Технология энергосберегающих функционально-распределённых вычислений в кластере микроспутников дистанционного зондирования Земли

А. Г. Басыров, А. В. Калюжный, В. В. Широбоков

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского
Санкт-Петербург, 197198, Россия
E-mail: aleksei.kalyuzhnyi@yandex.ru

В статье рассматривается кластер микроспутников дистанционного зондирования с выделенным «космическим аппаратом-сервером», выполняющим автономное планирование работы кластера. Перенос выполнения ряда задач по планированию функционирования кластера и предварительной обработке целевой информации на борт микроспутника требует увеличенной производительности его бортовой вычислительной системы, а следовательно, приводит к повышению расхода бортового энергоресурса. В статье рассмотрен подход к организации энергосберегающих информационных процессов на основе технологий функционально-распределённых вычислений в перспективном кластере микроспутников с одним или несколькими выделенными космическими аппаратами, снабжёнными высокопроизводительной бортовой вычислительной системой. Предложена модель функционально-распределённых вычислений, учитывающая энерго-временные затраты на сбор и обработку данных в зависимости от моментов времени передачи информации от микроспутников на выделенный космический аппарат-сервер, объёма этой информации, директивного времени выдачи результатов бортовой обработки на наземный комплекс управления. Поставлена оптимизационная задача планирования энергосберегающей функционально-распределённой обработки информации. Раскрыта общая методика организации функционально-распределённых информационных процессов и показаны возможности экономии энергоресурса источников питания микроспутника, что обеспечивает продление срока активного существования кластера и его готовности. Для анализа эффективности организации энергосберегающей обработки функционально-распределённых вычислений в орбитальной группировке микроспутников проведено имитационное моделирование обработки данных и решения задачи планирования применения целевой аппаратуры микроспутника в кластере, результаты которого представлены в статье.

Ключевые слова: функционально-распределённые вычисления, кластер микроспутников, бортовая вычислительная система, энергосберегающая обработка информации

Одобрена к печати: 21.02.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-65-74

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется исследованию технологий создания и применения многоспутниковых орбитальных группировок (ОГ) — кластеров дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на базе микроспутников (МС). Под кластером МС понимается совокупность МС различного назначения, которые решают общую задачу и воспринимаются потребителем как единое целое («виртуальный» космический аппарат (КА)). Кластеры МС имеют ряд особенностей:

1) в существующих ОГ отсутствует непосредственная связь между КА или же эта связь опосредована наземным комплексом управления (НКУ) или КА-ретранслятором;
2) баллистическое построение кластера должно определять пространственное положение орбиты МС таким образом, чтобы все МС кластера находились в относительной близости друг от друга, обеспечивающей информационный обмен между ними.

Объединение МС в орбитальные группировки (кластеры) позволяет существенно улучшить их технические возможности, повысить автономность, производительность и живучесть.

Технология кластерного построения орбитальных структур находится в активной разработке (Foster et al., 2008; Fraire et al., 2017). В статье рассмотрен вариант кластера МС типа «фрагментированный космический аппарат», где кластер МС можно рассматривать как распределённую систему, в которой решение информационно-вычислительных задач разделено между МС (Лупян и др., 2015). Этот подход, реализуемый в распределённых вычислительных системах, повышает эффективность целевого применения кластера МС (Басыров и др., 2015). Выделив в кластере один или несколько МС, обладающих мощной бортовой вычислительной системой, можно организовать распределённую обработку информации по технологии «облачных вычислений» (Лупян и др., 2004). При этом большая часть аппаратуры МС будет выполнять основную целевую функцию кластера — дистанционное зондирование Земли.

Актуальная проблема применения кластеров МС ДЗЗ — повышение автономности управления кластером за счёт переноса связанных с этим задач на борт одного из МС. Среди множества преимуществ такого подхода следует выделить возможность оптимизации сбора и обработки кластером информации на основе планирования его задействования в конкретных условиях обстановки.

Концепция энергосберегающих функционально-распределённых вычислений в кластере микроспутников

Перспективы развития космических средств обусловлены требованиями переноса части задач, решаемых наземным комплексом управления, на бортовой комплекс управления КА. Это позволит существенно сократить объём передаваемых данных с борта КА на наземный комплекс приёма, обработки и распространения информации (НКПОР), что обеспечит рост до 40 % информативности наблюдений, а также увеличение оперативности получения данных с 5–8 ч до реального масштаба времени.

Расширение масштабов использования кластеров МС влечёт за собой необходимость повышения автономности их функционирования. Увеличение числа МС в кластере приводит к перегрузке системы управления КА, а также необходимости обработки больших объёмов целевой информации. Таким образом, суммарный эффект от применения МС с одновременным увеличением их числа в кластере без использования новейших технологий управления и информационных систем может оказаться не всегда оправданным.

Обеспечение связи МС на низких орбитах с наземным комплексом управления (НКУ) является трудной задачей, так как на МС нельзя установить мощное приёмопередающее оборудование. Поэтому обработку всего массива данных целесообразно производить на выделенном МС кластера, а затем результат обработки передавать на НКПОР.

Основные преимущества автономного планирования на борту МС предопределяются возможностями использования более точных данных о координатах и фактическом состоянии ресурсов МС. Также появляется возможность планирования на борту дополнительной съёмки в проактивном режиме, если по результатам бортовой обработки полученных данных обнаружено низкое качество материала (Карсаев, 2016). Это обеспечивает существенное повышение эффективности целевого функционирования кластера за счёт использования таких возможностей, как распределение или перераспределение целей наблюдения между МС и планирование операций с учётом текущего фактического состояния МС, оперативной коррекции планов операций при появлении новых задач в результате обработки полученных результатов наблюдений и других дополнительных возможностей (Блинов и др., 2010).

Перенос решения ряда задач с НКУ и НКПОР на бортовой комплекс управления приводит к тому, что возникает необходимость увеличения производительности бортовой вычислительной системы (БВС) МС. Наращивание ресурсов БВС МС вступает в противоречие с ограничениями по массе КА, энергозатратам на обработку и передачу данных, требованиями по надёжности, предъявляемыми к бортовой аппаратуре (Araniti et al., 2015). Также следует отметить, что наращиваемые ресурсы БВС, как правило, не используются в полной мере, а востребованы на относительно коротких промежутках времени работы по целевому назначению МС.

Решением данного противоречия является подход, в основу которого положены две технологии. Во-первых, технология консолидации информационно-вычислительных ресурсов на выделенном МС-сервере (МС-С) кластера (Широбоков и др., 2015). Во-вторых, технология распределения задач между МС целевого назначения (ДЗЗ) и МС, осуществляющим обработку информации и передачу её на Землю. Предлагаемый подход даёт возможность минимизировать требования к аппаратно-программным ресурсам МС-клиента (МС-К), выполняющим роль сенсоров (приёмников информации ДЗЗ), благодаря переносу части информационно-вычислительной нагрузки на один или несколько МС-С, выступающих в данном случае в роли центра обработки данных.

Предполагается, что на борту МС-С будет проводиться предварительная обработка информации, собранной с МС-К, заключающаяся в отбраковке некачественных снимков и, возможно, распознавании заданных объектов. Это существенно сократит информационный трафик с НКПОР. Современные и перспективные средства обеспечения межспутникового радиоканала позволяют реализовать распределённый сбор информации.

Перемещение большей части функций обработки данных на высокопроизводительный и надёжный МС-С позволяет, с одной стороны, рационально расходовать дорогой энергоресурс МС-К, затрачиваемый на работу бортового компьютера, а с другой — минимизировать аппаратное обеспечение МС-К, повысив тем самым его надёжность и сократив требуемый энергоресурс.

В настоящее время разрабатываются средства обработки информации, например, на базе микропроцессора космического применения 5890ВМ1Т (разработчик — Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук) или на нейронных процессорах, которые могут использоваться в качестве БВС на МС-К.

Путями экономии энергоресурса бортовой системы электропитания являются:

- на МС-К: задействование для съёмки и передачи полученных данных от целевой аппаратуры только тех МС-К, информация с которых может быть принята и обработана МС-С за заданное время;
- в БВС МС-С: использование для обработки информации минимально необходимого количества вычислительных модулей БВС и минимизации времени их простоя в нагруженном состоянии.

Использованием нескольких МС-С достигается резервируемость системы и сохраняется функциональность при потере одного или нескольких серверов. При появлении новых микроспутников в кластере МС-С в автоматическом режиме производят настройку каналов для предоставления им необходимых ресурсов.

Сервер МС-С управляет информационными процессами кластера на основе плана распределённой обработки информации, выдавая команды на включение целевой аппаратуры МС-К и передачу информации от них. Поступающая от МС-К информация передаётся на БВС МС-С для дальнейшей обработки в соответствии с планом, который формируется на МС-С в зависимости от текущего состояния и положения МС-К, а также директив, поступающих с наземного контура управления.

Таким образом, необходимо «внешнее» планирование, определяющее порядок функционирования МС-К, и «внутреннее» планирование вычислений в БВС МС-С.

«Внешнее» планирование — определение подмножества МС-К, подлежащих задействованию в работе, состоит в формировании и выдаче управляющих воздействий на включение целевой аппаратуры на основе «внутреннего» планирования, например, для начала съёмки земной поверхности. При этом учитывается текущее положение МС-К, состояние его аппаратуры, ценность (важность) информации, которую он может предоставить.

«Внутреннее» планирование — поиск наилучшей упорядоченности для выполняемых заданий в БВС МС-С по обработке полученной информации с МС-К, удовлетворяющей заданному критерию, который определяется требованиями к оперативности, производительности и ресурсоёмкости функционирования кластера.

Эти процессы планирования должны быть согласованы, чтобы обеспечить выполнение поставленной задачи и рациональное использование ограниченного энергоресурса МС

(Iacopino et al., 2015). При этом существенен учёт ограничений на время обработки целевой информации, превышение которого над директивным временем может привести к потере данных или резкому снижению их ценности (Davis, 2015). Учитывая «внешний» и «внутренний» план, можно управлять рабочей вычислительной нагрузкой БВС МС-С, ограничивая её входной поток и, следовательно, непродуктивное функционирование МС-К, а значит, и расход энергоресурса части МС-К, информация от которых не сможет быть обработана к директивному сроку.

Вопросы ограничения энергоресурса микроспутников имеют существенное значение. Поэтому в разработанной концепции предполагается экономия энергоресурса на основе планирования возможностей бортового вычислителя МС-С обрабатывать определённый объём собранных МС-К данных. План задействования МС-К в проведении ДЗЗ конкретного района определяет, какие МС-К задействуются и какой объём информации от них требуется передать на МС-С с учётом ограничений на время обработки собранных данных и возможности бортовых источников питания МС-С. Этим облегчается работа МС-К и экономится энергоресурс как МС-К, так и МС-С.

Постановка задачи энергосберегающих функционально-распределённых вычислений

Кластер состоит из нескольких микроспутников (МС-К), имеющих на борту аппаратуру наблюдения и средства межспутникового обмена данными, а также микроспутника (МС-С), оснащённого бортовой вычислительной системой, средствами межспутникового обмена данными и средствами обмена информацией с НКПОР. На МС-С возлагается функция планирования автономной работы кластера, предварительной тематической обработки данных ДЗЗ (анализ пригодности данных или их отбраковка в случае покрытия района наблюдения облачностью), полученных от МС-К, управления МС-К и информационного обмена с НКПОР. МС-К решают задачу непосредственного наблюдения за заданными наземными объектами и передачи данных ДЗЗ на МС-К.

Работа сложной функционально-распределённой вычислительной сети невозможна без системы управления, основной задачей которой является планирование используемых ресурсов и временных затрат.

Содержательная постановка задачи заключается в выборе из кластера на заданном интервале планирования подгруппы МС-К, которые должны участвовать в наблюдении заданных участков поверхности Земли для достижения максимальной суммарной важности их снимков при ограничениях на время наблюдения и энергоресурс бортовых источников питания МС-К (Широбоков, Басыров, 2017).

Математическая постановка задачи может быть сформулирована следующим образом.

Дано:

M — количество МС-К в кластере.

$G = \{g_k\}$, $k = 1, ..., K$ — множество участков поверхности Земли, которые запланированы для наблюдения; $g_k = w_k^{\text{у}}, s_k^{\text{д}}, t_k^{\text{д}}, t_k^{\text{н}}, t_k^{\text{о}}, \xi_k$, где $w_k^{\text{у}}$ — показатель важности информации о k-м участке; $s_k^{\text{д}}$ — площадь участка, подлежащего наблюдению; $t_k^{\text{д}}$ — директивное время выдачи обработанной информации о k-м участке на НКПОР; $t_k^{\text{н}}$, $t_k^{\text{о}}$ — моменты времени входа и выхода кластера МС в(из) зоны для наблюдения k-го участка; ξ_k — вид съёмки кластером МС (1 — кадровая съёмка, 2 — площадная, 3 — маршрутная, 4 — стереоскопическая).

T — период планирования наблюдения (обусловлен длительностью освещённого участка орбиты), который объединяет все интервалы $T_k = \left[t_k^{\text{н}}, t_k^{\text{о}}\right]$, $k = 1, ..., K$, $T_k \in T$.

$\delta(T_k) = \{\delta_1(T_k), \delta_2(T_k), ..., \delta_M(T_k)\}$ — множество, характеризующее каждый i-й МС-К на интервале T_k вектором параметров:

$$\delta_i(T_k) = \left\langle s_i(T_k), d_i(T_k), e_i(T_k), \sigma_i(T_k) \right\rangle, \tag{1}$$

где $s_i(T_k)$ — площадь поверхности k-го участка, наблюдаемая i-м МС-К, в пределах подлежащей съёмке площади $s_k^{д}$, $i = 1, ..., M$; $d_i(T_k)$ — расстояние (среднее) между i-м МС-К и МС-С; $e_i(T_k)$ — запас энергоресурса i-го МС-К к началу интервала T_k; $\sigma_i(T_k)$ — состояние i-го МС-К к началу интервала T_k; $W(T_k) = \{w_i(T_k)\}$ — множество значений важности данных наблюдения кластером МС.

$\Theta = \langle N, \varphi, \varepsilon_{м}, E(T_k) \rangle$ — характеристики БВС МС-С, где N — количество вычислительных модулей (ВМ); φ — производительность одного ВМ; $\varepsilon_{м}$ — потребляемая одним ВМ БВС мощность; $E(T_k)$ — запас энергоресурса для БВС МС-С к началу интервала T_k.

Найти: на заданном временном периоде T планирования множество управляющих воздействий $U^*(T)$ МС-С на МС-К кластера такое, что:

$$U^*(T) = \underset{U^* \in U^{доп}}{\arg\max} \left(\sum_{k=1}^{K} \sum_{i=1}^{M} u_i(T_k) \cdot w_i(T_k) \right), \tag{2}$$

где $w_i(T_k)$ — значение показателя важности данных наблюдения i-м МС-К на интервале T_k;

$$U(T) = U(T_1), U(T_2), \ldots, U(T_K) = \begin{vmatrix} u_1(T_1) & \cdots & u_M(T_K) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_K(T_1) & \cdots & u_M(T_K) \end{vmatrix},$$

где $u_i(T_j)$ — управляющее воздействие — указание на задействование i-го МС-К на интервале T_j; $u_i(T_j) \in \{0,1\}$.

Ограничения:

1) на время информационных процессов:

$$u_i(T_k) \cdot \max_i \left(t_i^{ос}(T_k) + \tau_{ik}^{п}(v_{ik}, d_{ik}) \right) + \tau_k^{обр}\left(\Psi(T_k) \right) \leqslant t_k^{д}; \tag{3}$$

2) на расход энергоресурса на интервале T_k i-го МС-К:

$$u_i(T_k) \cdot \left(\varepsilon_s \tau_{ik}^{н} + \varepsilon_p \tau_{ik}^{п} \right) \leqslant e_i(T_k), \quad i \in (1, \ldots, M); \tag{4}$$

3) на расход энергоресурса на интервале T_k МС-С:

$$\varepsilon^{pr}\left(\tau_{ik}^{п}(T_k) \right) + E^{ob}\left(\Psi(T_k) \right) \leqslant E(T_k). \tag{5}$$

Учитывая, что планирование функционально-распределённой обработки информации производится в режиме реального времени на борту МС-С, для решения сформулированной выше задачи целесообразно применить алгоритмы приближённого планирования, дающие результат, близкий к оптимальному, за приемлемое время.

Результаты имитационного моделирования функционально-распределённой обработки информации в кластере микроспутников

Для анализа эффективности энергосберегающей функционально-распределённой обработки информации в кластере МС ДЗЗ в соответствии с предложенным подходом (Широбоков, Нечай, 2017) было проведено имитационное моделирование обработки целевой информации МС-К в БВС МС-С и решения задачи планирования работы целевой аппаратуры МС-К в кластере ДЗЗ (Лупян и др., 2018).

При моделировании функционирования ОГ МС проводились расчёты:

- важности информации, которую может получить каждый МС в результате съёмки с учётом координат МС и требуемого района наблюдения;
- оперативности наблюдения с учётом длительности съёмки, времени межспутникового обмена, а также длительности обработки всех данных, полученных от МС-К;
- энергоресурса, затраченного на работу бортовой аппаратуры МС-К и МС-С при функционально-распределённой обработки данных;

- параметров для синтеза плана параллельного вычислительного процесса в БВС МС-С с учётом моментов времени поступления информации от МС-К и её важности.

При моделировании было введено предположение об использовании на борту МС-К аппаратуры ДЗЗ с характеристиками, достаточными для решения задачи наблюдения с заданным качеством.

Моделирование энергосберегающей обработки данных на БВС МС-С и планирования работы целевой аппаратуры МС-К в кластере включало: моделирование процесса съёмки заданного количества объектов наблюдения, процесса передачи информации между МС-К и МС-С с учётом баллистического построения, имитацию процесса обработки данных на МС-С, а также процессов расхода и пополнения энергоресурсов бортовой системы электроснабжения. Для каждого интервала планирования производилась проверка работоспособности бортовых систем и оценивалась возможность проведения наблюдения заданного района.

При моделировании функционально-распределённой обработки информации в качестве исходных данных задавались: количество МС-К в кластере; количество объектов наблюдения и их параметры; время на подготовку бортовой системы электроснабжения МС-К к работе (время заряда аккумуляторных батарей). На основе датчиков случайных чисел генерировались: время передачи информации между МС-К и МС-С с учётом баллистического построения кластера; матрица возможных интервалов наблюдения запланированных участков для съёмки; количество МС-К, информация с которых может быть обработана в БВС МС-С к заданному директивному сроку (Городецкий, 2016).

При моделировании в качестве потенциальных вариантов бортовых вычислительных систем (БВС) для применения на МС-С рассматривались БВС на базе микропроцессоров с потребляемой мощностью до 10 Вт.

Поскольку автономное планирование обработки информации возлагается на бортовые средства МС-С, управляющая информация для наблюдения целей может поступать от любого НКУ напрямую или пересылаться через КА-ретранслятор. Аналогично полагается, что результат выполнения обработки данных также может доставляться напрямую или через КА-ретранслятор на НКПОР, который должен передать результаты заказчику. Директивное время выдачи результата рассчитывается на НКУ на основе баллистических параметров ОГ МС, расположения запланированных целей, зон радиовидимости НКУ и НКПОР, а также взаимного расположения КА-ретранслятора и МС-С.

Исходные данные для моделирования

Общее количество МС-К в группировке	5–30
Количество МС-С в группировке	1
Количество участков наблюдения	2–20
Количество вычислительных модулей в БВС МС-С	10
Период обращения кластера МС	1,5 ч
Время на пополнение энергоресурса аккумулятора МС, интервал наблюдения	2–6 ч

При моделировании обработки информации случайным образом генерировалось количество объектов наблюдения и их параметры, время наблюдения и передачи информации между МС-К и МС-С с учётом баллистического построения, а также остаточный энергоресурс бортовой системы электроснабжения на период планирования. На шаге планирования энергосберегающей обработки данных на МС-К применялся алгоритм планирования энергосберегающей параллельной обработки информации с учётом информационной важности и времени поступления задач (Широбоков, Нечай, 2017).

Показателем качества моделируемых процессов в кластере МС был выбран коэффициент $\Delta = (\theta_n - \theta)/\theta_n = 1 - \theta/\theta_n$, характеризующий относительный прирост производительности θ_n наблюдения при использовании предлагаемого подхода по сравнению с производительностью θ_n наблюдения при традиционном подходе. Оценка производительности наблюдения

при традиционном подходе проводилась на основе задействования всех МС, а также всех вычислительных модулей на период планирования с использованием известных алгоритмов.

При моделировании процессов оценивались зависимости относительного прироста производительности наблюдения Δ от количества МС-К в кластере и количества участков наблюдения на одном периоде планирования применения кластера МС.

На *рис. 1* и *2* приведена статистика испытаний, полученная по результатам имитационного моделирования кластера МС с применением и без применения изложенного подхода для всего периода планирования при одинаковых исходных данных. При этом планировалось задействование МС-К в зависимости от заданных требований. Сравнение проводилось с вариантом использования всех МС-К в кластере (традиционный подход), энергетические характеристики которых удовлетворяли заданным ограничениям.

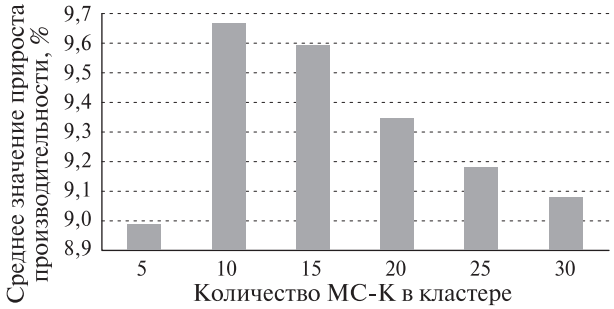

Рис. 1. Зависимость прироста производительности наблюдения кластера от количества МС-К

Рис. 2. Зависимость прироста производительности кластера от количества участков наблюдения на одном периоде планирования

Относительный прирост в производительности наблюдения, зависящий от количества МС-К в кластере, представлен на *рис. 1*. Анализ результатов моделирования показал, что среднее значение относительного прироста в производительности наблюдения при использовании предлагаемого подхода достигает максимума при ОГ, состоящей из 10–15 МС-К. Данная особенность обусловлена тем, что для повышения производительности наблюдения с увеличением количества МС-К в кластере необходимо резко увеличивать и производительность БВС МС-К.

Зависимость относительного прироста в производительности наблюдения кластером МС от количества участков наблюдения на одном периоде планирования применения кластера представлен на *рис. 2*. Анализ результатов моделирования показал, что среднее значение относительного прироста в производительности наблюдения при использовании предлагаемого подхода повышается на 8–13 % с увеличением количества участков наблюдения за планируемый период применения кластера МС.

Эффект достигается экономией ресурсов МС-К и МС-С, обусловленной тем, что задействоваться для съёмки и передачи данных на МС-С за планируемый период будут только те МС-К, информацию с которых возможно принять и обработать к директивному сроку выдачи результата на НКПОР.

Применение предлагаемого подхода позволяет организовать ресурсосберегающую обработку информации в кластере МС, обеспечивающую увеличение производительности функционирования кластера МС ДЗЗ.

Заключение

Анализ результатов имитационного моделирования показал, что прирост в производительности кластера МС ДЗЗ при применении разработанного подхода достигает 50 % в зависимости от ограничений на время обработки данных ДЗЗ (количества обработанных заданий).

Применение предложенного подхода также позволяет повысить среднее время наработки на отказ бортовой аппаратуры каждого МС до 6 %.

Использованные подходы приближённого планирования для решения оптимизационной задачи организации энергосберегающей функционально-распределённой обработки информации позволяют расширить границы применимости предложенных решений и перенести выполнение соответствующих программ на борт МС-С. Погрешность планирования по результатам имитационного моделирования не превышает 7 %. Оценка качества плана производилась сравнением полученного плана с оптимальным. Допустимая размерность задачи планирования (количество МС-К и интенсивность передаваемых ими данных на обработку в МС-С) зависит от применяемых компьютерных средств и ограничений на требуемую оперативность планирования.

При используемых исходных данных для моделирования задача может быть решена бортовыми вычислительными системами МС.

Литература

1. *Басыров А. Г.*, *Дудкин А. С.*, *Широбоков В. В.* Организация распределённой обработки информации в динамически изменяющейся вычислительной среде // Тр. Военно-косм. акад. им. А. Ф. Можайского. СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2015. № 649. С. 64–71.
2. *Блинов В. Н.*, *Иванов Н. Н.*, *Сеченов Ю. Н.* Малые космические аппараты: справоч. пособие. В 3 кн. Омск: ОмГТУ, 2010.
3. *Городецкий В. И.* Управление коллективным поведением роботов в автономной миссии // Робототехника и техн. кибернетика. 2016. № 1(10). С. 40–54.
4. *Карсаев О. В.* Обзор традиционных и инновационных систем планирования миссий КА // Тр. СПИИРАН. 2016. № 5(48). С. 151–181.
5. *Лупян Е. А.*, *Мазуров А. А.*, *Назиров Р. Р.*, *Прошин А. А.*, *Флитман Е. В.* Технология построения автоматизированных информационных систем сбора, обработки, хранения и распространения спутниковых данных для решения научных и прикладных задач // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Вып. 1. С. 81–89.
6. *Лупян Е. А.*, *Балашов И. В.*, *Бурцев М. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Кашницкий А. В.*, *Кобец Д. А.*, *Крашенинникова Ю. С.*, *Мазуров А. А.*, *Назиров Р. Р.*, *Прошин А. А.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.*, *Флитман Е. В.* Создание технологий построения информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 53–75.
7. *Лупян Е. А.*, *Бурцев М. А.*, *Прошин А. А.*, *Кобец Д. А.* Развитие подходов к построению информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 53–58.
8. *Широбоков В. В.*, *Басыров А. Г.* Методика функционально-распределенной обработки информации в перспективных кластерах микроспутников дистанционного зондирования Земли // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 4. С. 62–70.
9. *Широбоков В. В.*, *Нечай А. А.* Алгоритм планирования энергосберегающей параллельной обработки информации с учетом информационной важности и времени поступления задач // Вестн. Российского нового ун-та. Сер. «Сложные системы: модели, анализ и управление». 2017. № 1. С. 86–91.
10. *Широбоков В. В.*, *Басыров А. Г.*, *Швецов А. С.*, *Шушаков А. О.* Модель распределенной обработки информации в условиях воздействия дестабилизирующих факторов на информационно-телекоммуникационную систему // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. С. 215.
11. *Araniti G.*, *Bezirgiannidis N.*, *Birrane E.*, *Bisio I.*, *Burleigh S.*, *Caini C.*, *Feldmann M.*, *Marchese M.*, *Segui J.*, *Suzuki K.* Contact Graph Routing in DTN Space Networks: Overview, Enhance-ments and Performance // IEEE Communication Magazine. 2015. V. 53(3). P. 38–46.
12. *Davis T. M.* Operationally Responsive Space — The Way Forward // Proc. AIAA/USU Conf. Small Satellites. 2015. SSC15. P. 7–49.
13. *Foster I.*, *Zhao Y.*, *Raicu I.*, *Lu S.* Cloud computing and grid computing 360-degree compared // Grid Computing Environments Workshop: Proc. 2008. P. 1–10.
14. *Fraire J. A.*, *Madoery P.*, *Burleigh S.*, *Feldmann M.*, *Finochietto J.*, *Charif A.*, *Zergainoh N.*, *Velazco R.* Assessing Contact Graph Routing Performance and Reliability in Distributed Satellite Constellations // J. Computer Networks and Communications. 2017. V. 2017. Article ID 2830542. P. 1–18.

15. *Iacopino C.*, *Harrison S.*, *Brewer A.* Mission Planning Systems for Commercial Small-Sat Earth Observation Constellations // Proc. 9th Intern. Workshop on Planning and Scheduling for Space (IWPSS). 2015. P. 45–52.

Technology of energy-saving functional distributed computing in a cluster of Earth remote sensing microsatellites

A. G. Basyrov, A. V. Kalyuzhnyy, V. V. Shirobokov

Mozhaisky Military Space Academy, *Saint Petersburg 197198*, *Russia*
E-mail: aleksei.kalyuzhnyi@yandex.ru

The paper discusses a cluster of remote sensing microsatellites with a dedicated "spacecraft server" that performs autonomous cluster operation planning. The transfer of a number of tasks related to planning the functioning of a cluster and pre-processing target information on board a microsatellite requires an increased performance of its on-board computing system, and, consequently, leads to an increase in on-board energy resource consumption. The paper discusses the approach to the organization of energy-saving information processes based on the technology of functionally distributed computing in a promising cluster of microsatellites with one or more dedicated spacecraft equipped with a high-performance onboard computing system. A model of functionally distributed computing is proposed, taking into account the energy-time costs of collecting and processing information depending on the time of transmission of information from microsatellites to a dedicated spacecraft-server, the amount of this information, the directive time of issuing results of onboard processing to a ground control complex. The optimization task of planning energy-saving functionally distributed information processing has been set. The general method of organizing functionally-distributed information processes is disclosed, and the possibilities of saving energy resources of microsatellite power sources are shown, which ensures the extension of the active life of the cluster and its readiness. To analyze the efficiency of the organization of energy-saving functionally distributed computing in the orbital grouping of microsatellites, simulation modeling was performed and the results of data processing and solving the problem of planning the use of the microsatellite target equipment in a cluster were presented.

Keywords: functionally distributed computing, microsatellite cluster, on-board computer system, energy-saving information processing

Accepted: 21.02.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-65-74

References

1. Basyrov A. G., Dudkin A. S., Shirobokov V. V., Organizatsiya raspredelennoi obrabotki informatsii v dinamicheski izmenyayushcheisya vychislitel'noi srede (Organization of distributed information processing in a dynamically changing computing environment), *Trudy Voenno-kosmicheskoi akademii imeni A. F. Mozhaiskogo*, Saint Petersburg: A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 2015, No. 649, pp. 64–71.
2. Blinov V. N., Ivanov N. N., Sechenov Yu. N., *Malye kosmicheskie apparaty*, *v 3 knigakh* (Small spacecraft, 3 books), Omsk: OmGTU, 2010.
3. Gorodetskiy V. I., Upravlenie kollektivnym povedeniem robotov v avtonomnoi missii (Managing the collective behavior of robots in an autonomous mission), *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, 2016, No. 1(10), pp. 40–54.
4. Karsaev O. V., Obzor traditsionnykh i innovatsionnykh sistem planirovaniya missii KA (Overview of traditional and innovative planning systems for missions of spacecraft), *Trudy SPIIRAN*, 2016, No. 5(48), pp. 151–181.
5. Loupian E. A., Mazurov A. A., Nazirov R. R., Proshin A. A., Flitman E. V., Tekhnologiya postroeniya avtomatizirovannykh informatsionnykh sistem sbora, obrabotki, khraneniya i rasprostraneniya sputnikovykh dannykh dlya resheniya nauchnykh i prikladnykh zadach (The technology of building automated information

systems for collecting, processing, storing and distributing satellite data to solve scientific and applied data tasks), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2004, No. 1, pp. 81–89.

6. Loupian E. A., Balashov I. V., Burtsev M. A., Efremov V. Yu., Kashnitsky A. V., Kobets D. A., Krasheninnikova Yu. S., Mazurov A. A., Nazirov R. R., Proshin A. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I.A., Flitman E. V., Sozdanie tekhnologii postroeniya informatsionnykh sistem distantsionnogo monitoringa (Development of information systems design technologies), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 53–75.
7. Loupian E. A., Burtsev M. A., Proshin A. A., Kobets D. A., Razvitie podkhodov k postroeniyu informatsionnykh sistem distantsionnogo monitoringa (Evolution of remote monitoring information systems development concepts), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, No. 3, pp. 53–58.
8. Shirobokov V. V., Basyrov A. G., Metodika funktsional'no-raspredelennoi obrabotki informatsii v perspektivnykh klasterakh mikrosputnikov distantsionnogo zondirovaniya Zemli (Methods of functionally distributed information processing in promising clusters of microsatellites for remote sensing of the Earth), *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli*, 2017, Vol. 9, No. 4, pp. 62–70.
9. Shirobokov V. V., Nechay A. A., Algoritm planirovaniya energosberegayushchei parallel'noi obrabotki informatsii s uchetom informatsionnoi vazhnosti i vremeni postupleniya zadach (The planning algorithm for energy-saving parallel processing of information, taking into account the importance of information and the time of receipt of tasks), *Vestnik Rossiiskogo novogo universiteta. Ser. "Slozhnye sistemy: modeli*, *analiz i upravlenie"*, 2017, No. 1, pp. 86–91.
10. Shirobokov V. V., Basyrov A. G., Shvetsov A. S., Shushakov A. O., Model' raspredelennoi obrabotki informatsii v usloviyakh vozdeistviya destabiliziruyushchikh faktorov na informatsionno-telekommunikatsionnuyu sistemu (Model of distributed information processing under the influence of destabilizing factors on the information and telecommunication system), *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, No. 2, p. 215.
11. Araniti G., Bezirgiannidis N., Birrane E., Bisio I., Burleigh S., Caini C., Feldmann M., Marchese M., Segui J., Suzuki K., Contact Graph Routing in DTN Space Networks: Overview, Enhancements and Performance, *IEEE Communication Magazine*, 2015, Vol. 53(3), pp. 38–46.
12. Davis T. M., Operationally Responsive Space — The Way Forward, *Proc. AIAA/USU Conf. Small Satellites*, 2015, SSC15, pp. 7–49.
13. Foster I., Zhao Y., Raicu I., Lu S., Cloud computing and grid computing 360-degree compared, *Grid Computing Environments Workshop*, Proc., 2008, pp. 1–10.
14. Fraire J. A., Madoery P., Burleigh S., Feldmann M., Finochietto J., Charif A., Zergainoh N., Velazco R., Assessing Contact Graph Routing Performance and Reliability in Distributed Satellite Constellations, *J. Computer Networks and Communications*, 2017, Vol. 2017, Article ID 2830542, pp. 1–18.
15. Iacopino C., Harrison S., Brewer A., Mission Planning Systems for Commercial Small-Sat Earth Observation Constellations, *Proc. 9th Intern. Workshop on Planning and Scheduling for Space* (*IWPSS*), 2015, pp. 45–52.