

Выбор заданного космического объекта из множества наблюдаемых специализированным космическим аппаратом

В. Н. Арсеньев^а, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0001-6424-5320, vladar56@mail.ru

А. А. Ядренкина^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0003-2089-7460

^аВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Ждановская наб., 13, Санкт-Петербург, 197198, РФ

Введение: для обнаружения в околоземном космическом пространстве наиболее опасных объектов искусственного происхождения (космического мусора) планируется использовать специализированные космические аппараты, оснащенные оптико-электронными средствами. В связи с этим возникла проблема выбора наиболее опасного объекта из множества наблюдаемых по результатам измерений характеризующих их неоднородных селективных признаков. **Цель:** сформировать комплексный безразмерный показатель, зависящий от количества и качества измерительной информации о наблюдаемых космических объектах, и решающее правило выбора наиболее опасного объекта, обеспечивающее максимальную вероятность принятия правильного решения. **Результаты:** предложен метод выбора наиболее опасного космического объекта при ограниченных объемах измерительной информации о физически неоднородных селективных признаках космических объектов, находящихся в наблюдаемой специализированным космическим аппаратом области. При этом измерительные данные об отдельных селективных признаках космических объектов могут отсутствовать. Предложенное решающее правило для выбора наиболее опасного космического объекта учитывает не только погрешности, но и количество измерений селективных признаков каждого объекта. На актуальном примере продемонстрирована работоспособность метода. **Практическая значимость:** простота определения комплексных показателей, характеризующих космические объекты, находящиеся в области наблюдения специализированного космического аппарата, и решающего правила выбора наиболее опасного объекта, позволяет решать эту задачу на борту специализированного космического аппарата в реальном масштабе времени.

Ключевые слова — наиболее опасный космический объект, селективные признаки, специализированный космический аппарат, наблюдение, комплексный показатель.

Для цитирования: Арсеньев В. Н., Ядренкин А. А. Выбор заданного космического объекта из множества наблюдаемых специализированным космическим аппаратом. *Информационно-управляющие системы*, 2022, № 2, с. 11–19. doi:10.31799/1684-8853-2022-2-11-19

For citation: Arseniev V. N., Yadrenkin A. A. Selection of a given space object from the multitude observed by a specialized spacecraft. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 2, pp. 11–19 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2022-2-11-19

Введение

В настоящее время в околоземном космическом пространстве скопилось большое количество космических объектов (КО) искусственного происхождения (функционирующие и отработавшие космические аппараты (КА), разгонные блоки, последние ступени ракет-носителей, фрагменты, образовавшиеся при разрушении отдельных объектов) [1, 2]. Они представляют реальную угрозу функционирующим космическим аппаратам [3]. Для обнаружения и наблюдения КО в целях прогнозирования опасных ситуаций проводится мониторинг космического пространства с использованием наземных средств наблюдения, входящих в Автоматизированную систему предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве (АСПОС) [4]. Частично эти же вопросы решает объединенная система аэрокосмической обороны США и Канады NORAD (North American Aerospace Defense Command) и системы некоторых других

стран [5]. В перспективе в Международной аэрокосмической системе глобального мониторинга (МАКСМ/IGMASS) [6] параллельно с наземными средствами планируется использовать космический сегмент, включающий группировку специализированных космических аппаратов (СКА), оснащенных различными средствами наблюдения (оптико-электронными, радиолокационными и др.) [7].

Состояние каждого КО характеризуется некоторым набором в общем случае различных по своей физической природе селективных признаков, содержащих о нем координатную и некоординатную информацию [8]. Признаки, характеризующие траекторию движения КО, представляют координатную информацию. Некоординатную информацию дают признаки, характеризующие, например, геометрическую форму КО, размеры, характеристики собственного или отраженного излучения и др. Конкретные значения признаков о КО, попавших в область, наблюдаемую СКА (область наблюдения СКА), могут поступать из-

вне или же, если позволяют его измерительные средства, определяться на борту. При этом, как правило, имеется информация о селективных признаках КО, представляющего наибольшую угрозу для функционирующих в его окрестности КА.

Поскольку в процессе мониторинга космической обстановки в область, наблюдаемую СКА, могут одновременно попадать несколько КО, то возникает необходимость выбора из этого множества объекта, представляющего наибольшую угрозу. В зависимости от состава селективных признаков и вида метрики, на основе которой принимается решение о наиболее опасном космическом объекте (НОКО), как правило, используются общие методы решения данной задачи [9, 10]. В то же время имеется ряд новых подходов к решению отдельных частных задач выбора. Так, например, в работе [11] для селекции объектов используются только геометрические признаки и критерии. В статье [12] для определения орбит космического мусора предлагается использовать оптимальные группировки кубсатов с оптическими датчиками. Работа [8] также связана с определением параметров движения КО с помощью оптико-электронных средств космического базирования на солнечно-синхронной орбите. Автор работ [13, 14] рассматривает в качестве признаков конструктивные особенности КО и вероятностное описание анализируемой обстановки, а для принятия решения — байесовский подход с аддитивной функцией потерь либо дискретное вейвлет-преобразование. Статья [15] посвящена распознаванию орбитальных объектов с помощью звездных датчиков, расположенных на борту спутника, и специального алгоритма для создания базы данных с последующей их обработкой на земле. В работе [16] классификация объектов осуществляется на основе совместной обработки траекторной и поляризационной информации. Авторы доклада [17] в качестве признака использовали отношение сигнал/шум, а для различимости объектов — коэффициент ранговой корреляции. Для обнаружения факта разрушения КО на орбите в работе [18] сравниваются средние значения его эффективной поверхности рассеяния на смежных временных интервалах. В статье [19] и докладе [20] в качестве информативных признаков используется некоординатная информация: ранги, глубина, положение центра тяжести и моментные характеристики радиолокационных портретов. Распознавание осуществляется путем двухэтапного сравнения агрегированной информации. Авторы статьи [21] для распознавания объектов используют композицию байесовского и нейросетевого классификаторов и информацию о изображениях объектов в различных спектральных диапазонах. В работе [22] селекция КО осуществляется по координат-

ным и некоординатным признакам на основе критерия отношения правдоподобия. Метод, предложенный в [10], также позволяет комплексировать ограниченную разнородную информацию при решении задачи селекции КО.

Часть из рассмотренных выше подходов к решению задачи выбора требует наличия достаточно объемной измерительной и (или) априорной информации и немалых затрат времени на накопление и обработку данных [13–16, 21, 22]. Некоторые из них предполагают использовать только один тип информации (координатную или некоординатную) [11, 17–20]. Для реализации методов, предложенных в работах [8, 12], необходимо иметь специальные группировки спутников. Возникают также некоторые сложности применения метода решения задачи выбора, рассмотренного в работе [10], в случаях отличия объемов измерений одностипных селективных признаков наблюдаемых КО.

В связи с отмеченными замечаниями предлагается рассмотреть следующую задачу.

Постановка задачи

В некоторой области космического пространства находится R космических объектов, за которыми ведет наблюдение СКА. Каждый КО характеризуется n независимыми, случайными и, в общем случае, физически разнородными селективными признаками $X_i, i = \overline{1, n}$. Все признаки распределены по нормальному закону и имеют известные дисперсии $D_{X_i}, i = \overline{1, n}$, характеризующие погрешности их измерений. Математические ожидания погрешностей измерений полагаются нулевыми.

Среди наблюдаемых объектов находится НОКО, представляющий угрозу функционирующим в рассматриваемой области космического пространства КА. Его селективные признаки $x_{НОКО_i}, i = \overline{1, n}$, известны.

Проведены измерения признаков, характеризующих все объекты, находящиеся в области наблюдения СКА. Полученная измерительная информация представлена множествами

$$X_r = \left\{ x_{ij}^{(r)}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, N_i^{(r)}} \right\}, r = \overline{1, R},$$

где $x_{ij}^{(r)}$ — значение i -го признака r -го объекта $X_i^{(r)}$, полученное при его j -м измерении; $N_i^{(r)} \geq 0$ — число измерений i -го признака r -го объекта.

В дальнейшем случайные величины обозначаются прописными буквами, а их реализации — соответствующими строчными буквами.

Необходимо из множества наблюдаемых СКА объектов выбрать наиболее опасный.

Для решения этой задачи для каждого наблюдаемого КО вводится комплексный безразмерный показатель, учитывающий имеющуюся об объекте измерительную информацию.

Построение моделей комплексных показателей, характеризующих космические объекты

В качестве комплексного показателя r -го КО используется линейная комбинация измеренных значений характеризующих его селективных признаков:

$$w_r = \sum_{i=1}^n \alpha_i^{(r)} \sum_{j=1}^{N_i^{(r)}} x_{ij}^{(r)}, \quad (1)$$

где $\alpha_i^{(r)}$ — неизвестные коэффициенты, размерности которых являются обратными к размерностям соответствующих признаков, т. е. $[\alpha_i^{(r)}] = \frac{1}{[X_i]}$; $x_{ij}^{(r)} \in X_r$; $r = \overline{1, R}$.

Поскольку селективные признаки $x_{НОКОi}$, $i = \overline{1, n}$, характеризующие НОКО, известны, то для сравнения комплексных показателей КО, попавших в область наблюдения СКА, предлагаются коэффициенты $\alpha_i^{(r)}$, $i = \overline{1, n}$, $r = \overline{1, R}$, моделей комплексных показателей всех наблюдаемых объектов выбирать так, чтобы выполнялись условия

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i^{(r)} N_i^{(r)} x_{НОКОi} = w_{НОКО}, \quad r = \overline{1, R}, \quad (2)$$

где $w_{НОКО}$ — некоторая величина. В частности, это может быть целое положительное число.

Дисперсия комплексного показателя w_r , характеризующего r -й КО, в силу модели (1) и независимости входящих в ее правую часть селективных признаков определяется по формуле

$$D_{W_r} = \sum_{i=1}^n (\alpha_i^{(r)})^2 \sum_{j=1}^{N_i^{(r)}} D_{X_i} = \sum_{i=1}^n (\alpha_i^{(r)})^2 N_i^{(r)} D_{X_i}. \quad (3)$$

Тогда коэффициенты $\alpha_i^{(r)}$, $i = \overline{1, n}$, модели комплексного показателя r -го КО определяются из условия минимума дисперсии (3) при ограничении, заданном уравнением (2).

Данная задача может быть решена методом неопределенных множителей Лагранжа. В соответствии с этим методом составляется функция

$$L_r = D_{W_r} + 2\lambda \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i^{(r)} N_i^{(r)} x_{НОКОi} - w_{НОКО} \right) =$$

$$= \sum_{i=1}^n (\alpha_i^{(r)})^2 N_i^{(r)} D_{X_i} + 2\lambda \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i^{(r)} N_i^{(r)} x_{НОКОi} - w_{НОКО} \right), \quad (4)$$

где λ — неопределенный множитель.

Для определения неизвестных коэффициентов используются необходимые условия минимума функции (4), имеющие вид

$$\left. \frac{\partial L_r}{\partial \alpha_i^{(r)}} \right|_{\alpha_i^{(r)} = a_i^{(r)}} = 2a_i^{(r)} N_i^{(r)} D_{X_i} + 2\lambda N_i^{(r)} x_{НОКОi} = 0, \quad i = \overline{1, n}; \quad (5)$$

$$\left. \frac{\partial L_r}{\partial \lambda} \right|_{\alpha_i^{(r)} = a_i^{(r)}} = 2 \left(\sum_{i=1}^n a_i^{(r)} N_i^{(r)} x_{НОКОi} - w_{НОКО} \right) = 0. \quad (6)$$

Из формулы (5) можно найти коэффициенты модели

$$a_i^{(r)} = \frac{-\lambda x_{НОКОi}}{D_{X_i}}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

Их подстановка в правую часть выражения (6) дает уравнение

$$-\lambda \sum_{i=1}^n \frac{x_{НОКОi}^2 N_i^{(r)}}{D_{X_i}} = w_{НОКО},$$

из которого находится величина

$$\lambda = -\frac{w_{НОКО}}{\sum_{i=1}^n \frac{x_{НОКОi}^2 N_i^{(r)}}{D_{X_i}}}.$$

Подставив ее в правую часть формулы (7), получим выражения для определения коэффициентов моделей комплексных показателей для всех наблюдаемых объектов:

$$a_i^{(r)} = \frac{w_{НОКО} x_{НОКОi}}{D_{X_i} \sum_{i=1}^n \frac{x_{НОКОi}^2 N_i^{(r)}}{D_{X_i}}}, \quad i = \overline{1, n}; \quad r = \overline{1, R}. \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что математические модели комплексных показателей, характеризующих различные КО, будут отличаться входящими в них коэффициентами, поскольку последние зависят от объемов измерений селективных признаков. Точность полученной таким образом модели для каждого КО будет опреде-

латься величиной дисперсии соответствующего комплексного показателя. Ее можно найти путем подстановки в формулу (3) вместо коэффициентов $\alpha_i^{(r)}$ величин $a_i^{(r)}$, полученных по формуле (8):

$$D_{W_r} = \frac{w_{\text{НОКО}}^2}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{x_{\text{НОКО}i}^2 N_i^{(r)}}{D_{X_i}}\right)^2} \sum_{i=1}^n \frac{x_{\text{НОКО}i}^2 N_i^{(r)}}{D_{X_i}} = \frac{w_{\text{НОКО}}^2}{\sum_{i=1}^n \frac{x_{\text{НОКО}i}^2 N_i^{(r)}}{D_{X_i}}}, r = \overline{1, R}. \quad (9)$$

Значения комплексных показателей КО, попавших в область наблюдения СКА, определяются по формуле (1) при подстановке в нее коэффициентов, полученных по формуле (8):

$$w_r = w_{\text{НОКО}} \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{\text{НОКО}i} N_i^{(r)}}{D_{X_i}} \sum_{j=1}^{N_i^{(r)}} x_{ij}^{(r)} \right)}{\sum_{i=1}^n \frac{x_{\text{НОКО}i}^2 N_i^{(r)}}{D_{X_i}}} = \frac{w_{\text{НОКО}}}{\sum_{i=1}^n \frac{x_{\text{НОКО}i}^2 N_i^{(r)}}{D_{X_i}}} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{\text{НОКО}i} N_i^{(r)}}{D_{X_i}} \sum_{j=1}^{N_i^{(r)}} x_{ij}^{(r)} \right), r = \overline{1, R}. \quad (10)$$

Выбор наиболее опасного космического объекта

Из формулы (10) видно, что НОКО является тот, значение комплексного показателя которого ближе к величине $w_{\text{НОКО}}$.

В качестве меры близости предлагается использовать величину

$$\delta_r = \left| \frac{w_r - w_{\text{НОКО}}}{w_{\text{НОКО}}} \right| = \left| \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{\text{НОКО}i} N_i^{(r)}}{D_{X_i}} \sum_{j=1}^{N_i^{(r)}} x_{ij}^{(r)} \right)}{\sum_{i=1}^n \frac{x_{\text{НОКО}i}^2 N_i^{(r)}}{D_{X_i}}} - 1 \right| = \frac{\left| \sum_{i=1}^n \frac{x_{\text{НОКО}i} N_i^{(r)}}{D_{X_i}} \left(\frac{1}{N_i^{(r)}} \sum_{j=1}^{N_i^{(r)}} x_{ij}^{(r)} - x_{\text{НОКО}i} \right) \right|}{\sum_{i=1}^n \frac{x_{\text{НОКО}i}^2 N_i^{(r)}}{D_{X_i}}}, r = \overline{1, R} \quad (11)$$

Тогда решающее правило выбора номера k наиболее опасного объекта из множества КО, попавших в область наблюдения СКА, определяется выражением

$$k: \delta_k = \min\{\delta_r, r = \overline{1, R}\}. \quad (12)$$

Если для некоторых КО минимальные значения относительных величин, полученных по формуле (11), близки (например, $\delta_1 \approx \delta_2 = \min\{\delta_r, r = \overline{1, R}\}$), то в качестве наиболее опасного выбирается тот объект, для которого дисперсия комплексного показателя, полученная по формуле (9), меньше. То есть при $D_{W_1} < D_{W_2}$ НОКО считается объект с номером 1, поскольку вероятность события $|W_1 - w_{\text{НОКО}}| < |W_2 - w_{\text{НОКО}}|$ больше вероятности противоположного события $|W_1 - w_{\text{НОКО}}| \geq |W_2 - w_{\text{НОКО}}|$.

Это можно доказать следующим образом.

Рассматриваются два объекта с условными номерами 1 и 2, причем $\delta_1 = \min\{\delta_r, r = \overline{1, R}\}$, $\delta_2 \approx \delta_1$ и $D_{W_1} < D_{W_2}$. Поскольку все селективные признаки имеют нормальное распределение, то и комплексные показатели W_1 и W_2 в силу модели (1) также будут распределены по нормальному закону с дисперсиями D_{W_1} и D_{W_2} соответственно. Тогда при справедливости гипотезы о том, что i -й ($i = 1, 2$) КО является наиболее опасным, можно положить, что математические ожидания комплексных показателей W_1 и W_2 равны $w_{\text{НОКО}}$ и их функции плотности распределения имеют вид

$$\varphi_{W_i}(w_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{W_i}}} e^{-\frac{(w_i - w_{\text{НОКО}})^2}{2D_{W_i}}}, i = 1, 2. \text{ Следует}$$

также заметить, что полученные по формуле (8) коэффициенты моделей комплексных показателей всех КО (в том числе и объектов с номерами 1 и 2), попавших в наблюдаемую СКА область, удовлетворяют уравнениям (2).

Найдем функцию плотности распределения отношения

$$Z_{12} = \frac{W_1 - w_{\text{НОКО}}}{W_2 - w_{\text{НОКО}}} = \frac{Z_1}{Z_2}, \quad (13)$$

где случайная величина $Z_i = W_i - w_{\text{НОКО}}$ имеет

$$\text{распределение } \varphi_{Z_i}(z_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{W_i}}} e^{-\frac{z_i^2}{2D_{W_i}}}, i = 1, 2.$$

Воспользовавшись известной формулой для определения функции плотности распределения отношения двух нормально распределенных случайных величин, получим

$$\varphi_{Z_{12}}(z_{12}) = \int_{-\infty}^{\infty} |z_2| \varphi_{z_2}(z_2) \varphi_{z_1}(z_{12}z_2) dz_2 =$$

$$= \frac{1}{2\pi\sqrt{D_{W_1}D_{W_2}}\left(\frac{1}{2D_{W_2}} + \frac{z_{12}^2}{2D_{W_1}}\right)}. \quad (14)$$

На основе функции плотности распределения $\varphi_{Z_{12}}(z_{12})$ определяется вероятность события $|Z_1| < |Z_2|$:

$$P(|Z_1| < |Z_2|) = P\left(\left|\frac{Z_1}{Z_2}\right| < 1\right) = P(|Z_{12}| < 1) = \int_{-1}^1 \varphi_{Z_{12}}(z_{12}) dz_{12} = \frac{2}{\pi} \arctg \sqrt{\frac{D_{W_2}}{D_{W_1}}}. \quad (15)$$

Поскольку вероятность противоположного события $P(|Z_1| \geq |Z_2|) = 1 - P(|Z_1| < |Z_2|)$, а функция арктангенса монотонно возрастающая, то при $D_{W_1} < D_{W_2}$ вероятность $P(|Z_1| < |Z_2|) > P(|Z_1| \geq |Z_2|)$ и наиболее опасным является 1-й КО.

Из формулы (15) также видно, что при $D_{W_1} = D_{W_2}$ имеет место равенство вероятностей $P(|Z_1| < |Z_2|) = P(|Z_1| \geq |Z_2|) = 0,5$. Если при этом по результатам проведенных измерений селективных признаков получилось $\delta_1 = \min\{\delta_r, r = 1, R\}$, $\delta_2 \approx \delta_1$, то для принятия решения о НОКО требуется дополнительная измерительная информация.

На основе вероятностей $P(|Z_j| < |Z_i|)$, $i, j = 1, R, i \neq j$ можно априорно (без использования результатов измерений селективных признаков) оценить вероятность $P_{\text{апр}}^{(r)}$ того, что r -й КО является наиболее опасным ($r = 1, R$). Если допустить, что один из наблюдаемых КО является наиболее опасным, то должно выполняться условие $\sum_{r=1}^R P_{\text{апр}}^{(r)} = 1$. Тогда для определения веро-

ятей $P_{\text{апр}}^{(r)}$ предлагается использовать приближенную формулу

$$P_{\text{апр}}^{(r)} = \frac{\sum_{j=1, j \neq r}^R P(|Z_r| < |Z_j|)}{\sum_{r=1}^R \sum_{j=1, j \neq r}^R P(|Z_r| < |Z_j|)}, \quad r = 1, R. \quad (16)$$

Многочисленное ее применение в модельных экспериментах показало, что отличия полученных оценок от фактических значений вероятностей составляют единицы процентов. Поэтому формула (16) может служить основой для получения апостериорных оценок вероятностей выбора каждого из наблюдаемых КО как наиболее опасного для окружающих его КА и использования

их для принятия решения по максимуму апостериорной вероятности.

Иллюстративный пример

Рассматривается гипотетический СКА, ведущий наблюдение за определенной областью космического пространства. В наблюдаемую им область попадают четыре ($R = 4$) космических объекта (КО1, КО2, КО3 и КО4). Известно, что среди них находится КО, представляющий наибольшую опасность для функционирующих в его окрестности КА. Состояние каждого объекта характеризуется пятью ($n = 5$) независимыми безразмерными селективными признаками (в общем случае имеющими различную физическую природу) $X_i, i = 1, 5$, распределенными по нормальному закону с известными дисперсиями $D_{X_1} = 0,05, D_{X_2} = 0,05, D_{X_3} = 12, D_{X_4} = 0,11, D_{X_5} = 0,11$.

Известны значения этих признаков для НОКО: $x_{\text{НОКО1}} = 10, x_{\text{НОКО2}} = 7, x_{\text{НОКО3}} = 500, x_{\text{НОКО4}} = 40, x_{\text{НОКО5}} = 25$.

Для определения НОКО были проведены измерения селективных признаков всех КО, попавших в область наблюдения СКА.

Измерительная информация о селективных признаках КО1 представлена множеством

$$\mathbf{X}_1 = \{x_{11}^{(1)}, x_{31}^{(1)}, x_{32}^{(1)}, x_{41}^{(1)}, x_{51}^{(1)}, x_{52}^{(1)}\} = \{10, 01; 490, 75; 496, 87; 39, 84; 24, 77; 24, 92\},$$

включающим одно ($N_1^{(1)} = 1$) измеренное значение 1-го признака ($x_{11}^{(1)} = 10, 01$), два ($N_3^{(1)} = 2$) измеренных значения 3-го признака ($x_{31}^{(1)} = 490, 75, x_{32}^{(1)} = 496, 87$), одно ($N_4^{(1)} = 1$) измеренное значение 4-го признака ($x_{41}^{(1)} = 39, 84$) и два ($N_5^{(1)} = 2$) измеренных значения 5-го признака ($x_{51}^{(1)} = 24, 77, x_{52}^{(1)} = 24, 92$). Значение 2-го признака КО1 измерить не удалось ($N_2^{(1)} = 0$).

Измерительная информация о состояниях 2–4 наблюдаемых КО имеет следующий вид:

$$\mathbf{X}_2 = \{x_{11}^{(2)}, x_{21}^{(2)}, x_{31}^{(2)}, x_{41}^{(2)}, x_{42}^{(2)}, x_{51}^{(2)}\} = \{10, 35; 7, 44; 501, 84; 39, 82; 40, 33; 24, 81\},$$

$$N_1^{(2)} = 1; N_2^{(2)} = 1; N_3^{(2)} = 1; N_4^{(2)} = 2; N_5^{(2)} = 1;$$

$$\mathbf{X}_3 = \{x_{21}^{(3)}, x_{31}^{(3)}, x_{41}^{(3)}, x_{51}^{(3)}, x_{52}^{(3)}\} = \{6, 98; 497, 26; 40, 05; 24, 59; 25, 05\},$$

$$N_1^{(3)} = 0; N_2^{(3)} = 1; N_3^{(3)} = 1; N_4^{(3)} = 1; N_5^{(3)} = 2;$$

$$\mathbf{X}_4 = \{x_{11}^{(4)}, x_{12}^{(4)}, x_{21}^{(4)}, x_{41}^{(4)}, x_{42}^{(4)}, x_{51}^{(4)}\} = \{10, 07; 9, 83; 6, 82; 40, 20; 40, 29; 25, 17\},$$

$$N_1^{(4)} = 2; N_2^{(4)} = 1; N_3^{(4)} = 0; N_4^{(4)} = 2; N_5^{(4)} = 1.$$

Необходимо из четырех наблюдаемых СКА объектов выбрать наиболее опасный.

На основе имеющихся данных по формуле (8), в которой полагается $w_{\text{НОКО}} = 1$, определяются коэффициенты моделей комплексных показателей для всех наблюдаемых объектов:

$$\begin{aligned} a_1^{(1)} &= 0,0029; a_2^{(1)} = 0,0020; a_3^{(1)} = 0,0006; \\ a_4^{(1)} &= 0,0052; a_5^{(1)} = 0,0033; \\ a_1^{(2)} &= 0,0034; a_2^{(2)} = 0,0024; a_3^{(2)} = 0,0007; \\ a_4^{(2)} &= 0,0062; a_5^{(2)} = 0,0039; \\ a_1^{(3)} &= 0,0042; a_2^{(3)} = 0,0029; \\ a_3^{(3)} &= 0,0009; a_4^{(3)} = 0,0076; a_5^{(3)} = 0,0048; \\ a_1^{(4)} &= 0,0050; a_2^{(4)} = 0,0035; \\ a_3^{(4)} &= 0,0010; a_4^{(4)} = 0,0091; a_5^{(4)} = 0,0057. \end{aligned}$$

Подстановка этих коэффициентов в формулы (1) и (3) дает значения $w_1 = 0,9908$, $w_2 = 1,0037$, $w_3 = 0,9963$, $w_4 = 1,0044$ комплексных показателей наблюдаемых СКА объектов и их дисперсий $D_{W_1} = 1,44 \cdot 10^{-5}$, $D_{W_2} = 1,71 \cdot 10^{-5}$, $D_{W_3} = 2,10 \cdot 10^{-5}$, $D_{W_4} = 2,52 \cdot 10^{-5}$.

По формуле (11) определяются значения величины, характеризующей близость комплексных показателей наблюдаемых объектов к НОКО: $\delta_1 = 0,0092$, $\delta_2 = 0,0037$, $\delta_3 = 0,0037$, $\delta_4 = 0,0044$. Отсюда видно, что минимальные значения комплексных показателей КО2 и КО3 совпадают. Но поскольку $D_{W_2} < D_{W_3}$, то принимается решение, что наиболее опасным является КО2. В этом случае согласно формуле (15) вероятность $P(|W_2 - w_{\text{НОКО}}| < |W_3 - w_{\text{НОКО}}|) = 0,5326$, что больше вероятности $P(|W_3 - w_{\text{НОКО}}| < |W_2 - w_{\text{НОКО}}|) = 0,4674$ альтернативного события.

Заключение

Предложен подход к решению задачи выбора из множества наблюдаемых СКА космических объектов наиболее опасного для функционирующих в его окрестности КА. В его основе лежит комплексный безразмерный показатель в виде линейной комбинации результатов измерений селективных признаков, характеризующих КО. Величина и качество определения комплексного показателя для каждого КО зависят от объема и качества измерительной информации. В связи с этим одним из условий при определении коэффициентов, связывающих селективные признаки с комплексными показателями наблюдаемых объектов, является минимум дисперсий последних.

В отличие от известных методов, задача выбора решается при ограниченных объемах измерительной информации о физически неоднородных селективных признаках КО, находящихся в наблюдаемой СКА области. При этом измерительные данные об отдельных селективных признаках КО могут отсутствовать. Предложенное решающее правило для выбора наиболее опасного КО учитывает не только погрешности, но и количество измерений селективных признаков каждого КО. Показано, что при незначительных расхождениях между комплексными показателями наблюдаемых КО выбирается тот объект, вероятность появления которого является максимальной. Следует отметить, что предлагаемый метод может быть использован не только для выбора НОКО, но и для ранжирования всех наблюдаемых объектов с точки зрения степени опасности, которую они представляют для функционирующих КА.

Простота определения комплексных показателей и основанного на них решающего правила выбора НОКО позволяет решать эту задачу на борту СКА в реальном масштабе времени.

Литература

1. Zarcone G., Mariani L., Bucciarelli M., Hosseim S. H., Curiano F., Celesti P., Palo L. D. Image processing for geo detection. *Proc. of 3rd Intern. Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, June 11–13, 2021, Turkey, 2021, pp. 1–6. doi:10.1109/HORA52670.2021.9461359
2. Ключников В. Ю. Как очистить околоземное пространство от космического мусора? *Воздушно-космическая сфера*, 2019, № 1(98), с. 96–107. doi:10.30981/2587-7992-2019-98-1-96-107
3. Павлова Е. А., Стрельцов А. И., Еленин Л. В., Степаньянц В. А., Захваткин М. В. Формирование еди-

ного классификатора опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве. *Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша*, 2020, № 23, 22 с. <http://doi.org/10.20948/prepr-2020-23>. <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2020-23> (дата обращения: 05.08.2021).

4. Шустов Б. М. О роли науки в изучении и парировании космических угроз. *Вестник Российской академии наук*, 2019, т. 89, № 8, с. 777–799. doi:http://doi.org/10.31857/S0869-5873898777-000
5. Зберя В. А. Канада и США: у истоков военно-политического сотрудничества. *Россия и Америка в XXI веке*, 2020, вып. № 4, 15 с. doi:10.18254/S207054760013330-0. <https://rusus.jes.su/s207054760013330-0-1/> (дата обращения: 05.08.2021).

6. **Menshikov V. A., Perminov A. N., Urlichich Y. M.** *The Conception of the International Global Monitoring Aerospace System (IGMASS)*. Global Aerospace Monitoring and Disaster Management. Springer, Vienna, 2012. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0810-9_4
7. **Журкин И. Г., Чабан Л. Н., Орлов П. Ю.** Структурно-топологический алгоритм идентификации звезд и обнаружения объектов околоземного космического пространства. *Компьютерная оптика*, 2020, т. 44, № 3, с. 375–384. doi:10.18287/2412-6179-CO-597
8. **Кириченко Д. В., Багров А. В.** Оперативное выявление космогенных угроз с помощью орбитальных средств контроля космического пространства. *Радиопромышленность*, 2014, № 1, с. 174–184.
9. **Амелькин С. А., Захаров А. В., Хачумов В. М.** Обобщенное расстояние Евклида — Махаланобиса и его свойства. *Информационные технологии и вычислительные системы*, 2006, № 4, с. 40–44.
10. **Арсеньев В. Н., Ключкин А. К., Ядренкин А. А.** Метод выбора целевого объекта по ограниченным измерениям физически неоднородных признаков. *Изв. вузов. Приборостроение*, 2021, т. 64, № 10, с. 799–805. doi:10.17586/0021-3454-2021-64-10-799-805
11. **Волков В. Ю.** Адаптивная многопороговая селекция объектов на изображениях в системах дистанционного зондирования. *Информационно-управляющие системы*, 2020, № 3, с. 12–24. doi:10.31799/1684-8853-2020-3-12-24
12. **Afanasev A. A., Biktimirov S. N.** CubeSat formation architecture for small space debris surveillance and orbit determination. *Информационно-управляющие системы*, 2021, № 4, с. 37–46. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-4-37-46>
13. **Немыкин О. И.** Алгоритм селекции элементов запуска при наличии априорной информации о его составе и структуре. *Вопросы радиоэлектроники*, 2018, № 3, с. 114–119. <https://doi.org/10.21778/2218-5453-2018-3-114-119>
14. **Немыкин О. И.** Исследование информативности признаков селекции КА, формируемых по результатам обработки временных реализаций некоординатной информации. *Вопросы радиоэлектроники*, 2018, № 3, с. 90–98. <https://doi.org/10.21778/2218-5453-2018-3-90-98>
15. **Spiller D., Facchinetti C., Ansalone L., Tuozzi A., Magionami E., Schiattarella V., Curti F.** On-orbit recognition of resident space objects by using star trackers. *Acta Astronautica*, 2020, vol. 177, pp. 478–496. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.08.009>
16. **Смирнов Е. Е., Поздняков А. А., Паршин М. С.** Модель классификации объектов наблюдения в условиях пересечения их траекторий движения на основе совместного анализа траекторной и поляризационной информации. *Информационно-измерительные и управляющие системы*, 2021, т. 19, № 4, с. 14–26. doi:10.18127/j20700814-202104-02
17. **Гультияев Ю. П., Ковальчук В. С., Попов В. В.** Пути повышения различимости объектов в цифровых телевизионных системах наблюдения. *Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: тр. VIII Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.*, Санкт-Петербург, 27–28 февраля 2019 г., СПб., 2019, с. 126–130.
18. **Куликов С. В., Епанешников Н. М., Лиференко В. Д., Алдохина В. Н.** Обнаружение факта разрушения космических объектов на орбите по некоординатной информации наблюдаемого потока. *Вопросы радиоэлектроники*, 2020, № 6, с. 17–24. doi:10.21778/2218-5453-2020-6-17-24
19. **Aldokhina V. N., Kolesnik D. Y., Liferenko V. D., Legkov K. E.** Model of recognition of cosmic objects based on informative signs obtained by radar means. *Proc. Conf. "Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems" WECONF 2020*, Saint-Petersburg, 2020, p. 9131444. doi:10.1109/WECONF-48837.2020.9131444
20. **Liferenko V. D., Legkov K. E., Kolesnik D. Y.** Method for recognizing the type of space object in airspace based on the use of radar images. *Proc. Conf. "Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications" SYNCHROINFO 2020*, Svetlogorsk, 2020, p. 9166055. doi:10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166055
21. **Лепешкин С. А., Мишуков О. А.** Особенности совместной обработки разномодальных изображений в автоматизированных системах дистанционного зондирования распределенных объектов. *Тр. ВКА им. А. Ф. Можайского*, 2018, № 664, с. 131–140.
22. **Арсеньев В. Н., Трофимов И. А.** Решение задачи выбора в условиях физической неоднородности и ограниченности наблюдаемых признаков. *Информационно-управляющие системы*, 2015, № 4, с. 114–118. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.4.114

UDC 623.4.016

doi:10.31799/1684-8853-2022-2-11-19

Selection of a given space object from the multitude observed by a specialized spacecraft

V. N. Arseniev^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0001-6424-5320, vladar56@mail.ruA. A. Yadrenkin^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0003-2089-7460^aA. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia Emb., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: For the detection of most dangerous artificial space objects (space junk) in near-earth space, it is planned to use specialized spacecraft equipped with optoelectronic devices. In relation to this a problem arose when selecting the most dangerous object from the observed multitude, based on the measurements of inhomogeneous selective features that characterize these objects. **Purpose:** Form a complex dimensionless indicator, depending on the quantity and quality of measurement information about the observed space objects, and a decision rule for choosing the most dangerous object, providing the maximum probability of making the right decision. **Results:** A method is proposed for selecting the most dangerous space object under the condition of the limited amount of measurement information about physically inhomogeneous selective features of space objects located in the area which is observed by a specialized spacecraft. It should be noted that the measurement data on individual selective features of space objects may be absent. The proposed decision rule for the selection of the most dangerous space object takes into account not only inaccuracies and errors, but also the number of measurements of the selective characteristics of each object. The efficiency of the method has been demonstrated on a relevant example. **Practical relevance:** The simplicity of the determination of composite indicators characterizing space objects that are located in the area observed by a specialized spacecraft, and of the decision rule for selecting the most dangerous object makes it possible to solve this problem on board a specialized spacecraft in real time.

Keywords — the most dangerous space object, selective features, specialized spacecraft, observation, composite indicator.

For citation: Arseniev V. N., Yadrenkin A. A. Selection of a given space object from the multitude observed by a specialized spacecraft. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 2, pp. 11–19 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2022-2-11-19

References

- Zarccone G., Mariani L., Bucciarelli M., Hosseim S. H., Curiano F., Celesti P., Palo L. D. Image processing for geo detection. *Proc. of 3rd Intern. Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, June 11–13, 2021, Turkey, 2021, pp. 1–6. doi:10.1109/HORA52670.2021.9461359
- Klyshnikov V. Y. How to clear remove debris from near-earth space? *Aerospace Sphere Journal*, 2019, no. 1(98), pp. 96–107 (In Russian). doi:10.30981/2587-7992-2019-98-1-96-107
- Pavlova E. A., Streltsov A. I., Elenin L. V., Stepanyants V. A., Zakhvatkin M. V. Development of the common classification for hazards events in the near-Earth space. *Preprinty IPM im. M. V. Keldysha*, 2020, no. 23, 22 p. (In Russian). http://doi.org/10.20948/prepr-2020-23. Available at: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2020-23> (accessed 5 August 2021).
- Shustov B. M. The role of science in the study and prevention of space hazards. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2019, vol. 89, no. 8, pp. 777–799 (In Russian). doi:<http://doi.org/10.31857/S0869-5873898777-000>
- Zberya V. A. Canada and the United States: at the origins of politico-military cooperation. *Russia and America in the XXI Century*, 2020, iss. 4, 15 p. doi:10.18254/S207054760013330-0. Available at: URL:<https://rusus.jes.su/s207054760013330-0-1/> (accessed 5 August 2013).
- Menshikov V. A., Perminov A. N., Urlichich Y. M. *The Conception of the International Global Monitoring Aerospace System (IGMASS)*. In: *Global Aerospace Monitoring and Disaster Management*. Springer, Vienna, 2012. Pp. 233–261. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0810-9_4
- Zhurkin I. G., Chaban L. N., Orlov P. Yu. Structurally topological algorithm for star recognition and near-Earth space object detecting. *Computer Optics*, 2020, vol. 44, no. 3, pp. 375–384 (In Russian). doi:10.18287/2412-6179-CO-597
- Kirichenko D. V., Bagrov A. V. The rapid identification of the cosmogenic threats by space-based optical-electronic means. *Radio Industry (Russia)*, 2014, no. 1, pp. 174–184 (In Russian).
- Amelkin S. A., Zakharov A. V., Khachumov V. M. Generalized Euclidean — Mahalanobis distance and its properties. *Journal of Information Technologies and Computing Systems*, 2006, no. 4, pp. 40–44 (In Russian).
- Arseniev V. N., Klyuchkin A. K., Yadrenkin A. A. Method for target object selecting based on a limited number of measurements of physically dissimilar features. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, vol. 64, no. 10, pp. 799–805 (In Russian). doi:10.17586/0021-3454-2021-64-10-799-805
- Volkov V. Y. Adaptive multi-threshold objects selection in remote sensing images. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 3, pp. 12–24 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-3-12-24
- Afanasev A. A., Biktimirov S. N. CubeSat formation architecture for small space debris surveillance and orbit determination. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2021, no. 4, pp. 37–46. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-4-37-46>
- Nemykin O. I. Algorithm for selection of launch elements in the presence of a priori information about its composition and structure. *Questions of Radio Electronics*, 2018, no. 3, pp. 114–119 (In Russian). <https://doi.org/10.21778/2218-5453-2018-3-114-119>
- Nemykin J. I. Investigation of the informativity of the signs of selection of the spacecraft, formed by the results of processing the temporary realizations of non-coordinate information. *Questions of Radio Electronics*, 2018, no. 3, pp. 90–98 (In Russian). <https://doi.org/10.21778/2218-5453-2018-3-90-98>
- Spiller D., Facchinetti C., Ansalone L., Tuozzi A., Magionami E., Schiattarella V., Curti F. On-orbit recognition of resident space objects by using star trackers. *Acta Astronautica*, 2020, vol. 177, pp. 478–496. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.08.009>
- Smirnov E. E., Pozdniakov A. A., Parshin M. S. Model of classification of observation objects under conditions of intersection of their motion paths based on joint analysis of trajectory and polarization information. *Information-measuring and Control Systems*, 2021, vol. 19, no. 4, pp. 14–26 (In Russian). doi:10.18127/j20700814-202104-02
- Gulyaev Y., Koval'chuk V., Popov V. Ways to improve better visibility of objects in digital video surveillance systems. *Trudy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy i nauchno-metodicheskoy konferencii "Actual'nye problemy informatsionnykh telecommunicatsyi v nauke i obrazovanii"* [Proc. of the VIII Intern. Scientific-Technical and Scientific-Methodical Conf. "Actual problems of information telecommunications in science and education"]. Saint-Petersburg, 2019, pp. 126–130 (In Russian).
- Kulikov S. V., Epaneshnikov N. M., Liferenko V. D., Aldokhina V. N. Detection of fact destruction of space objects in orbit by noncoordinate information of observed flow. *Questions of Radio Electronics*, 2020, no. 6, pp. 17–24 (In Russian). doi:10.21778/2218-5453-2020-6-17-24
- Aldokhina V. N., Kolesnik D. Y., Liferenko V. D., Legkov K. E. Model of recognition of cosmic objects based on informative signs obtained by radar means. *Proc. Conf. "Wave Electron-*

- ics and its Application in Information and Telecommunication Systems*” WECONF 2020, Saint-Petersburg, 2020, p. 9131444. doi:10.1109/WECONF-48837.2020.9131444
20. Liferenko V. D., Legkov K. E., Kolesnik D. Y. Method for recognizing the type of space object in airspace based on the use of radar images. *Proc. Conf. “Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications” SYNCHROINFO 2020*, Svetlogorsk, 2020, p. 9166055. doi:10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166055
21. Lepeshkin S. A., Mishukov O. A. Features of joint processing of multi-spectral images in automated remote sensing systems for distributed objects. *Trudy VKA imeni A. F. Mozhaiskogo*, 2018, no. 664, pp. 131–140 (In Russian).
22. Arseniev V. N., Trofimov I. A. Solving the choice problem in the conditions of physical diversity and limited observable signs. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 4, pp. 114–118 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.4.114

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая SCOPUS и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, что снижает рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста, есть возможность провести регистрацию на 12-ти языках, включая русский (чтобы выбрать язык, кликните на зеленое поле сверху справа на стартовой странице): <https://orcid.org>