

УДК 621.396.967

В.Н. Лоза<sup>1</sup>, Є.С. Ленков<sup>2</sup>, М.Н. Охрамович<sup>1</sup><sup>1</sup> *Военный институт Киевского национального университета им. Т. Шевченко, Киев*<sup>2</sup> *Военный институт телекоммуникаций и информатизации, Киев*

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА ВИЗУАЛЬНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ – РАЗРЕШЕНИЯ ГРУППОВЫХ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЦЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ

*В статье рассматриваются возможности метода визуального распознавания (разрешения) групповых сосредоточенных целей на основе визуального представления результатов вейвлет-преобразования сигналов, отражённых от одиночных и групповых сосредоточенных целей. Приведены спектрограммы для моделей эхосигнала парной сосредоточенной цели, отличающихся степенью гладкости и характером флюктуаций. Сформулированы выводы о возможностях применения рассмотренного метода.*

**Ключевые слова:** *групповая цель, распознавание сигналов, вейвлет-преобразование.*

### Введение

Применение теории спектрального вейвлет-анализа позволяет решать задачу распознавания определённых классов сигналов по их тонкой структуре [1], прикладной целью которого является новый подход к решению проблемной задачи разрешения парной сосредоточенной цели в пределах импульсного объёма обзорных радиолокационных станций.

Задача сверхрелеевого разрешения по сущности эквивалентна задаче распознавания одного из двух классов эхосигналов: множества  $S1 = \{s1_m\}$ , характеризующего функции сигналов, отражённых от одиночных целей, и множества  $S2 = \{s2_m\}$ , определяющего структуру сигнала, отражённого от парной цели с перекрытием огибающих пачки, более 0,5. Число возможных разновидностей функций множеств "m" обосновывается ниже.

Так, функции множества  $S1$  соответствуют форме пеленгационной характеристики антенны, которая при цифровой обработке определяется дискретным набором амплитуд импульсов пачки и может быть либо квантованной по амплитуде, либо представлять собой последовательность единиц.

Сигнальные функции множества  $S2$  имеют структурную особенность, обусловленную интерференцией импульсных сигналов со случайным соотношением фаз в области перекрытия пачек одиночных целей (в центре суммарной пачки). В общем случае разность фаз импульсов интерференции может мало меняться от импульса к импульсу (случай "плавной" флюктуации) или (в большинстве случаев) изменяться случайно от импульса к импульсу в результате естественной дисперсии скорости целей. Последний случай характеризуется наличием быстрых флюктуаций, создающих при достаточном числе импульсов перекры-

тия ( $\geq 10$ ) нулевые провалы в результирующей пачке. Вероятность двух и более провалов, как показано в [2], имеет значение 0,8 ... 0,9.

Наличие быстрых флюктуаций эхосигнала свидетельствует о появлении в сигналах множества  $S2$  явно выраженных локальных особенностей (скачков) функции, обнаружение которых обеспечивается при обработке сигнала по технологии вейвлет-анализа, тогда как классический спектральный анализ не позволяет выявить резкие локальные изменения функции, так как коэффициенты Фурье отражают поведение сигнала за всё время его существования. Сигналы  $\{s2_m\}$  являются нестационарными на интервале сигнала.

В отличие от Фурье-преобразования, вейвлет-преобразование обеспечивает двухмерную развёртку, при этом частота и координата (время) рассматриваются как независимые переменные, что даёт возможность анализа сигналов сразу в двух пространствах и выявления пространственно-распределённых свойств объекта [3]. Для дальнейшего обсуждения задачи распознавания выделены наиболее характерные виды сигнальных функций для обоих классов, графический вид которых представлен на рис. 1.

На рис. 1 показаны: (1) – огибающая пачки, определяемая гауссовой зависимостью и функцией  $\sin(x)/x$ ; (2) – возможный вид огибающей пачки парной цели при достаточно сильной корреляции флюктуаций фаз, суммируемых на интервале перекрытия импульсов; (3) – огибающая результирующей пачки парной цели для случая быстрых флюктуаций от импульса к импульсу; (4) – дискретная бинарная пачка парной цели при быстрых флюктуациях. В решаемой задаче распознавания выделяются: в качестве гипотезы класса  $S1$  функций рис. 1 (1) и (не представленная на рис. 1) дискретная нормированная пачка, в качестве альтернативного класса – функции (2), (3) и (4).

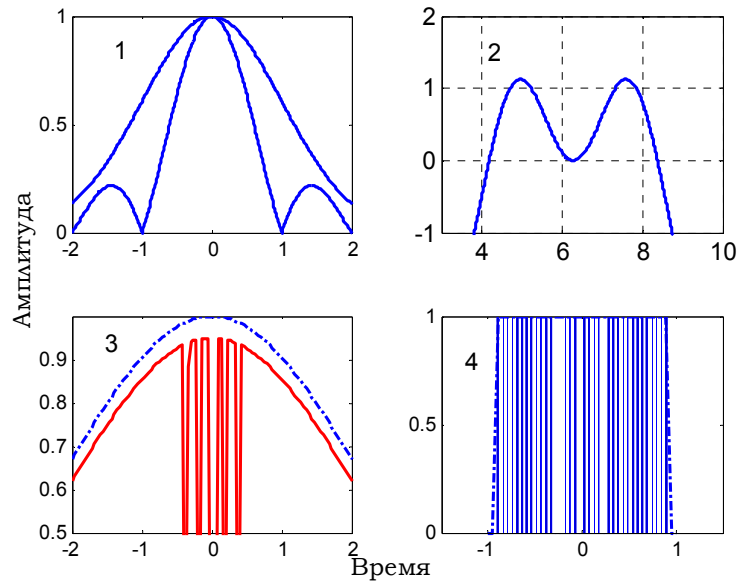


Рис. 1. Наиболее характерные виды сигнальных функций

С точки зрения приложений рассматриваемая задача может быть определена термином "распознавание – разрешение", которое подчёркивает целевое направления имеющей широкое применение задачи распознавания.

### Анализ возможностей метода визуального распознавания

Метод основан на вычислении результатов многомерного непрерывного вейвлет-преобразования (ВВП) сигналов и анализе особенностей их визуального представления [4].

В качестве средства вейвлет-анализа выделенных образцов функций используется многоуровневое одномерное вейвлет-разложение, называемое

декомпозицией сигнала. Выбор непрерывного ВВП основан на том, что за счёт свойства избыточности, обусловленной непрерывным изменением масштабных коэффициентов и параметра сдвига, визуальные результаты ВВП являются наиболее наглядными по сравнению с дискретным ВВП. Программные средства позволяют использовать его как для аналоговых, так и дискретных сигналов. Выбор в пользу непрерывного многоуровневого ВВП подтверждается более выраженной наглядностью представления вейвлет-спектра по сравнению с дискретным преобразованием. Для иллюстрации на рис. 2 показаны результаты: дискретного ВВП (средняя часть рис. 2) и непрерывного ВВП (нижний рисунок), вычисленные для тестового сигнала сложной структуры.

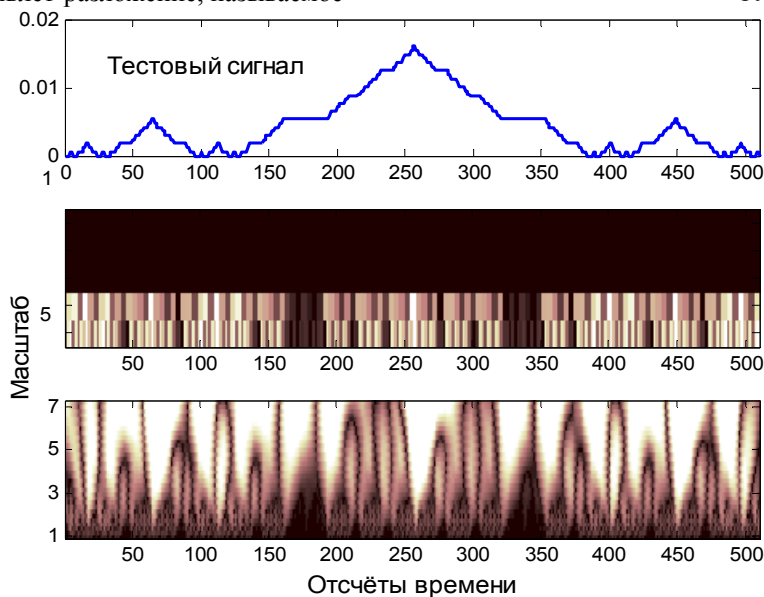


Рис. 2. Результаты дискретного и непрерывного вейвлет-преобразования

Наглядность спектрограмм нижнего рисунка значительно лучше.

Для непрерывного ВВП встроенная функция программного пакета [5; 6] непрерывного ВВП мно-

гомасштабного уровня имеет вид:

$$\text{COEFS} = \text{cwt}(s, \text{SCALE}, \langle \text{вид представления} \rangle),$$

где  $s$  – входной сигнал.

Функция вычисляет вейвлет-коэффициенты для каждого заданного уровня в пределах вектора сигнала и создаёт вейвлет-спектрограмму анализируемого сигнала. Сигнал задаётся выборкой значений  $\{s_k\}$ , то есть при аналоговом сигнале используется кусочно-постоянная функция. Вектор SCALE задаёт параметр масштабирования (ширину пакета), значение которого выбирается в пределах:

$$1 \leq x_1 < x_2 \leq \text{length}(s).$$

Значение коэффициента масштаба  $a$  управляет возможностью разрешения, которое определяется величиной  $1/a$ . Так, при  $j = 64$  (масштаб 1:64) разрешение составляет  $1/64$ .

Ниже представлены результаты вычисления вейвлет-спектров представленных на рис. 1 образцов функций.

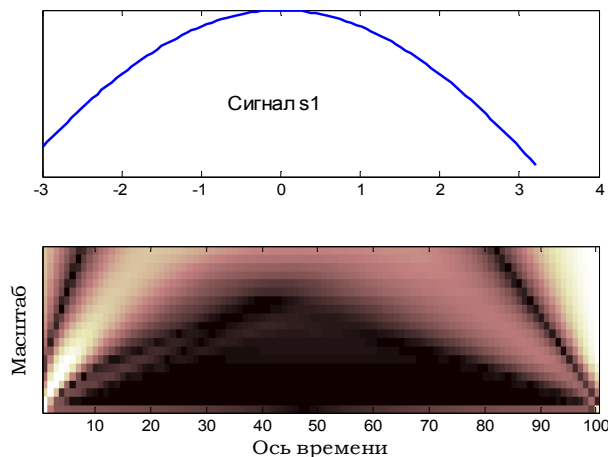


Рис. 3. Вейвлет-спектр одиночной цели для аналоговых сигнальных функций (гауссова функция)

На рис. 3, 4, 5 показаны рассчитанные спектрограммы для аналоговых сигнальных функций. Рис. 3 представляет вейвлет-спектр гауссовой функции, которую будем считать вейвлет-образом эхосигнала одиночной цели.

Тёмный фон на малых масштабах свидетельствует об отсутствии быстрых локальных изменений сигнала. Боковые полосы светлого тона обусловлены так называемым "краевым эффектом", который легко устраняется добавлением нулей в начале и конце сигнала или применением периодичности.

На рис. 4 показан вейвлет-спектр для модели эхосигнала парной сосредоточенной цели, когда время корреляции флюктуаций в области перекрытия соответствует нескольким импульсам пачки и изменение огибающей пачки носит плавный характер. В этом случае, как следует из рис. 4, не выражено наличие максимума гауссовой кривой и наблюдаются только "краевые" эффекты.

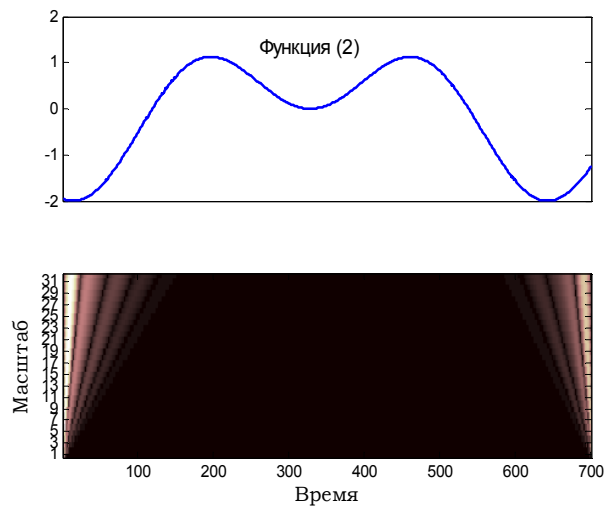


Рис. 4. Вейвлет-спектр для модели эхосигнала парной сосредоточенной цели

Практически более приемлемым является случай быстрых флюктуаций пачки в области перекрытия, когда кроме случайных изменений амплитуды каждого импульса появляется не менее двух провалов до значения ниже 0,5 (уровня отчёта). Вид спектрограммы для пачки с числом импульсов  $M = 64$  и областью перекрытия  $N = 16$  показан на рис. 5.

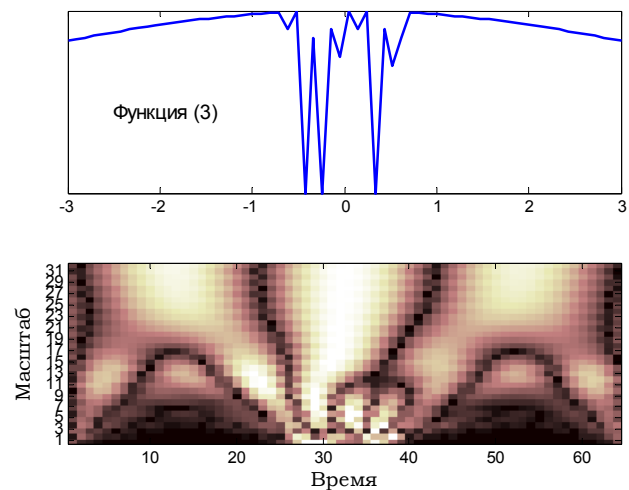


Рис. 5. Вейвлет-спектр для модели эхосигнала парной сосредоточенной цели при наличии не менее двух провалов до значения ниже 0,5

Из графика следует, что вейвлет-спектр наглядно показывает наличие быстрых локальных изменений огибающей в области провалов. При наличии видеоизображения образца спектрограммы рис. 3 его сравнение с рис. 5 вполне достоверно решает задачу распознавания – разрешения типа цели при обработке аналоговых сигналов.

На современном уровне разработки радиолокационных средств обнаружения предпочтение отдаётся методам цифровой обработки. В случае, когда не решается задача доплеровской селекции сигналов, применяется бинарное квантование принятого сигнала,

при котором на входе системы обработки сигнал представляет собой серию единичных значений в количестве, равном числу импульсов пачки – "M". Спектрограмма, представленная на рис. 6, определяет образец вейвлет-спектра гипотезы "одиночная цель".

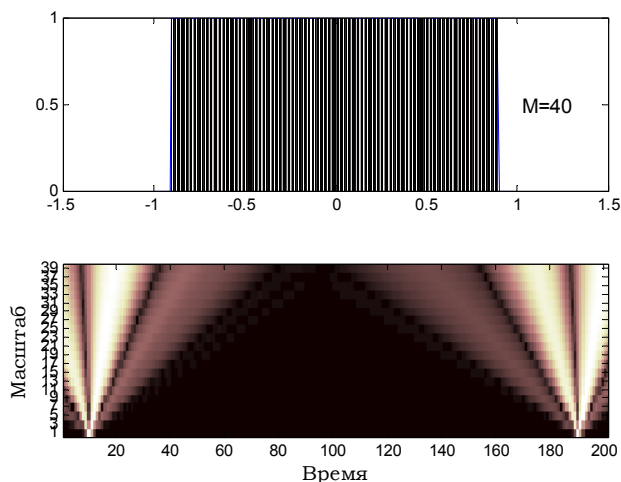


Рис. 6. Вейвлет-спектр одиночной цели для цифровых сигнальных функций

На спектрограммах рис. 6, как и для модели рис. 3, отсутствует (более явно) информация о локальных изменениях сигнала и сохраняются только области "краевых" эффектов.

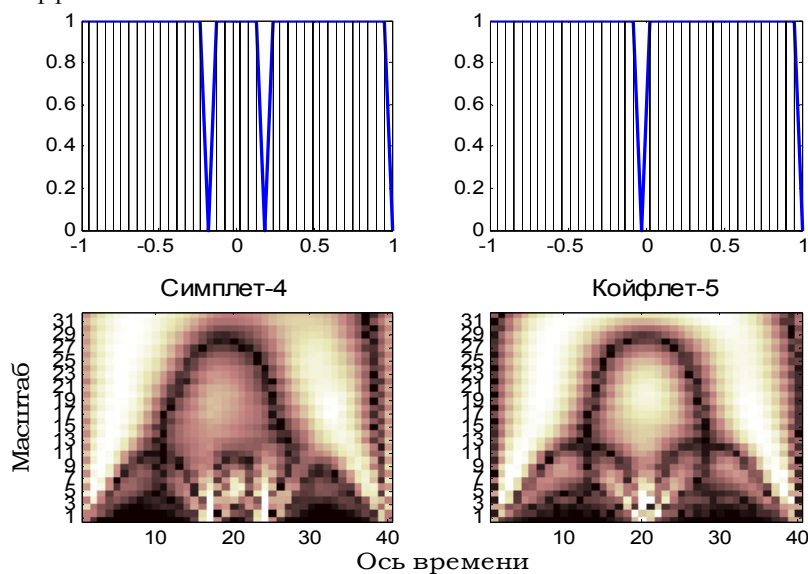


Рис. 7. Вейвлет-спектр для модели эхосигнала парной сосредоточенной цели при минимальном числе провалов для двух вариантов базисного вейвлета

С целью подтверждения данного утверждения на рис. 8 показан вейвлет-спектр прямоугольной дискретной пачки с флюктуациями в области перекрытия при незначительных флюктуациях амплитуды импульсов.

Различия между вейвлет-спектром образца (рис. 6) и изображением на рис. 8 вполне очевидны.

## Выводы

Возможности метода визуального распознавания типа целей по виду эхосигналов являются дос-

На следующем рис. 7 показаны вейвлет-спектры альтернативного решения "парная цель" при минимальном числе провалов (обосновано в [7]) для двух вариантов базисного вейвлета: симплет четвертого порядка и койфлет пятого порядка.

Очевидным является явно выраженное различие спектрограмм рис. 7 от рис. 6. Наиболее существенным с точки зрения практической реализации метода является тот факт, что даже при наличии всего одного провала (вероятность появления которого в области перекрытия пачек близка к 1) сохраняется та же возможность распознавания типа сигнала, как и при двух, а значит, и большем числе провалов в пачке эхосигнала. Сами провалы четко выражены на спектрограмме рис. 7 в виде светлых полос.

Из ранее проведенного анализа и результатов вычислений возникает существенный для практики вывод, что для распознавания выделенных классов сигналов совершенно не обязательно наличие нулевых провалов в функции-образе парной цели. Вид спектрограммы позволяет с достаточной степенью достоверности отличить функцию с "малыми" флюктуациями (провалы менее 0,5) по сравнению с функцией-образом эхосигнала одиночной цели (без флюктуаций).

таточно убедительными, хотя количественно эффективность нельзя выразить числовым показателем, как, например, при обнаружении – вероятностью обнаружения. Однако и вероятность обнаружения является аналитическим показателем качества обнаружения, поскольку реальная вероятность зависит от вероятности правильного визуального съёма информации с экрана индикатора оператором, которая может иметь большую степень разброса в связи с субъективными способностями оператора.

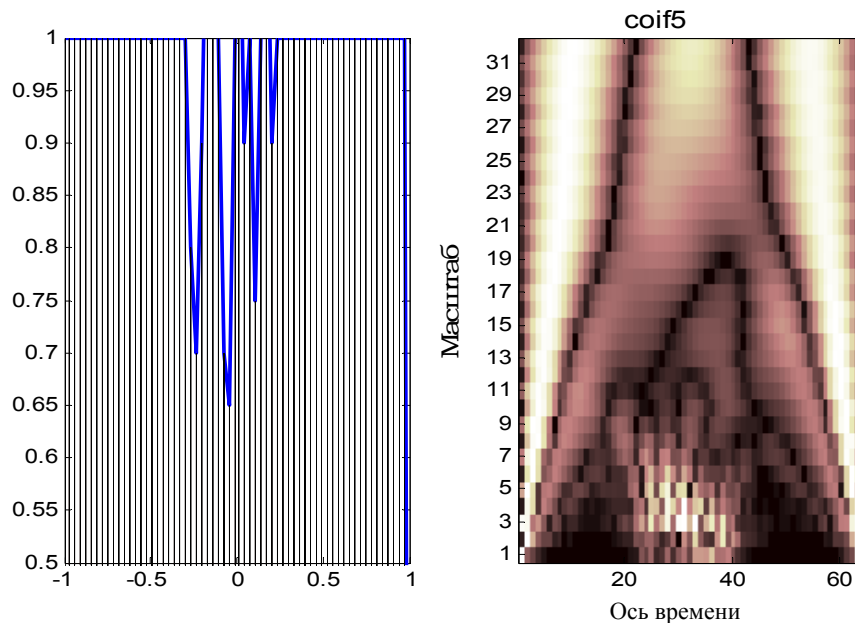


Рис. 8. Вейвлет-спектр прямокульної дискретної пачки з флюктуаціями в області перекриття при незначительних флюктуаціях амплитуду імпульсів

Метод дозволяє розрешати групові цілі, в яких число одиночних перевищує дві, що розширює практичні можливості методу. Аналіз спектрограм для випадку произвольного числа складових групової цілі являється предметом для подальших досліджень.

Реалізація методу візуального розпізнавання – розрешення передбачає тільки цифрову обробку сигналів, при цьому застосування багаторівневої обробки (6 – 8 рівнів) може бути переважним, оскільки в цьому випадку можливо розрешення цілей при відносно не глибокій флюктуації імпульсів області інтерференції.

### Список литературы

1. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов / С. Малла. – М.: Мир, 2005 – 671 с.
2. Долгушин В.П. Статистический анализ спектрально-временных параметров эхо-пачки сосредоточенной парной цели / В.П. Долгушин, Е.С. Ленков, В.Н. Лоза, Р.Ю. Кольцов // Сборник научных трудов Военного института Киевского национального университета имени Тараса Шевченко. – К., 2014. – № 45. – С. 24-33.

Тараса Шевченко. – К., 2013. – № 43. – С. 35-44.

3. Бурнаев Е.В. Применение вейвлет-преобразования для анализа сигналов / Е.В. Бурнаев. – М.: МФТИ, 2007. – 138 с.

4. Ленков С.В. Метод распознавания – разрешения групповых сосредоточенных целей на основе анализа визуальных результатов вейвлет-преобразования сигналов / С.В. Ленков, В.П. Долгушин, В.Н. Лоза, Ю.А. Цыцарев // Вестник Восточноукраинского национального университета им. В. Дала. – Луганск, 2014. – № 25. – С. 48-52.

5. Смоленцев Н.К. Вейвлет-анализ в MATLAB / Н.К. Смоленцев. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 448 с.

6. Дьяконов В.П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 976 с.

7. Долгушин В.П. Распознавание класса целей методом оценки статистических параметров вектора вейвлет-декомпозиции сигнала / В.П. Долгушин, В.Н. Лоза, А.Н. Борзак, Б.Г. Жиров // Сборник научных трудов Военного института Киевского национального университета имени Тараса Шевченко. – К., 2014. – № 45. – С. 24-33.

Поступила в редколлегию 14.11.2016

Рецензент: д-р техн. наук проф. Г.А. Кучук, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

### АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ МЕТОДУ ВІЗУАЛЬНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ – ДОЗВОЛУ ГРУПОВИХ ЗОСЕРЕДЖЕНИХ ЦІЛЕЙ НА ОСНОВІ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ

В.М. Лоза, Е.С. Ленков, М.Н. Охрамовіч

У статті розглядаються можливості методу візуального розпізнавання (дозволи) групових зосереджених цілей на основі візуального представлення результатів вейвлет-преобразования сигналів, відбитих від поодиноких і групових зосереджених цілей. Приведені спектрограми для моделей ехосигналу парної зосередженої мети, що відрізняються мірою гладкості і характером флюктуацій. Сформульовані висновки про можливість застосування розглянутого методу.

**Ключові слова:** групова мета, розпізнавання сигналів, вейвлет-перетворення.

### ANALYSIS OF POSSIBLE METHODS OF VISUAL RECOGNITION - RESOLUTION GROUP SUPPORTED THE OBJECTIVES BASED ON WAVELET TRANSFORMATION OF SIGNALS

V.N. Loza, E.S. Lenkov, M.N. Ohravovich

In the article possibilities of method of visual recognition (permissions) of the group concentrated aims are examined on the basis of visual presentation of results of вейвлет-преобразования of the signals reflected from the single and group concentrated aims. Spectrograms over are brought for the models of ехосигнала of the pair concentrated aim, different the degree of smoothness and character of флюктуацій. Conclusions are set forth about possibilities of application of the considered method.

**Keywords:** group target detection signals, the wavelet transform.