

АНАЛИЗ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В НЕРЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ДВИЖУЩИХСЯ ЦЕЛЕЙ В СЛОЖНЫХ СРЕДАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИКИ БОЛЕЕ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА В СРЕДЕ LabVIEW

А.А. АХУМЯН, М.А. БАРСЕГЯН, Н.Ю. ГАСПАРЯН,
Б.А. ОГАННИСЯН, Э.Р. СИВОЛЕНКО*

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: eduard.sivolenko@ysu.am

(Поступила в редакцию 16 октября 2024 г.)

Представлен новый способ использования биспектрального анализа для обнаружения движущихся целей. Используется метод цепструма для улучшения обнаружения гармонических частот. Метод предполагает чтение файла и использование алгоритма, который находит нужные гармоники в биспектре, уменьшая шум. Такой целенаправленный подход облегчает отслеживание и понимание движущихся целей. Метод был протестирован в симуляциях и обнаружено, что он значительно улучшает обнаружение целей и частотное разрешение по сравнению с традиционными методами биспектрального анализа. Эта новая методика помогает более точно и эффективно отслеживать движущиеся цели, особенно в радиолокационных и гидролокационных системах, где очень важно точное отслеживание.

1. Введение

В области обработки сигналов и обнаружения целей биспектральный анализ является сильным методом для поиска нелинейных взаимодействий и гармонических связей во временной области. Ключевым фактором является микродоплеровский эффект. Микродоплеровский эффект — это явление, наблюдаемое при обработке радиолокационных и гидролокационных сигналов и связанное с небольшими вариациями доплеровского сдвига, возникающими в результате динамических движений отдельных компонентов внутри цели. Обычный доплеровский сдвиг определяет скорость всего движущегося объекта, а микродоплеровский эффект определяет более сложные движения, такие как вращение лопастей вертолета, взмах конечностей или вибрация механических конструкций [1].

Доплеровский сдвиг обозначает изменение частоты волны относительно наблюдателя, находящегося в движении по отношению к источнику волны, что диктуется эффектом Доплера. Например, когда радар или гидролокационная система излучает сигнал, отражающийся от движущегося объекта, частота обратного сигнала изменяется в соответствии со скоростью объекта. Микродоплеровский сдвиг позволяет выявить более тонкие компоненты движения, включая вращение (например, вращение пропеллеров, лопастей вертолета),

вибрацию (например, вибрацию двигателя или тряску объекта), маятниковые движения (например, колебания конечностей) и колебания (например, колебания металлических пластин).

Явление микродоплеровского эффекта играет ключевую роль в том, чтобы радарные и гидролокационные системы могли различать цели на основе их характеристик движения. Примечательно, что движущийся человек генерирует заметную микродоплеровскую сигнатуру, связанную с движением конечностей. Эта особенность находит широкое применение в радиолокационных системах для распознавания человеческой активности, например, в сфере безопасности и наблюдения, а также в гидролокационных системах для обнаружения подводных объектов, приводимых в движение гребными винтами, таких как подводные лодки или корабли. Кроме того, он играет важную роль в медицинских приложениях, использующих радарную технологию для обнаружения дыхания и сердечной деятельности.

Настоящая работа посвящена изучению микродоплеровской сигнатуры идущего человека с особым акцентом на динамику верхних и нижних конечностей [2, 3].

2. Обработка биспектров

Статистика высших порядков (HOS — higher ordered statistics) в обработке сигналов включает в себя передовые статистические методы, которые выходят за рамки традиционной статистики второго порядка, обычно используемой в обработке сигналов, такой как среднее значение, дисперсия и автокорреляция. Методы HOS объединяют моменты высшего порядка, такие как асимметрия и эксцесс, для анализа сигналов, предлагая важнейшие сведения о нелинейных взаимодействиях в негауссовой системе. Эти методы особенно ценны для обнаружения и определения характеристик сложных сигналов с нелинейными или негауссовыми распределениями [4–6].

Использование HOS необходимо для обнаружения не гауссовских сигналов в радарных, гидролокаторах и системах связи. Традиционные методы второго порядка, основанные на среднем и дисперсии, неэффективны при обнаружении не гауссовских сигналов, таких как радарные эхо-сигналы от помех и импульсных шумов. HOS помогает идентифицировать эти сложные сигналы. Кроме того, статистика высших порядков имеет решающее значение для идентификации систем, особенно для обнаружения их нелинейности. Она эффективна при выявлении механических дефектов, таких как трещины или смещения в конструкциях.

Одно из ключевых понятий в HOS — биспектр, полученный из преобразования Фурье кумулянта третьего порядка, используется для обнаружения фазовых отношений и гармонических взаимодействий, которые не могут быть отражены статистикой второго порядка. Он широко применяется для выявления нелинейных взаимодействий в сигналах и оценки квадратичной фазовой связи между частотами (рис.1).

Биспектральный анализ сигнала был проведен в среде LabVIEW. Биспектр (биспектральная плотность) — это двумерное преобразование Фурье тройной автокорреляционной функции, которую при дискретном преобразовании Фурье можно записать в следующем виде [7, 8]:

$$\hat{B}_s(m, n) = \sum_{p=-N+1}^{N-1} \sum_{q=-N+1}^{N-1} R_s(p, q) \exp[-2\pi j(mp + nq)/N], \quad (1)$$

где m и n — частотные индексы, $R_x(p, q)$ — тройная автокорреляционная функция:

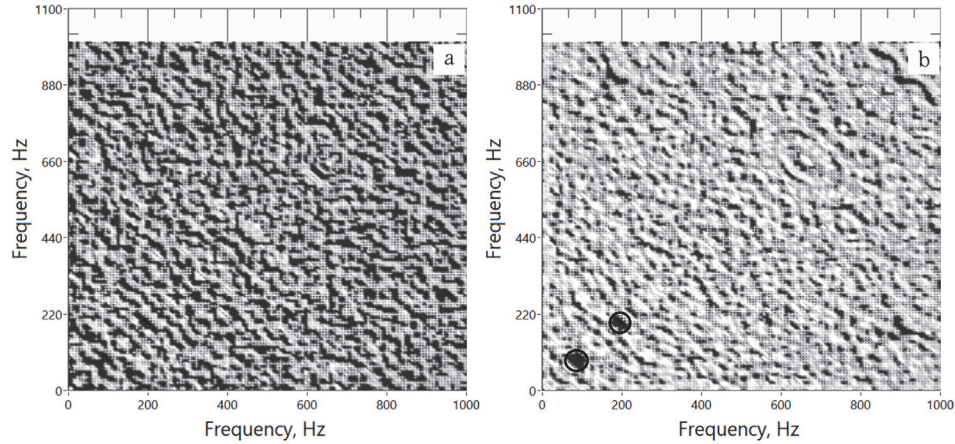


Рис.1. Биспектр (а) без квадратичной фазовой связи между частотами и (б) с квадратичной фазовой связью между частотами, обозначенными черными кружками.

$$R_s(p, q) = \langle \sum_{k=0}^{N-1} [s^{(i)}(k) - E] \times [s^{(i)}(k+p) - E] \times [s^{(i)}(k+q) - E] \rangle, \quad (2)$$

p и q — индексы отсчета дискретного временного сдвига, k — индекс временного отсчета, $s^{(i)}(k)$ — это i -я реализация случайного сигнала, а

$$E = \langle \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s^{(i)}(k) \rangle$$

— статистическое среднее сигнала по ансамблю реализаций [9].

При отсутствии постоянной составляющей сигнала, основываясь на (1) и (2), биспектр может быть выражен через спектры реализаций случайного сигнала $\dot{S}^{(i)}(m)$ [10]:

$$\dot{B}_s(m, n) = \langle \dot{S}^{(i)}(m) \dot{S}^{(i)}(n) \dot{S}^{*(i)}(m+n) \rangle = \langle \dot{S}^{(i)}(m) \dot{S}^{(i)}(n) \dot{S}^{(i)}(-m-n) \rangle, \quad (3)$$

т.е. биспектр — это среднее статистическое значение тройного произведения спектров на частотах m , n и комплексно-сопряженного спектра на частоте $m+n$, которое характеризует взаимные корреляционные отношения между спектральными компонентами процесса на этих трех частотах.

3. Метод поиска гармоник на основе цепструма

В области обработки сигналов существует мощный метод выявления периодических структур в частотной области, особенно эффективный для обнаружения гармонических составляющих. Подход, известный как поиск гармоник на основе цепструма, использует способность выявления гармоник и периодических составляющих в сигналах, предлагая значительные преимущества в различных приложениях, таких как обработка речи, радар, гидролокатор и диагностика неисправностей в механических системах. Цепструм — это преобразование сигнала, которое позволяет выявить периодические структуры в частотном спектре. Он определяется как обратное преобразование Фурье логарифма спектра мощности, который представляет собой квадрат величины преобразования Фурье сигнала. Результирующий сигнал находится в «цепстральной» области, где периодические особенности спектра усиливаются, что облегчает их различение. Основопологающие этапы цепстрального анализа включают в себя вычисление преобразования Фурье сигнала во временной области, затем логарифми-

рование полученного спектра и завершается применением обратного преобразования Фурье к логарифмическому спектру для получения цепстрального спектра.

Математически:

$$C(x) = F^{-1}[\log|F(x)^2|],$$

где $F(x)$ — преобразование Фурье сигнала x , $C(x)$ — цепструм сигнала. Цепстральный метод особенно эффективен в шумной среде, так как он сжимает спектральные гармоники в более различимую форму, что упрощает процесс обнаружения по сравнению с исходной частотной областью. Чтобы обнаружить гармоники с помощью цепстрального метода, необходимо выполнить следующие действия: выполнить преобразование Фурье сигнала для перехода в частотную область; вычислить логарифм величины частотного спектра (логарифмическое преобразование облегчает анализ мультипликативных отношений, таких как гармоники, путем их преобразования в аддитивные отношения); применить обратное преобразование Фурье к логарифмическому спектру, чтобы получить цепструм, который подчеркивает периодичность сигнала, включая гармоники; проанализировать пики цепстрального спектра на различных частотах (самый сильный пик часто соответствует основному периоду, а последующие пики представляют собой гармоники этой основной частоты).

4. Результаты и их обсуждение

Метод гармонического поиска на основе цепструма — это высокоэффективная техника для выявления периодичности и гармоник в сигналах. Переводя сигнал в квантовую область, цепструм упрощает обнаружение гармонических структур, которые могут быть не видны во временной или частотной области. Его устойчивость к шумам и способность выделять гармонические составляющие делают его особенно ценным в таких областях, как обработка речи, радиолокация, сонары и анализ вибраций. На рис.2 представлена подробная иллюстрация, демонстрирующая реализованные шаги.

Сначала формируется исходный сигнал, который может быть как в реальном времени, так и заранее подготовленным. В случае реального времени сигнал представляет собой отражённый сигнал от цели, полученный с радара или другого источника. Если используется заранее записанный сигнал, он загружается из файла, подготовленного в предыдущих экспериментах или симуляциях. Это позволяет анализировать как реальные, так и симулированные сигналы для более полной картины работы системы.

Затем, на втором этапе, в процессе передачи сигнала через канал записи-воспроизведения (или в сквозном канале), добавляются преднамеренные искажения. Эти искажения могут быть использованы для имитации реальных помех в канале связи, таких как шум, многолучевые отражения, интерференция и другие физические явления. Цель этого этапа заключается в уменьшении реальных искажений сигнала, улучшении его устойчивости к помехам и адаптации к реальным условиям распространения. Применение различных методов подавления шумов и коррекции сигналов на этом этапе критически важно для обеспечения стабильности и точности системы. Например, могут быть использованы адаптивные фильтры, которые помогают подавить шум, или системы коррекции ошибок для восстановления исходного сигнала.

Третьим шагом является подготовка сигналов к цифровой обработке, что

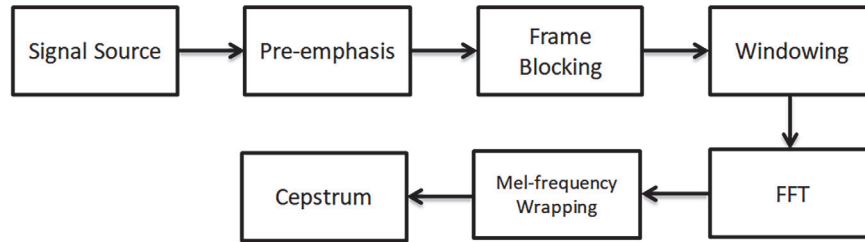


Рис.2. Схема обработки сигналов, демонстрирующая реализованные шаги.

включает формирование кадров. Этот процесс необходим для того, чтобы сигнал был разделён на сегменты (кадры), пригодные для дальнейшего анализа. Каждый сегмент может быть подвергнут предварительной обработке, например, через применение оконных функций, которые помогают минимизировать эффекты края при расчёте спектра. Одним из наиболее важных методов обработки является преобразование Фурье, которое переводит сигнал из временной области в частотную, где становятся видны его спектральные характеристики.

Перед тем как применить цепструм для дальнейшего анализа сигналов, важно провести фильтрацию данных, что помогает удалить нежелательные компоненты сигнала, такие как низкочастотный шум или высокочастотные помехи. Фильтрация улучшает точность работы алгоритмов, применяемых на следующем этапе, и обеспечивает более чёткое разделение полезных сигналов от помех. Цепструм используется для выявления периодических структур в сигнале, что особенно полезно в задаче отделения полезного сигнала от ревербераций или эхосигналов, характерных для многолучевого распространения. Панель управления выше указанных шагов приведена на рис.3.

Результат работы алгоритма представлен на рис.4. Линия 1 на графике отображает основную частоту анализируемого сигнала, которая является ключевым параметром для дальнейшего исследования его спектральных характеристик. Эта линия соответствует основному тону, или фундаментальной частоте, сигнала, которая может изменяться в зависимости от характеристик источника сигнала и условий распространения.

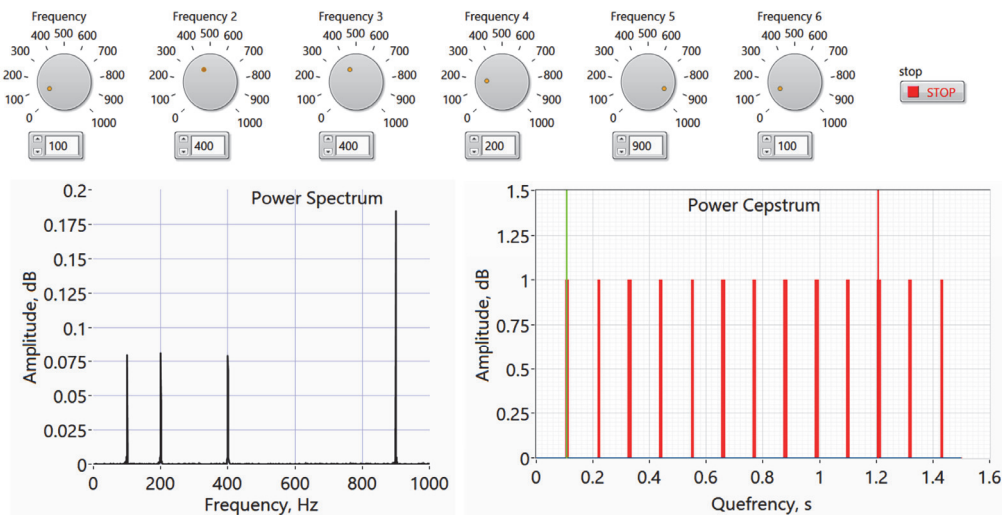


Рис.3. Панель управления реализованного алгоритма в среде LabVIEW.

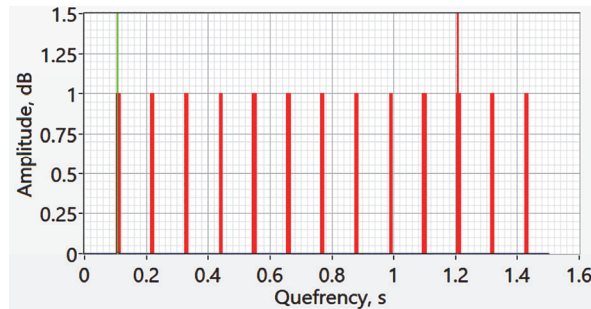


Рис.4. Визуализация и выявление гармонических компонент после использования цепструма.

Параллельно с основной частотой (линия 1) на графике появляются дополнительные компоненты, обозначенные как гармоники 3. Эти гармоники представляют собой кратные частоты основного тона и возникают в результате нелинейных процессов в системе или из-за сложного характера сигнала. Гармоники играют важную роль в анализе, так как их присутствие может свидетельствовать о спектральной чистоте сигнала или, наоборот, указывать на наличие нежелательных искажений.

Линия 2, идущая параллельно основной частоте, помогает отслеживать положение гармоник и их взаимосвязь с фундаментальной частотой. Эта линия может соответствовать дополнительным параметрам сигнала, таким как модуляции или изменения амплитуды, которые могут проявляться в виде дополнительных спектральных линий, накладывающихся на гармоническую структуру.

Таким образом, на рис. 4 можно наблюдать целостную картину поведения сигнала: основная частота (линия 1) и её гармоники (линия 3), которые располагаются на кратных частотах. Взаимодействие между этими компонентами позволяет исследовать природу сигнала более глубоко, выявлять наличие нелинейностей или особенностей, которые могут быть важны для анализа качества передачи, условий распространения или характеристик самого источника сигнала.

5. Заключение

Метод воспроизведения с выделением приоритетных гармонических частот с помощью статистического анализа высшего порядка повышает возможности системы мониторинга по обнаружению и наблюдению за движущимися целями в сложных условиях. Этот метод эффективно снижает уровень нежелательных сигналов и фоновых помех, фокусируясь на определенных гармониках. Он также позволяет отличить нужные сигналы от шума окружающей среды с похожими частотными компонентами, но с разными статистическими свойствами. Кроме того, применение статистики высшего порядка позволяет глубже понять нелинейную динамику, присутствующую в сложных системах, таких как биологические или механически напряженные системы. Такой подход облегчает обнаружение тонких сигналов, которые могут быть пропущены традиционными методами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке РА в рамках научного проекта 23DP-2B022.

ЛИТЕРАТУРА

1. **R.B. Randall, M.D. Coats, W.A. Smith.** Mechanical Systems and Signal Processing, **79**, 3 (2016).
2. **W.A. Smith, R.B. Randall.** Mechanical Systems and Signal Processing, **79**, 30 (2016).
3. **Y. Wang, J. Cao, C. Xu, Y. Cheng, X. Cheng, Q. Hao.** IEEE Photonics Journal, **11**, 1 (2019).
4. **E. Sivolenko, B. Hovhannisyan, A. Medvedev.** 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), St. Petersburg, Russia, 117–119 (2019).
5. **A. Medvedev, V. Temkina, A. Makaryan, E. Sivolenko, B. Hovhannisyan, H. Ayvazyan.** International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies, **268**, 183 (2022).
6. **M. Grigoryan, E. Sivolenko, A. Manasyan, A. Aharonyan.** International Conference on Microwave & THz Technologies, Wireless Communications and Optoelectronics (IRPhE 2022), Hybrid Conference, Yerevan, Armenia, 22–25 (2022).
7. **S.I. Ivanov, A.P. Lavrov, I.I. Saenko.** Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), **9870**, 670 (2019).
8. **P. Cabella, F.K. Hansen, M. Liguori.** Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **369**, 819 (2006).
9. **M. Peloso, M. Pietroni.** JCAP, **1305**, 031 (2013).
10. **J. Muthuswamy, D.L. Sherman, N.V. Thakor.** IEEE Trans. Biomed. Eng., **46**, 92 (1999).

HARMONIC SIGNATURES NON-REAL-TIME ANALYSIS OF MOVING TARGETS IN COMPLEX ENVIRONMENTS USING HIGHER-ORDERED STATISTICS IN LABVIEW

A. HAKHOUMIAN, M. BARSEGHYAN, N. GASPARYAN,
B. HOVHANNISYAN, E. SIVOLENKO

In signal processing and target detection, bispectral analysis is a powerful method for finding non-linear interactions and harmonic relationships in time series data. This paper introduces a new way to use bispectral analysis for moving targets. We use the cepstrum method to improve the detection of harmonic frequencies. Our method involves making a spectral mask that amplifies the desired harmonics within the bispectrum, reducing noise and other irrelevant signals. This focused approach makes it easier to track and understand moving targets. We tested our method in simulations and real-world scenarios and found that it significantly improves target detection and frequency resolution compared to traditional bispectral analysis methods. This new technique helps to monitor moving targets more accurately and efficiently, especially in radar and sonar systems, where precise target tracking and classification are crucial.