



УДК 681.322+621.396

В. В. Леонтьев, А. А. Пименов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Особенности построения нейронной сети в робастной радиолокационной системе классификации мономолекулярных пленок нефти на поверхности моря при горизонтальной поляризации электромагнитного поля

Предложена нейронная сеть, позволяющая принять решение о наличии или об отсутствии мономолекулярных пленок средней или тяжелой нефти на поверхности моря. Решение принимается в результате обработки сигнала радиолокационной станции с горизонтальной поляризацией электромагнитной волны, объединенной в единый комплекс с пассивными отражателями, расположенными по периметру акватории порта, а также на специальных буйках в море.

Нейронная сеть, радиолокация, моделирование, рассеяние радиоволн, морская поверхность, эффективная площадь рассеяния, комплексный коэффициент отражения, нефтяная пленка

Известен способ радиолокационного определения пленочных нефтепродуктов на поверхности моря [1], позволяющий обнаруживать мономолекулярные пленки при скользких углах облучения. Его суть состоит в объединении в единый комплекс радиолокационной станции (РЛС) с пассивными отражателями, расположенными либо по периметру акватории порта, либо на специальных буйках в море. Наличие загрязнения устанавливается на основе измерения эффективной площади рассеяния (ЭПР) отражателя, рассеивающего свойства которого зависят от наличия или отсутствия нефтяного слоя на поверхности воды [2].

В работе [3] предложена архитектура нейронной сети (НС), принимающая решение о наличии или об отсутствии загрязнения в автоматическом режиме. Рассеяние электромагнитных волн (ЭВ) чистой и загрязненной поверхностями моря промоделировано для случая применения в РЛС вертикальной поляризации (ВП) ЭВ. С точки зрения классификации ситуации на море этот вид поляризации предпочтителен, однако для снижения помех многие береговые РЛС, управляющие движением транспортных потоков на акватории порта, а также РЛС судового базирования имеют горизонтальную поляризацию (ГП) ЭВ.

В настоящей статье исследованы особенности построения НС в робастной радиолокационной си-

стеме классификации пленок нефти на поверхности моря при использовании в РЛС ГП электромагнитного поля. Исследование выполнено методами математического моделирования [4]–[7] для тех же условий задачи, что и в [3], а именно, рассмотрены две различающиеся по плотности нефти: средняя и тяжелая. Волнение моря – полностью развитое. Частота РЛС 10 ГГц. Результаты численных испытаний проиллюстрированы гистограммами ЭПР отражателя (рис. 1). Гистограммы 1 соответствуют чистой морской поверхности, гистограммы 2 – морской поверхности с пленкой средней нефти, гистограммы 3 – морской поверхности с пленкой тяжелой нефти. Скорость ветра на высоте 10 м над поверхностью моря $v_{В10}$ изменялась от 2.5 до 5.0 м/с с шагом 0.5 м/с. Статистические характеристики флуктуаций ЭПР отражателя (средняя ЭПР $\bar{\sigma}$ и дисперсия ЭПР D_{σ}) приведены в таблице.

Отметим особенности изменения флуктуаций ЭПР отражателя в случае изменения поляризации электромагнитного поля РЛС. При ВП [3] гистограммы ЭПР отражателя, полученные для чистой и загрязненной средней нефтью поверхностей моря, тем больше перекрываются, чем больше скорость ветра, однако изменение скорости ветра (в рассмотренном диапазоне скоростей) практически не сказывается на изменении гистограмм ЭПР от-

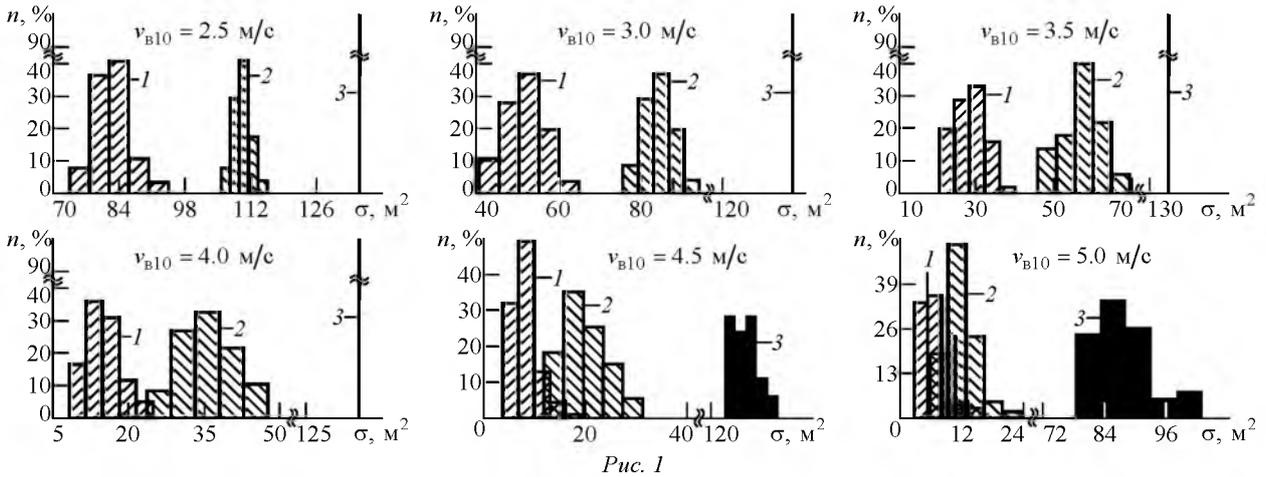


Рис. 1

$v_{B10}, \text{ м/с}$	Состояние моря					
	Чистое		С пленкой средней нефти		С пленкой тяжелой нефти	
	$\bar{\sigma}, \text{ м}^2$	$D_{\sigma}, \text{ м}^4$	$\bar{\sigma}, \text{ м}^2$	$D_{\sigma}, \text{ м}^4$	$\bar{\sigma}, \text{ м}^2$	$D_{\sigma}, \text{ м}^4$
2.5	82.6	14.1	110.0	3.8	135.0	0.0
3.0	51.8	23.5	84.3	13.8	135.0	0.0
3.5	28.3	19.6	57.3	26.1	135.0	0.0
4.0	14.9	13.2	35.2	27.9	135.0	0.1
4.5	8.2	6.3	19.8	16.9	126.0	6.9
5.0	8.2	6.3	19.8	8.2	126.0	32.0

ражателя для чистой водной поверхности. При ГП изменение скорости ветра ведет как к изменению гистограмм ЭПР отражателя, полученных при наличии пленки средней нефти на поверхности моря, так и к изменению гистограмм ЭПР отражателя для чистого моря. При этом указанные гистограммы ЭПР могут существенно перекрываться (рис. 2: 1 – ЭПР отражателя для чистого моря при $v_{B10} = 2.5 \text{ м/с}$; 2 – ЭПР отражателя при наличии пленки средней нефти и $v_{B10} = 3.0 \text{ м/с}$; рис. 3: 1 – ЭПР отражателя для чистого моря при $v_{B10} = 3.0 \text{ м/с}$; 2 – ЭПР отражателя при наличии пленки средней нефти и $v_{B10} = 3.5 \text{ м/с}$). Аналогичный вывод следует из таблицы, поскольку среднее значение и дисперсия ЭПР, полученные для чистой поверхности при скорости ветра 2.5 м/с, имеют почти те же значения, что средняя ЭПР и дисперсия ЭПР соответственно для поверхности с

пленкой средней нефти при скорости ветра 3.0 м/с. Следовательно, заключение о причине изменения гистограммы ЭПР отражателя (появление пленки нефти или изменение скорости ветра) для ГП при отсутствии информации о скорости ветра получить труднее, чем при ВП.

По аналогии с [3] для принятия решения о состоянии морской поверхности в момент времени t_i при отсутствии данных о скорости ветра в качестве информативного признака используем вектор $\mathbf{w}_i = [\sigma(t_i), D_{\sigma}(t_i)]$ ($\sigma(t_i)$ – ЭПР отражателя в момент t_i ; $D_{\sigma}(t_i)$ – дисперсия m отсчетов ЭПР отражателя, предшествующих моменту t_i), а в качестве НС – многослойную НС (рис. 4, где IW (Input Weights) – матрица весовых коэффициентов входного слоя; $LW_{k,l}$ (Layer Weights) – матрицы весовых коэффициентов скрытого или выходного слоев; причем индекс l указывает на

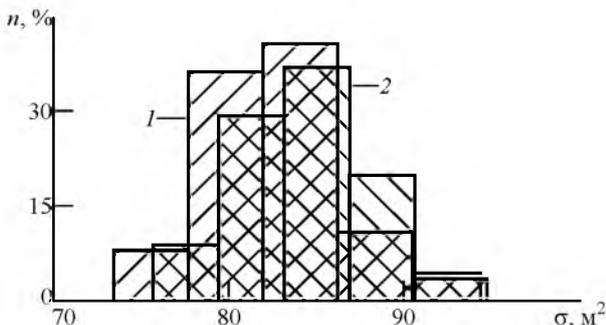


Рис. 2

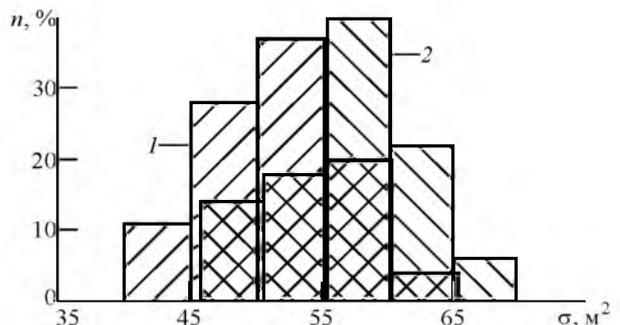


Рис. 3

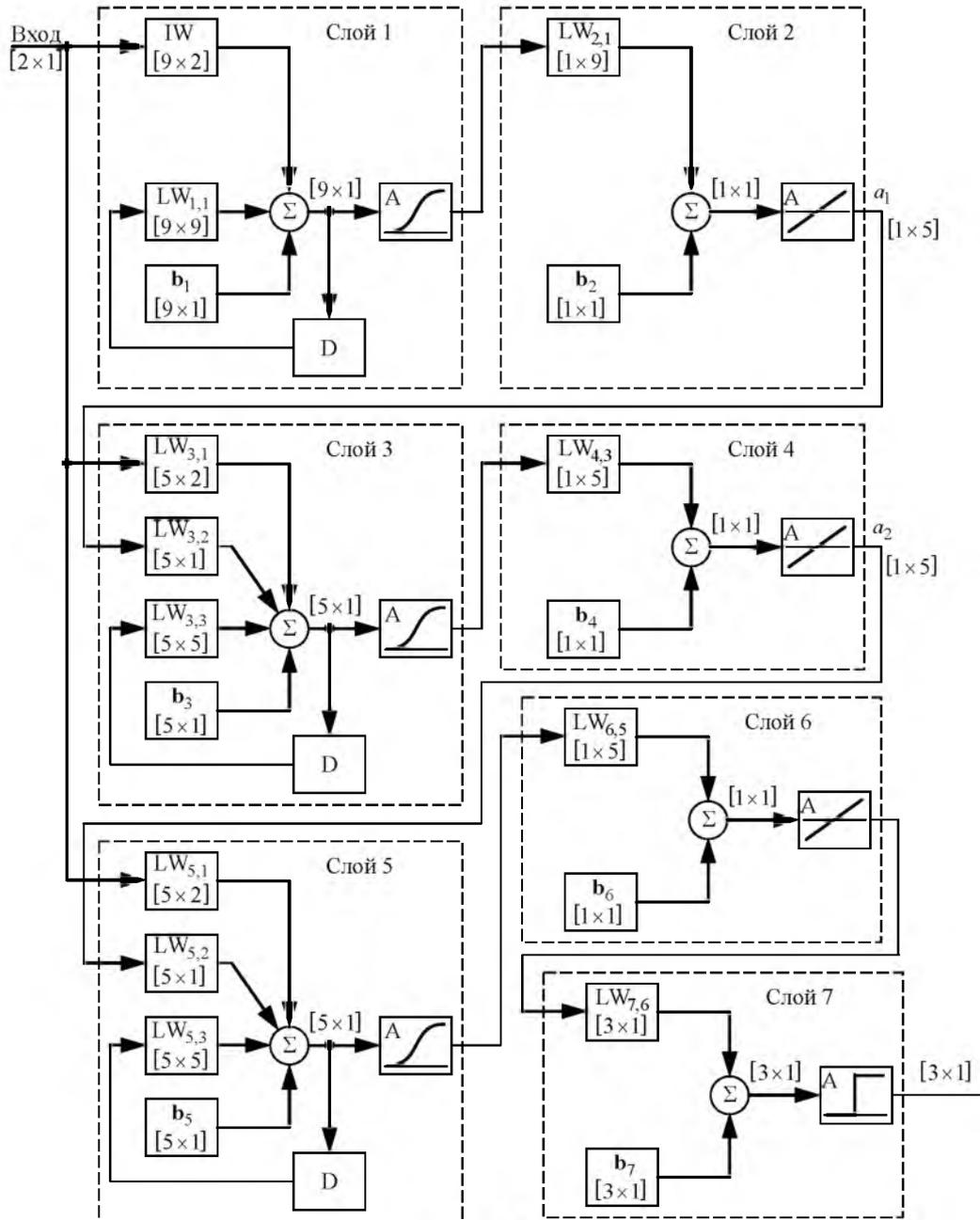


Рис. 4

номер слоя источника сигнала, а индекс k – на номер слоя приемника сигнала; \mathbf{b}_l – вектор смещений; Σ – сумматор; D – блок динамической обратной связи; A – узел активации; числа в квадратных скобках означают размеры матриц весовых коэффициентов или коэффициентов смещения: первое – количество строк, второе – количество столбцов), построенную с использованием архитектуры сети Элмана [8].

Нейронная сеть представляет собой рекуррентную многослойную НС. Большое количество слоев НС создает известные проблемы обучения (например, проблему исчезающего градиента), поэтому для обучения сети использовались мето-

ды, применяемые при глубоком обучении (deep learning) [9], однако для инициализации весов и смещений использовались не классические автоассоциативные структуры (АС) (ограниченные машины Больцмана, автоэнкодеры), а двухслойная рекуррентная НС, построенная на архитектуре сети Элмана и имеющая один нейрон в выходном слое. Такой подход позволяет получить одномерное отображение входного сигнала [10]. Первые три пары слоев НС, образующие три АС, используют логистическую функцию активации для нейронов входного слоя и линейную функцию активации для нейрона выходного слоя. Первая АС (слои 1 и 2) содержит 9 нейронов входного

слоя, а вторая и третья АС (слои 3, 4 и 5, 6 соответственно) содержат по 5 нейронов во входном слое.

Обучение НС производилось следующим образом. Для каждого типа поверхности (чистое море, море с пленками средней или тяжелой нефти) задавалось уникальное числовое значение (1, 2 и 3 соответственно). При подаче на вход первой АС отсчетов ЭПР отражателя и дисперсий m предыдущих отсчетов ЭПР отражателя одного из трех типов поверхности на выходе нейрона второго слоя, используя метод обратного распространения ошибки, формировалось сопоставленное данному типу поверхности значение.

На входы второй и третьей АС подавались векторы из отсчетов ЭПР отражателя, дисперсий m предыдущих отсчетов ЭПР отражателя и точечного отображения $a_n(t_i)$, $n = 1, 2$, полученного предыдущей АС в момент t_i :

$$w_{ni} = [\sigma(t_i), D_{\sigma}(t_i), a_n(t_i)].$$

На выходе каждой АС так же формировались сопоставленные данному типу поверхности уникальные числовые значения.

После обучения всех АС итоговая НС инициализировалась полученными весовыми коэффициентами и производилась тонкая настройка обычными методами (например, методом обратного распространения ошибки).

Седьмой слой не требует настройки, весовые коэффициенты и смещения задаются исходя из заданных уникальных числовых значений. Например, если чистой поверхности, поверхности с пленкой средней нефти и поверхности с пленкой тяжелой нефти на этапе обучения последней АС заданы значения 1, 2 и 3 соответственно, то

$$LW_{7,6} = (-1 \ 1 \ 1)^T; \quad b_7 = (1.5 \ -1.5 \ -2.5)^T,$$

где "Т" – символ транспонирования.

Для обучения НС использовались случайные реализации флуктуаций ЭПР отражателя, полученные при скоростях ветра от 2.5 до 5 м/с с шагом 0.5 м/с. Для верификации работы сети была получена выборка флуктуаций ЭПР для тех же состояний поверхности при произвольных скоростях ветра: 2.8, 3.3, 3.8 и 4.3 м/с. Результаты работы НС на контрольной выборке проиллюстрированы на рис. 5–8 соответственно. На рис. 5, а–8, а представлены изменения значений флуктуаций ЭПР при различных состояниях поверхности и фиксированной скорости ветра. По оси абсцисс указаны номера отсчетов флуктуаций ЭПР i . Отсчеты с номерами от 1 до 200 соответствуют чистой поверхности моря, с номерами от 201 до 400 – поверхности моря с пленкой средней нефти и с номерами от 401 до 600 – поверхности моря с пленкой тяжелой нефти. Временной интервал между соседними отсчетами составляет 0.1 с. На рис. 5, б–8, б показаны сигналы на нейронах выходного слоя. Единица на выходе любого нейрона соответствует наличию определенной ситуации на море: первого нейрона – чистая морская поверхность, второго нейрона – поверхность с пленкой нефти. Единица на выходе третьего нейрона может появиться только совместно с единицей на втором нейроне и служит признаком тяжелой нефти. Изменения штриховки под графиками показывают реальное положение на море, тип штриховки соответствует принятым обозначениям на рис. 1. Из рис. 5–8 видно, что НС правильно принимает решения о наличии или отсутствии пленки нефти при скоростях ветра до

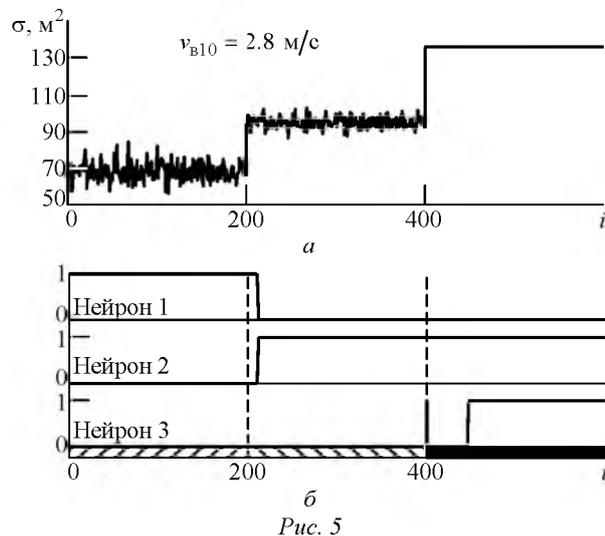


Рис. 5

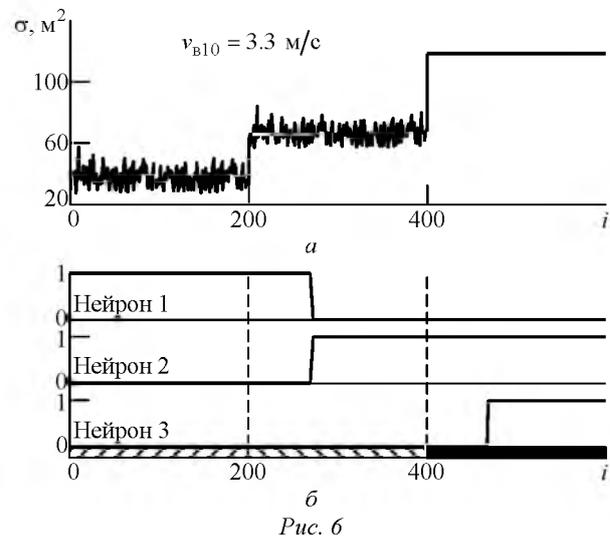


Рис. 6

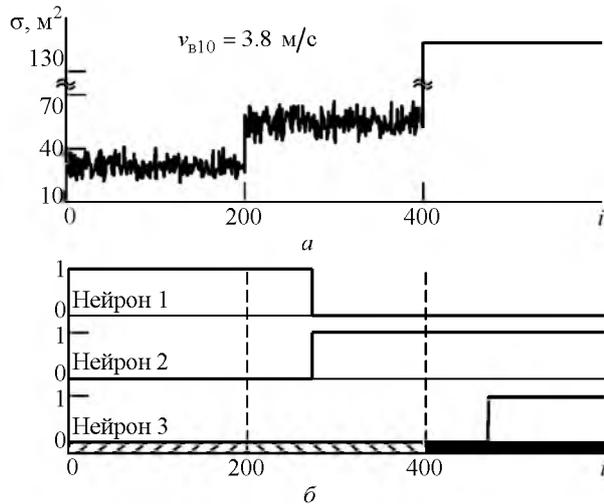


Рис. 7

3.8 м/с для средней нефти и до 4.3 м/с для тяжелой нефти. Задержка принятия решения при изменении ситуации на море обусловлена итеративным характером работы НС.

По сравнению с ВП использование ГП в едином комплексе РЛС с пассивными отражателями, расположенными либо по периметру акватории порта, либо на специальных буйках в море, существенно

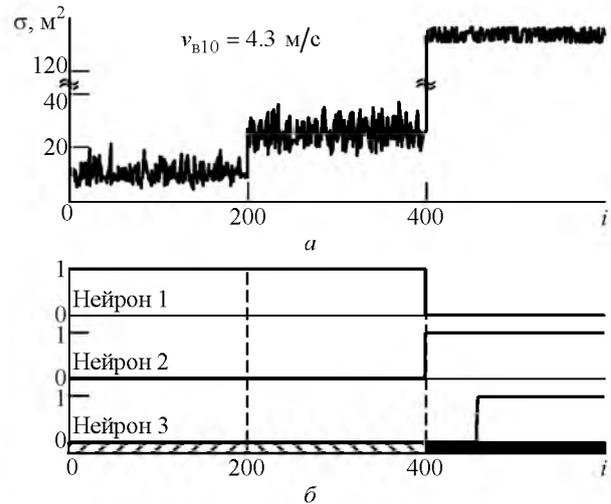


Рис. 8

усложнило решение задачи классификации мономолекулярных пленок нефти на морской поверхности и, соответственно, привело к усложнению НС. Вместе с тем такое решение позволит отказаться от необходимого переоборудования антенн многих береговых и судовых РЛС, работающих на ГП, а следовательно, отказаться от лишних затрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. РФ № 2529886 С1, МПК G01S 13/06 (2006.01). Способ обнаружения нефтяных пленок на водной поверхности / М. А. Бородин, О. А. Игнатъева, В. В. Леонтьев. Оpubл. 10.10.2014. Бюл. № 28.
2. Леонтьев В. В. Феноменологическая теория рассеяния радиоволн морскими объектами. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2006. 216 с.
3. Игнатъева О. А., Леонтьев В. В., Пименов А. А. Нейронная сеть как элемент робастной радиолокационной системы классификации мономолекулярных пленок нефти на поверхности моря // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2013. Вып. 6. С. 49–53.
4. Леонтьев В. В., Бородин М. А., Богин Л. И. Итерационный алгоритм расчета поля, рассеянного шероховатой поверхностью // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53, № 5. С. 537–544.
5. Леонтьев В. В., Третьякова О. А. Моделирование рассеяния радиоволн поверхностью моря, покрытой

мономолекулярной пленкой нефти // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2011. Вып. 3. С. 55–64.

6. Леонтьев В. В., Бородин М. А., Игнатъева О. А. Бистатистические диаграммы рассеяния морской поверхности, покрытой мономолекулярной пленкой нефти // Радиотехника. 2012. № 7. С. 39–44.
7. Игнатъева О. А., Леонтьев В. В. Выбор высоты установки пассивного отражателя радиолокационной системы обнаружения мономолекулярных пленок нефти на поверхности моря // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2013. Вып. 1. С. 94–101.
8. Elman J. L. Finding structure in time // Cognitive science. 1990. Vol. 14, № 2. P. 179–211.
9. Bengio Y. Learning deep architectures for AI // Foundations and trends in machine learning. 2009. Vol. 2, № 1. P. 31–127.
10. Стоянов А. К. Нейронная сеть, основанная на точечных отображениях // Изв. Томск. политехн. ун-та, 2008. Т. 313, № 5. С. 96–101.

V. V. Leontev, A. A. Pimenov
Saint-Petersburg state electrotechnical university "LETI"

Features of design neural network in robust radar system for classification of monomolecular oil films on the sea surface for horizontal polarization of electromagnetic field

Neural network that allows to make a decision about the presence or absence of monomolecular films of medium or heavy oil on the sea surface in the radar with horizontal polarization, integrated into a single system with passive reflectors located either on the perimeter of the port basin, or on special buoys at sea is proposed.

Neural network, radiolocation, modeling, wave scattering, sea surface, radar cross section, complex reflection factor, oil slick

Статья поступила в редакцию 30 января 2015 г.