

УДК 521.11

doi: 10.53816/20753608_2025_3_42

**МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ РАЙОНОВ
ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ РАЗНОРОДНЫМИ
КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ НАБЛЮДЕНИЯ**

**MODEL FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF OBSERVING REGIONS
OF THE EARTH'S SURFACE BY HETEROGENEOUS OBSERVATION
SPACECRAFT**

По представлению академика РАН В.А. Петрова

А.Ю. Коваленко, И.В. Грудинин, Д.Г. Майбуров

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

A.Y. Kovalenko, I.V. Grudinin, D.G. Maiburov

В статье обоснован показатель эффективности наблюдения районов на поверхности Земли. В качестве обобщенного показателя эффективности предложена вероятность получения пригодной информации об объекте в заданном районе за заданный интервал времени, ограниченным составом орбитальной группировки. Проведено обоснование частных показателей результативности, оперативности и ресурсоемкости.

Ключевые слова: космический аппарат, орбитальная группировка, эффективность наблюдения, вероятность наблюдения.

The article substantiates the indicator of the effectiveness of observing areas on the Earth's surface. As a generalized performance indicator, the probability of obtaining suitable information about an object in a given area over a given time interval by a limited composition of the orbital constellation is proposed. Individual indicators of efficiency, efficiency and resource intensity were substantiated.

Keywords: spacecraft, orbital constellation, observation efficiency, observation probability.

Введение

Анализ опыта последних вооруженных конфликтов, а также тенденций развития вооружения и военной техники, в частности космических средств, свидетельствует, что космическое и воздушное пространства превратились в важнейшие сферы вооруженной борьбы, а завоевание господства в воздухе и околоземном космическом пространстве обеспечивает эффективное достижение главных целей вооруженного конфликта. Степень использования космиче-

ских средств увеличивалась последовательно, по мере совершенствования технических характеристик применявшихся космических аппаратов (КА), увеличения состава национальных орбитальных группировок (ОГ) КА, а также в зависимости от геополитических обстоятельств. Количество задействуемых КА было пропорционально пространственному размаху и стратегической значимости проводимых операций. Вместе с тем, в настоящее время, все больший приоритет приобретает задача оперативного оборудования и дооборудования театров воен-

ных действий: комплексное наблюдение, связь, навигация, метеорологическое, топогеодезическое обеспечение в интересах видов вооруженных сил, родов войск и специальных служб; подготовки данных для выдачи целеуказаний системам оружия (в том числе, высокоточного), планирования ракетно-авиационных ударов и использования беспилотных летательных аппаратов [1]. Без активной информационной поддержки из космоса эффективное решение указанных задач уже практически невозможно. Перспективы развития отечественной орбитальной группировки направлены в сторону не столько количественного увеличения состава ОГ, а в большей степени в сторону повышения эффективности использования ОГ как средства информационного обеспечения действий группировок войск (сил) [2, 3].

Создание интегрированных космических информационно-телекоммуникационных систем — очередной шаг в развитии теории войн, который невозможен без поддержания и совершенствования эффективной космической инфраструктуры. В этой связи особую актуальность приобретает проблема создания так называемых разнородных ОГ КА наблюдения, имеющих в своем составе КА различного типа наблюдения (радиотехнического, радиолокационного и оптико-электронного) и позволяющих с позиции комплексирования указанных целевых возможностей во взаимодействии с существующими и перспективными космическими системами связи и ретрансляции повысить эффективность информационного обеспечения. В этой связи особую актуальность приобретает разработка научно-методического аппарата оценивания эффективности применения КА наблюдения, реализующих различные базовые принципы получения информации с поверхности Земли [2].

Модель показателя эффективности

Результаты применения КА наблюдения определяются динамикой процессов, происходящих как на поверхности Земли, так и в среде их функционирования — околоземном космическом пространстве.

Процесс функционирования КА наблюдения предполагает использования для оценивания

эффективности применения КА математических моделей, интегрирующих в себе пространственно-временные параметры областей применения КА, характеристики работы бортовой аппаратуры и параметры движения КА, характеристики условий обстановки [3].

При оценивании эффективности целесообразно выделять результат (эффект) от применения системы в соответствии с ее целевым предназначением, а также затраченные на достижение результата временные и материальные ресурсы. Естественно, что полезность эффекта понижается с ростом неоправданно затраченных ресурсов, а его правильная оценка зачастую носит субъективный характер и зависит от тех задач, которые решает система, применяющая исследуемую систему в своих целях.

Эффективность применения такой сложной технической системы, как разнородная ОГ КА наблюдения — это свойство получать результат ее функционирования с учетом условий применения сложной технической системы и с учетом способов использования активных средств управления этой системой.

Под показателями эффективностью операции также понимают:

- степень достижимости потенциального результата при идеальной стратегии и в идеальных условиях применения;
- степень различия между реальным ее результатом и желаемым результатом.

Под понятием управления [4] понимается процесс формирования рационального (разумно обоснованного) поведения системы в операции. Набор всевозможных взаимоисключающих (альтернативных) способов использования активных средств составляет множество допустимых стратегий U .

В свою очередь, результирующие факторы зависят от выбранной стратегии. Следовательно, результат операции также будет зависеть от стратегии [5, 6].

$$Y(u) = Y[\mathcal{E}(u), R(u), T(u)]. \quad (1)$$

Основная цель управления состоит в том, чтобы обеспечить максимальную эффективность использования активных средств в операции при решении поставленной задачи (при достижении цели).

Выбор стратегии u из множества допустимых стратегий U является основным этапом.

Применительно к космической системе наблюдения операции могут быть направлены [7]:

- на достижение целей функционирования — в штатных условиях эксплуатации;
- на парирование внешних неблагоприятных условий;
- на парирование внутренних неблагоприятных условий.

Элементами операций, направленных на достижение целей функционирования в штатных условиях эксплуатации могут быть:

- планирование порядка наблюдения объектов;
- астроориентация;
- проверка готовности КА к проведению наблюдения;
- разворот корпуса КА для наблюдения цели;
- шифровка сигнала;
- запись сигнала в запоминающее устройство;
- поворот антенн на КА-ретранслятор;
- передача информации;
- разворот корпуса КА для съемки следующей цели и т.д.

Основной принцип выбора показателя эффективности его строгое соответствие цели, которая должна быть достигнута в результате выполнения задачи. Показатель эффективности должен быть мерой достижения цели действий, мерой успешности выполнения задачи [5, 8].

Выполнение многих действий, особенно военного характера, сопровождается элементами случайности. Исход планируемого действия, даже организованного строго определенным образом, не может быть точно предсказан, будет случайным. Поэтому в качестве показателей эффективности принимаются неслучайные характеристики случайной величины.

Эффективностью применения КА наблюдения является ожидаемая мера достижения поставленной перед ними в ходе применения цели. При этом показатели эффективности выступают в качестве ее численной меры, а критерии эффективности — как совокупность условий, определяющих пригодность, оптимальность или превосходство результатов, оцениваемых действий с точки зрения поставленной в них цели

[5]. Исходя из анализа задач, возлагаемых на КА наблюдения, целью функционирования КА, в соответствии с принципом Колмогорова, является получение информационных данных с поверхности Земли и передача их потребителю. Из множества свойств, присущих процессу наблюдения, существенными являются операционные свойства, определяемые эффектами его результатов:

- результативность наблюдения $\mathcal{E}(u)$;
- ресурсозатраты на применение КА $R(u)$;
- оперативность наблюдения $T(u)$.

Качество решения задач наблюдения ОГ КА может быть оценено только всей совокупностью перечисленных операционных свойств с помощью векторного показателя (1).

$Y(u)$ как показатель эффективности должен быть представительным, критичным, комплексным и «простым». Типичной является ситуация, когда на характеристики, параметры, условия функционирования орбитальных средств в ходе наблюдения воздействует совокупность случайных факторов. Как следствие этого комплексной характеристикой качества такого целенаправленного процесса может служить только вероятность W достижения цели операции (наблюдения), в частности вероятность обнаружения объекта наблюдения в заданном районе за заданный интервал времени с учетом ограничений на ресурсозатраты (количество задействованных КА, при ограничении расхода операционного ресурса). Данный показатель является безразмерным и выражает степень соответствия реального результата операции требуемому или потенциально возможному результату для заданных стратегий и условий.

Таким образом, обобщенный показатель эффективности наблюдения районов обслуживания ОГ КА W — вероятность получения пригодной информации об объекте в заданном районе за заданный интервал времени ограниченным составом ОГ, определяемая по формуле полной вероятности [9, 10]

$$W = P(A) = \sum_{k=0}^{2^{N-1}} P(H_k) \cdot P(A/H_k)$$

при

$$t_{\text{уст}} \leq t^{\text{зад}}, N_{\text{КА}} = N_{\text{КА}}^{\text{дост}}, R_0 \leq R_0^{\text{дост}},$$

где A — событие, состоящее в том, что по данным наблюдения достигнут целевой эффект приращения ОГ КА;

H_k — событие, состоящее в том, что k -я комбинация ОГ наблюдения выполнила задачу наблюдения;

N — число баллистических структур (типов КА наблюдения), входящих в разнородную ОГ;

$t_{уст}$ — время устаревания информации;

$t^{зад}$ — заданное время;

$N_{КА}$ — количество КА в разнородной ОГ;

$N_{КА}^{дост}$ — доступное количество КА;

R_0 — операционный ресурс;

$R_0^{дост}$ — доступный операционный ресурс.

Вероятность $P(H_k)$ соответствует вероятности обнаружения оптико-электронными, радиолокационными или радиотехническими орбитальными средствами наблюдения

$$P(H_k) = 1 - \prod_{i \in \{i_k\}} (1 - P_{обн}^{(i)}), \quad k = 0(1)2^N - 1,$$

где i — индекс соответствующей баллистической структуры, входящей в разнородную ОГ;

k — индекс варианта комбинации баллистических структур, в составе разнородной ОГ;

$\{i_k\}$ — множество индексов баллистических структур, входящих в k -й вариант комбинации;

$P_{обн}^{(i)}$ — вероятность выполнения задачи наблюдения i -ой ОГ.

Условная вероятность $P(A/H_k)$ определяется следующим образом.

Если $H_k = 0$, т.е. задачу наблюдения не выполнила ни одна система наблюдения, то $P(A/H_k) = 0$.

Если $H_k = H^{(i)}$, т.е. задачу наблюдения выполнила только i -я система наблюдения, то $P(A/H_k) = v_i p_{Ti}$.

Если $H_k = H^{(ij)}$, т.е. задачу наблюдения выполнила i -я и j -я системы наблюдения, то $P(A/H_k) = v_i p_{Ti} + v_j p_{Tj} - v_i v_j p_{Ti} p_{Tj}$.

Если все (три) системы наблюдения выполнили задачу наблюдения, то

$$P(A/H_k) = \sum_{i=1}^3 v_i p_{Ti} - \sum_{i < j} v_i v_j p_{Ti} p_{Tj} + \prod_{i=1}^3 v_i p_{Ti},$$

где v_i — функциональная значимость данных, добываемых i -й системой;

p_{Ti} — вероятность того, что время наблюдения i -й системой заданного района не меньше заданного.

Для всестороннего оценивания эффективности наблюдения районов обслуживания разнородной орбитальной группировкой КА наряду с показателем эффективности наблюдения районов обслуживания (основным показателем эффективности) необходимо использовать некоторые параметры, характеризующие различные стороны и особенности проведения операции, они называются частными (дополнительными) показателями эффективности. Основной и дополнительные показатели эффективности составляют систему показателей эффективности [8, 11].

В качестве дополнительных показателей эффективности целесообразно использовать следующие [7, 10]:

- обзорность космической системы наблюдения;

- показатели детальности;

- показатели периодичности наблюдения объектов;

- показатели оперативности передачи информации;

- показатели производительности космического аппарата наблюдения.

Под обзорностью космической системы наблюдения понимаются возможные районы Земли ограниченные значениями широты.

В качестве показателей детальности наиболее целесообразно использовать разрешающую способность на местности, для КА оптико-электронного наблюдения в качестве данного показателя выступает линейное разрешение на местности. Разрешающая способность КА радиотехнического и радиолокационного наблюдения определяется практически идентично, с той лишь разницей, что получение информации при радиотехническом наблюдении осуществляется только по сигналу, излучаемого целью, при радиолокационном наблюдении — по отраженному сигналу на основе активной радиолокации. Разрешающая способность КА радиотехнического (радиолокационного) наблюдения — это минимально возможное смещение цели относительно другой цели по соответствующей координате (при одинаковых значениях всех других координат), при котором возможно раздельное их наблюдение и измерение координат и параметров движения.

В качестве показателей периодичности рассматриваются следующие показатели:

– время между двумя соседними по времени полета КА попаданиями объекта наблюдения с заданными координатами в зону обзора летящего КА;

– время между двумя соседними по времени полета КА попаданиями объекта наблюдения со случайными (неизвестными) координатами в зону обзора летящего КА;

– время между двумя соседними по времени полета КА попаданиями объекта наблюдения с заданными координатами в зону обзора летящего КА и с учетом вероятностных характеристик внешних (геофизических) условий над наблюдаемой территорией;

– время между двумя соседними по времени полета КА попаданиями объекта наблюдения со случайными координатами в зону обзора летящего КА и с учетом вероятностных характеристик внешних (геофизических) условий над наблюдаемой территорией.

Показатели периодичности КА наблюдения существенно зависят от баллистических характеристик орбитальной группировки, в частности от количества КА, от организации схемы обзора земной поверхности, высоты полета, от характеристик оптических систем и др.

Показатель оперативности передачи (получения) информации измеряется в единицах времени и включает в себя (путем суммирования) следующие частные показатели оперативности:

– время, необходимое для представления задания на проведение наблюдения в виде, пригодном для использования информационных технологий (формализация задания);

– время, необходимое для передачи заявки на наблюдение заданной цели на борт КА (с учетом входа КА в зону радиовидимости пункта управления или с учетом использования КА-ретранслятора);

– время, необходимое для планирования порядка наблюдения целей и постановки заявки в очередь с учетом заданных приоритетов и прогнозируемых условий наблюдения;

– время, необходимое для подхода к цели и проведения наблюдения;

– время, необходимое для обработки информации на борту КА и подготовки ее к передаче на Землю;

– время, необходимое для входа КА в зону радиовидимости наземных пунктов приема информации (или задействования КА-ретранслятора);

– время для передачи (перекачки) информации на Землю;

– время для обработки информации на Земле к пригодному для передачи потребителю виду;

– время, необходимое для передачи информации потребителю.

Перечисленные частные показатели оперативности получения информации оказывают различное (существенное или несущественное) влияние на общее время оперативности получения информации, причем это влияние имеет вероятностную природу.

В качестве показателей производительности космической системы наблюдения рассматриваются следующие показатели:

– количество объектов, которые может снять КА за один виток (сутки, год) полета;

– количество квадратных километров земной поверхности, которое может снять КА за один виток (сутки, год) полета или за время активного существования.

Вывод

Таким образом, в рамках оценивания эффективности наблюдения районов обоснована модель оценивания эффективности наблюдения районов на поверхности Земли разнородными космическими аппаратами наблюдения. В качестве обобщенного показателя эффективности предложена вероятность получения пригодной информации об объекте в заданном районе за заданный интервал времени ограниченным составом ОГ. Проведено обоснование частных показателей результативности, оперативности и ресурсоемкости.

Список источников

1. Сурувикин С.В., Кежаев В.А., Кулешов Ю.В. Актуальные проблемы развития теории управления группировками войск (сил) в интересах повышения эффективности огневого поражения противника с целью локализации международного вооруженного конфликта // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2018. № 1 (101). С. 24–32.

2. Коваленко А.Ю., Кульвиц А.В., Аверкиев Н.Ф. Основные положения концепции обоснования разнородных орбитальных группировок космических аппаратов наблюдения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2021. № 1 (116). С. 50–57.

3. Ляпоров В.Н., Макаров Ю.Н., Фадеев А.С. Вероятностная модель оценивания эффективности применения средств вооружения в условиях функционирования орбитальной системы наблюдения // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского. 2010. Вып. № 627. 5 с.

4. Алтухов П.К., Афонский И.А., Рыболовский И.В., Татарченко А.Е. Основы теории управления войсками. М.: Воениздат, 1984. 221 с.

5. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10-ти т. Т. 3. Эффективность технических систем; под общ. ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова. М.: Машиностроение, 1988. 328 с.

6. Юсупов Р.М., Лысенко И.В. Эффективность функционирования и другие операционные свойства систем: задачи и метод оце-

нивания // Труды СПИИРАН. № 5 (60). 2018. С. 241–270.

7. Раскин А.В., Левкин И.М., Остапенко О.Н. Обоснование математического аппарата оценивания эффективности космических систем // Радиотехника. 2012. № 11. С. 112–115.

8. Абчук В.А. Справочник по исследованию операций. М.: Воениздат, 1979. 368 с.

9. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 576 с.

10. Коваленко А.Ю. Математические аспекты оценивания результативности применения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды СПИИРАН. 2017. № 4 (53). С. 29–50.

11. Буравлев А.И., Горчица Г.И., Степанов В.Д. Методика интегральной оценки эффективности ударных комплексов вооружения и военной техники, и воинских формирований // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2022. № 3 (123). С. 104–110.