

УДК 621.382.323.001.57

Е.О. Евдокимова, В.П. Федосов**ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ АЛГОРИТМОВ РАЗЛОЖЕНИЯ
ДОПЛЕРОВСКИХ СИГНАЛОВ КОМПОНЕНТАМИ С ГАРМОНИЧЕСКИМ
ЗАКОНОМ ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТЫ**

Исследована помехоустойчивость алгоритмов декомпозиции многокомпонентных доплеровских сигналов, обеспечивающих распознавание подвижных объектов на основе отличий в движении элементов объекта с использованием доплеровской сигнатуры. Основной алгоритмов являются словари специальных сигналоподобных базисных функций, на основе которых обеспечивается формирование отличий сигнатур объекта. Базисные функции отражают наличие вращающихся или колеблющихся элементов объектов и характеризуются гармоническим законом модуляции частоты и могут быть описаны четырьмя параметрами гармонического колебания. В статье исследована помехоустойчивость алгоритмов, обеспечивающих выполнение подготовительных операций для классификации таких объектов, как вертолеты и другие винтовые летательные аппараты, идущий человек или животное. Алгоритмы могут использоваться, например, для классификации людей по походке. Возможно также применение алгоритмов для целей безопасности, например, распознавание по признаку гражданский или террорист, на основании общих признаков, которые ассоциированы с динамикой перемещения людей в экипировке и в гражданской одежде. Для всех этих задач необходимым условием достижения результата является наличие инструмента детального анализа микродоплеровских сигналов. Выделение отдельных компонент из сигнала-суперпозиции открывает возможности для детального анализа особенностей микродвижений элементов объектов. Показано, что словари используемых базисных функций обладают высокой помехоустойчивостью и решающей способностью даже при низком отношении сигнал/шум (ОСШ).

Доплеровская сигнатура; декомпозиция; помехоустойчивость.

Е.О. Evdokimova, V.P. Fedosov**NOISE STABILITY OF THE ALGORITHMS AIMED AT DOPPLER SIGNAL
REPRESENTATION IN TERMS OF THE COMPONENTS WITH HARMONIC
FREQUENCY MODULATION**

The noise stability of the Doppler signature decomposition algorithms intended for moving objects detection and recognition is investigated. The algorithms are aimed at Doppler spectrum analysis based on dictionaries composed of signal-like components describing micro-motions. Resolution ability of the dictionaries is explored. A basis of algorithms are dictionaries special similar to signal basic functions on which basis formation of differences of signatures of object is provided. In the paper noise stability of the algorithms designed for classification of such objects, as helicopters and other aircrafts and vehicles, walking human or animal. Also, such an algorithms can be used for personal recognition based on human gait deference, or classification civil-terrorist for security applications. Components extraction allows particular analysis and detail investigating of micro-Doppler signal features, associated with certain micro-motions. It is shown, that dictionaries provide a high noise stability and resolution even at the low relation a signal/noise (SNR).

Doppler signature; decomposition; noise stability.

Введение. За последнее десятилетие было выпущено множество работ, посвященных анализу микродоплеровских сигналов и его приложениям, особенно распознаванию и классификации подвижных объектов [1, 2]. В [3] представлено описание теории эффекта, а также приведены определения ключевых понятий и терминов. Микродвижения – это вибрации и вращения составных частей объекта,

сопутствующие глобальному поступательному движению. Примеры микродвижений: вращающиеся лопасти вертолетов или турбин, машущие движения крыльев птиц во время полета, качание конечностей человека или животного во время ходьбы [4, 5]. Микродоплеровский сигнал – это сигнал, который содержит в себе доплеровские смещения частоты, вызванные микродвижениями наблюдаемого объекта. Сигнатура микроДоплера – это уникальная характеристика движения, заключающаяся в сложной модуляции доплеровской частоты отраженного радиосигнала и выраженная распределением в частотно-временной области [3].

Так как информация о движении наблюдаемого объекта заключена в законе частотной модуляции эхосигнала, для анализа используют методы частотно-временного анализа, который на сегодняшний день представлен множеством пакетов и функций на различных языках программирования, например «Time-frequency analysis tools» для Matlab или «numpy - Frequency Analysis» для Python. Ряд исследований, представленных в современной литературе посвящен преобразованию сигналов в частотно-временную область [6, 9].

Среди исследований, посвященных анализу микродоплеровских сигналов важное место занимает разработка алгоритмов декомпозиции многокомпонентных сигналов со сложной модуляцией частоты [10, 15]. В [15] были получены результаты применения методов разреженных представлений для представления доплеровских сигналов суперпозицией функций словаря, где под словарем понимается матрица, столбцы которой содержат компоненты разложения, называемые атомами словаря. Словарь [15] был сформирован на основании модели однокомпонентного доплеровского сигнала описанной в [16]. Однако, для эффективного применения предложенных методов анализ помехоустойчивости для разных видов помех. Потенциальная разрешающая помехоустойчивость алгоритмов, основанных на использовании словарей, связана со свойствами словаря, например, со степенью взаимозависимости словарных функций. Текущее исследование посвящено исследованию разрешающей способности словарей по критерию Релея, сформированных на основе модели [16] при воздействии нормального шума.

Статья организована следующим образом: в первом разделе описана структура доплеровских сигналов, построенных на основании модели, второй раздел посвящен проблеме формирования словарей для конкретных задач, в третьем разделе произведен анализ помехоустойчивости алгоритмов, основанных на применении словарей, основанный на результатах компьютерного моделирования.

Модель микродвижения. В качестве модели микродвижения используется вращающийся отражатель с радиусом вращения r и частотой вращения Ω . Одновременно система совершает поступательное движение в направлении радара со скоростью v_0 . Как было показано в [16] мгновенную радиальную скорость вращающегося отражателя относительно приемного устройства можно упрощенно выразить через основные параметры модели r, v_0, Ω, α_0 :

$$v_R(t) = v_0 + 2\pi r \Omega \sin(2\pi \Omega t + \alpha_0), \quad (1)$$

где α_0 – начальная фаза вращения.

При отражении сигнала от подвижного объекта для определения знака доплеровских смещений и последующего анализа, сигнал представлен своей комплексной огибающей, сформированной на выходе квадратного приемника:

$$d(t) = M e^{j\theta(t)}, \quad (2)$$

где $M(t)$ и $\theta(t)$ – амплитуда и фаза комплексной огибающей соответственно.

Для рассматриваемого случая принимается $M = 1$, так как при формировании словаря функции должны быть нормированы. Фазовая модуляция сигнала связана с законом доплеровского смещения частоты выражением

$$\theta(t) = 2\pi \int f_D(t) dt, \quad (3)$$

где f_D , согласно эффекту Доплера выражается через закон изменения радиальной скорости наблюдаемого объекта и длину волны излучателя λ :

$$f_D(t) = \frac{2v_R(t)}{\lambda}. \quad (4)$$

С учетом (1), (3), и (4) фаза аналитического сигнала может быть выражена в виде

$$\theta(t) = -\frac{2\pi}{\lambda}(v_0 t + r \cos(2\pi\Omega t + \alpha_0)). \quad (5)$$

Представим сигнал (2) в частотно-временной области с помощью оконного преобразования Фурье:

$$F(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} d(\tau)h(\tau - t)e^{-i\omega\tau} d\tau, \quad (6)$$

где $h(t)$ – оконная функция.

Параметры частотно-временного распределения, представленные на рис. 1, связаны с параметрами закона изменения фазы сигнала следующими соотношениями:

$$A = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot R \cdot \Omega; A_0 = \frac{2v_0}{\lambda}.$$

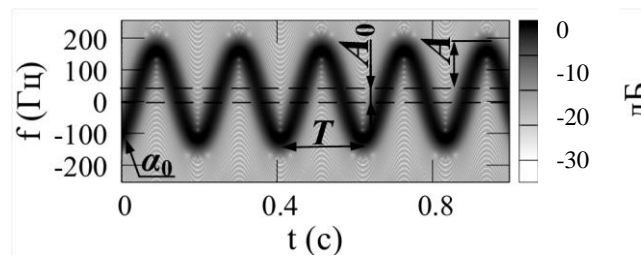


Рис. 1. Спектрограмма сигнала с гармоническим законом изменения частоты

Формирование словаря. Путем дискретизации сигналов вместо непрерывного сигнала $d(t)$, рассмотренного в разделе 1, получим n отсчетов сигнала, которые могут быть представлены n -м вектором \mathbf{d} . Пусть столбцы матрицы словаря \mathbf{D} содержат векторы \mathbf{d}_γ , где индекс γ пробегает множество всех индексов Γ :

$$\mathbf{D} = \{\mathbf{d}_\gamma : \gamma \in \Gamma\} \subset \mathbb{C}^n.$$

На основании модели, рассмотренной выше, атомы словаря могут быть представлены в следующем виде:

$$\mathbf{d}_\gamma = M_\gamma e^{j(B_\gamma + A_\gamma \cos(2\pi\Omega_\gamma t + \Psi_\gamma))},$$

где гармонический закон изменения фазы описывается четырьмя параметрами: A – амплитуда, B – постоянная составляющая, Ω – частота, Ψ – начальная фаза. Понятие словаря поясняется рис. 2, на котором представлены спектрограммы отдельных атомов. Параметры компонент словаря пробегают все значения из заданного диапазона. Сетка параметров выбирается исходя из разрешающей способности словаря.

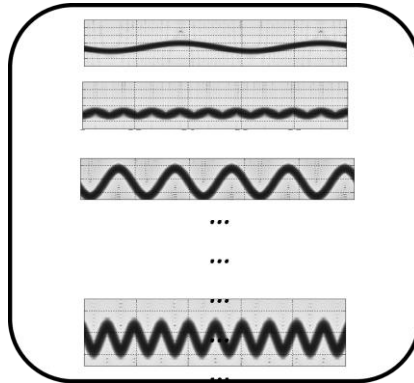


Рис. 2. Пояснение к понятию словаря функций

Функции рассматриваемого словаря не ортогональны. Проанализировать взаимную когерентность атомов словаря можно на основании матрицы Грама $\mathbf{G}\mathbf{r} = \mathbf{D}^T\mathbf{D}$, которую вводят для анализа линейной зависимости системы векторов. Определителем Грама системы векторов $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_n$ называется следующий определитель [17]

$$\begin{vmatrix} (\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_1) & (\mathbf{d}_2, \mathbf{d}_1) & \dots & (\mathbf{d}_n, \mathbf{d}_1) \\ (\mathbf{d}_2, \mathbf{d}_1) & (\mathbf{d}_2, \mathbf{d}_2) & \dots & (\mathbf{d}_n, \mathbf{d}_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\mathbf{d}_n, \mathbf{d}_1) & (\mathbf{d}_n, \mathbf{d}_2) & \dots & (\mathbf{d}_n, \mathbf{d}_n) \end{vmatrix}$$

Если определитель Грама не равен нулю, то векторы линейно независимы и все элементы матрицы, кроме диагональных, равны нулю. В противном случае векторы линейно зависимы, и анализ ненулевых элементов позволяет оценить степень взаимной корреляции векторов.

Выбирая функции словаря с разными параметрами, можно построить модель многокомпонентного сигнала

$$\mathbf{y} = \sum_{i=1}^N k_i \cdot \mathbf{d}_i,$$

где \mathbf{y} – вектор отсчетов входного сигнала $y(t)$, k_i – коэффициенты, характеризующие вклады соответствующих компонент \mathbf{d}_i в исходный сигнал.

Например, на рис. 3 показана спектрограмма сигнала, моделирующего отражения от системы вращающихся отражателей для разных радиусов и частот вращения.

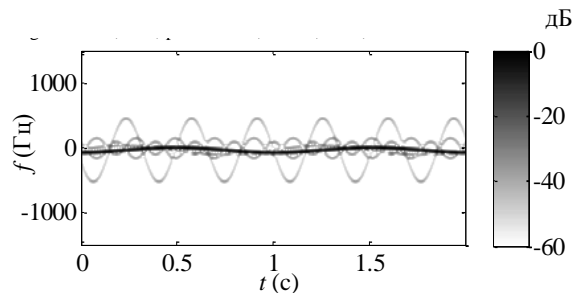


Рис. 3. Спектрограмма микродоплеровского сигнала, содержащего 7 компонент

Анализ помехоустойчивости. Для представления многокомпонентного сигнала элементами описанного словаря, необходимо искать атомы наиболее близкие к исходным компонентам. В качестве критерия схожести выступает скалярное произведение атома и исходного сигнала. При перемножении всех функций словаря и входных сигналов, как показано на рис. 4, формируется вектор коэффициентов $k = [k_1, k_2, \dots, k_N]$, который называется функцией подобия.

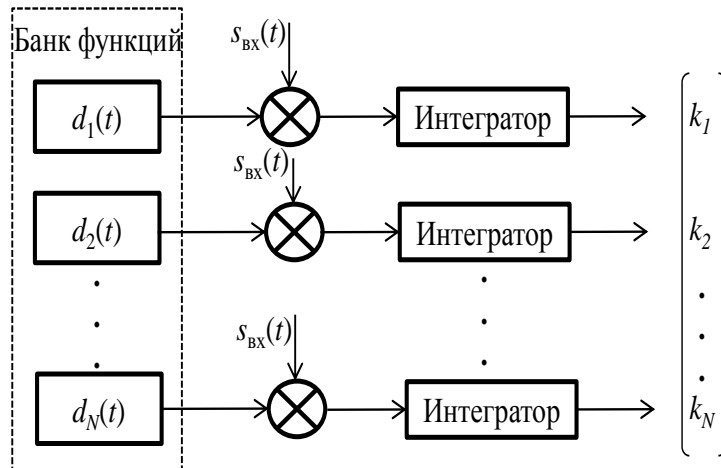


Рис. 4. Схема получения отклика входного сигнала при перемножении с функциями времени

Функция определена на пространстве параметров вышеописанной модели. Влияние шума на точность оценки параметров сигнала проявляется в смещении или исчезновении максимума функции подобия в параметрическом пространстве. Для удобства визуализации примем, что неизвестными являются только два параметра модели: амплитуда и частота изменения компонент в частотно-временной области. Тогда функция подобия в области некоторой точки параметрической области с координатами (A, Ω) может быть определена в следующем виде:

$$I(\Delta A, \Delta \Omega) = \langle \mathbf{d}(A, \Omega) \mathbf{d}^*(A + \Delta A, \Omega + \Delta \Omega) \rangle,$$

где $\langle * \rangle$ – скалярное произведение векторов. Функция отклика в зависимости от смещения компонент представлена на рис. 5.

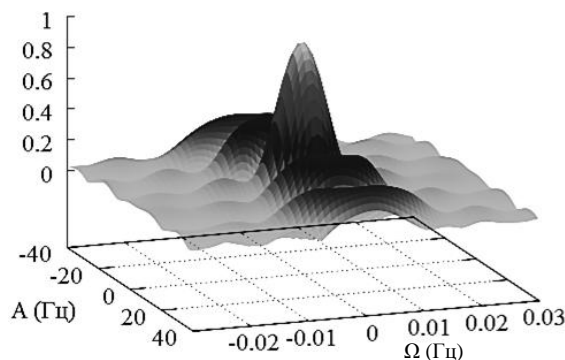


Рис. 5. Функция подобия в параметрической области

Точность оценки параметров не может превышать шаг сетки параметров. На рис. 6 представлен график зависимости ошибки оценки параметров A и Ω от отношения сигнал/шум (ОСШ).

Разрешающая способность словаря – это минимальное расстояние между атомами в параметрическом пространстве, при котором атомы разрешимы по критерию Релея. Функция подобия для сигнала, представленного суммой двух компонент словаря, показана на рис. 7.

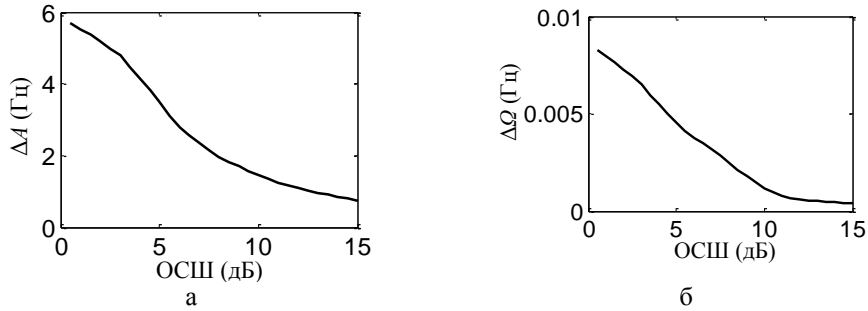


Рис. 6. График зависимости точности оценки параметра ΔA от ОСШ

График фигуры функции подобия на рис. 7 поясняет ситуацию, когда компоненты сигнала различимы, так как глубина провала между локальными максимума функции равна 0,5.

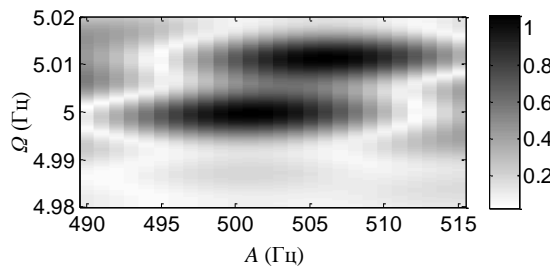


Рис. 7. Функция подобия для двухмерного параметрического пространства

На рис. 8 представлен идеализированный случай без учета шума. В результате влияния шума разрешающая способность словаря ухудшается, как показано на рис. 9, где по осям отложены ОСШ в дБ и расстояние между компонентами сигнала на параметрическом пространстве.

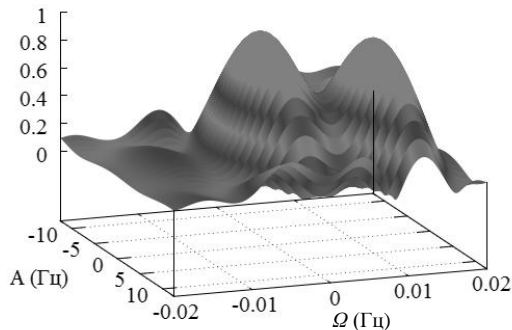


Рис. 8. Фигура функции подобия двухкомпонентного сигнала

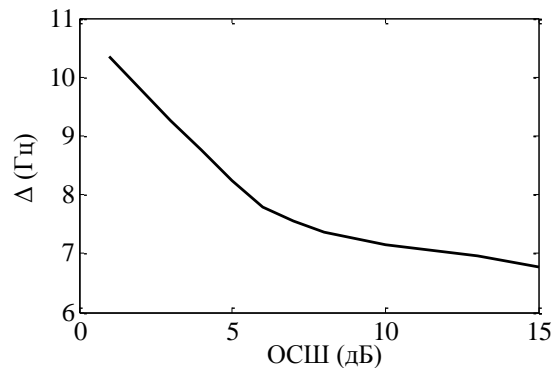


Рис. 9. График зависимости разрешающей способности словаря от ОСШ

Выводы. Произведен анализ помехоустойчивости и разрешающей способности методов, основанных на использовании словарей линейно зависимых функций. Для исследования был выбран сигнал с гармоническим законом изменения частоты с двумя неизвестными параметрами: амплитудой и частотой изменения фазы сигнала. Было показано, что словари обладают высокой помехоустойчивостью и разрешающей способностью даже при низком ОСШ. Так, при ухудшении ОСШ до 4 дБ погрешность оценки искомой амплитуды увеличивается до 4 Гц. Важно отметить, что словарные функции чувствительны к изменению частоты фазовой модуляции доплеровского сигнала. Погрешность оценки при ОСШ 3 дБ не превышает 0,005 Гц. Это связано с тем фактом, что изменение рассматриваемой частоты влечет за собой изменение всей структуры сигнала.

Рассмотренные словари могут применяться для преобразования и декомпозиции доплеровских сигналов, представления многокомпонентных сигналов со сложной частотной модуляцией в виде набора компонент. Так как для эффективного распознавания необходимо сформировать ряд информативных признаков, перспективно использовать в этом качестве векторы разреженных коэффициентов, которые представляют собой выдержку ключевой структурной информации микродоплеровской сигнатуры сигнала, характеризующейся сложной структурой и широким спектром. Также разреженные представления могут использоваться для оценки характеристик микродвижений, которые напрямую связаны со спектром сигнала. Это может служить толчком для применения доплеровских радаров в медицине для анализа походки человека, для выделения структурных отклонений и последующей их коррекции. Так же одним их возможных приложений является биометрическое распознавание по походке, которое возможно в силу индивидуальности характера движений каждого человека. Возможно также применение алгоритмов для целей безопасности, например, распознавание по признаку гражданский или террорист, на основании общих признаков, которые ассоциированы с динамикой перемещения людей в экипировке или в гражданской одежде. Для всех этих задач необходимым условием достижения результата является наличие инструмента детального анализа микродоплеровских сигналов. Выделение отдельных компонент из сигнала-суперпозиции открывает возможности для детального анализа особенностей микродвижений элементов объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bilik I., Tabrikian J., Cohen A. GMM-based target classification for ground surveillance Doppler radar // Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on. – 2006. – № 42 (1). – P. 267-278.

2. *Otero M.* Application of a continuous wave radar for human gait recognition. In Defense and Security // International Society for Optics and Photonics. – 2005. – P. 538-548.
3. *Chen V.C.* The micro-Doppler effect in radar. – Artech House Publishers, 2011. – 290 p.
4. *Chen V.C., Li F., Ho S.S., Wechsler H.* Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study // Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on. – 2006. – № 42 (1). – P. 2-21.
5. *Tahmoush D., Silvious J.* Modeled gait variations in human micro-Doppler // In Radar Symposium (IRS). – 2010. – 11th International IEEE. – P. 1-4.
6. *Boashash B.* Time frequency analysis. Access Online via Elsevier. – 2003. – 81 p.
7. *Chen V.C.* Analysis of radar micro-Doppler with time-frequency transform. In Statistical Signal and Array Processing // Proceedings of the Tenth IEEE Workshop on. – 2000. – P. 463-466.
8. *Mallat S.G., Zhang Z.* Matching pursuits with time-frequency dictionaries // Signal Processing, IEEE Transactions on. – 1993. – № 41(12). – P. 3397-3415.
9. *Sejdić E., Djurović I., & Jiang J.* Time-frequency feature representation using energy concentration: An overview of recent advances // Digital Signal Processing. – 2009. – № 19 (1). – P. 53-183.
10. *Thayaparan T., Abrol S., Riseborough E. et al.* Analysis of radar micro-Doppler signatures from experimental helicopter and human data // IET Radar, Sonar & Navigation. – 2007. – № 1 (4). – P. 289-299.
11. *Fogle O.R., Rigling B.D.* Micro-Range/Micro-Doppler Decomposition of Human Radar Signatures // Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on. – 2012. – № 48 (4). – P. 3058-3072.
12. *Raj R.G., Chen V.C., Lipps R.* Analysis of radar human gait signatures // Signal Processing, IET. – 2010. – № 4 (3). – P. 234-244.
13. *Raj R. G., Chen V.C., Lipps R.* Analysis of radar dismount signatures via non-parametric and parametric methods // In Radar Conference, IEEE. – 2009, May. – P. 1-6.
14. *Cai C., Liu W., Fu J.S.* Empirical mode decomposition of micro-Doppler signature // In Radar Conference, IEEE International. – 2005, May. – P. 895-899.
15. *Евдокимова Е.О., Федосов В.П.* Анализ алгоритмов декомпозиции многокомпонентных доплеровских сигналов для определения параметров движения объектов // Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние ЭМВ – ИРЭМВ-2-13». – Таганрог: Изд-во ЮФУ. – 2013. – С. 679-684.
16. *Евдокимова Е.О.* Модель сигнала для оценки параметров подвижных объектов на основе анализа доплеровского спектра // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 5 (142). – С. 122-128.
17. *Ильин В.А., Позняк Э.Г.* Линейная алгебра. – М.: Наука, 1974. – 296 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.Е. Галушкин.

Евдокимова Екатерина Олеговна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: ekaterina_tut@inbox.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371632; кафедра теоретических основ радиотехники.

Федосов Валентин Петрович – e-mail: vpfedosov@sfedu.ru; кафедра теоретических основ радиотехники; д.т.н.; профессор.

Evdokimova Ekaterina Olegovna – Federal State Owner Autonomous Educational Establishments of Higher Education “Southern Federal University”; e-mail: ekaterina_tut@inbox.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371632; the department of fundamental of radioengineering.

Fedosov Valentine Petrovich – e-mail: vpfedosov@sfedu.ru; the department of fundamental of radioengineering; dr. of eng. sc.; professor.