

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFOCOMMUNICATION TECHNOLOGIES

УДК 621.39

DOI 10.18413/2687-0932-2020-47-3-648-660

Исследование решающих правил распознавания объектов в малобазовой поляризационной измерительной системе при субполосной обработке сигналов

И.И. Олейник

Белгородский государственный национальный исследовательский
университет, ул. Победы, д. 85, г. Белгород, 308015, Россия
E-mail: oleinik_i@bsu.edu.ru

Аннотация

Показано, что в малобазовых поляризационных измерительных системах параметры принимаемых сигналов определяются характеристиками объекта при отражении от него зондирующих сигналов различных поляризаций. Показана возможность использования субполосного анализа для формирования векторов признаков распознавания. В качестве признаков распознавания предложено использование поляризационно-субполосного вектора, сформированного из принятых, отраженных от объекта сигналов. Разработаны двухальтернативные и многоальтернативные решающие правила распознавания и определены критерии принятия решений. Исследованы особенности построения решающих правил, определяемые рангом поляризационно-субполосной ковариационной матрицы объекта. Предлагается методика классификации объектов на этапе обучения с использованием оценок параметров распределения поляризационно-субполосного вектора.

Ключевые слова: малобазовая система, поляризация, распознавание, решающее правило, оценка, субполосный анализ, вектор, матрица, сигнал, гипотеза, ранг, классификация, ошибка, порог.

Для цитирования: Олейник И.И. 2020. Исследование решающих правил распознавания объектов в малобазовой поляризационной измерительной системе при субполосной обработке сигналов. Экономика. Информатика. 47 (3): 648–660. DOI 10.18413/2687-0932-2020-47-3-648-660.

Investigation of crucial rules for object recognition in a small basic polarization measuring system for sub-band signal processing

I.I. Oleynik

Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia
E-mail: oleinik_i@bsu.edu.ru

Abstract

It is shown that in small basic polarization measuring systems, the parameters of the received signals are determined by the characteristics of the object, when sounding signals of various polarizations are reflected from it. The possibility of using sub-band analysis to generate recognition feature vectors is shown. The use of a polarization-subband vector formed from received signals reflected from the object is suggested as recognition features. Two alternative and multi-alternative decision recognition rules have been developed and decision criteria have been defined. The features of constructing decision rules determined by the rank of the object's polarization-subband covariance matrix are investigated. We propose a method for classifying objects at the training stage, using estimates of the distribution parameters of the polarization-subband vector.

Keywords: small basic systems, polarization, recognition, decision rule, estimation, subband analysis, vector, matrix, signal, hypothesis, rank, classification, error, threshold.

For citation: Oleynik I.I. 2020. Investigation of crucial rules for object recognition in a small basic polarization measuring system for sub-band signal processing. *Economics. Information technologies.* 47 (3): 648–660 (in Russian). DOI 10.18413/2687-0932-2020-47-3-648-660.

Введение

На сегодняшний день обработка информации в многопозиционных радиолокационных измерительных системах выходит на принципиально новый технологический уровень. В таких системах существует возможность сканирования одного и того же объекта несколькими радиолокаторами или несколькими радиолокационными позициями. Данный принцип используется в ММО системах [Черняк, 2011]. Малобазовая радиолокационная система представляет собой систему, для которой антенны всех позиций, как передающих, так и приемных, находятся в пределах средней ширины лепестка диаграммы обратного рассеяния облучаемого объекта [Олейник, 2020]. При этом фронт падающей на антенны системы волны считается плоским в пределах базы (расстояния между приемными пунктами системы).

Принципы формирования, приема и обработки сигналов с поляризационными различиями в таких системах на сегодняшний день изучены недостаточно. Особенно при распознавании радиолокационных объектов в малобазовых поляризационных измерительных системах (МПИС) [Bliss et al., 2003].

Для распознавания объектов в МПИС необходимо решить ряд взаимосвязанных задач: выбор информативных признаков объектов распознавания, выбор способа описания признаков, минимизирующего вычислительные затраты на распознавание, выбор процедуры принятия решений в реальном времени. Спецификой проблемы распознавания объектов является существенная априорная неопределенность относительно количества классов объектов, их признаков и характеристик, что не позволяет использовать традиционные методы распознавания объектов, ориентированные на постобработку данных. Все вышеперечисленное требует разработки оптимальных решающих правил распознавания объектов с учетом всех особенностей построения и функционирования малобазовых поляризационных измерительных систем.

Принципы построения, организация излучения и приема сигналов в малобазовой поляризационной измерительной системе

В общем случае МПИС может иметь различную структуру построения. В частности, могут быть использованы две приемо-передающие позиции, работающие на двух ортогональных поляризациях [Олейник, 2020].

Рассмотрим вариант, при котором МПИС состоит из трех позиций [Олейник, 2020]. Одна позиция состоит из передающего устройства и антенны. При этом антенна может поочередно излучать сигналы двух ортогональных линейных поляризаций (вертикальная и горизонтальная). Вторая и третья позиция, состоящие из антенн и приемных устройств, принимают отраженные от объектов сигналы, причем каждая только на одной линейной поляризации (вертикальной и горизонтальной поляризации).

В качестве антенн могут выступать активные фазированные антенные решетки (АФАР) с определенным сектором электронного сканирования диаграммой направленности (ДН) [Ширман, 1998]. При этом алгоритм сканирования должен обеспечивать излучение и прием сигналов с каждой позиции в одном и том же угловом направлении. Это позволяет одновременно принимать отраженный от одного и того же объекта сигнал на обе приемные позиции.

В результате функционирования такой МПИС производится измерение поляризационного вектора рассеяния (ПВР) объекта [3].

Для обеспечения измерения ПВР необходимо, чтобы были поочередно излучены сигналы двух ортогональных поляризаций. Прием отраженных сигналов необходимо проводить одновременно на обе позиции, для каждого излученного сигнала. В этом случае возможно сформировать ПВР облучаемого объекта для каждого момента времени t [Burdanova et al., 2019; Киселев, 2005]

$$\dot{\mathbf{S}}(t) = (\dot{S}_{gv}(t) \quad \dot{S}_{gg}(t) \quad \dot{S}_{vg}(t) \quad \dot{S}_{vv}(t))^T, \quad (1)$$

где: $\dot{S}(t)$ – комплексные амплитуды на выходе приемных каналов, индекс g обозначает горизонтальную поляризацию, индекс v – вертикальную, первый индекс при S обозначает излучаемую поляризацию, второй – принимаемую (например, $\dot{S}_{vg}(t)$ – был излучен сигнал на вертикальной поляризации, а принят на горизонтальной).

На рис. 1 приведена структура трехпозиционной МПИС с одной передающей и двумя приемными позициями. Символом P_p обозначена передающая позиция. Символом Pr_g – приемная позиция, осуществляющая прием сигналов горизонтальной поляризации, символом Pr_v – приемная позиция, осуществляющая прием сигналов вертикальной поляризации. Символом O обозначен условный фазовый центр. R – расстояние от условного фазового центра до объекта. Символами r_v , r_g и r_p обозначены расстояния от антенн до объекта, для каждой позиции соответственно. В общем случае направление на объект может не совпадать с перпендикуляром к условному фазовому центру и может составлять некий угол α . Расстояния $\Delta r_v = R - r_v$, а $\Delta r_g = R - r_g$. Эти расстояния будут определять разности набега фаз отраженного сигнала относительно условного фазового центра.

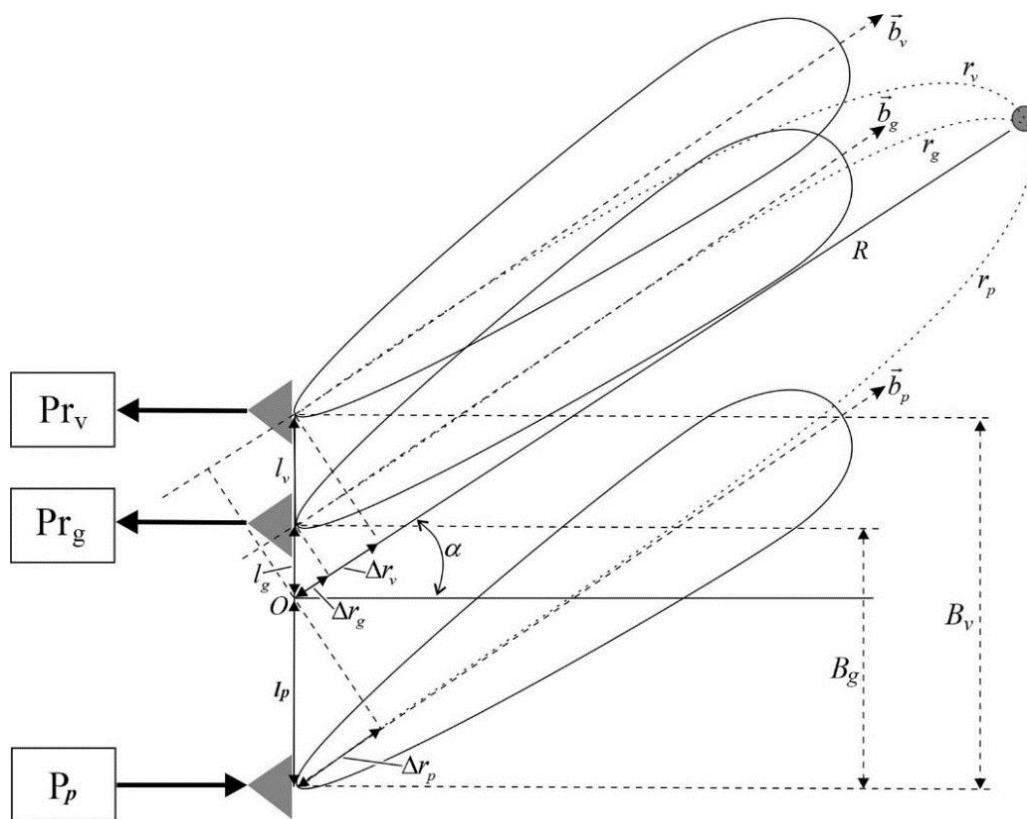


Рис. 1 Малобазовая поляризационная измерительная система
 Fig. 1 Small basic polarizing measuring system

В общем случае антенны всех позиций могут иметь различные характеристики направленности, соответственно и коэффициенты усиления (КУ) антенн будут отличаться. База между позициями характеризуется расстоянием B . Таким образом, для МПИС расстояния B_v и B_g должны быть намного меньше R .

Напряжения на выходе приемных каналов можно записать в виде [Олейник, 2020]

$$\dot{S}_{gg}(t) = Z_{gg} \exp(-j\Psi_{gg}) \dot{I}(t) \sigma_{gg} + \dot{S}_{ug}(t), \quad (2)$$

$$\dot{S}_{gv}(t) = Z_{gv} \exp(-j\Psi_{gv}) \dot{I}(t) \sigma_{gv} + \dot{S}_{uv}(t), \quad (3)$$

$$\dot{S}_{vg}(t) = Z_{vg} \exp(-j\Psi_{vg}) \dot{I}(t) \sigma_{vg} + \dot{S}_{ug}(t), \quad (4)$$

$$\dot{S}_{vv}(t) = Z_{vv} \exp(-j\Psi_{vv}) \dot{I}(t) \sigma_{vv} + \dot{S}_{uv}(t). \quad (5)$$

где:

$$Z_{gg} = K_{Pr g} \frac{1}{R^2} \sqrt{G_{A_{Pr g}} \cdot G_{A_p} \cdot P_{A_p}}, \quad Z_{gv} = K_{Pr v} \frac{1}{R^2} \sqrt{G_{A_{Pr v}} \cdot G_{A_p} \cdot P_{A_p}}, \quad (6)$$

$$Z_{vg} = K_{Pr g} \frac{1}{R^2} \sqrt{G_{A_{Pr g}} \cdot G_{A_p} \cdot P_{A_p}}, \quad Z_{vv} = K_{Pr v} \frac{1}{R^2} \sqrt{G_{A_{Pr v}} \cdot G_{A_p} \cdot P_{A_p}}, \quad (7)$$

с учетом введенных допущений $G_{A_{Pr g}} = G_{A_{Pr v}} = G_{A_p}$, $P_{A_{Pr g}} = P_{A_{Pr v}} = P_{A_p}$,

где: $\dot{S}_{ug}(t)$ и $\dot{S}_{uv}(t)$ – напряжение собственных шумов приемных устройств горизонтальной поляризации и вертикальной поляризации соответственно;

$K_{Pr g}$ и $K_{Pr v}$ – коэффициенты усиления приемных устройств горизонтальной поляризации и вертикальной поляризации соответственно;

$G_{A_{Pr g}}$ и $G_{A_{Pr v}}$ – коэффициенты усиления приемных антенн горизонтальной поляризации и вертикальной поляризации соответственно;

P_{A_g} и P_{A_v} – мощности, излучаемые антенной передающего устройства на горизонтальной и вертикальной поляризации соответственно;

G_{A_p} – коэффициент усиления передающей антенны;

$\Psi_{gg} = -k \cdot 2l_g \sin \alpha$, $\Psi_{gv} = -k \cdot \sin \alpha \cdot (l_p - l_v)$, $\Psi_{vg} = -k \cdot \sin \alpha \cdot (l_p - l_g)$, $\Psi_{vv} = -k \cdot 2l_v \sin \alpha$ – набеги фаз отраженных сигналов для приемных антенн вертикальной и горизонтальной поляризации при соответствующих излученных сигналах;

$k = 2\pi / \lambda$ – волновое число; λ – длина волны;

$\dot{I}(t)$ – множитель, описывающий вид сигнала (модуляцию комплексной огибающей);

σ_{gv} – эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) объекта на вертикальной поляризации, при облучении его сигналом горизонтальной поляризации;

σ_{gg} – ЭПР объекта на горизонтальной поляризации при облучении его сигналом горизонтальной поляризации.

σ_{vv} – ЭПР объекта на вертикальной поляризации при облучении его сигналом вертикальной поляризации;

σ_{vg} – ЭПР объекта на горизонтальной поляризации при облучении его сигналом вертикальной поляризации [Ширман, 2007].

Амплитудный множитель, входящий в выражения (6,7), можно представить в виде

$$\frac{1}{R^2} \approx \frac{1}{r_g r_p} \approx \frac{1}{r_p r_v}. \quad (8)$$

При этом $R \approx r_g \approx r_v \approx r_p$. Это допущение оправдано тем, что расстояния составляют километры, а база B – единицы метров (рис. 1).

Проанализировав полученные выражения, можно отметить, что в малобазовой поляризационной измерительной системе энергетические характеристики принимаемых сигналов будут в основном определяться ЭПР объекта на различных поляризациях. Прослеживается непосредственная зависимость от характеристик объекта при отражении от него зондирующих сигналов различных поляризаций. Это свойство является определяющим при разработке решающих правил распознавания объектов.

Субполосное представление сигналов в частотной области и формирование выборки векторов для распознавания

Принятый и оцифрованный сигнал $\dot{S}(t)$ (один из компонент вектора вида (1)), дискретизированный по времени, можно представить в векторном виде [Бакулев, 2004; Ronald et al., 2004]

$$\vec{S} = (s_1, s_2, \dots, s_Q). \tag{9}$$

Компоненты вектора \vec{S} представляют собой значения сигнала (функции времени), которые соответствуют значению аргумента $q\Delta t$

$$s_q = s(q\Delta t), \quad q = 1, \dots, Q, \tag{10}$$

где: Q – количество отсчетов сигнала; q – номер отсчета; Δt – интервал дискретизации по времени.

В общем случае энергии сигнальных компонент сосредоточены в малом количестве достаточно узких интервалов области определений спектров. При таком подходе возможно разбиение частотной оси на ряд частотных интервалов [Жиляков, 2015]

$$\Delta\omega = 4\pi / (Q - 1). \tag{11}$$

В соответствии с соотношением (11) возможно разбиение оси частот на частотные интервалы (субполосы) в следующем виде [Жиляков, 2015]:

$$\omega_k = [-\omega_{1k}, -\omega_{2k}) \cup [\omega_{1k}, \omega_{2k}), \quad k = 0, \dots, K \tag{12}$$

$$\omega_{10} = 0; \quad \omega_{20} = 2\pi / (Q - 1); \quad \omega_{1k} = \omega_{2k-1}; \quad \omega_{2k} - \omega_{1k} = 4\pi / (Q - 1), \tag{13}$$

где: K – число частотных интервалов; k – номер частотного интервала.

В основе субполосного анализа принято использовать понятие части энергии сигнала, попадающей в заданный частотный интервал [Zhilyakov, 2020]

$$P_k(s) = \int_{\omega \in \Omega_k} |S(\omega)|^2 d\omega / 2\pi. \tag{14}$$

Подставив в (14) выражение

$$S(\omega) = \sum_{q=1}^Q s(q) \exp(-j\omega(q-1)) \tag{15}$$

и проведя ряд преобразований, можно получить представление сигнала непосредственно в области оригиналов в виде квадратичной формы [Zhilyakov, 2020]

$$U_k(\vec{s}) = \vec{s}^T \mathbf{A}_k \vec{s}, \tag{16}$$

где: \mathbf{A}_k – субполосная матрица с элементами

$$a_{\gamma\xi}^k = \frac{\sin[\omega_{2k}(\gamma - \xi)] - \sin[\omega_{1k}(\gamma - \xi)]}{\pi(\gamma - \xi)} \quad \text{при } \gamma \neq \xi;$$

$$a_{\gamma\xi}^k = \frac{\omega_{2k} - \omega_{1k}}{\pi} \quad \text{при } \gamma = \xi; \quad \gamma, \xi = 1, \dots, Q.$$

Субполосная матрица \mathbf{A}_k рассчитывается для каждого частотного интервала k . После преобразования (16) вектор (9) фактически преобразовывается в вектор размерностью k , который можно записать в виде [Zalivin et al., 2020]

$$\vec{\mathbf{U}}_{(k)} = (U_{(1)} \quad U_{(2)} \quad \dots \quad U_{(k)})^T, \tag{17}$$

где: U – доля (часть) энергии сигнала в частотном интервале; k – номер частотного интервала; T – знак транспонирования.

Следовательно, компоненты ПВР (1) при субполосном представлении в спектральной области можно записать в виде вектора размерностью $4k$

$$\vec{\mathbf{U}}_{(4k)} = \begin{pmatrix} \vec{U}_{(k)}^{(gg)} \\ \vec{U}_{(k)}^{(gv)} \\ \vec{U}_{(k)}^{(vg)} \\ \vec{U}_{(k)}^{(vv)} \end{pmatrix}, \tag{18}$$

где каждая из компонент также представляет собой вектор размерностью k

$$\vec{U}_{(k)}^{(gg)} = \begin{pmatrix} U_{(1)}^{(gg)} \\ U_{(2)}^{(gg)} \\ \dots \\ U_{(k)}^{(gg)} \end{pmatrix}, \quad \vec{U}_{(k)}^{(gv)} = \begin{pmatrix} U_{(1)}^{(gv)} \\ U_{(2)}^{(gv)} \\ \dots \\ U_{(k)}^{(gv)} \end{pmatrix}, \quad \vec{U}_{(k)}^{(vg)} = \begin{pmatrix} U_{(1)}^{(vg)} \\ U_{(2)}^{(vg)} \\ \dots \\ U_{(k)}^{(vg)} \end{pmatrix}, \quad \vec{U}_{(k)}^{(vv)} = \begin{pmatrix} U_{(1)}^{(vv)} \\ U_{(2)}^{(vv)} \\ \dots \\ U_{(k)}^{(vv)} \end{pmatrix}. \tag{19}$$

Вектор вида (18), в отличие от (1), будет по сути поляризационно-субполосным вектором (ПСВ) объекта.

В случае, если локатор осуществляет несколько зондирований (пачка), по одному и тому же объекту и выполняются требования к когерентности отраженных сигналов (параметры отраженных сигналов неизменны в течение времени когерентности) [Гринкевич, 2015], то принятую пачку сигналов можно представить в виде выборки из n векторов размерностью $4k$

$$\vec{\mathbf{U}}_{n(4k)} = \begin{pmatrix} \vec{U}_{1(k)}^{(gg)} & \vec{U}_{2(k)}^{(gg)} & \dots & \vec{U}_{n(k)}^{(gg)} \\ \vec{U}_{1(k)}^{(gv)} & \vec{U}_{2(k)}^{(gv)} & \dots & \vec{U}_{n(k)}^{(gv)} \\ \vec{U}_{1(k)}^{(vg)} & \vec{U}_{2(k)}^{(vg)} & \dots & \vec{U}_{n(k)}^{(vg)} \\ \vec{U}_{1(k)}^{(vv)} & \vec{U}_{2(k)}^{(vv)} & \dots & \vec{U}_{n(k)}^{(vv)} \end{pmatrix}, \tag{20}$$

где: n – количество импульсов в пачке; $i = 1, \dots, n$ – текущий номер зондирования.

В общем случае выборка (20) является случайными измерениями (является многомерной случайной величиной), поскольку измерения подвержены случайным возмущениям, вероятностный характер которых сказывается на всех стадиях. Это погрешности самого измерителя, неточности регистрации и шумы в каналах при передаче данных измерений, ошибки округления при вычислениях и ряд других параметров. Следовательно, возможно определить многомерное распределение вероятности данных измерений и провести оценку его моментов.

Решающие правила распознавания объектов и особенности их построения

В случае предположения Гауссовости (нормальности) случайных измерений, вероятностное распределение выборки может характеризоваться двумя моментами – первым начальным (математическим ожиданием) и вторым центральным (ковариационной матрицей) [Богачев, 1997]. Элементы ковариационной матрицы (КМ) отражают степень статистической

связи элементов исходного вектора фиксируемых параметров между собой. Вектор математического ожидания (МО) можно записать в виде [Бурданова и др., 2008]

$$\vec{\mathbf{m}}_{(4k)} = \begin{pmatrix} \vec{m}_{(k)}^{(gg)} \\ \vec{m}_{(k)}^{(gv)} \\ \vec{m}_{(k)}^{(vg)} \\ \vec{m}_{(k)}^{(vv)} \end{pmatrix}, \quad (21)$$

где элементы вектора $\vec{\mathbf{m}}_{(4k)}$ вычисляются в соответствии с выражениями

$$\vec{m}_{(k)}^{(gg)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \vec{U}_{i(k)}^{(gg)}, \quad \vec{m}_{(k)}^{(gv)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \vec{U}_{i(k)}^{(gv)}, \quad \vec{m}_{(k)}^{(vg)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \vec{U}_{i(k)}^{(vg)}, \quad \vec{m}_{(k)}^{(vv)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \vec{U}_{i(k)}^{(vv)}, \quad (22)$$

где: нижний символ (k) обозначает размерность вектора (количество частотных интервалов или субполос); верхний символ (например (gg)) обозначает вид поляризации излученной и принятой поляризации, соответственно выражению (1).

Размерность вектора МО (21) будет, соответственно, $4k$.

Ковариационную матрицу можно записать в виде выражения [Бурданова и др., 2007]

$$\mathbf{M}_{(4k \times 4k)} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\vec{U}_{i(4k)} - \vec{\mathbf{m}}_{(4k)}) (\vec{U}_{i(4k)} - \vec{\mathbf{m}}_{(4k)})^T. \quad (23)$$

Размерность такой матрицы будет равна $4k \times 4k$, а сама матрица имеет блочную структуру. Следовательно, блоки матрицы можно представить в соответствии с выражениями

$$\begin{aligned} M_{(k \times k)}^{(gg:gg)} &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\vec{U}_{i(k)}^{(gg)} - \vec{m}_{(k)}^{(gg)}) (\vec{U}_{i(k)}^{(gg)} - \vec{m}_{(k)}^{(gg)})^T \\ M_{(k \times k)}^{(gg:gv)} &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\vec{U}_{i(k)}^{(gg)} - \vec{m}_{(k)}^{(gg)}) (\vec{U}_{i(k)}^{(gv)} - \vec{m}_{(k)}^{(gv)})^T \\ M_{(k \times k)}^{(gg:vg)} &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\vec{U}_{i(k)}^{(gg)} - \vec{m}_{(k)}^{(gg)}) (\vec{U}_{i(k)}^{(vg)} - \vec{m}_{(k)}^{(vg)})^T \\ M_{(k \times k)}^{(gg:gv)} &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\vec{U}_{i(k)}^{(gg)} - \vec{m}_{(k)}^{(gg)}) (\vec{U}_{i(k)}^{(gv)} - \vec{m}_{(k)}^{(gv)})^T \\ &\dots \\ M_{(k \times k)}^{(vv:vv)} &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\vec{U}_{i(k)}^{(vv)} - \vec{m}_{(k)}^{(vv)}) (\vec{U}_{i(k)}^{(vv)} - \vec{m}_{(k)}^{(vv)})^T \end{aligned}$$

Таким образом, ковариационную матрицу (23) можно представить в виде

$$\mathbf{M}_{(4k \times 4k)} = \begin{pmatrix} M_{(k \times k)}^{(gg:gg)} & M_{(k \times k)}^{(gg:gv)} & M_{(k \times k)}^{(gg:vg)} & M_{(k \times k)}^{(gg:vv)} \\ M_{(k \times k)}^{(gv:gg)} & M_{(k \times k)}^{(gv:gv)} & M_{(k \times k)}^{(gv:vg)} & M_{(k \times k)}^{(gv:vv)} \\ M_{(k \times k)}^{(vg:gg)} & M_{(k \times k)}^{(vg:gv)} & M_{(k \times k)}^{(vg:vg)} & M_{(k \times k)}^{(vg:vv)} \\ M_{(k \times k)}^{(vv:gg)} & M_{(k \times k)}^{(vv:gv)} & M_{(k \times k)}^{(vv:vg)} & M_{(k \times k)}^{(vv:vv)} \end{pmatrix}. \quad (24)$$

Блоки матрицы будут иметь размерность $k \times k$, а сама матрица $4k \times 4k$. Данную матрицу, в общем случае, можно считать поляризационно-субполосной ковариационной матрицей (ПСКМ) объекта.

При Гауссовом распределении выборки, плотность вероятности i -го вектора выборки может быть записана в виде выражения [Бурданова и др., 2008; Богачев, 1997]

$$P(\vec{U}_{i(4k)}) = \frac{1}{2\pi \det \mathbf{M}_{(4k \times 4k)}} \exp \left[-\frac{1}{2} (\vec{U}_{i(4k)} - \vec{\mathbf{m}}_{(4k)})^T \mathbf{M}_{(4k \times 4k)}^{-1} (\vec{U}_{i(4k)} - \vec{\mathbf{m}}_{(4k)}) \right]. \quad (25)$$

Свойство нормальности признаков сильно упрощает вид решающей функции, так как решающая функция оказывается линейной комбинацией наблюдений, и ее распределение вновь будет нормальным. Все виды решающих правил основаны на формировании отношения правдоподобия и его сравнении с определенным порогом, значение которого определяется выбранным критерием качества [Фомин и др., 1986].

При статистическом обнаружении и распознавании плотности вероятности распределения признаков априори неизвестны, поэтому в решающие правила подставляются не сами плотности вероятности, а их оценки, получаемые в процессе обучения. Соответственно, в решающем правиле с порогом сравнивается не само отношение правдоподобия, а его оценка, полученная в ходе обучения [Фомин, 1986].

В этом случае задачей параметрического обучения будет оценивание параметров (вектора средних (МО) и ПСКМ) нормальных плотностей вероятностей, используемых в решающем правиле. Поэтому в дальнейшем будем использовать не моменты распределения, а их оценки.

Блочная и симметричная структура ПСКМ позволяет сделать вывод, что она может оказаться вырожденной (сингулярной). Для преодоления сингулярности ПСКМ возможно использовать достаточно хорошо разработанный метод анализа главных компонент [Pearson, 1901], заключающийся в том, что подбирается базис, в котором ковариационная матрица не будет сингулярной [Айвазян и др., 1989].

Для этого, в качестве η -мерного базиса $E(\bar{\mathbf{U}})$ выбираются все η нормированные собственных векторов $\bar{\mathbf{b}}_j^0 (j = \overline{1, \eta})$, соответствующих ненулевым собственным значениям l_n ПСКМ. При этом ранг ПСКМ $\text{rg} \mathbf{M} = \eta$. В общем случае должны выполняться условия $\eta \leq 4k$. Тогда матрица перехода \mathbf{B} размера $4k \times \eta$ будет состоять из векторов $\bar{\mathbf{b}}_j^0$, расположенных столбцами [Либенсон и др., 1976]. Матрица \mathbf{B} должна удовлетворять условию $\mathbf{B}^T \mathbf{B} = \mathbf{I}$, где \mathbf{I} – единичная матрица размерности $\eta \times \eta$. Выражения для пересчета исходного вектора и оценок моментов распределения можем записать в виде [Либенсон и др., 1976; Мокеев и др., 2013]

$$\bar{\mathbf{Y}}_{(\eta)} = \mathbf{B}_{(4k \times \eta)} \bar{\mathbf{U}}_{(4k)}, \bar{\boldsymbol{\mu}}_{(\eta)} = \mathbf{B}_{(4k \times \eta)} \bar{\mathbf{m}}_{(4k)}, \mathbf{T}_{(\eta \times \eta)} = \mathbf{B}_{(\eta \times 4k)}^T \mathbf{M}_{(4k \times 4k)} \mathbf{B}_{(4k \times \eta)}, \quad (26)$$

где: $\bar{\mathbf{Y}}_{(\eta)}$ – ПСВ в новом базисе размерностью η , полученный из исходного, путем пересчета; $\bar{\boldsymbol{\mu}}_{(\eta)}$ (оценка вектора МО) и ПСКМ $\mathbf{T}_{(\eta \times \eta)}$ – пересчитанные в базис размерности η .

Плотность вероятности (25) в новом базисе можно записать в виде [Zalivin et al., 2020]

$$P(\bar{\mathbf{Y}}_{i(\eta)}) = \frac{1}{2\pi \det \mathbf{T}_{(\eta \times \eta)}} \exp \left[-\frac{1}{2} (\bar{\mathbf{Y}}_{i(\eta)} - \bar{\boldsymbol{\mu}}_{(\eta)})^T \mathbf{T}_{(\eta \times \eta)}^{-1} (\bar{\mathbf{Y}}_{i(\eta)} - \bar{\boldsymbol{\mu}}_{(\eta)}) \right]. \quad (27)$$

В общем случае возможны различные варианты построения решающих правил. Может быть двухальтернативный вариант, или многоальтернативный вариант. Вид решающего правила будет определяться решаемой задачей. Соответственно и критерии принятия решений могут быть различны.

Рассмотрим несколько примеров построения решающих правил и определим их особенности.

Вариант двухальтернативного решающего правила.

Гипотеза H_1 – принятый сигнал и представленный в виде (20), получен при отражении от объекта 1. Гипотеза H_0 – принятый сигнал получен при отражении от другого объекта. Решающее правило в данном случае формируется в виде отношения правдоподобия и сравнения его с порогом [Фукунага, 1979]. После логарифмирования решающее правило может быть записано в виде [Zalivin et al., 2020]

$$\ln L = \frac{n}{2} \ln \frac{\det \mathbf{T}_{1(\eta)}}{\det \mathbf{T}_{0(\eta)}} + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n ((\bar{\mathbf{Y}}_{i(\eta)} - \bar{\boldsymbol{\mu}}_{1(\eta)})^T \cdot (\mathbf{T}_{1(\eta \times \eta)})^{-1} \cdot (\bar{\mathbf{Y}}_{i(\eta)} - \bar{\boldsymbol{\mu}}_{1(\eta)}) -$$

$$-(\vec{Y}_{i(\eta)} - \vec{\mu}_{0(\eta)})^T \cdot (\mathbf{T}_{0(\eta \times \eta)})^{-1} \cdot (\vec{Y}_{i(\eta)} - \vec{\mu}_{0(\eta)}) > \ln C. \quad (28)$$

Оценки вектора МО $\vec{\mu}_{1(\eta)}$ и ПСКМ $\mathbf{T}_{1(\eta \times \eta)}$ должны быть получены с использованием обучающей выборки вида (20), полученной априори, по заранее известному объекту 1 (индекс 1 означает объект 1). На вход решающего правила подается контрольная выборка, получаемая в текущих измерениях по априори неизвестному объекту. Оценки вектора МО $\vec{\mu}_{0(\eta)}$ и ПСКМ $\mathbf{T}_{0(\eta \times \eta)}$ формируются по контрольной выборке. Индекс 0 означает неизвестный объект (другой объект для гипотезы H_0).

Порог принятия решения можно определить в соответствии с критерием Неймана-Пирсона [Фукунага, 1979], задав вероятность ошибки первого рода α (ложная тревога). Чем меньше заданная α , тем выше порог. При превышении порога принимается гипотеза H_1 – контрольная выборка получена по объекту 1. Гипотеза H_0 принимается во всех остальных случаях.

Основная особенность данного решающего правила заключается в том, что ранги ПСКМ для обоих гипотез должны быть одинаковыми (равны η). Соответственно и размерности выборок так же одинаковы и равны η [Либенсон и др., 1976]. Эта особенность позволяет использовать одну и ту же матрицу \mathbf{B} для пересчета всех выборок и всех оценок, используемых в решающем правиле (28). Причем эта матрица может быть получена априори на этапе обучения [Дикуль и др., 2007].

Вариант многоальтернативного решающего правила.

Используется при возникновении задачи, когда необходимо принять решение о принадлежности входной (контрольной) выборки векторов к одному из классов объектов. Возникает задача многоальтернативного выбора. Решающее правило в многоальтернативном случае можно записать в следующем виде: контрольная выборка вида (20) принадлежит классу x_r , $1 \leq r \leq K$, для которого функция правдоподобия максимальна [Фомин и др., 1986]

$$P_r = \prod_{i=1}^n p_r(\vec{Y}_{i(\eta)}) = \max \left\{ \prod_{i=1}^n p_k(\vec{Y}_{i(\eta)}) \right\}, \quad \text{для } 1 \leq k \leq K \quad (29)$$

где: $p_k(\vec{Y}_{i(\eta)})$ – плотность вероятности, в общем случае, η -мерного нормального закона $N(\vec{Y}_{i(\eta)}, \vec{\mu}_{k(\eta)}, \mathbf{T}_{k(\eta \times \eta)})$; K – общее количество классов; k – номер класса.

Решение о принадлежности контрольной выборки векторов $\vec{Y}_{i(\eta)} \in x_r$ принимается в том случае, когда одновременно выполняются $K - 1$ неравенств

$$P_r \geq P_k, \quad k = 1, 2, \dots, r - 1, r + 1, \dots, K.$$

Переходя к логарифмам отношений правдоподобия, решающее правило в многоальтернативном случае записывается в виде: $\vec{Y}_{i(\eta)} \in x_r$, если выполнены условия [Фомин и др., 1986; Дикуль и др., 2007]

$$G_{rk} = G_r - G_k = \ln P_r - \ln P_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [(\vec{Y}_{i(\eta)} - \vec{\mu}_{k(\eta)})^T (\mathbf{T}_{k(\eta \times \eta)})^{-1} (\vec{Y}_{i(\eta)} - \vec{\mu}_{k(\eta)}) - (\vec{Y}_{i(\eta)} - \vec{\mu}_{r(\eta)})^T (\mathbf{T}_{r(\eta \times \eta)})^{-1} (\vec{Y}_{i(\eta)} - \vec{\mu}_{r(\eta)})] + \frac{n}{2} \ln \frac{\det \mathbf{T}_{k(\eta \times \eta)}}{\det \mathbf{T}_{r(\eta \times \eta)}} > 0. \quad (30)$$

Приведенное многоальтернативное решающее правило (30) имеет ряд особенностей.

Первая особенность.

В данном случае, в качестве критерия принятия решения использован критерий максимального правдоподобия, поскольку вероятности появления классов и платы за ошибки априори неизвестны [Фомин и др., 1986; Дикуль и др., 2007]. Ошибки формулируются отлично от предыдущего варианта.

Ошибкой первого рода назовем отнесение выборки не к тому классу, к которому она на самом деле принадлежит (т. е. отнесение выборки к какому-либо классу x_k , отличному от x_l). Ошибкой второго рода назовем отнесение выборки к какому-либо определенному классу, когда в действительности она ему не принадлежит. Следовательно, вероятность ошибки первого рода можно записать в виде [Фомин и др., 1986]:

$$\alpha_r = P\left\{\bigcup_{k=1}^K [G_k - G_r > 0 | x_r]\right\} = 1 - P\left\{\bigcap_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^K [G_k - G_r \leq 0 | x_r]\right\} = 1 - P\left\{\bigcap_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^K [G_r - G_k > 0 | x_r]\right\}, \quad (31)$$

а вероятность ошибки второго рода представляется в виде [Фомин и др., 1986]:

$$\beta_r = \frac{1}{K-1} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq l}}^K \beta_{rk}, \quad \beta_{rk} = P\left\{\bigcap_{\substack{q=1 \\ q \neq l}}^K [G_r - G_q \leq 0 | x_k]\right\}, \quad q = 1, 2, \dots, K. \quad (32)$$

Вторая особенность.

Для корректного построения решающего правила (30) должно выполняться требование к одинаковой размерности η векторов контрольной выборки $\bar{Y}_{i(\eta)}$, оценок векторов средних (МО) $\bar{\mu}_{k(\eta)}$ и ПСКМ $\mathbf{T}_{k(\eta \times \eta)}$ для всех классов. При этом на этапе обучения появляется возможность провести предварительную классификацию на подклассы по рангам исходных матриц ПСКМ $\text{rg}\mathbf{M}$, которые будут определять размерность пространства признаков распознавания. В качестве признаков распознавания в данном случае выступает исходный вектор $\bar{U}_{(4k)}$ вида (18), который включает в себе все свойства объекта, как поляризационные, так и частотные (спектральные). После классификации по рангам на подклассы на этапе обучения возможно провести классификацию объектов в подклассах с использованием расстояния Махаланобиса [Фукунага, 1979]. В общем случае расстояние Махаланобиса может быть определено как мера различия между двумя случайными векторами с одинаковыми распределениями. При этом должны использоваться оценки моментов распределения, пересчитанные с применением матрицы перехода $\mathbf{B}_{(4k \times \eta)}$ (26). В данном случае значение η будет определять ранг исходных ПСКМ и являться номером подкласса.

Для примера (для классов r и k) выражение для расстояния Махаланобиса можно записать в виде

$$d_{rk}^2 = (\bar{Y}_{k(\eta)} - \bar{Y}_{r(\eta)}) (\mathbf{T}_{k(\eta \times \eta)})^{-1} (\bar{Y}_{k(\eta)} - \bar{Y}_{r(\eta)})^T. \quad (33)$$

При этом должно выполняться требование – расстояние между классами должно быть больше размера классов [Либенсон и др., 1976]. Матрица перехода $\mathbf{B}_{(4k \times \eta)}$ может быть получена на этапе обучения для каждого подкласса [Диккуль и др., 2007].

Заключение

В результате проведенных исследований был получен ряд новых научных результатов.

В малобазовых поляризационных измерительных системах характеристики принимаемых сигналов будут в основном определяться ЭПР объекта на различных поляризациях. Прослеживается непосредственная зависимость параметров сигналов от характеристик объекта, при отражении от него зондирующих сигналов различных поляризаций. Это свойство будет особенно проявляться при использовании сверхширокополосных сигналов с различными видами модуляции, например, для линейной частотной модуляции (ЛЧМ) [Ширман, 1998]. В зависимости от диапазона волн могут проявляться резонансные свойства отражений от объекта [Zalivin et al., 2020], что в свою

очередь позволяет использовать субполосный анализ для формирования векторов признаков распознавания.

В качестве признаков распознавания может выступать поляризационно-субполосный вектор, сформированный из принятых, отраженных от объекта, сигналов. В предположении нормальности случайных измерений вероятностное распределение выборки ПСВ характеризуется двумя моментами – первым начальным (вектором математического ожидания) и вторым центральным, в качестве которого выступает ПСКМ. Это позволяет использовать Байесовский подход к построению решающих правил распознавания различных объектов, как в двухальтернативном, так и в многоальтернативном случаях. Причем возможно использование различных критериев принятия решения. В двухальтернативном случае предложено использование критерия Неймана – Пирсона с заданием величины вероятности ошибки первого рода. Во многоальтернативном случае предпочтительно использование критерия максимального правдоподобия, поскольку априори неизвестны вероятности появления классов и платы за ошибки.

Разработанные решающие правила распознавания имеют ряд особенностей. Они определяются видом ПСКМ. Она может оказаться вырожденной (сингулярной). Для преодоления сингулярности ПСКМ предлагается использовать метод анализа главных компонент, заключающийся в том, что подбирается базис, в котором ковариационная матрица не будет сингулярной. Такой подход позволяет определить базис на этапе обучения и проводить предварительную классификацию объектов (на подклассы) по рангам ПСКМ объектов. Классификация в подклассах проводится на этапе обучения с использованием оценок параметров распределения (вектора средних и ПСКМ объектов) на основе вычисления расстояния Махаланобиса.

Таким образом, показана возможность использовать при распознавании объектов всю совокупность признаков, заключенных в сформированном ПСВ, без предварительной оценки информативности каждого признака.

Список литературы

1. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. 1989. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. Москва. Финансы и статистика: 607.
2. Бакулев П.А. 2004. Радиолокационные системы. М. Радиотехника: 320.
3. Богачев В. И. 1997. Гауссовские меры. Москва. Наука. ФИЗМАТЛИТ: 352.
4. Бурданова Е.В., Денисов А.П., Жилияков Е.Г., Олейник И.И., Синани А.И. 2008. Техническая реализация алгоритмов обнаружения целей на фоне помех в локационных системах с поляризационным зондированием. М. Вопросы радиоэлектроники. Серия: Электронная вычислительная техника, 2: 78–85.
5. Бурданова Е.В., Муромцев В.В., Олейник И.И., Храбростин Д.Б. 2007. Особенности разработки и реализации алгоритмов обработки и отображения информации в обзорной РЛС с полным поляризационным зондированием. Санкт-Петербург. Материалы XXIV Симпозиума: Радиолокационное исследование Природных сред, 6: 98–106.
6. Бурданова Е.В., Денисов А.П., Дикуль О.Д., Новоченко Ю.П., Олейник И.И. 2008. Использование статистических моделей для оценок характеристик радиолокационных систем с поляризационной обработкой информации при принятии решения о наличии объектов на фоне подстилающей поверхности. М. Вопросы радиоэлектроники. Серия: Радиолокационная техника, 2: 56–64.
7. Гринкевич А.В. 2015. Радиолокация. Минск. БГУИР: 190.
8. Дикуль О.Д., Новоченко Ю.П., Олейник И.И. 2007. Многоальтернативные решения в задачах выбора класса принадлежности радиолокационных объектов для систем с поляризационным зондированием. Научные ведомости БелГУ. Серия «информатика, прикладная математика, управление». 7 (38). 4: 56–62.
9. Жилияков Е.Г. 2015. Оптимальные субполосные методы анализа и синтеза сигналов конечной длительности. Автоматика и телемеханика. 4: 51–66.
10. Киселев А.З. 2005. Теория радиолокационного обнаружения на основе использования векторов рассеяния целей. СПб. Наука: 295.

11. Либенсон М.Н., Хесин А.Я., Янсон Б.А. 1975. Автоматизация распознавания телевизионных изображений. Москва. Энергия: 160.
12. Мокеев В.В., Соломахо К.Л. 2013. Об использовании метода главных компонент для анализа деятельности предприятия. Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». 7 (3): 41–46.
13. Олейник И.И. 2020. Анализ характеристик малобазовой поляризационной измерительной системы на основе представления сигналов. Актуальные вопросы науки и техники. Самара. Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. № 7. НИ: ИЦРОН: 28–34.
14. Олейник И.И. 2020. Представление сигналов при обработке информации в малобазовой поляризационной измерительной системе. Экономика. Информатика. 47 (2): 422–431.
15. Фомин Я.А., Тарловский Г.Р. 1986. Статистическая теория распознавания образов. Москва. Радио и связь: 264.
16. Фукунага К. 1979. Введение в статистическую теорию распознавания образов. Москва. Наука: 368.
17. Черняк В.С. 2011. О новых и старых идеях в радиолокации: ММО РЛС. Успехи современной радиоэлектроники, 2: 5–20.
18. Ширман Я.Д. 1998. Справочник по радиоэлектронным системам. М. МАКВИС: 422.
19. Ширман Я.Д. 2007. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория: справочник. М. Радиотехника: 512.
20. Allen R.L., Mills D.W. 2004. Signal analysis. Time, frequency, scale, and structure. Ieee Press. Wiley-interscience. A John Wiley & Sons: 246.
21. Burdanova E.V., Zhilyakov E.G., Mamatov A.V., Nemtsev A.N., Oleynik I.I. 2019. Decisive rule experimental studies to detect objects on the background of the earth surface using polarization differences of radar signals. COMPUSOFT. An International Journal of Advanced Computer Technology, 8(6): 3166–3170.
22. Bliss D.W., Forsythe K.W. 2003. Multiple-input multiple-output (MIMO) radar and imaging: Degrees of freedom and resolution. Records 37th Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, USA, 1: 54–59.
23. Pearson K. 1901. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. Philosophical magazine. 2: 559–572.
24. Zalivin A.N., Oleynik I.I., Pirogenko Y.A. 2020. Decision rule for recognizing small objects based on subband processing of radar signals. Science. Education. Practice: materials of the International University Science Forum (Canada, Toronto). April 22. Infinity Publishing: 197–207.
25. Zhilyakov E.G., Belov S.P., Oleinik I.I., Babarinov S.L., Trubitsyna D.I. 2020. Generalized sub band analysis and signal synthesis. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 9 (1): 78–86.

References

1. Ayvazyan S.A., Bukhshtaber V.M., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. 1989. Applied statistics. Classification and dimension reduction. Moscow. Finance and statistics: 607 (in Russian).
2. Bakulev P.A. 2004. Radar systems: textbook for universities. M. Radio engineering: 320 (in Russian).
3. Bogachev V.I. 1997. Gaussian measure. Moscow. The science. FIZMATLIT: 352.
4. Burdanova E.V., Denisov A.P., Zhilyakov E.G., Oleynik I.I., Sinani A.I. 2008. Technical implementation of algorithms for detecting targets against the background of interference in location systems with polarizing sensing. Series: Electronic computing. 2: 78–85 (in Russian).
5. Burdanova E.V., Muromtsev V.V., Oleynik I.I., Khrabrostin D.B. 2007. Features of development and implementation of algorithms for processing and displaying information in a survey radar with full polarization sensing. Saint-Petersburg. Materials of the XXIV Symposium: Radar research of Natural environments. Issue 6: 98–106 (in Russian).
6. Burdanova E.V., Denisov A.P., Dikul O.D., Novachenko Yu.P., Oleynik I.I. 2008. Using statistical models for evaluating the characteristics of radar systems with polarizing information processing when making a decision about the presence of objects on the background of the underlying surface. Series: Radar equipment. Vol. 2: 56–64 (in Russian).
7. Grinkevich A.V. 2015. Radar. Minsk. BGUIR: 190 (in Russian).
8. Dikul O.D., Novachenko Yu.P., Oleinik I.I. 2007. Multi-alternative solutions to the problems of selecting the class of ownership of radar objects for systems with polarizing sensing. Scientific sheets of BelSU. Series "computer science, applied mathematics, management". 7 (38). 4: 56–62 (in Russian).

9. Zhilyakov E.G. 2015. Optimal subband methods for analyzing and synthesizing signals of finite duration. Automation and telemechanics. no 4: 51–66 (in Russian).
10. Kiselev A.Z. 2005. Theory of radar detection based on the use of target scattering vectors. SPB. Science: 295 (in Russian).
11. Libenson M.N., Khesin A.Ya., Yanson B.A. 1975. Automation of recognition of television images. Moscow. Energy: 160 (in Russian).
12. Mokeev V.V., Solomakho K.L. 2013. On the use of the principal components method for analyzing the company's activities. Bulletin of YuUrGU. Series "Economics and management". 7 (3): 41–46 (in Russian).
13. Oleynik I.I. 2020. Analysis of the characteristics of a small basic polarizing measuring system based on signal representation. Current issues of science and technology. Samara. Collection of scientific papers on the results of the international scientific and practical conference. № 7. NN: ITSRON: 28–34.
14. Oleynik I.I. 2020. Representation of signals when processing information in a low-phase polarization measuring system. Economy. Computer science. 47 (2): 422–431 (in Russian).
15. Fomin Ya.A., Tarlovsky G. R. 1986. Statistical theory of pattern recognition. Moscow. Radio and communications: 264 (in Russian).
16. Fukunaga K. 1979. Introduction to the statistical theory of pattern recognition. Moscow. Science: 368 (in Russian).
17. Chernykh V.S. 2011. About new and old ideas in radar: MIMO RLS. Achievements of modern radio electronics, 2: 5–20 (in Russian).
18. Shirman Y.D. 1998. Electronic Systems Reference Book. M. МАКВИС: 422 (in Russian).
19. Shirman Y.D. 2007. Radio-electronic systems: Fundamentals of construction and theory: Handbook. M. radio engineering: 512 (in Russian).
20. Allen R.L., Mills D.W. 2004. Signal analysis. Time, frequency, scale, and structure. Ieee Press. Wiley-interscience. A John Wiley & Sons: 246.
21. Burdanova E.V., Zhilyakov E.G., Mamatov A.V., Nemtsev A.N., Oleynik I.I. 2019. Decisive rule experimental studies to detect objects on the background of the earth surface using polarization differences of radar signals. COMPUSOFT. An International Journal of Advanced Computer Technology, 8(6): 3166–3170.
22. Bliss D.W., Forsythe K.W. 2003. Multiple-input multiple-output (MIMO) radar and imaging: Degrees of freedom and resolution. Records 37th Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, USA, 1: 54–59.
23. Pearson K. 1901. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. Philosophical magazine. 2: 559–572.
24. Zalivin A.N., Oleynik I.I., Pirogenko Y.A. 2020. Decision rule for recognizing small objects based on subband processing of radar signals. Science. Education. Practice: materials of the International University Science Forum (Canada, Toronto). April 22. Infinity Publishing: 197–207.
25. Zhilyakov E.G., Belov S.P., Oleinik I.I., Babarinov S.L., Trubitsyna D.I. 2020. Generalized sub band analysis and signal synthesis. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 9 (1): 78–86.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Олейник Иван Иванович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий Белгородского государственного национального исследовательского университета, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivan I. Oleynik, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies Belgorod National Research University, Belgorod, Russia