

УДК 629.7

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2219-380414201670332>

А. Г. Меланченко¹, начальник отдела, А. А. Синча², инженер

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ ПАКЕТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАДАЧ ДЛЯ РАЗРЕЖЕННОГО КЛАСТЕРА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

En

A problem of decentralized task allocation for sparse cluster of spacecraft is examined. The method of task allocation for sparse cluster which provided one task allocation to one spacecraft was previously proposed. The results demonstrated that the method provided high effectiveness and good convergence of the task allocation process.

In terms of practicality sometimes it is more appropriate to have an opportunity of packet planning. The method in which task allocation is provided by packages for each spacecraft was proposed. Tasks are selected from the prior plan which is formed on the Earth and is transmitted to each spacecraft of the cluster. Proposed method is realized cyclically as two-stage process. At first stage it is formed total package of tasks and conflicts are solved on the second stage in compliance with consensus principle. At the same time the necessity of situational data coordination between cluster spacecraft is absent.

The result of the modeling shows that method which considers cluster as multi-agent system provides good convergence as well as admissible result obtaining for limited time. This approach allows saving of onboard computer resources.

Ua

Розглядається задача децентралізованого розподілення цільових задач для розрідженого кластера космічних апаратів. Запропоновано удосконалений метод розподілення задач, що розглядає такий кластер як мультиагентну систему та забезпечує добру збіжність результатів, а також отримання прийняттого результату за обмежений час. На відмінність від методу, який був розглянутий раніше, в запропонованому методі для кожного космічного апарата формується пакет цільових задач.

¹ Государственное предприятие «Конструкторское бюро “Южное” имени М. К. Янгеля», г. Днепр

² Государственное предприятие «Конструкторское бюро “Южное” имени М. К. Янгеля», г. Днепр

Введение

В статье [1] был предложен субоптимальный метод децентрализованного распределения задач наблюдения Земли для разреженного кластера КА, согласно которому кластер рассматривался как мультиагентная система (МАС). Была показана высокая эффективность и быстрая сходимость процесса распределения задач. Однако метод базировался на допущении, что одному КА может быть назначено не более одной целевой задачи. С практической точки зрения иногда более важно иметь возможность пакетного планирования, когда каждому КА кластера назначается не одна, а несколько целевых задач. Для случая компактного кластера, в котором расстояния между КА малы по сравнению с размерами объектов наблюдения (ОН), решение такой задачи было предложено в работах [2, 3], где кластер может рассматриваться как виртуальный многоэлементный КА, и распределение целевых задач между КА кластера может осуществляться произвольным образом. Для разреженного кластера условия наблюдения одного и того же ОН различными КА могут различаться, что исключает произвольное распределение целевых задач между КА. Для успешного достижения цели, поставленной перед разреженным кластером, необходимо скоординированное пакетное распределение целевых задач между КА.

Из литературы известно достаточно большое количество подходов к созданию МАС, в которых процесс распределения множества целевых задач реализуется по принципу аукциона. В большинстве случаев предлагается последовательное проведение аукционов с выбором одной задачи в результате каждого из них до тех пор, пока не останется задач, требующих распределения [4]. Известны также пакетные подходы к распределению задач целевых задач в МАС [5], предусматривающие группирование задач в пакеты и предоставление агентам возможности подавать на аукцион заявки на получение не отдельных задач, а целых пакетов. Если группируются сходные целевые задачи, пакетные алгоритмы реализуются быстрее последовательных, и даже могут повысить итоговую эффективность распределения. Однако известные пакетные алгоритмы требуют больших вычислительных ресурсов для своей реализации, поскольку предусматривают формирование пакетов из всех возможных комбинаций целевых задач и выбор пакетной заявки-победителя среди всего множества пакетов. В работах [6, 7] показано, что такая задача выбора является *NP*-сложной, и предлагаются эвристические субоптимальные методы ее решения.

В настоящей статье предлагается пакетный метод децентрализованного распределения целевых задач КА в разреженном кластере, который, в отличие от известных подходов, предусматривает формирование единственного пакета задач. Это позволяет сократить вычислительные затраты, а возможность параллельного распределения нескольких задач обеспечи-

вает более быстрое завершение процесса по сравнению с последовательными методами распределения.

Постановка задачи

Будем исходить из того, что известен перечень N_T целевых задач. Необходимо распределить их между N_A КА кластера таким образом, чтобы каждая задача была назначена не более чем одному КА, максимизируя при этом показатель эффективности миссии. Каждому КА может быть назначено не более L_T целевых задач, и процесс распределения задач считается завершенным, как только будет назначено $N_{\min} = \min\{N_T, N_A L_T\}$ задач. Глобальную целевую функцию определим как сумму локальных показателей эффективности, в качестве которых будем использовать функцию оценки всех целевых задач, назначенных конкретному КА. В такой постановке распределение целевых задач в кластере КА задач представляет собой задачу целочисленного программирования следующего вида:

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

при выполнении следующих условий: $\sum_{i=1}^{N_A} x_{ij} \leq L_T, \forall i \in I,$
 $\sum_{j=1}^{N_T} x_{ij} \leq 1, \forall j \in J, \quad \sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_T} x_{ij} = N_{\min} = \min\{N_T, N_A L_T\}, \quad x_{ij} \in \{0, 1\},$
 $\forall (i, j) \in I \times J.$

Указанные условия означают, что каждому КА может быть назначено больше задач, чем L_T , каждая задача может быть назначена только одному КА, а распределение задач прекращается, когда будут распределены все задачи, либо каждому КА будет назначено количество задач, равное L_T .

Двоичная переменная решения x_{ij}, x_i – вектор, j -м элементом которого является переменная x_{ij} , $I = \{1, \dots, N_A\}, J = \{1, \dots, N_T\}$ – индексные множества. Вектор $p_i \in (J \cup \{\emptyset\})^{L_T}$ представляет собой упорядоченную последовательность целевых задач для КА i , и соответствует маршруту, вдоль которого выполняется наблюдение. Элемент p_k этого вектора равен $j \in J$, если КА i назначено выполнение целевой задачи j в точке k маршрута, и \emptyset (будем обозначать так «пустую» задачу), если этому КА назначено выполнение менее k задач. Оператор суммирования в скобках соответствует локальному эффекту выполнения целевых задач для КА i . Предполагается, что функция оценки удовлетворяет условию $c_{ij}(x_i, p_i) \geq 0$ и может представлять собой любую неотрицательную функцию либо рас-

пределения x_i , либо маршрута p_i , но не обоих векторов. Применительно к рассматриваемой задаче наблюдения Земли с помощью разреженного кластера КА функция оценки может быть интерпретирована как эффект, зависящий от маршрута конкретного КА: длина маршрута (количество отснятых ОН), ценность снимка ОН для потребителя, убывающая со временем, и т.п.

Концепция децентрализованного пакетного распределения задач с проведением аукциона по принципу консенсуса

В отличие от известных подходов, предусматривающих формирование пакетов целевых задач с последующим проведением аукциона по выбору пакета-победителя, предлагаемый метод предусматривает проведение аукционов на уровне отдельных целевых задач до включения их в пакет. Задачи выбираются из априорного плана [2], который формируется на Земле и передается на борт каждого КА кластера. Как и в [1], предлагаемый метод децентрализованного пакетного распределения задач (ДПА) реализуется циклически в виде двухэтапного процесса: формирование единого пакета целевых задач по результатам аукционов на первом этапе с последующим разрешением конфликтов по принципу консенсуса.

Для формирования пакета каждый КА поддерживает два перечня целевых задач: пакетный b_i и маршрутный p_i . В первом перечне целевые задачи упорядочены по времени их включения в b_i , а во втором – по положению соответствующих ОН на маршруте. Количество элементов обоих векторов не может превышать L_T . Обозначим $S_i^{p_i}$ суммарный эффект, который обеспечит КА i при выполнении всех целевых задач на маршруте p_i . При добавлении задачи j к перечню b_i предельная оценка этого перечня изменяется следующим образом:

$$c_{ij}[b_i] = \begin{cases} 0, & j \in b_i \\ \max_{n \leq |p_i|} S_i^{p_i \oplus_n \{j\}} - S_i^{p_i}, & j \notin b_i \end{cases}, \quad (2)$$

где символом $|\cdot|$ обозначено количество элементов перечня, а символом \oplus_n – оператор вставки второго перечня непосредственно после элемента n первого перечня. Иными словами, схема определения эффекта в предлагаемом методе выбрана таким образом, чтобы новая задача добавлялась в пакет в том месте, где она даст максимальное приращение полезного эффекта, и величина эффекта становится новым значением предельной оценки перечня задач, ассоциированного с маршрутом p_i . Если же задача j была включена в маршрут p_i ранее, она не изменяет значение его предельной оценки. Кроме того, будем полагать функцию (2) неотрицательной.

1: Процедура *GenPack* ($z_i(t-1)$), $y_i(t-1)$, $b_i(t-1)$)
 2: $y_i(t) = y_i(t-1)$
 3: $z_i(t) = z_i(t-1)$
 4: $b_i(t) = b_i(t-1)$
 5: $p_i(t) = p_i(t-1)$
 6: **while** $|b_i| < L_T$ **do**
 7: $c_{ij} = \max_{n \leq |p_i|} S_i^{p_i \oplus_n \{j\}} - S_i^{p_i}, \forall j \in J \setminus b_i$
 8: $h_{ij} = \Theta(c_{ij} > y_{ij}(t)), \forall j \in J$
 9: $J_i = \arg \max_j h_{ij} \cdot c_{ij}$
 10: $n_i, J_i = \arg \max_n S_i^{p_i \oplus_n \{J_i\}}$
 11: $b_i = b_i \oplus_{and} \{J_i\}$
 12: $p_i = p_i \oplus_{n_i, J_i} \{J_i\}$
 13: $y_{i, J_i}(t) = c_{i, J_i}$
 14: $z_{i, J_i}(t) = i$
 15: **end do**
 16: **end**

Рис. 1. Алгоритм формирования пакета (КА i , итерация t)

Вначале суммарный эффект $S_i^\emptyset = 0$, а перечни пакета и маршрута обновляются рекурсивно в соответствии со следующей процедурой:

$$b_i = b_i \oplus_{and} \{J_i\}, p_i = p_i \oplus_{n_i, J_i} \{J_i\}, \quad (3)$$

где $J_i = \arg \max_j (c_{ij} [b_i] \times h_{ij})$, $n_i, J_i = \arg \max_n S_i^{p_i \oplus_n \{J_i\}}$, $h_{ij} = \Theta(c_{ij} > y_{ij})$,

где $\Theta(\cdot)$ – индикаторная функция, имеющая значение логической единицы для истинного аргумента и логического нуля – для ложного. Процедура (3) выполняется до тех пор, пока либо $|b_i| = L_T$, либо $h_i = 0$. Отметим также, что из (3) следует, что для данного пакета может существовать только один маршрут; обратное утверждение несправедливо. Псевдокод итерации t алгоритма ДПА для КА i представлен на рис. 1.

Каждый КА хранит и обновляет в процессе формирования пакета четыре вектора: вектор $y_i \in R_+^{N_T}$ – перечень заявок-победителей аукциона, вектор $z_i \in I^{N_T}$ – перечень КА-победителей аукциона, вектор

$b_i \in (J \cup \{\emptyset\})^{L_T}$ – пакет целевых задач, и вектор $p_i \in (J \cup \{\emptyset\})^{L_T}$ – маршрут, соответствующий пакету b_i .

После того, как пакеты целевых задач каждого КА кластера будут сформированы, начинается этап разрешения возможных конфликтов по принципу консенсуса. Как было отмечено выше, КА добавляют задачи в свои пакеты с учетом уже включенных в них задач. Если один из КА кластера узнает, что по задаче, включенной им в свой пакет, другой КА заявил лучшие условия, первый КА исключает данную задачу из своего пакета (будем называть эту задачу снятой); при этом значения предельной оценки задач, добавленных в пакет после снятой задачи, становятся недостоверными. Поэтому первый КА должен исключить из своего пакета все задачи, включенные в него после снятой задачи. В противном случае все последующие решения КА по формированию пакета будут базироваться на некорректных оценках, что может привести к неэффективной работе кластера в целом.

Для эффективного разрешения конфликтов предлагается осуществлять между КА кластера обмен тремя векторами. Два из них – перечень заявок-победителей аукциона $y_i \in R_+^{N_T}$ и $z_i \in I^{N_T}$ – перечень КА-победителей аукциона, были описаны выше. Третий вектор – $s_i \in R^{N_A}$ – содержит время последнего обновления информации от каждого из остальных КА кластера. При получении КА каждого i сообщения от КА k в этот вектор добавляется элемент

$$s_{ik} = \begin{cases} \tau_r, & g_{ik}=1 \\ \max_{m: g_{im}=1} s_{mk}, & g_{ik} \neq 1 \end{cases}$$

где τ_r – время приема указанного сообщения. Для определения КА кластера, информация которого по каждой целевой задаче является наиболее актуальной, используются вектора z_i и s_i . По результатам их анализа КА i может принять одно из трех решений относительно целевой задачи j :

- 1) *обновить*: $y_{ij} = y_{kj}, z_{ij} = z_{kj}$;
- 2) *очистить*: $y_{ij} = 0, z_{ij} = \emptyset$;
- 3) *оставить*: $y_{ij} = y_{ij}, z_{ij} = z_{ij}$.

Правила принятия этих решений обобщены в табл. 1.

Остановимся теперь более подробно на методике определения оценки целевой задачи. Одним из важных допущений при формировании оценки является то, что оценка задачи j не изменяет оценки задач, включенных в пакет до нее:

$$c_{ij}[b_i] \geq c_{ij}[b_i \oplus_{end} b] \quad (4)$$

для любых b_i, b, j таких, что $((b_i \oplus_{and} b) \oplus_{end} \{j\}) \in (J \cup \{\emptyset\})^{L_T}$, где \emptyset , как и ранее, обозначает «пустую» задачу. Будем называть функцию оценки, удовлетворяющую условию (4), функцией убывающей предельной оценки (УПО). С учетом определения предельной оценки задачи j (2) условие (4) можно преобразовать через выражение итогового эффекта:

$$\max_{n \leq |p_i|} S_i^{p_i \oplus_n \{j\}} - S_i^{p_i} \geq \max_{n \leq |p_i|+1, m \leq |p_i|} \max S_i^{(p_i \oplus_m \{k\}) \oplus_n \{j\}} - \max_{m \leq |p_i|} S_i^{p_i \oplus_m \{k\}}$$

для любых p_i, j, k таких, что $((p_i \oplus_m \{k\}) \oplus \{j\}) \in (J \cup \{\emptyset\})^{L_T}$.

Условию (4) удовлетворяют многие функции оценки, применяемые в задачах поиска целей и исследования окружающей среды с использованием мобильных роботов. При использовании функции УПО всегда справедливо соотношение

$$y_{i, b_n} \geq y_{i, b_m}, \text{ если } n \leq m,$$

где b_{ik} – целевая задача k в пакете задач КА i , поскольку

$$y_{i, b_n} = \max_j c_{ij} [b_i^{1:n-1}] \geq \max_j c_{ij} [b_i^{1:n-1} \oplus_{end} b_i^{n:m-1}], b_i^{k:l} = \{b_{ik}, \dots, b_{il}\}.$$

Другими словами, значение оценки y целевой задачи, находящейся вблизи начала пакета, не может быть меньше оценки задачи, находящейся вблизи его конца.

Для учета убывания оценки задачи с течением времени определим суммарный эффект, который обеспечит КА i при выполнении всех целевых задач на маршруте p_i :

$$S_i^{p_i} = \sum \lambda_j^{\tau_i^j(p_i)} \bar{c}_j, \quad (5)$$

где $\lambda_j < 1$ – коэффициент снижения оценки целевой задачи j , $\tau_i^j(p_i)$ – расчетное время достижения КА i района выполнения задачи j при движении по маршруту p_i , а \bar{c}_j – базовая (априорная) оценка эффекта, получаемого при выполнении задачи j . Убывание оценки задачи с течением времени позволяет моделировать процессы наблюдения Земли, в которых возрастание неопределенности во времени (например, степень закрытия конкретного ОН облаками) снижает эффективность наблюдения объектов, или ценность снимков снижается, если они выполнены позже заданного времени. При этом справедливо следующее соотношение, описывающее местоположение целевых задач на маршруте p_i :

$$\tau_i^j(p_i \oplus_n \{k\}) \geq \tau_i^j(p_i), \forall n, \forall k.$$

Другими словами, если КА отрабатывает более длинный маршрут, он попадет в точку выполнения каждой целевой задачи позднее, чем при отработке более короткого маршрута, что приведет к снижению оценок задач в первом варианте. Отметим также, что суммарный эффект (5) удовле-

Розділ 3. Керування

творяет определению функции УПО, если априорная оценка эффекта, получаемого при выполнении каждой целевой задачи, представляет собой неотрицательную константу, что представляется вполне очевидным.

Таблица 1.

Правила принятия решений

Отправитель (КА k) считает, что победитель (z_{ik}) – это	Получатель (КА i) считает, что победитель (z_{ij}) – это	Решение получателя (КА i)
Он сам	Он сам	Если $y_{kj} > y_{ij}$ – обновить
	КА k	обновить
	КА $m \notin \{i, k\}$	Если $s_{km} > s_{im}$ или $y_{kj} > y_{ij}$ – обновить
	Победителя нет	обновить
КА i	Он сам	оставить
	КА k	очистить
	КА $m \notin \{i, k\}$	Если $s_{km} > s_{im}$ – очистить
	Победителя нет	оставить
КА $m \notin \{i, k\}$	Он сам	Если $s_{km} > s_{im}$ и $y_{kj} > y_{ij}$ – обновить
	КА k	Если $s_{km} > s_{im}$ – обновить, иначе – очистить
	КА m	Если $s_{km} > s_{im}$ – обновить
	КА $n \notin \{i, k, m\}$	Если $s_{km} > s_{im}$ и $s_{kn} > s_{in}$ – обновить, Если $s_{km} > s_{im}$ и $y_{kj} > y_{ij}$ – обновить, Если $s_{kn} > s_{in}$ и $s_{im} > s_{km}$ – очистить
	Победителя нет	Если $s_{km} > s_{im}$ – обновить
Победителя нет	Он сам	оставить
	КА k	обновить
	КА $m \notin \{i, k\}$	Если $s_{km} > s_{im}$ – обновить
	Победителя нет	оставить

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 15, а количество задач в пакете L_T варьировалось в диапазоне от 1 до 4. 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 $\bar{\Delta}_{SA}$ 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 км до 40 км:

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

где I_{ij}, I_{kj} – оценки местоположения ОН j , используемые 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, 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. 2 представлена зависимость количества итераций t ДПА, необходимого для получения решения, от количества задач в пакете L_T и количества КА в кластере N_A , принятого равным количеству распределяемых целевых задач (ОН) N_T . Как и следовало ожидать, время распределения задач зависит только от N_T , а увеличение L_T немного ускоряет процесс распределения (поскольку в пакетном режиме распределения за одну итерацию ДПА может быть назначено несколько задач). Также моделирование подтвердило, что несогласованность ИО практически не влияет на быстродействие ДПА, которое во всех случаях существенно превышало быстродействие оптимального алгоритма координации задач [6].

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

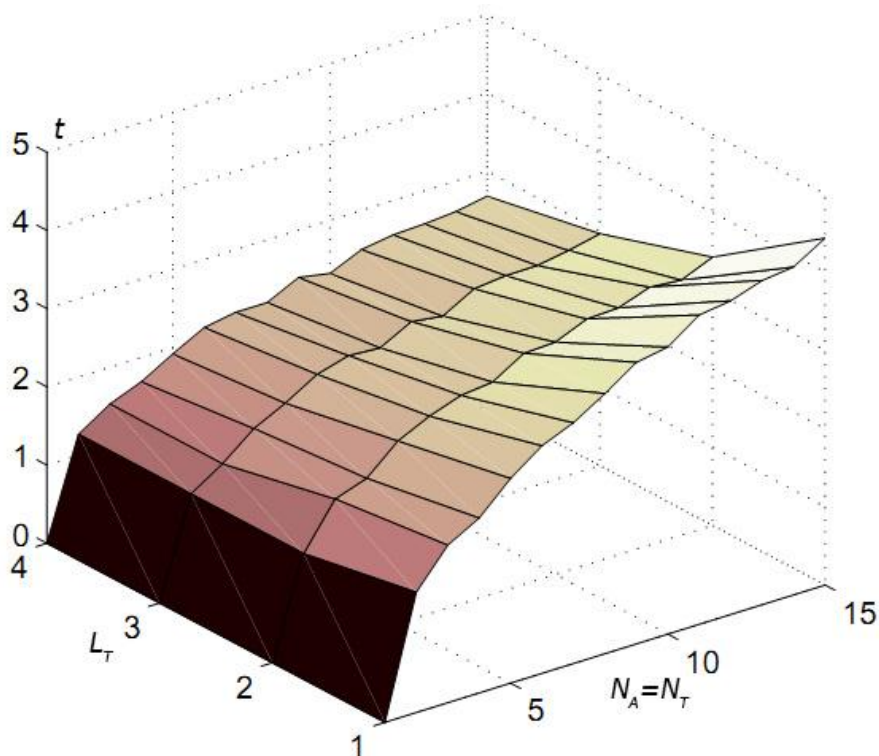


Рис. 2. Быстродействие пакетного метода распределения задач

На рис. 3 представлена зависимость среднего значения показателя субоптимальности $\bar{\Delta}_{opt}$ от количества задач в пакете L_T и погрешности ИО $\bar{\Delta}_{SA}$. Количество КА в кластере N_A также было принято равным количеству распределяемых целевых задач N_T (моделирование показало, что в этом случае значение $\bar{\Delta}_{opt}$ максимально). Видно, что при отсутствии погрешностей ИО результаты предлагаемого метода практически не отличаются от оптимальных ($\bar{\Delta}_{opt}$ не превышает 3%).

С ростом $\bar{\Delta}_{SA}$ значение показателя субоптимальности также растет, однако даже при максимальной погрешности ИО его значение не превышает 25%, что можно считать вполне приемлемым результатом. Кроме того, с ростом L_T наблюдается также некоторое возрастание $\bar{\Delta}_{opt}$, особенно при больших $\bar{\Delta}_{SA}$, что, по-видимому, обусловлено накоплением влияния некорректных оценок задач при их пакетном распределении на эффективность итогового решения.

Выводы

На основе результатов анализа известных методов распределения целевых задач между агентами МАС разработан новый метод пакетного децентрализованного распределения задач между КА разреженного кла-

стера, который является обобщением полученных ранее результатов для случая назначения одному КА нескольких целевых задач, актуального с точки зрения практики наблюдения Земли из космоса, и объединяет преимущества проведения аукциона при назначении задач и разрешения возможных конфликтов по принципу консенсуса.

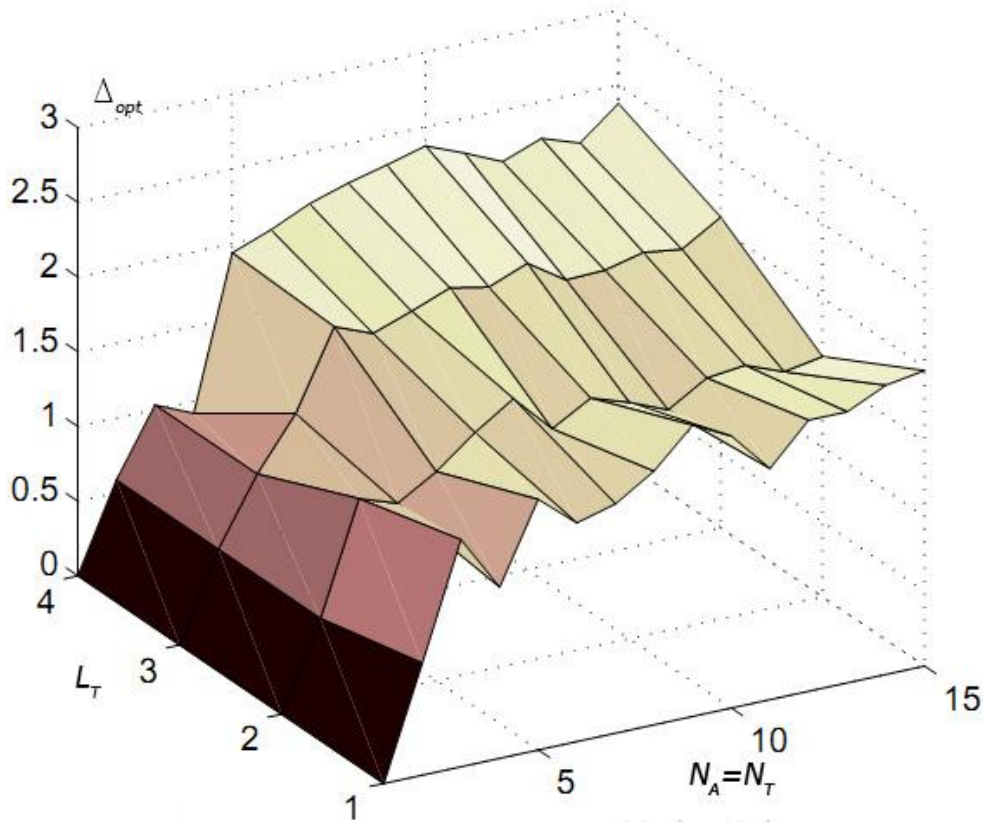


Рис. 3. Качество распределения задач при использовании пакетного метода

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

В дальнейшем планируется дополнить предложенный метод с целью использования его при распределении целевых задач между КА гетерогенного кластера.

Список использованной литературы

1. Меланченко А. Г. Децентрализованное распределение задач наблюдения Земли для разреженного кластера низкоорбитальных КА [Текст] / А. Г. Меланченко, А. А. Синча // Вестник Днепропетровского университета. Серия «Ракетно-космическая техника». – Д., 2015. – Вып. 19. – Т. 1. – С. 149–156.

2. *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.
3. *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.
4. *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.
5. *de Vries S.* Combinatorial auctions: A survey [Text] / S. de Vries, R. Vohra // IN-FORMS Journal of Computing. – 2003. – Vol. 15(3). – P. 284–309.
6. *Sandholm T.* Algorithm for optimal winner determination in combinatorial auctions [Text] / T. Sandholm // Artificial Intelligence. – 2002. – Vol. 135(1-2). – P. 1–54.
7. *Mito M.* On heuristics for solving winner determination problem in combinatorial auctions [Text] / M. Mito, S. Fujita // Journal of Heuristics. – 2004. – Vol. 10(5). – P. 507–523.