

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЛОКАЦИИ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ЗАКРЫТЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Аннотация

Актуальность и цели. Рассмотрены принципы построения системы управления мобильным роботом на основе ультразвуковой системы (УЗС) отслеживания координат, а также методы цифровой обработки сигналов для обнаружения и выделения частотных составляющих. Целью работы является обоснование, выбор и совершенствование существующих алгоритмов обработки сигналов для локации объектов.

Материалы и методы. Исследование проводилось с использованием среды Matlab, физической модели мобильного робота, ультразвуковой навигационной системы.

Результаты. Сопоставлены инверсные системы, в которых приемники стационарны, а излучатели мобильны, с неинверсными системами, в которых излучатели стационарны, а приемники мобильны. Обоснованы методы цифровой обработки сигналов для задач локации объекта – спектрального, корреляционного и параметрического анализа.

Выводы. Предложенные решения позволяют повысить точность позиционирования мобильного робота по сравнению с относительными системами позиционирования. Обосновано применение алгоритмов Прони и Рутисхаузера для выделения близких частотных составляющих, проведено их сравнение.

Ключевые слова: алгоритмы, навигация, мобильный робот, параметрический анализ, метод Прони, метод Рутисхаузера.

N. V. Myasnikova, S. V. Boryak, M. G. Myasnikova

SIGNAL PROCESSING IN ULTRASONIC OBJECT'S COORDINATE TRACKING SYSTEMS FOR ENCLOSED SPACES

Abstract.

Background. The principles of building a mobile robot control system based on an ultrasonic coordinate tracking system (USS), as well as methods of digital signal processing for detecting and isolating frequency components are considered. The purpose of this work is to substantiate, select and improve existing signal processing algorithms for object location.

Materials and methods. The research was carried out using the Matlab environment, a physical model of a mobile robot, and an ultrasonic navigation system.

Results. Inverse systems having stationary receivers and mobile emitters are compared with non-inverse systems in which the emitters are stationary and the receivers are mobile. The methods of digital signal processing – spectral, correlation, and parametric analysis - have been studied.

Conclusions. The proposed solutions make it possible to improve the positioning accuracy of the mobile robot in comparison with relative positioning systems. The application of the Proni and Rutishauser algorithms for identifying close frequency components is justified, and their comparison is carried out.

Keywords: algorithms, navigation, mobile robot, para-metric analysis, Prony method, the method of Rutishauser.

Введение

Сейчас повсеместно внедряется автоматизация [1], многие компании разрабатывают системы автопилотов для машин, ориентированные на закрытые или открытые помещения. Для закрытых помещений наиболее часто используется ультразвуковая навигационная система, работающая по принципу GPS [2], но только в закрытых помещениях и с погрешностью в пределах 3 см. В данной статье мы опишем: свой опыт в построении системы управления мобильным роботом на основе ультразвуковой системы (УЗС) отслеживания координат; способы цифровой обработки сигналов для обнаружения и выделения частотных составляющих.

Принципы построения систем

Существует множество вариаций данных систем, но все они делятся на две большие группы, инверсные и неинверсные. Структурная схема инверсной системы представлена на рис. 1, а неинверсной системы – на рис. 3 [3].

Структурная схема инверсной системы следующая: установлены 4 приемника ультразвукового сигнала (УЗ) $R_1...R_4$, и несколько излучателей УЗ-сигнала $T_1...T_3$, в данном случае 3. Приемники стационарны, излучатели мобильны. Применяется временное разделение излучателей. Физика звука такова, что мы можем делать только 10 измерений УЗ в секунду, это вызвано тем, что звук медленно распространяется, вследствие чего определение координат одного объекта происходит с частотой 10 Гц, если же необходимо отслеживать 10 объектов, то частота определения координат каждого из них 1 Гц. На рис. 1 изображено отслеживание координат T_3 .

При каждом цикле измерения координат на каждом приемнике R мы имеем сигналы, изображенные на рис. 2.

В данных сигналах выделяется область прихода информативного сигнала и рассчитывается время, на основании которого определяются длины $L_{3_1}, L_{3_2}, L_{3_3}, L_{3_4}$.

В неинверсной системе обратная архитектура. Излучатели (T) стационарны, а приемники (R) мобильны, и при временном разделении сигнала получается система с неограниченно растущим числом отслеживаемых объектов, при этом не изменяется частота определения их координат. Но по времени здесь разделены стационарные модули, которые являются излучателями УЗ-сигнала, вследствие чего возникают две проблемы: с ростом площади покрытия и, соответственно, числа стационарных модулей уменьшается частота обновления координат всех отслеживаемых объектов. Из-за того что излучатели разделены по времени и работают обычно с задержкой в 100 мкс, а отслеживаемые объекты в этот момент перемещаются, появляется ошибка прямо пропорциональная скорости отслеживаемых объектов.

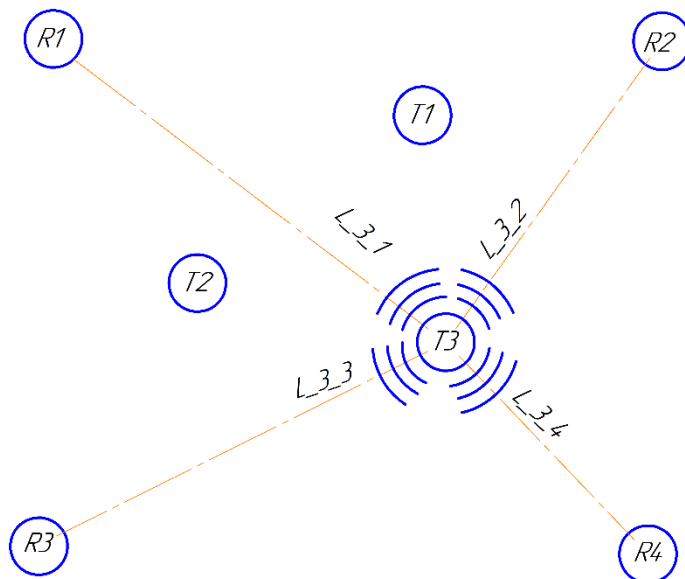


Рис. 1. Структурная схема инверсной системы

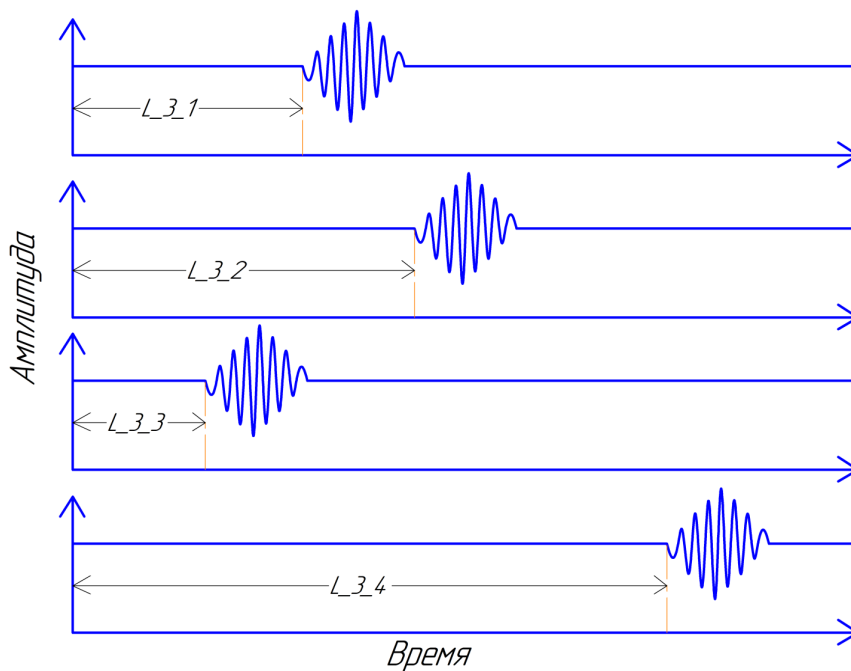


Рис. 2. Сигналы, получаемые приемниками в инверсной системе

Из вышесказанного следует вывод, что главная проблема – это временное разделение сигналов. Альтернативой выступает частотное разделение сигналов, которое может применяться в обеих конфигурациях, описанных выше [4].

Здесь ограничение накладывается числом рабочих частот. Обычно рабочий диапазон для излучателя SensComp 600 от 44 до 65 кГц. Этот диапазон можно расширить до значений до 120 кГц, но тогда придется использовать

отдельный пьезокерамический диск для каждой частоты, так как указанные излучатели эффективны только на своей резонансной частоте, которая определена его физическими свойствами. Микрофоны же имеют широкий диапазон частот и поэтому не накладывают на систему таких ограничений. Также необходимо учитывать, что пьезокерамические диски обычно выпускаются с шагом резонансной частоты в 20 кГц, так что мы имеем шесть рабочих частот.

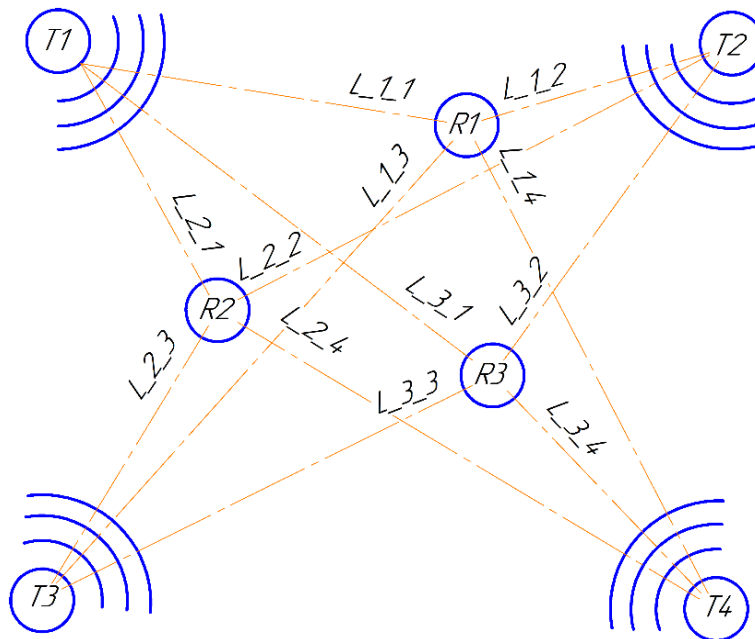


Рис. 3. Структурная схема неинверсной системы

Данный подход наиболее эффективен при неинверсной системе. Стационарные модули располагаются на расстоянии в несколько метров и это жестко детерминировано, в то время как мобильные модули постоянно перемещаются и могут быть собраны в одну группу, вследствие чего использовать неинверсную систему более эффективно в подавляющем большинстве случаев. Структурная схема неинверсной системы с частотным разделением представлена на рис. 3. Излучатели T1, T2, T3 и T4 излучают в одно и то же время на разных частотах, а приемники R1, R2 и R3 одновременно слушают эфир и записывают сигналы, представленные на рис. 4.

Выделение частотных составляющих и детектирование их начала является большой проблемой, особенно если несколько сигналов накладывается друг на друга.

Очевидно, при этом следует решить две задачи: определить частотный состав и найти «начало» отклика на каждой частоте.

Первая задача классическая для спектрального анализа. Наиболее известный алгоритм – дискретное преобразование Фурье (ДПФ) – не может дать решения задачи по двум причинам:

– это преобразование довольно затратное (N^2 операций умножения для реализации длиной N при классическом ДПФ или $N \log(N)$ при использовании быстрого преобразования);

– разрешение зависит от интервала анализа T , поэтому для обнаружения и разделения близких частотных составляющих требуется длинная реализация, что несовместимо с обработкой в режиме реального времени.

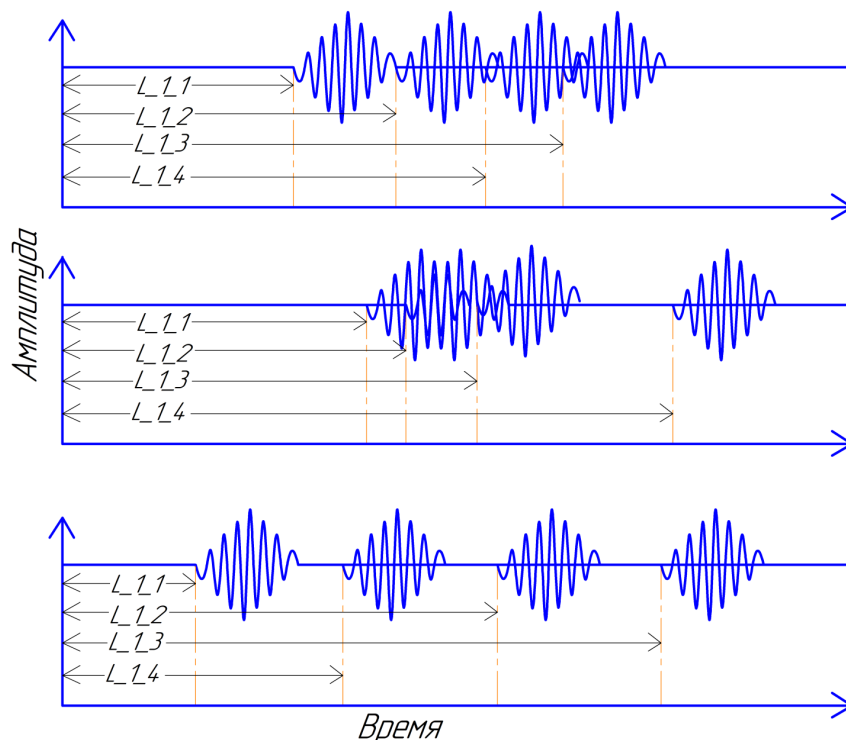


Рис. 4. Сигналы, получаемые приемниками в неинверсной системе

Бликие частотные составляющие могут быть выделены по короткой реализации данных с помощью параметрических методов спектрального анализа – метод Юла – Уолкера, метод Писаренко, метод Прони и др.

Для определения параметров компонент сигналов сложной формы наиболее подходящими являются методы Прони [5] и частных и разностей Рутисхаузера (QD-алгоритм) [6]. На рис. 5 приведена диаграмма Бode для модельного сигнала из трех близких составляющих, близких частотных составляющих 17.7000, 18.000 и 18.3030 кГц с одинаковыми амплитудами, при этом шаг дискретизации $dt = 0,01$ с. При этом методом Рутисхаузера были выделены частоты 18.2993, 17.7000 и 17.9901 кГц, а методом Прони 18.3604, 17.9526 и 17.6879. Метод Рутисхаузера позволяет выделять и более близкие компоненты, отличающиеся на тысячные доли, и обладает более низкой трудоемкостью по сравнению с методами на основе авторегрессионных моделей.

Чтобы объяснить этот факт, очень кратко изложим оба алгоритма.

Рассмотрим сначала метод Прони [5]. Он основан на согласовании кривой, содержащей p экспоненциальных членов с результатами измерений. Предполагается, что аппроксимирующая функция принимает форму,

$$\hat{x}(t) = \sum_{m=1}^p A_m e^{\alpha_m |t|} e^{j(2\pi f_m t + \theta_m)}, \quad (1)$$

причем функция определена при $-\infty < t < \infty$. Вещественный процесс моделируется комплексно-сопряженной парой $e^{j(2\pi f_m t + \theta_m)}$ и $e^{-j(2\pi f_m t + \theta_m)}$. Здесь p – порядок модели; A_m , α_m , f_m , θ_m – параметры колебательного звена (амплитуда собственных колебаний, коэффициент затухания, собственная частота и запаздывание).

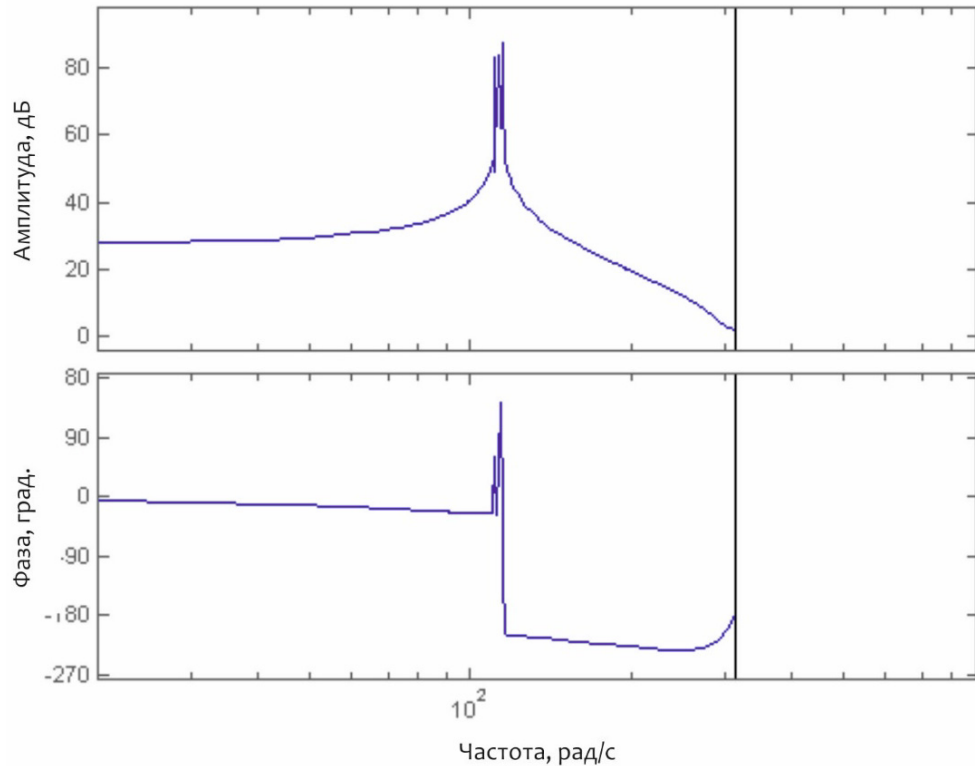


Рис. 5. Диаграмма Бode сигнала с близкими частотными составляющими

Метод Прони содержит три основных этапа: определение коэффициентов линейного предсказания $a_j, j = 1..p$; решение характеристического уравнения $z^p + a_1 z^{p-1} + \dots + a_p = 0$, корни которого $z_{i,i+1} = e^{(\alpha_i \pm j 2\pi f_i) \Delta t}$ несут информацию о собственных частотах и коэффициенте затухания колебания; определение комплексных амплитуд $h_j = U_j e^{j\varphi_j}, j = 1, \dots, p$, по известным

корням $y_i = \sum_{j=1}^p h_j z_j^i$.

В методе Рутисхаузера [6] задача экспоненциальной аппроксимации сигнала $F(t)$, рассматриваемого в промежутке $[t_0, T]$ состоит в определении параметров экспоненциальной суммы (1) по результатам $2n$ измерений $\{F(t_v)\}_0^{2n-1}$ сигнала $F(t)$ в заданные последовательные моменты времени

$\{(t_\nu)\}_0^{2n-1}$, $t_i \in [t_0, T]$. Решение задачи сводится к представлению в виде суммы простейших дробей рациональной функции $f(z)$, представляющей z -преобразование исходной функции $F(t)$, для которой

$$F(t_\nu) = s_\nu = \sum_{k=1}^n a_k e^{\alpha_k(t_0 + \nu h)}, \quad \nu = 0, 1, \dots, 2n-1,$$

тогда

$$f(z) = \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{s_\nu}{z^{\nu+1}} = \sum_{k=1}^n \frac{c_k}{z - \lambda_k}, \quad \text{где } \lambda_k = e^{\alpha_k h}, \quad c_k = a_k e^{\alpha_k t_0}.$$

Применяется алгоритм Рутисхаузера к последовательности $\{\tilde{s}_\mu\}_0^{M-1}$ следующим образом: по значениям \tilde{s}_μ вычисляют частные $\tilde{q}_k^{(\mu)}$ и разности $\tilde{e}_k^{(\mu)}$, $k = 1, 2, \dots$, с помощью правил ромба:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{e}_k^{(\mu)} &= \tilde{e}_{k-1}^{(\mu+1)} + \tilde{q}_k^{(\mu+1)} - \tilde{q}_k^{(\mu)}, \\ \tilde{q}_{k+1}^{(\mu)} &= \tilde{q}_k^{(\mu+1)} \frac{\tilde{e}_k^{(\mu+1)}}{\tilde{e}_k^{(\mu)}}, \end{aligned} \right\} k = 1, 2, \dots,$$

при условии, что $\tilde{q}_1^{(\mu)} = \tilde{s}_{\mu+1} / \tilde{s}_\mu$, $\mu = 0, 1, \dots, M-1$, а все числа $\tilde{e}_0^{(\mu)}$ равны нулю.

В результате применения обоих алгоритмов получаем все параметры мод и аппроксимацию сигнала по формуле (1).

Снижение трудоемкости в методе Рутисхаузера по сравнению с методом Прони обусловлено тем фактом, что вместо трудоемкого решения степенного уравнения высокого порядка (например, методом Лагера в алгоритме Прони) в методе частных и разностей решаются степенные уравнения не выше второго порядка. Поэтому вместо трудоемкости оценивания параметров модели порядка p в методе Прони, пропорциональной p^3 , при использовании метода частных и разностей получаем трудоемкость, пропорциональную $4p \left(\frac{p}{2} \cdot 2^3 \right)$. То есть трудоемкость снижается в $p^2 / 4$ раза.

Итак, два фактора – меньшая трудоемкость и лучшее разрешение в частотной области – делают применение метода Рутисхаузера более предпочтительным.

Так как метод Рутисхаузера вычисляет частные и разности, то он довольно чувствителен к шумам и промахам измерений. Есть два подхода к снижению этой чувствительности: замена большим шагом дискретизации с интегрированием по интервалу [7, 8]; применение метода наименьших квадратов (МНК) для согласования N уравнений с порядком системы p . Хотя прямых предпосылок для применения второго подхода (МНК) нет, авторы основывались на общности некоторых этапов алгоритмов Прони и Рутисхаузера.

Первый подход, конечно, более обоснован и удобен, но в рассматриваемых задачах речь идет об очень близких частотных составляющих, следовательно, нежелательно увеличивать шаг дискретизации. Поэтому авторы остановились на втором, т.е. фактически используется комбинация методов Рутисхаузера и Прони.

Момент появления составляющей в сигнале может быть определен с помощью кросскорреляционной функции. На рис. 6 показан фрагмент сигнала, представляющего собой сумму близких частотных составляющих 37080, 40450, 41000 и 30000 Гц, а на рис. 7 – кросскорреляционная функция с одной из них: смещение экстремума функции относительно нуля показывает момент появления этой составляющей, а близость максимума нормированной корреляционной функции к «1» указывает на степень сходства.

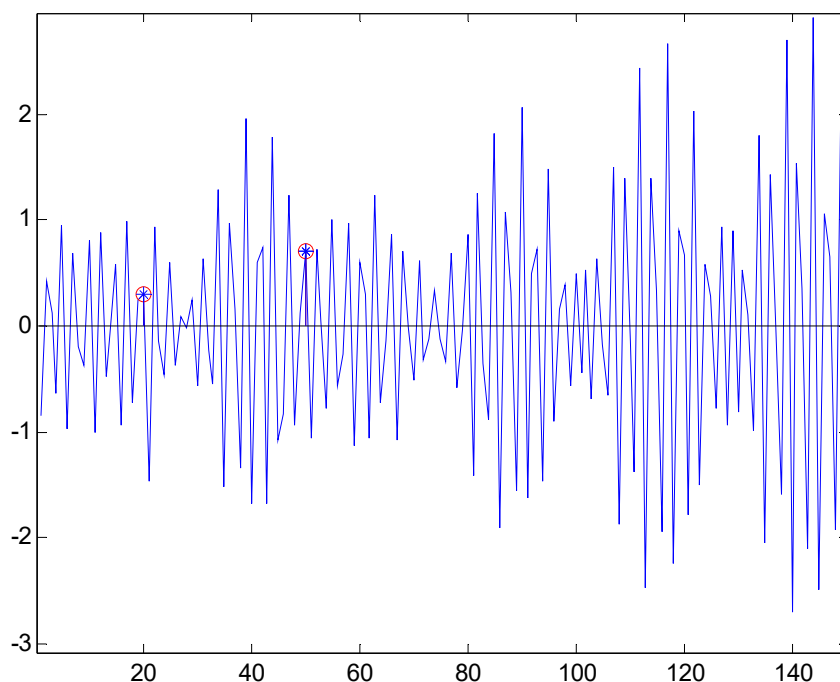


Рис. 6. Сигнал и определения «начала» его составляющих по корреляционной функции: по оси x номера отсчетов сигнала, а по оси y – его значения в размерных единицах

Точно определены моменты появления (номера отсчетов) составляющих [20 50 0], что показано на рис. 6 знаком «*», а на рис. 7 приведена кросскорреляционная функция с одной из составляющих.

Некоторые вопросы локации уже рассматривались авторами. В работах использовался аппарат экстремальной фильтрации для обнаружения и локации объектов [9, 10].

Заключение

Авторами обоснован выбор неинверсной ультразвуковой системы с частотным разделением. Обоснован, разработан и апробирован математический аппарат для решения задачи локации в ультразвуковых системах, обеспечи-

вающий разделение близких частотных составляющих. Дальнейшее направление исследований – адаптация алгоритмов к режиму реального времени.

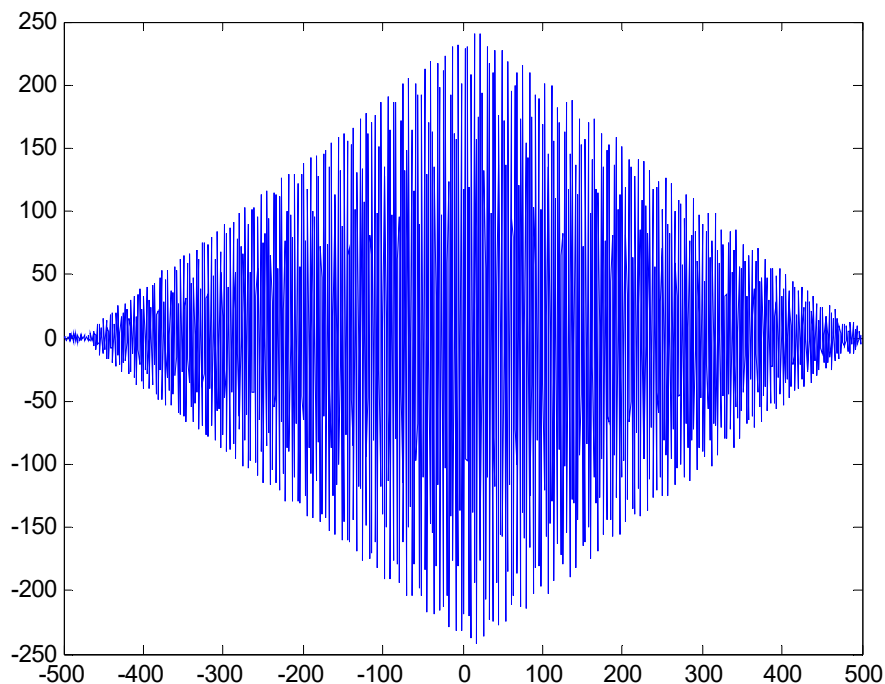


Рис. 7. Кросскорреляционная функция с одной из составляющих:
по оси x отсчеты функции, по оси y – ее значения

Библиографический список

1. Аналитический обзор мирового рынка робототехники 2019, Sberbank Robotics Laboratory // sberbank.ru. – URL: http://www.sberbank.ru/common/img/uploaded/pdf/sberbank_robotics_review_2019_17.07.2019_m.pdf (дата обращения: 07.10.2019).
2. Ультразвуковой GPS // habr.com. – URL: <https://habr.com/ru/post/451408/> (дата обращения: 07.10.2019).
3. **Qi, J.** A robust high-accuracy ultrasound indoor positioning system based on a wireless sensor network / J. Qi, G.-P. Liu // Sensors. – 2017. – Vol. 17. – P. 2554.
4. **Jiang, W.** An Indoor Airborne Ultrasonic Wireless Communication Network / Wentao Jiang & William Wright // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. – 2018. – P. 1–1. – DOI 10.1109/TUFFC.2018.2841501.
5. **Marpl, S.** Digital Spectral Analysis: With Applications, Prentice Hall, Englewood, Cliffs / S. Marpl. – New Jersey, 1987.
6. Der Quotienten-DifferenzenAlgorithmus / Von Heinz Rutishauser. – Basel-Stuttgart : BirkhäuserVerl, 1957. [Mitt. aus dem Inst. für angewandteMathematik].
7. Пат. 2467385 Российская Федерация. Способ и устройство для аппроксимации сигналов / Цыпин Б. В., Бондаренко Л. Н., Дмитриенко А. Г., Мясникова М. Г. – заявл. 04.08.2011 ; опубл. 20.11.2012. – Бюл. № 32. – 10 с.
8. Экспресс-анализ сигналов в инженерных задачах / Н. В. Мясникова, М. П. Берестень, Б. В. Цыпин, М. Г. Мясникова. – Москва : Физматлит, 2016. – 180 с.
9. **Боряк, С. В.** Ультразвуковая система навигации мобильных роботов / С. В. Боряк, Н. В. Мясникова // Информационные технологии в науке и образова-

нии. Проблемы и перспективы : сб. науч. ст. Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. / под ред. Л. Р. Фионовой. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. – С. 233–235.

10. **Мясникова, Н. В.** Ультразвуковая система локации объектов / Н. В. Мясникова, С. В. Боряк, Д. С. Пичейкин // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. ст. по материалам XXXIII Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 55-летию образования кафедры «Автоматика и телемеханика» : в 2 т. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. – С. 217–219.

References

1. *Analiticheskiy obzor mirovogo rynka robototekhniki 2019, Sberbank Robotics Laboratory* [Analytical review of the world robotics market in 2019, Sberbank Robotics Laboratory]. sberbank.ru. Available at: http://www.sberbank.ru/common/img/uploaded/pdf/sberbank_robotics_review_2019_17.07.2019_m.pdf (accessed Oct. 07, 2019). [In Russian]
2. *Ul'trazvukovoy GPS* [Ultrasound GPS]. habr.com. Available at: <https://habr.com/ru/post/451408/> (accessed Oct. 07, 2019). [In Russian]
3. Qi J., Liu G.-P. *Sensors*. 2017, vol. 17, p. 2554.
4. Jiang W., Wright W. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2018, pp. 1–1, 10.1109/TUFFC.2018.2841501.
5. Marpl S. *Digital Spectral Analysis: With Applications*, Prentice Hall, Englewood, Cliffs. New Jersey, 1987.
6. *Der Quotienten-Differenzen Algorithmus* [The quotient-difference algorithm]. Von Heinz Rutishauser. Basel-Stuttgart: BirkhäuserVerl, 1957. [Mitt. aus dem Inst. für angewandte Mathematik].
7. *Pat. 2467385 Rossiyskaya Federatsiya. Sposob i ustroystvo dlya approksimatsii signalov* [Patent 2467385, the Russian Federation. A device and technology of signal approximation]. Tsy-pin B. V., Bondarenko L. N., Dmitrienko A. G., Myasnikova M. G. BI, 2012, 32 p. [In Russian]
8. Myasnikova N. V., Beresten' M. P., Tsy-pin B. V., Myasnikova M. G. *Ekspress-analiz signalov v inzhenernykh zadachakh* [Express analysis of signals in engineering problems]. Moscow: Fizmatlit, 2016, 180 p. [In Russian]
9. Boryak S. V., Myasnikova N. V. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy: sb. nauch. st. Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf.* [Information technologies in science and education. Problems and prospects: proceedings of an All-Russian interregional scientific and practical conference]. Penza, 2018, pp. 233–235. [In Russian]
10. Myasnikova N. V., Boryak S. V., Picheykin D. S. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: sb. st. po materialam XXXIII Mezhdunar. nauch.-tekh. konf., posvyashch. 55-letiyu obrazovaniya kafedry «Avtomatika i telemekhanika»: v 2 t.* [Problems of automation and control in technical systems: proceedings of XXXIII International scientific and technical conference devoted to the 55th anniversary of the “Automation and remote control” sub-department: in 2 volumes]. Penza, 2019, pp. 217–219. [In Russian]

Мясникова Нина Владимировна

доктор технических наук, профессор,
кафедра автоматизации и телемеханики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: genok123@mail.ru

Myasnikova Nina Vladimirovna

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of automation and remote
control, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Боряк Сергей Васильевич

аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: boosoov@gmail.com

Boryak Sergey Vasil'evich

Postgraduate student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Мясникова Мария Геннадьевна

кандидат технических наук, доцент, кафедра ракетно-космического и авиационного приборостроения, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: urchin_blue@mail.ru

Myasnikova Mariya Gennad'evna

Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of rocket-space and aircraft instrument engineering, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Мясникова, Н. В. Обработка сигналов в системах ультразвуковой локализации объектов для закрытых помещений / Н. В. Мясникова, С. В. Борьяк, М. Г. Мясникова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 4 (52). – С. 87–97. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-4-7.