

УДК 621.394.6 EDN IPETDE

Идентификация трансформации управляющих воздействий при их логическом анализе в бортовом комплексе управления космического аппарата

Г. Н. Мальцев, *д. т. н., профессор, vka@mil.ru*

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Российская Федерация

С. А. Матвеев, *к. т. н., vka@mil.ru*

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены принципы идентификации трансформации управляющих воздействий, принимаемых космическим аппаратом по радиоканалу управления, при их логическом анализе в бортовом комплексе управления. Введены и формализованы две группы признаков, позволяющих идентифицировать трансформацию принимаемых или поступающих на исполнение команд управления, связанные с соответствием управляющего воздействия логической последовательности управляющих воздействий выполняемому технологическому циклу управления и текущему функциональному состоянию бортовой аппаратуры космического аппарата. Признаки идентификации трансформации команд управления формализованы в виде булевых функций проверки их соответствия разрешенной последовательности управляющих воздействий и текущему функциональному состоянию бортовой аппаратуры при выполнении штатных технологических циклов управления космическим аппаратом. Проанализированы возможности идентификации трансформации управляющих воздействий при их логическом анализе с использованием введенных признаков. При допущениях о статистических свойствах множества команд управления, передаваемых на космический аппарат, определены условия, при которых на основании анализа последовательности управляющих воздействий обеспечивается однозначное определение трансформации команды управления и остаточная вероятность трансформации команды управления после анализа ее соответствия текущему функциональному состоянию бортовой аппаратуры космического аппарата.

Ключевые слова: управление космическим аппаратом, трансформация управляющих воздействий, технологический цикл управления, логический анализ команд управления

Identification of the Transformation of Control Actions During Their Logical Analysis in the Onboard Spacecraft Control Complex

G. N. Maltsev, *Dr. Sci. (Engineering), Professor, vka@mil.ru*

Mozhaysky Military Space Academy, St. Petersburg, Russian Federation

S. A. Matveev, *Cand. Sci. (Engineering), vka@mil.ru*

Mozhaysky Military Space Academy, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. This article discusses a new principle of identification of transformation of control actions received by a spacecraft via the radio control channel, during their logical analysis by the onboard control complex. Two groups of features have been introduced and formalized that allow identifying the transformation of control commands being received or received for execution, related to the correspondence of the control action to the logical sequence of control actions for the technological control cycle being performed and the current functional state of the onboard equipment of the spacecraft. The signs of identification of the transformation of control commands are formalized in the form of Boolean functions for checking their compliance with the permitted sequence of control actions and the current functional state of the onboard equipment when performing standard technological control cycles of the spacecraft. The possibilities of identifying the transformation of control actions in their logical analysis using the introduced features are analyzed. With assumptions about the statistical properties of the set of control commands transmitted to the spacecraft, the conditions are determined under which, based on the analysis of the sequence of control actions, an unambiguous definition of the transformation of the control command is provided, as well as the residual probability of the transformation of the control command after analyzing its compliance with the current functional state of the onboard equipment of the spacecraft.

Keywords: spacecraft control, transformation of control actions, technological control cycle, logical analysis of control commands

Введение

Управление космическим аппаратом (КА) представляет собой процесс целенаправленного изменения состояния бортовой аппаратуры КА для успешного применения КА по назначению. Обеспечение нормального функционирования КА в орбитальном полете и их применение по назначению требует регулярного проведения радиоэлектронными средствами наземного комплекса управления (НКУ) сеансов управления (СУ) для передачи на КА по радиоканалам управляющих воздействий. В большинстве случаев управляющие воздействия передаются на КА в форме функциональных и числовых команд и программ управления, объединяемых понятием командно-программной информации [1, 2]. Особенностью передачи на КА командно-программной информации являются высокие требования к достоверности передачи для обеспечения устойчивости управления КА. Это обусловлено тем, что в логику управления КА заложено выполнение в бортовом комплексе управления (БКУ) всех управляющих воздействий, принятых по радиоканалу и удовлетворяющих принятым критериям достоверности [3, 4].

Будем понимать под командами управления функциональные и числовые команды, передаваемые на КА по отдельности, а также команды, входящие в состав передаваемых на КА программ управления. Команды, передаваемые на КА по отдельности, выполняются непосредственно после приема, а программы управления записываются в бортовое запоминающее устройство, и входящие в их состав команды выполняются в моменты времени, задаваемые программой управления. Влияние помех в радиоканалах и другие дестабилизирующие факторы могут приводить к искажению принимаемых на КА команд и их трансформации в ложные команды [5]. Опыт решения задач управления КА показывает, что нештатные ситуации приема и выполнения на КА ложных команд управления могут возникать сравнительно редко, но цена потерь при этом может быть очень высокой. Следствием выполнения ложных команд управления может быть перевод бортовой аппаратуры КА в нерасчетный режим функционирования, срыв решения задач управления КА вплоть

до потери управления и невозможности применения КА по целевому назначению. Для исключения выполнения ложных команд управления, вызванной их трансформацией при приеме, необходимо проведение в БКУ логического анализа принятых управляющих воздействий. В настоящей статье рассмотрены принципы такого логического анализа, основанного на учете разрешенных последовательностей и сочетаний команд управления в выполняемом технологическом цикле управления (ТЦУ) КА.

Содержательная постановка задачи

Все управляющие воздействия, передаваемые на КА радиоэлектронными средствами НКУ, направлены на поддержание требуемого состояния и параметров функционирования бортовой аппаратуры и при планировании СУ проходят верификацию на соответствие выполняемому ТЦУ КА, в том числе с использованием моделей функционирования КА [6, 7]. При этом в логику функционирования БКУ заложено проведение анализа достоверности принятых управляющих воздействий на двух уровнях: на канальном уровне за счет использования обратной связи и кодов, обнаруживающих и исправляющих ошибки [1, 6], и на уровне представления за счет сопоставления принятых команд управления с перечнем всех разрешенных команд управления для данного типа КА [3, 4]. Однако для исключения возможности выполнения искаженных команд управления, являющихся разрешенными для данного типа КА, этого оказывается недостаточно, и необходимо проведение в БКУ дополнительного логического анализа всех принимаемых управляющих воздействий, позволяющего идентифицировать трансформацию одной разрешенной команды управления в другую разрешенную команду управления и блокировать ее выполнение. Алгоритмизация такого логического анализа для его реализации в БКУ требует формализации признаков достоверности принятой или поступающей на исполнение команды управления как признаков ее принадлежности к множеству команд управления, разрешенных в текущем техническом состоянии и режиме функционирования бортовой аппаратуры КА.

С учетом наличия для каждого КА определенной технологической структуры процесса управления и соответствия передаваемых на КА средствами НКУ управляющих воздействий ТЦУ, установленному для КА в текущем режиме его применения и функциональном состоянии бортовой аппаратуры, в основу формализации признаков логического анализа в БКУ принимаемых управляющих воздействий для идентификации их возможной трансформации был положен математический аппарат алгебры логики. При его использовании задача формализации признаков принадлежности принятой или поступающей на исполнение команды управления множеству разрешенных команд управления состоит в определении логических показателей соответствия принимаемых управляющих воздействий их разрешенной последовательности для выполняемого ТЦУ и функционального состояния бортовой аппаратуры КА и в описании булевой функцией проверки значений введенных логических показателей, по результатам которой разрешается выполнение принятого управляющего воздействия.

Решение задачи формализации признаков логического анализа управляющих воздействий для идентификации их трансформации

Идентификация трансформации управляющих воздействий может осуществляться при их логическом анализе в БКУ на основе двух групп признаков, связанных с выполняемым ТЦУ КА. ТЦУ представляет собой циклически повторяющуюся последовательность операций, направленных на обеспечение работоспособности бортовых систем и применение КА по целевому назначению [6,9]. Первая группа признаков связана с соответствием управляющего воздействия логической последовательности управляющих воздействий при выполнении ТЦУ. Вторая группа признаков связана с соответствием управляющего воздействия текущему функциональному состоянию бортовой аппаратуры КА при выполнении ТЦУ. Эти признаки могут быть формализованы и использованы в процессе логического анализа в БКУ принятых управ-

ляющих воздействий до их исполнения аналогично тому, как это делается при решении задач ограничения доступа [8]. В обоих случаях учитывается логика управления режимами функционирования бортовой аппаратуры КА, реализуемая при передаче на КА средствами НКУ определенных управляющих воздействий, заложенная в ТЦУ КА при его проектировании и уточняемая по результатам испытаний и имитационного моделирования [10, 11]. Последовательность проверки признаков определяется порядком прохождения принятых по радиоканалу команд управления в подсистемах БКУ КА. Для каждой команды управления последовательно осуществляется проверка признаков первой и второй групп. Если в процессе логического анализа за любого из признаков управляющие воздействия идентифицируются как ложные, не связанные с выполняемым ТЦУ КА, то их выполнение блокируется и тем самым исключаются возможные негативные последствия.

Для каждого КА существует набор ТЦУ, соответствующих различным режимам летной эксплуатации и применения КА по назначению [6]. Каждый ТЦУ характеризуется определенной логикой выполнения в ходе СУ КА, проводимых радиоэлектронными средствами НКУ, а каждый СУ может быть декомпозирован на совокупность операций управления (ОУ), направленных на реализацию ТЦУ. Под ОУ понимается совокупность мероприятий по подготовке и выполнению частной задачи управления КА в соответствии с его целевым назначением. Каждой ОУ соответствует набор управляющих воздействий, непосредственно связанных с существом ОУ. Между управляющими воздействиями, передаваемыми на КА в процессе реализации отдельных ОУ и ТЦУ в целом, существует система отношений (совместности, следования и других), определяющая их взаимосвязь и последовательность выполнения, направленные на поддержание бортовой аппаратуры КА в требуемом состоянии. Эта система отношений учитывается при планировании проведения СУ и формировании перечня передаваемых на КА управляющих воздействий [7, 12, 13].

В общем виде технологическая структура управления КА в рамках реализации ТЦУ описывается графом, представленным на рис. 1.

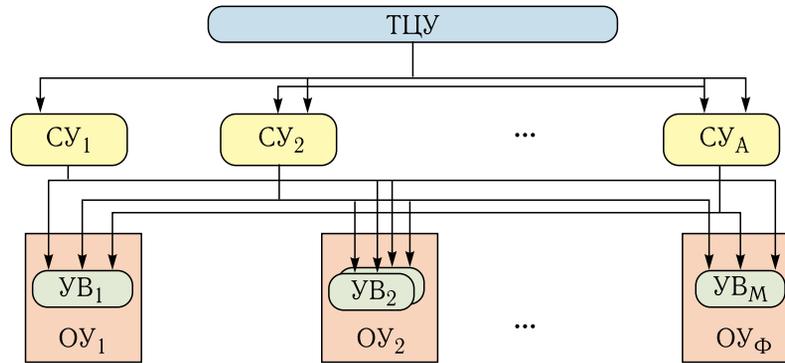


Рис. 1. Технологическая структура управления КА в рамках реализации ТЦУ

Для реализации ТЦУ КА планируются к выполнению различные ОУ, проводимые в ходе проведения СУ. Каждой ОУ соответствуют одно или несколько передаваемых на КА управляющих воздействий (УВ) в виде команд управления. Они обеспечивают перевод в требуемое состояние функционирования бортовых систем КА и управление режимами их работы.

В зависимости от типа каждая ОУ может быть построена на основе одной или нескольких команд управления, представляющих собой командную конструкцию, которая должна соответствовать определенной логической последовательности управляющих воздействий. Структура такой логической последовательности определяется причинно-следственными связями между управляющими воздействиями, соответствующими различным командам управления, при которых каждая команда управления как элемент командной конструкции является зависимой от предыдущей команды и определяющей для последующих команд.

Поскольку для выполнения определенной ОУ, как правило, требуется передать на КА последовательность управляющих воздействий, представим порядок размещения и сочетаемость команд управления k_m при проведении радиоэлектронным средством НКУ α -го СУ КА в виде: $Su_\alpha = \{k_{m(\alpha)-1} \succ k_{m(\alpha)}\}$, где $m(\alpha)$ — порядковый номер размещения команды управления в α -м СУ, $m(\alpha) = 2, M(\alpha)$; $M(\alpha)$ — общее количество команд управления в α -м СУ; символ « \succ » задает бинарное отношение «следует за»; $k_{m(\alpha)-1}$ и $k_{m(\alpha)}$ — предыдущая и текущая команды управления при

выполнении α -го СУ. Отсюда следует, что процедура анализа соответствия принятого управляющего воздействия логике выполняемого ТЦУ может быть основана на сопоставлении каждой принятой или поступающей на исполнение команды управления $k_{m(\alpha)}$ с предшествующими командами управления, входящими в разрешенные логические последовательности. Сопоставление осуществляется в определении соответствия принятой команды управления структуре размещения команд управления в разрешенной последовательности управляющих воздействий выполняемого ТЦУ КА.

С использованием функций алгебры логики [14] формализованный показатель логического соответствия принятой команды управления $k_{m(\alpha)}$ в ходе проведения α -го СУ разрешенной последовательности управляющих воздействий, состоящей из $l \geq 1$ команд управления, может быть представлен в следующем виде:

$$h_{m(\alpha)}^l = \bigvee_{i=1}^l k_{m(\alpha)-i} \rightarrow k_{m(\alpha)-i+1}, \quad (1)$$

где « \vee » — знак дизъюнкции, аналогичный для логических операций знаку суммирования « Σ »; « \rightarrow » — знак конъюнкции в терминологии сетевых функций алгебры логики. При $l = 1$ за текущим управляющим воздействием может следовать только одно разрешенное управляющее воздействие, что на практике может иметь место только в случае отдельных ОУ бортовыми системами КА. В выражении (1) отдельные конъюнкции соответствуют данным о детерминированной сочетаемости и логической связанности размещения команд управле-

ния в разрешенной последовательности управляющих воздействий выполняемого ТЦУ КА. При этом показатель $h_{m(\alpha)}^l$ логического соответствия последовательности команд управления выполняемому ТЦУ КА вида (1) может формироваться без учета семантического содержания команд управления, поскольку все функциональные и числовые команды передаются на КА в формализованном виде дискретных цифровых сообщений [1, 2].

Для формализации процедуры анализа соответствия принятой команды управления разрешенной последовательности управляющих воздействий в ходе проведения α -го СУ КА используем булеву функцию вида:

$$F(h_{m(\alpha)}^l) = \begin{cases} 1, & \text{при } k_{m(\alpha)-1}^\beta \rightarrow k_{m(\alpha)}^\beta \\ 0, & \text{при } k_{m(\alpha)-1}^\beta \not\rightarrow k_{m(\alpha)}^\beta \end{cases} \Big|_{l>1}, \quad (2)$$

где β — номер команды управления. Функция, представленная выражением (2), является условием проверки логического показателя соответствия $h_{m(\alpha)}^l$ и, как следствие, логической взаимосвязи принятой или поступающей на исполнение команды управления с предыдущими $l - 1$ командами управления.

С учетом выражения (2) признак, относящийся к первой группе признаков идентификации трансформации управляющих воздействий в БКУ КА, формализуется булевой функцией проверки значения логического показателя соответствия команды управления разрешенной последовательности управляющих воздействий и описывается выражением

$$S_1[l, h_{m(\alpha)}^l] = \begin{cases} 1, & l \geq 1 \cup F(h_{m(\alpha)}^l) = 1, \\ 0, & l \geq 1 \cup F(h_{m(\alpha)}^l) \neq 1. \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, при анализе соответствия принятой команды управления логике выполняемого ТЦУ КА в качестве признака идентификации ее трансформации может быть использовано обнаружение несоответствия логической взаимосвязи принятой или поступающей на исполнение команды управления с предыдущими командами управления, определяемое нарушением порядка их размещения в разрешенной последовательности управляющих воздействий выполняемого ТЦУ КА.

Число команд управления l в разрешенной последовательности управляющих воздействий определяет глубину верификации — число предшествующих команд управления, для которых анализируется логическая взаимосвязь с каждой очередной командой и определяются разрешенные последующие команды.

Под функциональным состоянием бортовой аппаратуры КА будем понимать штатный режим ее функционирования, соответствующий выполнению текущих целевых задач в рамках реализации выполняемого ТЦУ КА. Результатом исполнения в БКУ КА принимаемых управляющих воздействий является включение или отключение различных режимов функционирования специальной и обеспечивающей бортовой аппаратуры КА, при этом формируется соответствующее функциональное состояние КА. Каждому функциональному состоянию бортовой аппаратуры КА соответствует определенный набор (подмножество) управляющих воздействий — команды управления, передаваемые на КА в данном режиме. Среди этих команд могут быть команды, передаваемые только в определенном режиме функционирования бортовой аппаратуры КА — допустимые для этого режима, и команды, которые могут передаваться в различных режимах функционирования бортовой аппаратуры КА. В общем случае можно говорить об отношениях совместимости управляющих воздействий, выполняемого ТЦУ и функциональных состояний бортовой аппаратуры КА. Эти отношения, как и отношения между отдельными управляющими воздействиями, ОУ и ТЦУ учитываются при планировании проведения СУ КА и формировании перечня передаваемых на КА управляющих воздействий [7, 12, 13].

Для каждого типа КА все множество возможных управляющих воздействий по их семантическому содержанию можно сопоставить с различными режимами штатного функционирования и функциональными состояниями бортовой аппаратуры КА и объединить в соответствующие подмножества [3, 4]. Поэтому управление режимами функционирования бортовой аппаратуры КА и перевод их в требуемые состояния происходит в результате передачи на КА и исполнения в БКУ управляющих воздействий из подмножеств,

соответствующих различным функциональным состояниям бортовой аппаратуры КА. Эти подмножества в общем случае являются пересекающимися, однако в упорядоченных последовательностях команд управления будут команды, которые могут передаваться как в различных функциональных состояниях бортовой аппаратуры КА, так и только в текущем функциональном состоянии.

Соотношения между подмножествами команд управления, используемыми при управлении бортовой аппаратурой КА в различных функциональных состояниях, могут быть представлены используемыми для отображения множеств и отношений между ними диаграммы Эйлера–Венна. На рис. 2 приведен пример такой диаграммы, соответствующей наличию $G = 4$ функциональных состояний бортовой аппаратуры КА.

На диаграмме показаны: $K^g \subset K$ — подмножества команд управления соответствующие g -му режиму функционирования бортовой аппаратуры КА, $g = \overline{1, 4}$, и состоящие из команд управления $k_{\psi(g)}$, где $\psi(g)$ — номер команды управления в подмножестве K^g ; $S_g \subset S$ — множество функциональных состояний для штатных режимов функционирования бортовой аппаратуры КА. Такое графическое представление позволяет наглядно представить, во-первых, объединение подмножеств K^g во множество разовых команд K , используемых при управлении данным типом КА: $K^1 \cup K^2 \cup K^3 \cup K^4 = \bigcup_{g=1}^4 K^g \subset K$; во-вторых, соответствие каж-

дого функционального состояния бортовой аппаратуры КА S_g , $g = \overline{1, 4}$, одному из подмножеств команд управления $K^g \in K$, которые используются для управления бортовой аппаратурой КА в данном функциональном состоянии, при этом подмножества K^g могут как пересекаться ($K^1 \cap K^2 \neq \emptyset$ и $K^3 \cap K^4 \neq \emptyset$), так и не пересекаться ($K^2 \cap K^3 = \emptyset$, $K^1 \cap K^3 = \emptyset$, $K^1 \cap K^4 = \emptyset$ и $K^2 \cap K^4 = \emptyset$).

Для идентификации трансформации управляющего воздействия при приеме или поступлении на исполнение каждой команды управления в БКУ необходимо осуществлять проверку ее принадлежности множеству допустимых команд управления в текущем функциональном состоянии бортовой аппаратуры КА. В предположении, что все подмножества $K^g \in K$ пересекаются, доля команд

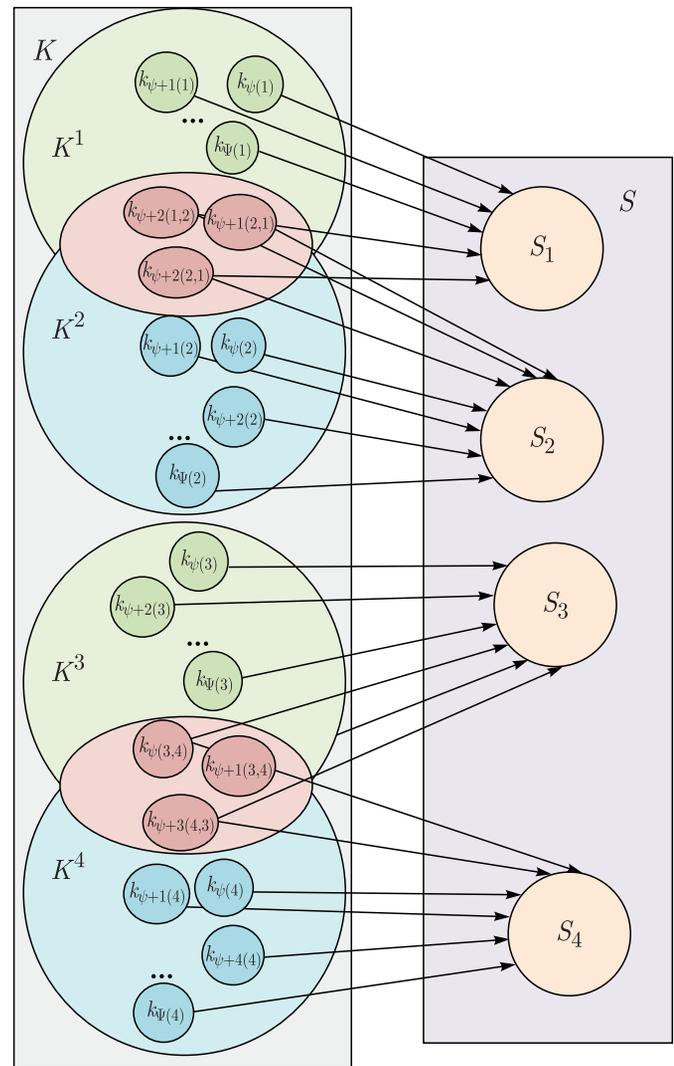


Рис. 2. Взаимосвязь между подмножествами управляющих воздействий, предназначенными для управления КА в различных функциональных состояниях

управления, для которых обеспечивается обнаружение несоответствия принятой команды текущему функциональному состоянию бортовой аппаратуры КА, характеризуется величиной $V = \frac{1}{B} \sum_{g=1}^G d_g$, где d_g — число команд управления, которые могут передаваться только в g -м функциональном состоянии бортовой аппаратуры КА, B — общее число команд управления, используемых при управлении данным типом КА, G — число возможных функциональных состояний бортовой аппаратуры КА. Вследствие пересечения подмножеств K^g значения величин d_g , $g = \overline{1, G}$, могут быть различными,

при этом принятая команда управления может принадлежать как множеству команд управления, передаваемых только в текущем функциональном состоянии бортовой аппаратуры КА, так и множеству команд управления, передаваемых в различных функциональных состояниях бортовой аппаратуры КА. Проверка принадлежности каждой принятой команды управления k^β , где β — номер команды управления, подмножеству команд управления $k_{\psi(g)} \in K^g$, допустимых для текущего g -го функционального состояния бортовой аппаратуры КА, может быть выполнена за счет использования логической операции эквивалентности.

Исходя из того, что в текущем режиме функционирования бортовой аппаратуры на КА радиоэлектронными средствами НКУ может передаваться $n \geq 1$ команд, формализованный показатель логической принадлежности принятой команды управления множеству допустимых команд управления в текущем функциональном состоянии бортовой аппаратуры КА может быть представлен с использованием функций алгебры логики [14] в следующем виде:

$$L_g^{(n)} = \left(\bigvee_{\psi(g)=1}^{\Psi(g)} k^\beta \leftrightarrow k_{\psi(g)} \right)^n, \quad (4)$$

где « \vee » — знак дизъюнкции, « \leftrightarrow » — знак логической эквивалентности; $\Psi(g)$ — общее число команд управления в подмножестве K^g . Вследствие использования логической операции эквивалентности показатель, представленный выражением (4), принимает значение «1» при соответствии принятой команды управления k^β хотя бы одной команде управления из множества команд, допустимых для текущего функционального состояния бортовой аппаратуры КА, что определяет ее принадлежность к данному подмножеству K^g , в противном случае принимает значение «0». При этом показатель $L_g^{(n)}$ логического соответствия принятой команды управления текущему функциональному состоянию бортовой аппаратуры КА вида (4) может формироваться без учета семантического содержания команд управления, поскольку все функциональные и числовые команды передаются на КА в формализованном виде дискретных цифровых сообщений [1, 2].

Для формализации процедуры логического анализа принадлежности принятой или поступающей на исполнение команды управления к множеству команд управления, допустимых в текущем g -м режиме функционирования бортовой аппаратуры КА, используем булеву функцию вида:

$$f(L_g^{(n)}) = \begin{cases} 1, & \text{при } k^\beta \in K^g \\ 0, & \text{при } k^\beta \notin K^g \end{cases} \Big|_{n \geq 1}. \quad (5)$$

Функция, представленная выражением (5), является проверочной по отношению к логическому показателю соответствия $L_g^{(n)}$ и, как следствие, к логической взаимосвязи принятой или поступающей на исполнение команды управления текущему функциональному состоянию бортовой аппаратуры КА.

С учетом выражения (5) признак, относящийся ко второй группе признаков идентификации трансформации управляющих воздействий в БКУ КА, формализуется булевой функцией проверки значения логического показателя принадлежности команды управления множеству допустимых команд управления для текущего функционального состояния бортовой аппаратуры КА в соответствии с выражением

$$S_2[n, L_g^{(n)}] = \begin{cases} 1, & n \geq 1 \cup f(L_g^{(n)}) = 1, \\ 0, & n \geq 1 \cup f(L_g^{(n)}) \neq 1. \end{cases} \quad (6)$$

Таким образом, при анализе соответствия принятой команды управления текущему функциональному состоянию бортовой аппаратуры КА в качестве признака идентификации ее трансформации может быть использовано обнаружение несоответствия принятой или поступающей на исполнение команды управления подмножеству управляющих воздействий, предназначенных для управления КА в текущем функциональном состоянии бортовой аппаратуры при выполняемом ТЦУ КА. Возможности идентификации трансформации команд управления определяются отношением числа команд, которые могут передаваться только в определенном функциональном состоянии бортовой аппаратуры КА и могут определяться как разрешенные, к общему числу команд управления КА.

Апробация результатов

Рассмотренные признаки идентификации трансформации команд управления вводятся в алгоритмы логического анализа принимаемых управляющих воздействий в БКУ КА, при этом признаки реализуемого ТЦУ и режима функционирования бортовой аппаратуры КА могут быть заданы программой полета или автономно определяться на борту КА блоком идентификации полетных ситуаций [15]. Проанализируем возможности идентификации трансформации управляющих воздействий при их логическом анализе в БКУ при достаточно общих допущениях о статистических свойствах множества команд управления, передаваемых на КА радиоэлектронными средствами НКУ, и их логической взаимосвязи с выполняемыми ТЦУ КА.

При анализе соответствия принятой команды управления логике выполняемого ТЦУ КА используется совокупность условий вида (2) и соответствующих им показателей логического соответствия принятой или поступающей на исполнение команды управления разрешенной последовательности управляющих воздействий. Они формируют базу данных для верификации принимаемых команд управления для всех типов операций управления и ТЦУ, предусмотренных для штатного функционирования КА. При этом условия идентификации трансформации команд управления характеризуются глубиной верификации l — числом предшествующих команд управления, для которых анализируется логическая взаимосвязь каждой очередной принятой команды при реализации текущего ТЦУ. При определенной глубине верификации и наличии разрешенных последовательностей команд управления в штатных ТЦУ возможно достижение условий, при которых за анализируемой последовательностью управляющих воздействий будет следовать только одно разрешенное управляющее воздействие.

Оценка требуемой для этого глубины верификации может быть выполнена в предположении, что передаваемые по радиоканалу управления команды управления статистически независимы и для каждой команды управления существует I команд управления, которые могут следовать

за ней в логической последовательности, являются разрешенными. Если B — общее число команд управления, то вероятность того, что в α -м СУ очередная команда управления с номером размещения $m(\alpha)$ является разрешенной для предшествующей команды управления с номером размещения $m(\alpha) - 1$ составляет I/B , вероятность того, что очередная команда управления с номером размещения $m(\alpha)$ является разрешенной для двух предшествующих команд управления с номерами размещения $m(\alpha) - 2$ и $m(\alpha) - 1$ составляет $(I/B)^2$ и т. д. Тогда вероятность того, что очередная команда управления с номером размещения $m(\alpha)$ является разрешенной для i предшествующих команд управления с номерами размещения $m(\alpha) - i$ до $m(\alpha) - 1$ составляет $(I/B)^i$. В общем случае допускается возможность передачи одной и той же команды управления несколько раз подряд.

Глубина верификации l , при которой за анализируемой последовательностью n команд управления может следовать только одна определенная команда управления, определяется из условия вида $(I/B)^l = B^{-1}$. В соответствии с данным условием вероятность того, что очередная команда управления является разрешенной для l предшествующих команд управления, составляет $1/B$ и равна вероятности передачи одной команды из общего числа команд управления. Обозначим $a = I/B$. Введенный параметр a характеризует степень взаимосвязанности управляющих воздействий в ТЦУ КА. Тогда при принятых допущениях требуемая глубина верификации определяется выражением

$$l = [\log_a(1/B)], \quad (7)$$

где $[\cdot]$ обозначает округление до ближайшего целого в сторону увеличения, поскольку показатель глубины верификации l является целым числом и $l \geq 1$. В предельных случаях при $I = 1$ выполняется $l = 1$ и гарантированная верификация обеспечивается при анализе соответствия очередной и предшествующей команд управления, а при $I = B$ и $B > 1$ верификация невозможна.

Найденные таким образом значения требуемой глубины верификации l следует рассматривать как нижний предел глубины верификации принимаемых на КА управляющих воздействий при условии их статистической независимости и заданных

значениях I и B . Величина l увеличивается с увеличением параметра $a = I/B$ и с уменьшением общего числа управляющих воздействий B . На рис. 3 приведена рассчитанная в соответствии с выражением (7) зависимость требуемой глубины верификации l от параметра a при различном числе B . Кривая 1 соответствует $B = 250$, кривая 2 — $B = 500$. Из графика видно, что значительное увеличение требуемой глубины верификации l происходит при $a \geq 0,5$, а при $a \leq 0,2$, что соответствует последовательностям команд управления, состоящим из нескольких десятков команд, требуемая глубина верификации составляет $l = 2-4$. Так, при принятых допущениях при $I = 25$ требуемая глубина верификации составляет $l = 3$ и при $B = 250$, и при $B = 500$. Это соответствует типичным условиям проведения СУ с передачей на КА до нескольких десятков команд управления.

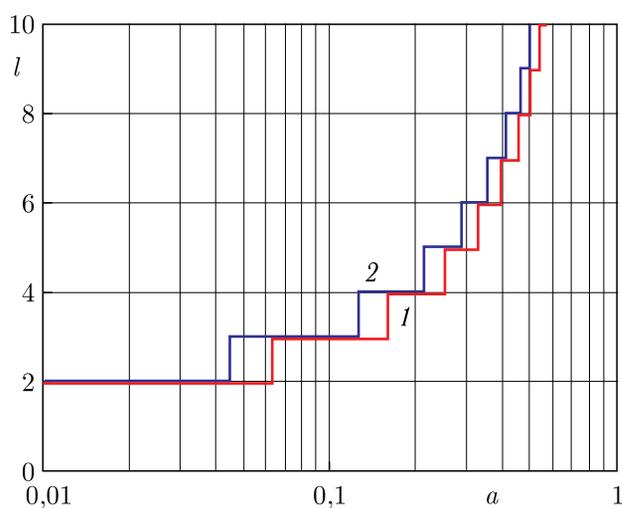


Рис. 3. Требуемая глубина верификации в зависимости от степени взаимосвязи управляющих воздействий в ТЦУ КА

При анализе соответствия принятой команды управления текущему функциональному состоянию бортовой аппаратуры КА используется совокупность условий вида (5) и соответствующих им показателей логического соответствия принятой или поступающей на исполнение команды управления разрешенному для выполняемого ТЦУ функциональному состоянию бортовой аппаратуры КА. Они формируют базу данных для верификации принимаемых команд управления для всех функ-

циональных состояний бортовой аппаратуры КА и ТЦУ, предусмотренных для этих состояний при штатном функционировании КА. При этом условия идентификации трансформации команд управления характеризуются соотношением V между числом команд управления, которые могут передаваться только в определенных функциональных состояниях бортовой аппаратуры КА, и общим числом команд управления для данного типа КА.

Поскольку в общем случае $V < 1$, можно говорить о вероятности идентификации трансформации команды управления при логическом анализе ее соответствия текущему функциональному состоянию бортовой аппаратуры КА. В g -м функциональном состоянии бортовой аппаратуры КА вероятность обнаружения несоответствия принятой команды управления данному функциональному состоянию определяется выражением $P^g = d_g/\Psi(g)$ и представляет собой отношение числа команд управления d_g , которые могут передаваться КА только в данном функциональном состоянии бортовой аппаратуры, к общему числу команд управления $\Psi(g)$, которые могут передаваться на КА в данном функциональном состоянии бортовой аппаратуры. Если определять вероятность обнаружения несоответствия принятой РК текущему функциональному состоянию бортовой аппаратуры КА для множества всех команд управления, используемых для управления КА определенного типа, то с учетом введенных обозначений при равновероятной передаче команд интересующей вероятности соответствует величина V : $P_{ид} = V$. Определяемая таким образом величина $P_{ид}$ является верхним пределом вероятности идентификации трансформации команды управления по признаку ее соответствия текущему функциональному состоянию бортовой аппаратуры КА.

Введем в рассмотрение взвешенную сумму вероятностей того, что принятая команда управления передается на КА только в определенном функциональном состоянии, для всех функциональных состояний бортовой аппаратуры КА $P_{ид}^* = \sum_{g=1}^g P(g)P^g$, где $P(g)$ — вероятность нахождения бортовой аппаратуры КА в g -м функциональном состоянии. Можно показать, что при пересекающихся подмножествах K^g всегда выполняется

$P_{\text{ид}} > P_{\text{ид}}^*$ — вероятность обнаружения несоответствия принятой команды управления текущему функциональному состоянию бортовой аппаратуры КА для множества всех команды управления, используемых для управления КА определенного типа, превышает взвешенную сумму вероятностей обнаружения несоответствия принятой команды управления текущему функциональному состоянию для всех функциональных состояний бортовой аппаратуры данного типа КА. Поэтому вероятность $P_{\text{ид}} = V$ может быть использована для оценки условий идентификации трансформации команды управления КА.

Положим следующие значения параметров, определяющих величину вероятности $P_{\text{ид}}$: $G = 10-15$, $B = 250-500$, $\Psi(g) = 20-40$, $d_g = 5-10$. Для приведенного диапазона значений параметров G , B , $\Psi(g)$, d_g вероятность $P_{\text{ид}}$ идентификации трансформации команды управления по признаку ее соответствия текущему функциональному состоянию бортовой аппаратуры КА для множества всех команд управления изменяется в диапазоне значений от 0,1 до 0,6, при этом вероятности P^g соответствия принятой команды управления функциональному состоянию бортовой аппаратуры КА для отдельных функциональных состояний изменяются в диапазоне значений от 0,125 до 0,5.

Полученные значения вероятности идентификации трансформации команды управления соответствуют приему отдельной команды. Если в текущем режиме функционирования бортовой аппаратуры осуществляется передача на КА группы n команд управления, то вероятность того, что ни одна из них может передаваться только в текущем функциональном состоянии бортовой аппаратуры КА составляет $(1 - P_{\text{ид}})^n$, а вероятность обнаружения несоответствия хотя бы одной принятой команды управления текущему функциональному состоянию бортовой аппаратуры КА определяется выражением

$$P_{\text{ид}}^{(n)} = 1 - (1 - P_{\text{ид}})^n. \quad (8)$$

При передаче на КА группы из n команд управления вероятность трансформации хотя бы одной команды составляет $P_{\text{тр}}^{(n)} = 1 - P_{\text{ид}}^{(n)}$. С увеличением числа команд управления в группе n

вероятность $P_{\text{ид}}^{(n)}$ увеличивается по сравнению с вероятностью $P_{\text{ид}}$, а вероятность $P_{\text{тр}}^{(n)}$ уменьшается по сравнению с вероятностью $P_{\text{тр}} = 1 - P_{\text{ид}}$. На рис. 4 приведены зависимости вероятности $P_{\text{тр}}^{(n)} = 1 - P_{\text{ид}}^{(n)}$ от вероятности $P_{\text{ид}}$ при различных n . Кривая 1 соответствует $n = 1$, кривая 2 — $n = 2$, кривая 3 — $n = 3$, кривая 4 — $n = 4$, кривая 5 — $n = 5$. Вероятность $P_{\text{ид}}^{(n)}$ рассчитывалась в соответствии с выражением (8). Случай $n = 1$ соответствует $P_{\text{тр}} = 1 - P_{\text{ид}}$.

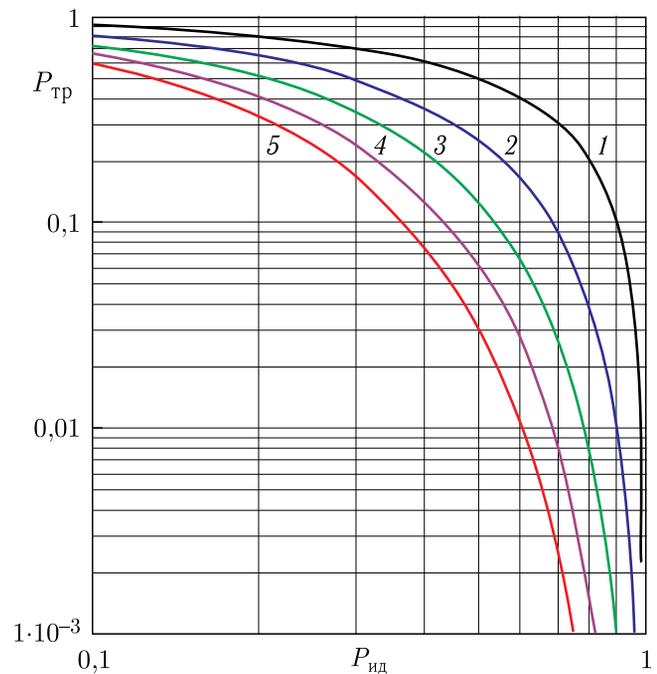


Рис. 4. Вероятность трансформации команды управления в зависимости от вероятности обнаружения несоответствия принятой команды текущему функциональному состоянию бортовой аппаратуры КА

Приведенные на рис. 3 и 4 зависимости характеризуют возможности идентификации трансформации управляющих воздействий при их логическом анализе в БКУ. Для реализации этих возможностей все команды управления, принимаемые на КА в ходе СУ, должны до их исполнения подвергаться логическому анализу с проверкой соответствия логических показателей принадлежности команды управления множеству допустимых команд управления (3) и (6) для выполняемого ТЦУ и текущего функционального состояния бортовой аппаратуры КА.

Заключение

Предотвращение выполнения ложных управляющих воздействий в результате трансформации принятых по радиоканалу команд управления имеет исключительно важное значение для успешного применения КА по назначению в течение всего срока его активного существования. Логический анализ принимаемых по радиоканалу управляющих воздействий с использованием введенных признаков позволяет идентифицировать трансформацию принятых или поступающих на исполнение команд управления и блокировать их, что обеспечит исключение возможных негативных последствий для нормального функционирования и применения КА по назначению.

В результате проведенного анализа процесса выполнения на борту КА логического анализа принимаемых по радиоканалу управляющих воздействий введены и формализованы две группы признаков, позволяющих идентифицировать трансформацию принимаемых или поступающих на исполнение команд управления при их логическом анализе в БКУ. Первая группа признаков связана с соответствием управляющего воздействия логической последовательности управляющих воздействий при выполнении ТЦУ. При анализе этих признаков и наличии разрешенных последовательностей команд управления в штатных ТЦУ возможно достижение условий, при которых за анализируемой последовательностью управляющих воздействий будет следовать только одно разрешенное управляющее воздействие, и в этом случае при определенной глубине верификации обеспечивается однозначное определение трансформации команды управления. Вторая группа признаков связана с соответствием управляющего воздействия текущему функциональному состоянию бортовой аппаратуры КА при выполнении ТЦУ. Логический анализ указанных групп признаков осуществляется в БКУ КА последовательно. Остаточная вероятность трансформации сообщения тем ниже, чем больше доля команд управления, для которых обеспечивается обнаружение несоответствия принятой команды выполняемому ТЦУ и текущему функциональному состоянию бортовой аппаратуры КА. Для практической реализации идентификации трансформации

управляющих воздействий с использованием рассмотренных признаков необходима разработка соответствующих программных средств БКУ КА.

Список литературы

1. *Молотов Е. П.* Наземные радиотехнические системы управления космическими аппаратами. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 256 с.
2. *Урличич Ю. М., Гусев Л. И., Леонов М. С. и др.* Радиотехнические комплексы управления дальними космическими аппаратами и для научных исследований / Под ред. Е. П. Молотова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 232 с.
3. *Бровкин А. Г., Бурдыгов Б. Г., Гордийко С. В. и др.* Бортовые системы управления космическими аппаратами / Под ред. А. С. Сырова. М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. 304 с.
4. *Микрин Е. А.* Бортовые комплексы управления космическими аппаратами. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 245 с.
5. *Вейцель В. А., Волковский А. С., Волковский С. А. и др.* Радиосистемы управления / Под ред. В. А. Вейцеля. М.: Дрофа, 2005. 416 с.
6. *Соловьев В. А., Лысенко Л. Н., Любинский В. Е.* Управление космическими полетами. В 2 ч. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана: Ч. 1, 2009. — 476 с.; Ч. 2, 2010. — 426 с.
7. *Жигастова О. К., Почукаев В. Н.* Командные конструкции и использование их при автоматизированном планировании полета автоматических космических аппаратов // Вестник МАИ. 2012. № 5. С. 21–31.
8. *Мальцев Г. Н., Матвеев С. А.* Исследование защищенности системы командного радиуправления подвижным объектом с использованием марковской модели преодоления нарушителем многоуровневой системы защиты информации // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. № 677. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2021. С. 153–164.
9. *Охлопков К. А.* Анализ типовых технологических циклов управления и передачи информации с низкоорбитальных космических аппаратов // Вестник метролога. 2022, № 2. С. 16–21.
10. *Исаева О. С., Ноженкова Л. Ф., Колдырев А. Ю.* Интеллектуальный анализ испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата // Вычислительные технологии. 2019. № 3. С. 59–74.

11. *Исаева О.С., Кулясов Н.В., Исаев С.В.* Метод структурно-графического анализа и верификации интеллектуальной имитационной модели // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 50. С. 79–88.
12. *Старшинов В.С., Цапко С.Г.* Реализация и апробация алгоритма для автоматизированного оперативного планирования расписания сеансов связи между космическими аппаратами наземными станциями // Вестник кибернетики. 2021. № 1. С. 31–40.
13. *Брега А.Н., Коваленко А.А.* Командно-программное управление полетом Российского сегмента МКС // Космическая техника и технологии. 2016. № 3. С. 90–104.
14. *Гладкова И.А., Можжев А.С., Мусаев А.А.* Метод логико-детерминированного моделирования сетевых систем // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). № 14. СПб.: СПбГТИ, 2012. С. 89–92.
15. *Орлов Д.А., Куреев С.А., Самусенко О.Е. и др.* Методический подход к решению проблемы автономного парирования нештатных ситуаций при управлении космическим аппаратом // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. № 1. С. 17–29.

Дата поступления рукописи
в редакцию 9.10.2023

Дата принятия рукописи
в печать 19.01.2024