

Визуальный когнитивный контроль радиотехнических сигналов систем космического назначения

Ю.Г. Емельянова^{1,А}, М.В. Хачумов^{2,В,С}

^А ИПС им. А.К. Айламазяна РАН (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт программных систем им. А.К. Айламазяна Российской академии наук ИПС им. А. К. Айламазяна РАН)

^В ФИЦ ИУ РАН (Федеральное государственное учреждение Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук Институт системного анализа)

^С РУДН (Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов»)

¹ ORCID: 0000-0001-7735-6820, yuliya.emelyanowa2015@yandex.ru

² ORCID: 0000-0001-5117-384X, khmike@inbox.ru

Аннотация

Разработан и исследован метод когнитивного графического представления временных последовательностей, позволяющий визуально классифицировать радиотехнические сигналы и оценивать степень их зашумленности. Метод опирается на построение упорядоченного по информационной значимости набора признаков. В свою очередь, информативность определяется формальным вкладом признака в качество распознавания типа сигнала. Построение когнитивных образов проводится, таким образом, в несколько этапов: 1) определение числовых признаков типовых сигналов, 2) ранжирование и отбор наиболее информативных признаков, 3) построение когнитивных графических образов, визуализирующих многомерный вектор признаков сигнала, 4) интерпретация когнитивных образов оператором.

Для построения когнитивно-графических образов сигналов используется метод интегрального контурного представления «полярная развертка». Всего вычисляется срок информативных параметров сигнала (признаков). Для повышения селективности полярной развертки признаки ранжированы в порядке убывания информативности методами Add и Del. Введена операция вычитания сигналов, определенная над их информативными параметрами. С целью повышения качества визуального распознавания в когнитивные образы добавлены монохромные полутона. Для усиления восприятия в контурные представления разностных образов введены цветояркие компоненты. Чувствительность когнитивных образов к существенным зашумлениям сигналов выражается в изменении формы, полутона и цветояркого представления полярных разверток. Приведено сравнение качества распознавания сигналов с помощью метрик и визуального распознавания полярных разверток. В заключительной части даны рекомендации оператору, принимающему решение, по типу и степени зашумления радиотехнического сигнала.

Ключевые слова: радиотехнический сигнал, признаковое пространство, информационная значимость, распознавание, когнитивная графика, когнитивный образ, визуализация многомерных данных, анализ радиотехнических сигналов, интерпретация когнитивного образа.

Введение

Одной из важных задач обработки радиотехнических сигналов, поступающих от систем космического назначения, является их оперативный анализ с целью обнаружения нештатных ситуаций и поддержки принятия решений человека-оператора [1-3]. Современное человеко-машинное взаимодействие строится на базе технологий образного представления и интерпретации больших объемов информации, способствующих быстрому принятию решений. Когнитивная визуализация данных служит перспективным направлением, дополняющим средства контроля и диагностики интерфейса командно-измерительных систем (НС КИС). Однако в настоящее время нет единых принципов построения когнитивных образов, способных нести пользователям в обобщенных, наглядных, легко и надежно воспринимаемых формах большие объемы и интенсивные потоки информации. Как правило, образы создаются индивидуально с учетом конкретной прикладной области и интерпретируются экспертом на основе обучения и накопленных знаний [4].

Разработка инструментов когнитивной графики началась сравнительно недавно. Одно из ранних определений когнитивной графики, в частности, дается в работе [5] применительно к медицинской тематике: «Когнитивная графика – это совокупность визуальных представлений, помогающих делать выводы о сложных когнитивных проблемах таких как диагностика и мониторинг». В русскоязычной литературе термин «когнитивная графика» (КГ) впервые был введен Зенкиным А.А. По его определению «когнитивная графика» – это совокупность приемов и методов образного представления условий задачи, которая позволяет либо сразу увидеть решение, либо получить подсказку для его нахождения» [6]. Существенный вклад в развитие методов когнитивной графики и визуализации информации внесен отечественными исследователями. К ним следует отнести Д.А. Поспелова [7], А.А. Зенкина [6], А.А. Башлыкова [8], М.Н. Бурдаева [9], А.Е. Янковскую [10], В.Г. Гришина [11], А.Ю. Зиновьева [12], Ю.В. Новоселова [13] и др. Среди зарубежных исследований можно выделить работы D.E. Kieras [14], T. Höllt [15] и F. Fischer [16].

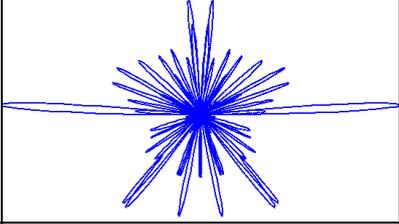
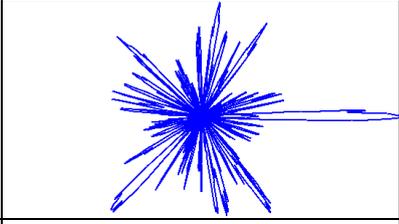
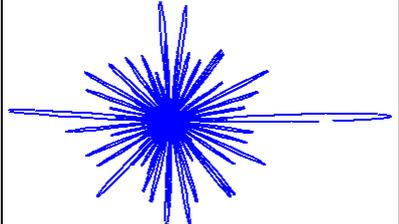
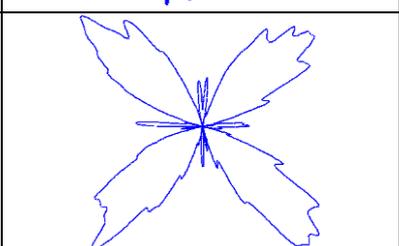
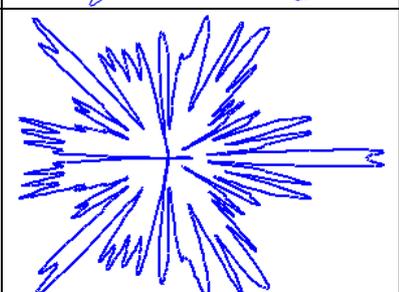
Предложенный метод является универсальным и может быть использован не только для контроля зашумленности радиосигналов, но и для контроля сбоя датчиков ориентации космических аппаратов, состояния аппаратуры НС КИС. Приведенные алгоритмы построения образов могут быть использованы в других прикладных областях, например, для контроля и диагностики энергетических установок, для определения степени тяжести заболевания пациентов в медицине.

1. Формирование когнитивного образа радиотехнических сигналов на основе полярной развертки

В таблице 1 представлены формулы, которые могут быть использованы для создания полярных разверток радиотехнических сигналов. Причем, формула (1) («звезда») была предложена Гришиным [11], а формулы (2-5) предложены авторами в представленной работе.

В таблице приняты следующие обозначения: $x = (x_1, \dots, x_n)$ – вектор, элементами которого являются информативные параметры сигнала. При этом каждая i -я точка контура имеет координаты $(\varphi, \rho(\varphi))$, где $0 \leq \varphi < 360$.

Таблица 1 – Методы представления полярных разверток

№	Формула	Когнитивный образ синусоиды	Номер Формулы
1	$\rho(\varphi) = \sum_{k=1}^n x_k \sin(k\varphi)$		(1)
2	$\rho(\varphi) = \sum_{k=1}^n x_k (\cos(k\varphi) + \sin^k(k\varphi))$		(2)
3	$\rho(\varphi) = \sum_{k=1}^n x_k (1 + k(\cos(k\varphi) + \sin(k\varphi)))$		(3)
4	$\rho(\varphi) = \sum_{k=1}^n x_k (e(\sin(k\varphi)) - 2 \cos(4\varphi))$		(4)
5	$\rho(\varphi) = \sum_{k=1}^n x_k (1 + 7 \cos(k\varphi) + 4 \sin^2(k\varphi) + 3 \sin^4(k\varphi))$		(5)

Замечено, что чем сложнее формула полярной развертки, тем менее наглядным является образ и тем больше скрываются отличительные особенности. Предлагается использовать для формирования когнитивно-графических образов наиболее простую и, одновременно с этим, удобную для восприятия, полярную развертку «звезда». Ниже перечислены информативные параметры сигнала, используемые при построении контурного образа [17-20] (таблица 2).

Таблица 2 – Информативные параметры сигнала

№	Название	Формула
1	Средняя мощность для дискретного сигнала	$P_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} S_n^2$, где N – число дискретных отсчетов сигнала, S_n – значения дискретных отсчетов сигнала

2	Среднее квадратичное значение за период дискретизации сигнала	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s_n^2}$
3	Среднее значение за период дискретизации сигнала	$M[S] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s_n$
4	Среднее выпрямленное значение за период дискретизации сигнала	$\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |s_n|$
5	Сумма амплитудно-частотных характеристик (АЧХ)	$\sum_{m=0}^{N-1} \sqrt{A_m^2 + B_m^2},$ где $A_m = \sum_{n=0}^{N-1} s_n \cos(2\pi n m / N),$ $B_m = \sum_{n=0}^{N-1} s_n \sin(2\pi n m / N)$
6	Энергия дискретного сигнала	$E = \sum_{n=0}^{N-1} s_n^2$
7	Длительность дискретного сигнала	$T = N \cdot \Delta t,$ где N – число дискретных отсчетов, Δt – период дискретизации
8	Эффективная ширина спектра сигнала – полоса частот, в пределах которой сосредоточена основная энергия сигнала	$\Delta\omega_{\text{эф}} = \frac{1}{F_{\text{max}}} \sum_{n=0}^{N-1} F(\omega),$ где $F(\omega)$ – односторонний спектр мощности, $F_{\text{max}} = \max(F(\omega))$
9	База сигнала – произведение длительности сигнала на эффективную ширину его спектра	$B = \Delta\omega_{\text{эф}} T$
10	Отношение сигнал / шум	$\frac{M[S]}{\sigma[S]},$ где $M[S]$ – среднее значение сигнала, $\sigma[S]$ – среднеквадратическое отклонение сигнала
11	Динамический диапазон	$D = 10 \lg \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{min}}},$ где P_{max} – максимальная мгновенная мощность сигнала, P_{min} – минимальная мгновенная мощность сигнала
12	Объем передаваемой информации	$V = \Delta\omega_{\text{эф}} T D$
13	Дисперсия	$D[S] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (s_n - M[S])^2$

14	Среднеквадратическое отклонение	$\sigma = \sqrt{D[S]}$
15	Норма сигнала	$\|s\| = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s_n^2}$
16	Минимальное значение сигнала на периоде дискретизации	S_{min}
17	Максимальное значение сигнала на периоде дискретизации	S_{max}
18	Размах сигнала	$S_{max} - S_{min}$
19	Экстремальное отклонение от среднего значения	$\max|s_n - M[S]|$
20	Минимальное значение действительной части спектра	$\min(A_m)$
21	Максимальное значение действительной части спектра	$\max(A_m)$
22	Разность между максимальным и минимальным значениями действительной части спектра	$\max(A_m) - \min(A_m)$
23	Сумма значений действительной части спектра	$\sum_{m=0}^{N-1} A_m$
24	Минимальное значение мнимой части спектра	$\min(B_m)$
25	Максимальное значение мнимой части спектра	$\max(B_m)$
26	Разность между максимальным и минимальным значениями мнимой части спектра	$\max(B_m) - \min(B_m)$
27	Сумма значений мнимой части спектра	$\sum_{m=0}^{N-1} B_m$
28	Минимальное значение АЧХ	$\min(R_m)$, где $R_m = \sqrt{A_m^2 + B_m^2}$
29	Максимальное значение АЧХ	$\max(R_m)$
30	Разность между максимальным и минимальным значениями АЧХ	$\max(R_m) - \min(R_m)$
31	Интервал корреляции	$\tau_K = \frac{\pi}{2\Delta\omega_{\text{эф}}}$

32	Минимальное значение фазочастотной характеристики (ФЧХ)	$\min(\varphi_m)$, где $\varphi_m = \arctg\left(\frac{-B_m}{A_m}\right)$
33	Максимальное значение ФЧХ	$\max(\varphi_m)$
34	Разность между максимальным и минимальным значениями ФЧХ	$\max(\varphi_m) - \min(\varphi_m)$
35	Сумма ФЧХ	$\sum_{m=0}^{N-1} \varphi_m$
36	Текущий спектр за промежуток T	$S_T = \sum_{m=0}^{N-1} R_m e^{\varphi_m}$
37	Отношение сигнал/шум в децибелах (дБ)	$Q = 10 \lg \frac{P_{cp}}{D[S]}$, где P_{cp} – средняя мгновенная мощность сигнала
38	Максимальная пропускная способность канала	$C = \Delta\omega_{\text{эф}} \log_2(1 + Q)$
39	Интеграл вероятности	$\Phi(s) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-s_n^2/2}$
40	Среднеквадратическое значение напряжения шума	$\sqrt{F_{max} \Delta\omega_{\text{эф}}}$

Оператору предоставляется возможность самостоятельно формировать когнитивный образ, выбирая состав вектора x из указанных параметров.

Порядок координат вектора $x = (x_1, \dots, x_n)$ не является случайным: первые координаты вектора определяют характер низкочастотных компонент изображения (ориентацию, симметрию и т.п.), а последние координаты – высокочастотных (локальных признаков) [11]. Перестановки координат в векторе информативных параметров $x = (x_1, \dots, x_n)$ могут существенно изменять возможности обнаружения отличий между когнитивными образами для разнотипных сигналов. Так как представление одним контуром более двадцати-тридцати различных x_k является неэффективным, то следует снизить размерность признакового пространства. Ранжирование признаков по убыванию информативности повышает селективность полярной развертки кривой со спектром, задаваемым вектором x . Задача ранжирования формулируется как поиск сочетания и упорядочивания признаков, правильно распознающих ситуацию (радиотехнический сигнал), что позволяет получить наиболее выразительные когнитивные образы дискретных сигналов. Предлагается формировать и ранжировать набор значимых признаков путем применения алгоритмов Add и Del [21, 22]. Применение указанных алгоритмов на каждом шаге требует распознавания типа сигнала и оценки качества распознавания. Задача распознавания формулируется следующим образом.

Построить распознающую функцию $F(\omega)$, $F(\omega) = (F_1(\omega), \dots, F_k(\omega), \dots, F_m(\omega))$, выход которой определяет класс Ω_k произвольного изображения ω , представленного вектором признаков $(x_1(\omega), \dots, x_n(\omega))$,

$$F_k(\omega) = \begin{cases} 1, & \text{если } \omega \in \Omega_k \\ 0, & \text{если } \omega \notin \Omega_k \\ \Delta, & \text{если неизвестно } \omega \in \Omega_k \text{ или } \omega \notin \Omega_k \end{cases}.$$

Для измерения расстояний между образцом и классом предлагается использовать метрику Евклида-Махаланобиса [23, 24], которая хорошо описывает распределение классов. В качестве меры качества классификации выбрана F-мера [25]: $F = 2 \frac{PR}{P+R}$, где P – точность распознавания, R – полнота распознавания.

Пусть $P_u = \{P_1, \dots, P_u, \dots, P_s\}$ – обучающая выборка из s типов сигналов ($s = 15$). P_u – множество прецедентов класса с номером u . Структура выборки представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Структура обучающей выборки

Объекты	Признаки					Группы объектов, название
	x_1	x_2	x_3	...	x_{40}	
1	$x_1^{1,1}$	$x_2^{1,1}$	$x_3^{1,1}$...	$x_{40}^{1,1}$	P_1 , амплитудно-модулированный сигнал
2	$x_1^{1,2}$	$x_2^{1,2}$	$x_3^{1,2}$	...	$x_{40}^{1,2}$
3	$x_1^{1,3}$	$x_2^{1,3}$	$x_3^{1,3}$	...	$x_{40}^{1,3}$
4	$x_1^{2,1}$	$x_2^{2,1}$	$x_3^{2,1}$...	$x_{40}^{2,1}$	P_2 , функция Дирихле
...	...					
7	$x_1^{2,4}$	$x_2^{2,4}$	$x_3^{2,4}$	...	$x_{40}^{2,4}$
8	$x_1^{3,1}$	$x_2^{3,1}$	$x_3^{3,1}$...	$x_{40}^{3,1}$	P_3 , функция Дирихле с шумом
9	$x_1^{3,2}$	$x_2^{3,2}$	$x_3^{3,2}$	...	$x_{40}^{3,2}$
10	$x_1^{3,3}$	$x_2^{3,3}$	$x_3^{3,3}$	...	$x_{40}^{3,3}$
11	$x_1^{4,1}$	$x_2^{4,1}$	$x_3^{4,1}$...	$x_{40}^{4,1}$	P_4 , импульс Гаусса
12	$x_1^{4,2}$	$x_2^{4,2}$	$x_3^{4,2}$	...	$x_{40}^{4,2}$
...
49	$x_1^{15,1}$	$x_2^{15,1}$	$x_3^{15,1}$...	$x_{40}^{15,1}$	P_{15} , треугольный импульс с шумом
50	$x_1^{15,2}$	$x_2^{15,2}$	$x_3^{15,2}$	...	$x_{40}^{15,2}$

Алгоритм 1. (Выделение и нормализация информативных параметров. Формирование учебной выборки).

Дано: набор типовых сигналов, представленных в дискретном виде с шагом 0.2. Каждому типу сигнала в таблице 3 соответствует несколько прецедентов (от одного до шести).

Результат: нормализованная учебная выборка из 40 информативных параметров.

Вычисляются информативные параметры сигналов для каждого обучающего образца по формулам (1-40, таблица 2).

1. Выполняется нормализация полученных характеристик: для каждого информативного параметра по формуле $\bar{x}_k^{u,b} = \frac{x_k^{u,b} - x_{k_min}}{x_{k_max} - x_{k_min}}$, где $x_k^{u,b}$ – значение k -го информативного параметра сигнала с номером b в подвыборке с номером u , x_{k_min} – минимальное значение k -го атрибута, x_{k_max} – максимальное значение k -го атрибута.

2. Вычисляются математические ожидания нормализованных параметров для всех типов сигналов по формуле $M_k^u = \frac{1}{N} \sum_{b=1}^N \bar{x}_k^{u,b}$, где N – количество объектов в подвыборке P_u .

3. Для каждого типа сигнала вычисляется обратная матрица ковариации, элементы матриц ковариации вычисляются следующим образом:

$$C_{uij} = \frac{1}{N-1} \sum_{b=1}^N (\bar{x}_i^{u,b} - M_i^u) (\bar{x}_j^{u,b} - M_j^u), i, j = 1, \dots, 40.$$

В таблице 4 представлены расстояния Евклида между образами в соответствии с принятым признаковым пространством.

Таблица 4 – Расстояние Евклида между эталонными сигналами

№	Название эталонного сигнала	Синусоида	Радиоимпульс	Последовательность треугольных импульсов	Функция Дирихле	Последовательность прямоугольных импульсов
		1	2	3	4	5
1	Синусоида	0	1.06234	0.98495	1.26333	0.92407
2	Радиоимпульс	1.06234	0	1.32460	1.54736	1.32216
3	Последовательность треугольных импульсов	0.98495	1.32460	0	0.80873	0.78621
4	Функция Дирихле	1.26333	1.54736	0.80873	0	0.80384
5	Последовательность прямоугольных импульсов	0.92407	1.32216	0.78621	0.80384	0

Таблица 5 – Расстояние Евклида-Махаланобиса между эталонными сигналами

№	Название эталонного сигнала	Синусоида	Радиоимпульс	Последовательность треугольных импульсов	Функция Дирихле	Последовательность прямоугольных импульсов
		1	2	3	4	5
1	Синусоида	0	1.12659	0.96096	1.58214	0.84224
2	Радиоимпульс	1.12659	0	1.75327	2.40006	1.72658
3	Последовательность треугольных импульсов	0.96096	1.75327	0	0.65090	0.13895
4	Функция Дирихле	1.58214	2.40006	0.65090	0	0.62974
5	Последовательность прямоугольных импульсов	0.84224	1.72658	0.13895	0.62974	0

2. Оптимизация набора информативных признаков

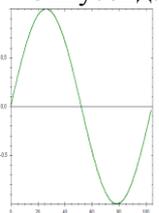
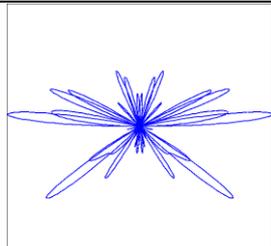
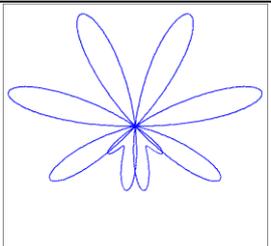
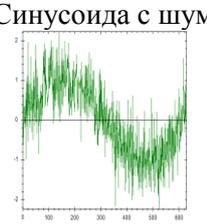
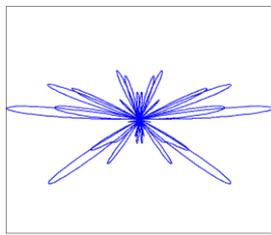
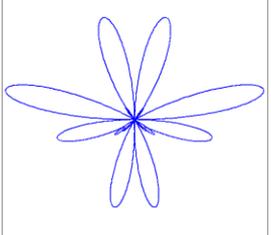
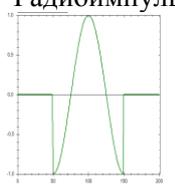
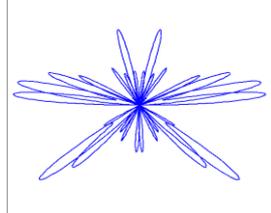
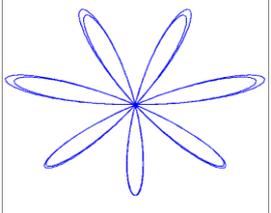
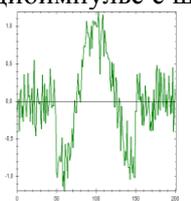
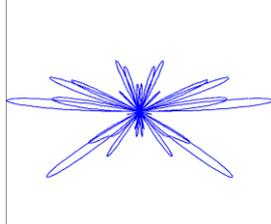
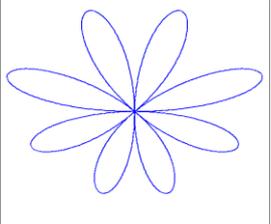
Рассмотрим порядок комбинированного применения методов Del и Add. Сначала производится сортировка информативных признаков по методу Add. Затем производится инверсия полученного набора признаков, ранжированных по убыванию инфор-

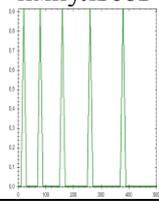
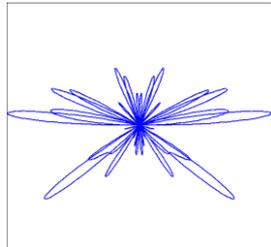
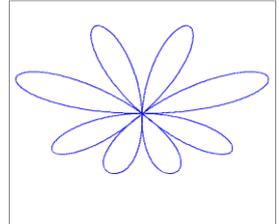
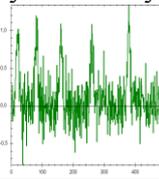
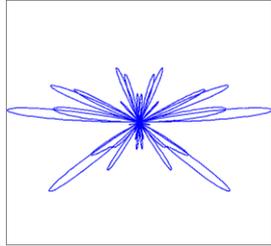
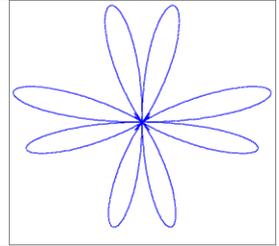
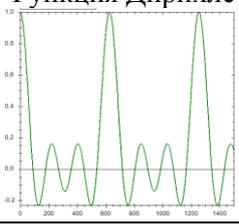
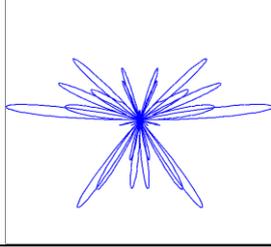
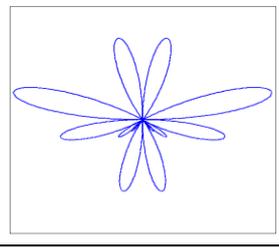
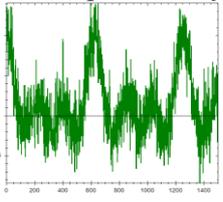
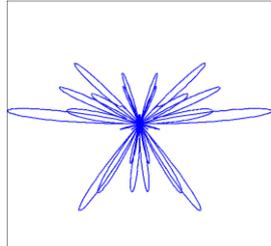
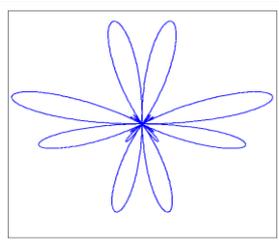
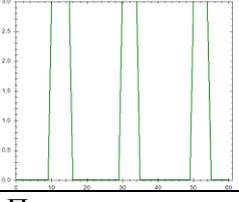
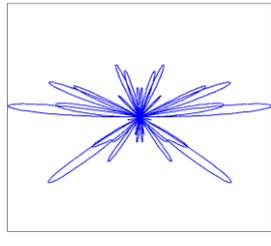
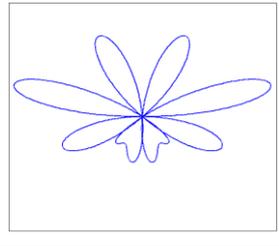
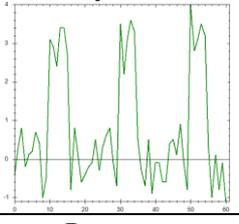
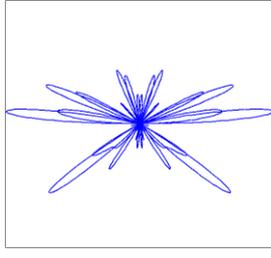
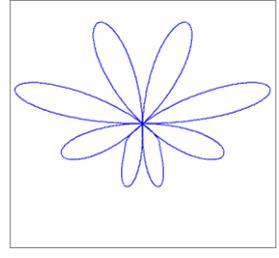
мативности. Далее, выполняется повторное ранжирование признаков, но по методу Del. Получаем вектор признаков, ранжированных по возрастанию информативности. Выполняется инверсия полученного вектора признаков.

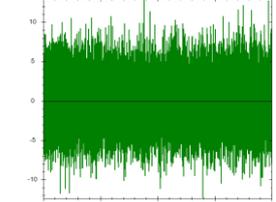
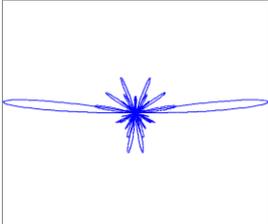
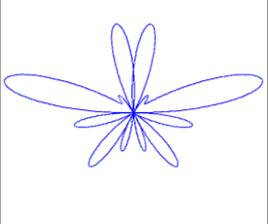
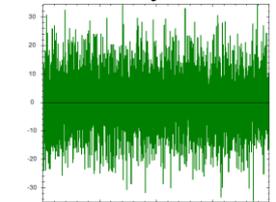
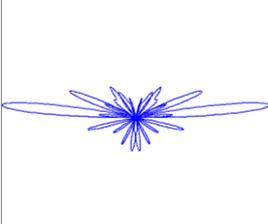
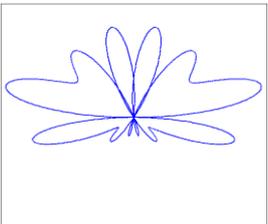
Рассмотрим применение методов Add и Del в другом порядке. Сначала выполняется сортировка информативных признаков по методу Del. Затем проводится инверсия полученного набора признаков, ранжированных по возрастанию информативности. Далее, выполняется ранжирование признаков по методу Add. В результате получаем вектор признаков, ранжированных по убыванию информативности.

В таблице 6 представлены результаты отбора наиболее информативных образов комбинированными методами с применением процедур $Add(Del(x_1, \dots, x_n))$ и $Del(Add(x_1, \dots, x_n))$. Приведены расстояния Евклида и Евклида-Махаланобиса от рассматриваемого сигнала до его эталона.

Таблица 6 – Когнитивные графические образы сигналов

№	Вид сигнала	Контурные образы сигналов, построенные по признакам, выбранным и ранжированным алгоритмами Add и Del, расстояние до эталона	
		а) $Add(Del(x_1, \dots, x_n))$ 1, 16, 14, 27, 19, 3, 23, 0, 4, 5, 7, 8, 11, 12, 26, 35, 9, 34, 18, 15, 21	б) $Del(Add(x_1, \dots, x_n))$ 30, 36, 38, 14, 9, 10, 34, 18
1	Синусоида 		
	Синусоида с шумом 		
	Расстояние	0.80455 / 0.63687	
2	Радиоимпульс 		
	Радиоимпульс с шумом 		
	Расстояние	1.13357 / 1.28052	

3	<p>Последовательность треугольных импульсов</p> 		
	<p>Последовательность треугольных импульсов с шумом</p> 		
	<p>Расстояние</p>	1.12921 / 1.16605	
4	<p>Функция Дирихле</p> 		
	<p>Функция Дирихле с шумом</p> 		
	<p>Расстояние</p>	0.52952 / 0.28097	
5	<p>Последовательность прямоугольных импульсов</p> 		
	<p>Последовательность прямоугольных импульсов с шумом</p> 		
	<p>Расстояние</p>	0.31369 / 0.09840	

6	<p>Белый гауссовский шум</p> 		
7	<p>Шум</p> 		

Наиболее различные образы для отдельных типов сигналов сформированы путем автоматической перестановки и подбора параметров на основе сочетания методов Del и Add (вариант б). Поэтому в дальнейшем принимаем при построении полярных разверток за основу последовательность признаков в соответствии с вариантом б) (таблица б). Алгоритм 2 и алгоритм 3 описывают две последовательные процедуры $Del(Add(x_1, \dots, x_n))$ упорядочивания признаков в поддержку этого варианта.

Алгоритм 2. (Ранжирование признаков: алгоритм Add)

Дано: InfParamNumbers – вектор номеров информативных признаков.

AddSortParams = \emptyset .

Результат: AddSortParams – ранжированный по возрастанию информативности вектор номеров информативных параметров.

1. Если вектор номеров информативных параметров InfParamNumbers пуст, перейти к шагу 7.
2. Вектор AddSortParams увеличивается на один элемент справа, которому присваивается номер первого информативного параметра из вектора InfParamNumbers.
3. Выполняется распознавание последовательности AddSortParams.
4. Вычисляется F-мера [25] качества распознавания, максимальная F-мера и номер соответствующего ей информативного параметра.
5. Последнему элементу вектора AddSortParams присваивается номер информативного параметра, на котором F-мера максимальна.
6. Из вектора InfParamNumbers удаляется номер информативного параметра, на котором последовательность AddSortParams получила максимальную F-меру. Переход к шагу 1.
7. Изменение порядка ранжированного вектора признаков AddSortParams на обратный.
8. Конец.

Алгоритм 3. (Ранжирование признаков: алгоритм Del)

Дано: AddSortParams; DelAddSortParams – множество номеров информативных признаков, отсортированных по методам Add и Del соответственно; DelAddSortParams = \emptyset .

Результат: DelAddSortParams – ранжированное по убыванию информативности множество номеров информативных параметров.

1. Если вектор номеров информативных параметров AddSortParams пуст, перейти к шагу 9.
2. Пусть $i = 0$ – номер проверяемого информативного параметра, length – длина вектора AddSortParams.
3. Распознавание сигнала, описываемого вектором tmpList, в который включены все признаки из вектора AddSortParams, за исключением i -го.

4. Вычисляется F-мера качества распознавания.
 5. i увеличивается на единицу. Если $i \leq length$, перейти к шагу 3, иначе – перейти к шагу 6.
 6. Вычисляется максимальная F-мера и номер соответствующего ей информативного параметра.
 7. Вектор DelAddSortParams увеличивается на один элемент справа, которому присваивается номер информативного параметра, на котором F-мера максимальна.
 8. Из вектора AddSortParams удаляется номер информативного параметра, на котором последовательность tmpList получила максимальную F-меру. $length$ уменьшается на единицу. Переход к шагу 1.
 9. Изменение порядка ранжированного вектора признаков DelAddSortParams на обратный.
 10. Конец.
- Результат работы алгоритмов представлен в таблице 7.

Таблица 7 – Признаки, ранжированные процедурой $Del(Add(x_1, \dots, x_n))$

Приоритет	Номер	Наименование
1	30	<i>Интервал корреляции</i>
2	36	<i>Отношение сигнал/шум в децибелах</i>
3	38	<i>Интеграл вероятности</i>
4	14	<i>Норма сигнала</i>
5	9	<i>Отношение сигнал / шум вычисляется делением среднего значения на среднеквадратическое отклонение</i>
6	10	<i>Динамический диапазон</i>
7	34	Сумма ФЧХ
8	18	Экстремальное отклонение от среднего значения
9	13	Среднеквадратическое отклонение
10	1	Среднее квадратичное значение за период дискретизации сигнала
11	25	Разность между максимальным и минимальным значениями мнимой части спектра
12	15	Минимальное значение сигнала на периоде дискретизации
13	17	Размах сигнала
14	16	Максимальное значение сигнала на периоде дискретизации
15	27	Минимальное значение АЧХ
16	3	Среднее выпрямленное значение за период дискретизации сигнала
17	37	Максимальная пропускная способность канала
18	39	Среднеквадратическое значение напряжения шума
19	22	Сумма значений действительной части спектра
20	35	Текущий спектр
21	26	Сумма значений мнимой части спектра
22	12	Дисперсия
23	11	Объем передаваемой информации
24	8	База сигнала
25	5	Энергия
26	4	Сумма амплитудно-частотных характеристик
27	24	Максимальное значение мнимой части спектра
28	0	Средняя мощность
29	19	Минимальное значение действительной части спектра
30	21	Разность между максимальным и минимальным значениями

		действительной части спектра
31	6	Длительность дискретного сигнала
32	29	Разность между максимальным и минимальным значениями АЧХ
33	28	Максимальное значение АЧХ
34	7	Эффективная ширина спектра сигнала
35	23	Минимальное значение мнимой части спектра
36	2	Среднее значение за период дискретизации сигнала
37	20	Максимальное значение действительной части спектра
38	33	Разность между максимальным и минимальным значениями ФЧХ
39	32	Максимальное значение ФЧХ
40	31	Минимальное значение фазочастотной характеристики

В таблице 7 курсивом выделен набор признаков, на котором процедура $Del(Add(x_1, \dots, x_n))$ получает наибольшее качество распознавания. Сравним распознавание сигналов с помощью метрик и визуальное распознавание полярных разверток.

Проверим качество распознавания сигналов метрикой Евклида, в пределах признакового пространства (таблица 8).

Таблица 8 – Расстояние Евклида между эталонными сигналами и зашумленными сигналами

№	Название эталонного сигнала	Синусоида	Радиоимпульс	Последовательность треугольных импульсов	Функция Дирихле	Последовательность прямоугольных импульсов
		1	2	3	4	5
1	Синусоида с низким уровнем шума	0.64940	1.24301	1.18212	1.00343	1.06825
	Синусоида со средним уровнем шума	0.70485	1.25022	1.18414	0.97683	1.06850
	Синусоида с высоким уровнем шума	0.80455	1.23801	1.12921	0.89017	1.04242
2	Радиоимпульс с низким уровнем шума	0.35857	1.00181	0.87220	1.15041	0.85729
	Радиоимпульс со средним уровнем шума	0.42052	1.03007	0.84535	1.12740	0.84390
	Радиоимпульс с высоким уровнем шума	0.75130	1.13357	0.45124	0.85127	0.55152
3	Последовательность треугольных импульсов с низким уровнем шума	0.99473	1.32935	0.03409	0.80886	0.42113
	Последовательность треугольных импульсов со средним уровнем шума	1.08651	1.38019	0.22642	0.76408	0.47037
	Последовательность треугольных импульсов с высоким уровнем шума	0.96515	1.26618	1.12921	0.85537	1.04897
4	Функция Дирихле с низким уровнем шума	1.29310	1.56942	0.84335	0.05343	0.83612
	Функция Дирихле со средним уровнем шума	1.26914	1.54370	0.87880	0.13766	0.86568
	Функция Дирихле с высоким	1.14000	1.41096	1.020711	0.54339	0.984698

уровнем шума						
5	Последовательность прямоугольных импульсов с низким уровнем шума	0.94846	1.33490	0.44178	0.79439	0.07093
	Последовательность прямоугольных импульсов со средним уровнем шума	0.98077	1.31781	0.39168	0.76840	0.13974
	Последовательность прямоугольных импульсов с высоким уровнем шума	0.77987	1.20778	0.53626	0.82209	0.33712

В таблице 8 красным цветом обозначены названия неправильно распознанных сигналов метрикой Евклида. Зеленым отмечены наименьшие расстояния от зашумленного сигнала до одного из эталонов, свидетельствующие о том, что сигнал правильно классифицирован. Красным цветом отмечены расстояния, свидетельствующие о том, что сигнал классифицирован неправильно.

Таким образом, из таблицы 8 следует, что расстояние Евклида является неустойчивым к распознаванию сигналов при наличии шумов. Проверим качество распознавания сигналов метрикой Евклида-Махаланобиса (таблица 9).

Таблица 9 – Распознавание радиотехнических сигналов метрикой Евклида-Махаланобиса

Уровень шума	Наименование эталонного сигнала				
	Синусоида	Радиоимпульс	Последовательность треугольных импульсов	Функция Дирихле	Последовательность прямоугольных импульсов
№	1	2	3	4	5
Без шума	Синусоида	Радиоимпульс	Последовательность треугольных импульсов	Функция Дирихле	Последовательность прямоугольных импульсов
Низкий уровень шума	Синусоида с шумом	Радиоимпульс с шумом	Последовательность треугольных импульсов	Функция Дирихле	Последовательность прямоугольных импульсов
Средний уровень шума	Синусоида с шумом	Радиоимпульс с шумом	Последовательность треугольных импульсов	Функция Дирихле с шумом	Последовательность прямоугольных импульсов с шумом
Высокий уровень шума	Синусоида с шумом	Радиоимпульс с шумом	Синусоида с шумом	Синусоида с шумом	Последовательность прямоугольных импульсов с шумом

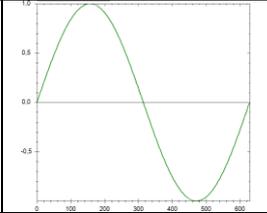
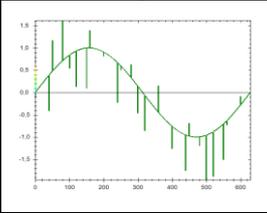
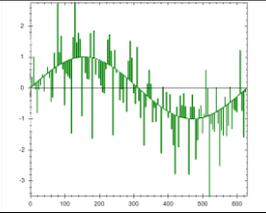
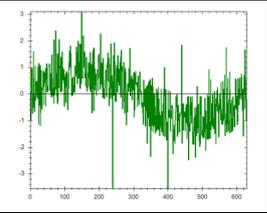
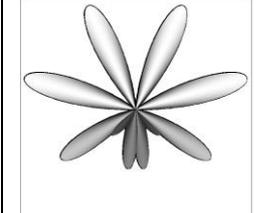
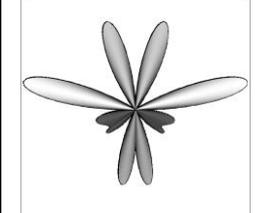
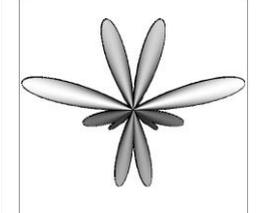
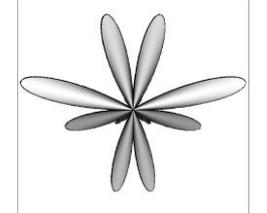
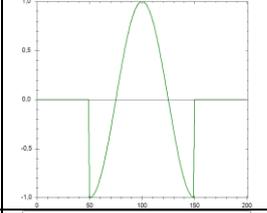
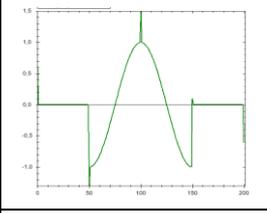
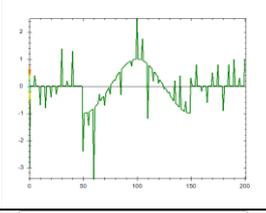
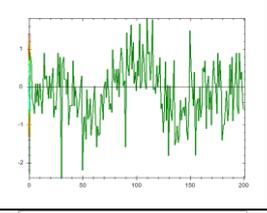
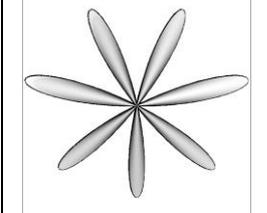
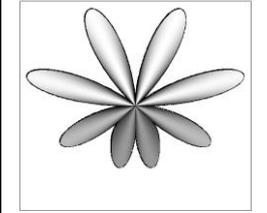
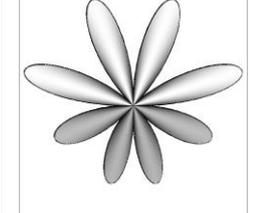
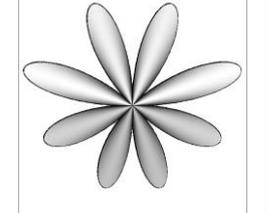
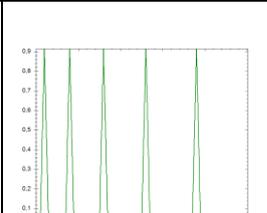
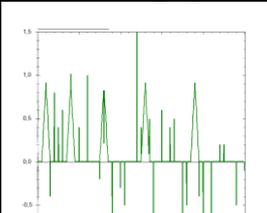
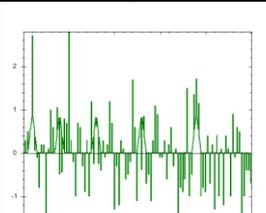
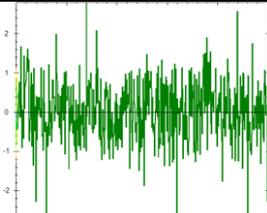
В таблице 9 красным цветом отмечены неправильные результаты классификации сигналов метрикой Евклида-Махаланобиса. Из таблицы видно, что метрика Евклида-Махаланобиса иногда не обнаруживает низкий и средний шум в сигнале, например, в последовательности треугольных импульсов, функции Дирихле и последовательности прямоугольных импульсов. Сигналы с высоким уровнем шума иногда распознаются неправильно, например, как зашумленная синусоида. С другой стороны, положительным качеством метрики Евклида-Махаланобиса является устойчивость к шумам.

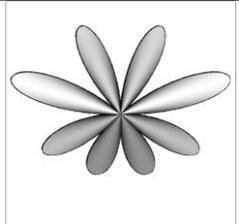
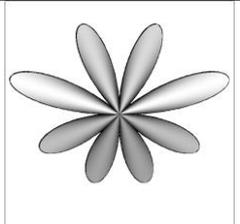
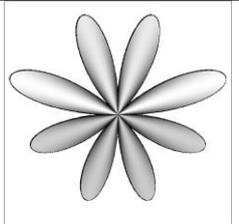
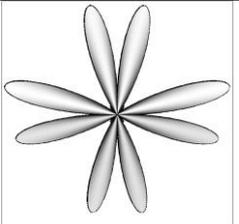
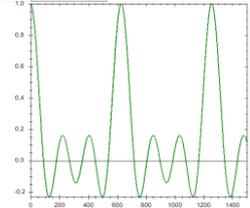
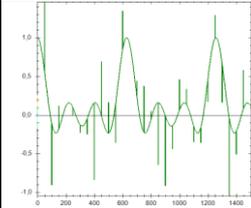
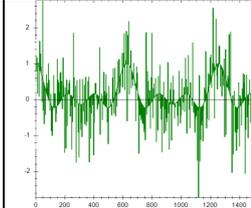
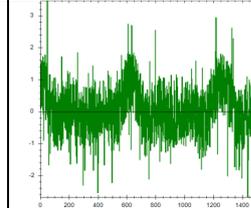
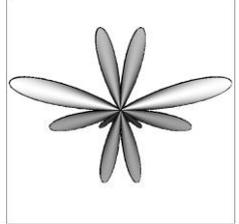
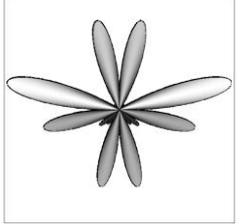
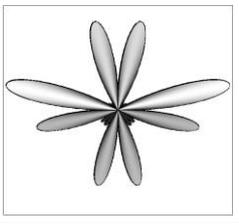
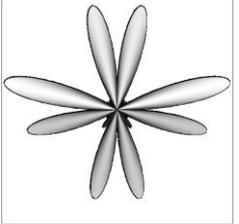
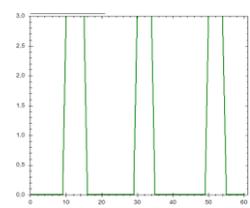
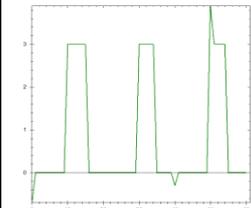
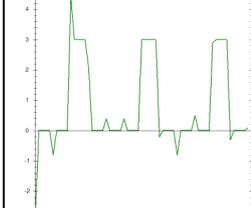
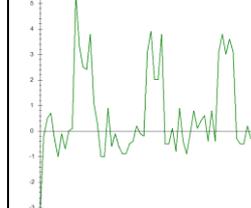
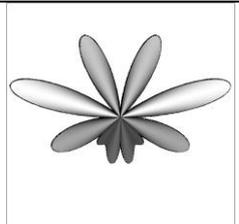
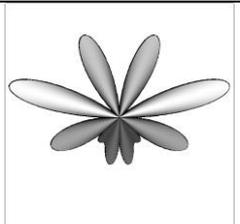
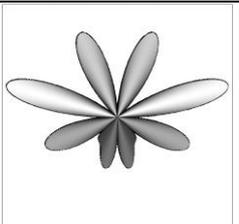
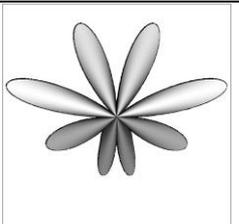
3. Методы повышения качества визуального распознавания полярных разверток

Для повышения качества визуального распознавания, добавим в когнитивные образы монохромные полутона. Яркость полутона определяется по формуле

$\lambda_i = \left[c \frac{\rho(\varphi_i) - \rho(\varphi)_{min}}{\rho(\varphi)_{max} - \rho(\varphi)_{min}} \right]$, где $c = 255$ – максимальное значение яркости, $\rho(\varphi)_{min}$ – минимальное значение среди всех $\rho(\varphi)$, $\rho(\varphi)_{min} \in \{\rho(0), \dots, \rho(\varphi_i), \dots, \rho(359)\}$, $\rho(\varphi)_{max}$ – максимальное значение среди всех $\rho(\varphi)$, $\rho(\varphi)_{max} \in \{\rho(0), \dots, \rho(\varphi_i), \dots, \rho(359)\}$. В таблице 10 показано влияние уровня шума на когнитивные образы сигналов (полярные развертки), расстояния Евклида и Евклида-Махаланобиса между зашумленным сигналом и его эталоном.

Таблица 10 – Монохромные образы радиотехнических сигналов с различными уровнями шумов

1) Синусоида				
График сигнала				
Когнитивный образ сигнала				
Расстояние	0	0.65024 / 0.42172	0.72656 / 0.52790	0.80455 / 0.63687
2) Радиоикулярс				
График сигнала				
Когнитивный образ сигнала				
Расстояние	0	1.00092 / 1.0018	1.03008 / 1.05363	1.13357 / 1.28052
3) Последовательность треугольных импульсов				
График сигнала				

Когнитивный образ сигнала				
Расстояние	0	0.09420 / 0.04794	0.22938 / 0.05262	1.12921 / 1.16605
4) Функция Дирихле				
График сигнала				
Когнитивный образ сигнала				
Расстояние	0	0.04789 / 0.00229	0.18530 / 0.03437	0.52952 / 0.28097
5) Последовательность прямоугольных импульсов				
График сигнала				
Когнитивный образ сигнала				
Расстояние	0	0.06252 / 0.00391	0.13691 / 0.01874	0.31369 / 0.09840

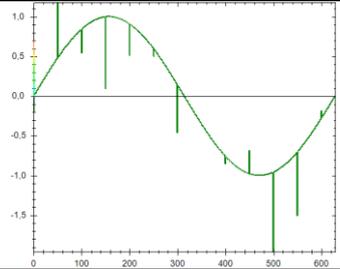
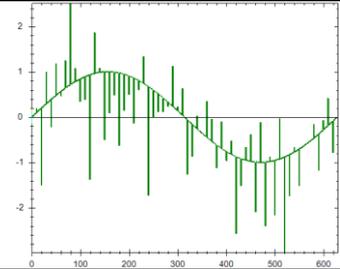
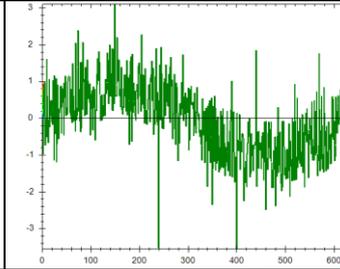
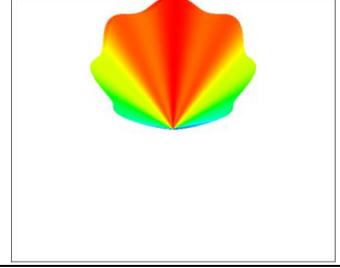
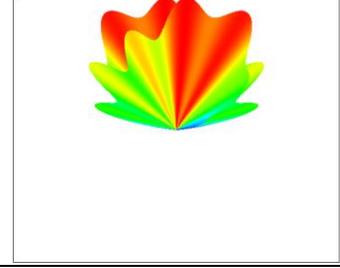
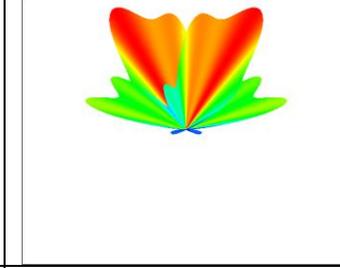
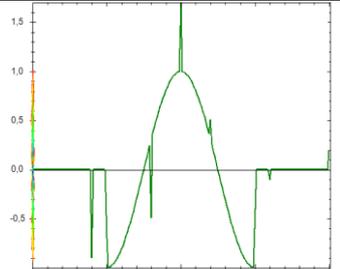
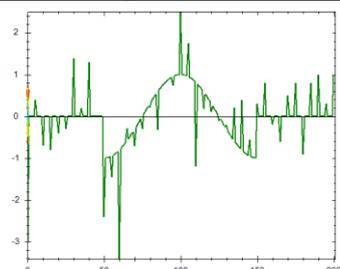
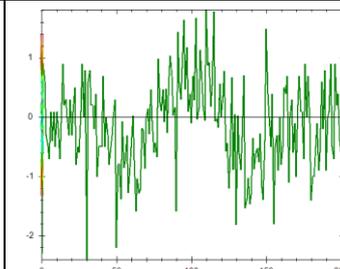
Из таблицы 10 видно, что когнитивные образы, в большинстве случаев, позволяют лучше классифицировать сигнал, чем метрика Евклида и Евклида-Махаланобиса. Например, синусоида с шумом и функция Дирихле с шумом, классифицируемые метрикой Евклида-Махаланобиса как один и тот же сигнал (таблица 9), имеют похожие, но визуально различные когнитивные образы. А именно: боковые нижние «лучи» у зашумленной синусоиды заметно короче и темнее, чем у зашумленной функции Дирихле. В то же время, при низком и среднем уровнях шума полярные развертки радиопульса и последовательности треугольных импульсов очень мало отличаются, что затрудняет визуальное распознавание когнитивных образов этих сигналов. Другими словами, распознавание радиотехнических сигналов качественно лучше в том случае, когда наблюдение за числовой информацией и классификация метриками сопровождается когнитивными графическими образами.

Для повышения наглядности введем операцию вычитания сигналов, определенную над их признаками: $\rho_{\text{разн}}(\varphi) = \sum_{k=1}^n (x_k - x_{k\varepsilon}) \sin(k\varphi)$, где $x_{k\varepsilon}$ – k -ый эталонный признак сигнала. Выполним соответствующую визуализацию $\rho_{\text{разн}}(\varphi)$ (таблица 11). Для усиления восприятия в контурные представления разностных образов введены цветояркие компоненты, приведены расстояния Евклида и Евклида-Махаланобиса до эталонных сигналов в принятом признаковом пространстве. Вычисление цвета выполняется по формуле:

$$(r, g, b) (\rho_{\text{разн}}(\varphi)) = \begin{cases} (0, \eta(\rho_{\text{разн}}(\varphi) - \rho_{\text{разн}}(\varphi)_{\min}), c), & \text{если } 0 \leq \rho_{\text{разн}}(\varphi) < \frac{\delta}{4} \\ \left(0, c, c - \eta\left(\rho_{\text{разн}}(\varphi) - \left(\rho_{\text{разн}}(\varphi)_{\min} + \frac{\delta}{4}\right)\right)\right), & \text{если } \frac{\delta}{4} \leq \rho_{\text{разн}}(\varphi) < \frac{\delta}{2} \\ \left(\eta\left(\rho_{\text{разн}}(\varphi) - \left(\rho_{\text{разн}}(\varphi)_{\min} + \frac{\delta}{3}\right)\right), c, 0\right), & \text{если } \frac{\delta}{2} \leq \rho_{\text{разн}}(\varphi) < \frac{3\delta}{4} \\ \left(c, c - \eta\left(\rho_{\text{разн}}(\varphi) - \left(\rho_{\text{разн}}(\varphi)_{\min} + \frac{\delta}{2}\right)\right), 0\right), & \text{если } \frac{3\delta}{4} \leq \rho_{\text{разн}}(\varphi) < \delta \\ (c, 0, 0), & \text{если } \rho_{\text{разн}}(\varphi) = \rho_{\text{разн}}(\varphi)_{\max} \end{cases}, \text{ где}$$

(r, g, b) – код цвета в формате RGB, $\rho_{\text{разн}}(\varphi)_{\min}$ – минимальное значение среди всех $\rho_{\text{разн}}(\varphi)$, $\rho_{\text{разн}}(\varphi)_{\max}$ – максимальное значение среди всех $\rho_{\text{разн}}(\varphi)$, $\delta = \rho_{\text{разн}}(\varphi)_{\max} - \rho_{\text{разн}}(\varphi)_{\min}$, $\eta = \frac{4c}{\delta}$.

Таблица 11 – Результаты визуализации разности исследуемых и эталонных сигналов

1) Синусоида			
График сигнала			
Когнитивный образ сигнала			
Расстояние	0.64949 / 0.42103	0.70485 / 0.49166	0.80455 / 0.63687
2) Радиопульс			
График сигнала			

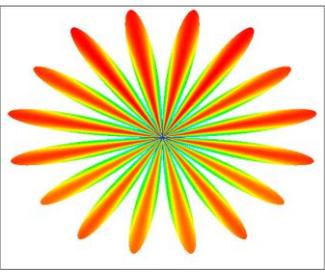
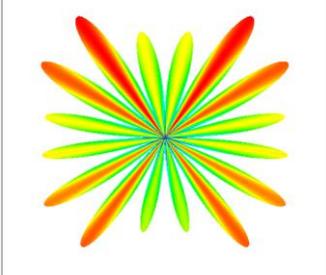
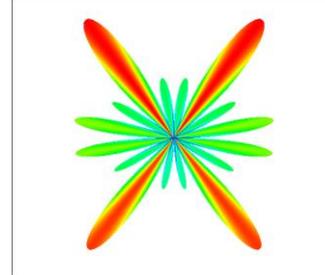
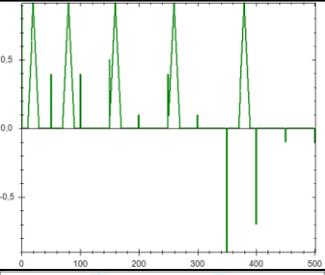
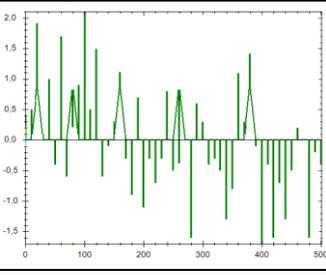
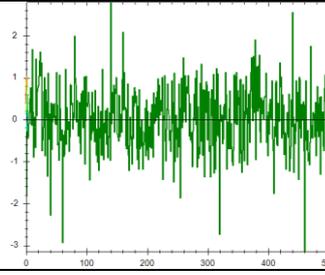
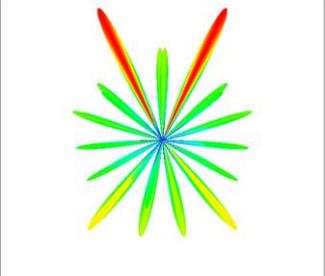
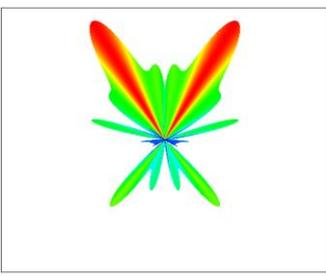
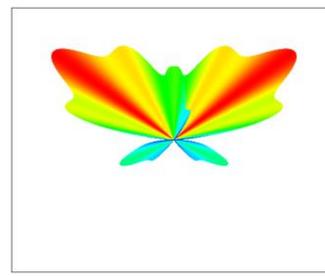
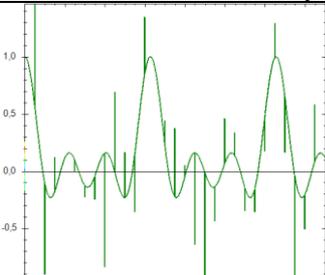
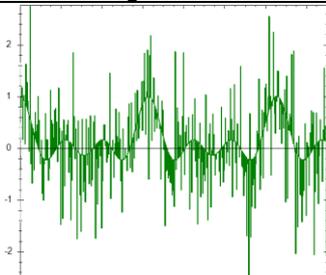
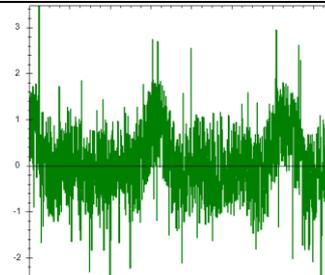
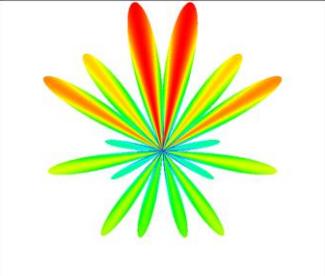
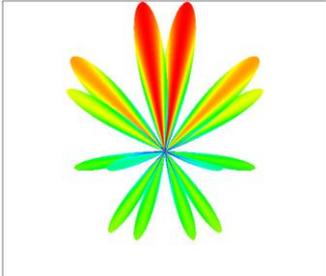
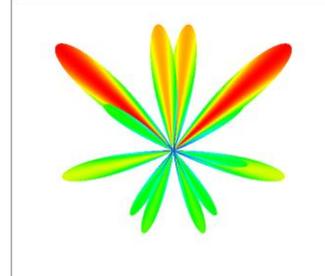
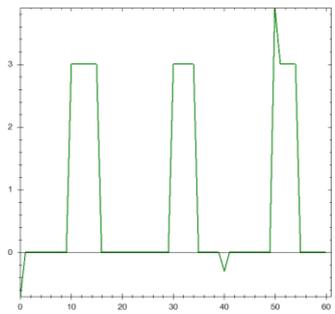
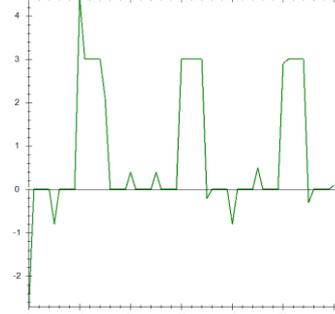
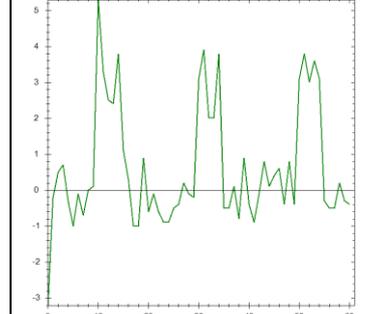
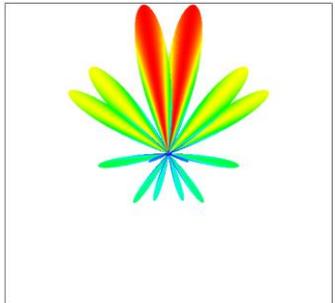
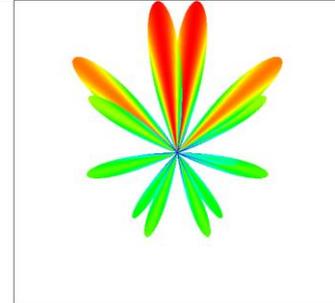
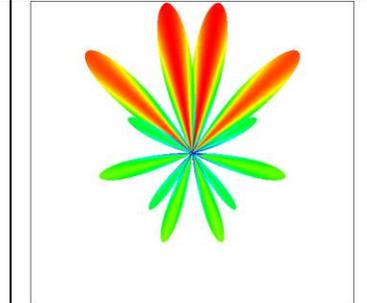
Когнитивный образ сигнала			
Расстояние	1.00181 / 1.00158	1.03007 / 1.05363	1.13357 / 1.28052
3) Последовательность треугольных импульсов			
График сигнала			
Когнитивный образ сигнала			
Расстояние	0.03409 / 0.00080	0.22642 / 0.04794	1.12921 / 1.16605
4) Функция Дирихле			
График сигнала			
Когнитивный образ сигнала			
Расстояние	0.04789 / 0.00229	0.18530 / 0.03437	0.52952 / 0.28097
5) Последовательность прямоугольных импульсов			

График сигнала			
Когнитивный образ сигнала			
Расстояние	0.06252 / 0.00391	0.13691 / 0.01874	0.31369 / 0.09840

В таблицах 6, 10 и 11 представлены фрагменты исследований когнитивных образов типовых зашумленных сигналов. Из таблиц виден характер чувствительности когнитивных образов к существенным зашумлениям сигналов, оцениваемых с помощью введенного расстояния. Она выражается в изменении формы полярных разверток (таблицы 6, 10, 11), а также в изменении формы и цветоярких представлений в разностных когнитивных образах (таблица 11). Понятно, что различить образы сможет только оператор НС КИС, прошедший соответствующее обучение. Для достижения высокого качества распознавания сигналов рекомендуется в интерфейсе предоставлять совместно как когнитивные образы сигналов, так и результаты их машинной классификации. А именно, в результате экспериментальных исследований показано, что тип сигнала лучше устанавливать с помощью программы автоматического распознавания, которая дает качество распознавания равное 92.7%. Оператору необходимо визуально определять уровень шума. Рекомендации даны в следующем разделе 4.

4. Анализ и интерпретация когнитивных образов сигналов

Оператор НС КИС должен визуально определять по предъявленному когнитивному образу тип сигнала и степень его зашумленности. В качестве рекомендации для оператора укажем следующие закономерности, помогающие анализу, запоминанию и интерпретации когнитивных образов.

Анализ типов сигналов

В зависимости от расстояний (таблицы 4, 5, 8), радиотехнические сигналы, построенные с выполненным ранжированием признаков, имеют разные когнитивные образы (таблицы 6, 10, 11). Особенно это заметно в разностных цветоярких представлениях. Все это позволяет оператору их однозначно различать (классифицировать).

Анализ степени зашумленности

Из анализа таблиц 6, 10, 11, прежде всего, видно, что между измеренными расстояниями и когнитивными образами зашумленных сигналов существует корреляционная связь:

- чем больше расстояние между образом сигнала и его эталоном, в рамках признакового пространства, тем более он зашумлен;
- чем больше разность расстояний (интервал) между зашумленными образами одного класса, тем более они различимы между собой.

В связи с тем, что расстояние между сигналами может быть незначительным и соответствующие образы плохо различимыми, целесообразно, с целью удобства оператора, разбить всю шкалу расстояний и соответственно виды когнитивных образов на отдельные хорошо различимые подклассы, в соответствии с уровнем шума: слабый шум, средний шум, сильный шум. Из анализа образов видно, что при переходе от одного подкласса к другому, наблюдаются следующие общие закономерности: существенно меняются форма, размер и цветовая гамма (в цветоярких образах).

Визуальные особенности трансформации монохромных образов (под воздействием шумов)

Рассмотрим монохромные образы из таблицы 11.

1) *Синусоида*. С возрастанием уровня шума увеличивается угол между двумя нижними «лучами», в то время как между двумя верхними – угол уменьшается. Нижние два «луча» становятся длиннее, а боковые нижние увеличиваются в размере и становятся светлее.

2) *Радиоимпульс*. С возрастанием уровня шума наблюдается общая тенденция преобразования фигуры в симметричную, равноконечную «звезду» с более округлыми «лучами», чем у эталона. При добавлении шума происходит разбиение нижнего «луча» на две составляющие.

3) *Последовательность треугольных импульсов*. С возрастанием уровня шума длина «лучей» выравнивается, они становятся более светлыми, тонкими и группируются по парам сверху, снизу, справа и слева. Другими словами, уменьшается угол между парами лучей сверху, снизу, справа и слева.

4) *Функция Дирихле*. С возрастанием уровня шума пары верхних и нижних «лучей», одновременно с боковыми нижними, увеличиваются и становятся светлее. Боковые верхние «лучи» не меняются.

5) *Последовательность прямоугольных импульсов*. С возрастанием уровня шума растут нижние и верхние пары «лучей». «Лучи», расположенные между боковыми и нижними, сливаются с нижними.

Визуальные особенности трансформации цветоярких образов (под воздействием шумов)

Рассмотрим цветояркие разностные образы из таблицы 11.

1) *Синусоида*. При малом уровне шумов наблюдается сглаженная форма образа, в котором цвета сконцентрированы в определенных областях и не смешиваются друг с другом. При этом преобладает красный цвет. С ростом уровня шума (средний уровень) происходит расслоение цветовых областей и их ассиметричное наложение друг на друга. При сильном зашумлении образы лучи развертки становятся более «острыми». При увеличении уровня шума начинают преобладать холодные цвета (зеленый и синий).

2) *Радиоимпульс*. При малом уровне шума образ представляет симметричную «звезду» с большим количеством одинаковых «лучей», с преобладанием красного цвета. При среднем уровне шума количество «красных лучей» сокращается в два раза. Большую область образа начинают занимать «укороченные лучи» желто-зеленого цвета. При высоком уровне шума в «звезде» остается только четыре крупных «ярко-красных луча». Практически, всю центральную область занимают короткие лучи зеленого цвета.

3) *Последовательность треугольных импульсов*. При малом уровне шума образ представляет «звезду» с двумя самыми длинными и яркими «красными лучами» в верхней части. При увеличении шума увеличивается угол между положением «красных лучей», ширина всех «лучей»; они сливаются в одну общую цветояркую форму.

4) *Функция Дирихле*. При малом уровне шума заметна пара верхних «красных лучей» и две пары боковых «оранжевых лучей». Нижняя половина «звезды» окрашена в зеленый цвет. С возрастанием уровня шума нижняя половина образа претерпевает малые изменения, в то время как угол между верхними лучами уменьшается, они укорачиваются.

чиваются и меняют цвет с красного на оранжевый. Одновременно, верхние «оранжевые лучи» значительно увеличиваются в размере и перекрашиваются преимущественно в красный цвет. Нижние боковые «оранжевые лучи» укорачиваются и становятся зелеными.

5) *Последовательность прямоугольных импульсов.* При малом уровне шума в верхней части «звезды» наблюдается пара наиболее длинных «лучей», с преобладанием красного цвета. Четыре боковых верхних «луча» попарно сгруппированы и окрашены преимущественно в желтый цвет. Лучи в нижней части образа более короткие, чем в верхней, и окрашены в зеленый голубой и синий цвета. При увеличении уровня шума замечено изменение боковых верхних «желтых лучей», а именно: два из них увеличиваются, краснеют и выравниваются с верхними по длине; другие два, расположенные ниже, укорачиваются и меняют цвет на зеленый. Одновременно с указанными изменениями увеличиваются в размере «лучи», расположенные в нижней части «звезды», приобретая преимущественно желто-зеленый цвет.

Заключение

В работе выполнен анализ применимости метода визуализации многомерных данных к мониторингу цифровых радиотехнических сигналов. Полученные когнитивные образы позволяют улучшить эргономические качества интерфейсов наземных станций космического назначения и повысить эффективность работы операторов. Основные достоинства разработанных методов графической поддержки: наглядность интерпретации и надежность контроля сигналов; легкость восприятия интенсивных потоков информации в реальном масштабе времени и возможность оперативного определения состояний. В заключительной части работы представлены обобщающие результаты анализа разработанных когнитивных образов в помощь операторам НС КИС.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Проекты № 18-37-00037, № 18-07-00014).

Список литературы

1. Безрук В.М., Иваненко С.А. Обнаружение и распознавание сигналов в условиях повышенной априорной неопределенности в задачах радиомониторинга // Системы управления, навигации и связи. Сборник научных трудов, №2, 2018.- с.135-141.
2. O'Shea T. J., West N.; Vondal M.; Clancy T. Ch. Semi-supervised radio signal identification. – 19th International Conference on Advanced Communication Technology. – IEEE, 2017. – 5 p. DOI: 10.23919/ICACT.2017.7890052.
3. Zha X., Peng H., Yang S. A Deep Learning Framework for Signal Detection and Modulation Classification. – Sensors, MDPI, 2019. – 21 p. DOI: 10.3390/s19184042.
4. Емельянова Ю.Г. Разработка методов когнитивного отображения состояний динамических систем реального времени. – Искусственный интеллект и принятие решений, №3, 2016, с.21-30.
5. Cole W.G. Medical cognitive graphics. – CHI '86: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, April 1986, pp.91-95.
6. Зенкин А.А. Когнитивная компьютерная графика. – М.: Наука, 1990. – 192 с.
7. Поспелов Д.А. Когнитивная графика – окно в новый мир. – Программные продукты и системы, №2, 1992. с.4-6.
8. Башлыков А.А. Компьютерные информационные системы для интеллектуальной поддержки операторов АЭС. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2016. – 520 с.
9. Бурдаев М.Н. Годографы и уравнение перелета в центральном поле тяготения. – Программные системы: теория и приложения, Т.3, №3(12), 2012, с.79-92.
10. Янковская А.Е., Ямшанов А.В. Интеллектуальные обучающе-тестирующие системы с применением когнитивных технологий. – XII Всероссийское совещание по про-

- блемам управления ВСПУ-2014: Труды. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014, с.4183-4191.
11. Гришин В.Г. Образный анализ экспериментальных данных. – М.: Наука, 1982. – 237 с.
 12. Зиновьев А. Ю. Визуализация многомерных данных. Красноярск: Изд-во КГТУ, 2000. – 180 с.
 13. Новоселов Ю.В. Диагностика технологического объекта с использованием фрактального когнитивного образа. – Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – СПб: ФГАОУ ВО СПбПУ, №2(145), 2012, с.119-122.
 14. Kieras D.E. A Guide to GOMS Model Usability Evaluation using GOMSL and GLEAN4. – Electrical Engineering and Computer Science Department University of Michigan, 2006. – 72 p.
 15. Höllt T. Visual Workflows for Oil and Gas Exploration: Ph.D. Thesis. Thuwal. 2013. 153 p.
 16. Fischer F. Visual Analytics for Situational Awareness in Cyber Security. PhD thesis, Univ. Konstanz, 2016. – 220 p.
 17. Лайнос Р. Цифровая обработка сигналов, 2-е издание. Пер. с англ. – М.: ООО «Бинном-Пресс», 2006. – 656 с.
 18. Ifeachor E.C., Jervis B.W. Digital Signal Processing: A Practical Approach. – Pearson Education, 2002. – 933 p.
 19. Слока В.К. Вопросы обработки радиолокационных сигналов. – М: Сов. радио, 1970. – 256 с.
 20. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы, 2-е издание. – М.: Высшая школа, 1987. – 446 с.
 21. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. – Новосибирск: ИМ СО РАН, 1999, 270 с; URL: http://sernam.ru/book_zg.php (дата обращения: 29.03.2019).
 22. Жвалевский О.В. Отбор информативных признаков: постановка задачи и методика ее решения. – Труды СПИИРАН. Вып. 4. – СПб.: Наука, 2007.
 23. Хачумов М.В. Расстояния, метрики и кластерный анализ. – Искусственный интеллект и принятие решений, №1, 2012, с.81-89.
 24. Khachumov M. V. Models of the Representation and Clustering of Semistructured Information. – Scientific and Technical Information Processing, 2015, Vol. 42, No. 5, pp. 388-396.
 25. Derczynski L. Complementarity, F-score, and NLP Evaluation // Proceedings of the Tenth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC'16). European Language Resources Association (ELRA) (Portorož, Slovenia, May, 2016), 2016, pp.261-266.

Visual cognitive control of space systems radiotechnical signals

Yu.G. Emelyanova^{1,A}, M.V. Khachumov^{2,B,C}

^A PSI RAS (Ailamazyan Program Systems Institute of RAS)

^B FRC CSC RAS (Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences)

^C RUDN University (Peoples Friendship University of Russia)

¹ ORCID: 0000-0001-7735-6820, yuliya.emelyanowa2015@yandex.ru

² ORCID: 0000-0001-5117-384X, khmike@inbox.ru

Abstract

The method of cognitive graphical information presentation is developed, allowing to classify radiotechnical signals and estimate the degree of noise. The method is based on the construction of a features set ordered by information significance. In turn, informativeness is determined by the formal contribution of the feature to the quality of signal type recognition. The construction of cognitive images is carried out in several stages: 1) determination of numerical characteristics of typical signals, 2) ranking and selection of the most informative characteristics, 3) construction of cognitive graphic images visualizing a multidimensional vector of signal features, 4) operator's interpretation of cognitive images.

The method of integral contour representation polar scan is used to construct cognitive-graphic images of signals. A total of forty informative parameters of the signal (features) are calculated. To increase the polar scan selectivity, the features are ranked in informativeness descending order by the Add and Del methods. The operation of signals subtraction defined over their informative parameters is introduced. With the goal to improve the visual recognition quality, monochrome halftones have been added to cognitive images. To improve perception of the contour representation of difference images color components have been introduced. The sensitivity of the cognitive images to substantial noise signals is expressed through changes in polar scan forms, tones and colorful presentation. The comparison of signals recognition quality by using metrics and polar scan visual recognition is provided. The recommendations are given to the decision-making operator on the type and noise degree of the radio signal in the final part.

Keywords: radiotechnical signal, characteristics environment, information importance, recognition, cognitive graphics, cognitive image, multidimensional data visualization, analysis of radiotechnical signals, interpretation of a cognitive image.

References

1. Bezruk V.M., Ivanenko S.A. Detection and recognition of signals under conditions of high a priori uncertainty in the tasks of radio monitoring . – Control, navigation and communication systems. Academic journal, 2018, No.2, pp.135-141. (in Russian)
2. O'Shea T. J., West N.; Vondal M.; Clancy T. Ch. Semi-supervised radio signal identification. – 19th International Conference on Advanced Communication Technology. – IEEE, 2017. – 5 p. DOI: 10.23919/ICACT.2017.7890052.
3. Zha X., Peng H., Yang S. A Deep Learning Framework for Signal Detection and Modulation Classification. – Sensors, MDPI, 2019. – 21 p. DOI: 10.3390/s19184042.
4. Emelaynova J.G.. Development of cognitive representation methods for real time dynamic systems. – Artificial Intelligence and Decision Making, 2016, No.3, pp.21-30. (in Russian)

5. Cole W.G. Medical cognitive graphics. – CHI '86: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, April 1986, pp.91-95.
6. Zenkin A. A. Cognitive computer graphics. – M.: Science, 1990. – 192 p. (in Russian)
7. Pospelov D.A. Cognitive Graphics – a window into the new world. – Software products and systems, 1992, No.2, pp.4-6. (in Russian)
8. Bashlykov A.A. Computer information systems for intelligent support of NPP operators. – M.: OJSC “RRIOMEOGI”, 2016. – 520 p. (in Russian)
9. Burdayev M.N. Hodographs and the equation of flight in a central gravitational field. – Software Systems: Theory and Applications, 2012, Vol.3, No.3(12), pp.79-92. (in Russian)
10. Yankovskaya A.E., Yamshanov A.V. Intelligent learning-testing systems using cognitive technologies. – XII All-Russian Meeting on RMPM-2014 Management: Works. – M.: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, 2014, pp. 4183-4191. (in Russian)
11. Grishin V.G. The figurative analysis of experimental data. – M.: Science, 1982. – 237 c. (in Russian)
12. Zinoviev A. Yu. Visualization of multidimensional data. Krasnoyarsk State University Press Publ, 2000. – 180 p. (in Russian)
13. Novoselov Yu.V. Diagnostics of technological object using fractal cognitive image. – Scientific and technical sheets of SPbSPU. Informatics. Telecommunications. Management. – SPb: SPbPUPG, 2012, No.2(145), pp. 119-122. (in Russian)
14. Kieras D.E. A Guide to GOMS Model Usability Evaluation using GOMSL and GLEAN4. – Electrical Engineering and Computer Science Department University of Michigan, 2006. – 72 p.
15. Höllt T. Visual Workflows for Oil and Gas Exploration: Ph.D. Thesis. Thuwal. 2013. 153 p.
16. Fischer F. Visual Analytics for Situational Awareness in Cyber Security. PhD thesis, Univ. Konstanz, 2016. – 220 p.
17. Lyons R.G. Digital Signal Processing, 2th edition, English translation. – M.: LLC “Binom-Press”, 2006. – 656 p. (in Russian)
18. Ifeachor E.C., Jervis B.W. Digital Signal Processing: A Practical Approach. – Pearson Education, 2002. – 933 p.
19. Sloka V. K. Problems of radar signal processing. – M: “Sov. radio”, 1970, 256 p. (in Russian)
20. Baskakov, S. I. Radio circuits and signals, 2th edition, M.: “Higher school”, 1987, 446 p. (in Russian)
21. Zagoruiko N. G. Applied methods of data and knowledge analysis, Novosibirsk: “IM SB RAS”, 1999, 270 p. (in Russian)
22. Zhvalevsky O. V. Selection of informative features: problem statement and method of its solution. – Transactions SPIRAS. Issue. 4. – SPb.: “Science”, 2007, pp.416-426. (in Russian)
23. Khachumov M. V. Distances, metrics, and cluster analysis. – Artificial Intelligence and Decision Making, 2012, No.1, pp.81-89. (in Russian)
24. Khachumov M. V. Models of the Representation and Clustering of Semistructured Information. – Scientific and Technical Information Processing, 2015, Vol. 42, No. 5, pp. 388-396.
25. Derczynski L. Complementarity, F-score, and NLP Evaluation // Proceedings of the Tenth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC'16). European Language Resources Association (ELRA) (Portorož, Slovenia, May, 2016), 2016, pp.261-266.