагентная система (МАС).

Обзор известных методов распределения задач в мультиагентных системах. Для повышения эффективности любой миссии, выполняемой группой агентов – мобильных роботов, необходима организация их совместной работы. Известно большое количество методов, дающих агентам возможность распределять между собой целевые задачи, выбирая их из известного перечня. В централизованных системах [4; 5] каждый агент передает необходимую для планирования информацию об обстановке (ИО), прежде всего о собственном состоянии и состоянии внешней среды, на центральный сервер, который формиру-

ет план для каждого агента группы. Преимуществом таких систем является возможность решения ресурсоемких задач на Земле, что позволяет снизить требования к бортовым вычислительным ресурсам. Однако при этом каждый агент должен быть обеспечен связью с центральным сервером, что ограничивает район выполнения миссии, либо требует существенного усложнения системы связи (например, введения в состав группы специальных агентов-ретрансляторов). Кроме того, отказ центрального сервера приводит к срыву миссии вне зависимости от состояния агентов.

Для устранения указанных недостатков предлагаются децентрализованные системы целевого управления, в которых функция планирования реализуется на борту каждого агента [6]. Обычно методы децентрализованного планирования базируются на предположении наличия идеальных (с бесконечной пропускной способностью и абсолютной надежностью) линий связи между агентами, поскольку в таких системах каждый агент должен располагать ИО у всех агентов группы. Реальные линии связи, имеющие ограниченную пропускную способность и подверженные воздействию помех и сбоев, существенно ограничивают возможности координации действий агентов [7]. Несогласованность ИО в этом случае может привести к возникновению конфликтов при распределении целевых задач между агентами, поскольку каждый агент будет решать задачу оптимального планирования, используя различные наборы данных. Поэтому обычно методы децентрализованного планирования предусматривают согласование ИО по принципу консенсуса до распределения целевых задач между агентами [8–10]. Применяемые алгоритмы согласования обеспечивают конвергенцию ИО при самых разных топологиях информационной сети, соединяющих агентов [11], что позволяет распределять целевые задачи в условиях быстроменяющейся внешней среды и при неполной ИО.

Вместе с тем алгоритмы согласования, применяющие принцип консенсуса, требуют значительного времени реализации и передачи больших объемов данных между агентами [12]. В условиях ограниченной пропускной способности информационной сети это приводит к большим затратам времени. Для сокращения этого времени предложен ряд подходов, не требующих достижения идеального консенсуса относительно ИО: в работе [Там же] предложено организовать между агентами обмен как ИО, так и результатами планирования, а в публикации [13] – передавать информацию только в случае расхождения между планами, составленными на основе локальной и глобальной ИО. Однако в обоих случаях неидеальный консенсус относительно ИО не позволяет гарантировать бесконфликтное распределение задач.

Еще одним подходом к получению субоптимального решения задачи планирования является применение алгоритмов распределения задач, построенных по принципу аукциона [14]. Обычно в роли аукциониста, принимающего заявки от всех агентов группы, оценивающего их и определяющего победителя на основе predetermined методики, выступает центральный узел системы [15]. В работе [16] предлагается альтернативный подход, в соответствии с которым в системе отсутствует центральный узел, а роль аукциониста исполняет один из агентов. В рассматриваемых алгоритмах каждый агент подает заявки на выделение ему целевых задач с оценками, базирующимися исключительно на собственной ИО. Поскольку каждая задача может быть назначена только одному агенту (победителю аукциона), эти алгоритмы позволяют найти бесконфликтное решение даже в случае несогласованности ИО у различных агентов. Основной проблемой практического применения рассматриваемых алгоритмов является необходимость передачи аукционисту заявок от каждого агента группы, что ограничивает возможные варианты топологии информационной сети. Для преодоления этого ограничения в работе [17] предложено проводить аукцион только среди агентов, находящихся

в непосредственной близости от аукциониста. Это позволяет снять ограничения на топологию сети за счет снижения качества распределения задач и, как следствие, снижения эффективности миссии в целом.

В целом анализ литературы показывает, что алгоритмы согласования ИО по принципу консенсуса до распределения задач менее чувствительны к топологии информационной сети, тогда как алгоритмы, применяющие принцип аукциона, менее чувствительны к несогласованности ИО и требуют меньших вычислительных ресурсов для своей реализации.

В настоящей статье предлагается метод распределения целевых задач, объединяющий преимущества обоих известных подходов и пригодный для реализации на борту КА разреженного гомогенного кластера с учетом имеющихся ограничений: аукцион применяется для децентрализованного распределения задач, а затем возможные конфликты разрешаются по принципу консенсуса. В отличие от известных алгоритмов консенсус достигается относительно оценки победившей заявки, а не относительно ИО, то есть аукцион проводится по принципу консенсуса. Единственным допущением является то, что одному КА может быть назначено не более одной целевой задачи.

Постановка задачи. Пусть известен перечень N_T целевых задач. Необходимо распределить их между N_A КА-агентами таким образом, чтобы каждая задача была назначена не более чем одному КА, максимизировав при этом показатель эффективности миссии. Процесс распределения задач считается завершенным, как только будет назначено $N_{\min} = \min\{N_T, N_A\}$ задач. Глобальную целевую функцию определим как сумму локальных показателей эффективности, в качестве которых будем применять функцию оценки задачи, назначенной конкретному КА. В такой постановке распределение целевых задач в кластере КА представляет собой задачу целочисленного программирования следующего вида:

$$\max \sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_T} c_{ij}(x_i) x_{ij}, \quad (1)$$

при условии

$$\sum_{i=1}^{N_A} x_{ij} \leq 1, \forall i \in I, \sum_{j=1}^{N_T} x_{ij} \leq 1, \forall j \in J, \sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_T} x_{ij} = N_{\min} = \min\{N_T, N_A\}, x_{ij} \in \{0, 1\}, \\ \forall (i, j) \in I \times J.$$

Здесь двоичная переменная решения $x_{ij} = 1$, если выполнение задачи j назначено КА i , а $x_i \in \{0, 1\}^{N_T}$ – вектор, i -ым элементом которого является переменная x_{ij} . Индексные множества определяются так: $I = \{1, \dots, N_A\}$, $J = \{1, \dots, N_T\}$. Предполагается, что функция оценки удовлетворяет условию $c_{ij}(x_i) \geq 0$.

Алгоритмы проведения аукциона. Одной из ключевых концепций предлагаемого метода является применение аукциона для распределения целевых задач между КА. Алгоритм проведения аукциона для централизованной системы распределения задач, впервые предложенный в работе [18], имеет полиномиальное время выполнения. Оценка задачи определяется как $c_{ij} = a_{ij} - p_j$, где a_{ij} – эффект, получаемый от назначения задачи j для выполнения агентом i , а p_j – глобальная ценность задачи j . Аукцион проводится циклически и продолжается до тех пор, пока каждому агенту не будет назначена задача с максимальной оценкой $\max_j c_{ij}$. На каждом цикле выбирается один из агентов, которому задача еще не назначена, и определяется задача $j = \arg \max_j (a_{ij} - p_j)$. Если задача j^* уже была назначена другому агенту, эти агенты меняются задачами. После этого оценка задачи j^* повышается так, чтобы она стала второй по ценности задачей в списке агента i . В результате выполнения алгоритма каждому агенту назначается задача, дающая максимальный эффект.

В децентралізованій системі розподілення задач їх оцінки визначаються як $c_{ij} = a_{ij} - p_{ij}$, где p_{ij} – локальна цінність задачі j при її назначенні агенту i . Звичайно агенти посилають свої заявки аукціоністу, який визначає переможця по правилу $i^* = \arg \max_i c_{ij}$ [15]. В роботі [19] запропоновано замінити аукціоніста спеціальним алгоритмом розв'язання конфліктів.

Алгоритми розв'язання конфліктів на основі консенсуса. Децентралізовані системи розподілення задач звичайно потребують узгодження ІО для всіх агентів [10]. В реальному світі швидкозмінююча зовнішня середовище, шуми датчиків і обмежена пропускання спроможність інформаційної мережі можуть сильно ускладнити підтримку узгодженої ІО. В цих випадках запропоновано на основі консенсуса узгоджувати не всю ІО, а лише визначену її частину (місцезнаходження агентів і цілей, класифікація цілей і т.д.). В роботі [11] показано, що при такому підході узгодження може бути досягнуто для різних варіантів топології інформаційної мережі.

Концепція децентралізованого розподілення задач з проведенням аукціону по принципу консенсуса. Пропонується метод передбачає циклічну реалізацію двохетапного процесу: проведення аукціону на першому етапі з наступним узгодженням переліку заявок-переможців по принципу консенсуса. Процес проведення аукціону починається з того, що кожен КА подає заявку на виконання цільової задачі. Нехай $c_{ij} \geq 0$ представляє собою заявку КА i на виконання задачі j . Кожен КА зберігає і оновлює в процесі розподілення задач два вектори довжини N_T . Вектор x_i представляє собою перелік задач КА i , в якому єдиний елемент $x_{ij} = 1$ (виконання задачі j доручено КА i), а інші елементи – нульові. Вектор y_i – це перелік заявок-переможців аукціону, елемент якого y_{ij} представляє собою останню по часу максимальну оцінку цінності кожної заявки. Обидва вектори ініціалізуються нульовими значеннями. На основі переліку заявок-переможців можна сформувати вектор h_i – перелік актуальних заявок, $h_{ij} = \Theta(c_{ij} > y_{ij})$, $\forall j \in J$, где $\Theta(\cdot)$ – індикаторна функція, яка має значення логічної одиниці для істинного аргументу і логічного нуля – для хибного. Псевдокод ітерації t алгоритму проведення аукціону для КА i представлено на Рис. 1. Звернемо увагу, що кількість ітерацій для кожного КА може бути різною. Якщо на ітерації t КА i ще не назначена задача (тобто $\sum_j x_{ij}(t) = 0$), то він починає з аналізу переліку актуальних заявок h_i .

Якщо цей перелік не порожній, КА i з поточного переліку заявок-переможців y_i вибирає задачу J_i , яка має максимальну оцінку (рядок 7 на Рис. 1), а потім оновлює свої переліки x_i і y_i . Якщо ж КА i вже має назначену задачу на ітерації t (тобто $\sum_j x_{ij}(t) \neq 0$), то він пропускає процес вибору задачі і переходить до другого етапу – узгодженню переліку заявок-переможців.

На другому етапі КА узгоджують перелік заявок-переможців по принципу консенсуса, а потім з допомогою цього переліку визначають переможця аукціону. Це забезпечує розв'язання конфліктів по всьому множині задач, при цьому не потрібна визначена структура інформаційної мережі. Нехай $\Gamma(\tau)$ – неорієнтована інформаційна мережа в момент часу τ , яка має симетричну матрицю сусідності $G(\tau)$. Матриця сусідності визначена так, що $g_{ik}(\tau) = 1$, якщо в момент часу τ існує лінія зв'язу між КА i і k (ці КА будемо називати «сусідами»). Припустимо, що кожен вузол мережі має короткозамкнуте ребро ($g_{ii}(\tau) = 1, \forall i$).

На кожній ітерації даного етапу КА i приймає від кожного з своїх сусідів перелік заявок-переможців. Псевдокод алгоритму розв'язання конфліктів для КА i на ітерації t , відповідної моменту реального часу τ , представлено на Рис. 2. Після прийому переліку y_k від кожного вузла мережі, для якого $g_{ik} = 1$, КА i замінює значення y_{ij} найбільшим значенням з власних

ного перечня y_i и перечней y_k своих соседей (строка 4 на Рис. 2). Если кто-либо из соседей предложил по задаче, выбранной КА i , лучшие условия ($z_{i,J_i} \neq i$ строка 6 на Рис. 2), КА i снимает свою заявку по этой задаче. Предполагается, что проблемы, возникающие при определении J_i на первом этапе или z_{i,J_i} на втором этапе распределения задач, разрешаются каким-либо заранее предусмотренным способом, например добавлением каждому КА малой случайной величины к оценке каждой заявки.

Алгоритм проведения аукциона (КА i , итерация t)

- 1: Процедура SelTask ($c_i, x_i(t-1), y_i(t-1)$)
- 2: $x_i(t) = x_i(t-1)$
- 3: $y_i(t) = y_i(t-1)$
- 4: if $\sum_j x_{ij}(t) = 0$ then
- 5: $h_{ij} = \Theta(c_{ij} > y_{ij}(t)), \forall j \in J$
- 6: if $\sum_j x_{ij}(t) \neq 0$ then
- 7: $J_i = \operatorname{argmax}_j h_{ij} \cdot c_{ij}$
- 8: $x_{i,J_i}(t) = 1$
- 9: $y_{i,J_i}(t) = c_{i,J_i}$
- 10: end if
- 11: end if
- 12: end

Рис. 1. Псевдокод алгоритма проведения аукциона

Алгоритм разрешения конфликтов (КА i , итерация t)

- 1: Передать y_i КА k для любого k , где $g_{ik}(\tau) = 1$
- 2: Принять y_k от КА k для любого k , где $g_{ik}(\tau) = 1$
- 3: Процедура UpdTask ($g_i(\tau), y_{k \in \{k | g_{ik}(\tau) = 1\}}(t), J_i$)
- 4: $y_{ij}(t) = \max_k g_{ik}(\tau) \cdot y_{kj}(t), \forall j \in J$
- 5: $z_{i,J_i} = \operatorname{argmax}_k g_{ik}(\tau) \cdot y_{k,J_i}(t)$
- 6: if $z_{i,J_i} \neq i$ then
- 7: $x_{i,J_i}(t) = 0$
- 8: end if
- 9: end

Рис 2. Псевдокод алгоритма разрешения конфликтов

Результаты моделирования. Для подтверждения эффективности предложенного метода децентрализованного распределения задач и его возможности устранять конфликты между КА кластера независимо от несогласованности ИО были проведены численные эксперименты. Количество КА N_A и количество распределяемых целевых задач (ОН) N_T было принято равным 20. ОН считались точечными [3] и равномерно распределенными на участке поверхности Земли размером $W \times W = 200 \times 200$ км. Начальное распределение КА также было принято равномерным. Погрешность ИО Δ_{SA} учитывалась как средняя ошибка в знании местоположения ОН (предполагалось, что КА обладают абсолютно точной информацией о собственном местоположении) и моделировалась аддитивным гауссовым шумом со среднеквадратическим отклонением, которое варьировалось в диапазоне от 2 до 40 км:

$$\bar{\Delta}_{SA} = \frac{1}{\sqrt{2WN_T}} \sqrt{\sum_{i,k:i \neq k}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_T} \|I_{ij} - I_{kj}\|^2}, \quad (3)$$

где I_{ij}, I_{kj} – оценки местоположения ОН J КА i и k соответственно, а символом $\| \cdot \|$ обозначена евклидова норма. Каждый КА вычислял оценку задачи, исходя из собственной оценки местоположения ОН. Информационная сеть формировалась путем генерирования минимального опорного дерева [20], к которому затем добавлялось переменное количество линий связи между КА. Для каждого варианта начальных условий моделирование выполнялось по сто раз, после чего определялись статистические характеристики результатов.

На Рис. 3 представлена зависимость времени получения решения τ от количества задач N_T и погрешности ИО Δ_{SA} . Как и следовало ожидать, время распределения задач зависит только от количества распределяемых задач N_T и практически не зависит от Δ_{SA} .

Для оценки качества распределения задач полученный результат сравнивался с результатами, полученными с применением оптимального алгоритма координации задач [6] при отсутствии погрешностей ИО, и вычислялось среднее значение показателя субоптимальности Δ_{opt} как разность решения задачи (1) и оптимального решения, выраженная в процентах.

Ниже представлена зависимость среднего значения показателя субоптимальности Δ_{opt} от количества задач N_T и погрешности ИО Δ_{SA} (Рис. 4). Видно, что при отсутствии погрешностей ИО результаты предлагаемого метода практически не отличаются от оптимальных (Δ_{opt} не превышает 3%). С ростом Δ_{SA} значение показателя субоптимальности также растет, однако даже при максимальной погрешности ИО его значение не превышает 30%, что можно считать вполне приемлемым результатом.

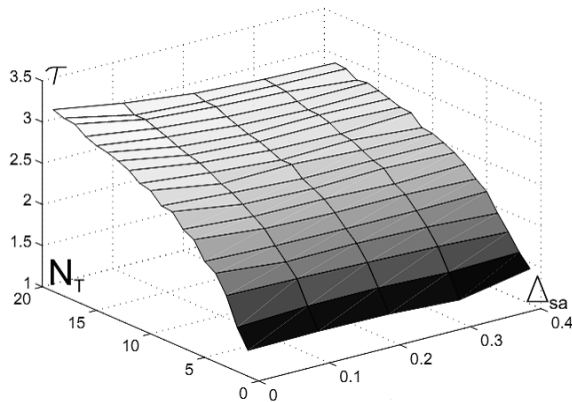


Рис. 3. Зависимость времени получения решения от количества задач и погрешности ИО

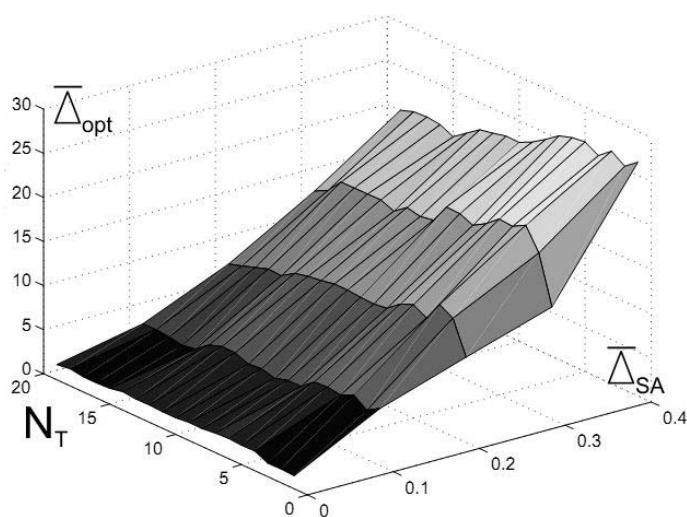


Рис. 4. Зависимость среднего значения показателя субоптимальности от количества задач и погрешности ИО

Выводы. На основе результатов анализа известных методов распределения целевых задач между агентами МАС разработан новый метод децентрализованного распределения задач между КА разреженного кластера, объединивший преимущества проведения аукциона при назначении задач агентам и разрешения возможных конфликтов по принципу консенсуса.

Результаты моделирования показали, что предложенный метод обеспечивает хорошую сходимость и получение приемлемого результата за ограниченное время, что позволит экономно расходовать вычислительные ресурсы бортового компьютера.

Библиографические ссылки

1. Меланченко, А. Г. Целевое управление кластерами космических аппаратов наблюдения Земли [Текст] / А. Г. Меланченко // XXI международная конференция по автоматическому управлению. «Автоматика-2014». НТУУ «КПИ». Материалы конференции. – К., 2014. – С. 158–160.
2. Меланченко, А. Г. Планирование спутниковых съемок в условиях неопределенности [Текст] / А. Г. Меланченко, А. А. Синча // Шестой Белорусский космический конгресс. ОИПИ НАН Беларуси. Материалы конгресса: в 2 т. – Мн., 2014. – Т. 1. – С. 327–330.
3. Меланченко, А. Г. Методические аспекты управления кластерами космических аппаратов наблюдения Земли [Текст] / А. Г. Меланченко // Космическая техника. Ракетное вооружение: сб. науч.-техн. ст. ГП «КБ «Южное». – Д., 2014. – Вып. 2(107). – С. 90–96.
4. Xu, L. Battle management for unmanned aerial vehicles [Text] / L. Xu, U. Ozguner // Proc. of the IEEE Conf. on Decision and Control. – 2003. – P. 27–56.
5. Turra, D. Fast unmanned vehicles task allocation with moving targets [Text] / D. Turra, L. Pollini, M. Innocenti // Proc. of the 43th IEEE Conf. on Decision and Control. – 2004. – P. 103–115.
6. McLain, T. W. Coordination variables, coordination functions, and cooperative-timing missions [Text] / T. W. McLain, R. W. Beard // J. of Guidance, Control, and Dynamics. – 2005. – Vol. 28(1). – P. 150–161.
7. Fax, J. A. Information flow and cooperative control of vehicle formations [Text] / J. A. Fax, R.M. Murray // IEEE Trans. on Automatic Control. – 2004. – Vol. 49(9). – P. 1465–1476.
8. Olfati-Saber, R. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays [Text] / R. Olfati-Saber, R.M. Murray // IEEE Trans. on Automatic Control. – 2004. – Vol. 49(9). – P. 1520–1533.

9. **Moallemi, C. C.** Consensus propagation [Text] / C. C. Moallemi, B. V. Roy // IEEE Trans. on Information Theory. – 2006. – Vol. 52(11). – P. 4753–4766.
10. **Ren, W.** Information consensus in multivehicle control [Text] / W. Ren, R. W. Beard, E. M. Atkins // IEEE Control Systems Magazine. – 2007. – Vol. 27(2). – P. 71–82.
11. **Wu, C. W.** Synchronization and convergence of linear dynamics in random directed networks [Text] / C. W. Wu // IEEE Trans. on Automatic Control. – 2006. – Vol. 51(7). – P. 1207–1210.
12. **Alighanbari, M.** Decentralized task assignment for unmanned aerial vehicles [Text] / M. Alighanbari, J. P. How // Proc. of the 44th IEEE Conf. on Decision and Control. – 2005. – P. 35–42.
13. **Dionne, D.** Multi-UAV Decentralized Task Allocation with Intermittent Communications: the DTC algorithm [Text] / D. Dionne, C. A. Rabbath // Proc. of the American Control Conf. – 2007. – P. 1158–1164.
14. **Dias M. B** Market-based multirobot coordination: A survey and analysis [Text] / M.B Dias, R. Zlot, N. Kalra, A. Stentz // Proc. of the 45th IEEE Conf. on Decision and Control. – 2006. – Vol. 94(7). – P. 1257–1270.
15. **Kwasnica A. M.** A new and improved design for multiobject iterative auctions [Text] / A. M. Kwasnica, J.O. Ledyard, D. Porter, C. DeMartini // Management Science. – 2005. – Vol. 51(3). – P. 419–434.
16. **Atkinson, M. L.** Results Analysis of Using Free Market Auctions to Distribute Control of UAVs [Text] / M.L. Atkinson // AIAA 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference, Workshop and Exhibit. – 2004. – P. 142–153.
17. **Sujit, P. B.** Distributed Sequential Auctions for Multiple UAV Task Allocation [Text] / P.B. Sujit, R. Beard // Proc. of the American Control Conf. – 2007. – P. 101–109.
18. **Bertsekas, D. P.** The auction algorithm for assignment and other network flow problems [Text] / D. P. Bertsekas // J. of Guidance, Control, and Dynamics. – 1989. – Vol. 4(1). – P. 159–172.
19. **Smith, S. L.** Target assignment for robotic networks: Asymptotic performance under limited communication [Text] / S. L. Smith, F. Bullo // Proc. of the American Control Conf. – 2007. – P. 1132–1144.
20. **Wilson, D. B.** Generating random spanning trees more quickly than the cover time [Text] / D. B. Wilson // Proc. of the 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing. – 1996. – P. 121–133.

Надійшла до редколегії 31.05.2015

УДК 519.683

В. И. Усиченко, А. В. Крюков, Д. Г. Грошелев

*Государственное предприятие «Конструкторское бюро “Южное”
имени М. К. Янгеля», г. Днепропетровск*

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОЛКНОВЕНИЙ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ВЫДЕЛЕНИЯ ЭКВИДИСТАНТНЫХ ТОЧЕК НА ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ОРБИТАХ

Показана возможность предвычисления момента встречи находящихся на софокусных эллиптических орбитах тел, исходя из равенства их радиус-векторов в момент встречи. Рассмотрен случай невозмущенного движения.

Ключевые слова: эквидистантная точка, область эквидистантных точек, фазовая кривая, фазовое пространство, истинная аномалия, софокусные орбиты, восходящий участок, нисходящий участок.