

УДК 521.35:[528.837:629.78]

**АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ  
НИЗКООРБИТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ  
МОНИТОРИНГА НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ**

**А.И. Пикуль, Д.К. Хегай, А.В. Шпак**

Предлагается алгоритм, позволяющий производить оценивание информационных возможностей космической системы при различных вариантах ее орбитального построения с учетом характеристик входящих в нее искусственных спутников Земли и объектов мониторинга.

**Ключевые слова:** искусственный спутник Земли, космическая система, рациональное построение баллистической структуры системы ИСЗ, мониторинг наземных объектов.

**Введение и постановка задачи**

Для проведения космического мониторинга наземных объектов, как правило, используется низкоорбитальная система искусственных спутников Земли (ИСЗ). При этом для решения стоящей целевой задачи с требуемым качеством могут использоваться различные варианты ее орбитального построения [1]. В ряде случаев создается избыточность информационных ресурсов системы, что неоправданно увеличивает ее стоимость и сложность. Также при функционировании системы ИСЗ на этапе ее развертывания или при несвоевременном восполнении ее численности может возникнуть ситуация, когда на поверхности Земли формируются зоны, где целевая задача в определенные моменты времени не решается с требуемым качеством. Таким образом, создание новой космической системы мониторинга наземных объектов целесообразно начинать с выбора баллистической структуры, обеспечивающей решение целевой задачи с требуемой эффективностью при заданных ограничениях.

Эффективность системы, как правило, характеризуется ее информационными возможностями – периодичностью наблюдения объекта (для неподвижных объектов), а также средней вероятностью обнаружения объекта с учетом допустимого времени устаревания данных (для подвижных объектов). Ограничениями могут являться общая стоимость создания системы, число ИСЗ в системе, количество, местонахождение и специфические особенности потребителей информации системы и др. Рациональность построения системы определяется минимумом затрат на ее создание при условии достижения требуемой эффективности ее работы.

Для решения этой сложной задачи целесообразно использовать модели и методы оценки информационных возможностей космических систем при различных вариантах их баллистического построения, реализованные в виде аналитических или статистических алгоритмов.

Алгоритм оценивания рациональности построения баллистической структуры системы ИСЗ мониторинга наземных объектов

При рассмотрении вопросов, связанных с построением низкоорбитальной системы ИСЗ, большое значение имеет моделирование процесса ее функционирования. Представляется, что в состав алгоритма, реализующего процесс моделирования баллистической структуры (БС) низкоорбитальной космической системы мониторинга, целесообразно включить расчетные процедуры, позволяющие осуществлять [2]:

- расчет параметров трассы полета ИСЗ;
- расчет параметров полосы обзора ИСЗ;
- формирование признака накрытия полосой обзора ИСЗ заданного района;
- имитацию неопределенности положения объекта мониторинга (ОМ) в районе;
- формирование признака попадания объекта в полосу обзора ИСЗ;
- формирование признака фиксации объекта мониторинга бортовой аппаратурой мониторинга (БАМ) ИСЗ;
- расчет параметров области возможного положения объекта мониторинга (ОВПОМ);
- расчет параметров круга связи;
- формирование признака приема информации на пункте приема информации (ППИ);
- формирование признака распознавания объекта на ППИ;
- выбор показателей и оценку эффективности применения и возможностей низкоорбитальной системы ИСЗ;
- формирование признака захвата ОМ по долготе;
- формирование признаков уклонения ОМ от средств БАМ ИСЗ;
- формирование предложений по построению баллистической структуры системы ИСЗ.

Для исследования информационных свойств космической системы большой практической интерес представляет определение периодичности обнаружения объекта мониторинга. Известно два подхода к решению этой задачи: аналитический и статистический. Достоинством аналитического подхода является то, что он позволяет сравнительно просто определить среднюю периодичность наблюдения ОМ в заданном районе, а недостатком – отсутствие возможности определять минимальные, максимальные и текущие интервалы времени между последовательными обнаружениями ОМ. Для определения этих интервалов и оценки вероятности того, что временные интервалы между обнаружениями ОМ не превысят заданных значений, целесообразно воспользоваться статистическим подходом, основанным на моделировании процесса функционирования системы.

Расчет параметров трассы полета, полосы обзора ИСЗ и круга связи с ППИ осуществляется стандартными процедурами, достаточно широко рассмотренными в литературе [1, 2]. Формирование признака накрытия полосой обзора ИСЗ заданного района осуществляется путем сопоставления текущих параметров движения ИСЗ с учетом ширины полосы обзора БАМ с географическими границами заданного района подстилающей поверхности. В качестве основного показателя эффективности применения системы целесообразно использовать среднее значение вероятности обнаружения ОМ  $W_z$  на мерном интервале, рассчитываемое с учетом допустимого времени устаревания данных  $\Delta T_{уст}$

$$W_z = \frac{1}{D_j} \sum_{i=1}^k S_i .$$

Здесь  $k$  – количество шагов по времени, когда текущее значение вероятности обнаружения ОМ отлично от нуля,  $k = 1 \dots K$ ;  $i$  – номер шага по времени, когда текущее значение вероятности обнаружения отлично от нуля;  $K = \frac{\Delta T_{уст}}{\Delta t}$ ;  $S_i$  и  $D_j$  – параметры, используемые при обработке результатов моделирования:

$S_i = P_i \cdot \Delta t$ ,  $D_j = \Delta t \cdot n_j$ ;  $\Delta t$  – размер шага по времени;  $j$  – номер шага по времени на интервале оценки  $T_{оц}$ ,  $j = 1 \dots E (T_{оц} / \Delta t)$ ;  $n_j$  – общее количество шагов по времени;  $P_i$  – текущее значение вероятности обнаружения за время мониторинга ОВПОМ

$$P_i = \frac{n_{pi}(t_y < \tau)}{n_{\Sigma i}},$$

где  $n_{pi}(t_y < \tau)$  – количество распознанных (обнаруженных) объектов, имитирующих неопределенность положения ОМ в заданной ОВПОМ и имеющих время устаревания данных меньше допустимого;  $n_{\Sigma i}$  – суммарное количество объектов.

Имитация неопределенности положения ОМ в районе ОВПОМ производится с помощью специальной процедуры. Исходными данными для ее реализации являются прогнозируемое (или расчетное) положение ОМ на момент наблюдения, а также область возможных отклонений фактического положения ОМ от расчетного. В процессе ее выполнения к расчетному положению ОМ добавляются случайные от-

клонения по широте и долготе с использованием псевдослучайных чисел и априорно известного закона распределения. Область возможных отклонений рассчитывается, исходя из известного местоположения ОМ на момент предыдущего наблюдения, предельно допустимой или средней скорости движения ОМ, а также возможностей маневрирования ОМ с учетом особенностей рельефа.

Для наглядности описания периодического обнаружения ОМ информационными средствами системы мониторинга можно построить график, на котором отображается соответствующим символом обнаружение или необнаружение каждого объекта, имитирующего неопределенность положения ОМ на интервале оценки, что позволяет измерить интервалы между обнаружениями и, в конечном итоге, определить периодичность обнаружения ОМ и отобразить ее в форме гистограммы – статистической плотности распределения временных интервалов между обнаружениями с заданной дискретностью (рис. 1, 2).

Формирование признаков попадания ОМ в полосу обзора ИСЗ и захвата ОМ по долготе осуществляется путем сопоставления текущих параметров движения отдельных ИСЗ с параметрами, характеризующими расчетное положение ОМ на момент наблюдения. Формирование признака фиксации объекта БАМ производится путем сопоставления обнаружительной способности БАМ реальным условиям наблюдения ОМ.

Считается, что ОМ уклоняется от обнаружения БАМ ИСЗ, если случайное число  $r$  окажется больше, чем вероятность обнаружения ОМ в условиях сложнопрогнозируемой радиоэлектронной обстановки  $p_{рЭО}$ . Признак уклонения описывается функцией обнаружения  $Pr_{укл}^{рЭО}$

$$Pr_{укл}^{рЭО} = \begin{cases} 1, & \text{при } r \leq p_{рЭО}; \\ 0, & \text{при } r > p_{рЭО}. \end{cases}$$

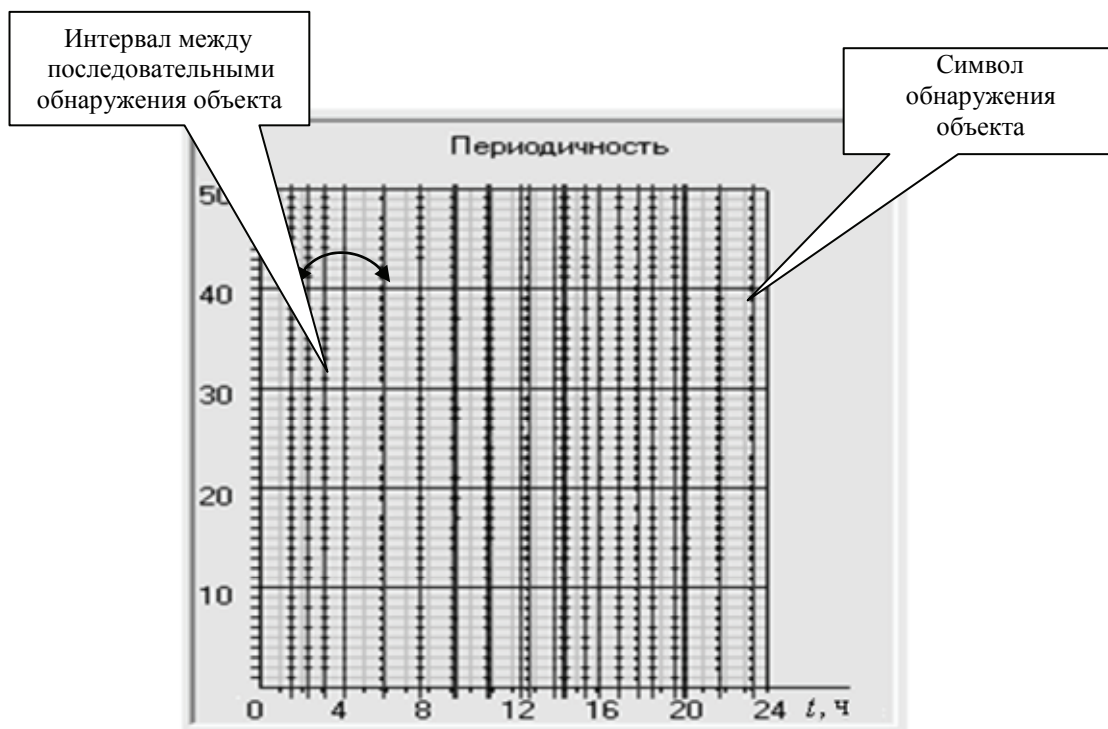


Рис. 1. Графическое представление временных интервалов между обнаружениями объектов, имитирующих неопределенность положения ОМ

При уклонении ОМ от обнаружения каналом радиолокационного мониторинга ИСЗ определяется скорость уклонения на интервале оценки, которая, в свою очередь, зависит от ряда параметров, наиболее значимыми из которых являются количество ИСЗ в системе, баллистическая структура системы (долготы восходящих узлов каждого ИСЗ), захваты по долготе на заданной широте и текущая широта маршрута перехода:

$$V_{укл} = f(N_{ИСЗ}, \Omega_i, \Delta\lambda_0, \varphi_m),$$

где  $N_{ИСЗ}$  – количество ИСЗ в системе;  $\Omega_i$  – долгота восходящего узла  $i$ -го ИСЗ;  $\Delta\lambda_0$  – ширина полосы захвата по долготе на широте проведения мониторинга;  $\varphi_m$  – текущая широта маршрута перехода.

Если объект мониторинга (с какой бы скоростью он ни двигался) при каждом пролете ИСЗ над ним постоянно попадает в полосу обзора канала радиолокационного мониторинга, то формируется признак неуклонения от обнаружения; в противном случае объект может уклониться от обнаружения (на всем интервале оценки или в пределах его некоторой части)

$$\text{Pr}_{\text{укл}}^{\text{р.л.м}} = \begin{cases} 1, & \text{при } V_{\text{укл}} = 0, \\ 0, & \text{при } V_{\text{укл}} > 0. \end{cases}$$

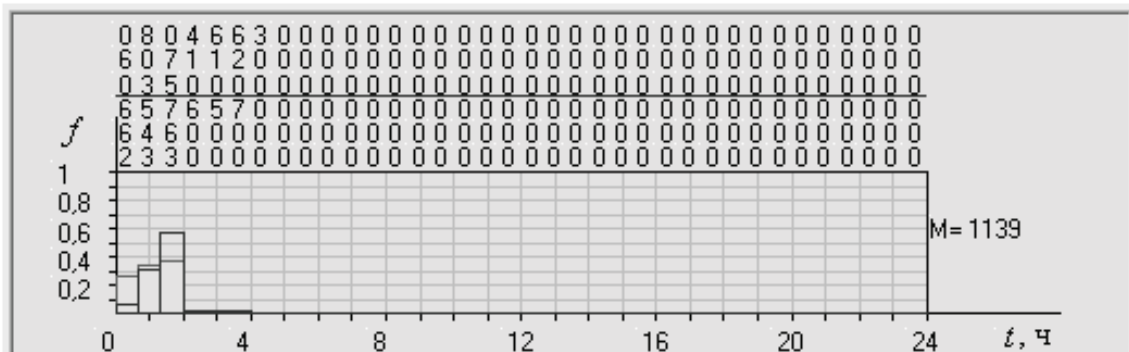


Рис. 2. Построение закона распределения временных интервалов между обнаружениями объектов

В процессе наращивания числа ИСЗ в системе должно обеспечиваться максимальное значение выбранного показателя эффективности ее применения – средней вероятности обнаружения ОМ [3, 4].

$$W_z \Rightarrow \max . \tag{1}$$

На каждом шаге процесса наращивания БС фиксируются значения долгот восходящих узлов предыдущих ИСЗ и изменяется долгота восходящего узла текущего ИСЗ:

$$\Omega_{N-1} = \text{const};$$

$$\Omega_N = \text{var};$$

При этом должна обеспечиваться невозможность уклонения ОМ от обнаружения ИСЗ (канала) радиолокационного мониторинга, т.е.

$$\text{Pr}_{\text{укл}} = 0 . \tag{2}$$

Совместное выполнение условий (1) и (2) обеспечивает рациональность построения баллистической структуры системы ИСЗ для заданной достоверности обнаружения ОМ.

Алгоритм, который позволяет осуществлять все необходимые расчеты, связанные с обоснованием вариантов рационального построения баллистической структуры космической системы мониторинга, представлен на рис. 3. Этот алгоритм был реализован в виде программного комплекса и в настоящее время используется для оценивания эффективности использования информационных возможностей и рациональности построения группировок ИСЗ мониторинга наземных объектов.

Адекватность использованной модели оценивалась путем сравнения результатов моделирования с данными проведения мониторинга наземных объектов с помощью бортовой регистрирующей аппаратуры ряда функционирующих орбитальных группировок ИСЗ [5]. Относительное отклонение оценки информационных возможностей системы во всех случаях не превысило 3%. Кроме того, моделирование позволило получить альтернативный вариант орбитального построения системы ИСЗ, при котором оценка информативности выросла на 15%.

### Заключение

В общем случае рациональное построение баллистической структуры низкоорбитальной космической системы мониторинга целесообразно осуществлять, исходя из следующих соображений:

- количество ИСЗ в системе не превысит некоторого максимального значения, обеспечивающего требуемое значение показателей эффективности применения системы;
- наращивание численности ИСЗ (запуск очередного ИСЗ) должно обеспечивать максимум эффективности применения системы по всем заданным районам мониторинга;
- параметры орбит ИСЗ должны выбираться с учетом возможного уклонения подвижных ОМ от предполагаемого района обнаружения.

Разработанная математическая модель и алгоритм на ее основе могут быть положены в основу создания методики оценки эффективности применения низкоорбитальной космической системы мониторинга при ее рациональном построении.

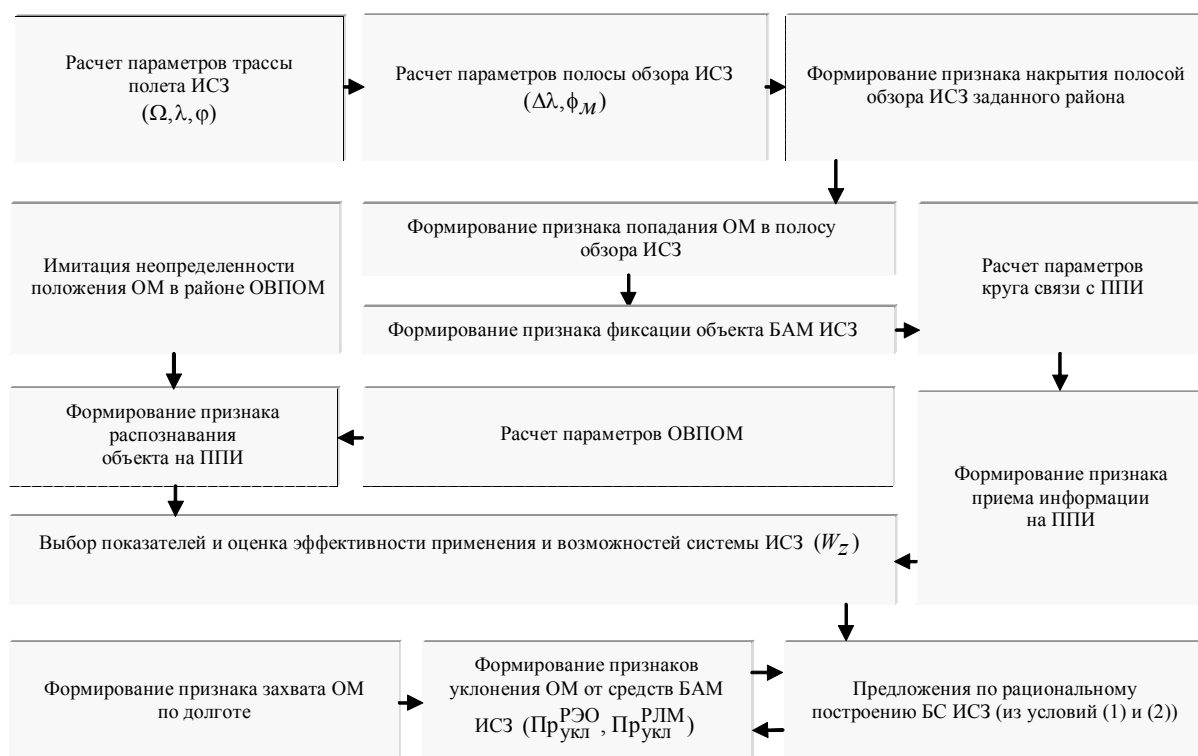


Рис. 3. Схема реализации алгоритма оценивания рациональности построения БС системы ИСЗ

### Литература

1. Основы теории полета космических аппаратов / Под ред. Г.С. Нариманова, М.К. Тихонравова. – М.: Машиностроение, 1972.– 608 с.
2. Калинов М.И. Методика оценки эффективности применения космических систем наблюдения // Сборник трудов 6-й Всероссийской НПК «Актуальные проблемы защиты и безопасности». – СПб: НПО СМ, 2003.– С. 53–78.
3. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.– 544 с.
4. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1968. – 356 с.
5. Макаренко Д.М., Потюпкин А.Ю. На орбитальных рубежах. – М.: Академия, 2008. – 280 с.

- Пикуль Анатолий Иванович** – ФГУП «ЦНИРТИ имени академика А.И. Берга», г. Москва, заместитель генерального директора, post@cnirti.ru
- Хегай Дмитрий Климович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник отдела, hdk\_2004@mail.ru
- Шпак Александр Васильевич** – ФГУП «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга», г. Москва, кандидат технических наук, главный конструктор, Juls\_s@inbox.ru