

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОАГЕНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ МНОГОСПУТНИКОВЫХ ОРБИТАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

А.Е. Привалов, В.В. Федяев, П.Ю. Бугайченко (Санкт-Петербург)

Введение

В настоящее время существенно повысились требования потребителей к информационной эффективности дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые продиктованы необходимостью обслуживания территориально разветвленной структуры многочисленных абонентов, заинтересованных в использовании информации в масштабе времени, близком к реальному. Вместе с тем, недостатком применения современных средств ДЗЗ является низкая оперативность получения информации [1]. Как показано в [2], самым эффективным способом (при условии своевременной обработки информации на пункте приема информации) является увеличение количества космических аппаратов (КА) в составе орбитальной группировки (ОГ). В настоящее время наметилась тенденция к созданию космических систем, включающих группировку КА большой размерности и широкую сеть территориально распределенных пунктов передачи (ППИ) и приема информации (ППРИ) [3, 4]. Для внедрения многоспутниковых ОГ ДЗЗ необходимо решить ряд задач [5], наиболее значимыми в контексте данного доклада являются: структурно-параметрический синтез ОГ ДЗЗ, обоснование алгоритмов автономного управления ОГ ДЗЗ, оценивание и повышение эффективности применения ОГ ДЗЗ, обоснования состава и размещения ППИ и приема информации ППРИ, а также ряд других. Одним из наиболее эффективных средств способов обоснования решений данных проблем является имитационное моделирование. Разработкой имитационных моделей ОГ ДЗЗ в настоящее время занимается ряд научных школ, среди которых следует отметить исследования самарского коллектива [6, 7, 8], а также Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН [9, 10]. Результаты проведенных авторами исследований развивают предлагаемую ими идею применения многоагентного подхода к разработке имитационной модели ОГ ДЗЗ с учетом случайного расположения ППИ и ППРИ, а также районов наблюдения.

Постановка задачи разработки имитационной модели

Основным свойством, определяющим эффективность применения ОГ ДЗЗ, является актуальность предоставляемой информации.

В качестве показателя актуальности информации предлагается рассматривать вероятность получения информации об объекте наблюдения за требуемое время (т.е. время, в течение которого информация может быть использована по назначению).

Целью разработки имитационной модели является оценивание влияния на актуальность представляемой информации следующих факторов: состав и орбитальная структура ОГ ДЗЗ, характеристики бортовой оптико-электронной аппаратуры и каналов связи; характеристики районов наблюдения; характеристики пунктов приема и передачи информации.

Исходя из вышесказанного, можно осуществить математическую постановку задачи.

Дано:

1. Совокупность базисных векторов:

$$Basis = \langle T, R, P, C, E, A, \Gamma, K, U \rangle.$$

Здесь T – непрерывное множество моментов времени ($T \in [0, \infty)$);

R – непрерывное множество расстояний ($R \in [0, \infty)$);

P – множество вероятностей ($P \in [0, 1]$);

C – множество КА;

E – множество районов наблюдения;

A – абсолютная геоцентрическая экваториальная система координат (АГЭСК)

$$A = (X, Y, Z \mid X, Y, Z \in R);$$

Γ – система географических координат:

$$\Gamma = (\lambda, \varphi),$$

где λ – множество долгот ($\lambda \in [0^\circ, 360^\circ]$); φ – множество широт ($\varphi \in [-90^\circ, 90^\circ]$);

K – кеплеровские элементы орбиты

$$K = (\Omega, i, \omega, p, e, \tau),$$

где Ω – прямое восхождение восходящего узла орбиты ($\Omega \in [0^\circ, 360^\circ]$);

i – наклонение орбиты ($i \in [0^\circ, 180^\circ]$);

ω – аргумент широты перигея орбиты ($\omega \in [0^\circ, 360^\circ]$);

p – большая полуось орбиты ($p \in R$);

e – эксцентриситет орбиты ($e \in [0, 1]$);

τ – время прохождения КА перигея орбиты ($\tau \in T$);

U – характеристики бортовой оптико-электронной целевой аппаратуры (БЦА)

$$U = (\varepsilon, v, \alpha, q_C, q_E),$$

ε – угол полураствора БЦА;

v – объём кадра;

α – максимальный угол отклонения от надира;

q_C – пропускная способность межспутникового канала связи;

q_E – пропускная способность канала связи с ППИ и ППрИ.

2. Модель ОГ ДЗЗ:

$$Constellation = \langle \psi_K, \psi_U \rangle,$$

где ψ_K – отображение, ставящее в соответствие каждому КА его параметры орбиты

$$\psi_K: C \rightarrow K;$$

ψ_U – отображение, ставящее в соответствие каждому КА характеристики его БЦА

$$\psi_U: C \rightarrow U.$$

3. Модель информационного обеспечения:

$$Task = \langle S, \mu, \eta, \xi, \rho \rangle,$$

где S – множество временных интервалов, для которых информация является актуальной:

$$S = \{\langle t_1, t_2 \rangle \mid t_1 < t_2\}, S \subset T \times T;$$

μ – отображение, ставящее в соответствие каждому району наблюдения E вероятностную меру μ_i множества S , характеризующую случайный временной интервал актуальности информации в заданном районе наблюдения:

$$\mu : E \times S \rightarrow P, \mu_i(S) = 1, \quad i = \overline{1, |E|};$$

η – отображение, ставящее в соответствие каждому району наблюдения E вероятностную меру η_i множества Γ , характеризующую случайные координаты района наблюдения:

$$\eta : E \times \Gamma \rightarrow P, \eta_i(\Gamma) = 1, \quad i = \overline{1, |E|};$$

ρ – отображение, ставящее в соответствие каждому району наблюдения E вероятностную меру ρ_i множества Γ , характеризующую случайные координаты ППрИс ОГ:

$$\rho : E \times \Gamma \rightarrow P, \rho_i(\Gamma) = 1, \quad i = \overline{1, |E|}.$$

Разработать модель χ для определения времени выполнения задач орбитальной группировкой $T_N = \chi(\text{Constellation}, \text{Task})$,

где $T_N = \{t_N \mid t_N \in T\}$ – множество моментов времени выполнения задач наблюдения, эквивалентное множеству задач наблюдения.

Определить вероятность P_a передачи на ППрИ актуальной информации:

$$P_a = P(t_N \in s \mid t_N \in T_N, s \in S).$$

Структура многоагентной имитационной модели

Для выбора концепции моделирования ОГ ДЗЗ проведем ее анализ как объекта системных исследований [11]. С точки зрения системного подхода ОГ ДЗЗ представляет собой неоднородную сложную динамическую систему, функционирование которой имеет различные аспекты:

1. Механический аспект функционирования ОГ ДЗЗ, связанный с описанием перемещения КА в пространстве, характеризуется моделями с непрерывным множеством состояний и непрерывным временем.

2. Аппаратурный аспект – работа целевой аппаратуры при выполнении задач наблюдения – характеризуется дискретными моделями.

3. Аспект информационного взаимодействия связан с наличием и динамикой изменения характеристик каналов связи внутри ОГ и с внешней средой и характеризуется нелинейными динамическими моделями. Модели передачи информации можно рассматривать как модели функционирования приемо-передающих систем, и отнести к аппаратурному аспекту.

Для построения модели ОГ ДЗЗ необходимо дополнить ее моделью среды функционирования, которая также может рассматриваться с точки зрения механического (перемещение объектов среды в пространстве), аппаратурного (работа аппаратуры ППИ и ППрИ) и информационного (каналы связи с ОГ) аспектов.

Кроме того, функционирование ОГ ДЗЗ является целенаправленным процессом, следовательно, при его моделировании необходимо учесть аспект управления ОГ. Традиционно управление ОГ является характеристикой внешней среды [11]. Однако, исходя из современных тенденций в области управления многоспутниковыми ОГ, а также требованиями обеспечения живучести в условиях вооруженного противоборства, в рамках работы выбрано децентрализованное коллективное управление ОГ ДЗЗ [12], являющееся аспектом функционирования ОГ ДЗЗ. Многочисленные исследования

[13, 14] показали эффективность применения многоагентного подхода для моделирования децентрализованных технических систем.

Таким образом, разработка предлагаемой имитационной модели базируется на принципах многоподходного моделирования. В основу архитектуры модели (рисунок 1) положен многоагентный подход, в основу моделей агентов – динамические модели с непрерывными и дискретными состояниями.

Имитационная модель ОГ ДЗЗ описывается кортежем:

$$M = \langle \Sigma, Ag_C, Ag_\delta, Ag_{CC}, Ag_{C\rho}, Ag_{\xi C} \rangle,$$

где Σ – модель среды функционирования агентов;

Ag_C – множество моделей агентов – космических аппаратов;

Ag_δ – множество моделей агентов задач;

Ag_{CC} – множество моделей агентов – линий межспутниковой связи;

$Ag_{C\rho}$ – множество моделей агентов – линий связи с ППрИ;

$Ag_{\xi C}$ – множество моделей агентов – линий связи с ППИ.

Все агенты функционируют в среде Σ , которая представляет собой трехмерное пространство, задаваемое АГЭСК (A).

В среде находятся следующие объекты:

1. Земля, поверхность которой определяется системой географических координат Γ , движущейся в АГЭСК по закону σ_1 [15]:

$$\sigma_1 : T \times \Gamma \rightarrow A.$$

2. Солнце, определяющееся ввиду его большой удаленности (относительно других расстояний модели) точкой в пространстве A , двигающейся по закону σ_2 [15]:

$$\sigma_2 : T \rightarrow A.$$

Взаимное расположение Земли и Солнца в пространстве определяют множество координат $\Gamma_{Sun} \subset \Gamma$ освещенной области земной поверхности, определяемых функцией σ_3 [15]:

$$\sigma_3 : T \times \sigma_2 \rightarrow \Gamma_{Sun} \subset \Gamma.$$

3. Район (районы) наблюдения, модели которых представляют собой реализацию двумерных случайных величин Γ_η – географических координат района наблюдения и S – временного интервала актуальности информации по соответствующим законам распределения:

$$\begin{cases} \sigma_4 : \mu \rightarrow s \in S, \\ \sigma_5 : \eta \rightarrow \Gamma_\eta \in \Gamma. \end{cases}$$

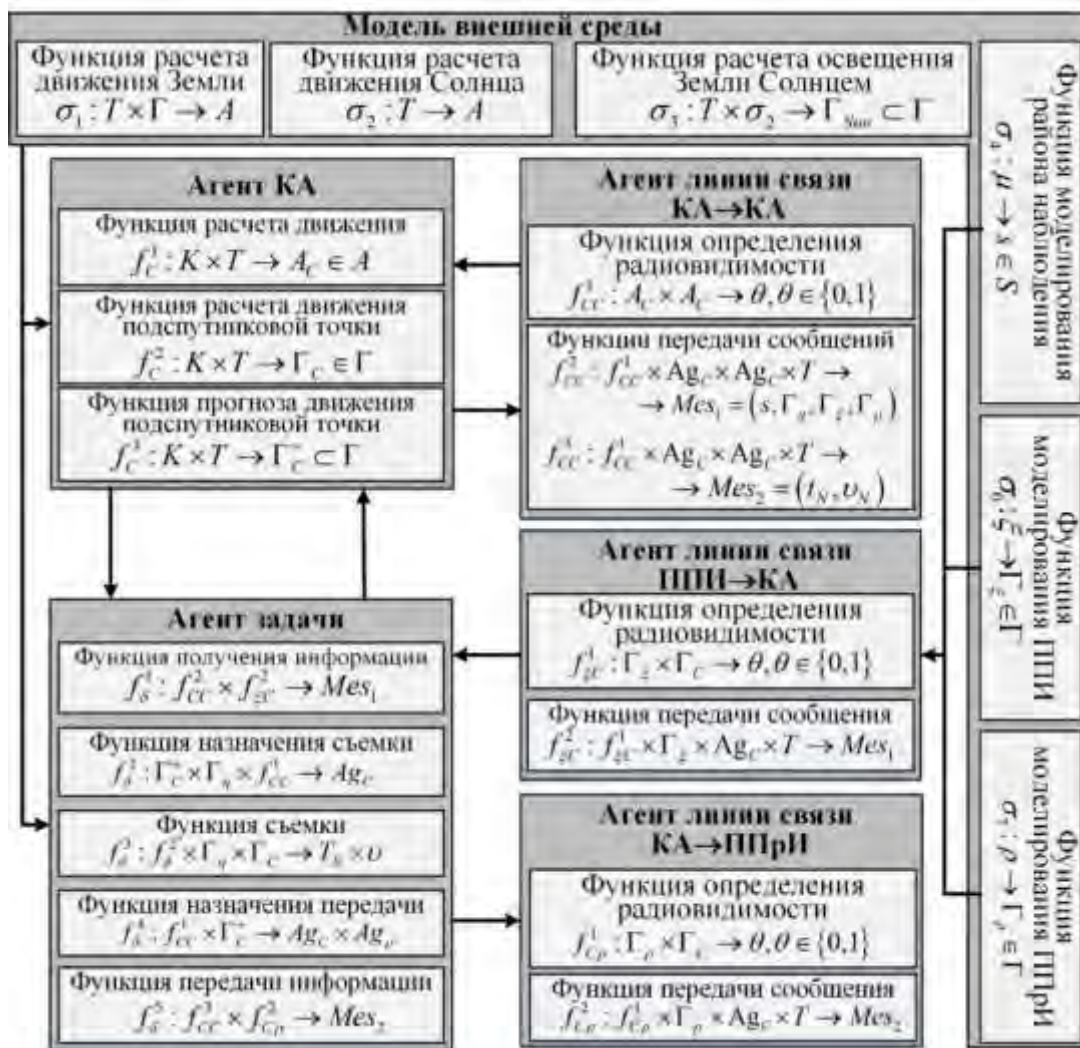


Рис.1 – Архитектура многоагентной модели ОГ ДЗЗ

4. ППИ и ППРИ, оснащённые современными приемо-передающими комплексами [16], могут быть как стационарными, так и мобильными. Следовательно, их модели представляют собой реализацию случайных географических координат Γ_ξ и Γ_ρ ППИ и ППРИ соответственно:

$$\begin{cases} \sigma_6 : \xi \rightarrow \Gamma_\xi \in \Gamma, \\ \sigma_7 : \rho \rightarrow \Gamma_\rho \in \Gamma. \end{cases}$$

Множество агентов – $KA Ag_C$ представляет совокупность динамических моделей движения центра масс f_C^1 и спутниковых точек f_C^2 в системах координат A и Γ соответственно, а также функций прогноза движения спутниковых точек КА f_C^3 .

Примечание: поскольку в статье отсутствует операция возведения в степень, надстрочный символ используется в качестве индекса.

В имитационной модели введены три типа агентов – линии связи:

1. Множество агентов линии межспутниковой связи (Ag_{CC}) образуют динамическую сеть передачи данных. Линия межспутниковой связи выполняет следующие функции:

– функцию определения наличия связи:

$$f_{CC}^1 : A_C \times A_C \rightarrow \theta, \theta \in \{0, 1\},$$

где θ – индикатор наличия или отсутствия связи, A_C – множество координат центра масс КА;

– функцию передачи вектора исходных данных задачи:

$$f_{CC}^2 : f_{CC}^1 \times Ag_C \times Ag_C \times T \rightarrow Mes_1,$$

где – $Mes_1 = (s, \Gamma_\eta, \Gamma_\xi, \Gamma_\rho)$ – вектор исходных данных задачи, передается по линиям межспутниковой связи в случае необходимости передать задачу на другой КА;

– функцию передачи вектора результатов выполнения задачи:

$$f_{CC}^3 : f_{CC}^1 \times Ag_C \times Ag_C \times T \rightarrow Mes_2,$$

где – $Mes_2 = (t_N, v_N)$ – вектор результатов выполнения задачи – передается по линиям межспутниковой связи к КА, ближайшему к ППрИ, и включает в себя время наблюдения t_N и результат наблюдения v_N .

2. Множество агентов – линии связи ППИ с КА ($Ag_{\xi C}$). Линия связи выполняет функции определения наличия связи $f_{\xi C}^1$ и передачи исходных данных для наблюдения $f_{\xi C}^2$ в формате Mes_1 , которые определяются аналогично Ag_{CC} .

3. Множество агентов – линии связи КА с ППрИ ($Ag_{C\rho}$). Линия связи выполняет функцию определения наличия связи $f_{C\rho}^1$ и передачи результатов наблюдения $f_{C\rho}^2$ в формате Mes_2 .

Множество агентов – задач Ag_δ выполняют следующие функции:

1. Получение информации о задаче в формате Mes_1 (функция f_δ^1).

2. Функция назначения съемки f_δ^2 , которая определяет агент - КА, для которого длительность выполнения задачи наблюдения района минимальна. Исходя из выбора стратегии децентрализованного управления, назначение КА на выполнение заявки осуществляется методом голосования с космическими аппаратами, находящимися в зоне радиовидимости (т.е. для которых $f_{CC}^1 = 1$). Задача наблюдения назначается космическому аппарату, который быстрее всего достигнет района наблюдения. Голосование осуществляется итерационно, пока заявка «по цепочке» линий межспутниковой связи не будет передана ближайшему к району наблюдения космическому аппарату.

3. Функция съемки района наблюдения f_δ^3 при достижении назначенным функцией f_δ^2 космическим аппаратом района наблюдения формирует результат наблюдения – время наблюдения $t_N \in T_N$ и объем кадра $v_N \in v$.

4. Функция назначения передачи f_δ^4 определяет ближайший к ППрИ агент - КА, координаты которого Γ_ρ указаны в исходных данных Mes_1 задачи. Функция (аналогично с f_δ^2) использует метод голосования между космическими аппаратами, находящимися на связи. Для расчета времени передачи информации на ППрИ используется прогноз движения подспутниковой точки Γ_C^+ .

5. Функция передачи информации f_δ^5 осуществляет передачу результатов наблюдений в формате Mes_2 . Передача осуществляется либо на другой КА, если он находится ближе к ППрИ, либо непосредственно на ППрИ.

Разработанная структура отличается расширенным множеством типов агентов, что позволяет существенно упростить алгоритмизацию каждого агента и реализовать стратегию децентрализованного коллективного управления.

Алгоритм функционирования имитационной модели

Алгоритм функционирования имитационной модели при отработке одной задачи наблюдения выполнен в форме UML-диаграммы деятельности [17] (рисунок 2). Диаграмма разбита на следующие разделы:

1. Внешняя среда (ППИ) – действия ППИ по формированию и хранению задачи.

2. ППИ→КА – действия агента – линии связи $Ag_{\xi c}$;
3. Задача – действия агента – задачи Ag_{δ} ;
4. КА→КА – действия агента – линии межспутниковой связи Ag_{cc} ;
5. КА→ППри – действия агента – линии связи $Ag_{c\rho}$;
6. Внешняя среда (ППри) – действия ПППри по приему результатов выполнения заявки.

Агент – космический аппарат Ag_c выполняет функции расчета и прогнозирования параметров орбитального движения, информация о которых используется для решения целевых задач. Эти функции выполняются непрерывно в фоновом режиме, поэтому, в целях упрощения восприятия, они на диаграмме не приводятся.

Реализация имитационной модели в среде AnyLogic

Имитационная модель реализована в среде имитационного моделирования AnyLogic. Выбор данной платформы обусловлен поддержкой многоподходного моделирования, а также развитыми средствами разработки многоагентных моделей [18]. Разработанная модель выполняет следующие функции:

1. ввод исходных данных, указанных в постановке задачи;
2. 3D-визуализация моделируемого процесса (рисунок 3);
3. привязка временной шкалы моделируемого процесса к реальному движению планет Солнечной системы;
4. анализ динамики выполнения задач по наблюдению районов моделирования многоспутниковой ОГ ДЗЗ.

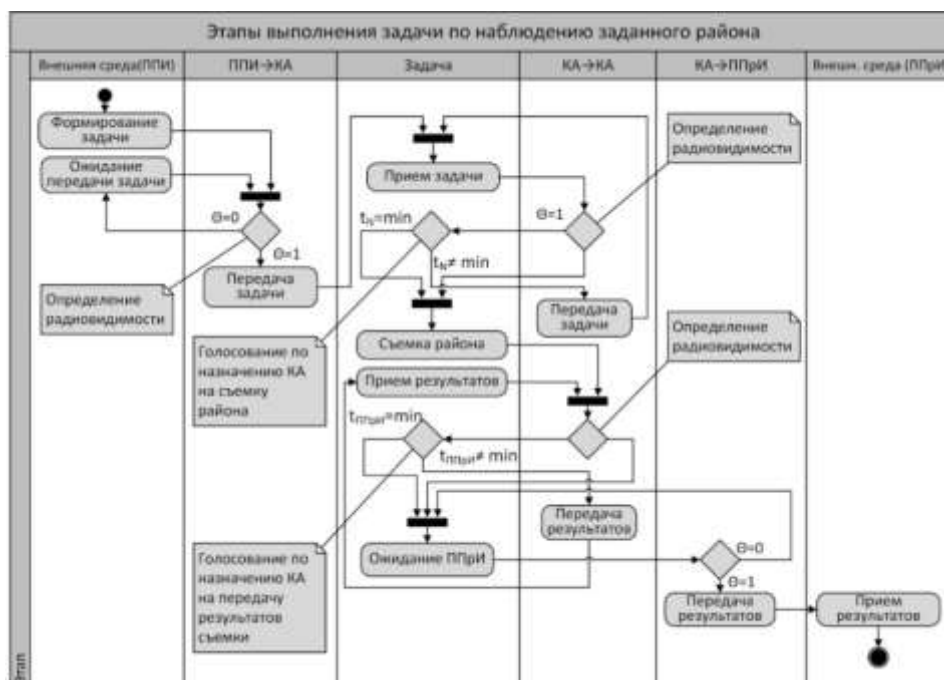


Рис.2 – UML-диаграмма деятельности агентов имитационной модели

Анализ функционирования имитационной модели проводился для пятнадцати задач по наблюдению районов со случайными координатами. Результат моделирования представлен в форме ленточной диаграммы (рисунок 4). На ней голубым цветом выделен случайный интервал времени формирования задачи (от начала моделирования). Фиолетовым цветом обозначен интервал времени от момента

формирования задачи до ближайшего сеанса связи (в задаче №1 этот интервал отсутствует, что свидетельствует о нахождении КА в зоне радиовидимости ППИ в момент формирования задачи).

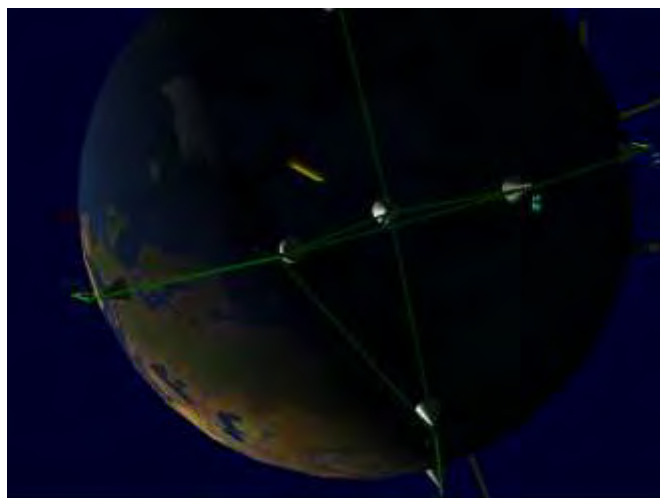


Рис.3 – 3D-визуализация моделируемого процесса

Далее задача выполняется ближайшим к району наблюдения КА, который определяется методом голосования (интервал выделен синим цветом). После выполнения задача передается на ППРИ (который для удобства анализа в рассмотренном примере совпадает с ППИ), ближайшим к нему КА, определенным методом голосования. Желтым цветом на графике показан интервал временного резерва выполнения задачи – временного интервала, в течение которого информация о районе наблюдения является актуальной. Если задача не выполнена в течение временного резерва, она считается не выполненной и выделяется красным цветом (например, задача №3).

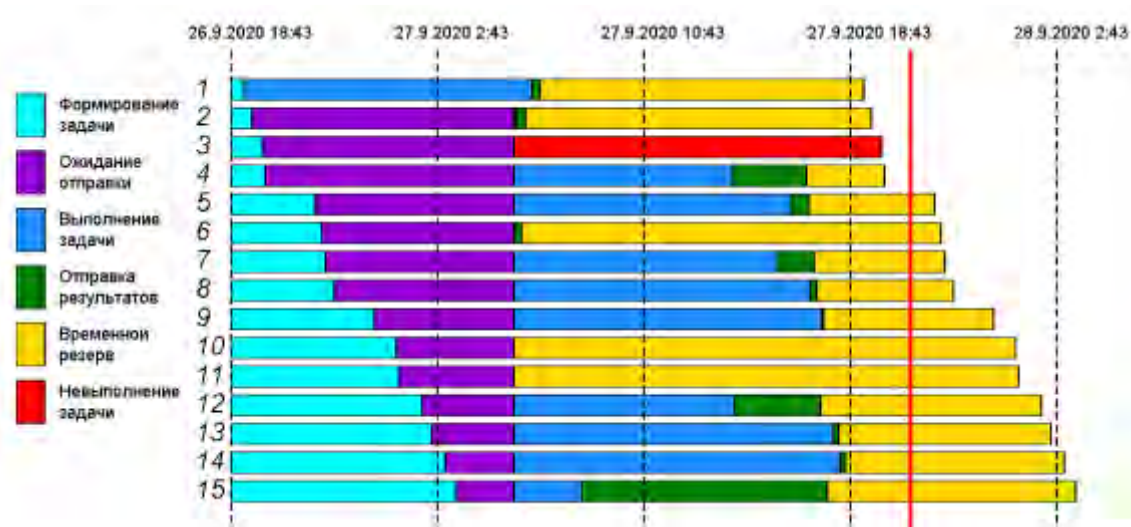


Рис.4 – Динамика выполнения задач по наблюдению районов моделирования многоспутниковой ОГ ДЗЗ

Выполненные задачи, а также задачи, для которых превышен срок временного резерва, передаются в функцию расчета вероятности получения актуальной информации P_a , график которой представлен на рисунке 5.

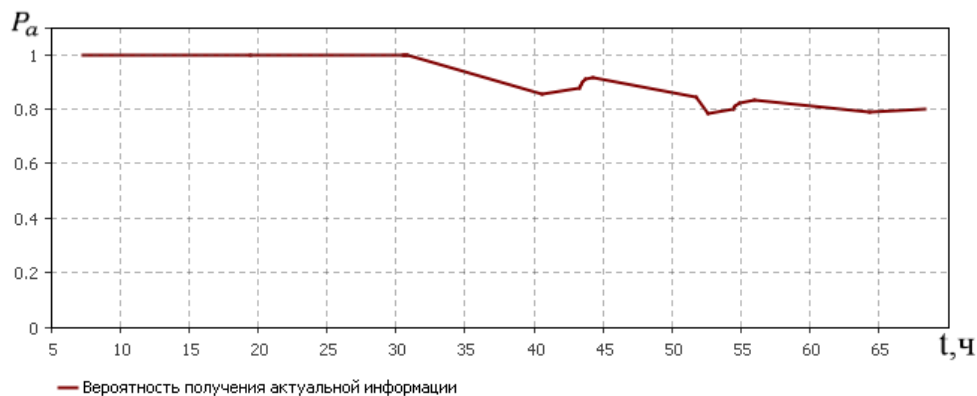


Рис.5 – График изменения вероятности получения актуальной информации

Анализ динамики выполнения задач по наблюдению заданных районов многоспутниковой ОГ ДЗЗ в форме ленточной диаграммы в совокупности с 3D-анимацией функционирования ОГ ДЗЗ позволяет оценить адекватность модели и ее пригодность для проведения статистических экспериментов.

Заключение

Разработка и применение многоспутниковых ОГ ДЗЗ в настоящее время связано с решением множества сложных задач, таких, как синтез оптимальной баллистической структуры, обоснование требований к параметрам бортовых систем, алгоритмам управления и многих других. Разработанная имитационная модель может послужить эффективной платформой для обоснования решений данных сложных задач. Модель легко масштабируема под различные орбитальные структуры ОГ ДЗЗ, конфигурацию пунктов приема и передачи информации, а также районы наблюдения. Анализ ее функционирования на тестовых примерах позволяет сделать вывод об адекватности модели и ее пригодности для проведения статистических испытаний.

Литература

1. **Фоминов И.В., Привалов А.Е.** Ключевые проблемы развития группового управления малыми космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли // М.: Космонавтика и ракетостроение, №103, 2019. С. 31-35.
2. **Бугайченко П.Ю., Никитин А.А., Привалов А.Е.** Пути повышения оперативности применения космических систем дистанционного зондирования Земли // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского № 651. – 2016. – С.14-20.
3. Kestrel Eye Block II / Kenneth J. Vocam, Kenneth J. Hyatt, Stephen J. Kalasky [etal.] – URL: https://www.researchgate.net/publication/327510322_Kestrel_Eye_Block_II/link/5b928bc292851c78c4f54cc7/download (дата обращения 10 октября 2020).
4. U.S Army Small Space Update / Billi E.Johnson, Jon T.Dodson, Timothy A. Farmer [etal.] – URL:<https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3349&context=smallsat> (дата обращения 10 октября 2020).
5. Проблемные вопросы создания многоспутниковых орбитальных группировок на базе малоразмерных космических аппаратов /В.В. Бетанов, С.А. Волков, Н.С. Данилин [и др.] // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы № 6 (3). – 2019.– С.57-65.

-
6. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли / А.В. Соллогуб, П.О. Скобелев, Е.В. Симонова [и др.] // Вестник Самарского ГТУ № 7 (28). – 2012. – С.47-54.
 7. Планирование целевого применения группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с использованием мультиагентных технологий / П.О. Скобелев, В.К. Скимунт, Е.В. Симонова [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 10 (171). С. 60-70.
 8. Решение задач дистанционного зондирования Земли с применением мультиагентных технологий / П.О. Скобелев, А.В. Соллогуб, А.В. Иващенко [и др.] // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2010. № 3 (28). С. 47-54.
 9. **Городецкий В.И., Карсаев О.В.** Самоорганизация группового поведения кластера малых спутников распределенной системы наблюдения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 2 (187). – С. 234-247.
 10. **Карсаев О.В.** Анализ оперативности информационных взаимодействий в низкоорбитальных многоспутниковых группировках // Труды СПИИРАН. – 2019. – Т. 18. № 4. – С. 858-886.
 11. **Калинин В.Н.** Космический аппарат как объект системных исследований // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2013. – Вып. 640. – С. 80-89.
 12. **Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.** Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 278 с.
 13. **Абросимов В.К.** Коллективы интеллектуальных летательных аппаратов: монография. – М.: Издательский Дом «Наука», 2017. – 304 с.
 14. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Д.А. Белоглазов, А.Р. Гайдук, Е.Ю. Косенко [и др.]; под ред. В.Х. Пшихопова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 305 с.
 15. Баллистика ракет-носителей и космических аппаратов / Н.Ф. Аверкиев, С.А. Богачев, С.А. Васьков [и др.]. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. – 242 с.
 16. Стремление к реальному времени: сервисы оперативного приема и доставки до клиента спутниковых изображений / ООО ИТЦ «СКАНЭКС» – URL: http://www.scanex.ru/upload/pdf/Приемные_станции_20180925_v2.pdf.
 17. **Арлоу Д., Нейштадт И.** UML 2 и унифицированный процесс. Практический объектно-ориентированный анализ и проектирование, 2-е издание. – Пер. с англ. – СПб: Символ-Плюс, 2007. 624 с.
 18. **Борщёв А.В.** Имитационное моделирование: состояние области на 2015 год, тенденции и прогноз / Седьмая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2015): Труды конф., 21-23 окт. 2015 г., Москва: в 2 т. / Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова Рос. Акад. наук; под общ. ред. С.Н. Васильева, Р.М. Юсупова. – Т. 1. Пленарные доклады – М.: ИПУ РАН, 2015. – С.14-22.