

УДК 681.32 (075); 621.396.96

В.В. Печенин, А.И. Кравченко, Е.П. Мсаллам

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

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВЕСОВОЙ КОРРЕКЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРОТЯЖЕННОГО МОРСКОГО ОБЪЕКТА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КООРДИНАТНОЙ ТОЧКИ ПРИВЯЗКИ

Разработан и исследован цифровой статистический метод оценивания координат статистического центра отражения протяженного морского объекта, основанный на весовой коррекции элементов бинарного изображения. Оценена эффективность метода весовой коррекции в сравнении с упрощенным методом нормализации радиолокационного изображения объекта. Полученные результаты могут быть использованы при разработке автоматизированных радиотехнических систем различного назначения.

Ключевые слова: радиолокация, координаты, протяженный объект, коэффициент, привязка, дискретизация, элемент.

Введение

Необходимость весовой коррекции элементов радиолокационного изображения (РЛИ) для определения координат точки привязки к корпусу морского объекта (судна), именуемой статистическим центром отражения (СЦО) [1] связана с особенностями формирования индикатрисы обратного рассеяния зондирующих сигналов протяженным объектом радиолокационного наблюдения в азимутальной плоскости [2].

Многолепестковость индикатрисы обратного рассеяния и сильные общие флуктуации уровней рассеянных сигналов приводят к флуктуациям интенсивности сигнала, рассеиваемого объектом в направлении на радиолокатор, а также увеличению его длительности по сравнению с длительностью зондирующего сигнала.

В таких условиях необходимо при обработке РЛИ протяженных морских объектов ввести определенные, физически мотивированные ограничения, с целью определения СЦО по информационно достаточному количеству элементов РЛИ в виде их весовой коррекции, определяющей вклад каждого из ограниченного количества элементов в координатные «блуждания» СЦО [3].

Физическими предпосылками ограничений количества бинарных элементов РЛС является, во-первых, снижение информационной емкости данных о координатной привязке по мере их удаления от «начала» изображения, и во-вторых, разумно предположить, что информационный вес каждого элемента РЛИ по мере возрастания его номера будет уменьшаться за счет формирования «точек отражения» не только собственными элементами конструкции морского судна, но и взаимными отражениями между элементами самой конструкции.

Следовательно, более удаленные от начала изображения бинарные элементы РЛИ по дальности,

даже в ограниченном наборе, являются менее информативными в отношении конструктивных особенностей этого протяженного объекта (морского судна).

Постановка задачи исследования

По данным экспериментальной оценки весовых корректирующих коэффициентов ограниченного РЛИ реальных морских судов, заимствованных из [4], и синтезированным цифровым алгоритмом оценки координат СЦО протяженного морского объекта исследовать эффективность метода весовой коррекции на реальных данных бинарных радиолокационных изображений морских судов.

Основные результаты

Пусть имеется некорректированное ("сырое") бинарное РЛИ судна в координатах азимутальности. Выберем в нем произвольную k -ю группу, количественно состоящую из N_{jk} смежных элементов дискретизации (каналов) дальности, содержащих последовательность «1». Обозначим через j_{k1} номер ближайшего к объекту канала дальности в данной k -й группе, помня, что выше этот канал дальности РЛИ уже был определен как наиболее информативный.

Тогда предлагаемая здесь весовая корректировка означает замену номера j_{k1} на некий коэффициент $J_k(N_{jk})$, т.е. на коэффициент, значение которого изменяется в зависимости от количества «1» в k -й группе каналов дальности. Значения корректирующих коэффициентов $J_k(N_{jk})$ определяются с учетом одновременно принимаемого положения о том, что на протяженном объекте наблюдения точкой привязки для оцениваемого по его радиолокационному изображению СЦО будет ближайший к БРЛС элемент конструкции объекта.

Конкретные значения корректирующих коэффициентов заимствованы из [4].

Приведем здесь конечные результаты экспериментальных оценок $J_k(N_{jk})$, полученных для условий, что размер элемента дискретизации (канала) дальности Δj равен значению ΔD разрешающей способности БРЛС по дальности:

$$J_k = \begin{cases} j_{k1} + 0,500 & \text{і } \delta \in N_{jk} = 1; \\ j_{k1} + 1,150 & \text{і } \delta \in N_{jk} = 2; \\ j_{k1} + 1,535 & \text{і } \delta \in N_{jk} = 3; \\ j_{k1} + 2,000 & \text{і } \delta \in N_{jk} = 4; \\ j_{k1} + 2,225 & \text{і } \delta \in N_{jk} = 5; \\ j_{k1} + 2,350 & \text{і } \delta \in N_{jk} \geq 6, \end{cases} \quad (1)$$

где $k \in 1 \div K$ - номер группы элементов дискретизации азимута (азимутального канала) данного РЛИ;

$N_{\tau}^* = 6$ - принятое здесь ограничение на максимальное число каналов дальности в каждом канале азимута, что используются для оценки СЦО.

С учетом всего вышеизложенного, расчетные соотношения для определения координат дальности и азимута геометрического центра протяженного объекта по его скорректированному РЛИ имеют вид

$$J_0 = j_{11} + \Delta j \cdot \left[\frac{\sum_{k=1}^K (J_k \cdot N_{jk})}{\sum_{k=1}^K N_{jk}} \right] + 0,5 \cdot L_R, \quad (2)$$

$$B_0 = b_{11} + \Delta b \cdot \left[\frac{\sum_{k=1}^K (B_k \cdot N_{jk})}{\sum_{k=1}^K N_{jk}} \right], \quad (3)$$

где j_{11} , b_{11} - опорные координаты дальности и азимута одной из вершин плоского РЛИ, что соответствует минимальным значениям тех координат;

Δj , Δb - ширина элемента дискретизации сигнала (изображения) по координатам дальности и азимута соответственно;

L_R - радиальный геометрический размер объекта наблюдения, т.е. длина проекции его геометрического размера на линию визирования БРЛС;

B_k - номер канала азимута, в котором находится k -я группа дальностей.

Рассмотрим эффективность метода весовой коррекции при оценке координат объекта на реальных примерах обработки РЛИ двух типов судов - крупногабаритного судна и судна средних геометрических размеров.

Для оценки эффективности была выполнена фиксация РЛИ указанных типов судов. Работы проводились 14.10.2010 в интервале времени 10.30÷10.45 с помощью действующей отечественной системы "Дельта-Навигатор" [5]. Место фиксации - пост СРДС "Очаков" (г. Очаков, Николаевской области).

Пост оборудован морской навигационной береговой радиолокационной станцией (БРЛС), "Енисей", которая функционирует в 3-см диапазоне радиоволн, имеет мощность излучения в импульсе 12,5 кВт при длительности импульса 100 нс и частоте посылок зондирующего сигнала 3 кГц. Коэффициент усиления антенны - около 30 дБ, а ее ширина в азимутальной плоскости на уровне -3 дБ, фактически определяющая разрешающую способность БРЛС по азимуту, составляет $\Delta A = 0,45^\circ$. Время полного кругового обзора пространства - 4 с.

Во время эксперимента оборудование поста функционировало в повседневном штатном режиме. Суда для эксперимента были выбраны произвольно, т.е. взяты во внимание лишь их геометрические размеры.

Первое из зафиксированных РЛИ относится к следовавшему на выход в море крупногабаритному судну "Sound Proodos" с геометрическими размерами $L \times B = 197,7 \times 24,2$ м.

Второе из зафиксированных РЛИ относится к следовавшему на выход в море среднегабаритному судну "УМ Pluto" с геометрическими размерами $L \times B = 116,0 \times 16,9$ м.

Для сохранения примерно одинаковых условий наблюдения оба РЛИ зафиксированы последовательно одно за другим в течение 15 минут в примерно одном и том же районе наблюдения - на завершающем участке 1-ого колена Бугско-Днепровско-Лиманского морского канала непосредственно перед выходом судов в открытое море. Удаление района фиксации составляет примерно 4,1÷4,6 морских мили (7,6÷8,5 км) от БРЛС при азимуте наблюдения $256^\circ \div 258^\circ$. Генеральный курс судов соответствовал направлению продольной оси 1-го колена морского канала $248,88^\circ$, т.е. ракурс наблюдения судов составлял примерно $\theta \approx 7^\circ \div 9^\circ$. Метеоусловия во время эксперимента были нормальными - солнечно, волнение моря не более 1 бала.

Радиолокационные изображения судов получены в виде слайдов экрана АРМ радиолокационного тракта системы "Дельта-Навигатор", а аналитическое описание изображений представлено в виде таблиц поля дальность-азимут, где размеры элементов дискретизации соответствуют реально действующим в системе "Дельта-Навигатор" и равны:

- по дальности - $\Delta j = \Delta D/2 = 7,5$ м;

- по азимуту - $\Delta b = 360/4096 \approx 0,08789^\circ$, т.е. $\Delta b \approx \Delta A/5,12$.

Выборочные бинарные РЛИ наблюдаемых морских судов:

«Sound Proodos» ($L \times B = 197,7 \times 24,2$ м);

«УМ Pluto» ($L \times B = 116,0 \times 16,9$ м)

представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

A \ D	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
9	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
3	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	
2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	
1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Рис. 1. РЛИ морского судна «Sound Proodos»; опорные координаты $j_{11} = 8434$ м, $b_{11} = 256,07^\circ$

A \ D	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
11	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
2	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 2. РЛИ морского судна «УМ Pluto»; опорные координаты $j_{11} = 7774$ м, $b_{11} = 256,95^\circ$

Построение и обработка РЛИ выполнялась лишь по тем сигналам, которые в соответствующем элементе разрешения дальность – азимут (A_i, D_i) существуют (наблюдаются) не менее двух полных круговых обзоров БРЛС. На рис. 1 и 2 такие элементы показаны более темным цветовым тоном.

Для определения координат СЦО для приведенных на рис. 1, 2 бинарных РЛИ воспользуемся известным методом нормализации РЛИ, описанным в [6].

Применительно к решаемой в данной работе задаче используется упрощенный метод нормализации, состоящий в замещении реального бинарного РЛИ прямоугольным, соответствующие стороны которого параллельны осям дальности D и азимута A , а четыре его вершины зафиксированы конечными точками «1» соответствующими значениями координат $D_{min}, D_{max}, A_{min}, A_{max}$ для затемненных РЛИ.

Так, для крупногабаритного судна «Sound Proodos» (рис. 1) означенные выше координаты равны:

$$\begin{aligned}
 D_{min_1} &= j_{11} = 8434,0 \text{ м,} \\
 D_{max_1} &= (j_{11} + 30 \cdot \Delta j) = 8659,0 \text{ м,} \\
 A_{min_1} &= b_{11} = 256,07^\circ, \\
 A_{max_1} &= (b_{11} + 12 \cdot \Delta b) = 257,12^\circ. \quad (4)
 \end{aligned}$$

Для среднегабаритного судна «УМ Pluto» (рис. 2):

$$\begin{aligned}
 D_{min_2} &= j_{11} = 7774,7 \text{ м,} \\
 D_{max_2} &= (j_{11} + 20 \cdot \Delta j) = 7924,7 \text{ м,} \\
 A_{min_2} &= b_{11} = 256,95^\circ, \\
 A_{max_2} &= (b_{11} + 12 \cdot \Delta b) = 258,00^\circ. \quad (5)
 \end{aligned}$$

Тогда координаты СЦО будут соответствовать геометрическим центрам нормализованных РЛС. При этом

$$\begin{aligned}
 J'_{01} &= 8546,5 \text{ м, } B' = 256,60^\circ, \\
 J'_{02} &= 7849,7 \text{ м, } B' = 257,48^\circ. \quad (6)
 \end{aligned}$$

Теперь для определения координат представленных в работе судов по тем же исходным данным применим метод весовой коррекции элементов РЛИ (рис. 1, 2).

Подставим данные РЛИ (рис. 1, 2) в формулы (1), (2). При этом предварительно модифицируем корректирующие коэффициенты $J_k(N_{jk})$ в (1), поскольку их значения приведены для общего случая, когда размер элемента дискретизации по дальности $\Delta j = \Delta D$, т.е. разрешающей способности БРЛС по этой координате. В рассматриваемом конкретном

случае $\Delta j = \Delta D/2$. Для модификации (1) воспользуемся методом графической полиномиальной интерполяции рис. 3. В результате (1) трансформируется к виду

$$J_k = j_{k1} + g_{jk}(N_{jk}),$$

где $g_{jk}(N_{jk})$ определяется по табл. 1.

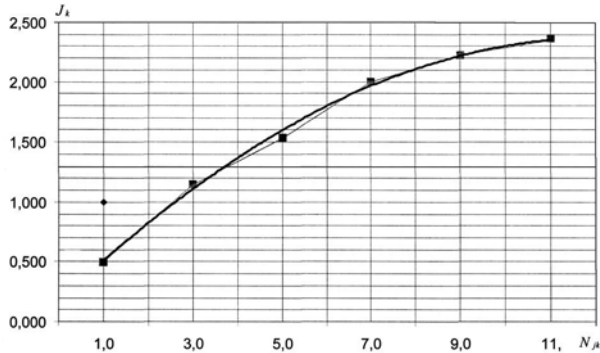


Рис. 3. Полиномиальная интерполяция корректирующих коэффициентов для случая $\Delta j = \Delta D/2$

Таблица 1

Весовые корректирующие коэффициенты для случая $\Delta j = \Delta D/2$

N_{jk}	1	2	3	4	5	6
g_{jk}	0,500	0,825	1,150	1,375	1,535	1,800

N_{jk}	7	8	9	10	>11
g_{jk}	2,000	2,105	2,225	2,300	2,350

На рис. 1, 2 более темным тоном показаны элементы РЛИ («1»), попадающие в зону ограничения $N_{\tau}^* = 11$. Кроме того, для (2) необходимо знать радиальные размеры судов L_R , которые для конкретных условий радиолокационных наблюдений можно определить как

$$L_R = L \cdot \cos \theta,$$

где θ - ракурсы наблюдения судов, которые соответственно равны: $\theta_1 = 1,15^\circ$ для судна № 1; $\theta_2 = 8,71^\circ$ для судна № 2.

Тогда координаты геометрических центров соответствующих судов методом весовой коррекции элементов радиолокационных изображений определяются как:

$$\begin{aligned} J_{01}'' &= 8549,4 \text{ м}, \quad B_{01}'' = 256,55^\circ, \\ J_{02}'' &= 7849,1 \text{ м}, \quad B_{02}'' = 257,49^\circ. \end{aligned} \quad (7)$$

Сравнение результатов оценок координат (6) и (7) показывает, что различия между ними не являются существенными, поскольку лежат в пределах разрешающей способности БРЛС. При этом метод весовой коррекции элементов РЛИ, по сравнению с методом

упрощенной нормализации, как и ожидалось, в целом дает результаты более близкие к фактическим.

В табл. 2 приведены результаты оценок значений бокового отклонения РЛИ среднеразмерного судна "УМ Pluto" относительно продольной оси морского канала, полученные по данным его радиолокационного сопровождения в обсуждаемом эксперименте. Оценки фиксировались с интервалом в 2÷4 обзора БРЛС (8÷16 с) во время равномерного и прямолинейного движения судна 2-м коленом Бугско-Днепровско-Лиманского морского канала.

Таблица 2

Оценки значений бокового отклонения радиолокационных изображений судна относительно продольной оси морского канала

№	Время	Отклонение [м]
1	10.25.13	40,89
2	10.25.21	51,23
3	10.25.33	48,88
4	10.25.45	49,72
5	10.25.57	48,10
6	10.26.13	48,29
7	10.26.25	49,48
8	10.26.37	50,54
9	10.26.49	49,59
10	10.27.01	48,26
11	10.27.13	46,50
12	10.27.25	41,03
13	10.27.37	41,77
14	10.27.50	47,94
15	10.28.02	47,61
16	10.28.18	51,59
17	10.28.30	46,39
18	10.28.42	46,48
19	10.28.54	40,73
20	10.29.18	41,35

Практическую ценность в этих данных представляет динамика изменений и статистические характеристики бокового отклонения, поскольку в условиях равномерного и прямолинейного движения судна она фактически отражает характер "блужданий" СЦО объекта радиолокационного наблюдения.

По данным таблицы 1 среднее значение и СКО оценок бокового отклонения судна соответственно составляют: $\langle \Delta D \rangle = 46,82 \text{ м}$; $\langle \sigma_{\Delta D} \rangle = 3,65 \text{ м}$.

На рис. 4 приведена графическая зависимость бокового отклонения ΔD во времени, построенная по данным таблицы 2.

Анализ статистических характеристик флуктуации СЦО объектов, полученных методом весовой коррекции элементов РЛИ в сравнении с аналогичными данными, полученными методом упрощенной нормализации, показывает, что они практически идентичны.

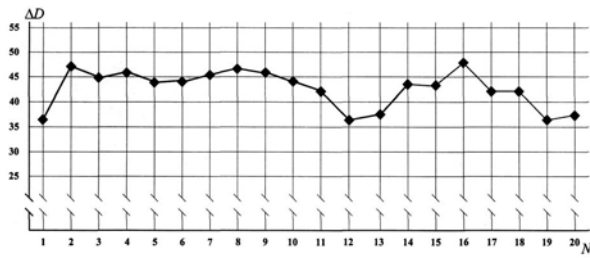


Рис. 4. Временные флуктуации СЦО судна при использовании метода весовой коррекции элементов радиолокационных изображений

Результаты идентичны как по данным в конкретных точках оценивания, так и по их средне-взвешенной разности $\Delta J = 1,15$ м для оценок координаты дальности, $\Delta B = 0,02^\circ$ - для оценок координаты азимута, что в принципе не увеличивает вероятность риска выхода судна за пределы коридора безопасности.

Заключение

Разработан и исследован цифровой статистический метод оценивания координат СЦО протяженного объекта по бинарному РЛИ, представляющему набор смежных бинарных координат дальности и азимута с весовой коррекцией конкретных величин дальности, входящих в расчетные формулы, включая ограничение максимального числа линейных элементов РЛИ.

Приведено сравнение метода весовых коэффициентов с упрощенным методом нормализации исходного РЛИ. Преимущество метода весовых коэффициентов перед упрощенным методом нормализации, как мера его эффективности, состоит в том, что он более реалистичен, поскольку сами корректирующие коэффициенты могут быть определены только по результатам реальных проводок судов и их соответствующей статистической обработке.

Выполненные и представленные в работе теоретические и экспериментальные исследования могут быть использованы при разработке и модернизации автоматизированных радиотехнических систем контроля движения морских судов в стесненных условиях мореплавания.

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. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели. – М.: Сов. радио, 1975. – 248 с.
3. Печенин В.В. Моделирование статистических характеристик координатных блужданий статистического центра отражений морского судна / В.В. Печенин, Е.П. Мсаллам // Міжнар. наук.-техн. конф. «Інтегровани комп'ютерні технології в машинобудуванні» (ІКТМ – 2006). – Харків, 2006. – С. 305.
4. Кравченко А.И. Алгоритм определения координат центра тяжести протяженного объекта / А.И. Кравченко, А.Д. Абрамов и др. Вісник національного технічного ун-ту «ХПІ». Збірник наукових праць. Вип. № 20, 2002. – С. 83 – 86.
5. Кравченко О.І. Автоматизована інформаційно-обчислювальна система технічної підтримки функціонування служб регулювання руху суден «Дельта-Навігатор» / О.І. Кравченко, Д.Г. Дмитров. – Рукопис «Пояснювальна записка технічних пропозицій зі створення системи «Дельта-Навігатор». – Миколаїв: ДП «Дельта-Лоцман», 2001. – 98 с.
6. Анисимов Б.В. Распознавание и цифровая обработка изображений / Б.В. Анисимов, В.Д. Курганов, В.К. Злобин. Учеб. пособие для студентов вузов. – М.: Высш. школа, 1983. – 295 с.

Поступила в редколлегию 1.04.2011

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

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ВАГОВОЇ КОРЕКЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ ЗОБРАЖЕННЯ РАДІОЛОКАЦІЇ ПРОТЯЖНОГО МОРСЬКОГО ОБ'ЄКТУ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ КООРДИНАТНОЇ ТОЧКИ ПРИВ'ЯЗКИ

В.В. Печенин, О.И. Кравченко, К.П. Мсаллам

Розроблений і досліджений цифровий статистичний метод оцінювання координат статистичного центру віддзеркалення протяжного морського об'єкту, заснований на ваговій корекції елементів бінарного зображення. Оцінена ефективність методу вагової корекції порівняно із спрощеним методом нормалізації зображення радіолокації об'єкту. Отримані результати можуть бути використані при розробці автоматизованих радіотехнічних систем різного призначення.

Ключові слова: радіолокація, координати, протяжний об'єкт, коефіцієнт, прив'язка, дискретизація, елемент.

APPLICATION OF METHOD OF GRAVIMETRIC CORRECTION OF RADIO-LOCATION DISPLAY OF EXTENSIVE MARINE OBJECT ELEMENTS AT DETERMINATION OF CO-ORDINATE POINT OF ATTACHMENT

V.V. Pechenin, A.I. Kravchenko, E.P. Msallam

Developed and investigational digital statistical method of evaluation of co-ordinates of statistical center of reflection of extensive marine object, based on the gravimetric correction of binary display elements. Efficiency of method of gravimetric correction is appraised by comparison to the simplified method of normalization of radio-location image of object. Can be drawn on the got results at development of the automated radio engineering systems of the different setting.

Keywords: radio-location, co-ordinates, extensive object, coefficient, attachment, дискретизація, element.