

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО НАБОРА ПАРАМЕТРОВ, ОКАЗЫВАЮЩИХ НАИБОЛЬШЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ С УЧЕТОМ ВЫБРАННЫХ КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Р. В. Белый, А. С. Мовляв

Рассмотрена методика выявления ключевых параметров технического облика перспективных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Сформулирована задача уменьшения размерности пространства исследуемых параметров космических аппаратов. Предложен метод экспертной оценки для анализа характеристик космических аппаратов и выявления наиболее значимых из них. Исследованы основные параметры космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Сформирован перечень наиболее значимых характеристик космических аппаратов, определяющих эффективность его функционирования. Произведен анализ по комплексному критерию. Составлены гистограммы результатов ранжирования по пяти группам характеристик, влияющих на эффективность функционирования космических аппаратов по критериям информативности и производительности. По результатам ранжирования групп характеристик экспертами выделены две группы факторов из девяти параметров, оказывающих наибольшее влияние на эффективность функционирования космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: методика снижения размерности, экспертный анализ, критерии эффективности, критерии информативности, критерии производительности, ключевые параметры космических аппаратов.

Системный подход к прогнозированию технического облика перспективных сложных объектов требует максимально возможного учета совокупности переменных, характеризующих объект, и взаимосвязей между ними. В процессе исследования возникает задача выбора компромиссного варианта между числом переменных в описании объекта и сложностью, трудоемкостью анализа и прогноза. К тому же задача значительно усложняется, если большинство или все из этих переменных имеют стохастический характер.

Методы снижения размерности описаний сложных объектов являются весьма актуальными для прогностики. Для этого используются методы теории информации, корреляционного анализа, распознавания образов, теории измерений и ряда других наук и их областей. Большинство методов требуют знания значений исследуемых параметров (наличия некоторой статистики). Набрать такую статистику не всегда возможно [1].

Под информативным набором параметров будем понимать совокупность характеристик, описывающих космический аппарат (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и процесс его функционирования в достаточной степени для решения задачи формирования технического облика.

Теоретическая реализация методики, предполагает для выявления значимых характеристик использовать качественный подход на основе результатов экспертного опроса.

Результатом практической реализации предлагаемой методики является информативный набор параметров, используемый в качестве исходных данных в дальнейших исследованиях по формированию технического облика перспективных КА ДЗЗ.

Космический аппарат является сложной технической системой и описывается конечным числом характеристик, определяющих эффективность его функционирования [2]. С целью снижения размерности пространства исследуемых параметров КА из всего множества характеристик необходимо выбрать наиболее значимые. В общем случае на эффективность функционирования КА оказывают влияние характеристики всех подсистем КА – целевой аппаратуры и обеспечивающих систем, а также формы и способы их применения и условия эксплуатации.

Отсутствие полной и достоверной информации о перспективных разработках КА ДЗЗ ограничивает возможности количественного анализа их характеристик. В связи с этим для анализа характеристик КА и выявления наиболее значимых из них предлагается использовать метод экспертной оценки, суть которого заключается в ранжировании анализируемых характеристик КА ДЗЗ по степени их влияния на эффективность функционирования КА. Обработка результатов экспертных оценок проводится методом ранговой корреляции.

При обработке результатов экспертных оценок по относительной важности исследуемых характеристик КА вычисляется коэффициент конкордации, показывающий степень согласованности мнений экспертов по важности каждого из оцениваемых параметров. Проверка согласованности в указанном статистическом смысле вовсе не является проверкой согласованности в смысле практики экспертных оценок.

Каждая оценка, данная i -м экспертом, выражается числом натурального ряда таким образом, что число 1 присваивается наиболее значимой характе-

ристике, а число n – минимально значимой. Если все оценки различны, то соответствующие числа натурального ряда есть ранги оценок i -го эксперта. Если среди оценок, данных i -м экспертом, есть одинаковые, то этим оценкам назначается одинаковый ранг, равный средней арифметической соответствующих чисел натурального ряда [3].

Сумма рангов S_j , назначенная экспертами характеристике j ($j = 1, \dots, m$, где m – число исследуемых направлений), определяется по формуле:

$$S_j = \sum_{i=1}^n R_{ij},$$

где R_{ij} – ранг оценки, данной i -м экспертом j -й характеристике.

Среднее значение суммы рангов оценок по всем характеристикам равно:

$$\bar{S} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m S_j.$$

Отклонение суммы рангов, полученных j -й характеристикой, от среднего значения суммы рангов определяется как $d_j = S_j - \bar{S}$. Тогда коэффициент конкордации, вычисленный по совокупности всех характеристик, составляет:

$$W = \frac{12 \sum_{j=1}^m d_j^2}{n^2(m^3 - m) - n \sum_{i=1}^n T_i},$$

где T_i – показатель связности рангов, рассчитываемый с помощью выражения

$$T_i = \sum_{l=1}^L (t_l^3 - t_l),$$

при наличии равных рангов (L – количество групп равных рангов; t_l – количество равных рангов в l -й группе).

Коэффициент конкордации принимает значение в пределах от 0 до 1. $W = 1$ означает полную согласованность мнений экспертов, при $W = 0$ – полную несогласованность. Коэффициент конкордации показывает степень согласованности всей экспертной группы. Низкое значение этого коэффициента может быть получено как при отсутствии общности мнений всех экспертов, так и из-за наличия противоположных мнений между подгруппами экспертов, хотя внутри подгруппы согласованность может быть высокой.

Коэффициент парной ранговой корреляции может принимать значения от +1 (полная согласованность мнений двух экспертов) до -1 (противоположность мнений).

Для определения уровня значимости значения коэффициента W можно использовать критерий χ^2 , вычисляемый следующим образом:

$$\chi^2 = \frac{12 \sum_{j=1}^m d_j^2}{mn(m+1) - \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^n T_i}.$$

Критерий определяется для числа степеней свободы $k = m - 1$, по соответствующим таблицам определяется уровень значимости полученных значений. Итоговую ранговую оценку ω_j для j -й характеристики можно определить как

$$\omega_j = 2 \frac{n(m+1) - S_j}{mn(m+1)},$$

при этом $\sum_{j=1}^m \omega_j = 1$.

Для выявления q наиболее значимых характеристик вводится критерий \mathcal{G} и используется следующее соотношение:

$$\min \sum_{j=1}^q \omega_j > \mathcal{G}.$$

То есть, необходимо выделить минимальное количество характеристик, сумма весовых коэффициентов которых будет больше заданного значения \mathcal{G} [4].

На основе представленной методики выявим ключевые параметры перспективных КА ДЗЗ. Используя данные информационно-аналитической модели, был сформирован перечень основных характеристик КА ДЗЗ и условий функционирования (таблица) [5, 6, 7].

Для удобства проведения экспертного опроса весь перечень характеристик был разделен на 5 групп:

- 1) геометрические характеристики оптоэлектронной системы (ОЭС);
- 2) спектральные и фотометрические характеристики ОЭС;
- 3) бортовое радиоэлектронное оборудование;
- 4) характеристики обеспечивающих систем КА;
- 5) внешние условия.

В качестве показателей эффективности функционирования КА использовались информативность, производительность. Экспертам было предложено расположить составленный перечень параметров в порядке убывания степени их влияния на показатели эффективности. Причем экспертная оценка проводилась в два этапа. На первом этапе оценивалось влияние групп параметров, а на втором – значимость характеристик в каждой группе.

Таблица

Перечень основных характеристик космических аппаратов дистанционного зондирования Земли

Геометрические характеристики оптико-электронной системы
Разрешающая способность оптико-электронной системы
Диаметр апертуры
Фокусное расстояние оптической системы
Угол поля зрения оптико-электронной системы
Размер элементов фотоприемного устройства (ФПУ)
Формат фотоприемного устройства
Мгновенный угол поля зрения
Спектральные/фотометрические характеристики оптико-электронной системы
Спектральный диапазон съемки
Количество одновременно работающих спектральных каналов
Уровень дискретизации изображения
Динамический диапазон оптико-электронной системы
Спектральная чувствительность элементов фотоприемного устройства
Отношение сигнал/шум
Бортовое радиоэлектронное оборудование
Алгоритмы обработки данных на борту
Производительность бортовых вычислительных систем
Алгоритм сжатия/степень сжатия данных на борту КА
Емкость бортового запоминающего устройства
Пропускная способность каналов связи «космический аппарат – пункт приема информации (ППИ)»
Точность системы автономной навигации
Точность системы ориентации и управления движением КА
Допустимые углы и скорость программных поворотов космического аппарата
Характеристики обеспечивающих систем космических аппаратов
Мощность системы энергообеспечения КА
Характеристики системы терморегулирования
Внешние условия
Орбитальные параметры
Условия освещенности
Метеоусловия
Характеристики объекта наблюдения
Характеристики пункта приема информации

Гистограмма результатов ранжирования групп характеристик по степени их влияния на информативность представлена на рис. 1, а.

К наиболее существенным группам параметров, влияющим на эффективность функционирования КА ДЗЗ по критерию информативности, специалисты относят: геометрические 1 и спектральные 2 характеристики ОЭС, бортовое радиоэлектронное оборудование 3. На эти группы приходится 88% суммарных ранговых оценок.

Гистограмма результатов ранжирования групп характеристик по степени их влияния на производительность представлена на рис. 1, б. К наиболее существенным группам параметров, влияющим на эффективность функционирования КА по критерию производительности, специалисты относят: геометрические 1 и спектральные 2 характеристики ОЭС, а также внешние условия 5. На эти группы приходится 87% суммарных ранговых оценок. Итоговая гистограмма представлена на рис. 2.

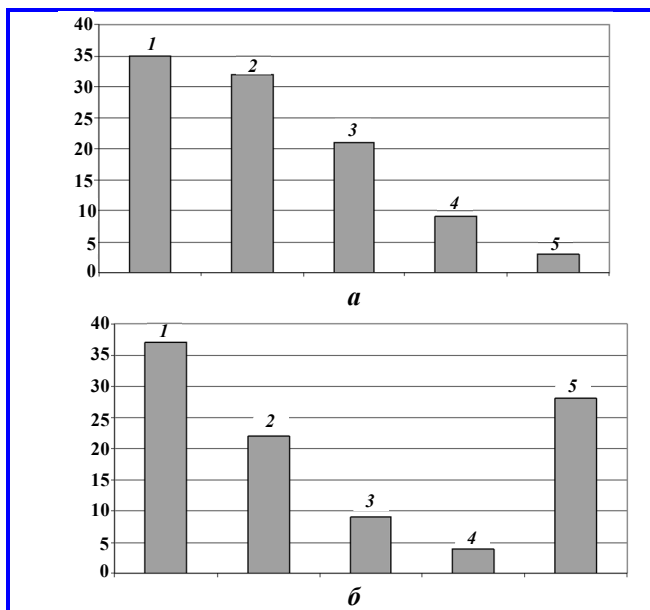


Рис. 1. Результаты первого этапа опроса экспертов по степени их влияния на информативность (а) и производительность (б): 1 – геометрические характеристики оптико-электронной системы; 2 – спектральные/фотометрические характеристики оптико-электронной системы; 3 – бортовое радиоэлектронное оборудование; 4 – характеристики обеспечивающих подсистем космических аппаратов; 5 – внешние условия

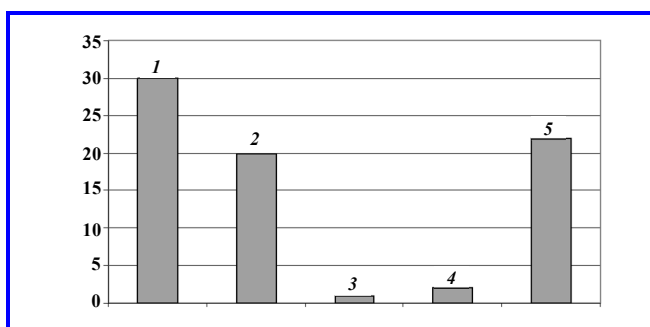


Рис. 2. Результаты ранжирования групп характеристик: 1 – геометрические характеристики оптико-электронной системы; 2 – спектральные/фотометрические характеристики оптико-электронной системы; 3 – бортовое радиоэлектронное оборудование; 4 – характеристики обеспечивающих подсистем космических аппаратов; 5 – внешние условия

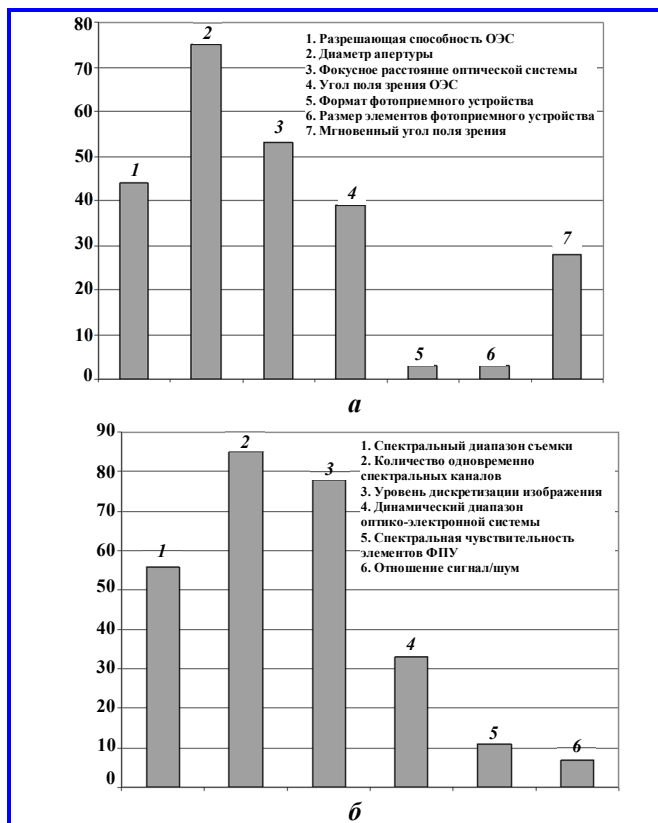


Рис. 3. Результаты ранжирования: *а* – геометрические характеристики оптико-электронной системы; *б* – спектральные/фотометрические характеристики оптико-электронной системы

Таким образом, по мнению экспертов, наибольшее влияние на эффективность функционирования КА ДЗЗ оказывают три группы факторов:

- геометрические характеристики ОЭС;
- спектральные характеристики ОЭС;
- внешние условия.

На эти группы приходится около 95% суммарных оценок.

Внешние условия оказывают влияние на эффективность функционирования КА ДЗЗ, но не являются характеристикой самого КА (его технического облика). В связи с этим, при анализе значимости характеристик в каждой группе принято решение в дальнейшем группу характеристик внешних условий не рассматривать.

Таким образом, основными параметрами, влияющими на эффективность КА, по мнению экспертов, являются характеристики его ОЭС, которые и определяют технический облик КА.

Определение наиболее значимых характеристик ОЭС проводилось в рамках второго этапа опроса экспертов. Итоговые гистограммы результатов ранжирования представлены на рис. 3.

Таким образом, по мнению экспертов, наибольшее влияние на эффективность функционирования КА ДЗЗ оказывают следующие параметры:

1. Диаметр апертуры.
2. Фокусное расстояние оптической системы.
3. Разрешающая способность ОЭС.
4. Угол поля зрения оптической системы.
5. Мгновенный угол поля зрения.
6. Количество одновременно работающих спектральных каналов.
7. Уровень дискретизации изображений.
8. Спектральный диапазон съемки.
9. Динамический диапазон ОЭС.

На эти параметры приходится 98% (для геометрических характеристик) и 93% (для спектральных характеристик) суммарных ранговых оценок соответственно. Основываясь на этих результатах, можно сделать вывод о том, что наиболее значимыми характеристиками КА ДЗЗ являются девять перечисленных параметров, получивших наивысшие ранговые оценки. Выявление направлений совершенствования ОЭС в области улучшения данных характеристик позволит оценить технический облик перспективных КА ДЗЗ. При проектировании КА, исходя из повышения информативности и производительности, необходимо обратить внимание в первую очередь на возможность улучшения характеристик именно этих девяти параметров.

Литература

1. Горбунов А. В. Методы разработки космических аппаратов для обеспечения качества информации дистанционного зондирования Земли : специальность 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Горбунов Александр Викторович. – Москва, 2003. – 157 с.
2. Соллогуб А. В. Космические аппараты систем зондирования поверхности Земли : математические модели повышения эффективности космических аппаратов / А. В. Соллогуб, Г. П. Аншаков, В. В. Данилов ; под ред. Д. И. Козлова. – Москва : Машиностроение, 1993. – 368 с. : ил.
3. Орлов А. И. Организационно-экономическое моделирование : учебник. В 3 частях. Часть 2. Экспертные оценки / А. И. Орлов. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – 486 с.
4. Крупинова Е. К. Обработка экспертных оценок : учебное пособие / Е. К. Крупинова, Е. А. Елтаренко. – Москва : МИФИ, 1982. – 94 с. : ил.
5. Лебедев А. А. Космические системы наблюдения : Синтез и моделирование / А. А. Лебедев, О. П. Нестеренко. – Москва : Машиностроение, 1991. – 224 с.
6. Маламед Е. Р. Конструирование оптических приборов космического базирования : учебное пособие / Е. Р. Маламед. – Санкт-Петербург : СПбГИТМО(ТУ), 2002. – 291 с.
7. Гуцин В. Н. Основы устройства космических аппаратов / В. Н. Гуцин. – Москва : Машиностроение, 2003. – 272 с.

Поступила в редакцию 29.12.2020

Руслан Владимирович Белый, аспирант, e-mail: whiterus77@gmail.com, т. 8 (901) 511-33-00.
(ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»).

Алексей Станиславович Мовляв, кандидат технических наук, главный специалист,
e-mail: a.movlyav@yandex.ru, т. 8 (903) 724-53-76.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

METHODOLOGY FOR SEARCHING THE INFORMATION SET OF THE MOST INFLUENTIAL PARAMETERS FOR THE OPERATION OF REMOTE SENSING SATELLITES

R. V. Belyy, A. S. Movlyav

The article considers the methods of identification of key parameters of configuration of prospective Earth remote sensing satellites. The task of reducing the space dimensions of the investigated spacecraft parameters is defined. A method of expert review for the analysis of spacecraft characteristics and identification of the most important of them is suggested. The main parameters of the Earth remote sensing satellites are investigated. The list of the most important spacecraft characteristics preconditioning the efficiency of its operation is made. The analysis based on a complex criterion is performed. The histograms containing the results of ranking based on five groups of characteristics affecting the efficiency of spacecraft operation under criteria of data rate and performance are drawn up. Based on the results of ranking the groups of characteristics, the experts define two groups of factors from nine parameters having the greatest effect on the efficiency of the Earth remote sensing satellites operation.

Key words: dimensions reduction method, expert review, efficiency, data rate, performance criteria, key spacecraft parameters.

1. Gorbunov A. V. Methods of spacecraft development to ensure the quality of the Earth remote sensing data : speciality 05.13.01 'System analysis, control and processing of data' : Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences / Gorbunov Aleksandr Viktorovich. – Moscow, 2003. – 157 p.
2. Sollogub A. V. Earth remote sensing spacecraft and space systems : mathematical models of spacecraft efficiency improvement / A. V. Sollogub, G. P. Anshakov, V. V. Danilov ; edited by D. I. Kozlova. – Moscow: Mashinostroyeniye, 1993. – 368 p.: ill.
3. Orlov A. I. Organizational and economic modeling : textbook. In 3 parts. Part 2. Expert assessment / A. I. Orlov. – Moscow : Publishing house of Bauman Moscow State Technical University, 2011. – 486 p.
4. Krupinova E. K. Processing of expert assessments : textbook / E. K. Krupinova, E. A. Eltarenko. – Moscow : МЭФН, 1982. – 94 p. : ill.
5. Lebedev A. A. Space observation systems : Synthesis and modeling / A. A. Lebedev, O. P. Nesterenko. – Moscow: Mashinostroyeniye, 1991. – 224 p.
6. Malamed E. R. Designing of space-based optical instruments : textbook / E. R. Malamed. – St. Petersburg: St. Petersburg Institute of Fine Mechanics and Optics (Technical University), 2002. – 291 p.
7. Gushchin V. N. Fundamentals of spacecraft design / V. N. Gushchin. – Moscow: Mashinostroyeniye, 2003. – 272 p.

Ruslan Vladimirovich Belyi, Ph. D. Student, e-mail: whiterus77@gmail.com, tel.: +7 (901) 511-33-00.
(Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Moscow Aviation Institute (National Research University)»).

Aleksei Stanislavovich Movlyav, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Chief Specialist,
e-mail: a.movlyav@yandex.ru, tel.: +7 (903) 724-53-76.
(JC «VNIIEМ Corporation»).