

---



---

**ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА, ФОТОНИКА  
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

---



---

УДК 004.9

**МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ  
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ЭЛЕМЕНТОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

© 2021 г. С.М. Климов, А.Н. Семенов\*

ФГБУ «4 ЦНИИ» Минобороны России, Королев, Россия

\*E-mail: Sean1968@mail.ru

Предложена методика регистрации и идентификации радиолокационных сигналов космических средств дистанционного зондирования Земли, использующая для распознавания режимов ведения радиолокационного наблюдения комбинированный метод, включающий использование элементов искусственного интеллекта в виде нейронной сети. Конструирование и обучение нейронной сети проводилось на основе априорных данных по радиолокационным сигналам и результатам стендового моделирования радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли. Цель разработки методики заключалась в обеспечении заданного уровня обнаружения, регистрации, идентификации радиолокационных сигналов для принятия мер при ведении радиолокационного наблюдения путем оповещения о фактах и режимах его ведения.

### ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие космических средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяет проводить оперативный контроль состояния критически важных объектов инфраструктуры и транспорта. Из всех направлений получения данных ДЗЗ в настоящий момент особое развитие получили радиолокационные средства, использующие технологию синтеза апертуры антенны и позволяющие круглосуточно получать радиолокационные изображения, не уступающие по разрешению данным оптико-электронных средств. Услуги по проведению радиолокационного наблюдения космическими средствами ДЗЗ в настоящее время предоставляются только зарубежными компаниями, которые, зачастую, не сообщают параметры зондирующих радиолокационных сигналов.

Особенностью радиолокационного наблюдения является то, что существует возможность получения данных по параметрам и режимам работы радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) антенны путем приема и обработки зондирующего радиолокационного сигнала.

Для получения реальных параметров зондирующих сигналов от РСА, используемых при проведении радиолокационного наблюдения (РЛН), можно использовать специализированные приемники,

обеспечивающие прием и измерение параметров электромагнитных волн, далее датчики обнаружения (ДО).

Методика регистрации и идентификации обнаруженных зондирующих радиолокационных сигналов должна обеспечить получение данных по параметрам принятого сигнала и определить режим ведения РЛН.

### МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В настоящее время для радиолокационного ДЗЗ используются космические аппараты (КА), оснащенные чаще всего РСА и работающими в X, C и S диапазонах электромагнитных волн.

Большинство РСА работают в X-диапазоне, что обусловлено необходимостью соблюдения требования международного Регламента радиосвязи и в то же время обеспечить ширину спектра сигнала, необходимую для получения радиолокационных изображений (РЛИ) с высоким разрешением. Так в X-диапазоне возможно получение субметрового разрешения РЛИ, также данный диапазон характеризуется возможностью лучшей селекции отраженных сигналов по сравнению с L- и S-диапазонами, что обеспечивает увеличение вероятности обнаружения малоразмерных объектов на фоне местности.

К числу КА ДЗЗ с РСА Х-диапазона относятся [1–3]:

- «ИГС-Радар» – серия японских КА двойного назначения;
- «Сар-Лупе» (SAR-Lupe) – система КА, развернутая Германией;
- «Космо-Скай-Мед» (COSMO-SkyMed) – итальянская система;
- «Радарсат-3» (Radarsat-3) – коммерческие канадские КА ДЗЗ;
- «Айсай» – система КА ДЗЗ с РСА, созданная в Финляндии, и ряд других, часто единичных КА, эксплуатируемых как частными, так и государственными службами.

К особенностям КА ДЗЗ с РСА С-диапазона относится использование сигналов с шириной спектра, так же достаточной для реализации субметрового разрешения. Типичными представителями таких КА ДЗЗ являются:

- «Радарсат-2» (Radarsat-2) – канадский КА ДЗЗ;
- «Сентинел» (Sentinel-1) – европейские КА с РСА С-диапазона;
- «ГаоФен» – китайские радарные спутники, заявленные как аппараты двойного назначения.

В S-диапазоне реализуемо метровое разрешение, данные этого диапазона применяются при наблюдении растительного покрова, изучении геологической структуры земной поверхности, так для измерения удельных объемов лесной биомассы.

В настоящее время в Российской Федерации ведется подготовка к развертыванию отечественных систем ДЗЗ, оснащенных РСА.

Запуск КА «Обзор-Р», оснащенного РСА «Касатка-Р» намечен на 2021 г. Характеристики РСА «Касатка-Р» позволяют в любое время суток и при любой облачности получать РЛИ земной поверхности высокого разрешения [4]. Основные характеристики РСА «Касатка-Р» и планируемые режимы ведения РЛН представлены в табл. 1.

Таким образом, рост числа КА ДЗЗ, оснащенных РСА, приводит к возможности круглосуточного всепогодного контроля состояния различных объектов на территории Российской Федерации, причем в ряде случаев возникает необходимость обнаружения с помощью ДО факта такого РЛН и выявления режима съемки. Кроме того, такие датчики обнаружения радиолокационных сигналов (РС) могут быть использованы в целях настройки и калибровки отечественной системы РЛН.

Датчики обнаружения представляют собой аппаратно-программные комплексы, позволяющие осуществить фактическую запись и обработку ра-

Таблица 1. Планируемые характеристики РСА «Касатка-Р» КА «Обзор-Р»

Спектральный диапазон	Х-диапазон (3.1 см)			
Периодичность съемки, сутки	2 (в полосе от 35 до 60 градусов с.ш.)			
Режим	Номинальное пространственное разрешение, м	Полоса обзора, км	Ширина полосы съемки, км	Поляризация
Высокодетальный кадровый режим (ВДК)	1	2×470	10	Одinarная (по выбору – Н/Н, V/V, Н/V, V/Н)
Детальный кадровый режим (ДК)	3	2×600	50	Одinarная (по выбору – Н/Н, V/V, Н/V, V/Н); Двойная (по выбору – V/(V+H) и H/(V+H))
Узкополосный маршрутный режим (УМ)	3	2×470	30	
	5	2×600		
Маршрутный режим	20	2×600	130	
	40		230	
Широкополосный маршрутный режим	200	2×600	400	
	300		600	
	500		2×750	750

диосигнала от РСА КА ДЗЗ непосредственно в момент ведения радиолокационной съемки.

Предлагаемая методика определяет порядок применения разработанных ДО на основе структурно-функциональной декомпозиции и математического моделирования совокупности информационных процессов поиска, обнаружения, регистрации (записи) и идентификации РС от РСА КА ДЗЗ с использованием комбинированных решающих правил:

- для идентификации известных РС – методом эталонных сравнений параметров РС по среднеквадратическим отклонениям (СКО) и пороговым значениям [5];
- для идентификации неизвестных РС – на основе использования нейронных сетей и машинного обучения [6–8].

В настоящее время регистрация и идентификация радиолокационных сигналов в датчиках обнаружения реализована для частотных диапазонов С (5–6 ГГц), Х (7–8, 9–10 ГГц), как наиболее распространенных среди зарубежных КА ДЗЗ.

Схема методики регистрации и идентификации космических радиолокационных сигналов датчиками обнаружения представлена на рис. 1.

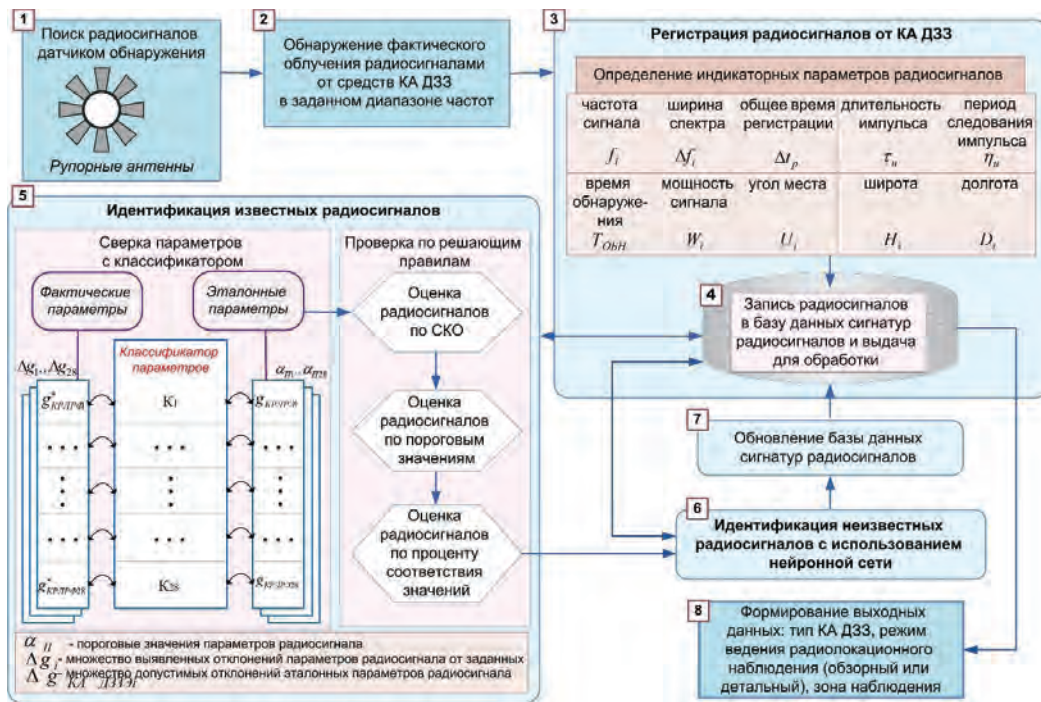


Рис. 1. Схема методики регистрации и идентификации космических радиолокационных сигналов датчиками обнаружения

Реализация методики представлена следующей последовательностью действий.

На первом этапе производится поиск радиосигналов с использованием антенной системы датчика обнаружения, позволяющей принимать зондирующие радиосигналы от бортового РСА КА ДЗЗ по углу места от 15° над горизонтом и без ограничений по азимуту.

Поиск радиосигналов осуществляется с использованием рупорных антенн датчика обнаружения, позволяющих регистрировать зондирующие сигналы от РСА КА ДЗЗ под углом 90 градусов относительно места расположения рупорных антенн.

Космические РСА осуществляют зондирование радиосигналом, ширина спектра которого соответствует разрешению по наклонной дальности  $L_d$  и горизонтальной дальности на местности  $L_y$ .

Разрешение по горизонтальной дальности на местности  $L_y$  поперек линии пути КА ДЗЗ в режиме бокового обзора определяется выражением [1]:

$$L_y = \frac{L_d}{\sin(y_i)} = \frac{c}{2\Delta f \sin(y_i)}, \quad (1)$$

где  $\Delta f$  – ширина спектра зондирующего радиосигнала;  $y_i$  – угол между направлением падения радиосигнала и местной вертикалью;  $c$  – скорость распространения радиоволны (скорость света).

Разрешение вдоль линии пути для РСА определяется через отношение рабочей длины волны к длине участка траектории движения КА ДЗЗ, на котором происходит когерентное запоминание принимаемого радиосигнала и последующий синтез искусственной апертуры (согласованная фильтрация траекторного сигнала):

$$L_x = 0.44 \frac{Rcf}{D_a} \approx \frac{Rcf}{2D_a}, \quad (2)$$

где  $R$  – расстояние между КА ДЗЗ и центром текущей полосы съемки;  $f$  – центральная частота зондирующего сигнала;  $D_a$  – длина синтезированной апертуры антенны, то есть расстояние, пройденное КА ДЗЗ за время ведения наблюдения.

Для РСА КА ДЗЗ диаграмма направленности реальной антенны радиолокатора мало влияет на разрешающую способность по азимуту, которая определяется длиной синтезированной апертуры, сформированной после приема радиосигналов.

Методика регистрации и идентификации космических радиолокационных сигналов датчиками обнаружения учитывает априорную информацию о пролетах КА ДЗЗ, доступную, например, из такого источника, как сайт наблюдателей за КА [9].

На втором этапе обнаружение радиосигнала производится путём его переноса на промежуточ-

Таблица 2. Индикаторные параметры радиолокационных сигналов КА ДЗЗ

№ п/п	Обозначение индикаторного параметра, $I_i$	Наименование индикаторного параметра
1	$f_i$	центральная частота сигнала
2	$\Delta f_i$	ширина спектра сигнала
3	$\Delta t_p$	общее время регистрации
4	$\tau_u$	длительность импульса
5	$\eta_u$	период следования импульсов
6	$T_{\text{обн}}$	время обнаружения
7	$W_i$	мощность сигнала
8	$U_i$	угол места
9	$H_i$	широта
10	$D_i$	долгота

ную частоту и оцифровки для получения измеряемых значений параметров радиосигнала.

Третий этап характеризуется первоначальной регистрацией радиосигналов по десяти индикаторным параметрам, которые установлены экспериментальным путём и представлены в табл. 2.

На четвертом этапе проводится запись значений параметров радиосигналов в базу данных сигнатур радиосигналов и выдача исходных данных для их идентификации на основе сигнатурного анализа (для известных радиосигналов) и эвристического анализа с использованием нейронной сети (для неизвестных радиосигналов).

Идентификация известных РС по классификатору параметров проводится на пятом этапе путем сравнения фактических (записанных) и эталонных параметров РС (относящихся к определенному типу КА ДЗЗ). Для анализа известных и неизвестных РС  $G_{\text{КАДЗЗ}}$  применяется единый классификатор параметров  $\{K1, \dots, K28\}$  (классификационных признаков) параметров РС.

Идентификация известных радиосигналов от РС КА ДЗЗ проведена на основе методов математической статистики к оценке числовых характеристик независимых случайных величин при ограниченном числе опытов [10] (при возможном количестве измерений датчиками обнаружения параметров радиосигналов в ходе 30–40 сеансов ведения РЛН) путём их проверки по решающим правилам:

а) оценки СКО:

на основе метода моментов [10] и с использованием опыта экспериментальных исследований запишем выражение для оценки СКО значений параметров радиосигналов от средств КА ДЗЗ:

$$\sigma = \sqrt{\left[ \frac{1}{K_{\text{ИЗМ}}} \sum_{j=1}^{K_{\text{ИЗМ}}} (g_{\text{КАДЗЗ}j} - \bar{m})^2 \right] \frac{K_{\text{ИЗМ}}}{K_{\text{ИЗМ}} - 1}}, \quad (3)$$

где  $K_{\text{ИЗМ}}$  – количество измерений параметров радиолокационных сигналов от средств КА ДЗЗ (табл. 2);  $g_{\text{КАДЗЗ}j}$  – значение параметра РС КА ДЗЗ при  $j$ -ом измерении;  $\bar{m} = \frac{1}{K_{\text{ИЗМ}}} \sum_{j=1}^{K_{\text{ИЗМ}}} g_{\text{КАДЗЗ}j}$  – оценка математического ожидания случайной величины  $g_{\text{КАДЗЗ}j}$ , определяемое как среднее арифметическое наблюдения её значений.

В выражении (3) элемент формулы  $K_{\text{ИЗМ}} / (K_{\text{ИЗМ}} - 1)$  является поправкой, необходимой для уменьшения систематической ошибки измерений параметров РС.

Исходя из центральной предельной теоремы и гипотезы о том, что случайные значения фактических параметров радиосигналов распределены по нормальному закону [10] в методике среднеквадратичное отклонение измеряемого параметра  $g_{\text{КАДЗЗ}j}$  задается на уровне  $3\sigma$  (правило трёх сигма), а соответствующая этому уровню доверительная вероятность равна  $P_{\text{ДВИРС}} = 0.997$ .

б) оценки пороговых значений:

формирование решающих (логических) правил идентификации радиолокационных сигналов (РС) от средств РЛН на основе сравнения каждого фактического значения параметра, записанного РС с его возможным пороговым значением в базе данных сигнатур РС:

$$G_{\text{КАДЗЗ}}(t_{\text{КАДЗЗ}} \leq t_{\text{зад}}) : \begin{cases} \forall t_{\text{КАДЗЗ}} \in T_{\text{КАДЗЗ}}, g_{\text{КАДЗЗ}i} \in G_{\text{КАДЗЗ}} \\ \exists \left[ \begin{array}{l} f_{\Phi}(g_{\text{КАДЗЗ}\Phi i} \in G_{\text{КАДЗЗ}\Phi}) - \\ - f_{\Xi}(g_{\text{КАДЗЗ}\Xi i} \in G_{\text{КАДЗЗ}\Xi}) \end{array} \right] \geq \alpha_{\text{ПОР}} \\ \rightarrow \Delta g_i \in \Delta g_{\text{КАДЗЗ}} \end{cases}, \quad (4)$$

$$G_{\text{КАДЗЗ}}^{\text{И}} = \left\{ \begin{array}{l} f, \Delta f, \Delta t_p, \eta_u, \tau_u, T_{\text{обн}}, \\ w, U, H, D \end{array} \right\}$$

$$G_{\text{КАДЗЗ}} = \{1, \dots, 28\}$$

где  $T_{\text{КАДЗЗ}}$  – время в течении которого регистрируется радиосигнал КА ДЗЗ;  $G_{\text{КАДЗЗ}}$  – совокупность параметров РС, по которым осуществляется их идентификация;  $G_{\text{КАДЗЗ}}^{\text{И}}$  – совокупность индикаторных параметров РС, по которым осуществляется их первоначальная регистрация;  $f_{\Phi}$  – функция от фактических значений параметров РС;  $f_{\Xi}$  – функция от эталонных значений параметров РС;  $g_{\text{КАДЗЗ}\Phi i}$  и  $g_{\text{КАДЗЗ}\Xi i}$  – фактические и эталонные значения пара-



метров РС;  $\alpha_{\text{ПОР}i}$  – пороговые (проверочные) значения параметров РС;  $\Delta g_i$  – множество выявленных отклонений параметров РС от заданных;  $\Delta g_{\text{КАДЗЗЭ}i}$  – множество допустимых отклонений эталонных параметров РС.

Подготовка пороговых значений для классификатора РС:

$$\begin{cases} \forall g_{\text{КАДЗЗФ}i} \in G_{\text{КАДЗЗФ}} \rightarrow \{K_1, \dots, K_{28}\} \\ \forall g_{\text{КАДЗЗЭ}i} \in G_{\text{КАДЗЗЭ}} \rightarrow \{K_1, \dots, K_{28}\} \\ \exists \alpha_{\text{ПОР}}^{\text{ЭТ}} \in \{\alpha_{g_{\text{КАДЗЗЭ}i}}^{\text{ЭТ}}, \dots, \alpha_{g_{\text{КАДЗЗЭ}i+1}}^{\text{ЭТ}}\} \rightarrow \max_{\Delta g_{\text{КАДЗЗЭ}i} \in G_{\text{КАДЗЗЭ}}} \Delta g_{\text{КАДЗЗЭ}i} \end{cases}, (5)$$

где  $\alpha_{\text{ПОР}}^{\text{ЭТ}}$  – множество допустимых отклонений значений фактических параметров от их эталонных значений для каждого из множества  $\{g_{\text{КАДЗЗЭ}i}, \dots, g_{\text{КАДЗЗЭ}i+1}\}$ ;

Выполнение правил сверки фактических и эталонных параметров РС по пороговым значениям:

$$\begin{cases} \text{если } \Delta g_i \leq \Delta g_{\text{КАДЗЗЭ}i} \rightarrow \alpha_{g_{\text{КАДЗЗЭ}i}}^{\text{ЭТ}}, \text{ то } \exists g_{\text{КАДЗЗФ}i} \in g_{\text{КАДЗЗЭ}i} \\ \dots \\ \text{если } \Delta g_{i+1} \leq \Delta g_{\text{КАДЗЗЭ}i+1} \rightarrow \alpha_{g_{\text{КАДЗЗЭ}i+1}}^{\text{ЭТ}}, \text{ то } \exists g_{\text{КАДЗЗФ}i+1} \in g_{\text{КАДЗЗЭ}i+1} \end{cases}, (6)$$

где  $\Delta g_{i+1}$  – множество выявленных отклонений параметров  $i+1$ -го значения РС от эталонного значения;  $\Delta g_{\text{КАДЗЗЭ}i+1}$  – множество допустимых отклонений  $i+1$ -х эталонных параметров РС.

На шестом этапе методики происходит идентификация неизвестных РС с использованием нейронной сети.

В материалах публикаций [11, 12] продемонстрирована эффективность использования искус-

ственных нейронных сетей в задачах идентификации (распознавания) радиолокационных сигналов.

Выбор аппарата искусственной нейронной сети для проведения классификации неизвестных (нераспознанных) радиосигналов был обусловлен рядом ограничений и особенностей, присущим зондирующим радиосигналам от РСА КА ДЗЗ, таким как:

- ограниченные временные рамки для выполнения расчетов при проведении классификации, обусловленные высокой частотой поступления изменяемых параметров РС;

- значительный уровень априорной неопределенности, определенный во многом неизвестными значениями вероятности отнесения по классам, стоимости принятия решений, кроме того в случае появления нового типа КА ДЗЗ или режима работы РСА до обновления данных отсутствует возможность набора обучающей статистики о распознаваемых объектах;

- наличие различных помех, обусловленных, как средой распространения радиосигнала, так и радиоэлектронной обстановкой;

- возможностью вариации параметров РСА, таких как мощность, центральная несущая частота зондирующих сигналов, постоянное изменение направления ведения РЛН относительно ДО, обусловленные движением КА ДЗЗ по орбите и приводящие к изменению в широких пределах, так как цели РЛН в ряде случаев неизвестны наблюдателю;

- возможность одновременной регистрации и идентификации нескольких РС от различных КА ДЗЗ.

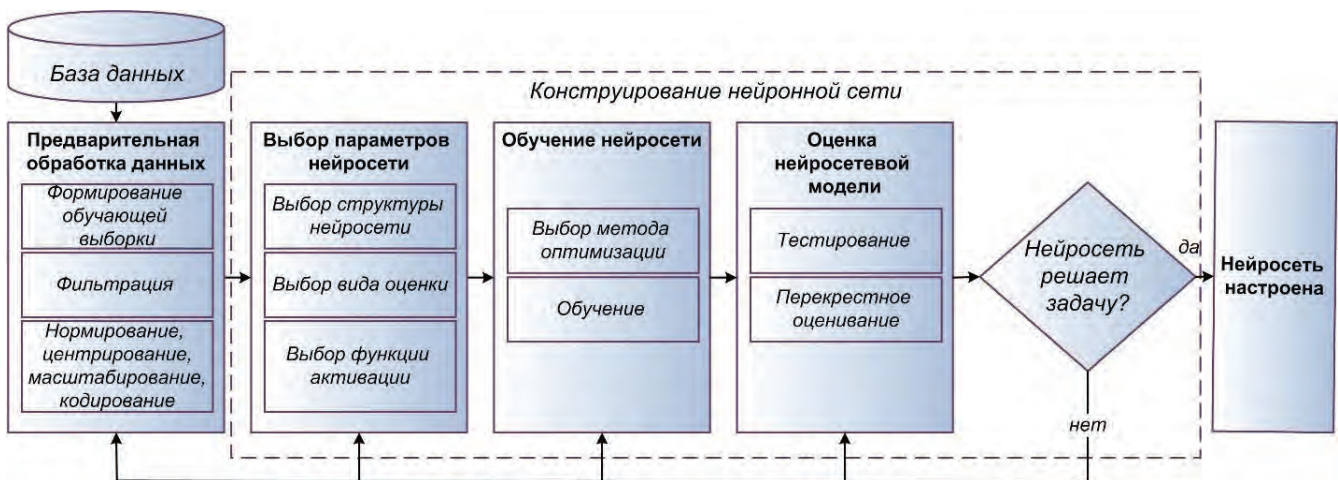


Рис. 2. Настройка нейронной сети

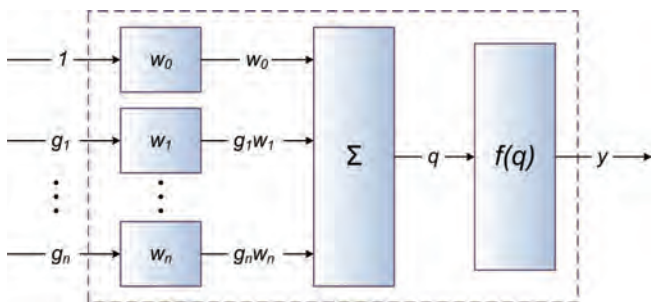


Рис. 3. Структурная схема формального нейрона для идентификации неизвестных радиосигналов

Типовой алгоритм конструирования нейронной сети для решения задачи распознавания неизвестных РС приведен на рис. 2.

Сущность использования схемы состоит в том, что на вход «распознавателя» поступает последовательность векторов параметров, полученная в результате аналого-цифрового преобразования широкополосного, сложно-модулированного электромагнитного РС. Причем полученные в результате преобразования значений РС содержат искажения, внесенные в процессе его приема, первичной обработки и оцифровки.

Согласно [12] нейронной сетью называется динамическая система, состоящая из совокупности связанных между собой по типу направленного графа элементарных процессоров, называемых формальными нейронами (рис. 3), и способная генерировать выходную информацию в ответ на входное воздействие.

Математическая модель формального нейрона для идентификации неизвестных радиосигналов представляется уравнением:

$$y = f(q) = f\left(\sum_{i=1}^n g_i w_i + w_0\right) = f\left(\sum_{i=0}^n g_i w_i\right) | g_0 = 1, \quad (7)$$

где  $y$  – выходной сигнал нейрона;  $f(q)$  – функция выходного блока нейрона;  $w_i$  – коэффициент – вес  $i$ -го входа, а  $w_0$  – начальное состояние (возбуждение) нейрона;  $g_i$  –  $i$ -ый входной сигнал;  $i = 1, 2, \dots, n$  – номер входа нейрона,  $n$  – число входов.

Функция  $f(q)$  называется также функцией активации, поскольку передает значение на вход следующего слоя нейронов сети.

Настройка весов входных воздействий – обучение нейрона состоит в таком подборе весов  $w_i$ , чтобы выходной сигнал  $y$  был наиболее близок к

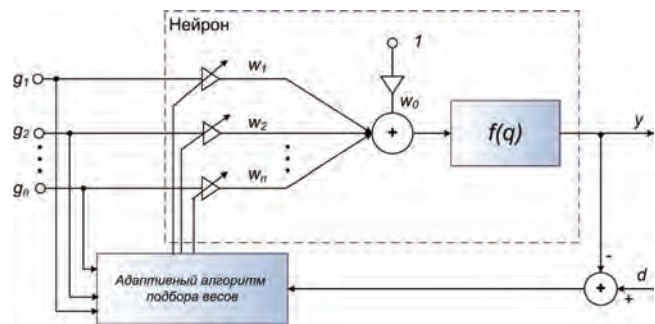


Рис. 4. Принцип обучения нейрона для идентификации неизвестных радиосигналов

заданному значению  $d$ . Графическое представление принципа обучения приведено на рис. 4.

Наиболее простой метод обучения заключается в применении метода Видроу-Хопфа [13], в котором используются следующие формулы:

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \Delta w_i, \quad (8)$$

$$\Delta w_i = g_i(d - y). \quad (9)$$

Для задач классификации радиосигналов хорошо зарекомендовал себя принцип обучения нейрона с учителем по принципу минимизации целевой функции, определенной в виде:

$$E(w) = \frac{(d - y)^2}{2}. \quad (10)$$

В качестве функции активации используем сигмоидальную функцию, как наиболее адаптированную для задач распознавания образов [14]. Функция представлена формулой:

$$f(n) = \frac{1}{1 + e^{-\beta n}}. \quad (11)$$

Сигмоидальная функция является монотонной и всюду дифференцируемой. Для упрощения используем  $\beta = 1$ .

Выбор нейронной сети для проведения классификации радиосигналов был определен специфическими свойствами анализируемых объектов – значений параметров зондирующих радиосигналов от КА ДЗЗ (табл. 2).

В настоящее время созданы и практически отработаны пакеты специального программного обеспечения, позволяющие создавать и настраивать нейронные сети для решения различных приклад-

ных задач. Так для решения задачи идентификации космических радиолокационных сигналов датчиками обнаружения был выбран пакет программного обеспечения, аналогичный по функционалу Fuzzy Expert [7] реализующий трехслойную нейронную сеть с обучением [15].

Задача распознавания была сформулирована следующим образом:

Имеется некоторое множество объектов  $\{b_1, b_2, \dots, b_N\}$ , представляющих в нашем случае факты ведения радиолокационного наблюдения (обнаруженные сеансы работы РСА). Априорно это множество разделено на классы  $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_M\}$ , т.е. совокупность режимов работы РСА (табл. 1) и тип системы КА ДЗЗ. Данные классы являются алфавитом распознавания. Кроме того известны признаки  $\{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ , на языке которых могут быть описаны классы и отдельные объекты, т.е. составлен рабочий словарь признаков [16].

Положим, что классы априорно описаны на языке признаков. В общем виде такое описание можно представить в форме соотношений, содержащих априорную информацию о классах объектов, записанную в базу данных.

$$Y_i = F_i(g_1, g_2, \dots, g_n), i = \overline{1, M}, \quad (12)$$

В случае регистрации датчиком обнаружения сеанса ведения радиолокационной съемки  $b_j$  проводится измерение значений, по которым формируется вектор признаков, описывающих объект. Требуется распознать объект  $b_j$ , т.е. установить, к какому классу он может быть отнесен. Для решения этой задачи необходимо сопоставить с помощью того или другого алгоритма распознавания апостериорной информации о распознаваемом объекте, представленной в виде вектора  $g_j^0 = \{g_1^0, g_2^0, \dots, g_n^0\}$ , с априорной информацией о классах объектов, формализованной в виде соотношения (12).

Алфавит классов был сформирован на основе априорной информации о режимах работы КА ДЗЗ, за основу были взяты режимы, приведенные в табл. 1. Построение признакового пространства системы распознавания было произведено на основе рабочего словаря признаков радиолокационных сигналов (табл. 2).

Настройка нейронной сети проводилась на реальных данных, полученных в ходе экспериментальных работ с датчиками обнаружений и в ходе моделирования режимов работы РСА на стенде

комплекса моделирования радиолокационных средств ДЗЗ в 4 ЦНИИ Минобороны России.

В результате настройки и обучения была сформирована и опробована нейронная сеть, показавшая на ряде тестов результат правильного распознавания режимов работы РСА на основе обработки неизвестных сигналов с вероятностью до 85%.

Седьмой этап методики состоит в автоматизированном обновлении базы данных сигнатур известных и неизвестных радиосигналов на основе анализа их параметров.

На восьмом этапе методики по результатам идентификации известных и неизвестных радиосигналов от средств КА ДЗЗ осуществляется формирование выходной информации, такой как тип КА ДЗЗ, режим работы РСА, расчетный район радиолокационного наблюдения, расчетные значения вероятности наблюдения объектов в заданном районе и т.п.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, предложенная методика регистрации и идентификации параметров зондирующих радиолокационных сигналов, представляющая собой комбинацию классических методов распознавания, дополненную элементами искусственного интеллекта в виде нейронной сети, обеспечивает на основе данных от датчиков обнаружения по параметрам принятого радиолокационного сигнала определение режима ведения радиолокационного наблюдения.

Методика позволяет определить зону ведения радиолокационного наблюдения, разрешение радиолокационного изображения получаемого космическими средствами дистанционного зондирования Земли и тем самым позволяет оценить уровень детализации снимаемого объекта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э., Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010, 674 с.
2. Лисицин А. Космические системы дистанционного зондирования Земли зарубежных стран // Зарубежное военное обозрение. 2019, №7, с. 63–67.
3. Меньшаков Ю.К. Виды и средства иностранных технических разведок: учеб. пособие / под ред. М.П. Сычева. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 656 с.:ил.
4. Сайт <http://bastion-karpenko.ru/army-2020> (проверен 16.03.2021 г.).

5. Куприянов А.И. Радиосигналы и радиоустройства в информационных системах: учебное пособие: в 2 ч. Ч. 1: Радиосистемы и радиосигналы. М: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, 118 с.
6. Аксенов С.В., Новосельцев В.Б. Организация и использование нейронных сетей (методы и технологии) / Под общ. ред. В.Б. Новосельцева. – Томск: Изд-во НТЛ, 2006, 128 с.
7. Комарцова Л.Г., Максимов А.В. Нейрокомпьютеры: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004, 400 с.: ил.
8. Николенко С., Кадурич А., Архангельская Е. Глубокое обучение. СПб.: Питер, 2020, 480 с.: ил.
9. <http://www.celstrak.com/NORAD/elements> (проверен 16.03.2021 г.).
10. Вентцель Е.С. Исследование операций, М.: Советское радио, 1972, 552 с.
11. Крайзмер Л.П., Кулик Б.А. Обработка сложных сигналов на основе использования нейрокомпьютеров // Персональный компьютер на вашем рабочем месте. С.-П.: СИГУ. 1991, с. 228–231.
12. Использование апостериорной информации при реализации систем радиолокационного распознавания с применением нейросетевых технологий / Д.Ф. Бескостый, С.Г. Боровиков, Ю.В. Ястребов, И.А. Созонтов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019, т. 22, №5, с. 52–60.
13. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского И.Д. Рудинского. – М. Финансы и статистика, 2002, 344 с: ил.
14. Хайкин Саймон Нейронные сети: полный курс, 2-е издание.: Пер. с англ. М. Издательский дом «Вильямс», 2006, 1104 с.: ил. Парал. тит. англ.
15. <http://www.github.com/Fuzzy Elements> (проверен 21.12.2020 г.).
16. Горелик А.Л., Барабаш Ю.Л., Кривошеев О.В., Эпштейн С.С. Селекция и распознавание на основе локационной информации / Под ред. Горелика А.Л. – М.: Радио и связь, 1990, 240 с.