

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ БЕСПРОВОДНАЯ СЕНСОРНАЯ СЕТЬ С ФУНКЦИЕЙ ПОТОКОВОГО РАСПОЗНАВАНИЯ МНОГОЧАСТОТНЫХ СИМВОЛОВ

© 2024 Г.И. Леонович, Д.В. Серебряков

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 25.01.2024

Интеллектуальные беспроводные сенсорные сети – инновационный класс технологий, объединяющих беспроводную связь и сенсорные информационные системы с целью создания динамичных и гибких систем сбора и анализа данных. В статье предложен вариант способа потокового распознавания многочастотных символов, формируемых группой источников информации с возможностью существенного улучшения энергетических и информационных показателей канала передачи данных.

Ключевые слова: распознавание многочастотных символов, беспроводная сенсорная сеть, OFDM сигнал, полосовая обработка сигналов, цифровая обработка сигналов, увеличение скорости передачи сигналов.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-1-129-134

EDN: LUPGKT

ВВЕДЕНИЕ

Беспроводные сенсорные сети (БСС), объединяющие информационно-измерительные, телекоммуникационные и радиотехнические системы, – одна из актуальных и перспективных сфер научных исследований. Существуют различные технологии физического, канального и сетевого уровней, которые позволяют реализовывать сети различного масштаба, в том числе интеллектуальные сети с дистанционно и автономно управляемой конфигурацией и функционалом их компонентов. БСС могут строиться как одночастотные, многочастотные, узкополосные или широкополосные системы с применением различных типов и составов радиосигналов, обусловленным поставленными целями, решаемыми задачами, средами применения, окружающей инфраструктурой [1].

Физический уровень БСС состоит из беспроводных сенсорных модулей – маломощных многофункциональных устройств, представляющие собой плату размером ~2,5 см³, на которой размещены процессор, память, цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи, радиочастотный приемопередатчик, источник питания и непосредственно датчики. Большинство приложений ориентировано на точное позиционирование модулей, оптимизацию контрольно-измерительных процессов и топологических схем, помехоустойчивость, надежность, устойчивость

к эксплуатационным факторам. Первичная обработка контрольно-измерительных данных, включая информацию о состоянии сенсоров и процесса передачи данных, производится непосредственно в модуле, в кластерной станции и в других узлах сети. Немаловажное значение придается формированию и потоковому распознаванию сигнально-кодовых конструкций (СКК), в которых каждому датчику или группе датчиков присваивается своя несущая частота, что способствует увеличению пропускной способности сетевой структуры. Наличие в интеллектуальной БСС (ИБСС) функции потокового распознавания передаваемых многочастотных символов (МЧС) на фоне нестационарных помех также позволяет существенно снизить энергопотребление модуля за счет сокращения времени передачи МЧС [2].

Целью работы является повышение энергетических и информационных показателей канала передачи данных.

ПОТОКОВОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ МНОГОЧАСТОТНЫХ СИМВОЛОВ НА ОСНОВЕ РАЗДЕЛЬНОЙ ПОЛОСОВОЙ ОБРАБОТКИ

Если реализовать потоковое распознавание МЧС с частотой отсчетов, превышающей в 2-3 и более раза частоту Найквиста, то при оценке символа до его завершения требуется большой объем вычислительных затрат, сопровождающихся снижением точности обработки сигналов в реальном временном масштабе. Также всегда существует опасность получения выборки сигнала, когда задача оценки оказывается плохо обусловленной или вырожденной [3].

Леонович Георгий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных систем.

E-mail: leogi1@mail.ru

Серебряков Дмитрий Валерьевич, аспирант.

E-mail: menotar52@gmail.com

Алгоритм отдельной полосовой обработки принимаемого сигнала и увеличения скорости посимвольной передачи OFDM сигналов [4], который обеспечивает высокие информационно-энергетические показатели ИБСС, заключается в следующем (рисунок 1).

Шаг 1. Демодуляция

В приемных каналах после демодуляции формируется два сигнала: синфазный $s_I(t)$ и квадратурный $s_Q(t)$, сумма которых в общем виде с учетом шума $\xi(t)$ и нормирующего усиления может быть записана в тригонометрической форме как зашумленный входной сигнал

$$y(t) = s_I(t) + s_Q(t) + \xi(t) = \sum_{i=1}^N A_I \sin\left(\frac{2\pi i}{T_0} t\right) + \sum_{i=1}^N A_Q \cos\left(\frac{2\pi i}{T_0} t\right) + \xi(t), \quad (1)$$

где A_I и A_Q – амплитуды квадратурных составляющих. После разделения входного сигнала на синфазную и квадратурную составляющие каждая из них обрабатывается в идентичных каналах. Обработка заключается в выполнении следующих операций.

Шаг 2. Аналого-цифровое преобразование (АЦП)

В результате АЦП формируются отсчеты с частотой квантования во времени, обеспечивающей необходимую точность оценки коротких

сигналов. Частота квантования может превышать в 2 и более раз частоту Найквиста.

Шаг 3а. Выделение поднесущих из принимаемого сигнала в режиме реального времени

В отличие от традиционных методов анализа временных фрагментов сигналов в работе [3] рассматриваются варианты улучшения спектрального разрешения в усеченном спектре анализируемого сигнала при конечном числе отсчетов путем использования априорной информации о параметрах обрабатываемых сигналов. Так как при обработке принимаемого символа априорно известны его спектральный состав и начальные фазы субполосных поднесущих, то искомыми являются только амплитуды поднесущих.

Ограничение на норму вектора ошибок δs зависит от мерности сигнального созвездия M , величины анализируемой части спектра сигнала и отношения сигнал/шум (ОСШ). Для достижения наилучшей точности оценки за интервал наблюдения $[0, t]$ может использоваться метод максимального правдоподобия (ММП) или метод минимального СКО.

Для уменьшения погрешности оценки амплитуд, создаваемой низкочастотными поднесущими, их можно режектировать из принимаемого символа как внеполосные помехи. Например, в работе [5] описан способ, который сводится к вычитанию из вектора спектральных



Рисунок 1 – Принцип потокового распознавания многочастотных символов с квитированием

отсчетов наблюдаемого процесса его проекции в подпространство помехи. Данный алгоритм предложено применять совместно с известной процедурой временного взвешивания для дополнительного подавления помехи. Для случая гармонической помехи дополнительное подавление составляет величину до 60 дБ при использовании для временного взвешивания прямоугольного окна и до 40 дБ – для окна Натолла.

Количество N поднесущих, определяющих ВЧ полосу отображения символа может определяться либо как фиксированная величина, ориентированная на априорно известные данные, либо дополнительно изменяться в зависимости от соотношения скоростей спектрального анализа и синтеза базиса эталонных сигналов НЧ полосы в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 2.

Шаг 3б. Формирование отображения ВЧ полосы принимаемого символа

По измеренным амплитудам синфазной A_I^* и квадратурной A_Q^* высокочастотных спектральных составляющих формируется суммарный сигнал, который после экстраполяции на период ортогональности $[0, T_0]$ является отображением высокочастотной полосы принимаемого символа :

$$s_H^*(t) = s_{HI}^*(t) + s_{HQ}^*(t) = \sum_{i=L+1}^N A_I^* \sin\left(\frac{2\pi i}{T_0} t\right) + \sum_{i=1}^N A_Q^* \cos\left(\frac{2\pi i}{T_0} t\right). \quad (2)$$

Шаг 3в. Формирование текущего отображения НЧ полосы принимаемого символа на интервале $[0, t]$

Текущее отображение НЧ полосы принимаемого символа определяется как разность между принимаемым сигналом и отображением ВЧ полосы принимаемого символа на интервале $[0, t]$

$$s_L^*(t) = [y_{HI}(t) - s_{HI}^*(t)] + [y_{HQ}(t) - s_{HQ}^*(t)], \quad t \in [0, t]. \quad (3)$$

Шаг 4а. Синтез амплитуд элементов сигнальных созвездий низкочастотных поднесущих (смотреть рисунок 1, 2)

Синтез амплитуд реализуется исходя из априорных данных о максимальной размерности M сигнального созвездия и результатов текущего спектрального анализа принимаемого сигнала с учетом его усиления и нормирования.

Шаг 4б. Формирование базиса эталонных низкочастотных сигналов (БЭНС)

Количество эталонных сигналов определяется максимальной размерностью M сигнального созвездия и количеством L синтезируемых

низкочастотных поднесущих. Количество всех возможных сочетаний определяет размерность базиса эталонных низкочастотных эталонных сигналов (БЭНС)

$$B = M^L. \quad (4)$$

При больших значениях M и L базис будет требовать большой емкости ЗУ, что существенно ограничивает или делает невозможным синтез полного набора эталонных сигналов ВЧ и НЧ полос. Например, при $M=16$ и $L=4$ размерность базиса составляет величину $B=65536$, а при $M=64$ и $L=100$ размерность БЭНС вырастает до $B=1,1228 \cdot 10^{381}$.

Таким образом, исключение спектрального анализа сигнала возможно только при приеме относительно узкополосных МЧС.

Шаг 5. Распознавание символа по результатам сравнения БЭНС с ОНЧ на интервале $[0, t]$

Распознавание осуществляется в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 2.

Мерой близости отсчетов синтезируемых сигналов и полученного отображения при применении критерия минимума среднеквадратической ошибки используется зависимость в виде

$$\delta s_{bn}^2 = (s_{Ln}^* - s_{Lbn}^*)^2 = \left[s_{Ln}^* - \left(\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{L-1} s_{bk} e^{j \frac{2\pi kn}{N}} \right) \right]^2, \quad n = 0, \dots, R, \quad b = 1, \dots, B, \quad (5)$$

где R – текущее количество отсчетов на интервале $[0, t]$.

По результатам анализа δs_{bn}^2 определяется эталонный НЧ сигнал, который для идентификации распознанного символа суммируется с отображением его ВЧ полосы

$$s_{\Sigma b}^*(t) = s_{Lb}^*(t) + s_H^*(t), \quad t \in [0, T_0], \quad (6)$$

а спектральный состав и эпюра распознанного символа используется для дальнейшей обработки принимаемого сигнала.

Таким образом, для распознавания символа за интервал времени $t \in [0, t_p < T_0]$ определяющим параметром является величина допустимой ошибки оценки сигнала на данной конкретной реализации при заданных параметрах сигнально-кодовых конструкций и допусках на норму вектора ошибок измерений при максимальном индексе модуляции [5].

С целью повышения достоверности распознавания, процедура определения эталонного НЧ сигнала повторяется до тех пор, пока два и более раз подряд не будет выбран один и тот же сигнал. Тогда время распознавания определяется

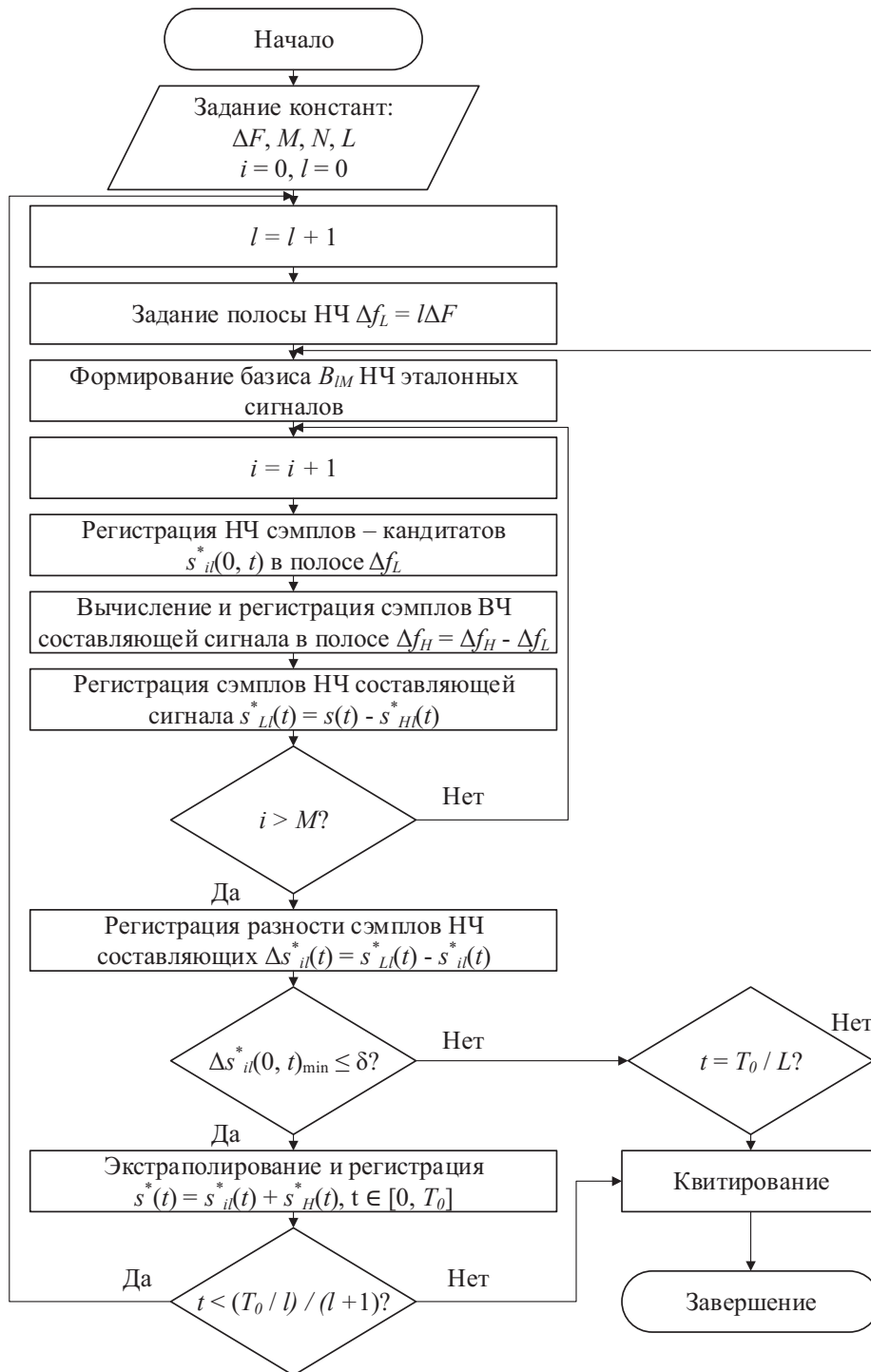


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма потокового распознавания

как $t_{pi} = t_p + i\Delta t$, где Δt - интервал дискретизации, $i = 1, 2, \dots$

Шаг 6. Передача по обратному каналу квитанции о распознавании символа (рисунок 3)

Квитанция о распознавании предназначена для априорно обусловленного сглаженного завершения передачи текущего символа и перехода к передаче очередного символа, сигнально-кодовая конструкция которого определяется исходя из оценки сигнально-помеховой обстановки в зоне расположения сенсорного модуля ИБСС.

ВЫВОДЫ

Улучшение информационно-энергетических показателей ИБСС заключается в увеличении пропускной способности радиоканала за счет распознавания передаваемых символов до завершения их передачи. Для этого на приемной стороне осуществляется раздельная субполосная обработка низкочастотной (НЧП) и высокочастотной (ВЧП) полос принимаемого МЧС $s(t)$ в режиме реального времени. Текущее значение фрагмента НЧП принимаемого сигнала

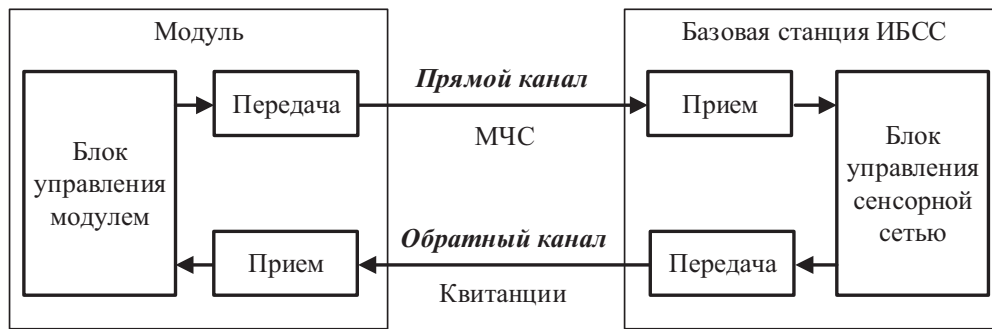


Рисунок 3 – Структурная схема передачи данных между базовой станцией и измерительным модулем

ла определяется как разница между фрагментом принимаемого сигнала и отображением ВЧП сигнала, сформированным посредством спектрального анализа этого фрагмента. Отображение НЧП символа на интервале текущего времени сравнивается с базисом синтезированных низкочастотных эталонных сигналов и по результатам сравнения в момент окончания распознавания МЧС выбирается эталонный сигнал с формой сравниваемого фрагмента наиболее близкой к форме фрагмента отображения низкочастотного сигнала, а сумма отображения высокочастотной составляющей и выбранного низкочастотного эталонного сигнала принимается в качестве распознанного символа. После распознавания символа по обратному каналу на модуль ИБСС передается квитанция о распознавании, по которой принимается решение о завершении передачи по прямому каналу текущего символа, формировании очередного символа и начале его передачи по прямому каналу с учетом текущей сигнально-помеховой обстановки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Леонович, Г.И.* Перспективные направления развития беспроводных сенсорных сетей / Г. И. Леонович, А. И. Данилин, В. В. Сергеев [и др.] // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций : Материалы Всероссийской научно-технической конференции, Самара, 14–16 мая 2019 года [под ред. А.И. Данилина]. – Самара: ООО «АРТЕЛЬ», 2019. – С. 8-11. – EDN WFXUBR.
2. *Гришин, И.В.* Обзор методов многочастотной модуляции сигналов в современных сетях беспроводной связи / И. В. Гришин, А. А. Калинкина // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2020. – Т. 8, № 2. – С. 55-66. – DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-2-55-66. – EDN MTLIEQ.
3. *Дмитриев, Е.В.* Аппроксимация коротких процессов, сигналов, функций и расчет их гармонических дискретных спектров / Е. В. Дмитриев // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2007. – Т. 10, № 1. – С. 33-46. – EDN LDFQFJ.
4. Патент № 2719396 С2 Российская Федерация, МПК H04L 27/148. Способ приема OFDM сигналов : № 2017146505 : заявл. 27.12.2017 : опубл. 17.04.2020 / Г. И. Леонович, С. В. Олешкевич ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Современные технологии». – EDN SOCHRW.
5. *Вострецов, А.Г.* Режекция внеполосной помехи / А. Г. Вострецов, В. А. Богданович, М. В. Гундарева // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2013. – № 1(20). – С. 72-79. – EDN PYBEZP.

INTELLIGENT WIRELESS SENSOR NETWORK WITH STREAMING MULTI-FREQUENCY SYMBOL RECOGNITION FUNCTION

© 2024 G.I. Leonovich, D.V. Serebryakov

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov, Samara, Russia

Intelligent wireless sensor networks are an innovative class of technologies that combine wireless communications and sensor information systems to create dynamic and flexible data collection and analysis systems. The article proposes a variant of the method for stream recognition of multi-frequency symbols generated by a group of information sources with the possibility of significantly improving the energy and information indicators of the data transmission channel.

Keywords: Multi-frequency symbol recognition, wireless sensor network, OFDM signal, bandpass signal processing, digital signal processing, increasing signal transmission speed.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-1-129-134

EDN: LUPGKT

REFERENCES

1. *Leonovich, G.I.* Promising directions for the development of wireless sensor networks / G. I. Leonovich, A. I. Danilin, V. V. Sergeev [et al.] // Current problems of radio electronics and telecommunications: Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference, Samara, 14–May 16, 2019 / Ed. A.I. Danilina. – Samara: ARTEL LLC, 2019. – pp. 8-11. – EDN WFXUBR.
2. *Grishin, I.V.* Review of methods of multi-frequency modulation of signals in modern wireless communication networks / I.V. Grishin, A.A. Kalinkina // Information technologies and telecommunications. – 2020. – T. 8, No. 2. – P. 55-66. – DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-2-55-66. – EDN MTLIEQ.
3. *Dmitriev, E. V.* Approximation of short processes, signals, functions and calculation of their harmonic discrete spectra / E. V. Dmitriev // Physics of wave processes and radio engineering systems. – 2007. – T. 10, No. 1. – P. 33-46. – EDN LDFQFJ.
4. Patent No. 2719396 C2 Russian Federation, IPC H04L 27/148. Method for receiving OFDM signals: No. 2017146505: application. 12/27/2017: publ. 04/17/2020 / G. I. Leonovich, S. V. Oleshkevich; applicant Limited Liability Company «Modern Technologies». – EDN SOCHRW.
5. *Vostretsov, A.G.* Rejection of out-of-band interference / A.G. Vostretsov, V.A. Bogdanovich, M.V. Gundareva // Reports of the Academy of Sciences of Higher School of the Russian Federation. – 2013. – No. 1(20). – pp. 72-79. – EDN PYBEZP.

Georgy Leonovich, Doctor of Technical, Professor of the Department of Radioelectronic Systems.

E-mail: leogi1@mail.ru

Dmitry Serebryakov, Postgraduate Student.

E-mail: menotar52@gmail.com