

И. И. СОПРОНЮК, аспирант, УкрГАЗТ, Харьков;

В. П. ЛЫСЕЧКО, канд. техн. наук, доцент, УкрГАЗТ, Харьков

МЕТОД МОНИТОРИНГА СПЕКТРА В КОГНИТИВНЫХ РАДИОСЕТЯХ НА ОСНОВЕ БПФ

У статті розглядається метод моніторингу спектру на основі БПФ, побудований узагальнений алгоритм моніторингу на підставі даного методу. Представлені результати моделювання відповідно до вимог стандарту IEEE 802.22, які підтверджують працездатність алгоритму, що розробляється.

The method for monitoring of the spectrum on the basis of the FFT algorithm to construct a generalized monitoring on the basis of this method is discussed. The results of modeling in accordance with the requirements of the developed standard IEEE 802.22, confirming the efficiency of the algorithm are shown.

Постановка проблеми. За последние десятилетия беспроводные технологии и беспроводные устройства получили широкое распространение, что резко увеличило спрос на спектр. Нынешние решения в области доступа к радиочастотному спектру привели к тому, что свободное его количество не удовлетворяет спроса на него, то есть – к появлению дефицита спектра. В нынешних беспроводных сетях доминирует командно-административный подход к управлению использованием спектра, где фиксированные участки спектра лицензированы для каждой отдельной беспроводной услуги или технологии. Огромный успех и рост беспроводных дополнений, которые работают в нелицензированных полосах, привели к переполненности этих полос.

Одним из возможных решений данной проблемы является технология когнитивного радио, которая основана на концепции динамического доступа к спектру, что позволяет существенно повысить эффективность его использования. Согласно этой концепции, вторичным пользователям (незакрепленным за данным частотным диапазоном) предоставляется возможность использовать диапазоны первичных пользователей (закрепленных за данным диапазоном) на время, пока этот диапазон ими не используется.

Анализ литературы. Существуют различные методы мониторинга спектра: энергетическое обнаружение, детектирование на основе согласованных фильтров, цикло-стационарное детектирование и т.д. [1], [2]. До настоящего времени, наиболее широко используемые открытые платформы – это семейство универсальных открытых аппаратных платформ (USRP) [3] в комбинации с программным обеспечением GNU Radio, способным производить большую часть обработки радиоволн, принимаемых и передаваемых различными радиоустройствами [4]. В [5] представлена экспериментальная базовая система под названием Berkeley Emulation Engine 2 (BEE2), использующая БПФ вместе с энергетическим детектированием. В [6] описывается мониторинг спектра в универсальных открытых аппаратных платформах, использующий спектральную плотность мощности (PSD). Однако, реализовать алгоритм мониторинга спектра в реальном времени достаточно затруднительно. Кроме того, в перечисленных и

других известных работах не представлено детальных результатов оценки рабочих характеристик предлагаемых методов мониторинга спектра.

Цель статьи. Целью статьи является исследование метода мониторинга спектра на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) в реальном масштабе времени при низком отношении сигнал-шум. Решение данной задачи является первостепенным шагом, дающим возможность эффективно осуществлять мониторинга спектра.

Основной материал. Поскольку большая часть спектра уже распределена, наиболее важной задачей является совместное использование лицензированных полос спектра, не вмешиваясь при этом в передачу лицензированных пользователей. Система когнитивного радио позволяет использовать временно свободные участки спектра, которые получили название спектральные «дыры» или пробелы в спектре, как показано на рис. 1. Если эта полоса в дальнейшем используется лицензированным пользователем, вторичный пользователь, для того чтобы не создавать помех, перемещается в другой участок спектра или остается в той же полосе, изменяя уровень мощности передачи, или схему модуляции [7].

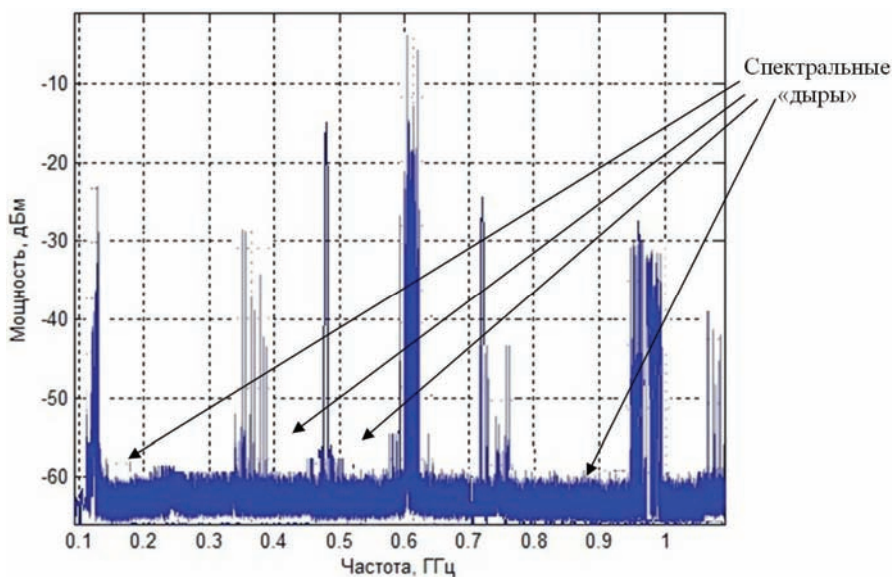


Рисунок 1 – Пример спектра в диапазоне 0.1...1 ГГц

Мониторинг радиочастотного спектра – одна из важнейших задач системы когнитивного радио. Эффективность мониторинга в значительной степени определяет то, насколько эффективно используется частотный спектр [1], [8]. Алгоритм мониторинга спектра для широкого диапазона отношения сигнал-шум должен обеспечивать высокую вероятность обнаружения лицензированных сигналов

и низкую вероятность ложного обнаружения. В тоже время необходимо учитывать вычислительную сложность и эффективность этих алгоритмов.

1 Метод мониторинга спектра на основе алгоритма БПФ

Рис. 2 иллюстрирует алгоритм мониторинга спектра на основе БПФ, который может быть разделен на следующие основные шаги:

1. На первом этапе сигнал делится на фреймы T . Обозначим t -ый фрейм как $x_t(n)$, $n = 0, \dots, N-1$, $t = 0, 1, \dots, T-1$, где N – количество выборок во фрейме.

2. Затем для получения желательной спектральной формы сегментированные фреймы умножаются на весовые коэффициенты [9]

$$x_{w,t}(n) = x_t(n)w(n),$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1; t = 0, 1, \dots, T-1.$$

3. После этого применяется алгоритм БПФ [9]

$$X_t(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_{w,t}(n)e^{-j2\pi kn/N},$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1; t = 0, 1, \dots, T-1.$$

4. На следующем этапе вычисляется спектральная плотность мощности фрейма [9]

$$P_t(k) = |X_t(k)|^2,$$

$$k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2}; t = 0, 1, \dots, T-1.$$

5. Вычисление спектральной плотности мощности T фреймов, P_ϕ :

$$P_\phi(k) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} P_t(k),$$

$$k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2}.$$

где коэффициентом $1/T$ можно пренебречь.

6. Вычисляем P_{cp} как среднее от P_ϕ [9]

$$P_{cp} = \frac{2}{N+2} \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}} P_\phi(k).$$

где коэффициентом $\frac{2}{N+2}$ можно пренебречь, не затрагивая рабочие характеристики.

7. Решающая величина $r(k)$, устойчивая к уровню фонового шума, определяется соотношением [9]

$$r(k) = \frac{P_{\phi}(k)}{P_{cp}},$$

$$k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2}.$$
(6)

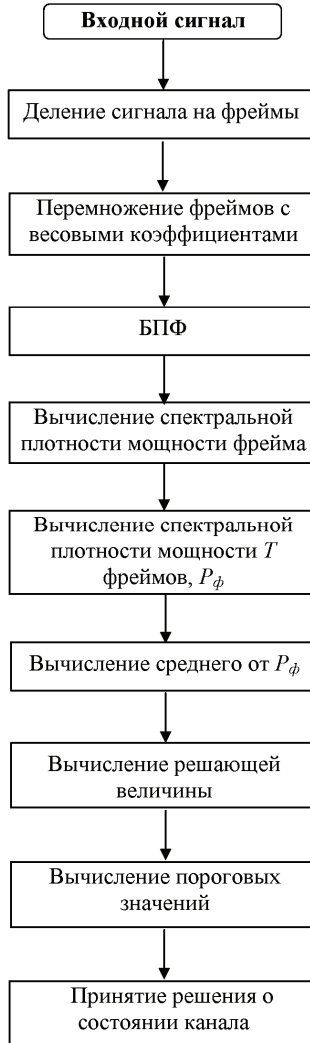


Рисунок 2 – Структурная схема обобщенного алгоритма, реализующего метод мониторинга спектра на основе БПФ

8. Вычисление пороговых значений [9]

$$\alpha = \frac{\max(r(k)) + \min(r(k))}{2}. \quad (7)$$

9. Принятие решения $r(k)$ для $k = 0, 1, \dots, N_2$ относительно занятости канала осуществляется согласно правилу:

$$\begin{cases} r(k) > \alpha \Rightarrow \text{канал занят;} \\ r(k) < \alpha \Rightarrow \text{канал свободен.} \end{cases} \quad (8)$$

где α – пороговый коэффициент. Альтернативно, решающее правило может быть сформулировано:

$$\begin{cases} P_\phi(k) - \alpha \cdot P_{cp} > 0 \Rightarrow \text{канал занят;} \\ P_\phi(k) - \alpha \cdot P_{cp} < 0 \Rightarrow \text{канал свободен.} \end{cases} \quad (9)$$

Результаты решений относительно состояния каналов могут быть объединены для принятия объединенного решения. Например, если K является набором интересующих частот, объединенное решение для частот $k \in K$ может быть сформулировано:

$$\text{Объединенное решение} = \begin{cases} \text{канал занят, если } k \in K \cap \{r(k) \geq \alpha\}; \\ \text{канал свободен, если } k \in K \cap \{r(k) < \alpha\}, \end{cases} \quad (10)$$

где \cap обозначает оператор «И».

2 Результаты моделирования

В таблице представлены требования для мониторинга спектра для разрабатываемого стандарта IEEE 802.22 для трех типов лицензированных сигналов. Как видно из таблицы, они должны быть детектированы при низком значении SNR. Это представляет первичную проблему мониторинга спектра.

Для проверки данного алгоритма было применено компьютерное моделирование для канала с аддитивным белым шумом (AWGN) со значениями отношения сигнал-шум, указанными в таблице, количеством первичных пользователей равным 20, вероятностью ложного обнаружения лицензированных сигналов $P_{FA} = 0,001$, размерностью БПФ $N = 256$, количеством фреймов $T = 200$. Горизонтальной чертой отмечено пороговое значение. Результаты моделирования представлены ниже на рис. 3-5.

Таким образом, Необходимое число отсчетов $N \cdot T$ определяет задержку выходного решения. Кроме того, разрешающая способность по частоте f_s/N также является ограничением в разработке системы. Для того, чтобы выбрать значения N , T , и α , необходимо знать разрешающую способность по частоте и значение SNR в рабочих условиях, а также требования для минимального значения P_D и максимального значения P_{FA} . Порог α определяется относительно вероятности P_{FA} .

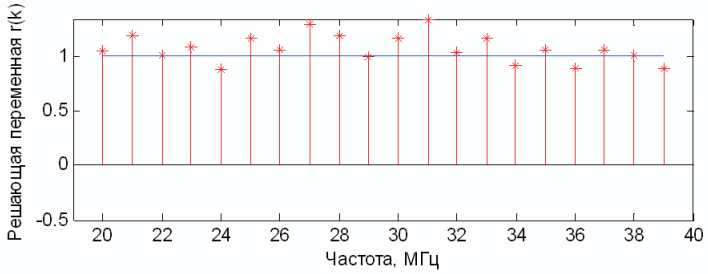
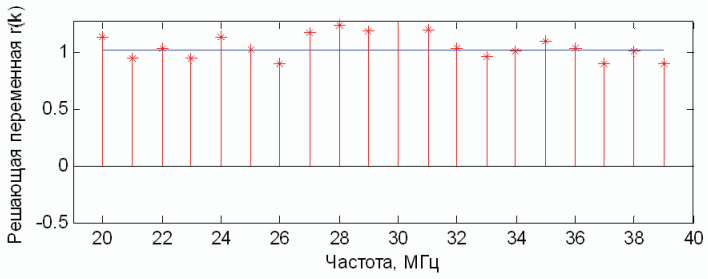


Рисунок 3 – Детектирование лицензированных сигналов
в канале с AWGN при SNR = -21 дБ

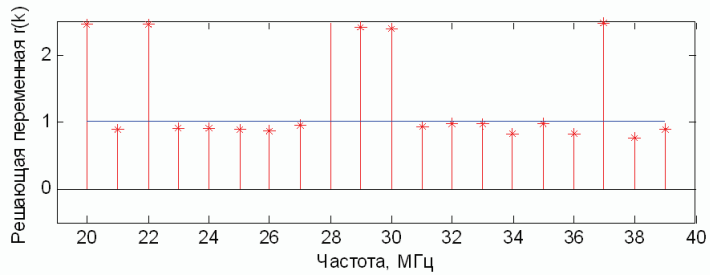
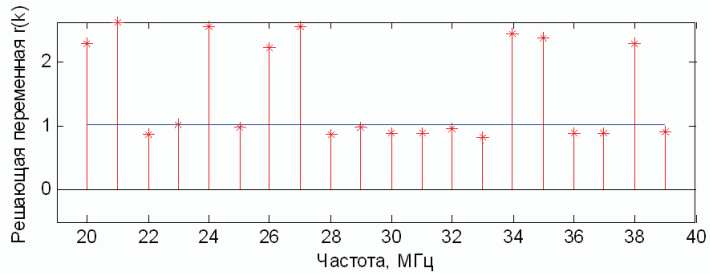


Рисунок 4 – Детектирование лицензированных сигналов
в канале с AWGN при SNR = -12 дБ

Требования к мониторингу спектра

	Аналоговое ТВ	Цифровое ТВ	Сотовые телефоны
Чувствительность, дБм	-94	-116	-107
SNR, дБ	1	-21	-12

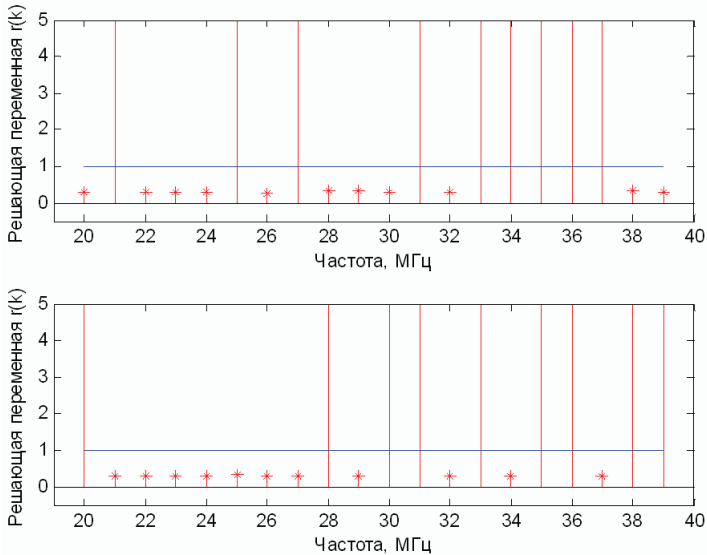


Рисунок 5 – Детектирование лицензированных сигналов
в канале с AWGN при SNR = 1 дБ

Выводы. В результате исследований были исследованы свойства метода мониторинга спектра на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) в реальном масштабе времени при низком отношении сигнал-шум.

Преимущество метода состоит в том, что величина, по значению которой принимается решение о состоянии канала (занятости канала), нечувствительна к уровню шума, а также, в том, что данный алгоритм ориентирован на работу в частотной области, что значительно упрощает его реализацию.

Список литературы: 1. S. Haykin, D. Thomson, J. Reed Spectrum sensing for cognitive radio // Proceedings of the IEEE. – May 2009. – Vol. 97, no. 5. – PP. 849-877. 2. T. Yucek, H. Arslan A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – March 2009. – Vol. 11, no. 1. – PP. 116-130. 3. Ettus Research LLC. [Online]. Available: <http://www.ettus.com/>. 4. GNU Radio. [Online]. Available: <http://www.gnuradio.org/>. 5. A. Tkachenko, D. Cabric, R. Brodersen Cognitive radio experiments using reconfigurable BEE2 // Proc. Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, October 2006. – PP. 2041-2045. 6. O. Mian, R. Zhou, X. Li, S. Hong, Z. Wu, A software-defined radio based cognitive radio demonstration over FM band // Proc. International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing, June 2009. – PP. 495-499. 7. Thomas Charles Clancy III Dynamic spectrum access in cognitive radio networks // Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy, 2006. 8. Carlos Cordeiro, Kiran Challapali, Monisha Ghosh Cognitive

PHY and MAC Layers for Dynamic Spectrum Access and Sharing of TV Bands. Philips Research North America. 9. Zhe Chen, Nan Guo, Robert C. Qiu Department of Electrical and Computer Engineering Center for Manufacturing Research Tennessee Technological University Cookville, TN 38505, USA.

Поступила в редколлегию 28.03.2011.