

УДК 621.396.1

А.В. Статкус<sup>1</sup>, Ф.М. Андреев<sup>2</sup><sup>1</sup> *Национальный технический университет «ХПИ», Харьков*<sup>2</sup> *Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков*

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПЕРАТИВНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ТРАЕКТОРИИ ЦЕЛИ

*Разработан метод оценки эффективности оперативной классификации типа траектории цели в РЛС надгоризонтного обнаружения баллистических и космических объектов по данным функционирования аналого-цифровой, или гибридной системы когерентной обработки пачки сигналов (СКОПС). Полученные результаты могут быть использованы как для оценки эффективности известных алгоритмов данного типа, так и для предъявления требований к точностным характеристикам СКОПС в зависимости от допустимого числа ложных тревог при оперативной классификации важных целей.*

**Ключевые слова:** *радиолокационная станция надгоризонтного обнаружения, траектория цели, оперативная классификация, аналого-цифровая система когерентной обработки, радиальное ускорение, ложная тревога.*

### Введение

**Актуальность проблемы.** Начало XXI века характеризуется значительным ростом номенклатуры РЛС надгоризонтного обнаружения (НГО) баллистических и космических объектов: «Волга» (РФ, 2002 г.), GRAVES (Франция, 2005 г.), «Воронеж-М» (РФ, 2006 г.), AN/TPY-2 (США, 2006 г.), «Воронеж-ДМ» (РФ, 2009 г.), «МАРС» и «МАРС-Э» (РФ, в разработке) [1, 2]. Включение в состав РЛС НГО системы когерентной обработки пачечного сигнала (СКОПС), обеспечивающей высокоточное измерение радиальных скорости  $R^{(1)}$  и ускорения  $R^{(2)}$ , позволяет значительно улучшить ее точностные характеристики. Эффективность функционирования РЛС за счет включения в ее состав СКОПС может быть повышена, если эти высокоточные измерения  $R^{(1)}$ ,  $R^{(2)}$  использовать также для решения задачи оперативной классификации целей. Класс целей в радиолокации – множество целей, характеризующихся определенными алфавитными признаками [3]. При радиолокационном распознавании обнаруженные объекты классифицируются на космические, баллистические, аэробаллистические, гиперзвуковые аэродинамические, аэродинамические (воздушные). Каждый из указанных классов, в свою очередь, разбивается на подклассы (виды). Например, для класса баллистических целей видами можно считать: одиночная, сложные с разрешаемыми или неразрешаемыми элементами, дипольная, авроральные радиотражения (результат отражения радиоволн на неоднородностях области E полярной ионосферы) [4]. Каждый из перечисленных видов также делится на типы, которые являются объектом распознавания. Например, для такого вида баллистического объекта как «одиночная цель» таковыми являются: тип головной части, тип ложной цели и т.д.

Для классификации объектов в РЛС НГО, как правило, используются траекторные и координатные признаки [5]. Траекторные признаки – это параметры траекторий баллистических и элементы орбит для космических объектов. Координатные признаки – это географические координаты (широта и долгота) точек старта и точек падения, дальности стрельбы и углы бросания баллистических ракет (БР) и т.д. Кроме того, для распознавания видов и типов целей используются сигнальные признаки, формируемые на основании временных, частотных и поляризационных признаков эхо-сигналов [3, 7–12].

Если класс объекта неизвестен, то для получения качественной траекторной и координатной информации необходимо для каждого объекта решать задачу распознавания его вида, чтобы далее включать в работу ту ветвь алгоритма сопровождения, которая для него оптимальна [5]. Это приводит к дополнительным непроизводительным затратам вычислительных и временных ресурсов вычислительного комплекса РЛС, и, в конечном итоге, к сокращению ее пропускной способности. Для перспективных РЛС НГО требования к пропускной способности возрастают в связи с необходимостью обслуживания дополнительно еще потока воздушных целей [1]. Следовательно, актуальной является задача оперативной классификации объектов, позволяющая разделить их на классы задолго до окончания процесса сопровождения и тем самым повысить пропускную способность РЛС НГО.

**Анализ известных результатов исследований.** Детально проблема распознавания типов БКО изучена с использованием время-частотных признаков [3, 7–10]. Высокая эффективность распознавания видов и типов БКО достигается при использовании поляризационных признаков [11, 12]. А вот число работ, посвященных различным аспектам классификации тра-

екторных признаков, весьма ограничено. В работе [13] классификацию БКО на пассивном участке движения предложено проводить по величине интеграла энергии, рассчитываемого без учета влияния Земли. Установлено, что это можно сделать, если имеется информация о дальности  $R$ , азимуте  $\varepsilon$ , угле места объекта  $\gamma$  и высокоточные измерения его радиальных скорости  $R^{(1)}$  и ускорения  $R^{(2)}$ .

**Нерешенная часть проблемы.** Однако, в настоящее время отсутствуют оценки эффективности данного метода в смысле достоверности классификации. В качестве такой оценки целесообразно взять такой широко используемый в теории распознавания показатель как число ложных тревог [3]. Отсутствие информации об эффективности метода не позволяет сделать вывод о возможности использования его в случае, когда потребное для его реализации число измерений  $n_{\text{КЛАСС}}$  координат БКО

$(R, R^{(1)}, R^{(2)}, \varepsilon, \gamma)$  оказывается меньше, чем необхо-

димое число  $n_{\text{ТР}}$  для определения параметров траекторий или элементов орбит БКО. Когда  $n_{\text{КЛАСС}} < n_{\text{ТР}}$ , имеется возможность осуществлять адаптацию не только в программном компоненте РЛС путем выбора соответствующей ветви алгоритма. Единственного зондирующего сигнала, оптимального для всех этапов и условий функционирования РЛС, не существует. Это значит, что в РЛС должен использоваться набор различных типов зондирующих сигналов, каждый из которых обеспечивает лучшие показатели качества работы РЛС в зависимости от складывающейся целевой и помеховой обстановки. Когда  $n_{\text{КЛАСС}} < n_{\text{ТР}}$ , появляется принципиальная возможность осуществлять адаптацию в передающем компоненте РЛС путем выбора соответствующего зондирующего сигнала и его параметров, а в приемном компоненте РЛС – параметров тракта обработки такого сигнала, отраженного от объекта.

**Цель статьи:** оценка эффективности оперативной классификации типа траектории объекта на основе теории статистических решений при использовании для этого метода, основанного на вычислении интеграла энергии.

## 1. Характеристика алгоритма оперативной классификации типа траектории цели

Назначение алгоритма оперативной классификации типа траектории цели – предварительная оценка характера движения цели перед началом сопровождения [5]. Результаты работы алгоритма используются для формирования уровня приоритетности («веса») цели. Режим когерентной обработки пачки импульсов в РЛС «Днепр-М» получил название режима фазотраекторной обработки (ФТН).

Входными данными для рассматриваемого алгоритма являются:

оценки радиальных скорости  $R^{(1)}$  и ускорения  $R^{(2)}$ , полученных на момент времени, соответствующий центру пачки, по результатам ее когерентной обработки для специального режима работы РЛС, когда цель облучается когерентной пачкой из  $N = 16$  импульсов (режим ФТН-16);

оценки дальности  $R$ , азимута  $\varepsilon$ , полученные по данным режимов захвата или сопровождения;

номер цели  $N_{\text{Ц}}$ .

В качестве признака классификации типа траектории цели в алгоритме используется оценка интеграла энергии  $h$ , которая формируется без учета вращения Земли соответственно выражению

$$h = V^2 - \frac{2\mu}{\rho} = \left(R^{(1)}\right)^2 + RR^{(2)} - \frac{\mu}{\rho^3} \left(R^2 + 2R_3^2 + 3RR_3 \text{Sin}\gamma \text{Sin}\varepsilon\right), \quad (1)$$

где  $V$  – абсолютное значение скорости цели,  $R_3 = 6371$  км – радиус Земли,  $\mu = 398605 \text{ км}^3/\text{с}^2$  – гравитационная постоянная,

$$\rho = (R^2 + R_3^2 + 2RR_3 \text{Sin}\gamma \text{Sin}\varepsilon)^{1/2} \quad (2)$$

– оценка модуля радиус-вектора цели. Угол места цели  $\gamma$  на этапе оперативной классификации типа траектории цели (ОКТЦ) не оценивается.

При расчете по формулам (1), (2) в качестве оценки  $\gamma$  выбирается угловое направление, которое соответствует центру сектора обзора РЛС по углу места.

Диапазон возможных значений  $h$  делится на промежутки  $\Delta h_i \in [h_i, h_{i+1}]$ ,  $i = 0, \dots, 5$ . Их граничные значения приведены в [5]. Между промежутками  $\Delta h_i$  и типами траекторий целей существует следующее соответствие:

0. Гиперзвуковая аэродинамическая цель.
1. Цель с предельно низкими значениями интеграла энергии.
2. БР средней дальности (БРСД).
3. Межконтинентальная БР (МБР).
4. Потенциально опасная цель.
5. Искусственный спутник Земли (ИСЗ).

Авторами был выполнен статистический анализ экспериментальных оценок интеграла энергии  $\hat{h}$ , полученных в результате работы РЛС НГО по эталонным ИСЗ когерентными импульсными последовательностями. Анализ состоял в проверке гипотезы о принадлежности распределения выборки значений экспериментальных оценок  $\hat{h}$  нормальному закону. Проверка выполнялась с использованием критериев согласия Колмогорова – Смирнова и  $\chi^2$  Фишера. Результаты проверки не противоречили гипотезе о нормальности выборочного распределения  $\hat{h}$ .

## 2. Определение точности оценки интеграла энергии

В качестве оценки эффективности данного алгоритма используем такой широко используемый в теории распознавания показатель, как число ложных тревог [5]. Он зависит от ошибок измерений интеграла энергии цели  $h$ .

Ошибки измерений в общем случае делятся на грубые ошибки (промахи), систематические и случайные ошибки. Имея в виду тот факт, что оперативная классификация назначается только по целям, для которых выполняется ряд специальных условий относительно уровня точности определения их координат и параметров движения, можно считать, что промахи и систематические ошибки при оценивании значений интеграла энергии цели отсутствуют.

Регулярные условия оценивания означают, что оценка  $\hat{h}$  находится в некоторой малой окрестности истинного значения  $h_0$  оцениваемой величины. Это позволяет для описания ошибки оценки значения интеграла энергии цели  $\Delta h$  воспользоваться разложением функциональной зависимости (1) в ряд по степеням малых значений параметров  $\Delta Z_i$ , имеющих смысл ошибок измерений аргументов  $Z_i$  зависимости (1), и ограничиться в нем только линейными членами

$$\Delta h = \hat{h} - h_0 \approx \sum_{i=0}^4 a_i \Delta Z_i, \quad (3)$$

где  $a_i = \partial h(\mathbf{Z}_0) / \partial Z_i$  – частные производные детерминированной зависимости (1) по ее аргументам в точке истинного значения оцениваемой величины  $h_0 = h(\mathbf{Z}_0)$ . Тогда средний квадрат ошибки  $\Delta h$  с учетом ее центрированности (математическое ожидание  $M\{\Delta h\} = 0$ ) представляется в таком виде

$$\begin{aligned} \sigma_h^2 &= M\{(\Delta h)^2\} = \\ &= M\left\{ \sum_{i=0}^4 a_i^2 (\Delta Z_i)^2 + 2 \sum_{i=0, j>i}^4 a_i a_j \Delta Z_i \Delta Z_j \right\} = \\ &= \sum_{i=0}^4 a_i^2 \sigma_i^2 + 2 \sum_{i=0, j>i}^4 a_i a_j k_{ij} \sigma_i \sigma_j, \quad (4) \end{aligned}$$

где  $\sigma_i^2$  – дисперсия  $i$ -й компоненты вектора оценки параметров цели  $\mathbf{Z} = (R, R^{(1)}, R^{(2)}, \varepsilon, \gamma)^T$ ,  $k_{ij}$  – коэффициент корреляции  $i$ -й и  $j$ -й компонент вектора  $\mathbf{Z}$ .

Реализованный в РЛС «Днепр-М» механизм формирования  $\mathbf{Z}$  означает независимость оценок радиальной скорости  $R^{(1)}$  и радиального ускорения  $R^{(2)}$  цели по данным алгоритма когерентной обработки друг от друга и от оценок дальности  $R$  и угловых координат  $\varepsilon, \gamma$ , а также независимость оценки азимута  $\varepsilon$  от  $R, R^{(1)}, R^{(2)}$ , т.е. некоррелированность

компонент  $\mathbf{Z}$ :  $k_{ij} = \delta_{ij}$ ;  $i, j = 0, \dots, 4$ . Поэтому окончательно получаем

$$\sigma_h^2 = \sum_{i=0}^4 a_i^2 \sigma_i^2. \quad (5)$$

С учетом выражения для частных производных (1) по компонентам  $\mathbf{Z}$ :

$$\begin{aligned} a_0 &= \partial h / \partial Z_0 = \partial h / \partial R = R^{(2)} - \frac{\mu}{\rho^5} \left[ R^3 + R^2 R \times \right. \\ &\times \left. \left( 4 + 3 \text{Sin}^2 \varepsilon \text{Sin}^2 \gamma \right) + 5 R^2 R_3 \text{Sin} \varepsilon \text{Sin} \gamma + 3 R_3^2 \text{Sin} \varepsilon \text{Sin} \gamma \right], \\ a_1 &= \partial h / \partial Z_1 = \partial h / \partial R^{(1)} = 2R^{(1)}, \\ a_2 &= \partial h / \partial Z_2 = \partial h / \partial R^{(2)} = R, \\ a_3 &= \partial h / \partial Z_3 = \partial h / \partial \gamma = \\ &= -3\mu \cdot R_3^2 R (R_3 + R \text{Sin} \varepsilon \text{Sin} \gamma) \text{Sin} \varepsilon \text{Cos} \gamma / \rho^5; \\ a_4 &= \partial h / \partial Z_4 = \partial h / \partial \varepsilon = \\ &= -3\mu \cdot R_3^2 R (R_3 + R \text{Sin} \varepsilon \text{Sin} \gamma) \text{Cos} \varepsilon \text{Sin} \gamma / \rho^5 \end{aligned} \quad (6)$$

и типовой точности оценок компонент вектора  $\mathbf{Z}$  перед оперативной классификацией в РЛС «Днепр-М» было установлено, что в пределах зоны обзора РЛС НГО максимальный суммарный вклад ошибок оценок  $R, R^{(1)}$  и  $\varepsilon$  в дисперсию оценки  $\hat{h}$  в соответствии с (1) не превышает 1 % ее величины. Поэтому точность оценки  $R^{(2)}$  является доминирующим фактором при определении точности оценки значения интеграла энергии цели, и влиянием других компонент  $\mathbf{Z}$  можно пренебречь. Используя терминологию теории эффективности и исследования операций [6, с. 184, 187], можно утверждать, что точность оценки является наиболее пригодным средством управления точностью оценки признака классификации и, следовательно, основным фактором, влияющим на эффективность рассматриваемого алгоритма. Далее полагаем

$$\sigma_h^2 \approx a_2^2 \sigma_2^2 = R^2 \sigma_2^2 \left[ \text{км}^4 / \text{с}^4 \right], \quad (7)$$

где  $\sigma_2 = \sigma(R^{(2)})$  – результирующая среднеквадратическая ошибка (СКО) оценки  $\hat{R}^{(2)}$ . Ввиду максимальной близости характера движения БР и низкоорбитальных ИСЗ определяющее значение при оперативной классификации имеют оценки  $\hat{h}$ , получаемые по этому классу ИСЗ.

Оценим максимальную дальность этого класса целей  $R_{\max}$  на этапе оперативной классификации при локации их РЛС «Днепр-М». Согласно (7) от нее зависит точность оценки  $\hat{h}$ . Анализ геометрии соответствующей задачи для цели, движущейся по круговой орбите с высотой  $H$  и наблюдаемой под углом места  $\gamma$ , приводит к выражению для  $R_{\max}$  вида

$$R_{\max}(H, \gamma) = R_{\text{ИСЗ}} \cdot \text{Sin} \alpha_0 / \text{Cos} \gamma, \quad (8)$$

$$\text{где } R_{\text{ИСЗ}} = R_3 + H; \quad (9)$$

$\alpha_0$  – центральный угол между направлением на РЛС и направлением на цель:

$$\text{Cos}\alpha_0 = (\text{Cos}^2\gamma + (r^2 - \text{Cos}^2\gamma)^{1/2}\text{Sin}\gamma)r^{-1}, \quad (10)$$

$$r = R_{\text{ИСЗ}} / R_3 = (R_3 + H) / R_3.$$

Принимая во внимание связь интеграла энергии ИСЗ, движущегося по круговой орбите, с ее радиусом  $R_{\text{ИСЗ}}$  из (9):

$$h = -\mu / R_{\text{ИСЗ}}, \quad (11)$$

при минимальном для РЛС «Днепр-М» угле места  $\gamma = 5^\circ$  получаем зависимость  $R_{\text{max}}(h)$  в виде линейной аппроксимации

$$R_{\text{max}}(h) \Big|_{\gamma=5^\circ} \approx 800 - 362,5(h - h_{\text{min}}^{\text{ИСЗ}}), \quad [\text{км}], \quad (12)$$

обеспечивающей погрешность не более 5% для  $h \in [h_{\text{min}}^{\text{ИСЗ}}, h_{\text{HO}}^{\text{ИСЗ}}]$ , где  $h_{\text{min}}^{\text{ИСЗ}} = -61,5 \text{ км}^2/\text{с}^2$  – минимальное значение  $h$  для ИСЗ, соответствующее минимальной высоте орбитального полета 120 км,  $h_{\text{HO}}^{\text{ИСЗ}} = -57 \text{ км}^2/\text{с}^2$  – граничное значение  $h$  для низкоорбитальных ИСЗ, формирующих ложные тревоги при оперативной классификации [5].

Окончательно выражение для дисперсии оценки  $\hat{h}$  в ходе оперативной классификации получаем подстановкой  $R_{\text{max}}(h)$  в (7) вместо дальности цели  $R$ :

$$\sigma_{\hat{h}}^2 \leq R_{\text{max}}^2(h)\sigma_2^2 \quad [\text{км}^4/\text{с}^4]. \quad (13)$$

Отметим хорошее согласие результатов аналитической оценки (13) с результатами точности оценки  $\hat{h}$  по экспериментальным данным работы РЛС «Днепр-М». Действительно, при локации ИСЗ с  $h \approx -58 \text{ км}^2/\text{с}^2$  на дальности  $R = 800 \text{ км}$  ( $R < R_{\text{max}}(h) \approx 2070 \text{ км}$  для данного  $h$ ) и при длительности накопления 1,3с (то есть  $N = 16$ , что для штатного алгоритма когерентной обработки, доставляющего оценки по методу наименьших квадратов (МНК), дает  $\sigma_2 \approx 0,7 \text{ м}/\text{с}^2$  [1]) на основе (13) получаем  $\sigma_{\hat{h}} \approx 0,56 \text{ км}^2/\text{с}^2$ , что практически совпадает с величиной выборочного СКО оценки  $\hat{h}$ , полученной по экспериментальным данным.

### 3. Оценка достоверности оперативной классификации типа траектории цели

Под ложной тревогой при оперативной классификации понимается ложное отнесение цели на этапе классификации к классу БР. При этом по каждой цели (при наличии ресурсов) назначается режим сопровождения (40 ... 50 с), и окончательное решение о типе траектории принимается только по результатам точной обработки. Так как затраты энергетических ресурсов на обслуживание цели в режиме сопровождения на порядок выше, чем в режиме обнаружения, ложные тревоги при оперативной классификации приводят к существенным «непроизводительным» затратам энергетических ресурсов РЛС и снижают ее пропускную способность по БР

или другим особо опасным целям. На основе теории статистических решений предлагается следующая методика оценки числа ложных тревог  $N_F$  при оперативной классификации за одно прохождение совокупности низкоорбитальных ИСЗ через зону обзора РЛС НГО, позволяющая учитывать фактическое распределение ИСЗ в околосферном пространстве по интегралу энергии  $N_{\text{ИСЗ}}(h)$ :

1. Задается среднеквадратическая ошибка измерения радиальной скорости  $\sigma(R^{(2)}) = \sigma_2$ .

2. Задается распределение ИСЗ в околосферном космическом пространстве по интегралу энергии  $N_{\text{ИСЗ}}(h)$ . В качестве примера на рис. 1 приведено распределение  $N_{\text{ИСЗ}}(h)$  по данным каталога NORAD [14] по состоянию на 04.02.2000 г.

3. Задается зона обзора РЛС НГО и определяется распределение ИСЗ в этой зоне обзора по интегралу энергии  $M_{\text{ИСЗ}}(h)$ .

4. Рассчитываются точностные характеристики оценки интеграла энергии в соответствии с выражениями (7)...(13) и определяются распределения оценки интеграла энергии  $f_{1k}(\hat{h})$  для каждого  $k$ -го подкласса класса 1 (ИСЗ) и  $f_2(\hat{h})$  для класса 2 (БР) в соответствии с рис. 1.

5. Рассчитывается интенсивность ложных тревог при оперативной классификации за один проход совокупности низкоорбитальных ИСЗ через зону обзора РЛС НГО как математическое ожидание числа ложных тревог, обусловленных ИСЗ  $k$ -го класса, в соответствии с выражением

$$N_F = \sum_k N_k^{\text{ИСЗ}} F_k, \quad (14)$$

где  $N_k^{\text{ИСЗ}}$  – число ИСЗ  $k$ -го подкласса в соответствии с гистограммой на рис. 1;  $F_k$  – вероятность ложной тревоги при оперативной классификации для ИСЗ  $k$ -го подкласса:

$$F_k = \int_{-\infty}^{h_{12}} f_{1k}(\hat{h}) d\hat{h}; \quad (15)$$

$h_{12}$  – граница классов 1 (ИСЗ) та 2 (БР), смещенная относительно исходного уровня  $h_{12}^0 = -65 \text{ км}^2/\text{с}^2$  для обеспечения вероятности правильного обнаружения БР, равной  $D_{\text{ОКТЦ}}$ :

$$D_{\text{ОКТЦ}} = \int_{-\infty}^{h_{12}^0} f_2(\hat{h}) d\hat{h}; \quad (16)$$

$$h_{12} = h_{12}^0 + X_{\alpha_{\text{ОКТЦ}}} \sigma(\hat{h}), \quad (17)$$

$X_{\alpha_{\text{ОКТЦ}}}$  – квантиль распределения ошибки  $\hat{h}$  при уровне значимости  $\alpha_{\text{ОКТЦ}} = 1 - D_{\text{ОКТЦ}}$ ;  $\sigma(\hat{h})$  – СКО оценки  $\hat{h}$ .

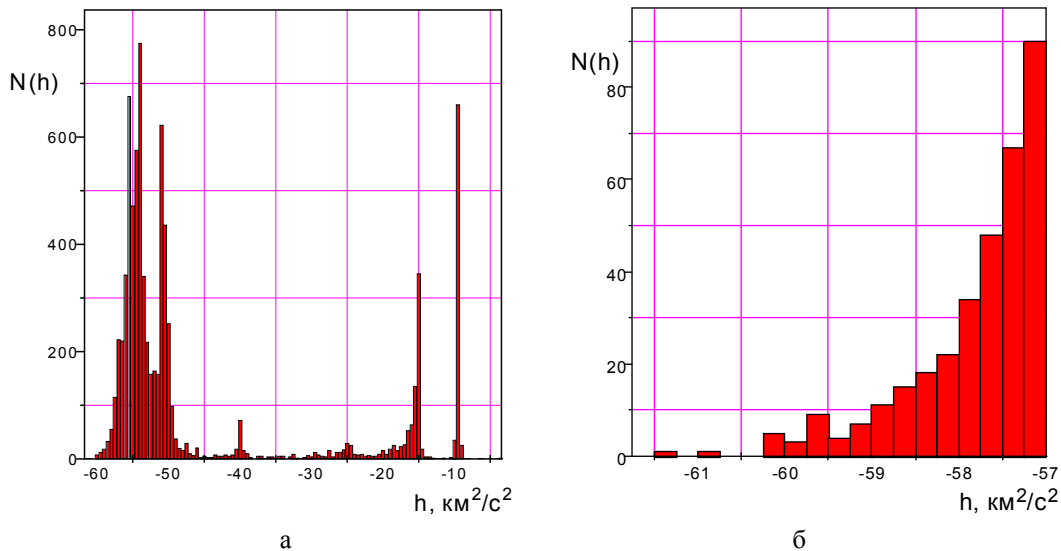


Рис. 1. Распределение ИСЗ в околоземном пространстве по интегралу энергии (данные каталога NORAD по состоянию на 4.02.2000): а – общий вид, б – низкоорбитальные ИСЗ при  $h < -57 \text{ км}^2 / \text{с}^2$

#### 4. Результаты оценки эффективности оперативной классификации

В соответствии с методикой п.3 интенсивность ложных тревог при оперативной классификации типа траектории цели была рассчитана для следующих допущений, выполняющихся в условиях функционирования РЛС НГО:

1. Низкоорбитальные составляющие распределений ИСЗ в околоземном пространстве и в зоне обзора РЛС «Днепр-М» практически совпадают:  $N_{\text{ИСЗ}}(h) = M_{\text{ИСЗ}}(h)$  при  $h \leq h_{\text{НО}}^{\text{ИСЗ}}$ .

2. Распределения оценки  $\hat{h}$  нормальны:  $\hat{h} \sim N(\bar{h}_{1k}, \sigma_{1k}(\hat{h}))$ ,  $\forall k$ , где  $\bar{h}_{1k}$  – среднее значение  $k$ -го подинтервала  $h$  из класса 1 (ИСЗ), а  $\sigma_{1k}(\hat{h})$  задаются выражением (13).

Зависимости интенсивности ложных тревог ОКТЦ от СКО оценки радиального ускорения  $\hat{R}^{(2)}$  для различных значений  $D_{\text{ОКТЦ}}$  представлены на рис. 2.

В табл. 1 и 2 работы [1] приведены значения ошибок измерения радиальных скорости  $R^{(2)}$  и ускорения  $R^{(1)}$  СКОПС соответственно без компенсации и с компенсацией ионосферных ошибок. На основании анализа этих таблиц можно сделать следующие выводы:

1. Точность оценки  $\hat{R}^{(1)}$  на основе фазовых когерентных измерений оказывается весьма высокой при условии компенсации ионосферной ошибки. В условиях функционирования РЛС НГО Украины максимальные абсолютные значения результирующей ошибки  $R^{(1)}$  при локации ИСЗ составляют 3 м/с. Компенсация ионосферной ошибки снижает величину результирующей ошибки примерно на порядок.

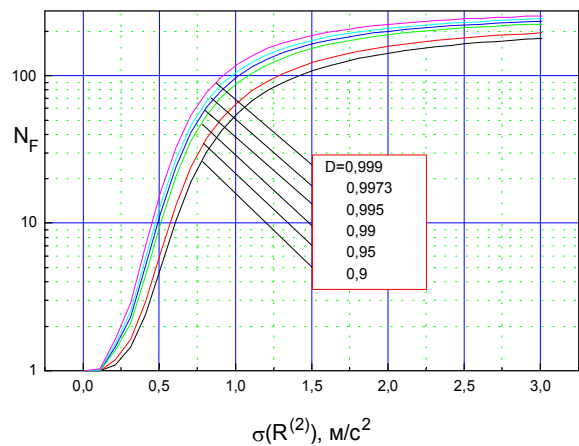


Рис. 2. Интенсивность ложных тревог ОКТЦ

2. Точность оценки  $\hat{R}^{(2)}$  даже при условии высоких кинематических свойств цели ( $|R^{(2)}| \leq 15g$ ), характерных для БКО, подвержена воздействию ионосферы в значительно меньшей степени, чем точность оценки  $\hat{R}^{(1)}$ . Поэтому требование компенсации ионосферной ошибки с точки зрения измерения  $R^{(2)}$  для штатного режима работы РЛС ( $N = 16$ ) не является категорическим.

3. Результирующая СКО оценки  $\hat{R}^{(2)}$  при отсутствии компенсации ионосферных ошибок может достигать 0,75...0,8 м/с<sup>2</sup>.

По зависимостям рис. 2 устанавливаем, что в штатном режиме работы РЛС «Днепр-М» при  $\sigma_2 = \sigma(R^{(2)}) = 0,75...0,8 \text{ м/с}^2$  и  $D_{\text{ОКТЦ}} = 0,95$  интенсивность ложных тревог при ОКТЦ за одно прохождение совокупности низкоорбитальных ИСЗ через зону обзора РЛС НГО составляет  $N_{\text{FO}} = 30...35$ .

Помимо оценки эффективности алгоритма оперативной классификации, приведенные на рис. 2 зависимости могут быть использованы для определения требований к точности измерения радиального ускорения СКОПС при модернизации или разработке новых РЛС НГО в зависимости от допустимого значения интенсивности ложных тревог ОКТЦ  $N_F$ . Так, если допустимая интенсивность ложных тревог  $N_F \leq 3$  при  $D_{\text{ОКТЦ}} \geq 0,995$ , то СКОПС должен обеспечивать СКО оценки радиального ускорения  $\sigma(R^{(2)}) = 0,3\text{м/с}^2$ .

## Выводы

На основе теории статистических решений разработан метод оценки эффективности оперативной классификации типа траекторий цели в РЛС надгоризонтного обнаружения баллистических и космических объектов по данным функционирования аналого-цифровой системы когерентной обработки пачки сигналов. При этом под эффективностью понимается достоверность классификации. Полученные с использованием этого метода результаты могут быть применены для оценки эффективности известных алгоритмов данного типа и предъявления требований к точностным характеристикам системы когерентной обработки в зависимости от допустимых значений такого показателя как число ложных тревог при оперативной классификации типа цели.

## Список литературы

1. Андреев Ф.М. Оценка точности измерения радиальной скорости и ускорения цели по данным системы когерентной обработки РЛС / Ф.М. Андреев, А.В. Статкус // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ДП «ЦНДІ НГУ», 2012. – Вип. 4(24). – С. 17-24.
2. Андреев Ф.М. Анализ возможности использования аналитического приближения для оценки второй и третьей производной дальности / Ф.М. Андреев, А.В. Статкус // Системи обробки інформації. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил, 2013. – Вип. 7 (114). – С. 171-176.

3. Горелик А.Л. Методы распознавания: учеб. пособие / А.Л. Горелик, В.А. Скрипкин. – М.: Высшая школа, 1984. – 208 с.
4. Средства воздушно-космического нападения противника и их характеристика как целей для войск ПВО: учебник для офицеров частей и учебных заведений войск ПВО; под ред. В.К. Стрельникова. – Х.: ВИРТА, 1988. – 372 с.
5. Радиотехнические станции надгоризонтного обнаружения войск ПРН: учебник; под ред. Ф.М. Андреева. – Х.: ВИРТА, 1983. – 444 с.
6. Демидов Б.А. Теория и методы военно-научных исследований вооружения и военной техники / Б.А. Демидов. – Х.: ВИРТА ПВО, 1990. – 558 с.
7. Эффективная площадь отражения сложных радиолокационных объектов. Тематический выпуск // ТИИЭР. – 1988. – Т. 77, № 5.
8. Методы распознавания и их моделирование / Я.Д. Ширман, С.А. Горшков и др. // Зарубежная электроника. – 1996. – №11. – С. 3-82.
9. Распознавание целей при многочастотной локализации / Е.Л. Казаков, В.Б. Бзот, Д.Г. Васильев, А.Е. Казаков, А.И. Коваленко; Под ред. Е.Л. Казакова. МО Украины. – Х.: ОНИЦ ВС, 2007. – 187 с.
10. Распознавание радиолокационных целей по сигнальной информации / Е.Л. Казаков, Д.Г. Васильев, А.Е. Казаков, Д.Н. Рыжов, О.В. Коломойцев; под ред. Е.Л. Казакова. – Х.: КП «Міська друкарня», 2010. – 232 с.
11. Казаков Е.Л. Радиолокационное распознавание космических объектов по поляризационным признакам / Е.Л. Казаков. – Одесса: ОИУМ, 1999. – 230 с.
12. Характеристики рассеяния радиолокационных целей / Е.Л. Казаков, В.Б. Бзот, А.Е. Казаков, В.Л. Павлов, Ю.М. Шишкин; под ред. Е.Л. Казакова. – Х.: АСС СПДФО Сторожук А.В., 2006. – 186 с.
13. Саврасов Ю.С. Алгоритмы и программы в радиолокации / Ю.С. Саврасов. – М.: Радио и связь, 1985. – 216 с.
14. NORAD Two-Line Element Sets Current Data. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.celestrak.com/NORAD/elements/>.

Поступила в редколлегию 31.07.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.М. Порошин, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ОПЕРАТИВНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ ТИПУ ТРАЄКТОРІЇ ЦІЛІ

А.В. Статкус, Ф.М. Андреев

Розроблено метод оцінки ефективності оперативної класифікації типу траєкторії цілі в РЛС надобрійного виявлення за даними функціонування системи когерентної обробки пачки сигналів (СКОПС). Отримані результати можуть бути застосовані як для оцінки ефективності відомих алгоритмів цього типу, так і для висунення вимог до точнісних характеристик СКОПС у залежності від припустимої кількості хибних тривог під час оперативної класифікації важливих цілей.

**Ключові слова:** радіолокаційна станція надобрійного виявлення, траєкторія цілі, оперативна класифікація, аналого-цифрова система когерентної обробки, радіальне прискорення, хибна тривога.

## EFFICIENCY EVALUATION OF TARGET TRAJECTORY ON-LINE CLASSIFICATION

A.V. Statkus, F.M. Andreev

The target trajectory on-line classification (TTOC) efficiency estimation technique for the Ballistic Missile Early Warning Radar (BMEWR) was developed. The technique could be used for both an evaluation of efficiency of such a kind of algorithms and a substantiation of requirements to the BMEWR coherent processing system as a source of measurements in terms of acceptable TTOC false alarm rate.

**Keywords:** early warning radar, target trajectory, on-line classification, coherent processing system, range acceleration, false alarm.