Обнаружение вторжений в радиоканал управления робототехническим комплексом на логическом уровне функционирования бортовой многоуровневой системы защиты

С. А. Матвеев, Д. А. Лесняк*

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

*denislesnyk@mail.ru

***Аннотация*. В целях обеспечения защищенности радиоканала управления с робототехническим комплексом рассмотрена возможность применения многоуровневой системы обнаружения вторжений. Предложен способ обнаружения попыток передачи нарушителем ложных команд управления на логическом уровне функционирования бортовой многоуровневой системы защиты при информационном обмене с робототехническим комплексом.**

Ключевые слова: многоуровневая система обнаружения вторжений, робототехнический комплекс, радиоканал управления

I. Информационный обмен с робототехническим комплексом

Одними из основных задач функционирования бортовой аппаратуры (БА) робототехнического комплекса (РК) являются:

- формирование команд управления для смежных бортовых систем РК;
- управление режимами работы системы телеметрического контроля бортовых систем на основании команд, поступающих от средств наземного комплекса (НК);
- формирование телеметрической информации о состоянии бортовых систем, процессах управления и характеристиках движения РК;
- формирование текущей информации о параметрах состояния БА.

На основании выше перечисленных основных задач, решаемых БА РК, становится актуальной задачей идентификации текущего технического состояния (ТС), задаваемого управляющими воздействиями, поступающих с НК в виде команд с допустимым ТС. Данная задача соответствует прикладному уровню функционирования многоуровневой системы обнаружения вторжений (СОВ) в составе БА РК [1, 2].

II. Процесс обнаружения вторжений в радиоканал управления робототехническим комплексом на логическом уровне функционирования бортовой многоуровневой системы защиты

На прикладном уровне признаком истинной команды является сопоставление текущего ТС $S^{тек}$, формируемое на основании принятой команды, с допустим ТС РК из заданного множества, который определяет режим функционирования бортовых систем смежных с БА, соответствующих одному из циклов управления. Следовательно, для идентификации ТС РК $S^{тек}$ необходимо сформировать признаки, соответствующие множеству допустимых ТС режимов функционирования бортовых систем РК в рамках выполнения штатного цикла управления [3, 4]. Представим допустимое ТС РК в виде множеств состояний характерных для штатного режима функционирования бортовых систем РК:

$$S^{шт} = \left\{ s_q^{шт} \right\}. \quad (1)$$

где $s_q^{шт}$ - соответствующие ТС, характерные для штатного режимов функционирования РК при $q = \overline{1,Q}$.

Рассмотрим ТС характеризующие прием команды в рамках проведения СУ для режимов штатной летной эксплуатации РК.

Для каждого q-ого ТС из множества $s_q^{шт}$ штатного функционирования РК в любой момент времени зададим многомерный вектор $\overline{R}^{шт}$ в пространстве значений параметров бортовых систем РК $\{p_i\}$, формируемый на основе телеметрического контроля состояния бортовой аппаратуры РК [5] и обобщенных ожидаемых изменениях значений параметров соответствующие приему каждой команды управления $\{c_j\}$:

$$S^{шт} \to \overline{R}^{шт} = \left\{ r_k\left(p_i; c_j\right) \right\}, \text{ где } i = \overline{1,I} \text{ и } j = \overline{1,J}. \quad (2)$$

В свою очередь представим многомерный вектор $\overline{R}^{шт}$ в виде двух векторов: характеризующий ТС РК в виде $r_к^{тм}\left(p_i\right)$ на основе значений параметров телеметрического контроля состояний бортовых систем РК и вектора $r_к^{рк}\left(c_j\right)$ задающее ожидаемое ТС, в результате приема команды управления. Необходимо отметить, что вектор $r_к^{рк}\left(c_j\right)$ формирует в свою очередь соответствующие изменения значений параметров, описываемых вектором $r_к^{тм}\left(p_i\right)$. С целью сопоставления $r_к^{тм}\left(p_i\right)$ и $r_к^{рк}\left(c_j\right)$ с состояниями из множеств $S^{шт}$, область изменений значений параметров каждого p_i и c_j необходимо разбить на интервалы. Таким

образом, непрерывным значениям каждых параметров будет соответствовать некоторое множество дискретных признаков $\bar{a}(\bar{b})$, определяющих нахождение параметров в одном из допустимых e интервалов [5, 6]:

$$c_j(p_i) \to \bar{a}(\bar{b}) = \{a_{je}\}(\{b_{ie}\}), \text{ где } e = \overline{1,E} \qquad (3)$$

Значения $a_{je}(b_{ie})$ в свою очередь представим в виде двоичной последовательности, разрядность которого определяется числом выделяемых интервалов e [5]. Следовательно, каждое ТС РК из множества $\{s_q^{шт}\}$ описывается вектором строкой, содержащей двоичную комбинацию $\{a_{je}\}(\{b_{ie}\})$. В свою очередь совокупность векторов-строк образует матрицу технических состояний РК, которая описывает допустимые ТС РК в сопоставлении со значения параметров телеметрического контроля бортовых систем РК и ожидаемыми значениями этих же параметров, задаваемые принятой командой.

В таблице представлен пример матрицы штатных ТС РК, соответствующей принятой команде в рамках проведения ТСУ для режимов штатной летной эксплуатации РК.

ТАБЛИЦА I МАТРИЦА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РК, СООТВЕТСТВУЮЩАЯ РЕЖИМАМ ШТАТНОЙ ЛЕТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РК

Параметры, характеризующие ТС РК												**Вектор** $\bar{R}^{шт}$	**Штатное техническое состояние**
p_1	p_2	$\cdots$	p_i	$\cdots$	p_I	c_1	c_2	$\cdots$	c_j	$\cdots$	c_J		
a_{11}	a_{12}	$\cdots$	a_{1i}	$\cdots$	a_{1I}	b_{11}	b_{12}	$\cdots$	b_{1j}	$\cdots$	b_{1J}	$\bar{R}_1^{шт}$	$\to s_1^{шт}$
a_{21}	a_{22}	$\cdots$	a_{2i}	$\cdots$	a_{2I}	b_{21}	b_{22}	$\cdots$	b_{2j}	$\cdots$	b_{2J}	$\bar{R}_1^{шт}$	$\to s_2^{шт}$
$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$
a_{q1}	a_{q2}	$\cdots$	a_{qi}	$\cdots$	a_{qI}	b_{q1}	b_{q2}	$\cdots$	b_{qj}	$\cdots$	b_{qJ}	$\bar{R}_к^{шт}$	$\to s_q^{шт}$
$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$
a_{Q1}	a_{Q2}	$\cdots$	a_{Qi}	$\cdots$	a_{QI}	b_{Q1}	b_{Q2}	$\cdots$	b_{Qj}	$\cdots$	b_{QJ}	$\bar{R}_K^{шт}$	$\to S_Q^{шт}$

Представленная матрица содержит необходимые признаки, описывающие изменения значений параметров бортовых систем в результате приема команды и телеметрического контроля, сопоставленные с многомерным вектором $\bar{R}^{шт}$, характеризующий допустимые ТС РК. Данная матрица с целью идентификации $S^{тек}$ закладывается в блок контроля ТС многоуровневой СОВ РК. Следовательно, текущее ТС РК $S^{тек}$, формируемое на основании многомерного вектора $\bar{R}^{тек}$ заданного принятой команды управления, необходимо идентифицировать с одним из допустимых ТС $S_Q^{шт}$ соответствующих состояний из множества $\{s_q^{шт}\}$. На основе выше изложенного процесс идентификации текущего ТС РК со штатным зададим исходя из следующего правила: $S^{тек} \Rightarrow S_Q^{шт} \in \{s_q^{шт}\}$ если выполняется условие:

$$\sum_{k=1}^{N_j}\left(\bar{R}_к^{тек} \oplus \bar{R}_к^{шт}\right) = 0 \text{ при } \bar{R}_к^{тек} \oplus \bar{R}_к^{шт} = \begin{cases} 0, \text{ если } \bar{R}_к^{тек} = \bar{R}_к^{шт} \\ 1, \text{ если } \bar{R}_к^{тек} \neq \bar{R}_к^{шт} \end{cases}$$

где $S^{тек}$ – текущее ТС РК, задаваемое принятой РК; $S_Q^{шт}$ – q-е допустимое ТС РК из множества $\{s_q^{шт}\}$; $\bar{R}^{тек}$ и $\bar{R}^{шт}$ – многомерные вектора соответствующих значений параметров состояний $S^{тек}$ и $S^{шт}$; N_q – количество заданных параметров для каждого q-ого допустимого ТС РК.

Текущее ТС РК идентифицируется как q-е допустимое ТС из множества $\{s_q^{шт}\}$ в том случае, если имеется полное попарное совпадение соответствующих значений параметров, описывающих многомерным вектором $\bar{R}^{тек}$ с параметрами, заданными $\bar{R}^{шт}$ сопоставимый с допустимым ТС в матрице. Таким образом, в случае $\bar{R}_к^{тек} \neq \bar{R}_к^{шт}$ на прикладном уровне в блоке контроля многоуровневой СОВ формируется признак несоответствия текущего ТС РК заданному матрицей, что соответствует ложной команды управления, выполнение необходимо заблокировать.

Однако необходимо учитывать, что в рамках выполнения задач по предназначению на борту РК могут возникнуть аварийные ситуации. При возникновении таких ситуаций в бортовых системах НКУ в рамках проведения режимов нештатного расчетного функционирования бортовых систем РК выдают команды не соответствующие ТСУ, т. е. при $S^{тек} \notin \{s_q^{шт}\}$ поскольку:

$$\sum_{k=1}^{N_j}\left(\bar{R}_к^{тек} \oplus \bar{R}_к^{шт}\right) \neq 0 \text{ при } \bar{R}_к^{тек} \oplus \bar{R}_к^{шт} = \begin{cases} 0, \text{ если } \bar{R}_к^{тек} = \bar{R}_к^{шт} \\ 1, \text{ если } \bar{R}_к^{тек} \neq \bar{R}_к^{шт} \end{cases}$$

Следовательно, в данном случае на борту РК имеется нештатная ситуация и необходимо идентифицировать текущее нештатное ТС (НТС) РК с ближайшим штатным. В этом случае при формировании НТС РК необходимо использовать части онтологий, сформированных матрицей штатных ТС [7, 8]. Поэтому

встает задача сопоставления текущего нештатного ТС РК к одному из штатных.

Таким образом, постановка задачи выглядит следующим образом: имеется текущее НТС РК $S^{нтек}$, которое описывается с помощью вектора $\overline{R}^{нтек}$ в результате принятия команды. Необходимо сопоставить $S_Q^{шт} \in \left\{ s_q^{шт} \right\}$, которое описывается вектором значений параметров $\overline{R}_к^{шт}$ при выполнение условия:

$$L\left(\overline{R}_к^{нтек}, \overline{R}_к^{шт} \right) \to \min, \tag{4}$$

где $L\left(\overline{R}_к^{нтек}, \overline{R}_к^{шт} \right)$ - функция, описывающая расстояние между точками пространства значений параметров, заданными соответствующими многомерными векторами.

Ввиду того, что в процессе сопоставления текущего нештатного ТС РК к одному из штатных необходимо сопоставить несколько ТС из заданного множества $\left\{ s_q^{шт} \right\}$, выражение (4) преобразуется к следующему виду:

$$L\left(\overline{R}_к^{нтек}, \overline{R}_к^{шт} \right) \le \Delta L^{доп} \tag{5}$$

где $\Delta L^{доп}$ – заданные максимально возможные отклонения многомерного вектора $\overline{R}$ изменения значений параметров бортовых систем, характеризующие штатные ТС РК.

Вычисление функции $L\left(\overline{R}_к^{нтек}, \overline{R}_к^{шт} \right)$ ввиду того, что соответствующие многомерные векторы представлены в виде двоичной последовательности, зададим следующим выражением:

$$L\left(\overline{R}_к^{нтек}, \overline{R}_к^{шт} \right) = \left| r_1^{нтек} - r_1^{шт} \right| + \left| r_2^{нтек} - r_2^{шт} \right| +$$

$$+ \left| r_K^{нтек} - r_K^{шт} \right| = \sum_{k=1}^{K} \left| r_k^{нтек} - r_k^{шт} \right|$$

В тоже время необходимо учитывать, что компоненты векторов $\overline{R}^{тек}$ и $\overline{R}^{шт}$ могут содержать параметры разных бортовых систем РК, поэтому преобразуем выражение в следующий вид:

$$L\left(\overline{R}_к^{нтек}, \overline{R}_к^{шт} \right) = \left| \frac{r_1^{нтек} - r_1^{шт}}{r_1^{нтек}} \right| + \left| \frac{r_2^{нтек} - r_2^{шт}}{r_2^{нтек}} \right| +$$

$$+ \left| \frac{r_K^{нтек} - r_K^{шт}}{r_K^{нтек}} \right| = \sum_{к=1}^{K} \left| \frac{r_к^{нтек} - r_к^{шт}}{r_к^{тек}} \right|.$$

Для сравнения $L\left(\overline{R}_к^{нтек}, \overline{R}_к^{шт} \right)$ с заданным значением $\Delta L^{доп}$ необходимо ввести в выражение обобщённую меру расстояния порядка α:

$$L\left(\overline{R}_к^{нтек}, \overline{R}_к^{шт} \right) = \left[\sum_{k=1}^{K} \left(\left| \frac{r_к^{нтек} - r_к^{шт}}{r_к^{тек}} \right| \right)^{\alpha} \right]^{\frac{1}{\alpha}} \tag{6}$$

Таким образом, при условии $\alpha \to \infty$ величина описывается выражением вида:

$$L\left(\overline{R}_к^{нтек}, \overline{R}_к^{шт} \right) \Rightarrow \max_{1 \le k \le K} \left| \frac{r_к^{нтек} - r_к^{шт}}{r_к^{нтек}} \right| \le \Delta L^{доп} \tag{7}$$

Процесс идентификации текущего НТС РК, задаваемый в результате принятия команды управления, с допустимым, зададим исходя из следующего правила: $S^{нтек} \Rightarrow S_Q^{шт} \in \left\{ s_q^{шт} \right\}$ если выполняется условие:

$$L\left(\overline{R}_к^{нтек}, \overline{R}_к^{шт} \right) \le \Delta L^{доп} \tag{8}$$

В случае невыполнения условия, заданного выражением блок контроля многоуровневой СОВ выявляет признак, что текущее НТС не идентифицирована как «ближайшая» к одному из штатных состояний, заданных соответствующей матрицей таблицы. Следовательно, принятая команда управления, задающая такую НТС является ложной и подлежит блокированию, а зафиксированная попытка передачи нарушителем ложной команды управления заносится в альманах многоуровневой СОВ с последующей передачей по обратному каналу наземным средствам.

Список литературы

[1] Мальцев Г.Н. Матвеев С.А. Исследование защищенности системы командного радиоуправления подвижным объектом с использованием марковской модели преодоления нарушителем многоуровневой системы защиты информации // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Выпуск 677, 2021. С. 153–164.

[2] Матвеев С.А. Модель системы обнаружения вторжений в радиоканал управления робототехническим комплексом // Сборник трудов 76-ой научно-технической конференции научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова НР 1(76) 2021, С. 136–139.

[3] Копкин Е.В., Кравцов А.Н., Мышко В.В. Анализ технического состояния космических средств. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. 189 с.

[4] Дмитриев А.К., Юсупов Р.М. Идентификация и техническая диагностика — МО РФ, 1987. 521 с.

[5] Кравец В.Г. Автоматизированные системы управления космическими полетами. М.: Изд-во Машиностроение, 1995. 254 с.

[6] Матюшин М.М., Саркисян Х.В. Построение оценочной функции для поддержки принятия оперативных решений при контроле параметров состояния космического аппарата // Наука и образование: электронное научно-техническое издание, 2011, № 4.

[7] Ларичев О.И. Объективные модели и субъективные решения. М.: Изд-во Наука, 1987. 141 с.

[8] Глазов Б.И. Автоматизированное управление в больших кибернетических системах. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Изд-во МО СССР, 1981.