

УДК 621.396.96:621.371.3

Е.П. Мсаллам, А.И. Кравченко

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КООРДИНАТНЫХ «БЛУЖДАНИЙ» СТАТИСТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ОТРАЖЕНИЙ ПРОТЯЖЕННОГО ОБЪЕКТА

На основе использования многоточечной статистической модели радиолокационных отражений от протяженного объекта типа морского судна выполнено имитационное моделирование статистических характеристик «блуждания» СЦО. Представлены результаты моделирования при расположении светящихся точек на палубной части морского судна.

**Ключевые слова:** статистический центр отражения, морское судно, моделирование.

### Введение

В настоящее время большое внимание уделяется решению задачи контроля и управления движения судов с требуемым уровнем безопасности и точности мореплавания в сложных метеоусловиях при ограниченных возможностях мореплавания в прибрежных морских зонах, заходах на разгрузку и погрузку в морские и речные порты, а также большой плотности судопотока.

Основным информационным источником сведений о координатах судов при их движении по морским каналам являются береговые радиолокационные станции.

Фундаментальным ограничением достижения высокой точности координатной привязки к геометрическому центру судна является сложность его пространственной конфигурации, наличие пассивных помех и ряд других причин.

Существенное влияние на точность координатной привязки оказывают угловые, дальномерные и амплитудные шумы, создаваемые различными элементами конструкции объекта. Радиолокационные отражения, создаваемые этими элементами, многоточечное рассеянное радиолокационное поле – поле «светящихся» точек. При этом возникают флуктуации суммарного отраженного сигнала по амплитуде, времени запаздывания и угловому (азимутальному) направлению. Это в свою очередь приводит к тому, что вместо действительного центра суммарных отражений мы получим кажущийся центр, называемый статистическим центром отражения (СЦО). В ряде случаев возможна координатная привязка протяженного объекта к СЦО. Однако принятие решения об использовании координат СЦО связано с реальной геометрической конфигурацией силуэтной формы конкретного морского судна в азимутальном и дальномерном направлениях для случая неучета бортовой части.

Теоретические аспекты статистического анализа флуктуаций СЦО по азимутальной и дальномерной координатам подробно рассмотрены в [1]. Показано, что наличие углового и дальномерного шумов

протяженного объекта приводит к «блужданию» СЦО по соответствующим координатам, а, следовательно, и к ошибкам координатной привязки.

**Цель моделирования** состояла в получении и оценке количественных значений статистических характеристик блужданий СЦО по случайному набору «светящихся» точек, расположенных на известном геометрическом поле размеров конкретного объекта – морского судна. Такое моделирование может найти практическое применение на этапе разработки стратегии выбора алгоритма оценки координатной привязки протяженного объекта, в том числе и к СЦО.

### Описание формализованной структуры процесса моделирования

1. Задаем геометрические размеры палубной части гипотетического морского судна (длину  $L$  и ширину  $B$ ).

2. Назначаем общее количество «светящихся» точек из геометрического расстояния между ними, и намечаем области их компактного размещения на геометрическом поле  $L \times B$  с заданием координат  $x_1$ , каждой точки.

3. Задаем направления движения морского судна относительно прямоугольной плоской системы координат  $x, y$  с центром в точке наблюдения рассеянного поля.

4. Выбираем необходимые для конкретного направления движения судна параметры движения (дальности, азимуты), а также ширину диаграммы направленности в азимутальной плоскости наблюдения.

5. По простым алгоритмам (типа оценки среднего) вычисляем координаты СЦО ( $x_{ц}$ ,  $y_{ц}$ ) для конечного набора положений судна (кадров) в заданном направлении его движения и рассчитываем абсолютные геометрические величины отклонения СЦО относительно геометрического центра морского судна.

6. Осуществляем центрированные исходных координат «светящихся» точек (пункт 2).

7. Формируем случайные выборки амплитуд  $E_i$  и фаз  $\varphi_i$ , распределенных по релеевскому и равномерному законам для каждого положения судна (кадра).

8. В каждом кадре рассчитываем относительные ошибки отклонения СЦО по азимуту и дальности с пересчетом их в абсолютные. Выполняем статистическую обработку азимутальных и дальномерных ошибок.

9. Осуществляем построение соответствующих таблиц и графиков, отображающих результаты моделирования.

Даем необходимые пояснения к таблицам и графикам.

В процессе моделирования использовались следующие расчетные формулы и соотношения.

1. Оценка координат СЦО осуществлялась в соответствии с простыми выражениями

$$D_{ц}^k = \frac{1}{N} \sum_i D_i^k; \quad A_{ц}^k = \frac{1}{N} \sum_i A_i^k, \quad (1)$$

где  $D_i^k$  – геометрическое расстояние между началом координат ( $x = 0, y = 0$ ) и  $i$ -й светящейся точкой в  $k$ -м кадре

$$D_i^k = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}; \quad (2)$$

$A_i$  – азимут направления  $D_i$  относительно опорного направления (координатная линия  $x$  или  $y$ ).

При несмещенном движении судна, когда продольная ось совмещена с координатной осью, например осью  $Y$

$$A_i^k = \arccos(y_i^k / D_i^k). \quad (3)$$

При смещенном движении судна, когда продольная ось и соответствующая координатная линия ( $x$  или  $y$ ) параллельны, но несомещены, т.е. расположены на фиксированном расстоянии

$$A_i^k = \arccos(l / D_i^k), \quad (4)$$

где  $l$  – геометрическая длина смещения продольной оси судна относительно координатной линии  $x$  или  $y$ .

Для оценки азимутального положения текущего кадра светящихся точек на судне при смещенном движении, необходимо вычислять (задавать) опорное направление отсчета азимута  $A_i$ . При моделировании в качестве опорного направления принимались линия  $D_{ГЦ}$  (ГЦ – геометрический центр судна)

$$A_{ок} = \arctg(L_k / l), \quad (5)$$

где  $L_k$  – геометрическое расстояние между точкой ГЦ и точкой пересечения соответствующей координатной линии ( $x$  или  $y$ ) и линией  $L_k$ .

Тогда расчет  $A_{ц}^k$  осуществлялся в соответствии с выражением  $A_{ц}^k = \frac{1}{N} \sum_i (A_{ок} - A_i)$  при заданном номере кадра  $k$ .

Геометрическое смещение СЦО относительно ГЦ вычисляем по формуле

$$c = \sqrt{D_{ц}^2 + (1 + L/2)^2} - 2D_{ц} (1 + L/2) \times \cos A_{ц}^k, \quad (6)$$

где  $L$  – длина судна.

2. Оценка флуктуационных характеристик осуществлялась по центрированному набору координат светящихся точек в каждом кадре фиксированного положения судна.

Относительные ошибки азимута и дальность рассчитывались по формулам

$$v_A = \frac{\Delta B}{B/2}, \quad v_r = \frac{\Delta r}{L/2}, \quad (7)$$

где  $\Delta B$  и  $\Delta r$  – абсолютные смещения СЦО по азимуту и дальности в центрированной системе координат.

Обобщенная относительная ошибка азимута и дальности вычислялась в соответствии с формулой

$$v_{A,r} = \frac{U_H U_B + V_H V_B}{U_H^2 + V_H^2}, \quad (8)$$

где  $U_H, U_B, V_H, V_B$  вычислялись по формулам

$$U_H = \sum_i \sum_k E_{i,k} \cos \psi_{i,k}, \quad V_H = \sum_i \sum_k E_{i,k} \sin \psi_{i,k}, \quad (9)$$

$$U_B = \sum_i \sum_k \xi_i E_{i,k} \cos \psi_{i,k}, \quad V_B = \sum_i \sum_k \xi_i E_{i,k} \sin \psi_{i,k}, \quad (10)$$

для азимутальной ошибки  $\xi_i = y_i / B$ , для дальномерной ошибки  $\xi_i = z_k / L$ , математическое ожидание  $\langle v \rangle$ , дисперсия и СКО вычислялись по стандартным формулам статистических вычислений.

Рассчитывалось отклонение  $\Delta v_o$  по формуле

$$\Delta v_o = v - \langle v \rangle = v_{A,r} - \frac{\langle U_H U_B + V_H V_B \rangle}{\langle U_H^2 + V_H^2 \rangle}. \quad (11)$$

Расчет флуктуационных характеристик осуществлялся в каждом кадре фиксированного положения суда при его движении (несмещенном и смещенном).

Генерация случайных реализаций (выборок)  $E_{i,k}$ ;  $\psi_{i,k}$  осуществлялась по стандартным компьютерным программам для релеевского закона распределения амплитуд  $E_{i,k}$  и равномерного распределения фаз.

### Результаты моделирования при несмещенном движении морского судна

Исходные данные: геометрические размеры судна  $L \times B = 100 \times 20$  м; максимальное число светящихся точек  $N = 75$ ; расстояние между светящимися точками по координатам  $x$  и  $y$   $\Delta = 5$  м; область компактного размещения светящихся точек сдвинута к носовой части судна; ширина диаграммы направленности в азимутальной плоскости  $\theta_r \approx 1^\circ$ ;

максимальная дальность  $Y_{\max} = 1200$  м; число фиксированных положений судна  $k = 10$ ; величина смещения кадра  $\Delta_k = 100$  м.

Визуальное расположение светящихся точек, соответствующее первому кадру  $N = 75$ ,  $Y_{\max} = 1200$  м показано на рис. 1.

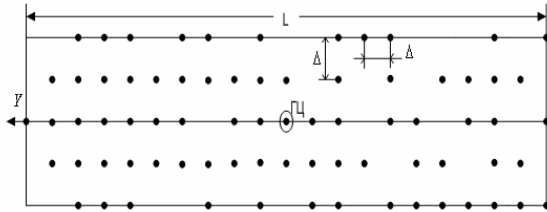


Рис. 1. Расположение светящихся точек 1-й кадр  $Y_{\max} = 1200$  м,  $N = 75$ ,  $\Delta = 5$  м,  $L \times B = 100 \times 20$  м

На рис. 2 приведена зависимость  $C_M(N)$ , наглядно демонстрирующая эффект блуждания СЦО относительно геометрического центра судна

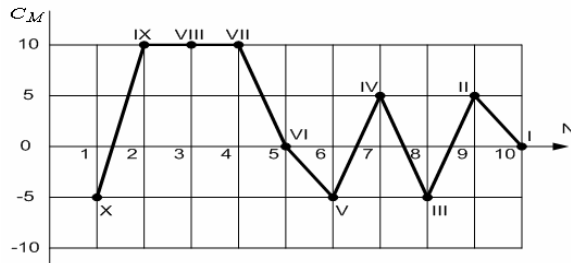


Рис. 2. График «блуждания» СЦО

Для оценки ошибок азимута и дальности производится центрирование исходной координатной системы  $x, y$  в систему  $u, z$  с началом координат в точке СЦО. Данная операция осуществляется путем вычитания  $x_{Ц}, y_{Ц}$  из исходной координатной сетки светящихся точек в каждом кадре.

Переобозначения координат соответствуют  $x \rightarrow u, y \rightarrow z$  для выбранного несмещенного направления движения судна.

Генерация соответствующих наборов случайных амплитуд и фаз осуществлялась по стандартным компьютерным программам.

На рис. 3 представлены в графическом виде зависимости, которые отображают статистические флуктуации СЦО по дальности  $\delta r$  и азимуту  $\Delta B$ , обусловленные дальномерными и угловыми шумами выбранного протяженного объекта.

Проанализируем полученные результаты. Как видно из графика блуждания СЦО, представленного на рис. 3, при достаточно равномерном размещении светящихся точек по геометрическому полю судна (визуально), наибольший вклад вносят блуждания по дальномерной координате (положения 2÷4). С уменьшением дальности до точки наблюдения блуждания оказываются знакопеременными (положения 5÷10), что связано с уменьшающимся количеством светящихся точек, попадающих в область наблюдения.

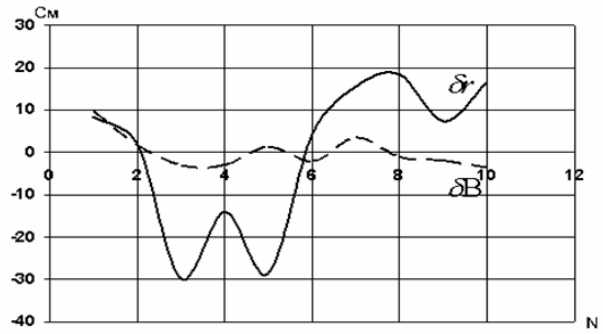


Рис. 3. Зависимость отклонений  $\delta r$  и  $\Delta B$

При центрировании координат относительно СЦО, поведение статистических ошибок, вызванных угловыми и дальномерными шумами достаточно сложно и мало зависит от количества светящихся точек, попадающих в область наблюдения. Это означает лишь то, что минимальное количество точек  $N = 17$  соответствует достаточной статистике. Например, средние ошибки  $\langle \Delta r \rangle$  и  $\langle \Delta B \rangle$  находятся в пределах расстояния между светящимися точками  $\Delta = 5$  м, т.е. находятся в пределах дискретности размещения светящихся точек и математическое ожидание  $\langle \Delta r \rangle$  и  $\langle \Delta B \rangle$  может условно считаться нулевым с точностью до дискреты  $\Delta$  (расстояние между точками).

Величина максимального отклонения (выброс) ошибка дальности  $\delta_{r_m} \approx 30$  м, составляет 30% от общей длины судна 100 м. Этот результат не противоречит теоретически ожидаемому для равномерного распределения светящихся точек.

### Результаты моделирования при смещенном движении морского судна

Исходные данные: геометрические размеры судна  $L \times B = 100 \times 20$  м; максимальное число светящихся точек  $N = 75$ ; расстояние между светящимися точками по координатам  $x$  и  $y$   $\Delta = 5$  м; область компактного размещения светящихся точек – середина судна; ширина диаграммы направленности в азимутальной плоскости  $\theta_r \approx 1^\circ$ ; величина смещения продольной оси судна относительно координаты  $x$   $Y_{см} = 1500$  м; число фиксированных положений судна  $k = 9$ ; величина смещения кадра  $\Delta_k = 600$  м.

Визуальное расположение светящихся точек, соответствующее всей освещенной плоскости судна  $N = 75$ ,  $Y_{\max} = 1510$  м показано на рис. 4.

На рис. 5 приведена зависимость  $C_M(N)$ , наглядно демонстрирующая эффект блуждания СЦО относительно геометрического центра судна.

На рис. 6 отображены в графическом виде зависимости  $\delta r, \delta B$ .

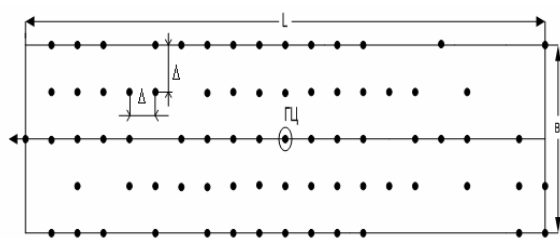


Рис. 4. Расположение светящихся точек, 5-й, 9-й кадры.  $Y_0 = 1510$  м,  $N = 75$ ,  $L \times B = 100 \times 20$  м,  $I_{\max} = \pm 2400$  м

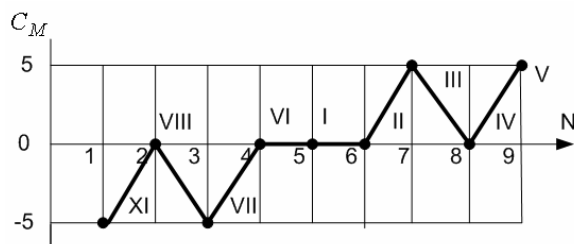


Рис. 5. График «блуждания» СЦО

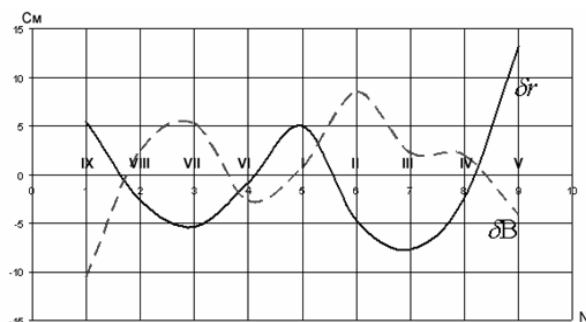


Рис. 6. Зависимости отклонений  $\Delta r$ ,  $\Delta B$

Проанализируем полученные результаты в сравнении с результатами несмещенного движения. Наблюдаемое поле светящихся точек рис. 4 компактно сосредоточено в центральной части геометрического поля судна с примерно одинаковым случайным разбросом светящихся точек по носовой и кормовой частям судна. При смещенном движении судна параллельно оси X график блуждания СЦО показывает, что величина смещения СЦО относительно геометрического центра (ГЦ) по абсолютному значению одинакова и симметрична относительно

оси Y (положение 1). Зависимости отклонений  $\Delta r_M$  и  $\Delta B_M$  носят плавный колебательный характер. При этом максимальные отклонения не превышают 10 м, а математические ожидания  $\langle \Delta r \rangle$  и  $\langle \Delta B \rangle$  в пределах  $\Delta = 5$  м можно считать нулевыми.

### Выводы

Полученные в процессе моделирования результаты дают основание сделать следующие выводы (в рамках исходных данных, выбранных нами для несмещенного и смещенного направления движения):

- при несмещенном движении судна и равномерно смещенном расположении светящихся точек по геометрическому полю  $L \times B$  морского судна наблюдаются величины дальномерных блужданий СЦО, достигающие  $25 \div 30\%$  от общей длины судна, при этом блуждания по азимуту тоже лежат в пределах 50% от ширины судна;

- при смещенном движении судна и сконцентрированном относительно геометрического центра расположении «светящихся» точек наблюдаются сравнительно плавные знакопеременные блуждания СЦО, причем азимутальные блуждания находятся в пределах 50 от ширины судна, а дальномерные в пределах 20 от общей длины судна.

### Список литературы

1. Островитянов Р.В. Статистическая теория радиолокации протяженных целей / Р.В. Островитянов, Ф.А. Басалов. – М.: Радио и связь, 1982. – 231 с.
2. Применение цифровой обработки сигналов / Под ред. Опенгейна. – М.: Мир, 1980. – 552 с.
3. Delano R.H. A Theory of Target Glint or Angular Scintillation in Radar Tracking / R.H. Delano // Proc. IRE, 1953. – Vol.41, № 3. – P. 61-67.
4. Кулемин Г.П. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами / Г.П. Кулемин, В.Б. Разказовский. – К.: Наук. Думка, 1987. – 232 с.

Поступила в редколлегию 15.04.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.К. Волосюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### МОДЕЛЮВАННЯ СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КООРДИНАТНИХ «БЛУКАНЬ» СТАТИСТИЧНОГО ЦЕНТРУ ВІДОБРАЖЕНЬ ПРОТЯЖНОГО ОБ'ЄКТУ

К.П. Мсаллам, О.І. Кравченко

На основі використання багатоточкової статистичної моделі радіолокаційних відображень від протяжного об'єкту типу морського судна виконано імітаційне моделювання статистичних характеристик «блукань» СЦВ. Представлені результати моделювання при розміщені точок на палубній частині морського судна.

**Ключові слова:** статистичний центр віддзеркалення, морське судно, моделювання.

### DESIGN OF STATISTICAL DESCRIPTIONS OF CO-ORDINATE «ROAMING» OF STATISTICAL CENTER OF REFLECTIONS OF EXTENSIVE OBJECT

Ye.P. Msallam, A.I. Kravchenko

On the basis of the use of statistical model of suspension points of reflections of radio-locations from the extensive object of type of marine ship the imitation design of statistical descriptions of «roaming» of statistical center of reflection is executed. The results of design at the location of luminous points are presented on deck part of marine ship.

**Keywords:** statistical center of reflection, marine ship, design.