

Паньчев Андрей Иванович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: ruu2011@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371733; кафедра антенн и радиопередающих устройств; к.т.н.; доцент.

Дубинская Изабэлла Витальевна – студентка.

Panychev Andrey Ivanovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: ruu2011@mail.ru; GSP-17A, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; the department of aerials and radio sending devices; cand. of eng. sc.; associate professor.

Dubinckay Izabella Vitalievna – student.

УДК 621.12.23

Е.О. Евдокимова

МОДЕЛЬ СИГНАЛА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДОПЛЕРОВСКОГО СПЕКТРА

Рассмотрены проблемы анализа радиолокационных эхосигналов, характеризующих микро- и макродвижения объектов. Исследована возможность упрощенного представления радиосигналов для повышения эффективности алгоритмов распознавания на основе различий в движении, которые благодаря эффекту Доплера преобразуются в различия спектров эхосигналов. С целью сформировать набор идеализированных функций для аппроксимации компонент реальных микродоплеровских сигналов, в работе предложена новая модель эхосигнала, характеризующего вращательное микродвижение. Предложенная модель учитывает характерные особенности частотно-временного распределения рассматриваемых сигналов. В результате работы сделан вывод об эффективности и широких перспективах применения сформированной модели для представления реальных микродоплеровских сигналов с целью их последующего анализа и выделения информативных признаков для решения задач классификации.

Микродвижение; доплеровский спектр; частотно-временное распределение; распознавание.

Е.О. Evdokimova

SIGNAL MODEL FOR MOVING OBJECT PARAMETERS ESTIMATION BASED ON DOPPLER SPECTRUM ANALYSIS

A few issues of studying micro- and macro-motions by a Doppler radar are reviewed. Ability to simplify multicomponent radar signals is explored. A new model of a rotating scatterer is suggested for forming a dictionary of functions. The model takes to account some particular issues associated with the micro-motions. It is assumed to approximate real micro-Doppler signals for increasing performance of recognition systems based on micro-Doppler radars. New features can be extracted due to the model representation. The main aspects of using the signal representation for moving object detection and recognition are considered.

Micro-motion; Doppler spectrum; time-frequency distribution; recognition.

Введение. Микродоплеровская сигнатура – это уникальная характеристика движения, содержащая закон модуляции доплеровской частоты эхосигнала и представленная в виде распределения в частотно-временной области [1]. Каждому типу движения соответствуют сигнатуры с характерной структурой. При этом

состав спектра смещений сигнала Доплера связан с кинематикой движения наблюдаемого объекта. Кроме того, даже небольшие конструктивные особенности объектов влияют на параметры сигналуры, и, следовательно, могут рассматриваться как признаки для распознавания. Присущая доплеровским характеристикам индивидуальность используется в широком спектре приложений: обнаружение, распознавание автомобилей, летательных аппаратов, классификация типов биологического движения и прочее.

В последние десятилетия многое было сделано в области классификации и распознавания подвижных объектов [2–5]. В настоящее время доплеровские сигналы широко используются для решения прикладных задач охраны и мониторинга. Применяются методы для выделения уникальных признаков однозначно характеризующих типы движения, которые заключены в законе угловой модуляции отраженного сигнала, что дает возможность классифицировать объекты, благодаря отличиям в динамике их движения. Одна из еще нерешенных, но безусловно перспективных задач в этом направлении – биометрическое распознавание на основе различий в движении биологических объектов [6].

Цель работы заключается в поиске способов извлечения из экосигналов максимального объема информации для дальнейшего совершенствования систем распознавания и решения новых актуальных задач. Кинематическая информация, скрытая в микродоплеровском сигнале, – ключ к повышению эффективности систем распознавания и классификации. При этом проблема анализа сигналов связана с их сложной структурой: суперпозиция отражений от подвижных частей наблюдаемого объекта результируется в экосигнале суммой частотно-моделированных компонент, каждая из которых характеризует отдельное микродвижение. Анализ многокомпонентного сигнала со сложной угловой модуляцией – задача нетривиальная. Один из подходов к определению параметров частных компонент заключается в создании алгоритма разложения исходного сложного сигнала на составляющие [7]. В этой работе авторы акцентируются на выборе модели микродвижения и модели, необходимой для реализации алгоритма декомпозиции. Предложена и проанализирована модель сигнала, отраженного от точечного объекта, совершающего вращательно-поступательное движение с малыми скоростями.

Модель экосигнала при вращательно-поступательном движении. В [1] смоделированы сигнатуры различных движений, на основе выборок реальных экосигналов. На рис. 1 представлена спектральная характеристика сигнала отражений от идущего человека – спектрограмма, полученная с помощью оконного преобразования Фурье (ОПФ)

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

где $s(t)$ – исходный Доплеровский сигнал, $h(t)$ – оконная функция.

ОПФ отображает исходный сигнал в частотно-временную область с помощью базисных функций, полученных на основе преобразования Фурье. Координаты частоты и времени частотно-временного распределения подчиняются обобщенному принципу неопределенности. Нижний предел точности совместного определения величин задается соотношением Гейзенберга [8] $\sigma_t \sigma_\omega \geq \frac{1}{2}$, где σ_t – длительность, а σ_ω – ширина спектра базисной функции.

Длительность окна влияет на частотно-временное разрешение, форма окна влияет на результирующий спектр. Выбор формы окна направлен на уменьшение эффекта энергетической утечки, который связан с конечным числом отсчетов и, в общем случае, нецелым числом периодов сигнала. Каждое окно сглаживания имеет свои собственные, отличные от других характеристики и степень

пригодности для различных применений. Решение задач анализа состава микро-доплеровского спектра связано с разрешением нескольких спектральных составляющих, близко расположенными относительно друг друга по частоте. В описанной ситуации наиболее важна спектральная разрешающая способность. В этом случае лучше выбирать окно сглаживания с очень узким боковым лепестком, например, прямоугольное окно [9].

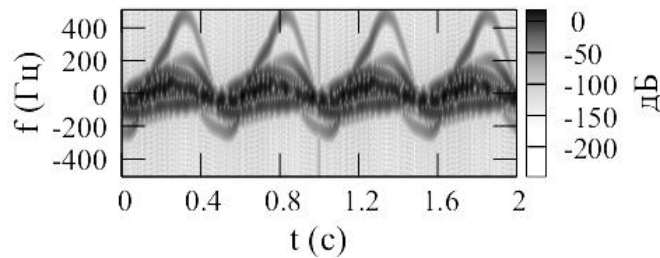


Рис. 1. Спектрограмма моделированного эхосигнала для идущего человека

На спектрограмме (см. рис. 1) визуально различимы компоненты эхосигнала, представляющего собой суперпозицию отражений от частей тела человека во время движения. Периодическая структура спектрограммы связана с периодичностью движений. Закон модуляции частных компонент зависит от кинематики реального движения объекта, и на спектрограмме видно, что энергия частотно-временного распределения на отдельных участках распределена по закону, близкому к гармоническому. Для получения модели сигнала, характеризующего частные компоненты, предлагается модель микродвижения (рис. 2). Частота доплеровского сдвига связана с радиальной скоростью отражателя следующим известным выражением

$$f_D(t) = \frac{2v_R(t)}{\lambda}, \quad (1)$$

где $v_R(t)$ – радиальная скорость отражателя относительно РЛС, λ – длина волны доплеровской РЛС.

На начальном этапе разработки алгоритмов разложения сигналов необходимо найти идеализированные сигналы, которыми могут быть представлены реальные компоненты. При этом сигналы должны иметь физический смысл. С учетом периодической природы изменения доплеровской частоты реальных компонент в работе предложено использовать семейство, или иначе – базис функций с гармоническим законом изменения частоты. Сигналы характеризуют вращательно-поступательное движение следующего свойства: точечный отражатель зафиксирован на краю вращающейся горизонтальной пластины, радиусом r (см. рис. 2), пластина тонкая и не оказывает влияния на отраженный сигнал. Отражатель вращается с частотой Ω и поступательно движется вместе с пластиной со скоростью v_0 .

Общее выражение для кинематики движения точечного отражателя в пространстве (2) приведено в [1] и представлено на рис. 2:

$$\mathbf{V}(t) = \frac{d}{dt} \mathbf{R}(t) = \mathbf{V}_0 + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}(t), \quad (2)$$

где $\mathbf{V}(t)$ – результирующий вектор скорости, \mathbf{V}_0 – вектор скорости поступательного движения, $\mathbf{R}(t)$ – вектор расстояния от начала координат до отражателя, $\mathbf{r}(t)$ – вектор радиуса вращательного движения, $\boldsymbol{\omega}$ – вектор угловой скорости вращения.

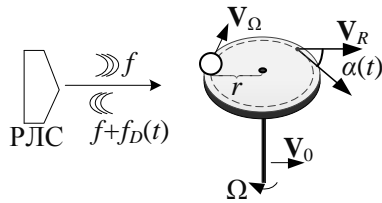


Рис. 2. Модель вращательно-поступательного движения

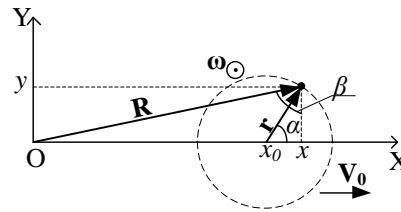


Рис. 3. Кинематическая схема вращательно-поступательного движения

Кинематика движения для случая, описанного моделью, поясняется на рис. 3. Модули векторов в выражении (2) для частного случая принимают следующие значения:

$$\|\mathbf{V}_0\| = v_0, \|\mathbf{V}_R\| = v_R, \|\mathbf{r}\| = r, \|\boldsymbol{\omega}\| = 2\pi\Omega.$$

Положение отражателя в пространстве выражается через мгновенный угол вращения $\alpha(t) = 2\pi\Omega t + \alpha_0$, где α_0 – начальный угол; тогда закон изменения координат точечного отражателя

$$\begin{aligned} x(t) &= x_0 + v_0 t + r \cos(2\pi\Omega t + \alpha_0), \\ y(t) &= -r \sin(2\pi\Omega t + \alpha_0). \end{aligned} \quad (3)$$

Расстояние от начала координат (где располагается доплеровский радар) $R(t)$ до отражателя выражается как функция параметров: $v_0, \Omega, \alpha_0, x_0, r$ (см. рис. 4). С учетом (3) получим

$$\|\mathbf{R}(t)\| = R(t) = \sqrt{(x_0 + v_0 t)^2 + 2r(x_0 + v_0 t)\cos(2\pi\Omega t + \alpha_0) + r^2}. \quad (4)$$

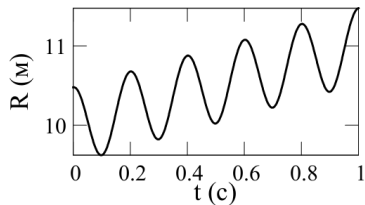


Рис. 4. Функция изменения дальности $R(t)$

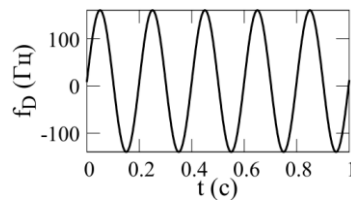


Рис. 5. Вариация частоты Доплера для вращающегося отражателя

Для упрощения модели можно принять $x_0 \gg r$, тогда $\beta \approx 90^\circ$. Тогда мгновенную радиальную скорость относительно приемного устройства можно упрощенно выразить через четыре основные параметры модели R, v_0, Ω, α_0 следующим образом:

$$v_R(t) = v_0 + 2\pi r \Omega \sin(2\pi\Omega t + \alpha_0). \quad (5)$$

На рис. 5 показана функция изменения доплеровской частоты эхосигнала вращающегося отражателя. В работе моделируются сигналы, излученные доплеровским радаром непрерывного излучения на частоте 15 ГГц.

Для удобства обработки микродоплеровский сигнал представлен, как комплексная огибающая принятого радиосигнала, полученная разложением эхосигнала на квадратуры

$$\hat{S}(t) = M(t)e^{j\theta(t)}, \quad (6)$$

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

Вся полезная информация о движении наблюдаемого объекта заключается в фазовой компоненте, а именно в законе фазовой модуляции отраженного сигнала, которая и рассматривается в работе. Паразитная амплитудная модуляция в рамках модели отсутствует, т.е. $M(t) = const$. Фазовая модуляция сигнала связана с законом доплеровского смещения частоты выражением

$$\theta(t) = 2\pi \int f_D(t) dt. \tag{7}$$

С учетом (5) и (7) фаза аналитического сигнала

$$\theta(t) = -\frac{2\pi}{\lambda} (v_0 t + r \cos(2\pi\Omega t + \alpha_0)). \tag{8}$$

Спектрограмма сигнала модели, полученная с помощью ОПФ, показана на рис. 6.

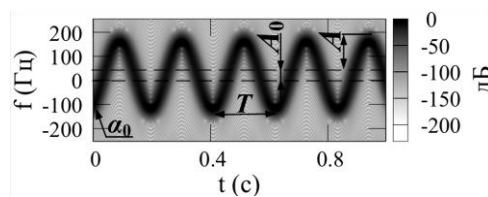


Рис. 6. Спектрограмма моделированного сигнала

В выражении (8) фаза сигнала есть функция четырех параметров модели, обозначенных на рис. 2, которые определяют форму спектрограммы. Связь между спектрограммой и фазой поясняется с помощью выражений (10) и обозначений на рис. 6:

$$A = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot R \cdot \Omega; A_0 = \frac{2v_0}{\lambda}. \tag{10}$$

Идея аппроксимации закона изменения радиальных скоростей частей тела человека гармоническими функциями использовалась ранее и была описана в [10]. Важно отметить, что движение многих объектов также может быть описано функциями базиса. Например, на рис. 7 показаны: временная выборка (так как сигнал комплексный, представлена одна из квадратур) и амплитудный спектр, полученный с помощью дискретного преобразования Фурье, а также спектрограмма трехкомпонентного сигнала, представляющего собой модель отражений от вертолета с двумя лопостями.

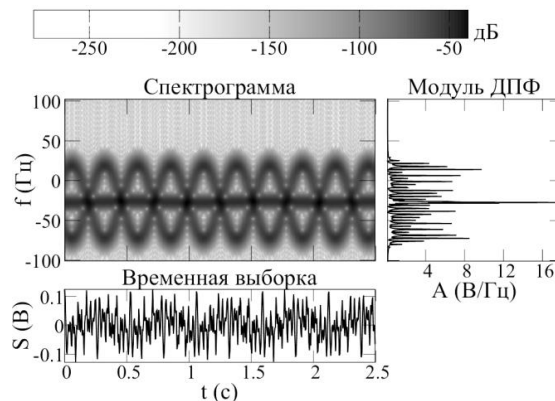


Рис. 7. Модель сигнала, отраженного от вертолета

Фактически, кинематика вращения лопастей идентична кинематике вращения точечного отражателя. Вследствие чего сигнал может быть представлен суперпозицией трех моделированных сигналов, два из которых характеризуют вращение лопастей, например, вертолета, а третий описывает отражение от его корпуса и не содержит частотных колебаний, т.е. параметр $\Omega = 0$.

Заключение. В работе рассмотрена модель сигнала, характеризующего вращательно-поступательное движение точечного объекта. Модель имеет важное значение для совершенствования систем распознавания, так как с ее помощью могут быть смоделированы более сложные сигналы: отраженные от объектов, включающих в свой состав несколько компонент, совершающих качательные или вращательные движения. В будущем, модель будет использована для решения задач оценки параметров и декомпозиции многокомпонентных микро-доплеровских сигналов.

Если рассматривать потенциальные возможности представления сигнатуры походки человека функциями базиса, очевидны некоторые ограничения: идеализированная модель учитывает, что конечности человека совершают вращательные движения, но не принимают во внимание неравномерность вращений и сложную истинную траекторию микродвижений – совокупность факторов, которыми и обуславливается структура реальных сигналов. Несмотря на ограниченную точность аппроксимации компонентами с гармоническим законом изменения частоты, такое представление сохраняет важные особенности: амплитуды, частоты и смещения компонент, параметры – характеристики движения, потенциально применимые для распознавания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Chen V.* The micro-Doppler effect in radar. – Artech House Publishers. – 2011. – 283 p.
2. *Bilik I., Tabrikian J., Cohen A.* GMM-based target classification for ground surveillance Doppler radar // Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on. – 2006. – Vol. 42, № 1. – P. 267-278.
3. *Kim Y., Ling H.* Human activity classification based on micro-Doppler signatures using a support vector machine // Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on. – 2009. – Vol. 47, № 5. – P. 1328-1337.
4. *Garreau G., Andreou C., Andreou A., Georgiou J., Dura-Bernal S., Wennekers T., Denham S.* Gait-based person and gender recognition using micro-Doppler signatures // Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS), 2011 IEEE. – 2011. – P. 444-447.
5. *Van Dorp P., Groen F.* Feature-based human motion parameter estimation with radar. – Radar, Sonar & Navigation, IET. – 2008. – Vol. 2, № 2. – P. 135-145.
6. *Boyd J., Little J.* Biometric gait recognition // Advanced Studies in Biometrics. – 2005. – P. 15-26.
7. *Cirillo L., Zoubir A., Amin M.* Parameter estimation for locally linear FM signals using a time-frequency Hough transform // Signal Processing, IEEE Transactions on. – 2008. – Vol. 56, № 9. – P. 4162-4175.
8. *Mallat S.* A Wavelet Tour of Signal Processing, Third Edition. The Sparse Way. – London: Academic Press, 2009. – 805 p.
9. *Федосов В.П., Нестеренко А.К.* Цифровая обработка сигналов в LabVIEW: Учебное пособие / Под ред. В.П. Федосова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ 2006. – 392 с.
10. *Tahmoush D., Silvious J.* Modeled gait variations in human micro-Doppler. – Radar Symposium (IRS). 2010 11th International. IEEE. – 2010. – P. 1-4.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.А. Зори.

Евдокимова Екатерина Олеговна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: ekaterina_tut@inbox.ru; 347930, г. Таганрог, ул. Кузнечная, 142, кв. 9; тел.: 89897238449; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Evdokimova Ekaterina Olegovna – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: ekaterina_tut@inbox.ru; 142, Kuznechnaya street, ap. 9, Taganrog, 347930, Russia; phone: +79897238449; the department of fundamentals of radio engineering; postgraduate student.

УДК 681.5.017; 681.5.03.23

П.Г. Михайлов, В.И. Лапшин, Д.А. Сергеев

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ КРЕМНИЕВЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

Статья посвящена вопросам моделирования и конструирования кремниевых чувствительных элементов (ЧЭ) емкостных датчиков давления. Предложены модели и представлены конструкции ряда емкостных чувствительных элементов, выполненных из монокристаллического кремния (МК). Изготовление емкостных ЧЭ на основе МК, который одновременно является и конструкционным и функциональным материалом, что позволяет изготавливать их с применением групповых технологий микроэлектроники. А это, в свою очередь, позволяет резко снизить цену и уменьшить габариты и вес ЧЭ и самих датчиков. Приведены расчетные зависимости конструктивных параметров, которые напрямую влияют на метрологию емкостных датчиков.

Монокристаллический кремний; микроэлектронные датчики; емкостной чувствительный элемент; электроды; расчетная модель; напряжение; мембрана; рабочая емкость; микромеханический емкостной датчик; диапазона измерения.

P.G. Mikhailov, V.I. Lapshin, D.A. Sergeev

MODELING AND DESIGN OF SILICON SENSORS CAPACITIVE PRESSURE SENSORS

The article deals with modeling and design of silicon sensors (SE) of capacitive pressure sensors. Models and designs are a number of capacitive sensing elements made of single-crystal silicon (MC). Manufacture of capacitive Jae-based MC, who is also the structural and functional materials that can produce them with the use of group technology in microelectronics. This, in turn, can dramatically reduce the cost and reduce the size and weight of the SE and the sensors themselves. Calculated according to the design parameters, which directly affect the metrology capacitive sensors.

Monocrystalline silicon; micro-electronic sensors; capacitive sensor element; electrodes; calculation model; voltage, membrane; operating capacity; micromachined capacitive sensor; the measurement range.

Монокристаллический кремний является перспективным конструктивным и функциональным материалом для многих приборов микросистемной техники (МСТ), к которым относятся и микроэлектронные датчики. Кремний обладает высокими прочностными характеристиками, его формообразование может проводиться немеханическими методами, например, газовым и жидкостным травлением, что позволяет получать прецизионные сложные структуры микронных размеров групповыми методами [1, 2]. МК с успехом применяется в миниатюрных емкостных датчиках давления и ускорения, позволяя получать весьма стабильные и недорогие датчики. Конструкции емкостных кремниевых датчиков базируются на различных конструктивных решениях, но в большинстве своем имеют сходство в конструкциях емкостных чувствительных элементов (ЕЧЭ), поэтому рассмотрим базовый ЕЧЭ и промоделируем его функционирование.