ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.396

А. С. Лаврентьева, В. А. Новиков,
М. Ю. Семенова, В. Р. Фидельман

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИМВОЛЬНОЙ СКОРОСТИ КОРОТКИХ ВЫБОРОК ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА

Аннотация.

Актуальность и цели. В работе рассмотрена задача определения символьной скорости фазоманипулированного сигнала, точная оценка которой играет важную роль для последующей демодуляции. Актуальность данной задачи обоснована тем, что для ряда приложений при выборе алгоритма решающим фактором, помимо точности, является возможность его применения для коротких выборок принимаемых сигналов. Зачастую данная задача усложняется тем, что определение параметров сигнала должно производиться в режиме, максимально приближенном к режиму реального времени.

Материалы и методы. В работе представлен метод определения символьной скорости фазоманипулированного сигнала, включающий в себя обнаружение моментов смены фазы с помощью быстрого дискретного вейвлет-преобразования. Проведено сравнение метода с алгоритмом на основе выделения комплексной огибающей сигнала и с алгоритмом на основе непрерывного вейвлет-преобразования.

Результаты. Показана возможность определения символьной скорости коротких фазоманипулированных сигналов на фоне аддитивного белого гауссова шума. Изучена эффективность предложенного алгоритма при различных отношениях сигнал/шум и длительностях обрабатываемого сигнала.

Выводы. Выбор алгоритма определения символьной скорости должен производиться исходя из размера выборки фазоманипулированного сигнала и временных ограничений задачи. Для сигналов большой длительности с высоким отношением сигнал/шум следует использовать метод с выделением комплексной огибающей сигнала. При наличии достаточных вычислительных ресурсов для предварительного определения оптимального масштабного коэффициента для коротких выборках сигналов следует отдать предпочтение методу с непрерывным вейвлет-преобразованием. При жестких требованиях к времени вычисления оптимальным выбором является метод с дискретным вейвлет-преобразованием.

Ключевые слова: фазоманипулированный сигнал, символьная скорость, короткая выборка, вейвлет-преобразование.

A. S. Lavrent'eva, V. A. Novikov,
M. Yu. Semenova, V. R. Fidel'man

ESTIMATION OF SYMBOL RATE OF A PSK SIGNAL USING WAVELET TRANSFORM

Abstract.

Background. The paper considers a problem of determining symbol rate of phase-shift keyed (PSK) signals. Its accurate assessment plays an important role in signal demodulation. The problem is topical as for a number of tasks the ability to handle short samples of received signals is crucial when choosing an algorithm. It is often complicated by the fact that signal parameters estimation must be done in near real time.

Materials and methods. This paper presents a method for determining PSK signal's symbol rate that includes detection of phase change moments using fast discrete wavelet transform. This method was compared with an algorithm based on identification of a signal complex envelope and with an algorithm based on continuous wavelet transform.

Results. The possibility of determining the symbol rate of short samples of a PSK signal is shown against additive white Gaussian noise. The efficiency of the suggested algorithm was studied for various signal-to-noise ratios and duration of the processed signal.

Conclusions. The choice of an algorithm for determining symbol rate should be based on the PSK signal sample length and time limits. The algorithm based on identification of a signal complex envelope should be used for long-duration signals with high signal/noise ratio. For short signal samples the algorithm based on continuous wavelet transform should be used in case of sufficient computing resources for pre-determination of the optimal scale factor. In case of strong requirements to computation time the best choice is the algorithm with discrete wavelet transform.

Key words: phase-shift keyed signal, symbol rate, short sample, wavelet transform.

Введение

Сигналы с фазовой манипуляцией широко применяются в цифровых телекоммуникациях, таких как коммерческие и военные системы связи, спутниковое телевидение. Точная оценка параметров сигналов с неизвестной структурой, в частности частоты манипуляции, очень важна для последующей обработки, в том числе для демодуляции сигнала.

В настоящей работе рассмотрено применение дискретного вейвлет-преобразования для оценки символьной скорости фазоманипулированных (ФМн) сигналов. В литературе по обработке радиосигналов за последнее десятилетие вейвлет-преобразование (ВП) встречается довольно часто, особенно в исследованиях локальных пространственных и частотных характеристик. Выбор ВП в качестве инструмента связан с тем, что оно дает информацию не только о частотном составе сигнала, но и о его особенностях во временной области [1], поэтому ВП может использоваться для определения моментов времени смены символа в принимаемом сигнале для дальнейшей оценки частоты манипуляции ФМн-сигнала.

В существующих работах по определению символьной скорости ФМн-сигналов с применением ВП чаще всего используется непрерывное вейвлет-преобразование (НВП) [2–7]. Основная трудность описанных в них алгоритмов связана с определением масштабного коэффициента НВП. В работах [2, 3]

НВП сигнала реализовано с использованием одного значения масштабного коэффициента, который подбирается экспериментально для конкретной задачи. Например, в патенте [3] предлагается использовать в роли материнского вейвлета вейвлет Добеши восьмого порядка и полученное экспериментальным путем значение масштабного коэффициента, которое позволяет получить высокую точность для исследуемых в работе сигналов с заданными параметрами. Изменение параметров обрабатываемого сигнала приводит к значительному ухудшению точности и устойчивости к шумам такого алгоритма.

В работах [4, 5] предлагаются алгоритмы, позволяющие определить «оптимальный» масштабный коэффициент, при котором алгоритм с НВП показывает повышенную устойчивость на фоне аддитивного белого гауссова шума. В условиях работы в режиме реального времени существенным недостатком таких методов являются значительные вычислительные затраты.

Для уменьшения вычислительной сложности при автоматизированном выборе масштабного коэффициента и устранения сильной зависимости от параметров конкретной задачи при его экспериментальном подборе в некоторых работах предлагается производить усреднение НВП-сигнала при нескольких масштабных коэффициентах [6, 7]. В работах [4, 8] отмечено, что такой подход не позволяет значительно увеличить устойчивость к шумам по сравнению со случаем использования одного масштабного коэффициента, что обусловлено значительной зашумленностью вейвлет-коэффициентов при малых масштабах, используемых при усреднении.

На данный момент не существует общепринятого подхода к выбору масштабного коэффициента, диапазона коэффициентов базисной вейвлет-функции и самой базисной функции для решения задачи определения частоты манипуляции ФМн-сигнала на основе непрерывного ВП. Чаще всего выбор осуществляется после ряда проведенных экспериментов [3] и зависит от требований задачи. Применение одного масштабного коэффициента позволяет работать только при высоких отношениях сигнал/шум и фиксированных параметрах сигнала. При использовании нескольких масштабных коэффициентов устойчивость к аддитивным белым гауссовым шумам увеличивается незначительно. Автоматизированный выбор «оптимального» масштабного коэффициента позволяет получить высокую точность вычислений при низких отношениях сигнал/шум, однако требует значительных вычислительных затрат.

По сравнению с НВП возможность применения дискретного вейвлет-преобразования (ДВП) для оценки символьной скорости ФМн-сигналов в литературе освещена недостаточно. В данной работе предлагается метод на основе дискретного вейвлет-преобразования с применением быстрого алгоритма Малла [9]; показана его эффективность для коротких выборок ФМн-сигнала. Сравнение предложенного метода производилось с двумя известными алгоритмами. Первый основан на выделении комплексной огибающей сигнала, по спектру модуля которого определяется частота манипуляции. Второй – на НВП с использованием одного масштабного коэффициента, определенного двумя методами: визуально по вейвлет-спектрограмме сигнала и автоматически по алгоритму, описанному в работе [6].

1. Определение частоты манипуляции с применением ДВП

Известно, что дискретная квадратично-интегрируемая функция $S(t) \in L^2(R)$ может быть представлена в виде линейной комбинации вейвлет-функций (материнский вейвлет) $\Psi_{j,k} = 2^{j/2}\Psi(2^j t - k)$ на различных масштабах и скейлинг-функции (отцовский вейвлет) $\Phi_{j,k} = 2^{j/2}\Phi(2^j t - k)$ на самом большом масштабе разрешения [9]:

$$S(t) = \sum_k a_{J,k}\Phi_{J,k}(t) + \sum_{j=1}^{J}\sum_k d_{j,k}\Psi_{j,k}(t),$$

где индекс *j* является параметром масштаба и называется уровнем разложения; индекс *k* является параметром сдвига; $a_{J,k}a$ – аппроксимирующие коэффициенты ДВП на масштабе разрешения *J*; $d_{j,k}$ – детализирующие коэффициенты ДВП на масштабе *j*.

Для определения частоты манипуляции модули детализирующих коэффициентов ФМн-сигнала *p* первых (высших) уровней разложения усредняются (рис. 1) и подвергаются Фурье-преобразованию (рис. 2).

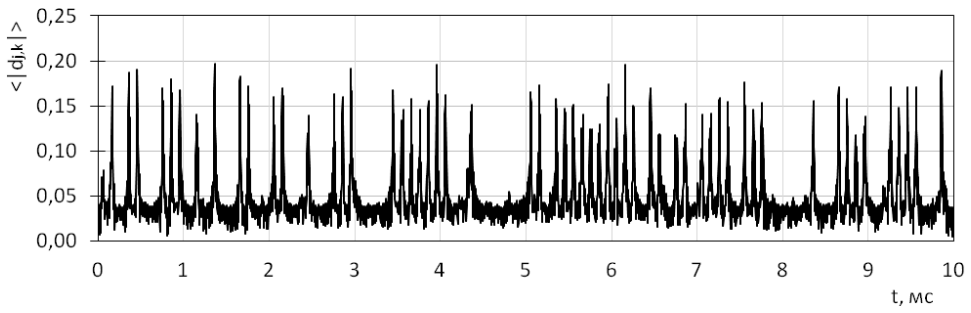


Рис. 1. Усредненное значение модуля детализирующих коэффициентов ФМн-сигнала по трем уровням разложения (ОСШ 10 дБ, 100 символов в сигнале)

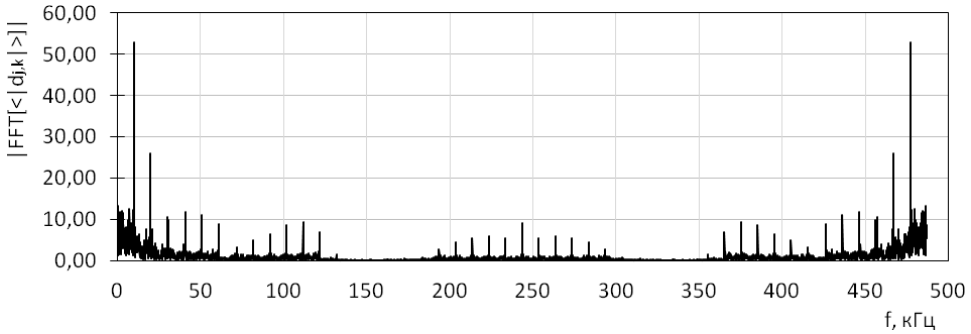


Рис. 2. Модуль преобразования Фурье усредненных значений модулей детализирующих коэффициентов ФМн-сигнала (ОСШ 10 дБ, 100 символов в сигнале)

Частота манипуляции сигнала определяется по пику в спектре детализирующих коэффициентов в диапазоне (BW/4, 3BW/4), где BW – ширина спектра сигнала. Для данного алгоритма требуется предварительно выделить IQ-компоненты (синфазную и квадратурную составляющие) ФМн-сигнала, чтобы исключить зависимость от несущей частоты и оставить особенности сигнала, связанные только с изменениями его фазы. В качестве материнского вейвлета использовался вейвлет Хаара; поскольку он прост в реализации и схож по форме с IQ-компонентами ФМн-сигналов, его применение позволяет получить хорошее временное разрешение.

Преимуществом данного метода является возможность использования быстрого вейвлет-преобразования (БВП), которое реализуется в виде каскадного соединения низкочастотных и высокочастотных фильтров и прореживания вдвое (пирамидального алгоритма Малла) [9].

При расчете учитываются только первые p уровней разложения сигнала. Использование большего числа уровней не позволяет увеличить точность алгоритма и ведет к уменьшению быстродействия метода. Связано это с тем, что при использовании БВП с каждым уровнем разложения количество отсчетов в сигнале уменьшается в два раза, поэтому при моделировании проводится интерполяция разных уровней до количества точек исходного сигнала путем дополнения нулями в частотной области. Число p определяется таким образом, чтобы на последнем используемом уровне разложения количества отсчетов на один символ было достаточно для последующего анализа. Для моделируемых в работе сигналов использовались $p = 3$ уровня разложения.

2. Определение частоты манипуляции с применением НВП

Для определения частоты манипуляции с применением НВП выполняется НВП $W(a,\tau)$ при определенном масштабном коэффициенте a от ФМн-сигнала $S(t)$. Как и в методе с ДВП, в качестве материнского вейвлета в работе использовался вейвлет Хаара.

Непрерывное вейвлет-преобразование одномерного сигнала определяется выражением

$$W(a,\tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} S(t)\Psi^*\left(\frac{t-\tau}{a}\right)dt,$$

где τ – сдвиг вейвлет-функции по оси времени; $\Psi(t)$ – базисный вейвлет (материнская функция). Аналогично методу с ДВП для расчета частоты манипуляции выделяются IQ-компоненты сигнала и подвергаются НВП. К модулю полученных вейвлет-коэффициентов применяется быстрое преобразование Фурье (БПФ) с последующим выделением пика в спектре.

В работе исследовался алгоритм с НВП при масштабных коэффициентах, определенных двумя способами. В первом значение a определялось визуально по вейвлет-спектрограмме незашумленного сигнала. Во втором для автоматического определения «оптимального» масштабного коэффициента a в работе использовался алгоритм, описанный в [6], заключающийся в выборе масштаба, при котором спектр коэффициентов вейвлет-преобразования имеет наиболее выраженный максимум.

3. Определение частоты манипуляции с применением комплексной огибающей

На практике для определения частоты манипуляции часто используют метод с выделением комплексной огибающей $g(t)$ сигнала [10]:

$$g(t) = I(t) + iQ(t).$$

Как и в методе с ДВП, в данном методе предполагается, что несущая частота сигнала известна или может быть предварительно оценена. ФМн-сигнал приводится к IQ-компонентам, подвергается нелинейному преобразованию (взятие модуля или квадрата модуля комплексной огибающей), далее, как и в двух других методах, определяется спектр полученных данных на основе быстрого преобразования Фурье, по которому оценивается частота манипуляции. Замена этапа применения ВП на более простой нелинейный преобразователь позволяет получить значительный выигрыш в быстродействии.

4. Результаты моделирования

На рис. 3 представлены графики зависимости относительной ошибки δf_M оцененной частоты манипуляции f_M от отношения сигнал/шум (ОСШ) для сигналов длительностью 300 символов. Анализ представленных графиков позволяет сделать вывод о том, что алгоритмы с НВП и ДВП более устойчивы к шуму, чем метод с применением комплексной огибающей. Метод с НВП и с ДВП позволяют определить частоту манипуляции с относительной ошибкой не более 0,01 для сигналов с ОСШ –8 и –4 дБ соответственно. Метод с выделением комплексной огибающей не удовлетворяет указанному условию уже при ОСШ 2 дБ.

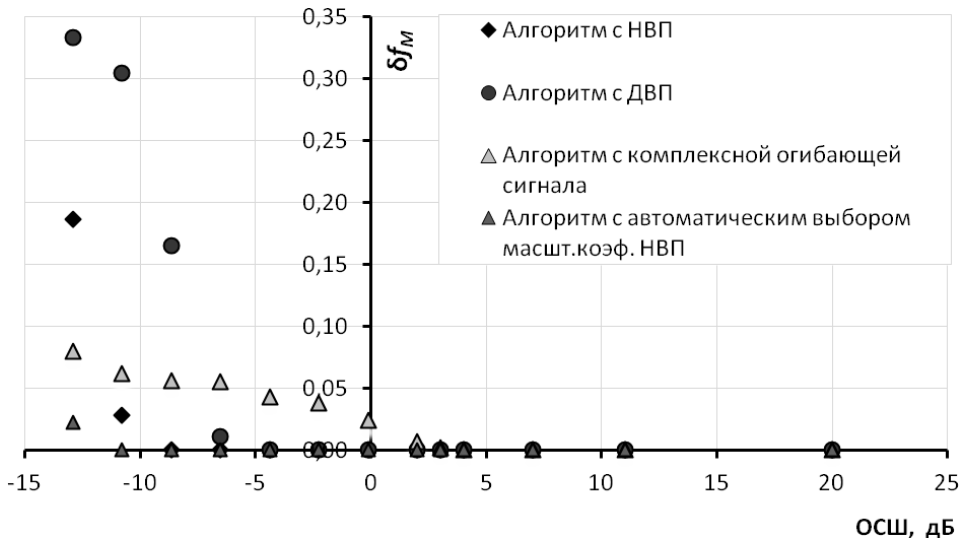


Рис. 3. Относительная погрешность частоты манипуляции δf_M в зависимости от уровня шума в сигнале (частота манипуляции f_M =10 кГц, количество символов N = 300, 1000 усреднений)

На рис. 4 представлены аналогичные графики для сигналов длительностью 50 символов. В этом случае метод с выделением комплексной огибающей не позволяет с достаточной точностью определить частоту манипуляции даже при отношении сигнал/шум 15 дБ. На таких «коротких» сигналах эффективность методов с НВП и ДВП также снижается, однако они позволяют обрабатывать ФМн-сигналы с ОСШ до 0 дБ.

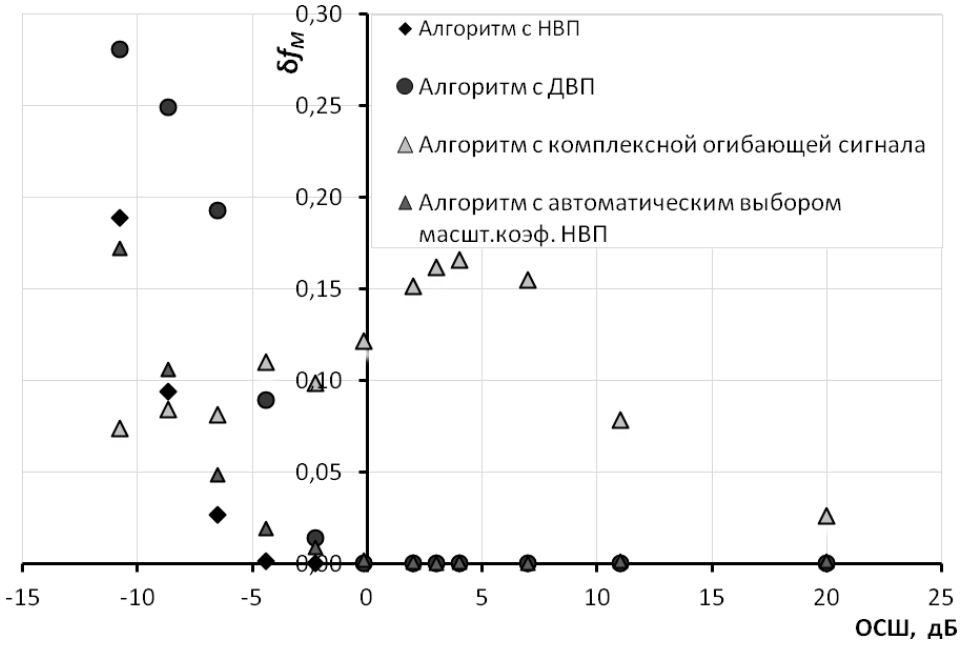
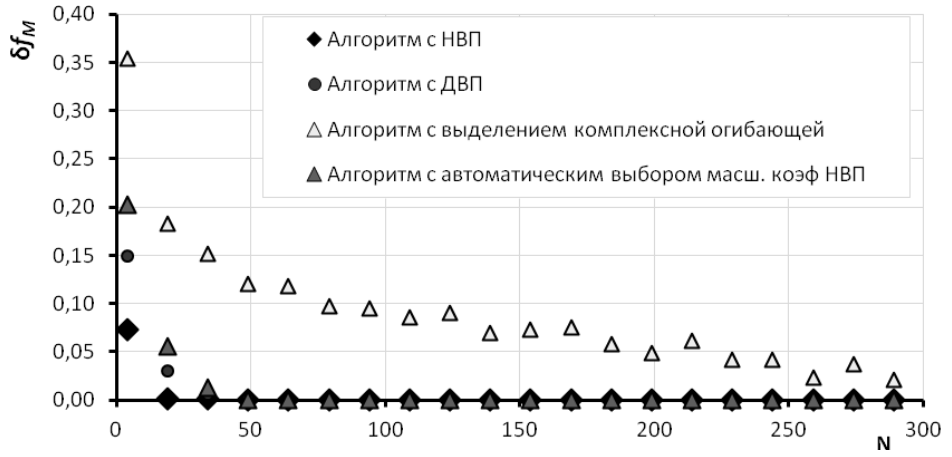


Рис. 4. Относительная ошибка частоты манипуляции δf_M в зависимости от уровня шума в сигнале (частота манипуляции f_M = 10 кГц, количество символов N = 50, 1000 усреднений)

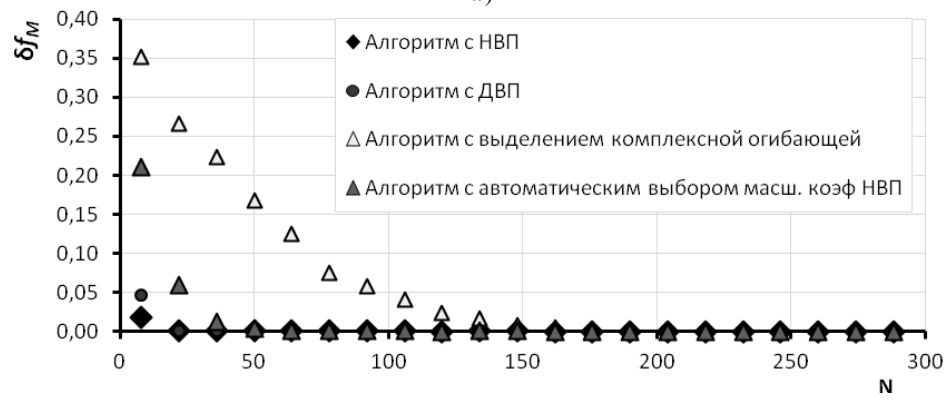
Представленные графики также показывают, что используемый алгоритм автоматического выбора масштабного коэффициента не позволяет получить его оптимальное (с точки зрения наибольшей устойчивости к шумам) значение a_{opt}. На рис. 4 видно, что алгоритм с НВП с автоматическим выбором масштаба a_{auto} незначительно уступает алгоритму с НВП с масштабом $a_{\exp}$, выбранным визуально по вейвлет-спектрограмме ФМн-сигнала. Несмотря на неоптимальность масштабного коэффициента a_{auto}, проведенные исследования точности определения частоты манипуляции в зависимости от уровня шума в сигнале при разных масштабах a показали, что устойчивость алгоритма с НВП с a_{auto} несущественно ниже устойчивости алгоритма с a_{opt}.

При исследовании влияния длительности сигнала на точность определения частоты манипуляции было выявлено, что эффективность рассматриваемых алгоритмов снижается на коротких выборках сигнала (рис. 5). Например, при ОСШ 5 дБ алгоритм, основанный на НВП, и алгоритм с применени-

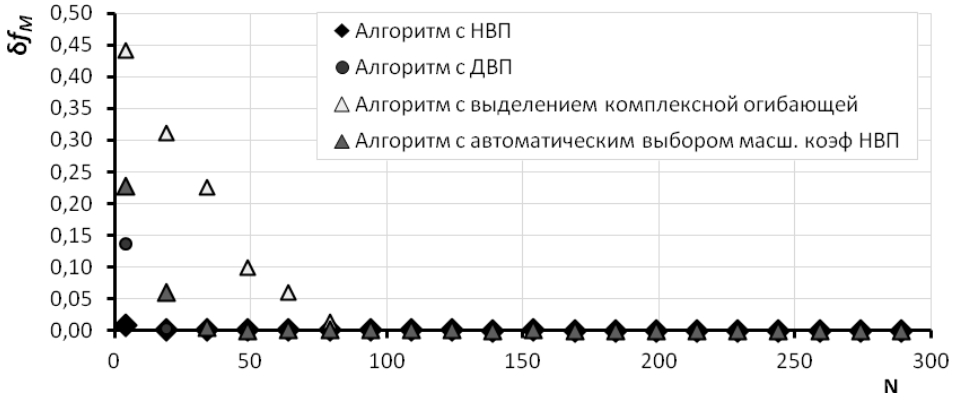
ем детализирующих коэффициентов ДВП позволяют получить требуемую точность вплоть до длительности сигнала $N = 40$ символов. Точность метода с выделением комплексной огибающей не удовлетворяет требованиям уже при $N = 150$ символах.



а)



б)



в)

Рис. 5. Относительная ошибка частоты манипуляции δf_M в зависимости от количества символов N в сигнале (частота манипуляции $f_M = 10$кГц, 1000 усреднений) при различных ОСШ: ***а*** – 0 дБ; ***б*** – 5 дБ; ***в*** – 10 дБ

При ОСШ 0 дБ и выше предельные длительности сигнала *N*, при которых обеспечивается требуемая точность для алгоритмов с НВП и ДВП, отличаются незначительно. Таким образом, алгоритмы с НВП и с ДВП обладают повышенной устойчивостью к шумам на коротких сигналах по сравнению с методом с выделением комплексной огибающей.

Заключение

В настоящей работе предложен алгоритм цифровой обработки с применением ДВП, позволяющий выделить моменты смены символа в ФМн-сигнале для дальнейшей оценки частоты манипуляции. Проведено сравнение предложенного метода с описанными в литературе методами на основе НВП и комплексной огибающей. Выявлено, что на коротких выборках ФМн-сигналов алгоритмы с ДВП и НВП показывают лучшую эффективность (точность) по сравнению с методом с выделением комплексной огибающей (алгоритмы с ДВП и НВП более устойчивы к аддитивным белым гауссовым шумам).

Эффективность алгоритма с НВП сильно зависит от параметров обрабатываемого сигнала при «ручном» выборе масштабного коэффициента, и требуются значительные вычислительные затраты при автоматическом выборе масштаба. Наличие быстрого алгоритма Малла и использование только нескольких уровней разложения сигнала в предложенном алгоритме с применением ДВП значительно сокращает вычислительные затраты, при этом устойчивость к аддитивным шумам не теряется по сравнению с методом с НВП.

Список литературы

1. **Дьяконов, В.** MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник / В. Дьяконов, И. Абраменкова. – СПб. : Питер, 2002. – 608 с.
2. **Ho, K. C.** Modulation identification of digital signals by the wavelet transform / K. C. Ho, W. Prokopiw, Y. T. Chan // IEEE MILCOM. – 1995. – Vol. 2. – P. 886–890.
3. Патент № 2 485 526 Российская Федерация, МПК G01R 23/16. Способ оценки параметров и демодуляции случайных сигналов / Семкин П. В., Кузовников А. В., Сомов В. Г. – опубл. 20.06.2013, Бюл. № 17.
4. **Mingwei, Q.** An improved model for symbol rate estimation based on wavelet transform / Q. Mingwei, D. Tao, L. Wei // Theoretical and Applied Information Technology. – 2013. – Vol. 51, № 1. – P. 53–59.
5. Blind symbol rate estimation of satellite communication signal by Haar wavelet transform / L. Wang, G. X. Zhang, D. M. Bian, Z. D. Xie, J. Hu // Electronics. – 2011. – Vol. 28, № 2. – P. 198–203.
6. **Yajun, L.** A blind symbol rate estimation of weak signal based on cyclic spectrum and wavelet transform / L. Yajun, Y. Yuancheng, D. Tao, Q. Mingwei // Information and Computational Science. – 2013. – P. 1917–1924.
7. **Chan, Y. T.** Symbol rate estimation by the wavelet transform / Y. T. Chan, J. W. Plews, K. C. Ho // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. – 1997. – Vol. 1. – P. 177–180.
8. **Xu, J.** The improvement of symbol rate estimation by the Wavelet transform / J. Xu, F. P. Wang, Z. J. Wang // IEEE, 2005. – P. 100–103.
9. **Яковлев, А. Н.** Введение в вейвлет-преобразования : учеб. пособие / А. Н. Яковлев. – Новосибирск : НГТУ, 2003. – 104 с.
10. **Koh, B. S.** Detection of symbol rate of unknown digital communication signals / B. S. Koh, H. S. Lee // Electronics Letters. – 1993. – Vol. 29. – P. 278–279.

References

1. D'yakonov V., Abramenkova I. *MATLAB. Obrabotka signalov i izobrazheniy. Spetsial'nyy spravochnik* [MATLAB. Signal and image processing. Special reference]. Saint-Petersburg: Piter, 2002, 608 p.
2. Ho K. C., Prokopiw W., Chan Y. T. *IEEE MILCOM*. 1995, vol. 2, pp. 886–890.
3. Patent № 2 485 526 Russian Federation, MPK G01R 23/16. *Sposob otsenki parametrov i demodulyatsii sluchaynykh signalov* [A method of parameter estimation and random signal demodulation]. Semkin P. V., Kuzovnikov A. V., Somov V. G. Publ. 20 June 2013. Bull. no. 17.
4. Mingwei Q., Tao D., Wei L. *Theoretical and Applied Information Technology*. 2013, vol. 51, no. 1, pp. 53–59.
5. Wang L., Zhang G. X., Bian D. M., Xie Z. D., Hu J. *Electronics*. 2011, vol. 28, no. 2, pp. 198–203.
6. Yajun L., Yuancheng Y., Tao D., Mingwei Q. *Information and Computational Science*. 2013, pp. 1917–1924.
7. Shan Y. T., Plews J. W., Ho K. C. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. 1997, vol. 1, pp. 177–180.
8. Xu J., Wang F. P., Wang Z. J. The improvement of symbol rate estimation by the Wavelet transform. *IEEE*, 2005, pp. 100–103.
9. Yakovlev A. N. *Vvedenie v veyvlet-preobrazovaniya: ucheb. posobie* [Introduction into wavelet transform: tutorial]. Novosibirsk: NGTU, 2003, 104 p.
10. Koh B. S., Lee H. S. *Electronics Letters*. 1993, vol. 29, pp. 278–279.

Лаврентьева Анастасия Сергеевна
инженер, Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники (Россия, г. Нижний Новгород, ул. Шапошникова, 5)

E-mail: nastya_lav_@mail.ru

Lavrent'eva Anastasiya Sergeevna
Engineer, Nizhny Novgorod State Research Institute of Radio Engineering (5 Shaposhnikova street, Nizhny Novgorod, Russia)

Новиков Владислав Антонович
кандидат физико-математических наук, старший преподаватель, кафедра информационных технологий в физических исследованиях, Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского (Россия, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 3)

E-mail: fidelman@nifti.unn.ru

Novikov Vladislav Antonovich
Candidate of physical and mathematical sciences, senior lecturer, sub-department of information technologies in physical research, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (building 3, 23 Gagarina avenue, Nizhny Novgorod, Russia)

Семенова Марина Юрьевна
кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Лианозовский электромеханический завод (Россия, г. Москва, Дмитровское шоссе, 110)

E-mail: mslemz@mail.ru

Semenova Marina Yur'evna
Candidate of physical and mathematical sciences, scientific associate, JSC «LEMZ R&P Corp.» (110 Dmitrovskoye highway, Moscow, Russia)

Фидельман Владимир Романович
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных технологий в физических исследованиях, Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского (Россия, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 3)

E-mail: fidelman@nifti.unn.ru

Fidel'man Vladimir Romanovich
Doctor of engineering sciences, professor, head of sub-department of information technologies in physical research, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (building 3, 23 Gagarina avenue, Nizhny Novgorod, Russia)

УДК 621.396
Лаврентьева, А. С.

Применение дискретного вейвлет-преобразования для определения символьной скорости коротких выборок фазоманипулированного сигнала / А. С. Лаврентьева, В. А. Новиков, М. Ю. Семенова, В. Р. Фидельман // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 1 (37). – С. 92–102.