

**Метод коррекции плана работы средств наземного
автоматизированного комплекса управления космическими
аппаратами на основе поиска максимальной клики
в разреженном сетевом графе операций**

Колпин М.А., Проценко П.А.*

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия*

**e-mail: prosvka@gmail.com*

Статья поступила 19.05.2021

Аннотация

В статье предложен метод коррекции плана работы средств наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ) космическими аппаратами (КА) при возникновении нештатных ситуаций. Показано, что план работы средств НАКУ КА может быть представлен в виде разреженного сетевого графа операций, что позволяет свести задачу коррекции плана к поиску максимальных клик в независимых подграфах исходного графа. Проведено моделирование процесса коррекции плана работы средств НАКУ КА с использованием разработанного метода и эвристических процедур FIFO и LIFO.

Ключевые слова: наземный автоматизированный комплекс управления, космический аппарат, операция управления, планирование, коррекция, максимальная клика, технологический цикл управления.

Введение

Управление КА является сложным технологическим процессом, связанным с применением разнотипных средств НАКУ КА. Процесс применения средств НАКУ КА сопровождается периодическим возникновением нештатных ситуаций, которые обуславливают наличие рисков невыполнения сеансов управления КА [1-3].

В соответствии со сложившейся практикой управления КА в случае выхода из строя наземного средства, спланированного для выполнения сеансов управления КА, проводится коррекция плана работы средств НАКУ КА [4-6]. Целью коррекции является обеспечение выполнения операций технологического цикла управления (ТЦУ) КА.

Существующая технология коррекции плана работы средств НАКУ КА имеет низкий уровень автоматизации. Задача перепланирования сеансов управления решается в так называемом «ручном режиме» с привлечением заинтересованных дежурных органов управления КА, а продолжительность коррекции зависит от знаний и опыта работы лиц, принимающих решение. Вопросам автоматизации процесса планирования посвящено ряд работ [7-11], при этом в них не рассматриваются проблемы коррекции плана применения средств НАКУ КА.

В зависимости от характера возникающих неисправностей на средствах управления, коррекции может подвергаться не только план работы средств НАКУ КА, находящийся в отработке, но и план, который будет реализовываться в последующие сутки управления КА.

В связи с тем, что средства НАКУ КА, как правило, являются средствами коллективного пользования, т.е. используются в контуре управления КА различного целевого назначения, количество изменений, вносимых в план, должно соответствовать количеству сеансов управления, которые не могут быть выполнены по причине неисправности средств. Кроме того, коррекция плана не должна осуществляться за счет перепланирования сеансов управления, на которые не повлиял выход из строя средств НАКУ КА.

Однако, с ростом количественного состава отечественной орбитальной группировки (ОГ) КА повышается сложность и продолжительность решения задачи коррекции плана работы средств НАКУ КА, что обусловлено увеличением размерности задачи поиска рационального состава изменений, которые необходимо внести в план.

Указанные обстоятельства позволяют сделать вывод о необходимости автоматизации процесса коррекции плана работы средств НАКУ КА.

Основой для автоматизации любого технологического процесса служат математические модели, методы и алгоритмы, предназначенные для решения задач обработки информации и формирования управляющих воздействий.

Применительно к процессу коррекции плана работы средств НАКУ КА требуется разработка и программная реализация метода, позволяющего на основе данных об исходном плане работы средств НАКУ КА, составе и функционале работоспособных средств НАКУ КА, управляемой ОГ КА, ТЦУ КА решить задачу перепланирования сеансов управления, которые не могут быть выполнены в связи с

неисправностью одного или нескольких средств управления КА. Полученный план должен обеспечивать реализацию всех ранее запланированных работ с ОГ КА.

Формализация задачи коррекции

Управление множеством КА $A = \{A_\nu\}, \nu \in N = \{1, \dots, n\}$ осуществляется средствами НАКУ КА $B = \{B_\mu\}, \mu \in M = \{1, \dots, m\}$ и заключается в выполнении операций управления КА $D = \{D_\gamma\}, \gamma \in K = \{1, \dots, k\}$ на суточных витках $C = \{C_\lambda\}, \lambda \in L = \{1, \dots, l\}$ в строгом соответствии с ТЦУ КА, который, в свою очередь, реализуется через план работы средств НАКУ КА.

Технологический цикл управления каждым КА удобно представить в виде матрицы $\Omega = (\tau_\gamma^{v\lambda}), \gamma \in K, \nu \in N, \lambda \in L$, в которой $\tau_\gamma^{v\lambda}$ - длительность γ -й операции управления ν -м КА на λ -м видимом суточном витке.

Интервал времени t , на который осуществляется планирование выполнения операций управления КА (как правило, составляет одни сутки), задается множеством моментов времени $T = \{t_\varphi\}, \varphi \in F = \{1, \dots, f\}$ с шагом дискретизации $\Delta t = t_{\varphi+1} - t_\varphi = const$.

Тогда исходный план работы средств НАКУ КА может быть представлен в виде неориентированного полного графа без петель $G = (G_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda}, E)$, вершинами которого являются операции управления $G_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda}$, а E - множество ребер, отражающих

бесконфликтность совместного присутствия в плане соединяемых ими операций управления.

Бесконфликтность операций управления КА в плане работы средств НАКУ КА означает, что $G_{\mu\gamma\varphi}^{\nu\lambda}$ не предполагают:

- одновременное проведение работ несколькими средствами НАКУ по одному КА;
- одновременное проведение работ одним средством НАКУ больше, чем по одному КА;
- одновременное проведение средством НАКУ нескольких операций управления по одному КА;
- задействование одного и того же средства НАКУ с интервалом времени между операциями управления, превышающим время, необходимое ему на подготовку к работе.

Неисправность средства управления B_{μ} , выявленная в момент времени $t_i \in t$, позволяет выделить в исходном графе G два множества вершин:

1) множество $\widehat{Z} = \left\{ \widehat{G}_{\mu\gamma\varphi}^{\nu\lambda} \right\}$, содержащее операции управления, которые не могут быть выполнены при $t_{\varphi} \geq t_i$, где $\widehat{\mu} \in \widehat{M} = \{1, \dots, m\}$ – множество номеров неисправных средств управления;

2) множество $\check{Z} = \left\{ \check{G}_{\mu\gamma\varphi}^{\nu\lambda} \right\}$, содержащее операции управления, которые могут быть выполнены при $t_{\varphi} \geq t_i$, где $\mu \in M = \{1, \dots, m\}$ – множество номеров работоспособных средств управления КА.

Возможности по перепланированию операций управления из множества \widehat{Z} зависят от состава и структуры ТЦУ конкретного КА, плана задействования работоспособных средств НАКУ КА, зон радиовидимости КА средствами НАКУ КА, а также имеющего ресурса времени на коррекцию плана.

При этом каждой операции управления $\widehat{G}_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda}$ может быть сопоставлено множество $\widetilde{Z}_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda} = \left\{ \widetilde{G}_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda}, v \in N, \lambda \in L, \gamma \in K, \mu \in M, \forall t_{\varphi} > t_i \right\}$ альтернативных вариантов ее реализации с использованием работоспособных средств НАКУ КА.

Тогда задача коррекции плана работы средств НАКУ КА может быть сформулирована как задача выбора из множества $\widetilde{Z} = \{ \widetilde{Z}_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda} \}$ такого состава альтернативных операций управления КА \widetilde{Z}^* , которые не имеют конфликтов на реализацию между собой и с операциями управления из множества \widetilde{Z} .

Множества \widetilde{Z} и \widetilde{Z}^* могут быть представлены в виде неориентированных графов без петель $\check{G} = \{ \check{G}_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda}, E \}$ и $\check{G}^* = \{ \check{G}_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda}, E \}$, вершинами которых являются операции управления $\check{G}_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda}$ и $G_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda}$ соответственно, а E в обоих графах – это множества ребер, отражающих бесконфликтность совместного присутствия в плане соединяемых ими операций управления.

Тогда задачу коррекции плана работы средств НАКУ КА удобно записать, как поиск в графе \check{G} максимальной клики \check{G}^* , которая при объединении с графом \check{G} образует полный граф K размерности $|K| = |\check{G}^*| + |\check{G}|$:

$$\tilde{G}^* = \arg \max_{\tilde{G}_i \in \tilde{G}} \{|\tilde{G}_i| \mid |\tilde{G}_i \cup \check{G}| = K\},$$

где i – количество клик в графе \tilde{G} .

Оценивание качества полученного решения предлагается осуществлять с использованием показателя полноты проведенной коррекции:

$$Q = \frac{|\tilde{Z}^*|}{|\hat{Z}|},$$

который отражает отношение количества операций управления, содержащихся в множестве \tilde{Z}^* , к количеству операций управления в множестве \hat{Z} .

Описание метода

Разработанный метод коррекции плана работы средств НАКУ КА основывается на процедурах отыскания максимальной клики в графе. Необходимо отметить, что размерность задачи коррекции обусловлена количеством КА в управляемой ОГ, количеством неисправных средств управления КА и интервалом времени, на котором необходимо провести коррекцию.

Задача нахождения максимальной клики является NP-полной [12], а одним из самых эффективных алгоритмов для ее решения является алгоритм Брона-Кербоша. Однако, вычислительная сложность данного алгоритма в худшем случае составляет – $O(3^{n/3})$, где n – число вершин [12], что обуславливает наличие проблемы размерности при решении задачи поиска максимальной клики для больших графов, к которым, в определенных ситуациях, может относиться и графа \tilde{G} .

В связи с этим в рамках метода предложена двухэтапная процедура преодоления проблемы размерности. На первом этапе проводится сужение множества альтернатив \tilde{Z} , а на втором этапе осуществляется декомпозиция задачи поиска максимальной клики.

Структурно-логическая схема разработанного метода коррекции плана работы средств НАКУ КА, реализующая описанный выше подход, представлена на рис. 1.

Метод включает в себя 6 основных блоков.

В первом блоке задаются исходные данные о составе, структуре и параметрах управляемой ОГ, НАКУ КА, плане работы средств НАКУ КА и параметрах выхода из строя средств НАКУ.

Данные об ОГ содержат информацию о:

- пространственном положении каждого КА на начало суток реализации плана работы средств НАКУ;
- технологическом цикле управления каждым КА в виде сопоставления каждой операции управления ее длительности и номера видимого суточного витка, на котором средства НАКУ КА должны выполнить данную операцию.

Наземный автоматизированный комплекс управления КА характеризуется средствами управления КА в его составе. Для каждого средства управления указывается номер, а также функционал и географические координаты его расположения. Информация о неисправных средствах управления содержит номера неисправных средств и время, когда данные неисправности обнаружены.

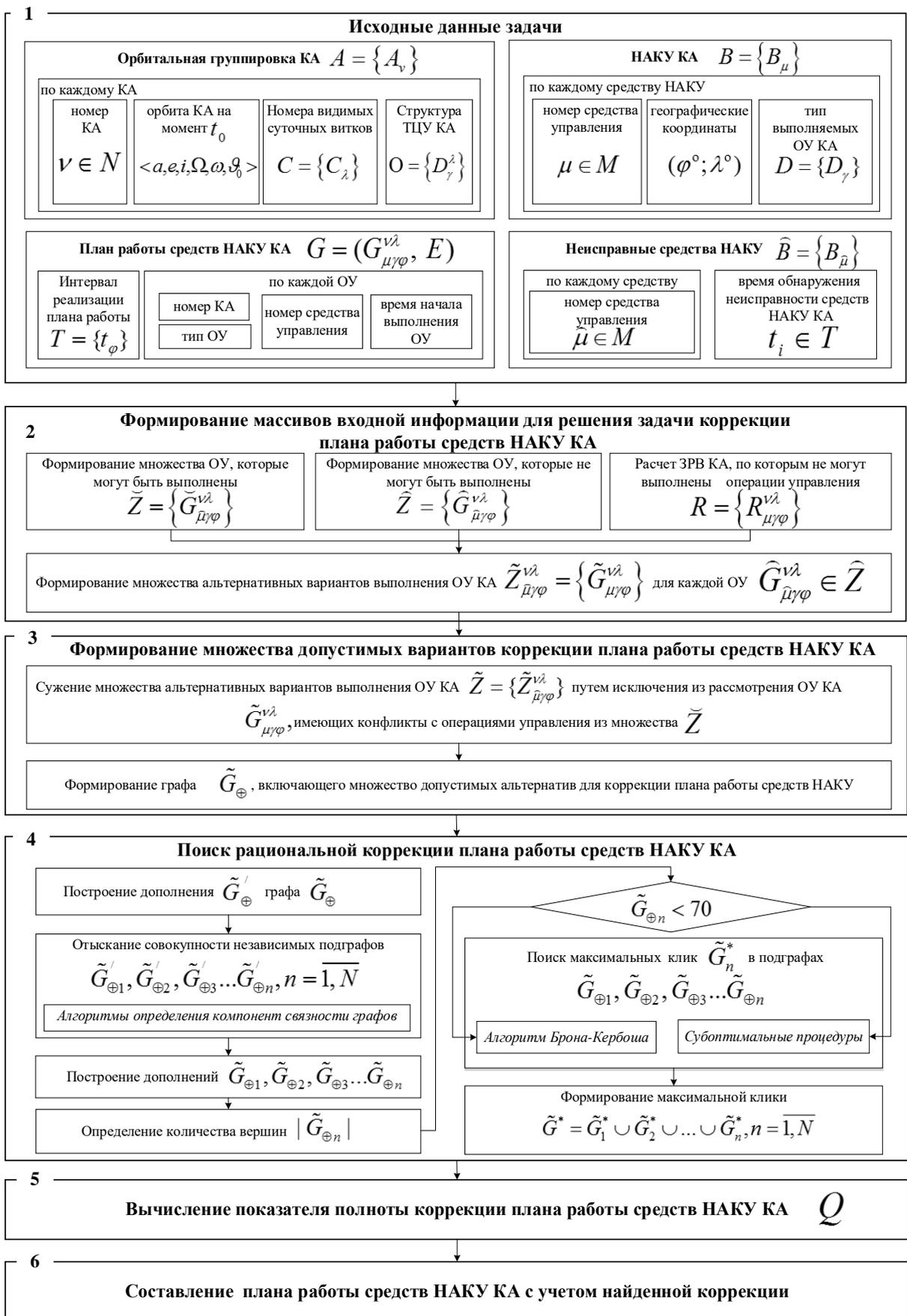


Рис. 1. Структурно-логическая схема метода

Во втором блоке метода осуществляется формирование массивов входной информации для решения задачи коррекции плана работы средств НАКУ КА. Для этого выполняются следующие действия:

1) на основе исходных данных о плане работы средств НАКУ КА формируется множество операций управления КА, которые не могут быть выполнены по причине неисправности одного или нескольких средств НАКУ $\hat{Z} = \{ \hat{G}_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda} \}$;

2) расчет зон радиовидимости КА исправными средствами НАКУ $R = \{ R_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda} \}$, по которым не могут быть выполнены операции управления из множества \hat{Z} . Здесь $R_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda} = (t1_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda}, t2_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda})$ – параметры времени входа ($t1_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda}$) КА в ЗРВ исправного средства НАКУ, имеющего функционал γ , и времени выхода из нее ($t2_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda}$) на видимом суточном витке λ ;

3) на основе 1) и 2) для каждой операции управления $\hat{G}_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda}$, которая не может быть выполнена, формируется множество альтернативных вариантов ее выполнения $\tilde{Z}_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda} = \{ \tilde{G}_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda} \}$;

4) формирование множества $\tilde{Z} = \{ \tilde{G}_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda} \}$ путем объединения множеств $\tilde{Z}_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda}$.

Множество \tilde{Z} содержит все альтернативные операции управления КА, которые могут быть использованы для коррекции плана работы средств НАКУ КА. Однако, как было отмечено ранее, альтернативные операции управления, включаемые в коррекцию, не должны иметь конфликтов на реализацию как с операциями исходного

плана работы средств НАКУ, так и между собой, т.е. в терминах теории графов, коррекция должна представлять собой полный подграф.

В связи с этим в третьем блоке осуществляется формирование множества допустимых вариантов коррекции плана работы средств НАКУ КА, содержащего только такие альтернативные операции управления, которые не имеют конфликтов на реализацию с операциями исходного плана работы средств НАКУ. Для этого осуществляется:

1) проверка всех операций $\tilde{G}_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda} \in \tilde{Z}$ на наличие конфликтов с операциями $\check{G}_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda} \in \check{Z}$;

2) формирование графа $\tilde{G}_{\oplus} = \{\tilde{G}_{\mu\gamma\varphi}^{v\lambda}, E\}$ путем удаления из графа \tilde{G} конфликтных вершин и инцидентных им ребер.

В четвертом блоке осуществляется поиск рациональной коррекции плана работы средств НАКУ, который основан на отыскании максимальной клики $\tilde{G}^* \in \tilde{G}_{\oplus}$. В связи с тем, что граф \tilde{G}_{\oplus} по-прежнему может представлять собой большой граф, обладающий при этом высокой связностью, то для отыскания максимальной клики использована процедура, предложенная авторами в работах [13, 14]. Решение задачи основывается на построении и работы с дополнением \tilde{G}'_{\oplus} графа \tilde{G}_{\oplus} .

Так как в графе \tilde{G}'_{\oplus} ребрами соединены только те вершины, которые не могут быть одновременно включены в план работы средств НАКУ, то \tilde{G}'_{\oplus} представляет

собой разреженный граф. Данное свойство \tilde{G}'_{\oplus} позволяет снизить вычислительную сложность решения задачи поиска максимальной клики.

Для этого осуществляется:

- 1) выделение в \tilde{G}'_{\oplus} совокупности несвязных подграфов графов $\tilde{G}'_{\oplus i}$;
- 2) построение для $\tilde{G}'_{\oplus i}$ дополнений $\tilde{G}_{\oplus i}$;
- 3) поиск в $\tilde{G}_{\oplus i}$ максимальных клик;
- 4) формирование искомой клики \tilde{G}^* объединением максимальных клик,

найденных в его независимых подграфах $\tilde{G}_{\oplus i}$.

Для решения задачи поиска совокупности несвязных подграфов рекомендуется использовать алгоритмы поиска компонент связности графа (в глубину или ширину) [15, 16], преимущество которых является линейное время сходимости относительно количества вершин и ребер в графе.

Для решения задачи отыскания максимальных клик подграфов $\tilde{G}_{\oplus i}$, имеющих менее 70 вершин, предлагается использовать алгоритм Брона-Кербоша [16], а в других случаях рекомендуется задействовать субоптимальные процедуры, позволяющие находить приемлемые решения за полиномиальное время [17–20].

В результате отыскания максимальной клики \tilde{G}^* в пятом блоке метода осуществляется оценивание показателя полноты коррекции, а в шестом блоке составление плана работы средств НАКУ КА с учетом найденной коррекции.

Результаты моделирования

Для апробации предложенного в статье метода разработано программное средство, позволяющее автоматизировать процесс коррекции плана работы средств НАКУ КА.

На основе разработанного программного средства проведено моделирование процесса коррекции для различных вариантов исходных данных. Основной целью выполненных расчетов являлось сравнение значений показателя полноты коррекции плана работы средств НАКУ КА, получаемых с использованием разработанного метода и подходов, реализующих эвристические процедуры FIFO и LIFO.

В качестве исходных данных рассматривались:

- 1) низкоорбитальная группировка КА, состоящая из 130 КА;
- 2) технологический цикл управления низкоорбитальным КА на суточном интервале, включающий закладку командно-программной информации (КПИ) на первом или втором видимом суточном витке, прием телеметрической информации (ТМИ) на последнем или предпоследнем видимом суточном витке;
- 3) средства НАКУ КА, размещенные на 6-ти командно-измерительных пунктах (КИП), имеющих следующие условные наименования и географические координаты: КИП-1 (55,75 с.ш., 37,61 в.д.), КИП-2 (55,87 с.ш., 38,00 в.д.), КИП-3 (58,31 с.ш., 82,00 в.д.), КИП-4 (51,83 с.ш., 107,00 в.д.), КИП-5 (62,02 с.ш., 129,73 в.д.), КИП-6 (50,55 с.ш., 137,00 в.д.). При этом на каждом КИП располагается по два комплекта средств, обладающих функционалом выполнения указанных типов операций управления КА;

4) план работы средств НАКУ КА на сутки, который формируется для исходных данных (1)-(3) с использованием программного средства, описанного в работе [9];

5) характеристика нештатных ситуаций: неисправность всех средств управления КА одного КИП в моменты времени 00:00, 03:00, 6:00, 12:00, 15:00, 18:00 и 21:00;

б) технология коррекции плана работы средств НАКУ КА:

А- резервирование выполнения операций управления на следующем видимом суточном витке КА;

Б- резервирование выполнения операций управления на двух последующих видимых суточных витках КА;

В- резервирование выполнения операций управления на трех последующих видимых суточных витках КА.

По результатам выполненных экспериментов проведены коррекции планов работы средств НАКУ КА для приведенных выше сценариев моделирования.

Сложность реализации «ручной технологии» решения задачи коррекции плана работы средств НАКУ КА для сформированных исходных данных отражена на рис. 2 в виде зависимости среднего количества операций управления, которые не могут быть выполнены, от времени выхода из строя средств управления одного КИП.

Результаты коррекции плана работы средств НАКУ КА, выполненные для различных суток моделирования при выходе из строя средств управления одного КИП, представлены на рис. 3-5.

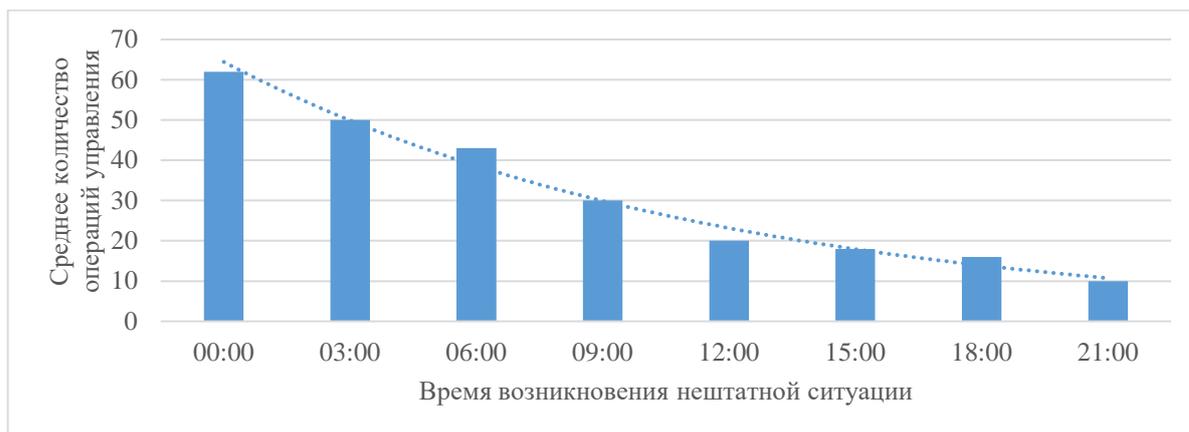


Рис. 2. Среднее количество операций управления, которые не могут быть выполнены при неисправности средств управления КА одного КИП

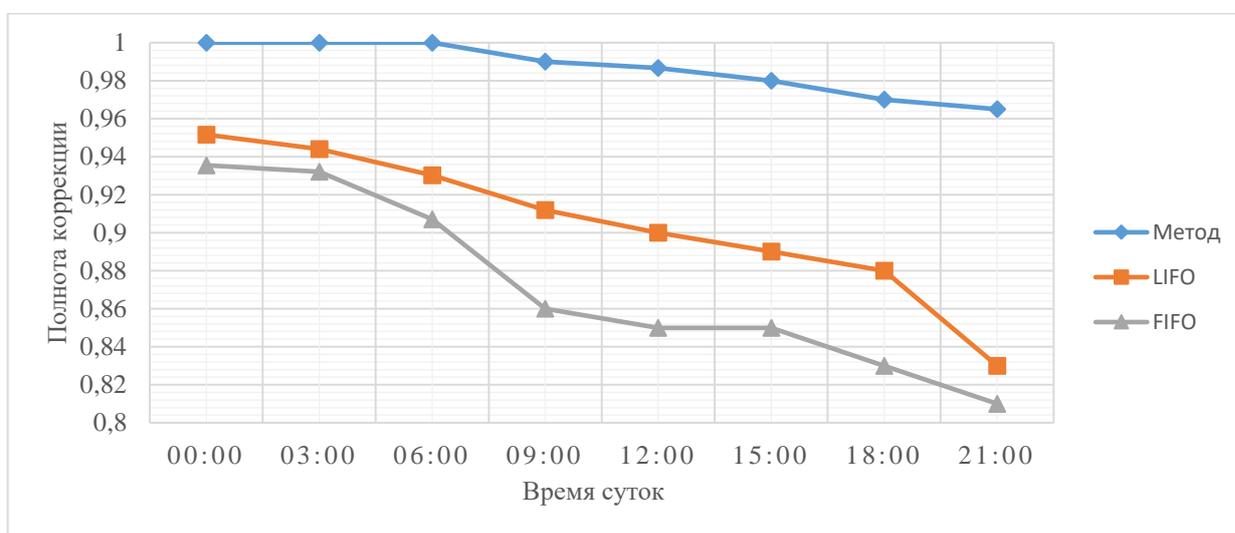


Рис. 3. Зависимость значений полноты коррекции при использовании технологии А

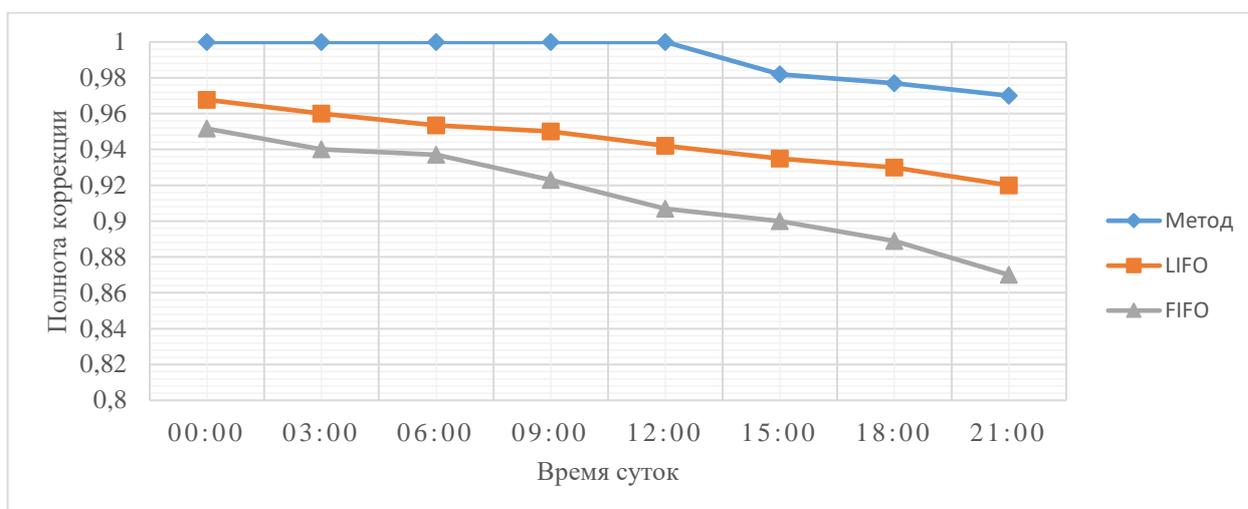


Рис. 4. Зависимость значений полноты коррекции при использовании технологии Б

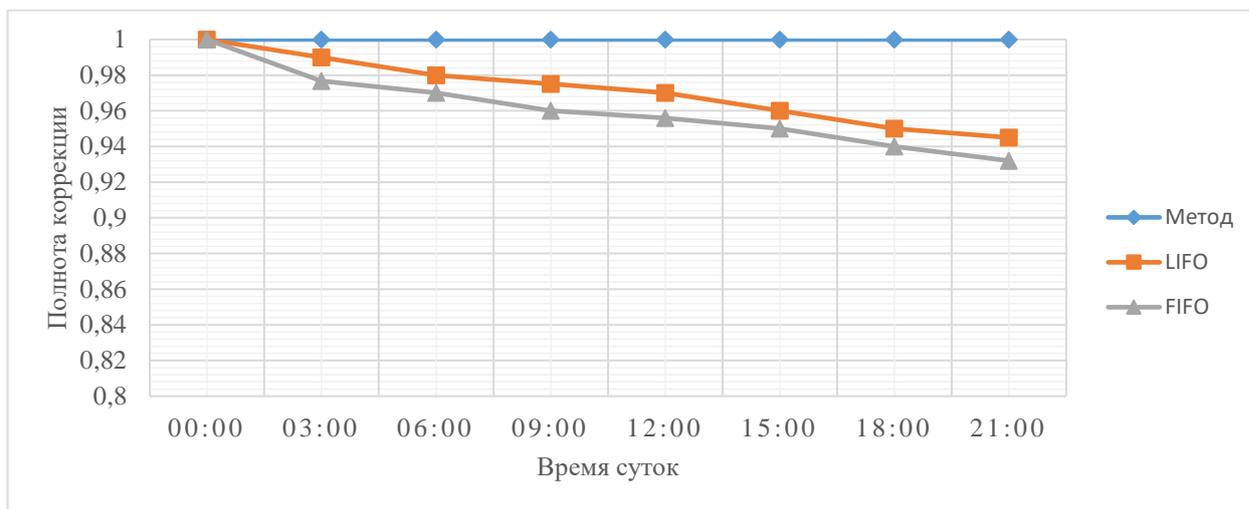


Рис. 5. Зависимость значений полноты коррекции при использовании технологии В

Графики отражают зависимость значений показателя полноты коррекции от времени выхода из строя средств управления КА для технологий коррекции А, Б, В.

Сравнительный анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

– при коррекции плана работы средств НАКУ КА в связи с неисправностью средств управления одного КИП в начале суток полнота коррекции обеспечивается на уровне единицы в случаях использования разработанного метода, а также процедур FIFO и LIFO при условии резервирования операций управления на трех последующих видимых суточных витках;

– с уменьшением интервала времени, на котором необходимо выполнить коррекцию плана работы средств НАКУ КА, эффективность использования предлагаемого метода в сравнении с эвристическими алгоритмами FIFO и LIFO увеличивается. Значения показателя полноты коррекции, получаемые с использованием разработанного метода, в среднем на 10 % выше, чем для алгоритмов FIFO и LIFO;

– увеличение «гибкости» ТЦУ КА до 3-х резервных видимых суточных витков, на которых возможно проведение операций управления КА, позволяет обеспечить значения показателя полноты коррекции на уровне единицы при использовании разработанного метода во всех рассмотренных сценариях моделирования.

Заключение

Таким образом, разработанный метод позволяет формировать рациональные коррекции планов работы средств НАКУ КА исходя из состава, структуры и параметров управляемой ОГ КА, НАКУ, а также требований и ограничений технологий управления КА. Применение метода обеспечивает прирост показателя полноты коррекции плана работы средств НАКУ КА за счет применения оптимизационных процедур при решении задачи перераспределения ресурсов НАКУ КА.

Предложенный в работе метод является развитием научно-методического аппарата планирования работы и оценивания эффективности НАКУ КА в условиях возникновения нештатных ситуациях на средствах управления КА и может использоваться:

– в качестве основы для создания программного средства автоматизированной коррекции плана работы средств НАКУ КА;

– в интересах совершенствования существующих программных средств планирования работы средств НАКУ КА;

– при проведении научных исследований по оцениванию показателей устойчивости и оперативности управления КА, реализуемого различными конфигурациями НАКУ КА.

Библиографический список

1. Мануйлов Ю.С., Калинин В.Н., Гончаревский В.С., Делий И.И. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса управления. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2010. – 609 с.
2. Максимов А.М., Райкунов Г.Г., Шучев В.Г. Научно-технические проблемы развития наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения // Космонавтика и ракетостроение. 2011. № 4 (65). С. 5 - 12.
3. Золотарёв А.Н., Сохранный Е.П. О центре ситуационного анализа, координации и планирования работы средств наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения и измерений // Космонавтика и ракетостроение. 2011. № 1 (62). С. 162 – 171.
4. Мануйлов Ю.С., Новиков Е.А. Алгоритм локально-оптимального управления технологическим процессом // Экономическая кибернетика: системный анализ в экономике и управлении: сборник научных трудов. 2005. № 12. С. 56 - 61.
5. Дудко А.Н., Кучеров Б.А., Литвиненко А.О., Сохранный Е.П. Метод планирования бесконфликтного задействования наземных технических средств при обеспечении управления группировкой космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2014. № 1 (74). С. 155 - 163.
6. Литвиненко А.О. Программный комплекс автоматизированного планирования задействования средств наземного автоматизированного комплекса управления // Труды МАИ. 2016. № 86. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=67829>

7. Сохранный Е.П. Способы решения основных проблемных вопросов разрешения конфликтных ситуаций по задействованию наземных средств управления космическими аппаратами // Труды МАИ. 2019. № 108. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=109504>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-11](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-11)
8. Дудко А.Н., Кучеров Б.А., Литвиненко А.О., Сохранный Е.П. Метод повышения оперативности планирования задействования средств управления космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения // Космонавтика и ракетостроение. 2016. № 1 (86). С. 103 - 109.
9. Вороновский В.В., Дудко А.Н., Матюшин М.М., Сохранный Е.П., Усиков С.Б., Сохранная А.Е. Задача назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения. Формирование иерархической структуры исходных данных // Космонавтика и ракетостроение. 2018. № 1 (100). С. 89 – 99.
10. Матюшин М.М., Луценко Ю.С., Гершман К.Э. Синтез структуры органа управления полетом космических группировок // Труды МАИ. 2016. № 89. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=72869>
11. Кондрашин М.А., Арсенов О.Ю., Козлов И.В. Применение технологии виртуализации и облачных вычислений при построении сложных распределенных моделирующих систем // Труды МАИ. 2016. № 89. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=73411>
12. Емеличев В.А., Мельников О.И., Сарванов В.И., Тышкевич Р.И. Лекции по теории графов. - М.: Наука, 1990. – 392 с.

13. Колпин М.А., Проценко П.А., Фролов О.П. Метод планирования операций управления космическими аппаратами многоспутниковой орбитальной группировки // Известия российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2020. № 4. С. 69 – 75.
14. Колпин М.А., Проценко П.А., Слащев А.В. Методика оценивания эффективности функционирования наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами // Труды МАИ. 2017. № 92. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=77144>
15. Etsuji Tomita, Akira Tanaka, Haruhisa Takahashi The worst-case time complexity for generating all maximal cliques and computational experiments // Theoretical Computer Science, 2006, vol. 363, issue 1. pp. 28 - 42. DOI: [10.1016/j.tcs.2006.06.015](https://doi.org/10.1016/j.tcs.2006.06.015)
16. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р. Алгоритмы: построение и анализ. – М.: Вильямс, 2005. – С. 622 - 632.
17. Грибков М.А., Алексеевский А.В., Спирин С.А., Короткова М.А. Вычислительный подход к решению задачи о поиске максимальной клики // Труды Института системного анализа Российской академии наук. 2006. Т. 25. С. 185 - 192.
18. Alvarez A., Erwin R. An Introduction to Optimal Satellite Range Scheduling, Springer, 2015, 162 p.
19. Zufferey N., Amstutz P., Giaccari P. Graph colouring approaches for a satellite range scheduling problem // Journal of Sheduling, 2008, no. 11 (4), pp. 263 - 277. DOI: [10.1007/s10951-008-0066-8](https://doi.org/10.1007/s10951-008-0066-8)
20. Preindl B., Seidl M., Mehnen L., Krinninger S., Stuglik S., Machnicki D. A performance comparison of different satellite range scheduling algorithms for global ground

station networks // In 61st International Astronautical Congress, Prague, Czech Republic, 2010, pp. 253 - 257.

Method for correcting the work plan of the ground automated spacecraft control complex based on the search for the maximum clique in sparse network graph of operations

Kolpin M.A., Protsenko P.A.*

*Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky,
13, Zdanovskaya str., Saint-Petersburg, 197198, Russia*

**e-mail: prosvka@gmail.com*

Abstract

The necessity of automating the process of correcting the work plan of the ground automated spacecraft control complex in the interests of increasing the operativeness of countering emergency is reasoned. Method for correcting the work plan of spacecraft control agency is proposed. The plan in question can be represented as sparse network graph of operations. This circumstance makes it possible to reduce the problem of plan correction to the search for maximum cliques in independent subgraphs of the original graph using the known optimal and suboptimal algorithms of graph theory. This approach is implemented in two stages. At the first stage, the complement of the initial operations graph is constructed and a set of disconnected subgraphs is searched in it using known algorithms for finding the components of the graph's connectivity (in depth or width). The advantage of these algorithms is the linear convergence time relative to the number of vertices and edges in the graph.

At the second stage, the search for maximum cliques of the found subgraphs is carried out. If the subgraph has less than 70 vertices, then the Bron-Kerbosch algorithm is used;

otherwise, suboptimal procedures that allow finding acceptable solutions in polynomial time are used.

The modeling of the process of correcting the work plan of the control agency using the developed method and heuristic procedures FIFO and LIFO has been carried out. It is concluded that the use of the developed method provides an increase in the correction completeness index due to optimization procedures when solving the problem of redistributing of the resources of the ground automated spacecraft control complex.

The method developed can be used for:

- creation of software tool for automated correction of the work plan of spacecraft control agency;
- conducting scientific research to assess the stability and operativeness of spacecraft control.

Keywords: Ground Automated Control Complex, spacecraft, control operation, planning, correction, maximum click, technology management cycle.

References

1. Manuilov Yu.S., Kalinin V.N., Goncharevskii V.S., Delii I.I. *Upravlenie kosmicheskimi apparatami i sredstvami nazemnogo kompleksa upravleniya* (Control spacecraft and ground control complex), Saint Petersburg, VKA imeni A.F. Mozhaiskogo, 2010, 609 p.
2. Maksimov A.M., Raikunov G.G., Shuchev V.G. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2011, no. 4 (65), pp. 5 - 12.

3. Zolotarev A.N., Sokhrannyi E.P. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2011, no. 1 (62), pp. 162 – 171.
4. Manuilov Yu.S., Novikov E.A. *Ekonomicheskaya kibernetika: sistemnyi analiz v ekonomike i upravlenii*, 2005, vol. 12, pp. 56 - 61.
5. Dudko A.N., Kucherov B.A., Litvinenko A.O., Sokhrannyi E.P. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2014, no 1 (74), pp. 155 - 163.
6. Litvinenko A.O. *Trudy MAI*, 2016, no. 86. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=67829>
7. Sokhrannyi E.P. *Trudy MAI*, 2019, no. 108. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=109504>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-11](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-11)
8. Dudko A.N., Kucherov B.A., Litvinenko A.O., Sokhrannyi E.P. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2016, no. 1 (86), pp. 103 - 109.
9. Voronovskii V.V., Dudko A.N., Matyushin M.M., Sokhrannyi E.P., Usikov S.B., Sokhrannaya A.E. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2018, no. 1 (100), pp. 89 – 99.
10. Matyushin M.M., Lutsenko Yu.S., Gershman K.E. *Trudy MAI*, 2016, no. 89. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=72869>
11. Kondrashin M.A., Arsenov O.Yu., Kozlov I.V. *Trudy MAI*, 2016, no. 89. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=73411>
12. Emelichev V.A., Mel'nikov O.I., Sarvanov V.I., Tyshkevich R.I. *Lektsii po teorii grafov* (Lectures on graph theory), Moscow, Nauka, 1990, 392 p.
13. Kolpin M.A., Protsenko P.A., Frolov O.P. *Izvestiya rossiiskoi akademii raketnykh i artilleriiskikh nauk*, 2020, no. 4, pp. 69 – 75.

14. Kolpin M.A., Protsenko P.A., Slashchev A.V. *Trudy MAI*, 2017, no. 92. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=77144>
15. Etsuji Tomita, Akira Tanaka, Haruhisa Takahashi The worst-case time complexity for generating all maximal cliques and computational experiments, *Theoretical Computer Science*, 2006, vol. 363, issue 1. pp. 28 - 42. DOI: [10.1016/j.tcs.2006.06.015](https://doi.org/10.1016/j.tcs.2006.06.015)
16. Kormen T., Leizerson Ch., Rivest R. *Algoritmy: postroenie i analiz* (Algorithms: Construction and Analysis), Moscow, Vil'yams, 2005, pp. 622 - 632.
17. Gribkov M.A., Alekseevskii A.V., Spirin S.A., Korotkova M.A. *Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiiskoi akademii nauk*, 2006, vol. 25, pp. 185 - 192.
18. Alvarez A., Erwin R. *An Introduction to Optimal Satellite Range Scheduling*, Springer, 2015, 162 p.
19. Zufferey N., Amstutz P., Giaccari P. Graph colouring approaches for a satellite range scheduling problem, *Journal of Sheduling*, 2008, no. 11 (4), pp. 263 - 277. DOI: [10.1007/s10951-008-0066-8](https://doi.org/10.1007/s10951-008-0066-8)
20. Preindl B., Seidl M., Mehnen L., Krinninger S., Stuglik S., Machnicki D. A performance comparison of different satellite range scheduling algorithms for global ground station networks, *In 61st International Astronautical Congress*, Prague, Czech Republic, 2010, pp. 253 - 257.