УДК 004.728.1

МЕТОД СИНХРОНИЗАЦИИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ НА ШУМОПОДОБНЫХ СИГНАЛАХ

Е. И. Гурин, д.т.н., профессор кафедры ВТ ПГУ, Пенза, Россия;
orcid.org/0000-0001-6288-3310, e-mail: gurin2@yandex.ru
С. В. Тумасов, аспирант ПГУ, Пенза, Россия;
orcid.org/0009-0002-9234-6940, e-mail: yord22j@rambler.ru

В известных работах недостаточно подробно рассмотрен вопрос синхронизации узлов вычислительных сетей на шумоподобных сигналах сферы «Интернет вещей» в сложных условиях местности и при наличии помех в канале. В связи с этим разработка метода синхронизации и обработки информации и его реализация для беспроводных вычислительных сетей на шумоподобных сигналах является актуальной исследовательской задачей. ***Целью работы*** *явля.тся разработка метода синхронизации и обработки информации, его реализация для беспроводных вычислительных сетей с малым потреблением энергии, использующих шумоподобные сигналы в сложных природных условиях лесистой местности. Разработан метод синхронизации и обработки информации для беспроводных вычислительных сетей на шумоподобных сигналах для условий лесистой местности и в условиях воздействия помех. Представленный метод реализован для вычислительной сети с малым потреблением энергии сферы «Интернет вещей» на микроконтроллерах MSP430 и модулях трансиверов. Представленный метод синхронизации и обработки информации позволяет обеспечить синхронизацию передатчика и приёмника беспроводной сети, наиболее полно учитывает сложные природные условия лесистой местности и воздействие помех.*

Ключевые слова: *шумоподобные сигналы, вычислительные сети, синхронизация, микроконтроллеры, протоколы, псевдослучайные последовательности, передача информации, беспроводные сети, MSP430.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-46-57

Введение

Для постоянного мониторинга окружающей среды в лесистой местности важно обеспечить максимальную дальность связи и минимальное потребление энергии узлами сети. Одним из путей решения данной проблемы является использование беспроводных сетей на шумоподобном сигнале (ШПС). Беспроводные сети широко используют ШПС во многих сферах, например в медицине [1], чрезвычайных ситуациях [2], метеорологии [3], активном отдыхе [4, 5], сельском хозяйстве [6], транспортной области [7]. Большую роль играют условия применения беспроводных сетей. Сложные условия леса могут налагать существенные ограничения на работоспособность сети. В лесистой местности передаваемый сигнал подвергается эффекту изменения поляризации, многолучёвому распространению, поглощению растительностью, поэтому больше искажается и ослабляется по сравнению с открытым пространством [8]. Из-за этого бюджет радиолинии и дальность связи в лесу могут заметно уменьшаться. Использование ШПС может повысить дальность связи без внесения существенных изменений в аппаратное обеспечение оборудования [5, 9].

Важную роль в вычислительных сетях на шумоподобных сигналах играет метод синхронизации и обработки информации. Улучшение качества синхронизации узлов сети позволяет повысить работоспособность сети, уменьшить энергопотребление. В известных работах недостаточно полно рассмотрен механизм синхронизации для вычислительных сетей на шумоподобных сигналах сферы «Интернет вещей» (IoT) в сложных условиях местности и при наличии помех в канале. При этом многие готовые аппаратно-программные комплексы не предоставляют необходимый набор инструментов для реализации методов синхронизации и

обработки информации и их проверки, имеют высокое энергопотребление. Поэтому разработка метода синхронизации и обработки информации и его реализация для беспроводных вычислительных сетей на шумоподобных сигналах являются актуальной задачей. Цель статьи – разработка метода синхронизации и обработки информации и его реализация для беспроводных вычислительных сетей с малым потреблением энергии, использующих шумоподобные сигналы в сложных природных условиях лесистой местности и воздействия помех.

Теоретическая часть

Разработанный метод синхронизации и обработки информации использует технологию расширения спектра методом прямой последовательности (DSSS), так как она обеспечивает большую дальность связи, чем другие [10]. В данной технологии передаваемый символ сообщения заменяется псевдослучайной последовательностью (ПСП). Метод использует амплитудную манипуляцию (ASK), которая применяется в модуляторах и демодуляторах с простой структурой. Разработанный метод позволяет обеспечить требуемую величину порога сопротивляемости системы связи широкополосным помехам, использует когерентный приём, поскольку данный вид приёма позволяет снизить требуемый уровень отношения «сигнал-шум» для выбранного уровня битовых ошибок.

Предлагаемый метод содержит следующие пункты:

1. Определение требуемых величин коэффициента битовых ошибок, дальности связи, информационной скорости, порога сопротивляемости помехам, местности и условий развёртывания сети.

Величина коэффициента битовых ошибок соответствует частоте появления битовых ошибок на приёме и, как правило, задаётся требованиями к сфере применения сети. Дальность связи определяет дистанцию между передатчиком и приёмником, при которой связь между ними будет удовлетворять всем значениям других требуемых величин. Информационная скорость определяет пропускную способность канала связи. Порог сопротивляемости помехам задаёт максимальное значение отношения «помеха-сигнал» в канале, при котором система не теряет своей работоспособности. Местность и условия развёртывания сети определяют особенности канала передачи информации.

2. Определение значения отношения «сигнал-шум» для выбранного значения коэффициента битовых ошибок и значения невосприимчивости системы к широкополосным помехам.

Значение используемой ширины полосы сигнала должно быть минимально возможное, обеспечивающее требуемую скорость передачи битов.

Если рассматривать влияние только аддитивного белого гауссова шума, то коэффициент битовых ошибок для используемого типа приёмника и модуляции рассчитывается по следующей формуле [11]:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) = Q\left(\sqrt{2\frac{S}{N}}\right), \quad (1)$$

где E_b / N_0 – отношение энергии бита к спектральной мощности шума, S / N (или SNR) – отношение «сигнал-шум».

С помощью формулы (1) подбирается наименьшее необходимое значение SNR для удовлетворения требуемого значения битовых ошибок.

Важной положительной чертой шумоподобного сигнала является повышение помехоустойчивости связи при влиянии преднамеренных помех. В данном методе в отличие от моделей Фрииса [12], P.833-10 [13] рассмотрено влияние широкополосной помехи и учитывается заданное значение порога сопротивляемости помехам. Для случая широкополосной помехи коэффициент битовых ошибок определяется по следующей формуле [11]:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{E_b / N_0}{1 + (E_b / N_0)(J / S)_{\text{треб}} / G_p}}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{2S / N}{1 + (2S / N)(J / S)_{\text{треб}} / G_p}}\right), \quad (2)$$

где $(J/S)_{\text{треб}}$ – порог сопротивляемости помехам, G_p – коэффициент расширения спектра сигнала.

Для заданного коэффициента битовых ошибок, выбранного значения SNR по формуле (1), значения $(J/S)_{\text{треб}}$ выбирается требуемая величина коэффициента расширения спектра сигнала с помощью формулы (2). Коэффициент расширения спектра в дальнейшем будет определять длину псевдослучайной последовательности.

3. Определение типа и длины ПСП.

Отношение сигнал/шум и уровень боковых пиков функции автокорреляции ПСП являются одними из основных параметров, влияющих на дальность связи. Величина SNR для выбранной ПСП рассчитывается по формуле [9, 14]:

$$SNR = 20\log_{10}\left(\frac{\max(R_x(\tau))}{s}\right),$$

где $\max(R_x(\tau))$ – максимальное значение функции автокорреляции ПСП, s – среднеквадратическое значений функции автокорреляции ПСП.

Чем больше SNR и ниже максимальный уровень боковых пиков, тем выше дальность связи. Отношение сигнал/шум увеличивается с ростом длины ПСП. Это объясняется формулой коэффициента расширения спектра сигнала [14]:

$$G_p = 10\log_{10}(N),$$

где N – база ШПС (кодовые символы).

Выбираемый тип псевдослучайной последовательности должен иметь высокий уровень отношения «сигнал/шум» и низкий максимальный уровень боковых лепестков. С учетом требуемых значений коэффициента битовых ошибок, дальности связи и выбранного типа псевдослучайной последовательности выбирается длина псевдослучайной последовательности. Длина ПСП должна иметь наименьший допустимый размер.

4. Выбор диапазона частот передачи информации, расчёт ослабления сигнала, планирование значения выходной мощности передатчика, выбор типа используемой антенны, определение требуемой чувствительности приёмника.

Работа на определённом диапазоне частот определяется рядом параметров, контролируемых Государственной комиссией по радиочастотам (ГКРЧ). Используемый диапазон будет влиять на ослабление сигнала. Разрешения на использование нелицензируемых диапазонов частот не требуются, что облегчает их применение. Распространёнными нелицензируемыми диапазонами частот являются: LPD433, PMR446, 868(UHF), 2400(S). Нелицензируемые диапазоны определяют ограничения на значение выходной мощности передатчика, используемую ширину полосы частот. Выбранный частотный диапазон должен допускать требуемую ширину полосы сигнала, обеспечивать наименьшее ослабление сигнала.

Исходя из выбранного частотного диапазона, берётся максимальное разрешённое значение выходной мощности передатчика, ориентируясь на требования, например, ГКРЧ. При реализации данное значение может корректироваться.

Предельное значение чувствительности приёмника рассчитывается по следующей формуле [15]:

$$S_{\max} = -174 + 10\log_{10}(BW) + NF + SNR, \quad (3)$$

где BW – ширина полосы сигнала (Гц), NF – коэффициент шума приёмника (дБ), SNR – отношение «сигнал-шум» на входе демодулятора приемника для обеспечения требуемой вероятности безошибочного приема (дБ).

Величина запаса по мощности на замирания устанавливается равной 31 дБ. Исходя из этого, формулу бюджета канала [12] преобразуем к следующему виду:

$$M = P_{tx} - S + G_{ant} - L = 31\,\text{дБ}, \quad (4)$$

где P_{tx} – выходная мощность (дБм), S – чувствительность приемника (дБм), G_{ant} – совокупный коэффициент усиления приемной и передающей антенны (дБи), L – затухание сигнала на радиотрассе (дБ).

Суммарный коэффициент усиления антенны G_{ant} взят равным 6 дБ, что соответствует двум четвертьволновым вибраторам (штыревым антеннам). За коэффициент шума приемника берётся значение коэффициента шума входного LNA усилителя за вычетом ослабления полосового фильтра, получим NF = 5 дБ.

Из формулы (4) при замене S на $S_{\max}$ выражается величина максимально допустимого ослабления сигнала лесистой местностью:

$$L = 31\text{дБ} - P_{tx} - G_{ant} + S_{\max}. \quad (5)$$

На основе построенного графика для суммарного ослабления сигнала [5] и величины L определяется максимальная дальность связи $d_{\max}$.

5. Расчёт величины необходимого джиттера тактового сигнала узлов связи, анализ имеющихся генераторов, определение порогового значения корреляции, максимального времени установления синхронизации, достижимой скорости передачи информации.

Большое значение в передатчиках и приемниках имеет система тактирования. Необходимо рассчитать верхний порог величины джиттера для обеспечения работы с псевдослучайными последовательностями требуемой длины. Верхний порог величины джиттера рассчитывается по следующей формуле [16]:

$$J_{req} = \frac{T_{c.s.}}{N}, \quad (6)$$

где $T_{c.s.}$ – период кодового символа ПСП (с).

Использующиеся генераторы тактовой частоты должны иметь значение джиттера, которое равно или ниже рассчитанного верхнего порога.

Пороговое значение корреляции определяется на основе максимального уровня боковых пиков, с учетом типа используемой псевдослучайной последовательности. Например, для m-последовательностей пороговое значение корреляции представлено следующей формулой [14]:

$$R_{xy_trh} = \frac{N}{\sqrt{N}}. \quad (7)$$

Максимальное время установления синхронизации рассчитывается по следующей формуле [10]:

$$t_{synch} = \frac{1}{3} \times N \times N \times T_{c.s.} \quad (8)$$

Достижимая скорость передачи информации при полученных характеристиках определяется по следующей формуле [14]:

$$R_{bit} = \frac{R_{c.s.}}{N}, \quad (9)$$

где $R_{c.s.}$ – скорость следования кодовых символов ПСП (код.симв./с).

6. Описание алгоритма работы передатчика узла сети в периоды синхронизации.

Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 1.

Этот алгоритм содержит следующие действия:

– «Начало». Устанавливается длина псевдослучайной последовательности, отводов и начального состояния сдвигового регистра.

– «Инициализация». Устанавливаются начальные значения регистров, таймеров.

– «Получение опорного кодового символа». Считывается следующий кодовый символ генерируемой ПСП для его последующей передачи.

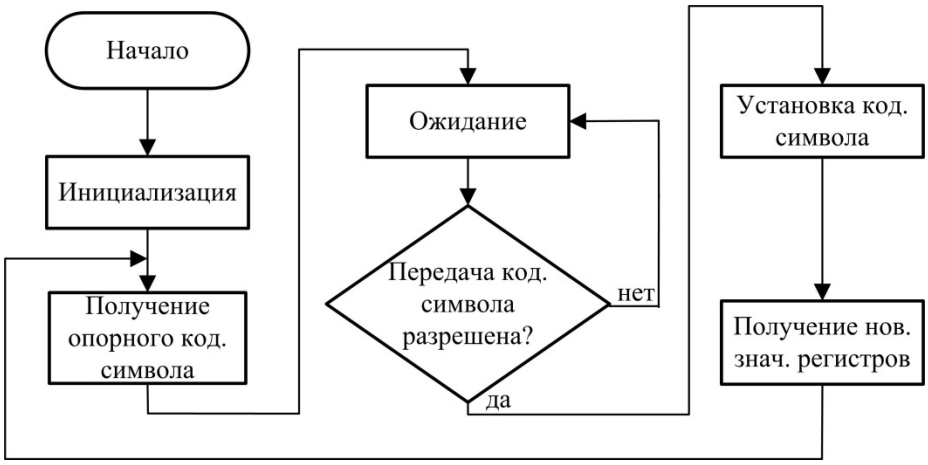

Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма работы передатчика узла сети в периоды синхронизации
Figure 1 – Block diagram of transmitter algorithm of communication node during synchronization periods

– «Ожидание». Приостанавливается обработка до тех пор, пока таймер для кодовых символов не подаст активный сигнал разрешения передачи кодового символа. Если сигнал таймера в активном состоянии, то происходит переход к действию «Установка кодового символа», иначе к действию «Ожидание».

– «Установка кодового символа». Устанавливается значение кодового символа на входе модуля передачи по беспроводному каналу. Модуль взаимодействия с беспроводным каналом передаёт установленное значение кодового символа до активного сигнала с выхода таймера.

– «Получение новых значений регистров». Рассчитывается значение нового кодового символа ПСП с помощью сложения по модулю 2 отводов сдвигового регистра. Заносится новый кодовый символ в регистр с помощью сдвига.

7. Описание алгоритмов работы системы синхронизации приёмника в периоды синхронизации.

В состав алгоритмов системы синхронизации приёмника входят: алгоритм верхнего уровня, алгоритм захвата и алгоритм слежения. Алгоритм верхнего уровня содержит следующие действия:

– «Начало». Инициализируются значения сдвиговых регистров трёх корреляторов захвата, трёх корреляторов слежения.

– «Захват». Производится поиск фазы ПСП. Выполняются действия алгоритма захвата. Происходит анализ значений корреляции трёх корреляторов захвата и трёх корреляторов слежения. Если один из корреляторов имеет значение, большее или равное пороговому значению корреляции (R_{xy_trh}), фаза ПСП захвачена, происходит переход к действию «Сопровождение».

– «Слежение». Производится слежение за фазой ПСП. Выполняются действия алгоритма слежения. Происходит анализ значений корреляции трёх корреляторов слежения. Если значения корреляции на этих корреляторах ниже порогового значения корреляции (R_{xy_trh}), считается, что фаза ПСП ушла больше, чем на кодовый символ, происходит переход к действию «Захват».

Алгоритм захвата представлен на рисунке 2.

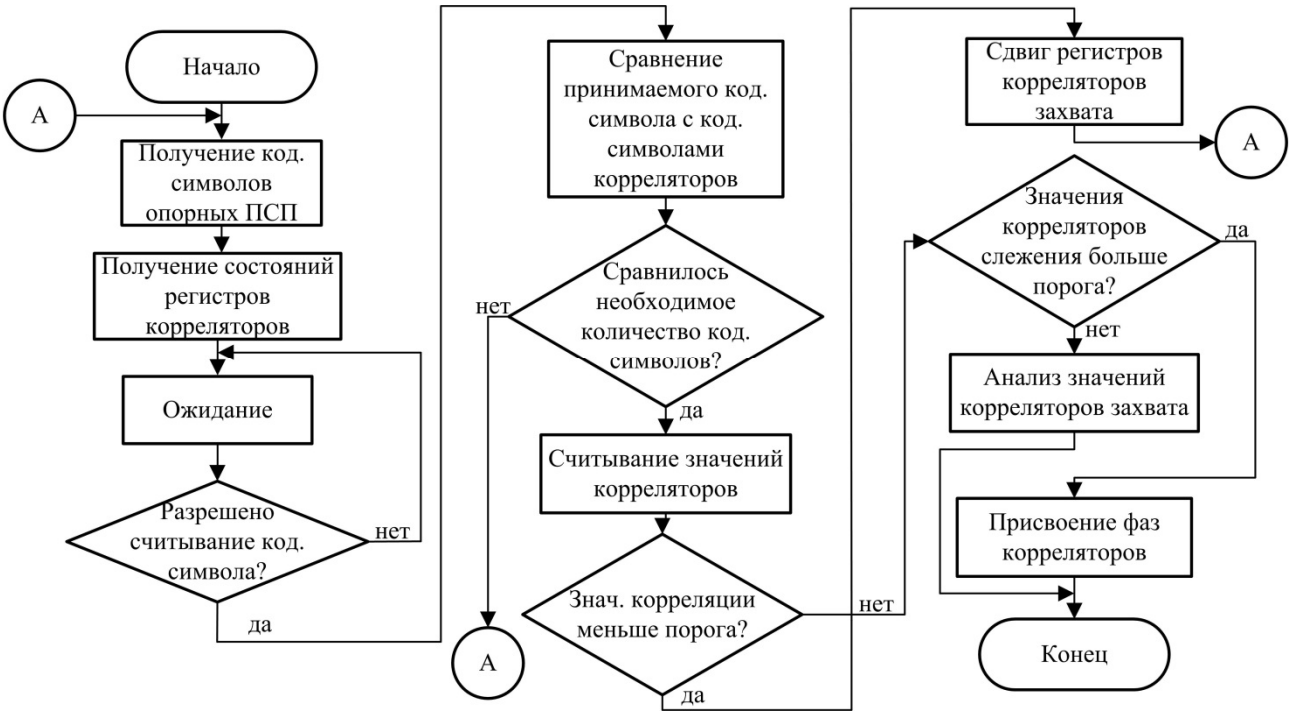

Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма захвата
Figure 2 – Block diagram of acquisition algorithm

Этот алгоритм содержит следующие действия:

– «Начало». Запускается процесс захвата.

– «Получение кодовых символов опорных ПСП». Производится расчёт следующих кодовых символов опорных ПСП для корреляторов.

– Получение состояний регистров корреляторов». Определяются новые состояния регистров сдвига корреляторов.

– «Ожидание». Приостанавливается обработка до тех пор, пока не будет разрешено считывание принимаемого кодового символа. Если считывание разрешено, то происходит переход к действию «Сравнение принимаемого кодового символа с кодовыми символами корреляторов», иначе к действию «Ожидание».

– «Сравнение принимаемого кодового символа с кодовыми символами корреляторов». Значение получаемого кодового символа сопоставляется со значениями кодовых символов опорных ПСП корреляторов захвата и слежения. Если кодовые символы совпали, происходит увеличение значения корреляции для такого коррелятора, если нет - уменьшение. Увеличивается значение счётчика кодовых символов ПСП. Если счётчик кодовых символов ПСП меньше двойного выбранного размера псевдослучайной последовательности, то происходит переход к действию «Получение кодовых символов опорных ПСП». Если счётчик кодовых символов ПСП больше двойного выбранного размера m-последовательности или равен, то происходит переход к действию «Считывание значений корреляторов».

– «Считывание значений корреляторов». Получение накопленных значений корреляции корреляторов и их сравнение с пороговым значением корреляции (R_{xy_trh}). Если значения корреляции на всех корреляторах меньше R_{xy_trh}, то происходит переход к действию «Сдвиг регистров корреляторов захвата». Если значение корреляции на каком-либо корреляторе слежения больше или равно R_{xy_trh}, то происходит переход к действию «Присвоение фаз корреляторов». Если значение корреляции на каком-либо корреляторе захвата больше либо равно R_{xy_trh}, то происходит переход к действию «Анализ значений корреляторов захвата».

– «Сдвиг регистров корреляторов захвата». На один кодовый символ вправо сдвигаются состояния регистров корреляторов захвата.

– «Анализ значений корреляторов захвата». Рассматриваются значения корреляций на корреляторах захвата. В зависимости от значений корреляции производится или не производится сдвиг фазы корреляторов захвата. Значения фаз корреляторов захвата присваиваются значениям фаз корреляторов слежения.

– «Присвоение фаз корреляторов». Фазам ПСП корреляторов захвата присваиваются соответствующие фазы корреляторов слежения.

– «Конец». Закончено выполнение действий алгоритма захвата. Произведён захват фазы ПСП.

Алгоритм слежения представлен на рисунке 3.

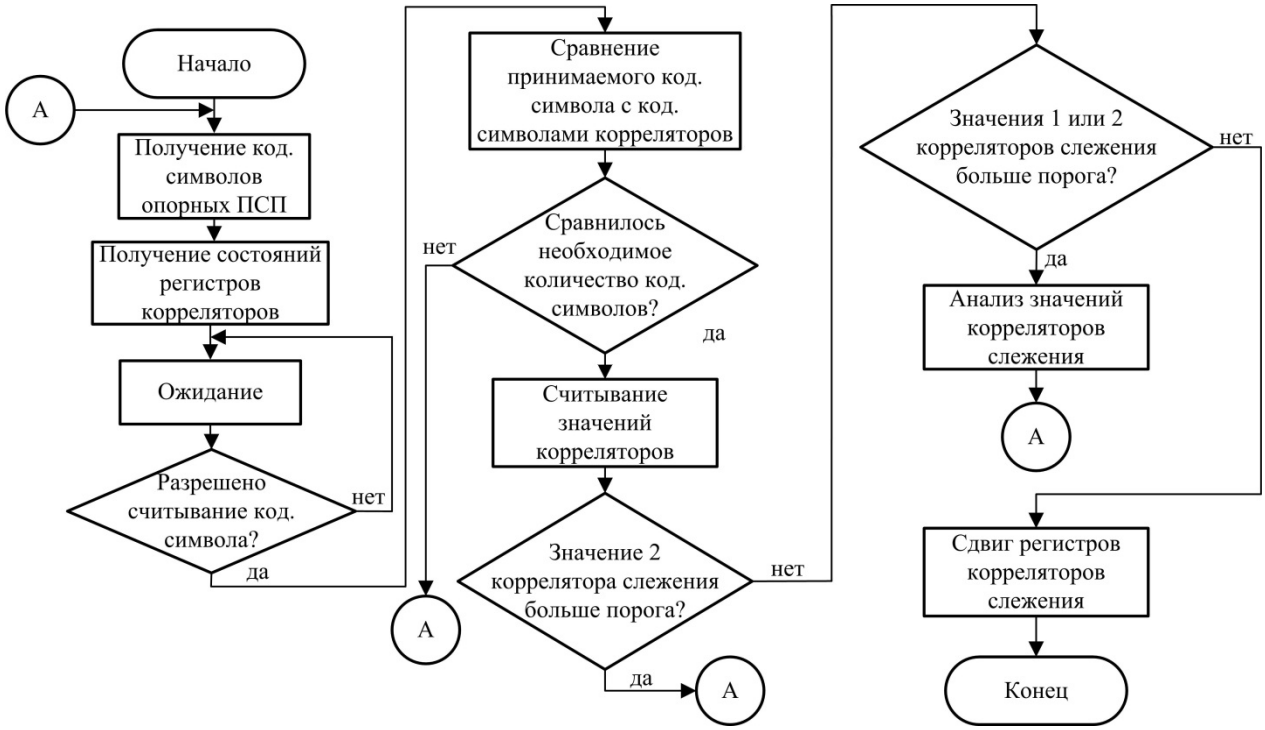

Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма слежения
Figure 3 – Block diagram of tracking algorithm

Этот алгоритм содержит следующие действия:

– «Начало». Запускается процесс слежения.

– «Получение кодовых символов опорных ПСП». Производится расчёт следующих кодовых символов опорных ПСП для корреляторов слежения.

– «Получение состояний регистров корреляторов». Определение новых состояний регистров сдвига для корреляторов слежения.

– «Ожидание». Приостанавливается обработка до тех пор, пока не будет разрешено считывание принимаемого кодового символа. Если сигнал прерывания в активном состоянии, происходит переход к действию «Сравнение принимаемого кодового символа с кодовыми символами корреляторов», иначе к действию «Ожидание».

– «Сравнение принимаемого кодового символа с кодовыми символами корреляторов». Сопоставление значения получаемого кодового символа с кодовыми символами опорных ПСП корреляторов слежения. Если кодовые символы совпали, происходит увеличение значения корреляции для такого коррелятора, если нет – уменьшение. Увеличивается значение счетчика кодовых символов ПСП. Если счётчик кодовых символов ПСП меньше двойного выбранного размера псевдослучайной последовательности, то происходит переход к действию «Получение кодовых символов опорных ПСП». Если счётчик кодовых символов ПСП больше двойного выбранного размера псевдослучайной последовательности или равен, то происходит переход к действию «Считывание значений корреляторов».

– «Считывание значений корреляторов». Получение накопленных значений корреляции коррелляторов слежения и сравнение с пороговым значением корреляции (R_{xy_trh}). Если значение корреляции на втором корреляторе больше или равно R_{xy_trh}, то считается, что синхронизация по фазе ПСП установлена. С этого коррелятора можно считывать информацию. В этом случае происходит переход к действию «Получение кодовых символов опорных ПСП». Если значение корреляции на первом или третьем корреляторе слежения больше либо равно R_{xy_trh}, то происходит переход к действию «Анализ значений корреляторов слежения». Если значения корреляции на всех корреляторах слежения меньше R_{xy_trh}, то происходит переход к действию «Присвоение фаз корреляторов».

– «Анализ значений корреляторов слежения». Рассматриваются значения корреляций на первом и третьем корреляторах слежения. В зависимости от значений корреляции производится или не производится сдвиг фазы корреляторов слежения. Значения фаз корреляторов слежения присваиваются значениям фаз корреляторов захвата. Происходит безусловный переход к действию «Получение кодовых символов опорных ПСП».

– «Сдвиг регистров корреляторов слежения». На один кодовый символ вправо сдвигаются состояния регистров корреляторов слежения.

– «Конец». Окончание выполнения действий алгоритма слежения. Фаза ПСП потеряна.

Экспериментальные исследования

Представленный выше метод был реализован на микроконтроллерах MSP430 с низким потреблением энергии. Область применения – построение (мобильных) вычислительных сетей с использованием концепции IoT, работающих в сложных условиях местности при наличии помех. Такие сети могут использоваться для организации мониторинга окружающей среды, координации действий спасательных служб в зонах возникновения опасных природных явлений или процессов (лесные пожары, наводнения и др). Изложенный метод может также использоваться для организации беспроводной сети группы лиц во время активного отдыха (туризм, ориентирование и т.д.). Требуемый коэффициент битовых ошибок (P_b) был выбран равным 10^{-3}, дальность связи – минимум 500 м, информационная скорость (R_{bit}) – не менее 4,5 бит/с, порог сопротивляемости помехам $(J/S)_{\text{треб}}$ равен 5 дБ, местность – смешанный лес.

В случае канала с аддитивным белым гауссовым шумом для обеспечения значения коэффициента битовых ошибок 10^{-3} достаточно иметь значение SNR на входе приёмника равным 7 дБ. Это значение взято за опорное значение SNR.

Значения P_b для различных величин SNR для случая канала с аддитивным белым гауссовым шумом и широкополосной помехой рассчитаны по формуле (2) представленного метода при пороге сопротивляемости помехам $(J/S)_{\text{треб}}$ равном 5 дБ при различных коэффициентах расширения спектра сигнала, и построен график, представленный на рисунке 4.

Как видно из рисунка 4, для обеспечения значения P_b, равного 10^{-3}, и соответствующего значения SNR при заданном $(J/S)_{\text{треб}}$ необходимо обеспечить коэффициент расширения спектра сигнала, равный 1023.

По результатам анализа обнаружено, что наибольший уровень отношения «сигнал-шум» и наименьший уровень боковых лепестков имеют m-последовательности. Минимальная длина псевдослучайной последовательности для обеспечения требуемой величины коэффициента расширения спектра равна 1023 кодовым символам. Следовательно, минимальная величина ширины полосы частот для обеспечения заданной информационной скорости (R_{bit}) и коэффициента расширения спектра (G_p) равна 9,3 кГц.

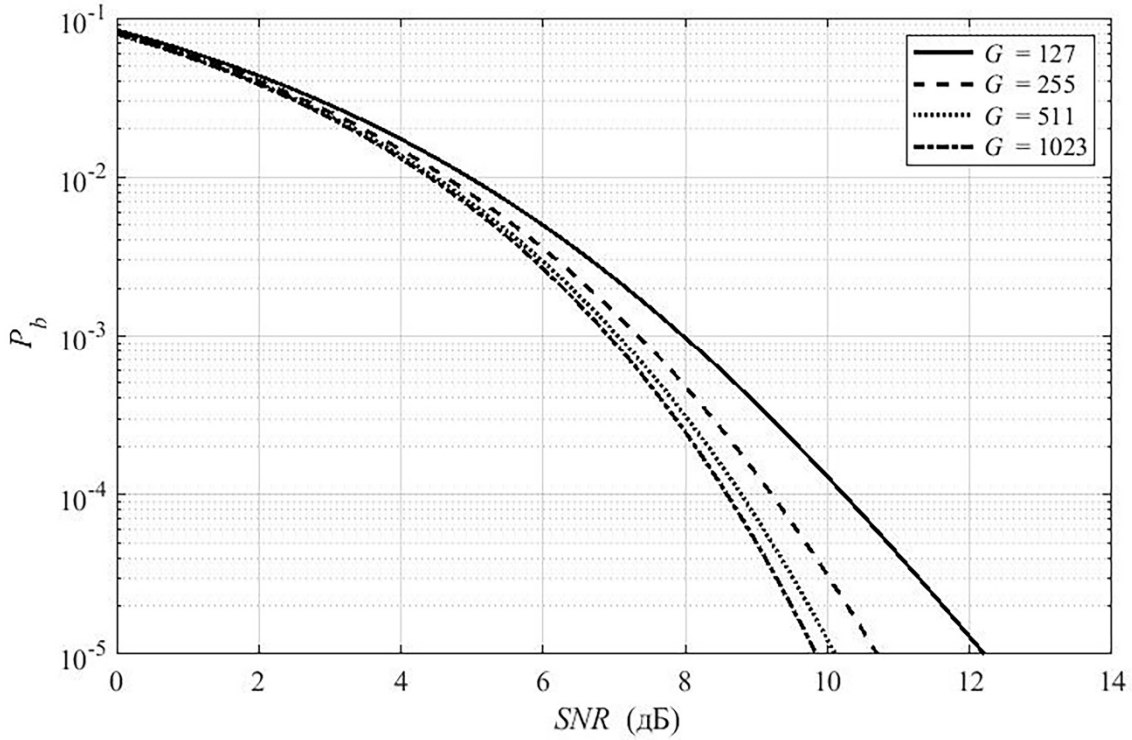

Рисунок 4 – Зависимость коэффициента битовых ошибок от отношения «сигнал-шум» для канала с аддитивным белым гауссовым шумом и широкополосной помехой
Figure 4 – Dependence of bit error rate on signal-to-noise ratio for the channel with additive white Gaussian noise and wideband jamming

Учитывая сложный характер местности смешанного леса, был выбран диапазон LPD433 для рассматриваемой беспроводной сети, так как он обеспечивает минимальное ослабление сигнала в лесу среди нелицензируемых диапазонов при одинаковой чувствительности приёмника и мощности передатчика [5]. Расчёт ослабления сигнала растительностью и соответствующие графики приведены в работе [5].

Рассчитаны и определены следующие параметры:

– $S_{\max}$ рассчитан по формуле (3), получено значение -122,32 дБ;

– L рассчитан по формуле (5), получено значение 137,32 дБ;

– $d_{\max}$ определён равным 1700 м с использованием значений $S_{\max}$, L и графика для суммарного ослабления сигнала [5];

– J_{req} рассчитан по формуле (6), получено значение 210,2 нс;

– R_{xy_trh} рассчитан по формуле (7), получено значение 31,9844;

– t_{synch} рассчитан по формуле (8), получено значение 75,02 с;

– R_{bit} рассчитан по формуле (9), получено значение 4,55 бит/с.

При выборе вычислительных модулей передатчика и приёмника основное внимание уделялось низкому потреблению, легкой доступности и по возможности наличию отладочных плат. Была выбрана и приобретена отладочная плата LaunchPad с 16-разрядным микроконтроллером MSP430G2553 от Texas Instruments. MSP430G2553 обеспечивает низкое электропотребление (0,5 мВт), обладает большим количеством аппаратных блоков: таймеры, АЦП, UART, SPI. В качестве передатчика с ASK-модуляцией был выбран модуль FS1000A, поскольку реализован по простой схеме. FS1000A выполняет ASK-модуляцию несущей частоты 433 МГц с информационным сигналом и передаёт получившийся сигнал. Потребляемая мощность модуля равна 60 мВт. В роли приемника с ASK-демодуляцией был выбран

модуль RF-5V, поскольку он характеризуется простотой и высокой чувствительностью. Он имеет мощность потребления 20 мВт.

Были рассмотрены тактовые генераторы для передатчика и приёмника: M2103757, генератор с цифровым управлением (DCO), низкочастотный генератор (VLO), SMD oscillator 12 MHz. Был выбран SMD oscillator 12 MHz, поскольку его джиттер ниже J_{req} и ниже, чем у других генераторов.

Правильность работы передатчика предварительно проверялась с помощью устройств класса RTL-SDR [17]. Они используют технологию программно-конфигурируемого радио (SDR), которая позволяет вносить изменения в эксплуатационные характеристики оборудования беспроводных сетей, что делает их универсальными средствами для приёма. Они подключаются к компьютеру с помощью USB и позволяют обрабатывать отсчёты принимаемого сигнала с помощью средств Python и GNU-Radio. В ходе экспериментальной проверки на выбранной элементной базе установлено, что представленный метод даёт верные характеристики для трансиверов и вычислительных модулей.

Заключение

В данной статье представлен метод синхронизации и обработки информации, учитывающий помеховую обстановку в канале, влияние лесистой местности на характеристики разрабатываемого оборудования. В данном методе основной акцент сделан на шумоподобном сигнале, поскольку данная технология обеспечивает эффективный инструмент защиты от влияния помех. Разработанный метод предоставляет характеристики для подбора необходимой элементной базы, обеспечивает быстрое время синхронизации и устойчивость к частотному дрейфу и джиттеру генераторов узлов сети. Представленный метод был применён при разработке узлов для беспроводной малопотребляющей сети IoT и успешно прошёл практическую проверку, что говорит о том, что он обеспечивает достаточную точность при планировании беспроводной сети в указанных условиях.

Библиографический список

1. **Ahmed I., Karvonen H., Kumpuniemi T., Katz M.** Wireless Communications for the Hospital of the Future: Requirements, Challenges and Solutions, International Journal of Wireless Information Networks, 2020, vol. 27, pp. 4-17.

2. **Pervez F., Qadir J., Khalil M., Yaqoob T., Ashraf U., Younis S.** Wireless Technologies for Emergency Response: A Comprehensive Review and Some Guidelines, IEEE Access, 2018, vol. 6, pp. 71814-71838

3. **Kommuri K., Ratnam K. V., Prathyusha G., Krishna P. G.** Development of real time environment monitoring system using with MSP430, International Journal of Engineering & Technology, 2018, vol. 7, no. 1, pp. 72-76.

4. **Бекмагамбетова Ж. М., Липская М. А., Оразымбетова А. К., Оспанова Н. А.** Ключевые особенности применения технологии LoRa при разработке сетей беспроводных датчиков // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникации им. М. Тынышпаева. 2017. № 2. С. 164-170.

5. **Таранцев Е. К., Тумасов С. В.** Сеть радиомаяков с расширенным спектром для экстремальных игр // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2016. № 3. С. 161-166.

6. **Siddique A., Prabhu B., Chaskar A., Pathak R.** A review on intelligent agriculture service platform with LoRa based wireless sensor network, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 2019, vol. 6, pp. 2539-2542.

7. **Матаева А. Б.** Применение LoRa технологии для электронных билетов на железной дороге // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникации им. М. Тынышпаева. 2017. № 1. С. 175-178.

8. **Meng Y. S., Lee Y. H., Ng B. C.** Study of propagation loss prediction inforest environment, Progress In Electromagnetics Research B, 2009, vol. 17, pp. 117-133.

9. **Тумасов С. В.** Аппаратно-программный комплекс для анализа вычислительных сетей на шумоподобных сигналах // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2020. № 2. С. 138-142.

10. **Meel J.** Spread Spectrum. Jan De Nayerlaan: De Nayer Institute, 1999. 33 p.

11. **Sklar B.** Digital Communications: Fundamentals and Applications. New Jersey: Prentice Hall, 2001. 1104 p.

12. **Пушкарёв О.** Использование диапазонов 433 и 868 МГц в системах промышленной телеметрии // Электронные компоненты. 2012. № 2. С. 42-48.

13. **ITU** Recommendation ITU-R P.833-10 Attenuation in vegetation. Geneva: ITU, 2020. 33 p.

14. **Dixon R.C.** Spread Spectrum Systems. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1979. 422 p.

15. **Rohde & Schwarz** LTE UE receiver performance measurements. Munich: Rohde & Schwarz, 2018. 23 p.

16. **Dunn J.** Measurement Techniques for Digital Audio. Beaverton: Audio Precision, Inc., 2004. 203 p.

17. **Фокин Г. А.** Принципы и технологии цифровой связи на основе программно-конфигурируемого радио: обзор современных тенденций в области создания комплекса подготовки специалистов // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 1. С. 78-94.

UDC 004.728.1

METHOD OF INFORMATION SYNCHRONIZATION AND PROCESSING IN COMPUTING NETWORKS ON SPREAD SPECTRUM SIGNALS

E. I. Gurin, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Department of Computer Engineering, PSU, Penza, Russia;
orcid.org/0000-0001-6288-3310, e-mail: gurin2@yandex.ru
S. V. Tumasov, post-graduate student, PSU, Penza, Russia
orcid.org/0009-0002-9234-6940, e-mail: yord22j@rambler.ru

Well-known works haven't thoroughly considered the issue of computer network nodes synchronization on spread spectrum signals of the «Internet of things» sphere in difficult terrain conditions and in the presence of interference in the channel. In this regard, the development of a method for synchronization and information processing and its implementation for wireless computer networks based on spread spectrum signals is an urgent research task. ***The aim of the work*** *is to develop a method for synchronization and information processing, its implementation for wireless computer networks with low power consumption using spread spectrum signals in difficult natural conditions of wooded area. The method has been developed for synchronization and information processing for wireless computer networks based on spread spectrum signals for wooded areas and under interference conditions. The method presented is implemented for a computer network with low power consumption in the «Internet of Things» sphere on MSP430 microcontrollers and transceiver modules. The method of synchroniza-tion and information processing given here makes it possible to ensure the synchronization of trans-mitter and receiver of wireless network, most fully takes into account difficult natural conditions of wooded area and interference effects.*

Key words: *spread spectrum signals, computer networks, synchronization, microcontrollers, protocols, pseudo-noise sequences, information transmit, wireless networks, MSP430.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-46-57

References

1. **Ahmed I., Karvonen H., Kumpuniemi T., Katz M.** Wireless Communications for the Hospital of the Future: Requirements, Challenges and Solutions. *International Journal of Wireless Information Networks.* 2020, vol. 27, pp. 4-17.

2. **Pervez F., Qadir J., Khalil M., Yaqoob T., Ashraf U., Younis S.** Wireless Technologies for Emergency Response: A Comprehensive Review and Some Guidelines. *IEEE Access.* 2018, vol. 6, pp. 71814-71838.

3. **Kommuri K., Ratnam K.V., Prathyusha G., Krishna P. G.** Development of real time environment monitoring system using with MSP430. *International Journal of Engineering & Technology.* 2018, vol. 7, no. 1, pp. 72-76.

4. **Bekmagambetova Z. M., Lipskaya M. A., Orazimbetova A. K., Ospanova N. A.** Key features of the application LoRa technology in the development of wireless sensor networks. *Vestnik Kazaxskoj Akademii Transporta I Kommunikacij IM. M. Tynshpaeva.* 2017, no. 2, pp. 164-170. (in Russian).

5. **Tarantsev E. K., Tumasov S.V.** The network of radio beacons with spread spectrum for extreme games. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus.* 2016, no. 3, pp. 161-166. (in Russian).

6. **Siddique A., Prabhu B., Chaskar A., Pathak R.** A review on intelligent agriculture service platform with LoRa based wireless sensor network. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET).* 2019, vol. 6, pp. 2539-2542.

7. **Matayeva A. B.** LoRa application technology for e-tickets on the railway. *Vestnik Kazaxskoj Akademii Transporta I Kommunikacij IM. M. Tynshpaeva.* 2017, no. 1, pp. 175-178. (in Russian).

8. **Meng Y. S., Lee Y. H., Ng B.C.** Study of propagation loss prediction inforest environment. *Progress In Electromagnetics Research B.* 2009, vol. 17, pp. 117-133.

9. **Tumasov S. V.** Hardware and software complex for analysis of computer networks of spread spectrum signals. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus.* 2020, no. 2, pp. 138-142. (in Russian).

10. **Meel J.** *Spread Spectrum.* Jan De Nayerlaan: De Nayer Institute. 1999. 33 p.

11. **Sklar B.** *Digital Communications: Fundamentals and Applications.* New Jersey: Prentice Hall. 2001. 1104 p.

12. **Pushkarev O.** Using ranges 433 and 868 MHz in industrial telemetry systems. *Elektronnye komponenty.* 2012, no. 2, pp. 42-48. (in Russian)

13. **ITU** Recommendation ITU-R P.833-10 Attenuation in vegetation. Geneva: ITU. 2020. 33 p.

14. **Dixon R. C.** *Spread Spectrum Systems.* New York: John Wiley & Sons, Inc. 1979. 422 p.

15. **Rohde & Schwarz** *LTE UE receiver performance measurements.* Munich: Rohde & Schwarz. 2018. 23 p.

16. **Dunn J.** *Measurement Techniques for Digital Audio.* Beaverton: Audio Precision, Inc. 2004. 203 p.

17. **Fokin G.** Principles and Technologies of Digital Communication Based on Software Defined Radio: A Review of Modern Trends in the Field of Creating a Curricculum. *Trudy uchebnyx zavedenij svyazi.* 2019, vol. 5, no. 1, pp. 78-94. (in Russian).