

НАЗЕМНЫЕ КОМПЛЕКСЫ, СТАРТОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 629.78; 629.7.08

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ОГРАНИЧЕНИЙ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ, УЧИТЫВАЕМЫХ ПРИ ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИИ

Артюшенко В.М.* , Кучеров Б.А.**

*Технологический университет,
ул. Гагарина, 42, Королев, Московская область, 141070, Россия*

** e-mail: artuschenko@mail.ru*

*** e-mail: boris.ku4erov@gmail.com*

Статья поступила в редакцию 08.06.2019

Рассмотрены ограничения по использованию средств управления космическими аппаратами (КА), учитываемые при их распределении, к которым относятся: ограничения по одновременному использованию различных средств управления КА, ограничения по использованию отдельного средства управления КА и ограничения, обусловленные возможностями центров управления полётами КА по проведению сеансов связи. Приведено описание системы рассмотренных ограничений, учитываемых при распределении средств управления КА. Проведен анализ указанной системы. Представлена математическая постановка задачи учёта рассмотренной системы ограничений.

Ключевые слова: наземный автоматизированный комплекс управления, план распределения средств, конфликтная ситуация, электромагнитная совместимость средств управления КА, ограничения по использованию общих ресурсов.

Введение

При управлении космическими аппаратами требуется решение целого ряда задач распределения различных ресурсов [1–6]. Одной из таких задач является распределение средств управления (PCY) КА, предназначенных для передачи командно-программной информации, приёма телеметрической информации и решения ряда других задач [7, 8].

PCY КА осуществляется в условиях жестких ресурсных ограничений. К ним относятся как ограничения по распределяемому ресурсу средств управления КА, так и временные ограничения, накладываемые на оперативность формирования плана распределения средств (ПРС).

Обеспечение оперативного и качественного решения задач PCY КА требует учёта всей совокупности таких ограничений. Одним из этапов

достижения этой цели является анализ системы ограничений по использованию средств управления КА, учитываемых при их распределении.

В различных отечественных и зарубежных работах, посвященных составлению и оптимизации планов распределения средств управления КА, учитываются различные ресурсные ограничения.

В работе [9] предложена методика оценивания эффективности функционирования наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ) КА с учётом сложной системы технических, технологических и пространственно-временных ограничений, накладываемых на процесс управления КА. Отмечена сложность («невозможность») формализованного учёта всей системы технологических ограничений, накладываемых на процесс управления КА различного целевого назначения (различный состав операций управления, последовательность выполнения операций, совместимость проведения операций, их длительность и т.д.) [9]. Среди ограничений отмечены возможность (невозможность) одновременного проведения операций управления несколькими средствами по одному КА, нормативное время подготовки средств НАКУ к проведению операций управления КА, возможность последовательного проведения нескольких операций управления при нахождении КА в одной зоне радиовидимости (ЗРВ) [9]. Таким образом, в указанной работе система ограничений рассматривается в более широком смысле – ограничения технологий управления КА.

В работе [10] рассматриваются следующие ограничения, учитываемые при адаптивном планировании сеансов связи группировки малых КА с наземными станциями приёма/передачи данных: технические характеристики приёмопередающих устройств наземных станций и малых КА (для определения их совместимости), зоны радиовидимости, время наведения антенного комплекса на конкретный малый КА, время подготовки к работе программно-технических средств обработки данных, расписание работы наземных станций (например, график работы дежурной смены) [10].

Влияние особенностей КА на технологии их управления рассматривается в таких работах, как, например, [11], где проанализированы особенности пилотируемых КА, влияющие на методологию управления их полётом, в том числе ограниченность бортовых ресурсов и ограничения по располагаемым объемам внутри пилотируемых КА и допустимым массам оборудования и расходуемых компонентов [11].

В ряде работ, например в [12–15], применительно к задаче составления расписания для спутников («satellite range scheduling») рассматриваются ограничения, схожие с учитываемыми при РСУ КА ограничениями. К ним относятся: проведение сеансов связи только в рамках ЗРВ космических аппаратов средствами управления [12–14, 16]; необходимость выполнения подготовительных операций к проведению сеанса связи (время подготовки средства к проведению сеанса связи) [12, 17, 18]; возможность работы одного средства управления только с одним КА в один момент времени (включая подготовку к проведению и проведение сеанса связи) [12–19]; неисправности средств управления КА и эксплуатационные мероприятия, проводимые на них, во время которых использование средств управления для проведения сеансов связи невозможно [14].

Также в работах [12, 13] приведен ряд ограничений, отличающихся от рассматриваемых применительно к РСУ КА. Среди них можно отметить: возможность проведения только одного сеанса связи с одним КА в один момент времени [12], использование межспутникового взаимодействия только при отсутствии возможности проведения сеанса связи с помощью наземных средств управления непосредственно с требуемым КА [13].

Минимальная длительность сеанса связи, рассматриваемая в работах [12, 13] в качестве ограничения, заданного постоянной величиной, при РСУ КА учитывается в качестве требований центров управления полётами (ЦУП) КА к проведению сеансов связи, причем её значение может быть задано индивидуально для каждого сеанса. Она может задаваться в заявке на использования средств управления КА в явном виде или следовать из запрашиваемых времен начала и окончания проведения сеанса связи.

В других работах, таких как [13, 16, 19, 20], рассматриваются ограничения по времени проведения сеансов связи и по минимальной длительности сеансов, варьируемой в зависимости от решаемых при их выполнении задач. При РСУ КА они учитываются в качестве требований ЦУП КА.

Минимально необходимое число сеансов связи, рассматриваемое в работе [13] в качестве ограничения, при РСУ КА может быть учтено в целевой функции разработки плана распределения средств.

Ограничение по дистанции между КА и средством управления, рассматриваемое, например, в работе [13], при РСУ КА учитывается в исходных данных. Так, в состав наземного комплекса управ-

ления (НКУ) КА включаются только те средств управления, которые могут быть использованы для проведения сеансов связи с КА. Кроме того, зоны радиовидимости КА рассчитываются с учётом технических характеристик КА и средства управления, определяющих возможность установления радиосвязи между ними.

Постановка задачи РСУ КА с учётом ресурсных ограничений

В работах [7, 21] показана зависимость ПРС и времени его формирования от потребностей в средствах управления КА, ограничений по их использованию, решающих правил и используемых методического и программного обеспечения [7, 21]:

$$(SHD, T) = f(SAT, GS, REQ, RESTR, RULES, TOOLS), \quad (1)$$

где SHD – план распределения средств управления КА; T – время формирования ПРС; SAT – множество КА; GS – множество средств управления КА; REQ – потребности в ресурсах (средствах управления КА); $RESTR$ – ограничения по использованию ресурсов; $RULES$ – решающие правила; $TOOLS$ – методическое и программное обеспечение распределения средств управления КА [7, 21].

Для дальнейшего использования при рассмотрении учёта ограничений при РСУ КА представим заявки на использование средств управления в следующем виде [7]:

$$REQ = \{req_k\}: req_k = \{sat_i, gs_j, t_k^{begin}, t_k^{end}, t_k^{prep}, WM_k, p_k\}, \quad (2)$$

$$k = \overline{1, req_num}, i \in [1, sat_num], j \in [1, gs_num],$$

где sat_i – КА, у которого существует потребность в ресурсах; gs_j – средство управления, потребность в использовании которого существует у КА sat_i ; t_k^{begin} и t_k^{end} – соответственно запрашиваемые времена начала и окончания использования ресурса; t_k^{prep} – запрашиваемое время подготовки к использованию ресурса, во время которого распределяемый ресурс также занят; WM_k – множество запрашиваемых режимов работы средства управления КА; p_{req_k} – приоритет запроса на использование

ресурса; req_num – количество потребностей в ресурсах (заявок); sat_num – количество КА в составе группировки; gs_num – количество средств управления КА в составе НАКУ КА [7].

ПРС представим в следующем виде [7]:

$$SHD = \{task_l\}: task_l = \{sat_i, gs_j, t_l^{begin}, t_l^{end}, t_l^{prep}, WM_l, p_l\}, \quad (3)$$

$$l = \overline{1, task_num}, i \in [1, sat_num], j \in [1, gs_num],$$

где sat_i – КА, с которым запланировано проведение сеанса связи; gs_j – средство управления, запланированное для проведения сеанса связи с КА sat_i ; t_l^{begin} и t_l^{end} – соответственно запланированные времена начала и окончания сеанса связи; t_l^{prep} – запланированное время подготовки к сеансу связи, во время которого распределяемый ресурс также занят; WM_l – множество запланированных режимов работы средства управления КА; p_l – приоритет запроса на использование ресурса; $task_num$ – количество сеансов связи в ПРС [7].

Ограничения по использованию средств управления КА

Ограничения по использованию ресурсов могут быть представлены в следующем виде:

$$RESTR = \{RESTR_s, RESTR_c, RESTR_{mcc}\}, \quad (4)$$

где $RESTR_s$ – ограничения по использованию отдельного средства управления КА; $RESTR_c$ – ограничения по одновременному использованию различных средств в интересах управления как одного, так и различных КА; $RESTR_{mcc}$ – ограничения, обусловленные возможностями центров управления полётами КА по проведению сеансов связи.

Ограничения, касающиеся возможности использования отдельного средства управления КА, были рассмотрены в работах [7, 21] и могут быть представлены в следующем виде [7, 21]:

$$RESTR_s = \{VW, GCC, SO, ST, WM\}, \quad (5)$$

где VW – множество зон радиовидимости космических аппаратов средствами управления; GCC – множество НКУ отдельных КА; SO – множество эксплуатационных мероприятий на средствах уп-

равления КА; ST – состояние средств управления КА; WM – множество режимов работы, поддерживаемых отдельными средствами управления [7, 21].

Рассмотрим ограничения по одновременному использованию различных средств управления КА. Одной из причин, которой могут быть обусловлены такие ограничения, может являться электромагнитная совместимость средств управления КА при их работе в определенных режимах. Такая ситуация возможна для средств управления, расположенных достаточно близко друг к другу (например, на одном пункте эксплуатации) и работающих в определенных режимах на одних и тех же частотах.

Другой причиной ограничения по одновременному использованию различных средств управления КА может являться необходимость использовать в одно и то же время один и тот же ресурс (неразделяемый или разделяемый, но ограниченного объема). Например, в качестве такого ограничения может выступать пропускная способность каналов системы связи и передачи данных. Так, между центрами управления полётами КА и пунктом эксплуатации, на котором расположено несколько средств управления КА, может быть организован канал связи пропускной способности, недостаточной для одновременного проведения сеансов связи с использованием всех средств управления данного пункта эксплуатации в определенных режимах их работы.

Таким образом, ограничения по одновременному использованию различных средств управления КА можно представить в следующем виде:

$$RESTR_c = \{RESTR_{cf}, RESTR_{cr}\}, \quad (6)$$

где $RESTR_{cf}$ – ограничения по одновременному использованию различных средств управления КА, обусловленные электромагнитной совместимостью; $RESTR_{cr}$ – ограничения по одновременному использованию различных средств управления КА, обусловленные необходимостью использования одного и того же ресурса.

Указанные ограничения должны учитываться при РСУ КА в числе прочих ограничений.

Ограничения, обусловленные электромагнитной совместимостью

Ограничения, обусловленные электромагнитной совместимостью, в общем случае могут быть представлены в следующем виде:

$$RESTR_{cf} : freq_{l_1} \neq freq_{l_2}$$

$$\forall \left(l_1 = \overline{1, task_num}, l_2 = \overline{1, task_num}, sat_{task_{l_1}} \neq \neq sat_{task_{l_2}}, \left[t_{task_{l_1}}^{begin}, t_{task_{l_1}}^{end} \right] \cap \left[t_{task_{l_2}}^{begin}, t_{task_{l_2}}^{end} \right] \neq \emptyset \right), \quad (7)$$

где $freq_{l_1}$ и $freq_{l_2}$ – частоты работы средств управления при проведении l_1 -го и l_2 -го сеансов связи соответственно; $sat_{task_{l_1}}$ и $sat_{task_{l_2}}$ – КА, для управления которыми запланированы l_1 -й и l_2 -й сеансы связи соответственно; $t_{task_{l_1}}^{begin}$ и $t_{task_{l_1}}^{end}$ – соответственно запланированные времена начала и окончания l_1 -го сеанса связи; $t_{task_{l_2}}^{begin}$ и $t_{task_{l_2}}^{end}$ – соответственно запланированные времена начала и окончания l_2 -го сеанса связи.

При РСУ КА должна быть обеспечена возможность выявления конфликтных ситуаций, вызванных такими ограничениями, на основе данных, поступающих в орган планирования. В связи с этим ограничения по одновременному использованию различных средств управления КА, обусловленные электромагнитной совместимостью, могут быть сформулированы как наборы характеристик двух сеансов связи, приводящих к возникновению конфликтных ситуаций при РСУ КА. Представим такие ограничения в следующем виде:

$$RESTR_{cf} = restr_i^{cf} = \{restr_i^{cf_1}, restr_i^{cf_2}, same_location_i\}, \quad (8)$$

$$i = \overline{1, restr_cf_num};$$

$$restr_i^{cf_1} = \{SAT_i^{ref_1}, BAND_i^{ref_1}, GS_i^{ref_1}, GS_MODEL_i^{ref_1}, WM_i^{ref_1}, wm_cond_i^{ref_1}\}; \quad (9)$$

$$restr_i^{cf_2} = \{SAT_i^{ref_2}, BAND_i^{ref_2}, GS_i^{ref_2}, GS_MODEL_i^{ref_2}, WM_i^{ref_2}, wm_cond_i^{ref_2}\}, \quad (10)$$

где $restr_i^{cf_1}$ и $restr_i^{cf_2}$ – соответственно наборы характеристик k_1 -й и k_2 -й заявок на использование

средств управления КА для проведения сеансов связи, приводящих к возникновению конфликтной ситуации при РСУ КА по причине i -го ограничения, обусловленного электромагнитной совместимостью средств управления КА; $SAT_i^{ref_1}$ и $SAT_i^{ref_2}$ – множества КА, одновременное проведение сеансов связи для управления которыми подпадает под i -е ограничение; $BAND_i^{ref_1}$ и $BAND_i^{ref_2}$ – множества диапазонов частот каналов информационного обмена между КА и средствами управления, одновременная работа в которых подпадает под i -е ограничение; $GS_i^{ref_1}$ и $GS_i^{ref_2}$ – множества средств управления, одновременная работа которых подпадает под i -е ограничение; $GS_MODEL_i^{ref_1}$ и $GS_MODEL_i^{ref_2}$ – множества моделей средств управления, одновременная работа которых подпадает под i -е ограничение; $WM_i^{ref_1}$ и $WM_i^{ref_2}$ – множества режимов работы средств управления, выполнение которых подпадает под i -е ограничение; $wm_cond_i^{ref_1}$ и $wm_cond_i^{ref_2}$ – условия (конъюнкция или дизъюнкция), применяемые к соответствующим множествам режимов работы при определении подпадания сеанса под i -е ограничение; $same_location_i$ – признак распространения ограничения только на средства управления, размещенные на одном пункте эксплуатации; $restr_cf_num$ – количество ограничений по одновременному использованию различных средств управления КА, обусловленных электромагнитной совместимостью.

Следует учитывать, что для некоторых ограничений часть характеристик может быть не задана. Например, можно указать только множество средств управления либо только множество моделей средств управления, которых касается задаваемое ограничение. Однако, чтобы ограничение имело смысл, должно выполняться следующее условие:

$$\left(GS_i^{ref_j} \neq \emptyset \right) \vee \left(GS_MODEL_i^{ref_j} \neq \emptyset \right) \vee \left(SAT_i^{ref_j} \neq \emptyset \right) \vee \left(i = \overline{1, restr_cf_num}, j = \overline{1, 2} \right). \quad (11)$$

Таким образом, ограничения могут касаться как определенных средств управления КА, так и

быть общими для некоторых их моделей. Кроме того, некоторые ограничения могут быть обусловлены особенностями проведения сеансов связи с определенными КА и в некоторых случаях могут не зависеть непосредственно от характеристик используемых средств управления КА.

Заметим, что часть характеристик сеансов связи, приведенных в выражениях (9)–(10), не входит в состав заявок на использование средств управления КА, поступающих в орган планирования. К таким характеристикам относятся диапазоны частот, используемых при проведении сеансов связи, и модели средств управления. Однако они могут быть получены из нормативно-справочной информации на основании данных поступивших заявок. Так, указанные диапазоны частот определяются характеристиками бортовой аппаратуры (БА) командно-измерительной системы (КИС) КА, а значит, могут быть получены из нормативно-справочной информации по КА, для которого запрашивается использование средств управления:

$$sat_{req_k} \Rightarrow band_{req_k}, \quad (12)$$

где sat_{req_k} – КА, для управления которым запрошено проведение k -го сеанса связи; $band_{req_k}$ – диапазон работы БА КИС космического аппарата, для управления которым запрошено проведение k -го сеанса связи.

При подаче заявки в орган планирования указывается запрашиваемое средство управления КА, что позволяет однозначно определить модель средства для дальнейшего использования при учёте ограничений по электромагнитной совместимости:

$$gs_{req_k} \Rightarrow gs_model_{req_k}, \quad (13)$$

где gs_{req_k} – средство управления, запрошенное для проведения k -го сеанса связи; $gs_model_{req_k}$ – модель средства управления, запрошенного для проведения k -го сеанса связи.

Возникновение конфликтной ситуации при РСУ КА, обусловленной ограничениями (8), определяется одновременным выполнением всех следующих условий:

$$\left[t_{req_{k_1}}^{begin}, t_{req_{k_1}}^{end} \right] \cap \left[t_{req_{k_2}}^{begin}, t_{req_{k_2}}^{end} \right] \neq \emptyset; \quad (14)$$

$$\left(\left(sat_{req_{k_1}} \in SAT_i^{ref_1} \right) \vee \left(SAT_i^{ref_1} = \emptyset \right) \right) \wedge \left(\left(sat_{req_{k_2}} \in SAT_i^{ref_2} \right) \vee \left(SAT_i^{ref_2} = \emptyset \right) \right); \quad (15)$$

$$\left(\left(gs_{req_{k_1}} \in GS_i^{ref_1} \right) \vee \left(GS_i^{ref_1} = \emptyset \right) \right) \wedge \left(\left(gs_{req_{k_2}} \in GS_i^{ref_2} \right) \vee \left(GS_i^{ref_2} = \emptyset \right) \right); \quad (16)$$

$$\left(\left(band_{req_{k_1}} \in BAND_i^{ref_1} \right) \vee \left(BAND_i^{ref_1} = \emptyset \right) \right) \wedge \left(\left(band_{req_{k_2}} \in BAND_i^{ref_2} \right) \vee \left(BAND_i^{ref_2} = \emptyset \right) \right); \quad (17)$$

$$\left(\left(gs_model_{req_{k_1}} \in GS_MODEL_i^{ref_1} \right) \vee \left(GS_MODEL_i^{ref_1} = \emptyset \right) \right) \wedge \left(\left(gs_model_{req_{k_2}} \in GS_MODEL_i^{ref_2} \right) \vee \left(GS_MODEL_i^{ref_2} = \emptyset \right) \right); \quad (18)$$

$$\left[\left(\left(WM_{req_{k_1}} \cap WM_i^{ref_1} \neq \emptyset \right) \wedge \left(wm_cond_i^{ref_1} = OR \right) \right) \vee \left(\left(WM_i^{ref_1} \subseteq WM_{req_{k_1}} \right) \wedge \left(wm_cond_i^{ref_1} = AND \right) \right) \vee \left(WM_i^{ref_1} = \emptyset \right) \right] \wedge \left[\left(\left(WM_{req_{k_2}} \cap WM_i^{ref_2} \neq \emptyset \right) \wedge \left(wm_cond_i^{ref_2} = OR \right) \right) \vee \left(\left(WM_i^{ref_2} \subseteq WM_{req_{k_2}} \right) \wedge \left(wm_cond_i^{ref_2} = AND \right) \right) \vee \left(WM_i^{ref_2} = \emptyset \right) \right]; \quad (19)$$

$$\left[\left(\left(gs_location_{req_{k_1}} = gs_location_{req_{k_2}} \right) \vee \left(\left(GS_i^{ref_2} \neq \emptyset \right) \wedge \left(GS_i^{ref_2} \neq \emptyset \right) \right) \right) \wedge \left(same_location_i = true \right) \right] \vee \left(same_location_i = false \right), \quad (20)$$

где $gs_{req_{k_1}}$ и $gs_{req_{k_2}}$ – средства управления, запрошенные для проведения k_1 -го и k_2 -го сеансов связи соответственно; $band_{req_{k_1}}$ и $band_{req_{k_2}}$ – диапазоны работы бортовой аппаратуры командно-измерительных систем КА, для управления которыми запрошены k_1 -й и k_2 -й сеансы связи соответственно; $gs_model_{req_{k_1}}$ и $gs_model_{req_{k_2}}$ – модели средств управления, запрошенные для проведения k_1 -го и k_2 -го сеансов связи соответственно; $WM_{req_{k_1}}$ и $WM_{req_{k_2}}$ – множества режимов работы, запрошенные для выполнения при проведении k_1 -го и k_2 -го сеансов связи соответственно; $gs_location_{req_{k_1}}$ и $gs_location_{req_{k_2}}$ – пункты эксплуатации средств управления, запрошенных для проведения k_1 -го и k_2 -го сеансов связи соответственно.

Заметим, что, как видно из выражения (19), когда в описании ограничения (выражения (8)–(10)) к множеству режимов работы средства управления применена дизъюнкция, то хотя быть один из режимов работы, запрошенных для выполнения при проведении сеанса связи, должен совпадать с одним из режимов, приведенных в описании ограничения. Когда в описании ограничения (выражения (8)–(10)) к множеству режимов работы применена конъюнкция, то для возникновения конфликтной ситуации необходимо, чтобы были запрошены все режимы работы, приведенные в описании ограничения.

Из выражения (20) видно, что признак распространения ограничения только на средства управления, размещенные на одном пункте эксплуатации, игнорируется в случае задания ограничения с помощью множеств конкретных средств управления КА.

Таким образом, конфликтная ситуация по причине ограничений (8) возникает при РСУ КА, когда характеристики заявок на использование средств управления КА (выражение (2)) совпадают с характеристиками, приведенными в описании ограничений (выражения (9), (10)).

Ограничения, обусловленные необходимостью использования общих ресурсов

Ограничения, обусловленные необходимостью использования одного и того же ресурса, в общем виде могут быть представлены следующим образом:

$$RESTR_{cr} = \{RESTR_{crus}, RESTR_{crs}\}, \quad (21)$$

где $RESTR_{crus}$ – ограничения по одновременному использованию различных средств управления КА, обусловленные необходимостью использования одного и того же неразделяемого ресурса; $RESTR_{crs}$ – ограничения, обусловленные необходимостью использования одного и того же разделяемого ресурса.

Множество неразделяемых ресурсов, невозможность одновременного использования которых является ограничением, которое должно учитываться при РСУ КА, можно представить в следующем виде:

$$RESTR_{crus} : RES^{us} = \{res_j^{us}\}, \quad (22)$$

$$j = \overline{1, res_us_num},$$

где res_j^{us} – j -й неразделяемый ресурс; res_us_num – количество неразделяемых ресурсов.

Множество потребностей в разделяемых ресурсах, возникающих при использовании средств управления КА, можно представить в следующем виде:

$$DRUS = drus_i = \{GS_i, GS_MODEL_i, res_j^{us}\}, \quad (23)$$

$$i = \overline{1, drus_num}, j \in [1, res_us_num],$$

где $DRUS$ – множество потребностей в неразделяемых ресурсах; $drus_i$ – i -я потребность в неразделяемых ресурсах; GS_i – множество средств управления, при использовании которых возникает i -я потребность в ресурсе res_j^{us} ; GS_MODEL_i – множество моделей средств управления, при использовании которых возникает i -я потребность в ресурсе res_j^{us} ; $drus_num$ – количество потребностей в неразделяемых ресурсах.

Чтобы описание потребности (23) имело смысл, должно выполняться следующее условие:

$$(GS_i \neq \emptyset) \vee (GS_MODEL_i \neq \emptyset) \quad (24)$$

$$\forall (i = \overline{1, drus_num}).$$

Возникновение конфликтной ситуации при РСУ КА, обусловленной ограничениями по использованию неразделяемых ресурсов, определя-

ется одновременным выполнением всех следующих условий:

$$\left[t_{req_{k_1}}^{begin}, t_{req_{k_1}}^{end} \right] \cap \left[t_{req_{k_2}}^{begin}, t_{req_{k_2}}^{end} \right] \neq \emptyset; \quad (25)$$

$$\left(\left(gs_{req_{k_1}} \in GS_{drs_{i_1}} \right) \vee \left(gs_mod\ el_{req_{k_1}} \in GS_MODEL_{drs_{i_1}} \right) \right) \wedge$$

$$\wedge \left(\left(gs_{req_{k_2}} \in GS_{drs_{i_2}} \right) \vee \left(gs_mod\ el_{req_{k_2}} \in GS_MODEL_{drs_{i_2}} \right) \right)$$

$$\forall \left(res_{drus_{i_1}} = res_{drus_{i_2}} \right), \quad (26)$$

где

$$i_1 \in [1, res_us_num]; \quad i_2 \in [1, res_us_num];$$

$$k_1 \in [1, req_num]; \quad k_2 \in [1, req_num].$$

Таким образом, наличие потребности в использовании неразделяемого ресурса делает невозможным одновременное использование заданного множества средств управления КА – только одно средство из такого множества может применяться в один момент времени.

Рассмотрим ограничения, обусловленные необходимостью использования одного и того же разделяемого ресурса. Так, множество разделяемых ресурсов может быть представлено в следующем виде:

$$RESTR_{crs} : RES^s = \{res_j^s, cap_j\}, \quad (27)$$

$$j = \overline{1, res_s_num},$$

где RES^s – множество разделяемых ресурсов; res_j^s – j -й разделяемый ресурс; cap_j – доступный объем j -го разделяемого ресурса; res_s_num – количество разделяемых ресурсов.

Множество потребностей в разделяемых ресурсах, возникающих при использовании средств управления КА, можно представить в следующем виде:

$$DRS = drs_i = \{GS_i, GS_MODEL_i, res_j^s, vol_j\}, \quad (28)$$

$$i = \overline{1, drs_num}, j \in [1, res_s_num],$$

где DRS – множество потребностей в разделяемых ресурсах; drs_i – i -я потребность в разделяемых ресурсах; GS_i – множество средств управления, при использовании которых возникает i -я потребность в ресурсе res_j^s ; GS_MODEL_i – множество моделей средств управления, при использовании которых возникает i -я потребность в ресурсе res_j^s ; vol_i – требуемый объём ресурса res_j^s , соответствующий i -й потребности; drs_num – количество потребностей в разделяемых ресурсах.

Чтобы описание потребности (28) имело смысл, должно выполняться следующее условие (аналогичное условию (24) для неразделяемых ресурсов):

$$(GS_i \neq \emptyset) \vee (GS_MODEL_i \neq \emptyset) \quad \forall (i = \overline{1, drs_num}). \quad (29)$$

При этом требуемый объём ресурса может быть задан статически или может определяться динамически в зависимости от характеристик заявки на использование средств управления КА. Тогда потребность в использовании j -го разделяемого ресурса, необходимого для обеспечения возможности выполнения k -й заявки на использование средств управления КА, можно представить в следующем виде:

$$vol_{req_k}^{res_j^s} =$$

$$= \sum_{i=1}^{drs_num} f(vol_{drs_i}, req_k) \left[\begin{array}{l} \left(\left(\left(gs_{req_k} \in GS_{drs_i} \right) \vee \right. \right. \\ \left. \left. \vee \left(gs_model_{req_k} \in \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \left(\in GS_MODEL_{drs_i} \right) \right) \right) \wedge \right. \\ \left. \left. \left(res_{drs_i} = res_j^s \right) \right) \right] \\ k = \overline{1, req_num}, j = \overline{1, res_s_num}. \quad (30)$$

Таким образом, ограничения, обусловленные потребностями в использовании разделяемых ресурсов, с учётом выражений (27), (28) и (30) можно представить в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^{drs_num} \left[vol_{req_k}^{res_j^s} \left| \left(\left(res_{drs_i} = res_j^s \right) \wedge \left(t \in \left[t_{req_k}^{begin}, t_{req_k}^{end} \right] \right) \right) \right] \leq \leq cap_{res_j^s} \quad (31)$$

$$\forall (t \in [t_{schb}, t_{sche}], j = \overline{1, res_s_num}, k = \overline{1, req_num}),$$

где t_{schb} , t_{sche} – соответственно время начала и время окончания горизонта планирования. Так как РСУ КА осуществляется на суточном интервале, то данные времена будут соответствовать времени начала и времени окончания суток реализации ПРС.

Суть выражения (31) заключается в следующем: сумма объёмов потребностей по каждому ресурсу на любой момент времени не должна превышать доступный объём этого ресурса. Нарушение данного условия приводит к возникновению конфликтной ситуации при РСУ КА.

Ограничения, обусловленные возможностями ЦУП КА по проведению сеансов связи

Возможности центров управления полётами КА по проведению сеансов связи, приводящие к возникновению ограничений, подлежащих учёту при РСУ КА, могут рассматриваться в качестве характеристик ЦУП КА:

$$RESTR_{mcc} : MCC = \{mcc_j, seans_max_num_j\}, \quad j = \overline{1, mcc_num}, \quad (32)$$

где MCC – множество центров управления полётами КА; mcc_j – j -й ЦУП КА, характеристики которого приведены; $seans_max_num_j$ – максимально допустимое количество сеансов связи, проводимых одновременно j -м ЦУП КА; mcc_num – количество ЦУП КА.

Для учёта данного ограничения при РСУ КА необходимы сведения о том, какими КА управляет каждый ЦУП КА. Отражающее это выражение можно представить в следующем виде:

$$MCC^{SAT} = \{mcc_{ij}^{sat}\} : mcc_{ij}^{sat} = \begin{cases} 1 - \text{если } sat_i \text{ управляется из ЦУП КА } mcc_j, \\ 0 - \text{в другом случае,} \end{cases} \quad (33)$$

$$i = \overline{1, sat_num}, j = \overline{1, mcc_num},$$

где sat_num – количество КА.

При этом любой КА управляется только из одного ЦУП КА, что можно представить в виде следующего выражения:

$$(\forall i \in [1, sat_num]) \sum_{j=1}^{mcc_num} mcc_{ij}^{sat} = 1. \quad (34)$$

Тогда, с учётом представленных выше выражений, ограничение, обусловленное возможностями ЦУП КА по одновременному проведению нескольких сеансов связи, можно представить в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^{sat_num} \left[mcc_{ij}^{sat} \left((sat_{req_k} = sat_i) \wedge (t \in [t_{req_k}^{begin}, t_{req_k}^{end}]) \right) \right] \leq seans_max_num_j \quad (35)$$

$$\forall (t \in [t_{schb}, t_{sche}], j = \overline{1, mcc_num}, k = \overline{1, req_num}).$$

Суть представленного выражения заключается в следующем: количество сеансов связи, проводимых ЦУП КА в любой момент времени, не должно превышать соответствующие возможности ЦУП КА.

Выводы

Рассмотренные ограничения образуют систему ограничений по использованию средств управления КА, учитываемых при РСУ КА. Схематичное представление указанной системы ограничений представлено на рисунке [8].

Показано, что в такую систему ограничений должны входить ограничения как по использованию отдельных средств управления КА, так и по

их совместному использованию, а также ограничения, обусловленные характеристиками ЦУП КА.

Предложена математическая постановка задачи учёта рассмотренной системы ограничений при РСУ КА, которая может быть использована при дальнейшем развитии методического обеспечения РСУ КА.

Библиографический список

1. Fliege J., Kaparis K., Khosravi B. Operations research in the space industry // European Journal of Operational Research. 2012. Vol. 217. No. 2, pp. 233-240. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.06.035
2. Vazquez A.J., Erwin R.S. On the tractability of satellite range scheduling // Optimization Letters. 2015. Vol. 9. No. 2, pp. 311-327. DOI: 10.1007/s11590-014-0744-8
3. Дарных В.В., Малышев В.В., Усовик И.В. Многокритериальная оптимизация эффективности целевого функционирования орбитальных группировок систем дистанционного зондирования Земли на основе оперативного планирования // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 5. С. 37-52.
4. Скобелев П.О. Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития // Информационные технологии. 2013. № S1. С. 1-32.
5. Жигастова О.К., Почукаев В.Н. Методика автоматизированного планирования полёта автоматических околоземных космических аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 3. С. 97-103.
6. Жигастова О.К., Почукаев В.Н. Язык разработки плана полёта, составляемого автоматизированным способом для автоматических космических аппара-



- тов // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С. 136-146.
7. Кучеров Б.А. Постановка задачи оптимизации распределения средств управления космическими аппаратами в условиях ресурсных ограничений // Информационно-технологический вестник. 2018. № 4(18). С. 32-43.
 8. Кучеров Б.А. Система ограничений по использованию ресурсов, учитываемых при распределении средств управления космическими аппаратами // Эволюционные процессы информационных технологий: сборник трудов по материалам 4-й международной научно-технической конференции 5 апреля 2019 г. М.: Научный консультант, 2019. С. 43-47.
 9. 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>
 10. Скобелев П.О., Травин В.С., Жилиев А.А., Симонова Е.В., Иванов А.Б. Мультиагентная технология адаптивного планирования сеансов связи группировки малых космических аппаратов с наземными станциями // Информационные технологии в управлении: сборник трудов 7-й Российской мультikonференции по проблемам управления (ИТУ-2014). Санкт-Петербург, 07-09 октября 2014. СПб.: Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. С. 701-709.
 11. Соловьев В.А., Любинский В.Е., Матюшин М.М. Проблемы управления полетами пилотируемых космических комплексов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2013. № 3(92). С. 39-54.
 12. Yuqing L., Rixin W., Minqiang X. Satellite range scheduling with the priority constraint: An improved genetic algorithm using a station ID encoding method // Chinese Journal of Aeronautics. 2015. Vol. 28. No. 3, pp. 789-803. DOI: 10.1016/j.cja.2015.04.012
 13. Li Z., Li J., Mu W. Space-Ground TT&C Resources Integrated Scheduling Based on the Hybrid Ant Colony Optimization // Proceedings of the 28th Conference of Spacecraft TT&C Technology in China: Openness, Integration and Intelligent Interconnection. ? Singapore: Springer Singapore, 2018, pp. 179-196. DOI: 10.1007/978-981-10-4837-1_15
 14. Barbulescu L., Howe A., Whitley D. AFSCN scheduling: How the problem and solution have evolved // Mathematical and Computer Modelling. 2006. Vol. 43. No. 9-10, pp. 1023-1037. DOI: 10.1016/j.mcm.2005.12.004
 15. Vazquez R., Perea F., Galán Vioque J. Resolution of an Antenna-Satellite assignment problem by means of Integer Linear Programming // Aerospace Science and Technology. 2014. Vol. 39, pp. 567-574. DOI: 10.1016/j.ast.2014.06.002
 16. Song Y.-J., Zhang Z.-S., Song B.-Y., Chen Y.-W. Improved Genetic Algorithm with Local Search for Satellite Range Scheduling System and its Application in Environmental monitoring // Sustainable Computing: Informatics and Systems. 2019. Vol. 21, pp. 19-27. DOI: 10.1016/j.suscom.2018.11.009
 17. Lee J., Wang S., Chung D., Hyun C., Choi S., Ko K., Ahn H., Jung O. Visibility conflict resolution for multiple antennae and multi-satellites via genetic algorithm // 2013 IEEE Aerospace Conference (Big Sky, Montana, USA, 2-9 March 2013), 10 p. DOI: 10.1109/AERO.2013.6496849
 18. Marinelli F., Nocella S., Rossi F., Smriglio S. A Lagrangian heuristic for satellite range scheduling with resource constraints // Computers & Operations Research. 2011. Vol. 38. No. 11, pp. 1572-1583. DOI: 10.1016/j.cor.2011.01.016
 19. Xhafa F., Sun J.Z., Barolli A., Biberaj A., Barolli L. Genetic algorithms for satellite scheduling problems // Mobile Information Systems. 2012. Vol. 8. No. 4, pp. 351-377. DOI: 10.3233/MIS-2012-00153
 20. Barbulescu L., Howe A.E., Watson J.P., Whitley L.D. Satellite Range Scheduling: A Comparison of Genetic, Heuristic and Local Search // Parallel Problem Solving from Nature (PPSN VII). – Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2002, pp. 611-620. DOI: 10.1007/3-540-45712-7_59
 21. Kucherov B., Přibyl O. Increasing efficiency of ground stations scheduling for sustainable satellite based services // Proceedings of 2018 Smart City Symposium Prague (SCSP). Prague, Czech Republic. 24-25 May 2018. DOI: 10.1109/SCSP.2018.8402657

ANALYSING THE SYSTEM OF RESTRICTIONS ON SPACECRAFT CONTROL MEANS APPLICATION, ACCOUNTED FOR WHILE THEIR SCHEDULING

Artyushenko V.M.* , Kucherov B.A.**

University of Technology

42, Gagarin str., Korolev, Moscow region, 141070, Russia

* e-mail: artuschenko@mail.ru

** e-mail: boris.ku4erov@gmail.com

Abstract

A number of tasks of various resources scheduling should be solved to ensure spacecrafts mission control. One of such tasks is tracking, telemetry and command (TT&C) ground stations scheduling. That task is performed under strict resource restrictions. These restrictions include both restrictions on the resource being scheduled and temporal restrictions being imposed on the operativeness of the ground stations distribution plan developing. To ensure operative and qualitative TT&C, accounting for all these restrictions is required.

The restrictions on employing ground stations include the ones on applying separate ground stations as well as restrictions on various ones simultaneous employing. Restrictions stipulated by mission control centers capabilities to perform communication sessions with spacecraft are also a part of the restrictions on TT&C ground stations application.

The restrictions on employing a separate ground station include radio-visibility zones, a set of ground stations network for each spacecraft, a set of service operations to be done for ground station (during which it cannot be used to perform communication sessions with spacecraft) and a set of operation modes supported by each ground station. The restrictions on simultaneous application of different ground stations include ones caused by electromagnetic compatibility and restrictions caused by necessity of employing same resources. The restrictions caused by electromagnetic compatibility can be defined through the sets of two communication sessions characteristics, which cannot be performed simultaneously. These definitions can be used to identify conflict situations while TT&C ground stations scheduling. The resources which simultaneous application may be limited can be sharable or non-sharable. Demands for such resources can be associated with ground stations or their models. It will allow, in its turn, identify conflict situations while ground stations scheduling. Another restriction, which should be regarded while identifying conflict situations during ground stations scheduling, is the maximal

number of communication sessions, which each mission control center can perform concurrently. The presented restrictions can be considered as the system of resource restrictions to be accounted for while TT&C ground stations scheduling. The proposed mathematical task formulation of accounting for the system of restrictions can be employed in future development of methodical support for ground stations scheduling.

Keywords: ground-based automated control complex, schedule of means distribution, conflict situation, electromagnetic compatibility of spacecraft control means, restrictions on shared resources employing.

References

1. Fliege J., Kaparis K., Khosravi B. Operations research in the space industry. *European Journal of Operational Research*, 2012, vol. 217, no. 2, pp. 233-240. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.06.035
2. Vazquez A.J., Erwin R.S. On the tractability of satellite range scheduling. *Optimization Letters*, 2015, vol. 9, no. 2, pp. 311-327. DOI: 10.1007/s11590-014-0744-8
3. Darnopykh V.V., Malyshev V.V., Usovik I.V. Multi-criteria optimization of efficiency of earth remote sensing systems constellations target functioning on the basis of operative planning. *Aerospace MAI Journal*, 2014, vol. 21, no. 5, pp. 37-52.
4. Skobelev P.O. *Informatsionnye tekhnologii*, 2013, no. S1, pp. 1-32.
5. Zhigastova O.K., Pochukayev V.N. Method of automated planning of automatic near-Earth spacecrafts. *Aerospace MAI Journal*, 2012, vol. 19, no. 3, pp. 97-103.
6. Zhigastova O.K., Pochukayev V.N. Flight plan development language allowing automatic flight planning for automated spacecraft. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 136-146.
7. Kucherov B.A. *Informatsionno-tekhnologicheskii vestnik*, 2018, no. 4(18), pp. 32-43.
8. Kucherov B.A. *Materialy IV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (05 April 2019) "Evolyutsionnye protsessy informatsionnykh tekhnologii"*.

- Sbornik statei*. Moscow, Nauchnyi konsul'tant, 2019, pp. 43-47.
9. Kolpin M.A., Protsenko P.A., Slashchev A.V. *Trudy MAI*, 2017, no. 92. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=77144>
 10. Skobelev P.O., Travin V.S., Zhilyaev A.A., Simonova E.V., Ivanov A.B. *Materialy VII Rossiiskoi mul'tikonferentsii po problemam upravleniya ITU-2014 (Saint Petersburg, 07-09 October 2014) "Informatsionnye tekhnologii v upravlenii"*. *Sbornik statei*. St. Petersburg, Kontsern "TsNII "Elektropribor", 2014, pp. 701-709.
 11. Solov'ev V.A., Lyubinskii V.E., Matyushin M.M. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie*, 2013, no. 3(92), pp. 39-54.
 12. Yuqing L., Rixin W., Minqiang X. Satellite range scheduling with the priority constraint: An improved genetic algorithm using a station ID encoding method. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, vol. 28, no. 3, pp. 789-803. DOI: 10.1016/j.cja.2015.04.012
 13. Li Z., Li J., Mu W. Space-Ground TT&C Resources Integrated Scheduling Based on the Hybrid Ant Colony Optimization. *Proceedings of the 28th Conference of Spacecraft TT&C Technology in China: Openness, Integration and Intelligent Interconnection*. Singapore, Springer Singapore, 2018, pp. 179-196. DOI: 10.1007/978-981-10-4837-1_15
 14. Barbulescu L., Howe A., Whitley D. AFSCN scheduling: How the problem and solution have evolved. *Mathematical and Computer Modelling*, 2006, vol. 43, no. 9-10, pp. 1023-1037. DOI: 10.1016/j.mcm.2005.12.004
 15. Vazquez R., Perea F., Galán Vioque J. Resolution of an Antenna-Satellite assignment problem by means of Integer Linear Programming. *Aerospace Science and Technology*, 2014, vol. 39, pp. 567-574. DOI: 10.1016/j.ast.2014.06.002
 16. Song Y.-J., Zhang Z.-S., Song B.-Y., Chen Y.-W. Improved Genetic Algorithm with Local Search for Satellite Range Scheduling System and its Application in Environmental monitoring. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2019, vol. 21, pp. 19-27. DOI: 10.1016/j.suscom.2018.11.009
 17. Lee J., Wang S., Chung D., Hyun C., Choi S., Ko K., Ahn H., Jung O. Visibility conflict resolution for multiple antennae and multi-satellites via genetic algorithm. *IEEE Aerospace Conference (Big Sky, Montana, USA, 2-9 March 2013)*, 10 p. DOI: 10.1109/AERO.2013.6496849
 18. Marinelli F., Nocella S., Rossi F., Smriglio S. A Lagrangian heuristic for satellite range scheduling with resource constraints. *Computers & Operations Research*, 2011, vol. 38, no. 11, pp. 1572-1583. DOI: 10.1016/j.cor.2011.01.016
 19. Xhafa F., Sun J.Z., Barolli A., Biberaj A., Barolli L. Genetic algorithms for satellite scheduling problems. *Mobile Information Systems*, 2012, vol. 8, no. 4, pp. 351-377. DOI: 10.3233/MIS-2012-00153
 20. Barbulescu L., Howe A.E., Watson J.P., Whitley L.D. Satellite Range Scheduling: A Comparison of Genetic, Heuristic and Local Search. *Parallel Problem Solving from Nature (PPSN VII)*. Berlin, Springer Berlin Heidelberg, 2002, pp. 611-620. DOI: 10.1007/3-540-45712-7_59
 21. Kucherov B., Přibyl O. Increasing efficiency of ground stations scheduling for sustainable satellite based services. *Proceedings of 2018 Smart City Symposium Prague (SCSP). Prague, Czech Republic. 24-25 May 2018*. DOI: 10.1109/SCSP.2018.8402657