



Принятие решения о наиболее опасном техногенном объекте космическим аппаратом мониторинга околоземного космического пространства

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

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

Е. В. Слатова^а, соискатель ученой степени канд. техн. наук, orcid.org/0009-0004-1177-1932

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

Введение: для предотвращения столкновений техногенных объектов с функционирующими в верхних слоях атмосферы Земли космическими аппаратами проводится непрерывное наблюдение за этими объектами с использованием наземных средств. Однако их применение не позволяет предотвратить столкновения с космическим мусором. **Цель:** формирование решающего правила для выбора наиболее опасного объекта из множества наблюдаемых, обеспечивающего максимум апостериорной вероятности. **Результаты:** предложен метод выбора специализированным космическим аппаратом наиболее опасного техногенного объекта из множества наблюдаемых по результатам измерений их частных неоднородных признаков. Состав и количество измерений частных признаков для различных наблюдаемых объектов могут отличаться. В основе предложенного решающего правила лежит комплексное использование не только фактических значений частных признаков наблюдаемых объектов, полученных по результатам измерений, но и расчетных вероятностей гипотез о наиболее опасном объекте. Такой подход позволяет принять решение, обеспечивающее максимум апостериорной вероятности. Работоспособность метода продемонстрирована на примере. **Практическая значимость:** возможность принятия решения по различным совокупностям и количествам измерений частных признаков наблюдаемых объектов, а также простота решающего правила позволяют на борту специализированного космического аппарата мониторинга околоземного космического пространства оперативно определять наиболее опасный техногенный объект.

Ключевые слова — техногенные космические объекты, специализированный космический аппарат, наблюдение, частные признаки, комбинированный признак, решающее правило.

Для цитирования: Арсеньев В. Н., Ядренкин А. А., Слатова Е. В. Принятие решения о наиболее опасном техногенном объекте космическим аппаратом мониторинга околоземного космического пространства. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 4, с. 26–34. doi:10.31799/1684-8853-2023-4-26-34, EDN: BHIXTF

For citation: Arseniev V. N., Yadrenkin A. A., Slatova E. V. Making a decision on the most dangerous man-made object by a spacecraft for monitoring near-Earth space. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 4, pp. 26–34 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-4-26-34, EDN: BHIXTF

Введение

Для функционирующих в околоземном космическом пространстве космических аппаратов (КА) серьезную опасность представляет скопившийся там в большом количестве космический мусор, имеющий искусственное происхождение (отработавшие элементы средств выведения, разгонные блоки, неиспользуемые космические аппараты, фрагменты, образовавшиеся в результате их столкновений, и т. д.) [1, 2]. Для предотвращения столкновений техногенных объектов с функционирующими КА используются наземные средства, осуществляющие непрерывное наблюдение за обстановкой в верхних слоях атмосферы [3, 4]. В настоящее время рассматривается программа построения системы обзора на базе космических аппаратов (КАСО) [5], оснащенных специальной аппаратурой [6]. По результатам наблюдения за космическими объектами (КО) формируется единый классификатор опасных ситуаций, которые могут возникнуть в верхних

слоях атмосферы [7]. Он позволяет определить характерные признаки космических объектов, представляющих опасность для функционирующих КА [8]. Эти признаки содержат координатную и некоординатную информацию о геометрической форме, размерах КО, спектральных и энергетических характеристиках излучаемых или отраженных ими сигналов, параметрах движения и т. д. и имеют различную физическую природу [9]. В зависимости от расстояния и ракурса наблюдения для одних КО удаётся определить одну совокупность признаков, для других — другую, количество измерений одних и тех же признаков для различных объектов также может отличаться.

Каждый КАСО ведет наблюдение за обстановкой в заданной области космического пространства, в которой находится функционирующий КА. В этой области, как правило, находятся другие космические объекты, представляющие угрозу КА. По результатам измерений призна-

ков, характеризующих наблюдаемые объекты, КАСО должен принять решение о наиболее опасном техногенном объекте [10]. При этом полагается, что частные признаки, характеризующие наиболее опасный техногенный объект (НОО), известны.

В настоящее время разработаны различные подходы к решению этой задачи. Большинство из них базируется на использовании обобщенного (по Колмогорову) расстояния и его частных случаев [11]. Имеются и другие методы, отличающиеся совокупностями используемых частных признаков и правилами принятия решения о НОО. Они достаточно подробно представлены в статье [12]. Отметим лишь некоторые их особенности. В качестве частных признаков, характеризующих наблюдаемые КО, в работах [13, 14] предлагается использовать их конструктивные особенности. В статье [9] используются координатные признаки КО. Автор статьи [15] предлагает для принятия решения использовать геометрические признаки наблюдаемых объектов. В статье [16] показано, что для получения координатной информации о параметрах движения техногенных объектов целесообразно использовать специальные группировки малых КА, оснащенных оптико-электронными датчиками. Для распознавания КО в работе [17] предлагается использовать орбитальные и наземные средства, включающие КА, оснащенные датчиками звезд. Авторы статьи [18] для решения задачи классификации комплексируют данные о параметрах траектории движения объекта и поляризационную информацию. В докладе [19] для различимости объектов используются цифровые телевизионные системы наблюдения. В качестве признака, характеризующего наблюдаемые объекты, используется отношение сигнал/шум. В работе [20] для принятия решения анализируется изменение во времени параметров эффективной поверхности рассеяния КО. В работах [21, 22] для распознавания объектов используется некоординатная информация в виде параметров и характеристик радиолокационных изображений объектов. Авторы статьи [23] для распознавания объектов предлагают проводить совместную обработку информации, полученной по их разносектральным изображениям. Для селекции КО в работе [10] используется критерий отношения правдоподобия, учитывающий как координатные, так и некоординатные признаки объектов и позволяющий комплексовать ограниченную разнородную информацию. В статьях [12, 24] для выбора заданного КО из множества наблюдаемых предлагается использовать комбинированные признаки в виде линейной свертки частных признаков, характеризующих наблюдаемые объекты.

Следует отметить, что применение подходов к решению задачи выбора, предложенных в ра-

ботах [15, 19–22], предполагает использование только одного типа информации (координатной или некоординатной). Для принятия решения методами, изложенными в работах [10, 13, 14, 17, 18, 23], необходим достаточно большой объем измерительной и (или) априорной информации о наблюдаемых объектах, а также время для накопления и обработки данных. Применение методов, предложенных в работах [9, 16, 17], в настоящее время ограничено в связи с отсутствием необходимых для их реализации космических средств. Одним из требований метода принятия решения о НОО, рассмотренного в работе [24], является наличие одинаковых объемов измерительной информации о частных признаках всех наблюдаемых КО. На практике это требование не всегда можно удовлетворить. Решающее правило для принятия решения о наиболее опасном КО, предложенное в статье [12], основано на использовании относительных отклонений комбинированных признаков наблюдаемых объектов от комбинированных признаков НОО и не позволяет в полном объеме использовать априорную информацию о наблюдаемых объектах.

Постановка задачи выбора наиболее опасного техногенного объекта

Рассматривается КАСО, ведущий наблюдение за некоторой областью в верхних слоях атмосферы, в которой находится функционирующий КА и объекты техногенного происхождения.

Общее число объектов, за которыми наблюдает КАСО, равно R .

Частные признаки $X_i, i = \overline{1, n}$, характеризующие наблюдаемые объекты, являются независимыми случайными величинами, распределенными по нормальному закону.

Полагается, что математические ожидания погрешностей измерений частных признаков равны нулю и известны дисперсии $D_{X_i}, i = \overline{1, n}$, погрешностей бортовых измерительных средств.

В области, наблюдаемой КАСО, находится НОО с известными значениями $x_{НООi}, i = \overline{1, n}$, частных признаков.

С помощью измерительных средств КАСО проведены измерения частных признаков, характеризующих все КО, попавшие в наблюдаемую область.

Частный признак $X_i^{(r)}$ с номером i , характеризующий наблюдаемый объект с номером r , был измерен $N_i^{(r)} \geq 0$ раз. Полученные значения частных признаков обозначаются $x_{ij}^{(r)}, r = \overline{1, R}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, N_i^{(r)}}$. Если для какого-то объекта не удалось измерить ни одного частного признака, то при принятии решения о

НОО он не рассматривается, поскольку в этом случае является ненаблюдаемым.

На основе имеющейся информации необходимо из множества КО, попавших в область наблюдения КАСО, выбрать объект, который по критерию максимума апостериорной вероятности представляет наибольшую опасность функционирующему в его окрестности КА.

Предлагается следующий порядок решения данной задачи.

1. По результатам измерений частных признаков рассчитываются безразмерные комбинированные признаки, характеризующие наблюдаемые объекты, по известной формуле [12]

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

где $w_{\text{НОО}}$ – комбинированный признак НОО, значение которого выбирается из удобства представления данных при расчетах, поскольку оно не влияет на качество решения поставленной задачи [это видно из приведенной ниже формулы (3)].

Формула (1) для вычисления значения комбинированного признака получена на основе линейной свертки значений частных признаков, коэффициенты которой минимизируют дисперсию комбинированного признака при условии, что их сумма равна $w_{\text{НОО}}$.

2. Определяются дисперсии, характеризующие точность оценивания комбинированных признаков наблюдаемых объектов, путем применения операции вычисления дисперсии к правой части формулы (1) [12]:

$$D_{w_r} = D[w_r] = \frac{w_{\text{НОО}}^2}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{x_{\text{НОО}i}^2 N_i^{(r)}}{D_{X_i}} \right)^2} \sum_{i=1}^n \frac{x_{\text{НОО}i}^2 N_i^{(r)}}{D_{X_i}} = \frac{w_{\text{НОО}}^2}{\sum_{i=1}^n \frac{x_{\text{НОО}i}^2 N_i^{(r)}}{D_{X_i}}}, r = \overline{1, R}. \quad (2)$$

3. Рассматриваются гипотезы H_r , состоящие в предположении, что r -й наблюдаемый объект является наиболее опасным, $r = \overline{1, R}$.

4. На основе формулы, позволяющей найти вероятность P_{ij} того, что i -й наблюдаемый объект ближе к НОО, чем j -й:

$$P_{ij} = \frac{2}{\pi} \arctg \sqrt{\frac{D_{w_j}}{D_{w_i}}}, i, j = \overline{1, R}, i \neq j, \quad (3)$$

находятся расчетные вероятности $P(H_r)$ гипотез H_r , $r = \overline{1, R}$.

Формула (3) согласно работе [12] получена путем определения функции плотности распределения отношения $\frac{W_i - w_{\text{НОО}}}{W_j - w_{\text{НОО}}}$ и вычисления на ее основе вероятности

$$P_{ij} = P \left(\left| \frac{W_i - w_{\text{НОО}}}{W_j - w_{\text{НОО}}} \right| < 1 \right).$$

5. По полученным в п. 1 значениям w_r , $r = \overline{1, R}$, комбинированных признаков наблюдаемых объектов определяются условные вероятности $P(w_r/H_r)$, $r = \overline{1, R}$, характеризующие близость этих значений к комбинированному признаку $w_{\text{НОО}}$, при условии справедливости соответствующих гипотез H_r , $r = \overline{1, R}$.

6. Рассчитываются апостериорные вероятности гипотез $P(H_r/w_r)$, $r = \overline{1, R}$.

7. Наиболее опасным полагается КО, имеющий максимальное значение апостериорной вероятности.

Таким образом, для принятия решения о НОО необходимо найти расчетные вероятности $P(H_r)$ гипотез H_r и условные вероятности $P(w_r/H_r)$, характеризующие удаленность комбинированных признаков наблюдаемых объектов от комбинированного признака $w_{\text{НОО}}$.

Определение расчетных вероятностей гипотез H_r , $r = \overline{1, R}$

Полагается, что в области, наблюдаемой КАСО, находится техногенный объект, представляющий наибольшую опасность функционирующему КА. Тогда гипотезы H_r , $r = \overline{1, R}$, образуют полную группу несовместных событий и сумма их вероятностей $\sum_{r=1}^R P(H_r) = 1$.

Гипотеза H_r , состоящая в том, что r -й наблюдаемый объект является наиболее опасным, будет верна, если выполняются условия

$$P_{ri} > P_{ir}, i = \overline{1, R}, i \neq r, \quad (4)$$

где вероятности P_{ri} вычисляются по формуле (3) после подстановки в нее соответствующих дисперсий комбинированных признаков, полученных по формуле (2); $P_{ir} = 1 - P_{ri}$.

Вероятность одновременного выполнения этих условий в силу независимости измерений частных признаков и, как следствие, независимости комбинированных признаков

наблюдаемых объектов определяется по формуле

$$\prod_{i=1}^R P_{ri}, i \neq r. \quad (5)$$

При нарушении любого из условий в выражении (4) гипотеза H_r отвергается. Вероятность возникновения такой ситуации можно рассчитать по формуле

$$\begin{aligned} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^R P_{kr} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq r \\ i \neq k}}^R P_{ri} &= P_{2r} P_{r3} P_{r4} \dots P_{rR} + \\ &+ P_{r2} P_{3r} P_{r4} \dots P_{rR} + P_{r2} P_{r3} P_{4r} \dots P_{rR} + \dots + \\ &+ P_{r2} P_{r3} P_{r4} \dots P_{Rr}. \end{aligned}$$

Отсюда видно, что вероятности альтернативных событий, когда рассматриваемая гипотеза отвергается, определяются следующим образом:

– вероятность отвергнуть гипотезу H_1 ($r = 1$)

$$\begin{aligned} &P_{21} P_{13} P_{14} \dots P_{1R} + P_{12} P_{31} P_{14} \dots P_{1R} + \\ &+ P_{12} P_{13} P_{41} P_{15} \dots P_{1R} + \dots + P_{12} P_{13} P_{14} \dots P_{1(R-1)} P_{R1}; \end{aligned}$$

– вероятность отвергнуть гипотезу H_2 ($r = 2$)

$$\begin{aligned} &P_{12} P_{23} P_{24} \dots P_{2R} + P_{21} P_{32} P_{24} \dots P_{2R} + \\ &+ P_{21} P_{23} P_{42} P_{25} \dots P_{2R} + \dots + P_{21} P_{23} P_{24} \dots P_{2(R-1)} P_{R2}; \end{aligned}$$

– вероятность отвергнуть гипотезу H_R ($r = R$)

$$\begin{aligned} &P_{1R} P_{R2} P_{R3} \dots P_{R(R-1)} + P_{R1} P_{2R} P_{R3} \dots P_{R(R-1)} + \\ &+ P_{R1} P_{R2} P_{3R} P_{4R} \dots P_{R(R-1)} + \dots + P_{R1} P_{R2} P_{R3} \dots P_{(R-1)R}. \end{aligned}$$

Тогда вероятность гипотезы H_r (события, состоящего в том, что r -й наблюдаемый объект является наиболее опасным) будет определяться по формуле

$$\begin{aligned} P(H_r) &= \frac{\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq r}}^R P_{ri}}{\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq r}}^R P_{ri} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^R P_{kr} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq r \\ i \neq k}}^R P_{ri}} = \\ &= \frac{1}{1 + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^R P_{kr} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq r \\ i \neq k}}^R P_{ri}} \Bigg/ \frac{1}{\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq r}}^R P_{ri}} = \frac{1}{1 + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^R \frac{P_{kr}}{P_{rk}}}. \end{aligned}$$

Поскольку второе слагаемое, стоящее в знаменателе последнего выражения:

$$\begin{aligned} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^R \frac{P_{kr}}{P_{rk}} &= \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^R \frac{1 - P_{rk}}{P_{rk}} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^R \left(\frac{1}{P_{rk}} - 1 \right) = \\ &= \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^R \frac{1}{P_{rk}} - (R - 1) = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^R \frac{1}{P_{rk}} - R + 1, \end{aligned}$$

то окончательно получается достаточно простая формула для расчета вероятности того, что r -й космический объект является наиболее опасным для функционирующего КА:

$$P(H_r) = \frac{1}{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^R \frac{1}{P_{rk}} - R + 2}. \quad (6)$$

Данная формула позволяет рассчитать вероятности гипотез для каждого наблюдаемого КО только по информации о том, какие его частные признаки удалось измерить, количествах измерений отдельных признаков и дисперсиях погрешностей задействованных измерительных средств. Поскольку сами измеренные значения частных признаков не используются, то полученные вероятности называются расчетными.

Очевидно, что если состав измеренных частных признаков и количества их измерений для всех наблюдаемых объектов одинаковые ($N_i^{(r)} = N_i, i = 1, n, r = 1, R$), то из формулы (6) следует

$$P(H_r) = \frac{1}{R}, r = \overline{1, R},$$

поскольку в этом случае согласно формулам (2) и (3) $D_{W_1} = D_{W_2} = \dots = D_{W_R}, P_{kj} = P_{jk} = 0,5, k = 1, R, j = 1, R, k \neq j$, и все гипотезы $H_r, r = \overline{1, R}$, равновероятны.

Расчетные вероятности позволяют предположить, какой из наблюдаемых объектов является наиболее опасным.

Для принятия решения, как было сказано выше, параллельно с расчетными вероятностями необходимо использовать значения $w_r, r = 1, R$, комбинированных признаков, полученные по результатам измерений частных признаков наблюдаемых объектов по формуле (1).

Правило принятия решения о наиболее опасном космическом объекте

Для каждого наблюдаемого специализированым КА объекта рассматриваются два события.

Первое событие – гипотеза H_r , о том, что r -й объект является наиболее опасным. Расчетная вероятность этого события определяется по формуле (6). Второе событие связано с полученным по результатам измерений значением w_r комбинированного признака r -го объекта. При этом могут иметь место два случая: $w_r > w_{\text{НОО}}$ и $w_r < w_{\text{НОО}}$. Если $w_r > w_{\text{НОО}}$, то второе событие состоит в том, что случайное значение (оно обозначается буквой W_r) комбинированного признака $W_r > w_r$. Если $w_r < w_{\text{НОО}}$, то второе событие эквивалентно событию $W_r < w_r$. Вероятность второго события при условии, что справедлива гипотеза H_r , имеет вид

$$P(w_r / H_r) = \begin{cases} P(W_r > w_r), & \text{если } w_r > w_{\text{НОО}}; \\ P(W_r < w_r), & \text{если } w_r < w_{\text{НОО}}, \quad r = \overline{1, R}. \end{cases}$$

Поскольку закон распределения комплексного признака r -го наблюдаемого объекта нормальный с функцией плотности распределения вероятностей

$$\varphi_{W_r}(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{W_r}}} e^{-\frac{(w-w_{\text{НОО}})^2}{2D_{W_r}}},$$

то

$$P(w_r / H_r) = \begin{cases} \int_{w_r}^{\infty} \varphi_{W_r}(w) dw, & \text{если } w_r > w_{\text{НОО}}; \\ \int_{-\infty}^{w_r} \varphi_{W_r}(w) dw, & \text{если } w_r < w_{\text{НОО}} \end{cases}$$

или

$$P(w_r / H_r) = 0,5 - \int_{w_{\text{НОО}}}^{w_{\text{НОО}} + \Delta w_r} \varphi_{W_r}(w) dw,$$

где $\Delta w_r = |w_r - w_{\text{НОО}}|$.

После введения новой переменной $y = w_r - w_{\text{НОО}}$ получается

$$P(w_r / H_r) = 0,5 - \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{W_r}}} \int_0^{\Delta w_r} e^{-\frac{y^2}{2D_{W_r}}} dy, \quad r = \overline{1, R}. \quad (7)$$

Отсюда видно, что, чем меньше отличие комбинированного признака w_r r -го наблюдаемого объекта от комбинированного признака $w_{\text{НОО}}$, т. е. чем меньше величина Δw_r , тем больше условная вероятность $P(w_r / H_r)$. Максимальное значение 0,5 условной вероятности $P(w_r / H_r)$ достигается при $w_r = w_{\text{НОО}}$.

В качестве меры, характеризующей близость r -го наблюдаемого объекта к наиболее опасному КО, можно использовать вероятность одновременного наступления двух событий: гипотезы H_r и события $W_r > w_r$ или $W_r < w_r$ – в зависимости от того, какому условию, $w_r > w_{\text{НОО}}$ или $w_r < w_{\text{НОО}}$, удовлетворяет полученный по результатам измерений комбинированный признак. Вероятность произведения этих двух событий

$$P(H_r, w_r) = P(H_r)P(w_r / H_r), \quad r = \overline{1, R}.$$

Можно заметить, что данная вероятностная мера учитывает как расчетные вероятности $P(H_r)$ гипотез H_r , так и условные вероятности $P(w_r / H_r)$, полученные по результатам реальных измерений и характеризующие близость наблюдаемых объектов к НОО.

Поскольку гипотезы H_r , $r = \overline{1, R}$, образуют полную группу несовместных событий, то для принятия решения о наиболее опасном объекте целесообразно использовать апостериорные вероятности этих гипотез. Они могут быть определены по формуле Байеса, которая с учетом введенных выше обозначений принимает вид [25]

$$P(H_r / w_r) = \frac{P(H_r, w_r)}{\sum_{i=1}^R P(H_i, w_r)} = \frac{P(H_r)P(w_r / H_r)}{\sum_{i=1}^R P(H_i)P(w_i / H_i)}, \quad r = \overline{1, R}. \quad (8)$$

Тогда наиболее опасным объектом в наблюдаемой КАСО области околоземного космического пространства считается техногенный объект, имеющий максимальное значение апостериорной вероятности (8). Иными словами, наблюдаемый объект с номером s считается наиболее опасным, если

$$P(H_s / w_s) = \max \{ P(H_r / w_r), \quad r = \overline{1, R} \}.$$

Для подтверждения работоспособности предложенного подхода к решению задачи выбора рассматривается демонстрационный пример, в котором в силу ограниченности информации исходные данные могут отличаться от реальных.

Пример

Гипотетический КАСО ведет наблюдение за некоторой областью в верхних слоях атмосферы. Он обнаружил четыре КО. Известно, что среди них есть объект, угрожающий нормальному

функционированию находящегося в его окрестности КА. Каждый наблюдаемый КАСО объект характеризуется шестью частными признаками. Известны значения частных признаков НОО: $x_{НОО1} = 100$, $x_{НОО2} = 40$, $x_{НОО3} = 25$, $x_{НОО4} = 18$, $x_{НОО5} = 10$, $x_{НОО6} = 3$.

Точность бортовых измерительных средств, используемых для измерений значений частных признаков, характеризуется дисперсиями погрешностей этих средств: $D_{X_1} = 3$, $D_{X_2} = 1,3$, $D_{X_3} = 0,8$, $D_{X_4} = 0,6$, $D_{X_5} = 0,3$, $D_{X_6} = 0,1$.

В процессе наблюдения за КО была получена следующая измерительная информация.

Для первого объекта получены одно ($N_1^{(1)} = 1$) значение $x_{11}^{(1)} = 102,65$ 1-го признака, два ($N_2^{(1)} = 2$) значения $x_{21}^{(1)} = 39,02$, $x_{22}^{(1)} = 39,34$ 2-го признака, одно ($N_3^{(1)} = 1$) значение $x_{31}^{(1)} = 24,27$ 3-го признака, одно ($N_4^{(1)} = 1$) значение $x_{41}^{(1)} = 17,65$ 4-го признака, одно ($N_5^{(1)} = 1$) значение $x_{51}^{(1)} = 9,54$ 5-го признака и одно ($N_6^{(1)} = 1$) значение $x_{61}^{(1)} = 3,43$ 6-го признака.

Для второго объекта получены одно ($N_1^{(2)} = 1$) значение $x_{11}^{(2)} = 98,94$ 1-го признака, одно ($N_2^{(2)} = 1$) значение $x_{21}^{(2)} = 41,81$ 2-го признака, два ($N_3^{(2)} = 2$) значения $x_{31}^{(2)} = 26,00$, $x_{32}^{(2)} = 23,83$ 3-го признака и одно ($N_4^{(2)} = 1$) значение $x_{41}^{(2)} = 18,69$ 4-го признака. Пятый и шестой признаки измерить не удалось ($N_5^{(2)} = 0$, $N_6^{(2)} = 0$).

Для третьего объекта получены одно ($N_1^{(3)} = 1$) значение $x_{11}^{(3)} = 99,74$ 1-го признака, одно ($N_2^{(3)} = 1$) значение $x_{21}^{(3)} = 40,06$ 2-го признака, одно ($N_3^{(3)} = 1$) значение $x_{31}^{(3)} = 25,07$ 3-го признака и одно ($N_4^{(3)} = 1$) значение $x_{41}^{(3)} = 16,72$ 4-го признака. Остальные признаки измерить не удалось ($N_5^{(3)} = 0$, $N_6^{(3)} = 0$).

Для четвертого объекта получены одно ($N_1^{(4)} = 1$) значение $x_{11}^{(4)} = 99,16$ 1-го признака, одно ($N_2^{(4)} = 1$) значение $x_{21}^{(4)} = 39,59$ 2-го признака и одно ($N_4^{(4)} = 1$) значение $x_{41}^{(4)} = 18,31$ 4-го признака. Третий, пятый и шестой признаки измерить не удалось ($N_3^{(4)} = 0$, $N_5^{(4)} = 0$, $N_6^{(4)} = 0$).

По этим данным КАСО должен принять решение о НОО.

Положив в формулах (1) и (2) $w_{НОО} = 10$, найдем комбинированные признаки и их дисперсии для всех наблюдаемых объектов:

$$\begin{aligned} w_1 &= 10,0028, w_2 = 10,0541, w_3 = 9,9268, \\ w_4 &= 9,9385; \\ D_{W_1} &= 0,0133, D_{W_2} = 0,0150, D_{W_3} = 0,0170, \\ D_{W_4} &= 0,0196. \end{aligned}$$

По полученным дисперсиям на основе формул (3) и (6) определяются расчетные вероятности гипотез H_r , $r = 1, R$, о том, что соответству-

ющий наблюдаемый объект является наиболее опасным:

$$\begin{aligned} P(H_1) &= 0,2810; P(H_2) = 0,2598; \\ P(H_3) &= 0,2400; P(H_4) = 0,2192. \end{aligned}$$

Подстановка значений комбинированных признаков и их дисперсий в формулу (7) позволяет получить условные вероятности

$$\begin{aligned} P(w_1/H_1) &= 0,3388; P(w_2/H_2) = 0,4359; \\ P(w_3/H_3) &= 0,0432; P(w_4/H_4) = 0,4791. \end{aligned}$$

Апостериорные вероятности гипотез H_r определяются по формуле (8) после подстановки в нее значений расчетных вероятностей $P(H_r)$ и условных вероятностей $P(w_r/H_r)$:

$$\begin{aligned} P(H_1/w_1) &= 0,2940; P(H_2/w_2) = 0,3497; \\ P(H_3/w_3) &= 0,0320; P(H_4/w_4) = 0,3243. \end{aligned}$$

Из полученных результатов видно, что при принятии решения только на основе расчетных вероятностей гипотез наиболее опасным объектом следует считать первый объект, поскольку $P(H_1) = \max\{P(H_r), r = 1, R\}$. При использовании только условных вероятностей — четвертый объект, для которого $P(w_4/H_4) = \max\{P(w_r/H_r), r = 1, R\}$. Если решение принимается по критерию максимума апостериорной вероятности, учитывающему как расчетную, так и условную вероятность, то наибольшую опасность для КА, функционирующего в наблюдаемой КАСО области космического пространства, представляет второй объект, поскольку $P(H_2/w_2) = \max\{P(H_r/w_r), r = 1, R\}$.

Многочисленное применение предложенного решающего правила для исходных данных рассматриваемого примера показало, что наиболее опасным объектом в 35 % случаев является 1-й объект, в 28 % — 2-й объект, в 22 % — 3-й объект и в 15 % случаев — 4-й объект.

Заключение

Предложено решающее правило для выбора наиболее опасного техногенного объекта из множества наблюдаемых специализированным КА по результатам измерений их частных признаков. Состав и количества измерений частных признаков для различных наблюдаемых объектов могут отличаться. Решение принимается на основе комплексного использования расчетных вероятностей гипотез о наиболее опасном объекте и условных вероятностей, характеризующих отличия комбинированных признаков наблюдаемых объектов, полученных по результатам

измерений, от соответствующего признака наиболее опасного объекта. Такой подход позволяет принять решение, обеспечивающее максимум апостериорной вероятности.

Работоспособность метода продемонстрирована на примере.

Возможность принятия решения по различным совокупностям и количествам измерений

частных признаков наблюдаемых объектов, а также простота решающего правила позволяющая на борту специализированного КА оперативно определять наиболее опасный техногенный объект и предотвращать его столкновение с функционирующим КА.

Литература

1. Adushkin V., Aksenov O., Veniaminov S., Kozlov S. Challenging aspects in evaluation the potential danger of space objects breakups and collisions for space flights. *Advances and Astrophysics*, 2018, vol. 3, no. 2, pp. 83–90. <https://dx.doi.org/10.22606/adap.2018.32003>
2. 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
3. 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>
4. 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).
5. 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
6. 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
7. Павлова Е. А., Стрельцов А. И., Еленин Л. В., Степаньянц В. А., Захваткин М. В. Формирование единого 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).
8. 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
9. Кириченко Д. В., Багров А. В. Оперативное выявление космогенных угроз с помощью орбитальных средств контроля космического пространства. *Радиопромышленность*, 2014, № 1, с. 174–184.
10. 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
11. 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.
12. 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
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. 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
16. 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>
17. 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>
18. 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

19. Гулятьев 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.
20. Куликов С. В., Епанешников Н. М., Лиференко В. Д., Алдохина В. Н. Обнаружение факта нарушения 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
21. 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" WECNF 2020*, Saint-Petersburg, 2020, p. 9131444. doi:10.1109/WECNF-48837.2020.9131444
22. 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

23. Лепешкин С. А., Мишуков О. А. Особенности совместной обработки разноточных изображений в автоматизированных системах дистанционного зондирования распределенных объектов. *Тр. ВКА им. А. Ф. Можайского*, 2018, № 664, с. 131–140.
24. Арсеньев В. Н., Ключкин А. К., Ядренкин А. А. Метод выбора целевого объекта по ограниченными измерениями физически неоднородных признаков. *Изв. вузов. Приборостроение*, 2021, т. 64, № 10, с. 799–805. doi:10.17586/0021-3454-2021-64-10-799-805
25. Гусева М. Е., Силаев А. М. Использование байесовских методов для макроэкономического моделирования фаз бизнес-цикла. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика*, 2021, т. 37, вып. 2, с. 298–317. <https://doi.org/10.21638/spbu05.2021.205>

UDC 623.4.016

doi:10.31799/1684-8853-2023-4-26-34

EDN: BHIXTF

Making a decision on the most dangerous man-made object by a spacecraft for monitoring near-Earth space

V. N. Arseniev^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0001-6424-5320, vladar56@mail.ru

A. A. Yadrenkin^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0003-2089-7460

E. V. Slatova^a, Applicant for the degree PhD, Tech., orcid.org/0009-0004-1177-1932

^aA. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia Emb., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: To prevent the collisions of man-made facilities with the Earth's atmosphere, the spacecraft which function in the upper layers are continuously monitored by these objects using ground tools. However, their use does not prevent collisions with space debris. **Purpose:** To form of a decision rule to select the most dangerous object from a set of the observed ones and provide the maximum posteriori probability. **Results:** A method is proposed for a specialized spacecraft to select the most dangerous man-made object from the set of observed objects on the basis of the measurement of their inhomogeneous features. The composition and number of measurements of particular features for various observed objects may differ. The proposed decision rule is based on the complex use of not only the actual values of particular features of the observed objects, obtained from the measurement results, but also on the information about the accuracy characteristics of the involved onboard measuring instruments. This approach ensures the choice of the most dangerous object according to the criterion of the maximum posteriori probability. The efficiency of the method is demonstrated by the example. **Practical relevance:** The possibility to make a decision on various sets and quantities of measurements of particular features of the observed objects, as well as the simplicity of the decision rule, allow us to quickly detect the most dangerous man-made object onboard a specialized spacecraft used for monitoring the near-Earth space.

Keywords — space debris, specialized spacecraft, the most dangerous space object, particular features, combined features, decision rule.

For citation: Arseniev V. N., Yadrenkin A. A., Slatova E. V. Making a decision on the most dangerous man-made object by a spacecraft for monitoring near-Earth space. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 4, pp. 26–34 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-4-26-34, EDN: BHIXTF

References

- Adushkin V., Aksenov O., Veniaminov S., Kozlov S. Challenging aspects in evaluation the potential danger of space objects breakups and collisions for space flights. *Advances and Astrophysics*, 2018, vol. 3, no. 2, pp. 83–90. <https://dx.doi.org/10.22606/adap.2018.32003>
- 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
- 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

4. Zberya V. A. Canada and the United States: at the origins of politico-military cooperation. *Russia and America in the 21st Century*, 2020, iss. 4, 15 p. (In Russian). doi:10.18254/S207054760013330-0. Available at: <https://rusus.jes.su/s207054760013330-0-1/> (accessed 5 August 2021).
5. 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
6. 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
7. Pavlova E. A., Streltsov A. I., Elenin L. V., Stepanyants V. A., Zakhvatkin M. V. Development of the common classification for hazardous events in the near-Earth space. *Keldysh Institute Preprints*, 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).
8. Kliushnikov V. Yu. How to clear space 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
9. 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).
10. 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
11. 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).
12. Arseniev V. N., Yadrenkin A. A. Selection of a given space object from the multitude observed by a specialized spacecraft. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 2, pp. 11–19 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2022-2-11-19
13. Nemykin J. I. Algorithm for the selection of launching 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>
14. 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>
15. Volkov V. Yu. Adaptive multi-threshold objects selection in remote sensing images. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 3, pp. 12–24 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-3-12-24
16. Afanasev A. A., Biktimirov S. N. CubeSat formation architecture for small space debris surveillance and orbit determination. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2021, no. 4, pp. 37–46. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-4-37-46>
17. Spiller D., Facchinetti C., Ansalone L., Tuozi 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>
18. 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
19. Gulyaev Yu., Koval'chuk V., Popov V. Ways to improve better visibility of objects in digital video surveillance systems. *Trudy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj 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).
20. Kulikov S. V., Epaneshnikov N. M., Liferenko V. D., Aldokhina V. N. Detection of the fact of destruction of space objects in orbit using non-coordinate information of the observed flow. *Questions of Radio Electronics*, 2020, no. 6, pp. 17–24 (In Russian). <https://doi.org/10.21778/2218-5453-2020-6-17-24>
21. 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
22. 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
23. Lepeshkin S. A., Mishukov O. A. Features of joint processing of multi-spectral images in automated remote sensing systems for distributed objects. *Proc. of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2018, no. 664, pp. 131–140 (In Russian).
24. 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
25. Guseva M. E., Silaev A. M. Use of Bayesian methods for macroeconomic modelling of business cycle phases. *St Petersburg University Journal of Economic Studies*, 2021, vol. 37, iss. 2, pp. 298–317 (In Russian). <https://doi.org/10.21638/spbu05.2021.205>