

5. Св. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012613244. Формирование и обработка дискретно-частотных сигналов в полосе частот 3,1 кГц / А. Н. Копысов, И. З. Климов, М. В. Тюлькин.

6. Копысов А. Н., Климов И. З., Тюлькин М. В. К вопросу об исследовании частотно-временного сигнала в многолучевом канале связи // Вестник ИжГТУ. – 2009. – № 4. – С. 125–127.

7. Копысов А. Н., Мошонкин В. А., Загидуллин Ю. Т. Исследование алгоритмов снижения пик-фактора сигнальных конструкций на базе дискретно-частотных сигналов // Электронные средства и системы управления. – 2012. – № 1. – С. 18–22.

8. Синтез составного дискретно-частотного сигнала / А. Н. Копысов, И. З. Климов, Ю. Т. Загидуллин, В. А. Мошонкин, А. А. Богданов // Вестник ИжГТУ. – 2013. – № 1(57). – С. 95–97.

Получено 22.06.15

9. Martin Christopher Gill. Coded-Waveform Design for High Speed Data Transfer over High Frequency Radio Channels, a thesis submitted in accordance with the requirements for the degree of Doctor of Philosophy / Institute for Telecommunications Research School of Electronic Engineering University of South Australia 25 February 1998. – P. 130.

10. Tactical Radios 2012-2013 // Compendium by Armada. – 2012. – No. 4. – 32 p.

11. Св. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2011613301.

12. Синтез составного дискретно-частотного сигнала.

13. Копысов А. Н., Климов И. З., Тюлькин М. В. Указ. соч.

14. Св. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2011613301.

15. Martin Christopher Gill. Указ. соч.

УДК 621.391

О. В. Пономарева, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

А. В. Пономарев, кандидат экономических наук, Центральная избирательная комиссия Удмуртской Республики

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ НЕПРЕРЫВНЫХ ЧАСТОТНЫХ СПЕКТРОВ ДИСКРЕТНЫХ СИГНАЛОВ МЕТОДОМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ДИСКРЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

Введение

В связи с преимуществами цифровой обработки сигналов (ЦОС) перед аналоговыми методами (гарантированная точность, идеальная воспроизводимость результатов, высокая производительность и экономичность, гибкость при моделировании) все большее число специалистов вовлекается в орбиту применения спектральных методов ЦОС. При этом многие из них, прекрасно разбираясь в своей предметной области, сталкиваются с определенными трудностями при переходе от аналоговых методов спектрального анализа к цифровым методам. Эти трудности объясняются, с одной стороны, тем, что дискретный спектральный анализ Фурье имеет свою специфику и не основан на аналогии с непрерывным спектральным анализом Фурье, с другой – с некоторыми ошибочными утверждениями, содержащимися в монографиях и учебных пособиях относительно некоторых операций, применяемых в ЦОС. Яркий пример – утверждение о том, что операция дополнения сигнала нулевыми отсчетами (ОДН) позволяет повысить спектральное разрешение при вычислении дискретного преобразования Фурье (ДПФ) [1, 2]. Отметим, что свойства ДПФ, на котором базируется классический дискретный спектральный анализ, являются *точными, а не приближенными* (как иногда утверждается), основанными на аналогии преобразований Фурье [3]. Восстановление значений

непрерывных частотных спектров дискретных сигналов методом ДПФ возможно, но связано с большими непроизводительными затратами вычислительных мощностей и оперативной памяти процессорных измерительных средств (ПриС) [4].

В работах [5–14] введено обобщение ДПФ в виде параметрического ДПФ (ДПФ-П), исследованы его свойства, рассмотрены некоторые его приложения.

Целью данной работы является исследование вопросов восстановления значений непрерывных частотных спектров дискретных сигналов методом ДПФ-П при различных значениях параметра θ ($0 \leq \theta < 1$) внутри интервала дискретности в частотной области, а также сравнение метода ДПФ-П с существующими методами решения данной задачи.

Методы восстановления значений непрерывных частотных спектров дискретных сигналов

ДПФ-П может задаваться в матричной форме [15–17]:

$$S_{N,\theta} = \frac{1}{N} F_{N,\theta} X_N, \quad 0 \leq \theta < 1, \quad (1)$$

где $F_{N,\theta}$ – матрица параметрических экспоненциальных функций:

$$F_{N,\theta} = \begin{matrix} & 0 & 1 & \dots & (N-1) & n \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ (N-1) \\ k \end{matrix} & \left[\begin{array}{cccc} 1 & W_N^\theta & \dots & W_N^{\theta(N-1)} \\ 1 & W_N^{(1+\theta)} & \dots & W_N^{(1+\theta)(N-1)} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & W_N^{(N-1+\theta)} & \dots & W_N^{(N-1+\theta)(N-1)} \end{array} \right] & , \end{matrix}$$

или в алгебраической форме [18–20]:

$$S_N(k, \theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{(k+\theta)n},$$

$$W_N^{(k+\theta)n} = \exp \left[-j \frac{2\pi}{N} (k + \theta)n \right]; \quad (2)$$

$$k = \overline{0, N-1}; \quad 0 \leq \theta < 1.$$

При значении параметра $\theta = 0$ ДПФ-П переходит в ДПФ [21, 22]:

$$S_{N,\theta} \Big|_{\theta=0} \Rightarrow S_N; \quad S_N(k, \theta) \Big|_{\theta=0} \Rightarrow S_N(k). \quad (3)$$

В работе [23] предлагается следующий метод восстановления значений непрерывного частотного спектра дискретного сигнала $x(n); n = \overline{0, (N-1)}$: применить к исходному сигналу $x(n)$ ОДН (выбрав, например, число нулевых отсчетов равным $N \cdot (q-1)$, где q – целое число), и выполнить ДПФ полученного дискретного сигнала $x_{\text{допол}}(n)$ с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Реализация данного метода, как нетрудно заметить, связана с непроизводительными затратами ПриС на хранение и обработку введенных нулевых отсчетов в исходный сигнал.

Возможен другой метод восстановления значений непрерывного частотного спектра дискретного сигнала $x(n); n = \overline{0, (N-1)}$.

$$\begin{matrix} k/q & \left[\begin{array}{c} 1 \\ S_N(0,0) \Rightarrow \mathfrak{Z}(0) \\ S_N(1,0) \Rightarrow \mathfrak{Z}(q) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ S_N((N-1),0) \Rightarrow \mathfrak{Z}((N-1) \cdot q) \end{array} \right] \dots \left[\begin{array}{c} q \\ S_N(0,(q-1)/q) \Rightarrow \mathfrak{Z}(q-1) \\ S_N(1,(q-1)/q) \Rightarrow \mathfrak{Z}(2q-1) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ S_N((N-1),(q-1)/q) \Rightarrow \mathfrak{Z}(N \cdot q-1) \end{array} \right] \end{matrix}.$$

Предлагаемый метод восстановления значений непрерывных частотных спектров дискретных сигналов методом ДПФ-П позволяет по сравнению с методом ДПФ на основе ОДН устранить непроизводительные затраты вычислительных мощностей и оперативной памяти ПриС. Вычисление ДПФ-П проводится $(q-1)$ раз с помощью алгоритма быстрого параметрического преобразования Фурье (БПФ-П) [25–31] размерности N независимо от значения q .

С использованием понятия параметрической N -периодической последовательности [24]

$$x_\theta(n) = x(n \bmod N) W_N^{\theta N \text{ent}[n/N]}, \quad (4)$$

где $\text{ent}[\cdot]$ – символ взятия целой части, сигнал $x(n)$, заданный на конечном интервале $\overline{0, N-1}$, и сигнал $x_{\text{допол}}(n)$, дополненный нулевыми отсчетами, число которых равно $N \cdot (q-1)$, может быть на интервале $\overline{0, (N \cdot q-1)}$ представлен в виде суммы

$$x_{\text{допол}}(n) = \frac{1}{q} \sum_{i=0}^{q-1} x_i(n) = \frac{1}{q} \sum_{i=0}^{q-1} x_\theta(n) \Big|_{\theta=i \cdot \frac{1}{q}},$$

где $x_\theta(n)$ задается формулой (4),

$$n = \overline{0, (N \cdot q-1)}. \quad (5)$$

На основе соотношений (2), (4), (5) можно предложить метод восстановления значений непрерывных частотных спектров дискретных сигналов методом ДПФ-П, реализуемый следующим алгоритмом.

- Выбираем шаг $m = 1/q$ по частоте, с которым предполагается восстановить значения непрерывного частотного спектра дискретного сигнала $x(n); n = \overline{0, (N-1)}$.

- Находим ДПФ-П сигнала $x(n); n = \overline{0, (N-1)}$ при значениях параметра θ , принадлежащих множеству $\left\{ 0, \frac{1}{q}, \dots, \frac{q-1}{q} \right\}$.

- Формируем массив \mathfrak{Z} восстановленных с шагом $m = 1/q$ значений непрерывного частотного спектра дискретного сигнала $x(n); n = \overline{0, (N-1)}$ согласно следующему алгоритму:

Рассмотрим сокращение числа вычислений при реализации предложенного алгоритма БПФ-П вместо известных алгоритмов для реализации ОДН для восстановления промежуточных значений непрерывного спектра ДПФ, если N не равно целой степени двух, и БПФ, если N целая степень двух.

Число операций P_1 для ДПФ без учета нулевых операций составляет $P_1 = N \cdot q \cdot N = N^2 \cdot q$. Число

операций P_2 для БПФ без учета нулевых операций составляет

$$P_2 = N \cdot q \cdot \log_2(N \cdot q) = N \cdot q \cdot (\log_2 N + \log_2 q)$$

при $q = 2^k$, где k – целое число.

Число операций P_3 для БПФ-П составляет

$$P_3 = N \cdot (q-1) \cdot \log_2 N.$$

Таким образом, выигрыш предложенного алгоритма по сравнению с ДПФ составляет

$$\gamma_1 = P_1 / P_3 = \frac{N \cdot q}{(q-1) \cdot \log_2 N}. \text{ Например, при } N = 1024,$$

$q = 2 \gamma_1 = 200$. Выигрыш предложенного алгоритма по сравнению с БПФ составляет

$$\gamma_2 = P_2 / P_3 = \frac{(\log_2 N + \log_2 q) \cdot q}{(q-1) \cdot \log_2 N}. \text{ Например, при}$$

$$N = 1024, q = 2 \gamma_2 = 2, 2.$$

В заключение отметим еще одно достоинство предлагаемого метода восстановления значений частотных спектров. Дело в том, что вычисление ДПФ с помощью быстрых алгоритмов (алгоритмов БПФ) предъявляет жесткие требования к длительности сигнала $x_{\text{допол}}(n)$ [32, 33]. Например, при использовании широко применяемого алгоритма БПФ по основанию 2 длительность сигнала $x_{\text{допол}}(n)$ должна быть степенью двух. Следовательно, множество частот, на которых могут быть восстановлены значения частотных спектров, оказывается также жестко заданным. Предлагаемый метод свободен от указанного недостатка.

Библиографические ссылки

1. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов : учебник для вузов. – 2-е изд. – М. : Питер, 2007. – 749 с.
2. Голд Б., Рэйдер Ч. Цифровая обработка сигналов : пер. с англ. – М. : Сов. радио, 1973. – 367 с.
3. Трахтман А. М. Введение в обобщенную спектральную теорию сигналов. – М. : Сов. радио, 1972. – 351 с.
4. Сергиенко А. Б. Указ. соч.
5. Пономарева О. В., Пономарев В. А., Пономарев А. В. Иерархическая морфологическо-информационная модель системы функционального диагностирования объектов на основе цифровой обработки сигналов // Датчики и системы. – 2014. – № 1(176). – С. 2–8.
6. Пономарев В. А., Пономарева О. В. Временные окна при оценке энергетических спектров методом параметрического дискретного преобразования Фурье // Автометрия. – 1983. – № 4. – С. 39–45.
7. Пономарев В. А., Пономарева О. В. Обобщение дискретного преобразования Фурье для интерполяции во временной области // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1983. – Т. XXVI. – № 9. – С. 67–68.
8. Пономарева О. В. Быстрое параметрическое дискретное преобразование Фурье действительных последовательностей // Цифровая обработка сигналов. – 2012. – № 2. – С. 2–5.
9. Пономарева О. В., Пономарева Н. В. Модификация фильтра на основе частотной выборки для решения задач цифровой обработки случайных процессов со скрытыми

периодичностями // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 2(20). – С. 122–129.

10. Пономарева О. В., Пономарев А. В., Пономарева Н. В. Метод быстрого вычисления дискретного преобразования Фурье действительных последовательностей // Цифровая обработка сигналов. – 2013. – № 2. – С. 10–15.

11. Пономарева О. В., Пономарев А. В., Пономарев В. А. Обобщение алгоритма Герцеля для решения задач выявления скрытых периодичностей // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1(21). – С. 41–46.

12. Пономарева О. В., Алексеев В. А., Пономарев А. В. Цифровой периодограммализ и проблемы его практического применения // Вестник ИжГТУ. – 2013. – № 2(58). – С. 130–133.

13. Пономарев В. А., Пономарева О. В., Пономарев А. В. Метод эффективного измерения скользящего параметрического спектра Фурье // Автометрия. – 2014. – Т. 50. – № 2. – С. 31–38.

14. Пономарева О. В., Тюрикова Е. Ф. Методы и алгоритмы спектрально-корреляционной компьютерной обработки электроэнцефалограмм // Современные информационные и электронные технологии. – 2014. – Т. 1. – № 15. – С. 70–71.

15. Обобщение алгоритмов Герцеля и скользящего параметрического дискретного преобразования Фурье / В. А. Пономарев, О. В. Пономарева, А. В. Пономарев, Н. В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2014. – № 1. – С. 3–11.

16. Пономарева О. В. Инвариантность скользящего энергетического спектра Фурье дискретных сигналов в базисной системе параметрических экспоненциальных функций // Вестник ИжГТУ. – 2014. – № 2(62). – С. 102–106.

17. Пономарева О. В., Алексеев В. А., Пономарев А. В. Быстрый алгоритм измерения спектра действительных сигналов методом аperiodического дискретного преобразования Фурье // Вестник ИжГТУ. – 2014. – № 2(62). – С. 106–109.

18. Пономарева О. В. Измерение спектров комплексных сигналов на конечных интервалах методом аperiodического дискретного преобразования Фурье // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 1(23). – С. 100–107.

19. Пономарев В. А., Пономарева О. В., Пономарева Н. В. Метод быстрого вычисления дискретного преобразования Гильберта в частотной области // Современные информационные и электронные технологии. – 2014. – Т. 1. – № 15. – С. 183–184.

20. Пономарева О. В. Неинвариантность скользящего энергетического параметрического фурье-спектра действительных тональных сигналов // Цифровая обработка сигналов. – 2014. – № 2. – С. 7–14.

21. Пономарев В. А., Пономарева О. В. Инвариантность текущего энергетического фурье-спектра действительных дискретных сигналов на конечных интервалах // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2014. – № 1. – С. 15–21.

22. Пономарев В. А., Пономарева О. В. Инвариантность текущего энергетического спектра Фурье комплексных дискретных сигналов на конечных интервалах // Изв. высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2014. – Т. 2. – С. 8–16.

23. Голд Б., Рэйдер Ч. Указ. соч.

24. Пономарева О. В., Пономарева Н. В. Повышение точности и расширение функциональных возможностей цифровых фильтров на основе частотной выборки // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 2(7). – С. 114–119.

25. Там же.

26. Пономарева О. В., Пономарев А. В., Пономарева Н. В. Формализованное описание погрешностей измерения вероятностных характеристик случайных процессов процессорными измерительными средствами // Современные информационные и электронные технологии. – 2013. – Т. 1. – № 14. – С. 90–93.

27. Алексеев В. А., Пономарев В. А., Пономарева О. В. Методология определения погрешностей измерения вероятностных характеристик случайных процессов, реализуемых процессорными измерительными средствами // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – № 2(16). – С. 91–99.

28. Пономарева О. В., Пономарев А. В., Пономарева Н. В. Скользящее параметрическое ДПФ в задачах обнаружения тональных компонент // Цифровая обработка сигналов. – 2012. – № 4. – С. 2–7.

29. Пономарева О. В., Пономарев А. В., Пономарев В. А. Измерение скользящего взвешенного энергетического дискретно-временного спектра тональных компонент // Ин-

Получено 24.05.15

теллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2(24). – С. 126–132.

30. Пономарева О. В. Измерение временных спектров дискретных сигналов методом модифицированного параметрического дискретного преобразования Фурье // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2(24). – С. 132–138.

31. Пономарев В. А., Пономарева О. В. Виброакустическое диагностирование коробок передач станков цифровыми методами // Станки и инструмент. – 1983. – № 9. – С. 18–21.

32. Демпфирование поперечных колебаний вращающейся по крену ракеты с помощью микрогироскопа / В. Я. Распопов, Р. В. Алалуев, Ю. В. Иванов, Д. М. Малютин // Гироскопия и навигация. – 2007. – № 1(56). – С. 125–128.

33. Гирич В. Я., Распопов В. И., Белобрагин В. Н. Измерители угловых параметров летательного аппарата на базе гироскопа с вращающимся подвесом // Датчики и системы. – 2005. – № 2. – С. 7–10.

УДК 681.518.3+623.54

А. Ю. Вдовин, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова
С. В. Суглов, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ РАСПОЛОЖЕНИЯ СВЕТОВЫХ ЭКРАНОВ НА СТРЕЛКОВОЙ ТРАССЕ С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКОВ КОНТАКТНОЙ БЛОКИРОВКИ

Системы на основе световых экранов широко применяются для определения различных внешнебаллистических параметров пуль [1–5]. При этом очевидно, что погрешности определения этих параметров будут в большой степени определяться погрешностями установки световых экранов на стрелковой трассе. Поэтому необходимо стремиться к максимально точной установке экранов или по крайней мере к максимально точному определению местоположения световых экранов после их установки. Но в условиях стрелковой трассы это не всегда возможно по ряду причин (средства измерения несовершенны, кроме того, световые экраны имеют определенную толщину, причем ее величина может изменяться в зависимости от расстояний до оптического датчика и излучателя, и пр.). В связи с этим весьма актуальной становится задача идентификации (в данном случае – уточнения) положения световых экранов. Возможен вариант идентификации с использованием системы уравнений внешней баллистики [6].

При использовании штатного бесконтактного метода определения скорости пули стрелковая трасса оборудуется двумя парами световых экранов – на дистанциях 8 и 12, 23 и 27 м для определения скоростей на дистанции 10 и 25 м от дульного среза соответственно.

Оценим возможность выполнения идентификации расположения световых экранов путем стати-

стического моделирования с большим числом опытов ($n = 1000$) при проведении следующего эксперимента. На стрелковой трассе кроме 4 световых экранов размещены датчики штатной контактной блокировки Д0 и Д5 (рис. 1).

На рис. 1 Э1–Э4 – световые экраны, образованные линейными излучателями И1–И4 и оптически датчиками Д1–Д4. В среде Mathcad создана модель баллистического комплекса, соответствующего рис. 1.

Считая, что местоположение экрана Э4 и Д5 относительно Д0 известно точно, на основании рассчитанных моментов срабатывания датчиков Д0, Д4, Д5, полученных при моделировании серии выстрелов (точки попадания генерируются в соответствии с табличными характеристиками рассеивания пуль для изделия АКМ [7]), по известной методике [8] определяются начальные скорости и баллистические коэффициенты пуль. Далее решается прямая задача внешней баллистики, и для каждого выстрела определяются дальности расположения световых экранов, затем результаты усредняются. Было установлено, что при таких условиях погрешность идентификации практически не зависит от исходной погрешности установки световых экранов Э1–Э3, заданной на модели, и для экранов Э1, Э2 и Э3 не превышает 1; 1,2; 1,5 мм соответственно.

Далее была произведена оценка влияния погрешности установки экрана Э4 относительно Д0 на точ-