

Воробей В.И.

ДВУХКОНТУРНАЯ СИСТЕМА ОБУЧЕНИЯ ОБНАРУЖЕНИЮ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА

Рассмотрены особенности обнаружения радиолокационного сигнала и измерения его координат в стробе автоматического сопровождения крупноразмерного судна. Предложен алгоритм обучения обнаружению объекта, позволяющий уменьшить ошибку вычисления его координат.

Ключевые слова: радиолокация, обнаружение, измерение, обучение.

Постановка проблемы. Цифровая обработка радиолокационной информации в средствах автоматической радиолокационной прокладки (САРП) судовой радиолокационной станции (РЛС) базируется, в частности, на том, что сигнал на выходе радиолокационного приемника подвергается бинарному квантованию по амплитуде и времени в пределах физического строба автоматического сопровождения цели. В результате формируется бинарная матрица, состоящая из нулей и единиц. Группа единиц создает бинарный радиолокационный портрет (РЛП), соответствующий полезному сигналу, а также скопление единиц, обусловленных отражениями радиолокационного сигнала от морской поверхности, участков береговых массивов, облаков и других источников помех. Координаты цели вычисляются, как координаты «центра тяжести» РЛП [1]. **Проблема** заключается в том, что по завершении решения задачи обнаружения по контуру РЛП крупноразмерной цели наблюдается прилегание помех, которые могут внести ошибку в вычисление ее пеленга и дальности.

Анализ исследований, проведенных в [1–13], показал, что за основу решения проблемы целесообразно принять исследования алгоритма обучения обнаружению цели (1), (2) при указаниях учителя (4) [7], [8].

$$C_g[n] = U(n, n-1, C_g[n-1]) + \gamma_g[n] \omega_{21} \left(\left(F_{1g} \left\{ \mathbf{B}, \bar{Q}_g \left[\overline{\mathbf{X}}_g[n], U(n, n-1, C_g[n-1]) \right] \right\} - 1 \right) \right) \quad (1)$$

если $\vec{S}_g \neq 0$;

$$C_g[n] = U(n, n-1, C_g[n-1]) + \gamma_g[n] \omega_{12} F_{1g} \left\{ \mathbf{B}, \bar{Q}_g \left[\overline{\mathbf{X}}_g[n], U(n, n-1, C_g[n-1]) \right] \right\} \quad (2)$$

если $\vec{S}_g \neq 0$,

где n – дискретное время ($n=1$ - 1-й оборот антенны РЛС, $n=2$ - 2-й оборот, ...);

$C_g[n]$ – управляющее воздействие, изменяющее коэффициент усиления радиолокационного приемника в g стробе;

$U_g(n, n-1, C_g[n-1]) = C_g[n-1] \cdot H_g[n, n-1]$, – нелинейное преобразование, определяющее характер нестационарности процесса на входе радиолокационного приемника [14],[15];

γ_g – параметр обнаружителя, изменяющийся по заданному закону в зависимости от дискретного времени n и определяющий скорость сходимости алгоритма обучения;

ω_{12} и ω_{21} – стоимости ошибок первого и второго рода;

$$F_1\{\vec{Q}[\cdot]\} = \begin{cases} 1, & \text{если } \vec{X} \in X_1^0, \\ 0, & \text{если } \vec{X} \in X_1^0, \end{cases} \text{ – нелинейное преобразование, определяющее критерий} \quad (3)$$

обнаружения связной зоны [1];

B – порог бинарного квантования видеосигнала;

$Q_g[\cdot] = W_g[n] \cdot X_g$ – выходной сигнал радиолокационного приемника;

$W_g[n]$ – коэффициент усиления радиолокационного приемника;

$\vec{X}_g[n]$ – вектор входного сигнала;

X_1^0 – класс, характеризующий образ полезного сигнала.

Структурная схема обучающейся системы, реализующей алгоритм (1), (2), представлена на рис. 1.

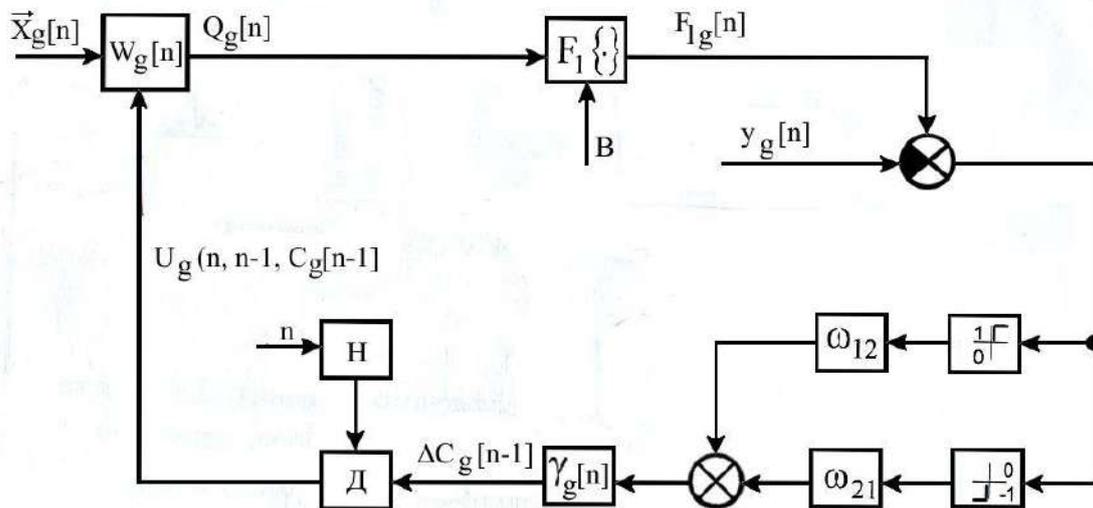


Рис. 1. Структурная схема системы, реализующей алгоритм (1), (2)

В схеме присутствуют указания "учителя" $Y_g[n]$, понятие о которых вводится в процессе получения алгоритма [7], [8],

$$Y_g[n] = \begin{cases} 1, & \text{если } \vec{S}_g \neq 0, \\ 0, & \text{если } \vec{S}_g = 0 \end{cases} \quad (4)$$

и дискретный интегратор D [2].

На рис. 2 представлена развернутая структурная схема обучающейся системы, полученная при [13]:

$$W_g[n] = (K_0 - \alpha C_g[n-1]) K_n,$$

где K_0 – максимальный коэффициент усиления регулируемого усилителя;

α – угловой коэффициент регулировочной характеристики;

K_n – нерегулируемый коэффициент усиления;

$F_{2g}[n]$ – обнаружитель связной зоны [1].

где $\Delta C_g[n] = \gamma_g \cdot \omega_{12}$, что соответствует уменьшению коэффициента усиления приемника и соответственно, уменьшению амплитуды ложного сигнала, поступающего на вход обнаружителя $F_{2g}[n]$.

Процесс с течением времени $[n]$ будет повторяться до тех пор, пока помеха, формирующая ложный сигнал, не станет ниже порога квантования настолько, что будет выполняться условие

$$C_g[n] = C_g[n-1].$$

3. Пропуск полезного сигнала (ошибка второго рода).

Если $Y_g[n]=1$ (учитель указывает, что в данный момент времени должен быть обнаружен полезный сигнал, $S \neq 0$) и $F_1\{\cdot\}=0$ (система не обнаружила полезный сигнал), то в соответствии с выражением (1) получим

$$C_g[n] = C_g[n-1] - \Delta C_g[n],$$

где $\Delta C_g[n] = \gamma_g[n] \cdot \omega_{21}$, что соответствует увеличению коэффициента усиления приемника и способствует выполнению равенства $C_g[n] = C_g[n-1]$, т.е. правильному обнаружению.

4. Правильное необнаружение.

Если $F_1\{\cdot\}=0$ и $F_g=0$, то, как и в первом варианте, коэффициент усиления приемника остается неизменным.

В работах [8],[9],[10] решается задача исследования алгоритма (1), (2): приводятся результаты анализа алгоритма с точки зрения его сходимости, вида закона распределения входной помехи, источника формирования обучающей выборки и др. **Нерешенная часть проблемы** заключается в исследовании алгоритма обучения обнаружению с точки зрения возможности последующего уменьшения ошибки вычисления координат крупноразмерных объектов.

Цель данной статьи – уменьшение ошибки измерения пеленга и дальности крупноразмерных, протяженных объектов в САРП на базе использования возможностей алгоритма обучения обнаружению объекта.

Основной материал. Для достижения поставленной цели в работе проводилось исследование алгоритма (1), (2) методом имитационного моделирования алгоритма и процесса на входе усилителя промежуточной частоты (УПЧ) радиолокационного приемника [6]. Анализ алгоритма (1), (2) осуществлялся при следующих исходных данных:

1. Алгоритм обучения соответствует одноканальному режиму работы ($g = 1$), т.е. решается задача обнаружения одной цели в одном строке;
2. Управляющее воздействие $C_g[n]$, изменяющее коэффициент усиления УПЧ, равно

$$C_g[n] = C_1[n] = C[n]; \tag{5}$$

3. Процесс на входе УПЧ – квазистационарен;

$$U(n, n-1, C_g[n-1]) = C[n-1]; \tag{6}$$

4. Закон изменения скорости сходимости алгоритма – показательный, что соответствует постоянному значению коэффициента усиления цепи обратной связи [2]

$$\gamma_g[n] = \gamma_0 = \text{const}; \tag{7}$$

5. $\omega_{12} = \omega_{21} = 1$; \tag{8}

6. Регулирующая характеристика УПЧ – линейная [13];

$$7. Q[\cdot] = (K_0 - \alpha C[n-1]) K_n \cdot X[n]; \quad (9)$$

8. $F_1\{\cdot\}$ – функция, принимающая значения 0 или 1, реализующая критерий логического обнаружения пачки импульсов (частный случай связной зоны) с фиксацией ее границ «3/5 – 2» [4], зависящей от порога В бинарного квантования видеосигнала по амплитуде и параметров приемника.

Алгоритм (1), (2) с учетом исходных данных можно записать в следующем виде:

$$C[n] = C[n-1] + \gamma_0(F_1[n]-1), \quad (10)$$

если $S \neq 0$,

$$C[n] = C[n-1] + \gamma_0 F_1[n], \quad (11)$$

если $S = 0$,

$$C[n] = C[n-1] + \gamma_0(F_1[n] - y[n]), \quad (12)$$

где $y[n]$ – указания учителя, поступающие от оператора САРП (вахтенного помощника капитана).

$$y[n] = \begin{cases} 1, & \text{если } \vec{S} \neq 0, \\ 0, & \text{если } \vec{S} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

Структурная схема системы, реализующей алгоритм (12), представлена на рис.3.

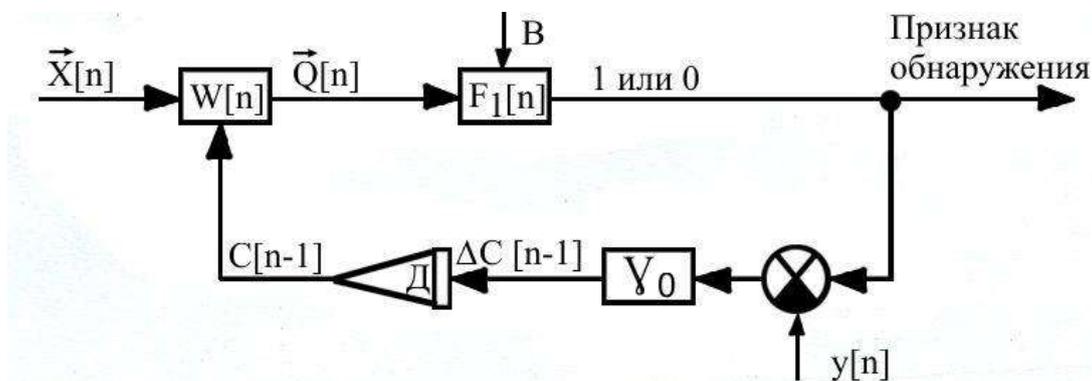


Рис.3. Структурная схема системы, реализующей алгоритм обучения обнаружению (12)

Развернутая структурная схема представлена на рис.4.

Указания учителя $y[n]$, рассматриваемые в известном обучающемся приемнике I [2], представляют собой следующую информацию: $y[n]$, равное 1, означает, что обработке подвергается отрезок входного процесса, где должна присутствовать цель в виде одиночного импульса, и $y[n]$, равное 0, - обработке подвергается отрезок входного процесса, где должна присутствовать только помеха. В настоящей работе учитель дает информацию $y[n] = 1$ о том, что в данное время на данном участке морской поверхности находится цель, отраженный сигнал \vec{S} от которой представляет собой последовательность импульсов, и $y[n] = 0$, если на участке должна присутствовать только помеха.

Из распечаток также следует, что по мере обучения уменьшается число помех, прилегающих к области полезного сигнала по контуру РЛП, и по окончании обучения помехи достигают минимальных размеров. Однако эти помехи, поступая, также, как и полезный сигнал, на вторичную обработку, могут внести значительные ошибки в вычисление координат объекта. Так, например, при оценке пеленга на цель при безвесовой обработке пачек двоично квантованных сигналов [4] подобные помехи могут внести ошибку в измерение пеленга, равную $15' - 20'$. Поэтому целесообразно с целью уменьшения ошибки измерения координат объекта минимизировать влияние подобных помех.

Этого можно достичь, если после того, как управляющее воздействие достигло оптимального значения C^0 , продолжить его изменение по критерию стабилизации амплитуды шумов приемника (число «+» в помеховом строке) на уровне, соответствующему наиболее четкому контуру РЛП цели при соблюдении требования: значение управляющего воздействия $C_{ш}$, полученное из условия стабилизации уровня шумов, должно принадлежать к ряду оптимальных значений C^{0i} , зависящих от i отношения амплитуды полезного сигнала к амплитуде помехи

$$C_{ш} \in C^{0i}. \quad (14)$$

Реализация условия (14) влечет за собой применения одновременно двух систем: обучающейся и стабилизации. Такую систему уместно назвать двухконтурной обучающейся системой.

Алгоритм обучения в этом случае принимает вид

$$C[n] = C[n-1] + \gamma_0(F_1[n] - y[n]) + \{sg(P_T - P_3)\}sgn(F_1[n] - y[n]), \quad (15)$$

где функция, реализующая стабилизацию уровня шумов вычисляется с помощью выражения

$$sg(P_T - P_3) = \begin{cases} 1, & \text{если } P_T - P_3 > 0 \\ 0, & \text{если } P_T - P_3 = 0; \\ -1, & \text{если } P_T - P_3 < 0 \end{cases}$$

функция, которая дает разрешение на стабилизацию уровня шумов вычисляется с помощью выражения

$$sgn(F_1[n] - y[n]) = \begin{cases} 1, & \text{если } F_1[n] - y[n] = 0 \\ 0, & \text{если } F_1[n] - y[n] = \pm 1 \end{cases};$$

где P_T – текущий уровень шумов;

P_3 – заданный уровень шумов.

Алгоритм (12) реализуется в следующей последовательности. Если

$$C[n] = C[n-1] = C^0,$$

то

$$F_1[n] - y[n] = 0,$$

и в соответствии с выражением (17)

$$sgn(F_1[n] - y[n]) = 1.$$

Алгоритм (15) в этом случае примет вид

$$C[n] = C[n-1] + \text{sg}(P_T - P_3).$$

В результате происходит стабилизация шумов P_T на заданном уровне P_3 . Если

$$F_1[n] - y[n] = \pm 1,$$

то в соответствии с (17)

$$\text{sgn}(F_1[n] - y[n]) = 0$$

и алгоритм (15) примет вид

$$C[n] = [n-1] + \gamma_0(F_1[n] - y[n]),$$

т.е. процесс стабилизации прекращается и не возобновляется до тех пор, пока значение $C[n]$ с помощью обучения не выйдет в область оптимальных значений.

Структурная схема системы, реализующей алгоритм (14), представлена на рис. 7.

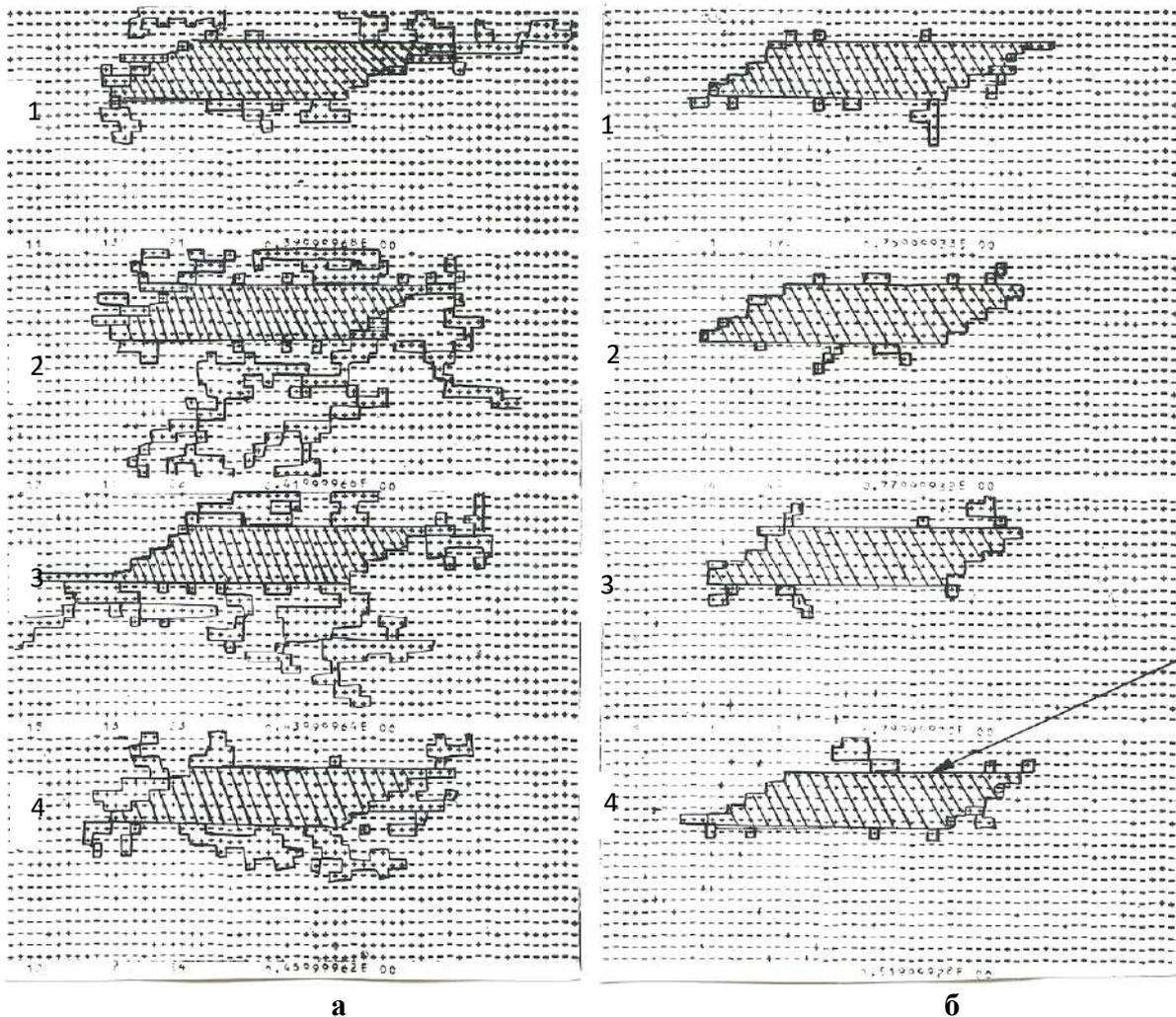


Рис. 6. Динамика обнаружения цели:
 а - середина процесса обучения;
 б - окончание процесса обучения.

Исследование двухконтурной обучающейся системы показало уменьшение ошибки определения координат (центра тяжести РЛП) крупноразмерной цели на 20' по пеленгу 30 м по дальности.

Выводы. Максимальные суммарные ошибки определения координат в САРП могут достигать 2 градусов по пеленгу и 100 метров по дальности (при самых неблагоприятных условиях), поэтому можно принять, что предложенная двухконтурная обучающаяся система позволяет уменьшить ошибку определения координат на 16% по пеленгу и 27% по дальности.

В перспективе целесообразна разработка и исследование алгоритмов при $\omega_{12} \neq \omega_{21}$ и $\gamma_0 = \text{var}$, а также при условии нестационарности входного процесса (изменении амплитуды полезного сигнала и помехи в зависимости от дальности до цели и до отражающей поверхности моря при его волнении).

ЛИТЕРАТУРА

1. Судовые средства автоматизации предупреждения столкновений судов/ Ю.Г. Зубаров, Р.Н. Черняев, Е.В. Якшевич, В.Я. Яловенко. – М.: Транспорт, 1985. – 264 с.
2. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах/Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, 1968.- 400 с.
3. Цыпкин Я.З. Основы теории обучающихся систем / Я.З. Цыпкин . – М. : «Наука», 1970. – 252 с.
4. Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации/С.З. Кузьмин// Советское радио, 1974. – 432 с.
5. Воробей В.И. Измерение координат сигнала в средствах автоматической радиолокационной прокладки /В.И. Воробей// Водный транспорт: зб. наук. праць Київської державної академії водного транспорту. – К.: РВВКДАВТ, 2012. – №2(14). – С. 56–61.
6. Воробей В.И. Моделирование процесса на входе приемника радиолокационных сигналов /В.И. Воробей// Водный транспорт: зб. наук. праць Київської державної академії водного транспорту. – К.: РВВКДАВТ, 2013. - №3(18). - С. 21–26.
7. Воробей В.И. Обучающийся обнаружитель радиолокационного сигнала при отсутствии дополнительных указаний учителя. /В.И. Воробей// Водный транспорт: зб. наук. праць Київської державної академії водного транспорту. – К.: РВВКДАВТ, 2014. - №3(21). – С. 45–50.
8. Воробей В.И. Исследование динамики обучающегося обнаружителя радиолокационных сигналов /В.И. Воробей, А.Н. Носовский// Водный транспорт. зб. наук. праць Київської державної академії водного транспорту. – К.: РВВКДАВТ, 2015. – (22). – С. 14–18.
9. Воробей В.И. Исследование динамики обучающегося обнаружителя радиолокационных сигналов в условиях воздействия различных помех /В.И. Воробей // Водный транспорт. зб. наук. праць Київської державної академії водного транспорту. – К.: РВВКДАВТ, 2015. – №2(23).– С. 13–18.
10. Воробей В.И. Автоматическое обнаружение радиолокационного сигнала при ограниченном времени его существования/ В.И. Воробей// Водный транспорт. зб. наук. праць Київської державної академії водного транспорту. – К.: РВВКДАВТ, 2016. – №2(25). – С. 19–25.
11. Кионини А. Метод автоматической регулировки порогового уровня в РЛС / А.Кионини// Зарубежная радиоэлектроника. – 1970. – № II. – С.14–18.
12. А.с. 776264, СССР. МКИЗ G 01S 7/46. Устройство для сопровождения эхосигналов обзорной радиолокационной станции /Георгизон Е.Б., Комиссаров Г.Ф., Санников, В.И. Яловенко В.Я. (СССР). – № 2748043, заявл. 28.03.79.

-
13. Кривицкий Б.Х. Автоматические системы радиотехнических устройств/Б.Х. Кривицкий//Л.: Гос. эн ерг. изд-во, 1982. – 192 с.
 14. Цыпкин Я.З. Алгоритмы адаптации и обучения в нестационарных условиях/ Я.З.Цыпкин А.И. Кашинский, К.А. Ларионов // Техническая кибернетика, 1970. – № 5. – С. 19–21.
 15. Воробей В.И. Обучающаяся система обнаружения в условиях нестационарной помехи от морского волнения / В.И. Воробей А.А. Кошевой // Вопросы судостроения.–сер. Вычислительная техника, 1982. – вып. 43. – С. 47–51.

Воробей В.І.

ДВОКОНТУРНА СИСТЕМА НАВЧАННЯ ВИЯВЛЕННЮ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО СИГНАЛУ

Розглянуті особливості виявлення радіолокаційного сигналу і виміру його координат в стробі автоматичного супроводження великорозмірного судна.

Запропонован алгоритм навчання виявленню об'єкта, що дає можливість зменшити помилку обчислення його координат.

Ключові слова: радіолокація, автовиявитель, навчання, вимірювання.

Vorobei V.I.

TWO CONTOURS LEARNING SYSTEM TO DETECT RADAR SIGNAL

The special features of radar signal detection and measuring of its coordinates for the automatic tracking of great ship are conducted.

The learning algorithm to detect an object, allowing to decrease the error of measuring its coordinates, is offered.

Keywords: radar, detection, learning, measuring considered.

REFERENCES

1. Zubarov, Yu.H., Cherniaev, R.N, Yakshevych, E.V. and Yalovenkoiu, V.Ya. (1985). *Sudovye sredstva avtomatyzatsyy preduprezhdeniya stolknovenyi sudov [Marine automation equipment for the prevention of collisions of ships]*, Transport, Moskva, 264 p.
2. Tsyapkyn, Ya.Z. (1968). *Adaptatsiya y obuchenye v avtomaticheskikh systemakh [Adaptation and training in automatic systems]*, Nauka, Moskva, 400 p.
3. Tsyapkyn, Ya.Z. (1970). *Osnovy teoryy obuchaiushchyksia system [Fundamentals of theory of training systems]*, Nauka, Moskva, 252 p.
4. Kuzmyn, S.Z. (1974). *Osnovy teoryy tsyfrovoy obrabotky radyolokatsyonnoi ynformatsyy [Fundamentals of the theory of digital processing of radar information]*, Sovetskoe radio, Moskva, 432 p.
5. Vorobei, V.Y. (2012). *Yzmerenye koordynat syhnala v sredstvakh avtomaticheskoi radyolokatsyonnoi prokladky [Measurement of the coordinate of the signal in the means of automatic radar lining]*, *Vodnyi transport*, No.2(14), pp.56-61.
6. Vorobei, V.Y. (2013), *Modelyrovanye protsessa na vkhode pryemnyka radyolokatsyonnykhsyhnalov [Simulation of the process at the input of the radar receiver signals]*, *Vodnyi transport*, No.3(18), pp.21-26.
7. Vorobei, V.Y. (2014). *Obuchaiushchyksia obnaruzhytel radyolokatsyonnoho syhnala pry otsutstvyi dopolnytelnykh ukazanyi uchytelia [A trainer detecting a radar signal in the absence of additional teacher's instructions]*, *Vodnyi transport*, No.3(21), pp.45-50.
8. Vorobei, V.Y. and Nosovskyi, A.N. (2015). *Yssledovanye dynamyky obuchaiushchehosia obnaruzhytelia radyolokatsyonnykh syhnalov [Investigation of the dynamics of a trained detector of radar signals]*, *Vodnyi transport*, No.1(22), pp.14-18.
9. Vorobei, V.Y. (2015). *Yssledovanye dynamyky obuchaiushchehosia obnaruzhytelia radyolokatsyonnykh syhnalov v uslovyakh vozdeistviya razlychnykh pomekh [Investigation*

-
- of the dynamics of the learning detector of the sonar signals in the conditions of the influence of various interferences], *Vodnyi transport*, No.2(23), pp.13-18.
10. Vorobei, V.Y. (2016). Avtomaticheskoe obnaruzhenie radyolokatsyonnoho syhnala pry ohranychnom vremeny eho sushchestvovaniya [Automatic detection of a radar signal with limited time of its existence], *Vodnyi transport*, No.2(25), pp.19-25.
 11. Kyonyny, A. (1970). Metod avtomaticheskoi rehulyrovky porohovoho urovnia v RLS [Method of automatic regulation of threshold level in radar], *Zarubezhnaia radyoэlektronika*, Vol. II, pp.14–18.
 12. Heorhizon, E.B., Komysarov, H.F., Sannykov, V.Y. and Yalovenko, V.Ya. (1979). Ustroistvo dlia soprovozhdeniya ekhosityhnalov obzornoй radyolokatsyonnoй stantsyy [The device for tracking the signals of the surveillance radar], USSR, MKY3G01S7/46.
 13. Kryvytskyi, B.Kh. (1982), Avtomaticheskyye systemy radyotekhnicheskyykh ustroystv [Automatic systems of radiotechnical devices], Hos. enerh. yzd-vo, Leningrad, 192 p.
 14. Tsyapkyn, Ya.Z., Kashshnskiy, A.Y. and Laryonov, K.A. (1970). Alhorytmy adaptatsyy y obucheniya v nestatsyonarnyykh uslovyakh [Algorithms of adaptation and learning in non-stationary conditions], *Tekhnicheskaya kybernetika*, No.5, pp. 19-21.
 15. Vorobei, V.Y. and Koshevoi, A.A. (1982). Obuchaiushchaya sistema obnaruzheniya v uslovyakh nestatsyonarnoi pomekhy ot morskoho volneniya [Learning system of detection in the conditions of non-stationary interference from sea wave], *Voprosy sudostroeniya*, Vol.43, pp.47–51.

Рецензент: д.т.н., професор Пашков Д.П.,
Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління