

УДК 621.396.96 : 621.371.3

А.И. КРАВЧЕНКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

## УПРОЩЕННЫЙ ЦИФРОВОЙ МЕТОД И АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ «УСЛОВНОГО» СТАТИСТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ОТРАЖЕНИЯ ПРОТЯЖЕННОГО МОРСКОГО ОБЪЕКТА

В работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований определения координатных «блужданий» по дальности «условного» статистического центра отражения «активного» радиолокационного изображения, сформированного по эвристическому правилу выделения ограниченной группы смежных бинарных групп по дальности и азимуту по данным реальных измерений. Определяемые в соответствии с разработанными цифровыми алгоритмами координаты морского объекта не содержат погрешностей, вносимых взволнованной морской поверхностью.

**Ключевые слова:** объект, алгоритмы, метод, центр, отражение, изображение, точка, траектория, моделирование, активная группа, радиолокатор, азимутальная координата

### Введение

Задача определения координат протяженных объектов, к числу которых относятся авиационно-космические и морские объекты, геометрические размеры которых больше или существенно больше импульсного разрешающего объема радиолокационной станции, рассматриваемая в контексте проблемы оптимизации координатных измерений, является важной и актуальной.

Следует особо отметить, что основной целью координатных измерений авиационно-космических объектов является возможность автоматического управления объектом поскольку его геометрический профиль менее сложен, чем геометрический профиль морского объекта.

Цель координатных измерений протяженных морских объектов (морских судов) состоит в обеспечении информационной поддержки служб регулирования движением судов в прибрежных морских регионах.

В качестве координатной привязки морского судна, используемой в практической навигации широкое применение находит статистический центр отражения (СЦО) радиолокационного изображения объекта [1, 2], радиолокационный центр оконтуренного радиолокационного изображения [3] и другие способы оценки координат протяженного объекта [4].

В настоящей работе предлагается и исследуется простой, по мнению автора, метод и алгоритм определения СЦО, использующий геометрический подход к формированию и обработке бинарного радиолокационного изображения морского судна.

**Цель работы:** на теоретическом уровне статистического подхода решить задачу разработки оптимального и квазиоптимального алгоритмов определения азимутальной и дальномерной координат СЦО; на основе реальных данных проводки морского судна, исследовать погрешности (блуждания) СЦО.

### Основное содержание

Пусть наблюдается радиолокационное изображение протяженного объекта в виде произвольного ограниченного набора «блестящих» точек в прямоугольной системе координат с началом в точке наблюдения объекта.

Для общего случая цифровой сигнальной модели размером  $N \cdot M$  точек, где  $N$  - число точек вдоль координаты дальности, а  $M$  - число точек координаты азимута.

В [1] получены оптимальные алгоритмы определения азимутальной и дальномерной координат статистического центра отражения (СЦО):

$$V_{\text{opt } M} = \frac{\sum_M I_{0M}^0 v(\text{opt } n)_M}{\sum_M I_{0M}^0}; \quad (1)$$

$$D_{\text{opt } N} = \frac{\sum_N I_{0N}^0 D(\text{opt } n)_N}{\sum_N I_{0N}^0}, \quad (2)$$

где  $V_{\text{opt } M}$  – оптимальная оценка азимута по  $M$  блестящим точкам;

$D_{opt N}$  – оптимальная оценка дальности по  $N$  блестящим точкам;

$I_{0M}^0, I_{0N}^0$  – соответствующие интенсивность радиолокационных отражений от дальномерных и азимутальных блестящих точек;

$v(opt n)_M, D(opt n)_N$  – оптимальные оценки азимута и дальности в  $M$  и  $N$  точках соответственно;

$n$  – количество единичных замеров азимута и дальности в любой из  $M$  и  $N$  блестящих точках соответственно.

Введем стандартную интенсивность  $I_0^0$  и нормируем соотношения (1) и (2).

Тогда:

$$V_{opt M} = \frac{\sum_M \alpha_M v(opt n)_M}{\sum_M \alpha_M}; \quad (3)$$

$$D_{opt N} = \frac{\sum_N \beta_N D(opt n)_N}{\sum_N \beta_N}. \quad (4)$$

Коэффициенты  $\alpha_M$  и  $\beta_N$  для любой из  $M, N$  блестящих точек должны удовлетворять, по крайней мере двум основным условиям:

$$\alpha_M \geq 0, \beta_N \geq 0 \text{ и } \alpha_M < \infty, \beta_N < \infty.$$

При этом плотность распределения  $P(\alpha)$ ,  $P(\beta)$  должна соответствовать релейской.

При движении протяженного объекта по произвольной плоской траектории, определяемой геометрической формой морского канала или фарватера, когда меняется азимутальное положение и дальность между протяженным объектом и радиолокационной станцией число блестящих точек  $M, N$  изменяется в каждом измерительном контакте, который обычно находится в пределах нескольких секунд.

Если предположить, что наиболее точное координатное положение СЦО определяется максимально возможным, а в пределе бесконечном количестве «блестящих» точек, то эффект блуждания будет определяться отклонением, т.е. ошибкой смещения СЦО при конкретно-наблюдаемом количестве блестящих точек в единичном измерительном контакте к максимальному количеству точек.

Выполненные в [3] исследования на уровне компьютерного моделирования показали, что в зависимости от ракурса движения протяженного объекта размерами 100 м по длине и 30 м по ширине величины максимального отклонения относительно

центра СЦО могут достигать 30 %, что составляет по длине судна  $\Delta g \approx 30$  м и ширине  $\partial B \approx 10$  м, что не противоречит теоретически-ожидаемым, полученным в [2].

Поскольку статистика флуктуаций интенсивностей (плотность распределения  $W(I_{0M,N}^0)$ ) описывается квадратом распределения Релея [4], то и статистика флуктуаций коэффициентов  $\alpha_M$  и  $\beta_N$  описывается тем же законом.

Проведенный анализ на теоретическом уровне, с учетом выполнения статистических закономерностей, описывающих флуктуационные характеристики блестящих точек при их неограниченном количестве естественно даст лучшие результаты по минимизации блуждания СЦО, используемого в качестве координатной привязки к корпусу морского судна, однако на практике такая ситуация не имеет места.

Одним из возможных вариантов достаточно просто реализуемых может быть следующий.

Поскольку задача определения неизвестных весовых коэффициентов может быть решена на основе специальной (эвристической) методики обработки реальных радиолокационных изображений, получаемых для определенного класса судов, подбора участка траектории, выбора благоприятных метеословий и состояния моря, то она сама представляет отдельное, достаточно-сложное исследование.

Т.о. не прибегая к решению задачи определения неизвестных коэффициентов  $\alpha_M, \beta_N$  в выражениях (3) и (4), следует положить их равными 1, а само радиолокационное изображение формировать путем выбора «активных» групп последовательно обнаруженных бинарных сигналов по азимуту и дальности.

Под активной группой будем считать максимально-обнаруживаемое количество «1» по азимуту и дальности, задаваемое заранее, исходя из априорных знаний о геометрических характеристиках морского судна. При этом минимальное число «1» по азимутальному и дальномерному направлениям  $K_{min} \leq 2$ . Тогда  $K_{max} \geq K_{min} + 1$  или 2 и т.д.

При заданных уровнях амплитудного квантования просматриваются все дальномерные ячейки радиолокационного изображения на выходе аналого-цифрового преобразователя (АЦП), затем на следующем и т.д. до тех пор, пока обнаруженная сигнальная группа  $K_i^1 = K_{max}$ .

Такая же процедура осуществляется по азимутальным ячейкам квантования  $K_i^a = K_{max}^a$ . Остальные «1» в обнаруженных активных группах не учитываются, т.е. полученное таким образом синтезированное радиолокационное изображение будет со-

держат  $A_K$  активных групп по азимуту и  $D_K$  активных групп по дальности. Максимальное значение, достигаемое при формировании бинарного радиолокационного изображения количество групп по азимуту и дальности может составить

$$A_{K \max} = \frac{B}{\Delta\varphi}, \quad D_{K \max} = \frac{L}{\Delta R}, \quad (5)$$

где  $B$  – ширина,  $L$  – длина протяженного объекта;  $\Delta\varphi$  – разрешающая способность радиолокатора по азимуту (дискрета азимута);

$\Delta R$  – разрешающая способность радиолокатора по дальности (дискрета азимута).

Определение координат «условного» статистического центра протяженного объекта (морского судна) осуществляется очень просто.

По синтезированному радиолокационному изображению определяем ближайшую к радиолокатору ячейку с координатами  $\varphi_{i \min}$ ,  $R_{i \min}$  путем перебора всех  $\varphi_i$ ,  $R_i$ , полученных на этапе синтеза.

Следующим этапом координатных измерений будет формирование искомым координат

$$\varphi_{L'/2} = \frac{\varphi_{K_{\max}^a} - \varphi_{i \min}}{2}, \quad (6)$$

$$R_{L'/2} = \frac{R_{K_{\max}^i} - R_{i \min}}{2}, \quad (7)$$

где  $\varphi_{K_{\max}^a}$  – верхнее значение азимутальной активной группы;

$R_{K_{\max}^i}$  – верхнее значение дальномерной активной группы.

Полученная т.о. оценка координат условного статистического центра отражения находится на линии «борта» морского судна  $L'$ .

При необходимости возможен пересчет выражений (6) и (7) на линию, проходящую через середину ширины в направлении длины судна  $L$ :

$$\varphi_{\tilde{A}} = \varphi_{L'/2} - \left(\frac{B}{2} \cos \theta\right) \cdot \left(\frac{\varphi_{L'/2}}{R_{L'/2}}\right), \quad (8)$$

$$R_{\Gamma} = R_{L'/2} + \frac{B}{2} \sin \theta, \quad (9)$$

$$\theta = \arccos \frac{R_{K_{\max}^i} - R_{i \min}}{\Delta R \sqrt{\left(\frac{R_{K_{\max}^i} - R_{i \min}}{\Delta R}\right)^2 + \left(\frac{\varphi_{K_{\max}^a} - \varphi_{i \min}}{\Delta\varphi}\right)^2}}. \quad (10)$$

Дадим некоторые дополнительные пояснения относительно выбора точки с координатами  $\varphi_{i \min}$ ,  $R_{i \min}$ .

Если судно движется в направлении вращения антенны радиолокатора, то искомая точка имеет координату  $\varphi_{\min}$ . Что же касается  $R_{i \min}$ , то при  $R \gg L$  точек  $R_{\min}$  будет несколько, т.е. по всей длине объекта будет выполняться примерное равенство  $R \approx R_{i \min}$ .

Если же судно движется в направлении, противоположном направлению движения радиолокатора, то искомая точка соответствует координатам  $R_{\min}$ ,  $\varphi_{\max}$  (ближайшая к радиолокатору). И в этом случае точек  $R_{\min}$  будет несколько.

Кроме того, истинная величина  $\left(\varphi_{K_{\max}^a} - \varphi_{i \min}\right)_{\text{ист}}$ , или  $\left(\varphi_{\max} - \varphi_{K_{\max}^a}\right)_{\text{ист}}$  может отличаться от оцениваемой в процессе радиолокационных измерений.

При больших  $R \gg L$

$$\left(\varphi_{K_{\max}^a} - \varphi_{\min}\right)_{\text{ист}} = \frac{L}{R} \cdot 57,4^\circ. \quad (11)$$

Если наблюдаемая величина

$$\left(\varphi_{K_{\max}^a} - \varphi_{\min}\right) < \left(\varphi_{K_{\max}^a} - \varphi_{\min}\right)_{\text{ист}}, \quad (12)$$

то в знаменателе выражения (10) вторым сомножителем следует поставить выражение

$$\sqrt{\left(\frac{\left(\varphi_{K_{\max}^a} - \varphi_{i \min}\right)_{\text{ист}}}{\Delta\varphi}\right)^2 + \left(\frac{R_{K_{\max}^i} - R_{i \min}}{\Delta R}\right)^2}. \quad (13)$$

### Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальная апробация разработанной методики и алгоритмов оценки координат «условного» статистического центра отражений осуществлялась по натурным данным проводки двух крупногабаритных судов береговым радиолокатором, размещенным в акватории морского порта г. Николаева. Обработывались бинарные двумерные радиолокационные изображения судов с геометрическими размерами  $L_1 = 106$  м,  $B_1 = 17$  м и  $L_2 = 177$  м,  $B_2 = 23$  м. Ширина канала проводки равнялась 160 м. Радиолокационная информация обновлялась каждые 4 с.

Косвенным эквивалентом блуждания условного СЦО была взята величина смещения продольной

оси судна  $\Delta F_i$  относительно центральной линии морского канала, которая рассчитывалась на формуле

$$\Delta F_i = (R_{0i} - R_i) \cdot \sin \varphi_i^0,$$

где  $R_{0i}$  – расчетная дальность между координатами антенный радиолокатора и точкой пересечения линии визирования с центральной линией морского канала;

$i$  – номер радиолокационного изображения;

$\varphi_i^0$  – азимутальное направление линии визирования на текущий кадр изображения, регистрируемого с временным шагом  $T_0 \approx 1$  мин. с учетом коэффициента прореживания кадров.

Общее число «сырых» кадров по 1-му судну составило 508, а по 2-му - 462.

Расчетные значения математического ожидания и среднеквадратического отклонения по прореженным радиолокационным изображениям составили:

$$\langle \Delta F_i \rangle_1 = m_1 = \frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} \Delta F_i = 16,7 \text{ м}, \quad (14)$$

$$\langle \Delta F_i \rangle_2 = m_2 = \frac{1}{28} \sum_{i=1}^{28} \Delta F_i = 15,2 \text{ м}, \quad (15)$$

$$\text{СКО}_1 = 7,05 \text{ м}, \quad \text{СКО}_2 = 6,1 \text{ м}. \quad (16)$$

На рис. 1 приведены графические зависимости блужданий условного СЦО для 1 и 2 судов при  $R_1 = 8 \div 3$  км.

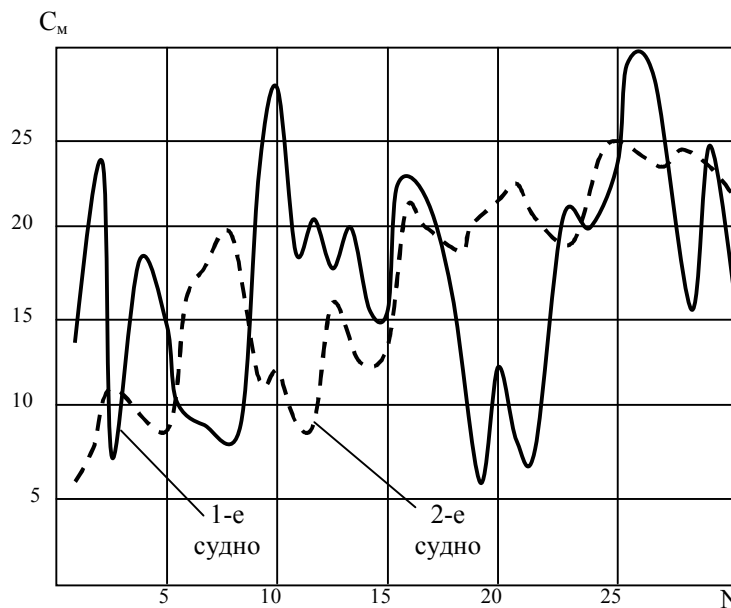


Рис. 1. Зависимости отклонений СЦО

## Выводы

По результатам экспериментальных исследований разработанного метода и цифровых алгоритмов определения координат условного СЦО, выполненных по данным натурных измерений можно констатировать:

- разработан простой метод вычисления координат условного СЦО, реализуемый в виде цифровых алгоритмов обработки реальных радиолокационных изображений протяженного объекта;

- определяемые в соответствии с разработанными цифровыми алгоритмами координаты морского объекта не содержат погрешностей, вносимых в радиолокационное изображение взволнованной морской поверхностью;

- разработанный метод и его практическая реализация могут обеспечить эффективную информа-

ционную поддержку служб регулирования движением судопотока и отдельных судов в стесненных условиях мореплавания.

## Литература

1. Печенин В.В. Оптимальные цифровые алгоритмы определения координат статистического центра отражения протяженного объекта / В.В. Печенин, Е.П. Мсаллам // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – К.: КПИ, 2006. – Т. 49, № 11. – С. 64-72.
2. Островитянов Р.В. Статистическая теория радиолокации протяженных целей / Р.В. Островитянов, Ф.А. Басалов. – М.: Радио и связь, 1982. – 231 с.
3. Печенин В.В. Моделирование статистических характеристик координатных блужданий статистического центра отражений / В.В. Пече-

нин, Е.П. Мсаллам // Міжнар. науково-тех. конф. «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні (ІКТМ-2006)». – Х.: Нац. аерокосм. ун-т "ХАІ", 2006. – С. 305.

4. Кулемин Г.П. Статистические характеристики радиолокационных целей / Г.П. Кулемин, В.Б. Разказовский. Препринт 92-2. – Х.: ИРЭ НАНУ, 1992. – 32 с.

Поступила в редакцию 29.03.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., заведующий кафедры «Проектирование радиоэлектронных систем летательных аппаратов» И.В. Барышев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

### СПРОЩЕНИЙ ЦИФРОВИЙ МЕТОД І АЛГОРИТМИ ВИЗНАЧЕННЯ "УМОВНОГО" СТАТИСТИЧНОГО ЦЕНТРУ ВІДДЗЕРКАЛЕННЯ ПРОТЯЖНОГО МОРСЬКОГО ОБ'ЄКТУ

*О.І. Кравченко*

У роботі приведені результати теоретичних і експериментальних досліджень визначення координатних "блукань" по дальності "умовного" статистичного центру віддзеркалення "активного" зображення радіолокації, сформованого за евристичним правилом виділення обмеженої групи суміжних бінарних груп по дальності і азимуту за даними реальних вимірів. Визначувані відповідно до розроблених цифрових алгоритмів координати морського об'єкту не містять погрешностей що вносяться схвильованою морською поверхнею.

**Ключові слова:** об'єкт, алгоритми, метод, центр, віддзеркалення, зображення, точка, траєкторія, моделювання, активна група, радіолокатор, азимутна координата.

### SIMPLIFIED DIGITAL METHOD AND ALGORITHMS OF DETERMINATION OF "CONDITIONAL" STATISTICAL CENTER OF REFLECTION OF EXTENSIVE MARINE OBJECT

*A.I. Kravchenko*

Results over of theoretical and experimental researches of determination of the co-ordinate "wandering" are in-process brought on distance of "conditional" statistical center of reflection of "active" radio-location image, formed by heuristic rule of selection of the limited group of contiguous binary groups on distance and azimuth from data of the real measuring. The co-ordinates of marine object determined in accordance with the worked out digital algorithms do not contain errors, brought in by the disturbed marine surface.

**Key words:** object, algorithms, method, center, reflection, image, point, trajectory, design, active group, radio-locator, azimuthal coordinate.

**Кравченко Александр Иванович** – канд. техн. наук, докторант кафедры «Проектирование радиоэлектронных систем летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.