

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.331

## Алгоритм совместной оценки и компенсации ошибок временной и частотной синхронизации сигналов с возможностью регулирования точности оценки

Мухамадиев С.М., Рогожников Е.В., Рехаб Х.К.Х.А.А., Диноченко К.В., Крюков Я.В., Калашникова Н.Г.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, <https://tusur.ru/>  
Томск 634050, Российская Федерация

E-mail: [sema.fandmc3@mail.ru](mailto:sema.fandmc3@mail.ru), [evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru](mailto:evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru), [hashemkhaled950@gmail.com](mailto:hashemkhaled950@gmail.com), [k.dinochenko@yandex.ru](mailto:k.dinochenko@yandex.ru), [iakov.v.kryukov@tusur.ru](mailto:iakov.v.kryukov@tusur.ru), [natalia.g.kalashnikova@tusur.ru](mailto:natalia.g.kalashnikova@tusur.ru)

Поступила 26.03.2024, рецензирована 02.04.2024, принята 07.04.2024

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

**Аннотация:** Представлен анализ влияния ошибок синхронизации на обработку сигнала, дан обзор существующих подходов оценки и компенсации ошибок временной и частотной синхронизации, предложен новый подход, позволяющий совместно оценить смещения по времени и частоте, обеспечить более точную оценку по сравнению с существующими аналогами и, более того, регулировать точность оценки дробной ошибки и временной, и частотной синхронизации.

**Ключевые слова:** линейно-частотная модуляция, Long Range, частотная синхронизация, временная синхронизация, Internet of Things

УДК 621.376

**Для цитирования:** Мухамадиев С.М., Рогожников Е.В., Рехаб Х.К.Х.А.А., Диноченко К.В., Крюков Я.В., Калашникова Н.Г. Алгоритм совместной оценки и компенсации ошибок временной и частотной синхронизации сигналов с возможностью регулирования точности оценки. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2024, 16(3):331-340. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.331.

## Algorithm for joint estimation and compensation of signals time and frequency synchronization errors with estimation accuracy control

Semen M. Mukhamadiev, Eugeny V. Rogozhnikov, Hashem Khaled Hashem Abdelkader Aly Rehab, Kirill V. Dinochenko, Yakov V. Kryukov, Natalya G. Kalashnikova

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, <https://tusur.ru/>  
Tomsk 634050, Russian Federation

E-mail: [sema.fandmc3@mail.ru](mailto:sema.fandmc3@mail.ru), [evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru](mailto:evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru), [hashemkhaled950@gmail.com](mailto:hashemkhaled950@gmail.com), [k.dinochenko@yandex.ru](mailto:k.dinochenko@yandex.ru), [iakov.v.kryukov@tusur.ru](mailto:iakov.v.kryukov@tusur.ru), [natalia.g.kalashnikova@tusur.ru](mailto:natalia.g.kalashnikova@tusur.ru)

Received March 14, 2023, peer-reviewed March 20, 2023, accepted March 24, 2023

**Abstract:** An analysis of the influence of synchronization errors on signal processing is presented, a review of existing approaches for estimating and compensating for time and frequency synchronization errors is given, a new approach is proposed that allows joint evaluation of time and frequency offsets, providing a more accurate estimate compared to existing analogues and, moreover, regulating accuracy of fractional error estimation of both time and frequency synchronization.

**Keywords:** chirp spread spectrum, Long Range, frequency synchronization, time synchronization, Internet of Things

UDC 621.376

*For citation:* Semen M. Mukhamadiev, Eugeny V. Rogozhnikov, Hashem Khaled Hashem Abdelkader Aly Rehab, Kirill V. Dinoshenko, Yakov V. Kryukov, Natalya G. Kalashnikova. Algorithm for joint estimation and compensation of signals time and frequency synchronization errors with estimation accuracy control. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(3):331-340e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.331.

**СОДЕРЖАНИЕ**

1. **ВВЕДЕНИЕ (332)**
  2. **ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ (333)**
    - 2.1 **МОДУЛЯЦИЯ (333)**
    - 2.2 **ДЕМОДУЛЯЦИЯ (333)**
  3. **ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ОШИБОК ВРЕМЕННОЙ И ЧАСТОТНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ НА ДЕМОДУЛЯЦИЮ ЛЧМ СИГНАЛОВ (333)**
  4. **СУЩЕСТВУЮЩИЕ АЛГОРИТМЫ В ОБЛАСТИ ВРЕМЕННОЙ И ЧАСТОТНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ЛЧМ СИГНАЛОВ (335)**
  5. **ПРЕДЛОЖЕННЫЙ АЛГОРИТМ СИНХРОНИЗАЦИИ (336)**
  6. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ (339)**
- ЛИТЕРАТУРА (340)**

**1. ВВЕДЕНИЕ**

В контексте развития Интернета вещей (Internet of Things, IoT) в последние годы наблюдается активное развитие сетей большого радиуса действия с низким энергопотреблением [1,2]. Данное развитие обусловлено необходимостью обеспечения связи на значительных расстояниях с устройствами IoT, где также важно минимальное энергопотребление. Технология Low-power Wide-area Network (LoRaWAN) представляет собой одно из наиболее широко используемых и признанных решений в данной области [3,4]. Она включает в себя набор протоколов, в том числе физический уровень под названием Long Range (LoRa) и уровень MAC называемый LoRaWAN. Спецификация LoRa не доступна публично из-за того, что LoRa является запатентованным стандартом компании Semtech [5], а уровень MAC – открытым стандартом LoRa Alliance [6].

Хотя число исследований физического уровня технологии LoRa продолжает расти [7], ключевые аспекты этого уровня до сих пор не полностью исследованы. Однако механизмы модуляции и демодуляции широко изучены

[8-10]. Для передачи данных эта технология использует сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Модуляция таких сигналов происходит путем изменения частоты сигнала. Из-за особенностей сигналов ЛЧМ они могут быть получены и обработаны даже при низком отношении сигнал/шум (ОСШ) вплоть до вероятности ошибки в 1 бит на миллион переданных при ОСШ, равном минус 18 дБ.

Однако помехоустойчивость подобных систем может значительно снижаться, так как ошибки временной и частотной синхронизации оказывают негативное воздействие на результат демодуляции ЛЧМ сигналов [11-16]. Существует множество методов для оценки и коррекции таких типов ошибок [11-16]. Основной трудностью является то, что частотное и временное смещение трудно различить из-за схожести искажений, которые они вносят в ЛЧМ сигналы, что также является предметом научного исследования [11,12]. Создаются алгоритмы, которые позволяют оценить отдельно временное и частотное смещение. Несмотря на разнообразие алгоритмов для оценки подобных типов ошибок, некоторые из них характеризуются повышенной сложностью [13], а другие фокусируются только на одном типе ошибок – только на временном или только на частотном смещении [14,15].

В этой статье представлен трехэтапный метод оценки и компенсации ошибок временной и частотной синхронизации для ЛЧМ сигналов. В ходе исследования также демонстрируются особенности влияния ошибок синхронизации на процесс демодуляции сигналов ЛЧМ.

Работа содержит 4 раздела. В первом разделе описываются принципы формирования и обработки сигналов ЛЧМ. Второй раздел посвящен анализу влияния ошибок синхронизации на демодуляцию ЛЧМ сигналов. Третий раздел содержит

обзор существующих методов оценки и компенсации ошибок синхронизации. В четвертом разделе описан предложенный метод оценки и компенсации временной и частотной ошибки синхронизации, а также проведено моделирование.

## 2. ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

Описание процессов модуляции и демодуляции ЛЧМ сигналов уже представлены в ряде научных работ [8-10]. Ниже будет дано краткое описание этапов модуляции и демодуляции таких сигналов. Основные параметры ЛЧМ сигналов, а также переменные, применяемые в работе, представлены в **Таблице 1**.

Заметим, что в рамках данного исследования при построении зависимости вероятности битовой ошибки от ОСШ будет применяться коэффициент расширения спектра, равный 6. Значения коэффициента расширения спектра меньше 6 не предусмотрены стандартом Semtech. Это значение соответствует режиму минимальной помехоустойчивости сигнала, что позволяет получить нижнюю границу производительности системы. Если требуется увеличить помехоустойчивость, это можно сделать путем увеличения значения SF.

### 2.1 Модуляция

В данной статье будут использоваться термины *upchirp* и *downchirp*, которые обозначают ЛЧМ сигналы с линейно возрастающей и убывающей частотами соответственно. В комплексной форме *upchirp* записывается как:

$$\mathbf{x}[n] = \exp\left(\frac{li \cdot \pi \cdot n^2}{N}\right), \quad (1)$$

где  $n = 0 \dots N-1$ .

Комплексно-сопряженная версия *upchirp* сигнала называется *downchirp*:

$$\bar{\mathbf{x}}[n] = \exp\left(\frac{-li \cdot \pi \cdot n^2}{N}\right). \quad (2)$$

Модуляция выполняется путем добавления смещения частоты к немодулированному *upchirp* (1) сигналу. Либо можно изначально сформировать сигнал со смещением частоты:

$$\mathbf{s}[n] = \exp\left(\frac{li \cdot \pi \cdot (n^2 + 2 \cdot k \cdot n)}{N}\right), \quad (3)$$

где  $\mathbf{s}[n]$  – модулированный *upchirp*;  $k$  – номера символа модуляции.

Исходя из представленных выше параметров, очевидно, что, если сигнал содержит  $N$  отсчетов, в нем можно сохранить до  $N$  различных символов информации. При коэффициенте расширения спектра, равном 6, каждый такой сигнал содержит 6 бит данных, и число возможных состояний для одного символа модуляции равно 64.

### 2.2 ДЕМОДУЛЯЦИЯ

При демодулировании необходимо модулированный сигнал перемножить с немодулированным сигналом *downchirp*, что дает в результате гармонический сигнал с некоторой частотой, который называется *dechirp* сигнал:

$$\mathbf{y}[n] = \mathbf{s}[n] \bar{\mathbf{x}}[n] = \exp\left(\frac{li \cdot \pi \cdot 2 \cdot k \cdot n}{N}\right), \quad (4)$$

где  $\mathbf{y}[n]$  – *dechirp* сигнал.

Для определения переданного символа модуляции, обозначаемого  $k$ , необходимо определить частоту *dechirp* сигнала. Для этого необходимо вычислить модуль быстрого преобразования Фурье *dechirp* сигнала и найти позицию максимального аргумента в спектре:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}[n] &= \text{FFT}(\mathbf{y}[n]), \\ \hat{k} &= \arg \max(|\mathbf{Y}[n]|), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\mathbf{Y}[n]$  – Фурье преобразование *dechirp* сигнала;  $\hat{k}$  – демодулированный символ.

## 3. ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ОШИБОК ВРЕМЕННОЙ И ЧАСТОТНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ НА ДЕМОДУЛЯЦИЮ ЛЧМ СИГНАЛОВ

Ошибка частотной синхронизации может возникнуть из-за эффекта Доплера или

**Таблица 1**

Параметры ЛЧМ сигналов

Параметр	Обозначение	Значение
Тип сигнала	-	Комплексный
Полоса сигнала	BW	1 МГц
Коэффициент расширения спектра	SF	6
Количество отсчетов в сигнале	N	$2^{\text{SF}}$

нестабильности частоты кварцевых генераторов в принимающих или передающих устройствах. Эта проблема особенно критична в узкополосных сигналах или сигналах с большой базой. Причина ошибки временной синхронизации лежит в неправильно выполненной кадровой синхронизации. Обычно приходится иметь дело с обоими типами ошибок одновременно.

Согласно исследованиям, ошибки синхронизации можно разделить на два типа: целые и дробные [11-15]. Например, если период дискретизации сигнала равен  $t$ , а сам сигнал содержит  $N$  отсчетов, то временное смещение сигнала, кратное периоду дискретизации, представляет собой целую ошибку. Если же временное смещение меньше  $t$ , это классифицируется как дробная ошибка. Это же относится и к частотной области: целые ошибки – это ошибки, кратные частотному интервалу по величине; дробные ошибки – это ошибки, значение которых меньше частотного интервала. Если полоса сигнала равна  $BW$ , то частотный интервал будет равен  $BW/N$ . Согласно исследованиям [11-15], наиболее негативное влияние на процесс демодуляции оказывает дробная ошибка. Например, временное смещение равное половине периода дискретизации сигнала, а также частотное смещение равное половине частотного интервала.

Для понимания в качестве иллюстрации влияния дробной ошибки обоих типов синхронизации на амплитуду пика в спектре dechirp сигнала приведен Рис. 1. В продемонстрированном примере смещение в спектральной области соответствует половине частотного интервала, а смещение во временной области – половине периода дискретизации.

При временном и частотном смещении происходит распределение энергии на соседние пики с основного, приводя к снижению амплитуды каждого из пиков. При обоих типах ошибки энергия также разделяется между двумя пиками, но расстояние между ними возрастает. Следовательно, при наличии временного или частотного смещения вероятность успешной демодуляции при низком ОСШ существенно снижается [11-15].

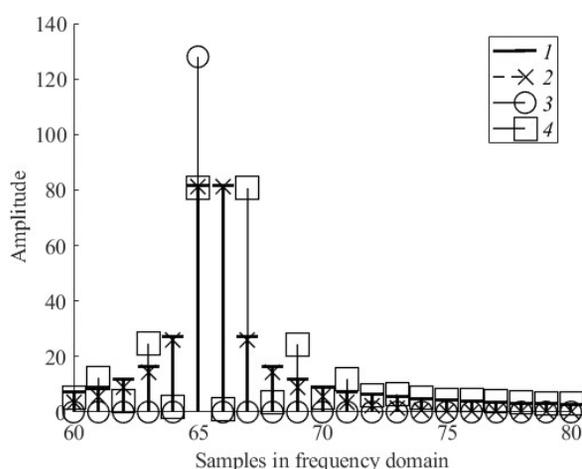


Рис. 1. Влияние дробной ошибки временной и частотной синхронизации на dechirp сигнал. 1 – частотное смещение, 2 – временное смещение, 3 – без смещения, 4 – частотное и временное смещение.

Происходит это по причинам как уменьшения амплитуды пика, так и возрастания вероятности выбора неверного пика.

На Рис. 2 показан эффект целочисленной ошибки частотной и временной синхронизации на Фурье пик после демодуляции. Временное смещение равно периоду дискретизации, частотное смещение равно частотному интервалу.

Временное и частотное смещение, согласно Рис. 1. и Рис. 2., оказывают схожее влияние на dechirp сигнал. Дробные ошибки являются наиболее негативными, так как помимо

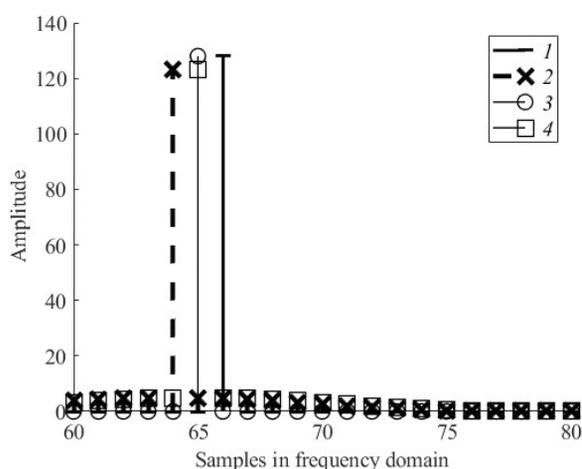


Рис. 2. Влияние целочисленной ошибки временной и частотной синхронизации на dechirp сигнал. 1 – частотное смещение, 2 – временное смещение, 3 – без смещения, 4 – частотное и временное смещение.

смещения пика, также снижают его амплитуду, что значительно затрудняет выполнение оценки в отличие от целых ошибок.

#### 4. СУЩЕСТВУЮЩИЕ АЛГОРИТМЫ В ОБЛАСТИ ВРЕМЕННОЙ И ЧАСТОТНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ЛЧМ СИГНАЛОВ

В работе [14] применяется двухэтапная оценка смещения частоты. Оценка выполняется на основании положения пика в частотной области немодулированных символов преамбулы и алгоритма Шмидла и Кокса [16]. Однако в работе не учитывается наличие временного смещения и рассматривается только частотная синхронизация, а также алгоритм Шмидла и Кокса не обеспечивает высокую точность оценки, так как точность алгоритма Шмидла и Кокса снижается при низком ОСШ. Подход, демонстрирующий более высокую точность оценки, был представлен в работе [15]. Авторы вычисляли корреляцию между принятыми символами преамбулами и опорными, в которые вводилось смещение частоты. Алгоритм также обладает низкой сложностью за счет применения алгоритма быстрого поиска подходящего опорного сигнала. Однако авторы также не рассматривали наличие ошибки временной синхронизации.

Первое описание алгоритма компенсации как временного, так и частотного смещения с низкой вычислительной сложностью представлено в работе [12], где также подчеркивается важность разделения ошибок синхронизации на дробные и целые. Авторы используют особенности влияния временного смещения на  $\text{downchirp}$  и  $\text{upchirp}$  сигналы, чтобы выполнить совместную оценку целого смещения времени и частоты. Далее происходит вычисление дробного смещения частоты, используя ранее полученные оценки, после чего вычисляется дробное временное смещение.

В работе [13] также предлагается алгоритм совместной оценки временного и частотного смещения, основанный на методе максимального правдоподобия. Однако алгоритм отличается высокой вычислительной сложностью, что затрудняет его применение для IoT систем.

Новый подход к оценке ошибки временной и частотной синхронизации продемонстрирован в работе [11]. Процесс оценки и компенсации разделен на три этапа. На первом этапе вычисляется дробное смещение частоты с применением предложенного авторами алгоритма и выполняется компенсация. На втором этапе выполняют предварительную оценку дробного временного смещения, также используя предлагаемый в их работе подход. На третьем этапе авторы применяют подход к совместной оценке целого смещения частоты и времени из работы [12], после чего выполняют уточняющую оценку дробного временного смещения. Стоит отметить, что авторы подчеркивают важность оценки и компенсации дробного смещения частоты перед выполнением оценки целого смещения, так как это значительно влияет на итоговый результат работы алгоритма. Однако предлагаемый алгоритм оценки дробной ошибки частотной синхронизации выполняется с помощью вычисления разности фаз основного пика в нескольких подряд идущих символах. Как уже было сказано в разделе 3, ошибка частотной и временной синхронизации производит практически идентичный эффект на спектр  $\text{dechirp}$  сигнала. Следовательно, алгоритм дробной оценки, в котором требуется сперва определить основной пик, может продемонстрировать ухудшение точности при одновременном наличии дробных ошибок временной и частотной синхронизации. Так как есть вероятность неверного определения основного пика. Дополнительно стоит учесть многолучевое распространение, которое приводит к появлению множества пиков вокруг основного [17]. Также отметим, что авторы не уточняют способ компенсации дробной ошибки временного смещения. Компенсация данного вида ошибок может быть выполнена несколькими различными способами, значительно различающимися с точки зрения вычислительной сложности. Например, согласно свойствам Фурье, устранение дробного смещения возможно осуществить путем умножения спектра сигнала на соответствующие множители, что является вычислительно затратной операцией. Менее затратным подходом является применение фильтра Фарроу [18].

В работе [19] авторы перед этапом вычисления Фурье преобразования интерполировали сигнал в 10 раз и по пику с максимальной амплитудой определяли уход частоты. Целью работы была не частотная синхронизация, а идентификация пользователей по индивидуальному уходу частоты, который для каждого пользователя был уникальным.

### 5. ПРЕДЛОЖЕННЫЙ АЛГОРИТМ СИНХРОНИЗАЦИИ

В разделе 2 было отмечено, что существует 4 вида возможных ошибок, которые рассматриваются в работах, посвященных синхронизации:

1. Дробная ошибка временной синхронизации.
2. Целая ошибка временной синхронизации.
3. Дробная ошибка частотной синхронизации.
4. Целая ошибка частотной синхронизации.

В данной работе предлагается трехэтапный алгоритм, позволяющий выполнить оценку всех вышеперечисленных видов ошибок, а также компенсацию. Оценка выполняется с применением символов преамбулы и точность оценки увеличивается с ростом числа символов преамбулы. В преамбуле содержится 8 сигналов, и расположены они в порядке, представленном на **Рис. 3**.

Первые два этапа оценки базируются на работах [12] и [19]. На третьем этапе вычисляется оценка смещения частоты согласно алгоритму Шмидла и Кокса.

На первом этапе принятый  $upchirp$  и  $downchirp$  перемножаются с опорными  $downchirp$  и  $upchirp$  соответственно, а также принятый  $upchirp$  перемножается с окном Тьюки (6). Далее к обоим сигналам добавляется определенное количество нулей, чтобы увеличить длительность сигнала в 8 раз, и для каждого сигнала вычисляется быстрое преобразование Фурье. Увеличение в



**Рис. 3.** Структура преамбулы, применяемая в предложенном алгоритме. На рисунке U обозначает  $upchirp$ , а D –  $downchirp$ .

8 раз необходимо, чтобы заполненный нулями сигнал имел количество отсчетов, кратное степени двойки. Это позволит применить быстрое преобразование Фурье. Согласно авторам [19], при 8-и кратном увеличении длительности сигнала таким образом можно выполнить оценку частоты с точностью до  $BW/(N \cdot 8)$ .

$$\mathbf{r}_{up}[n] = \text{FFT}\left(\left\{\mathbf{y}_1[n] \bar{\mathbf{x}}[n] \mathbf{T}[n], \mathbf{0}_{N(8-1)}\right\}\right)$$

$$\mathbf{r}_{down}[n] = \text{FFT}\left(\left\{\mathbf{y}_2[n] \mathbf{x}[n] \mathbf{T}[n], \mathbf{0}_{N(8-1)}\right\}\right)$$

$$k_{up} = \arg \max(|\mathbf{r}_{up}[n]|)$$

$$k_{down} = \arg \max(|\mathbf{r}_{down}[n]|)$$

$$\bar{k}_{up} = \begin{cases} \frac{k_{up} - N \cdot 8}{8}, & k_{up} > \frac{N \cdot 8}{2} \\ \frac{k_{up}}{8}, & k_{up} \leq \frac{N \cdot 8}{2} \end{cases} \quad (6)$$

$$\bar{k}_{down} = \begin{cases} \frac{k_{down} - N \cdot 8}{8}, & k_{down} > \frac{N \cdot 8}{2} \\ \frac{k_{down}}{8}, & k_{down} \leq \frac{N \cdot 8}{2} \end{cases}$$

где  $\mathbf{r}_{up}[n]$ ,  $\mathbf{r}_{down}[n]$  – демодулированные интерполированные  $upchirp$  и  $downchirp$  соответственно;  $\{\}$  – конкатенация двух векторов;  $\mathbf{T}[n]$  – окно Тьюки;  $\mathbf{0}_{N(8-1)}$  – вектор нулей;  $\bar{k}_{up}, \bar{k}_{down}$  – уточненные с помощью интерполяции положения пиков.

Но в дополнение к оценке частоты в данной работе предлагается применить способ совместной оценки из работы [12], что, в свою очередь, позволит выполнить оценку временного смещения с точностью до  $t/8$  (7).

$$STO = \frac{\bar{k}_{up} - \bar{k}_{down}}{2},$$

$$STO_{int} = \lfloor STO \rfloor,$$

$$STO_{frac} = STO - STO_{int}, \quad (7)$$

$$CFO_{int} = \frac{BW}{N} \cdot \frac{\bar{k}_{up} + \bar{k}_{down}}{2},$$

где  $\lfloor \cdot \rfloor$  – округление;  $STO_{int}$  – оценка целой ошибки временной синхронизации;  $STO_{frac}$  – оценка дробной ошибки временной

синхронизации;  $CFO_{int}$  – оценка целой ошибки частотной синхронизации.

Полученные оценки (7) подлежат устранению. Целое смещение частоты может быть устранено посредством частотной компенсации согласно свойствам преобразования Фурье. Целое временное смещение устраняется циклическим сдвигом сигнала. Компенсация дробного временного смещения выполняется с помощью фильтра Фарроу.

В разделе 2 и 3 было сказано, что при определенных значениях временного или частотного смещения оценка будет выполнена неверно. Например, при временном смещении, равном половине периода дискретизации, в спектре появится два пика, и неверная оценка приведет к тому, что вместо устранения ошибка будет увеличена. Однако в этом случае дробная оценка, равная половине периода дискретизации, станет целой ошибкой, равной периоду дискретизации. Устранить целую ошибку значительно проще. Это же касается и частотного смещения. Чтобы учесть этот сценарий, на втором этапе повторяются те же действия, что и на первом этапе, однако используется уже в два раза больше сигналов – два  $upchirp$  и два  $downchirp$ , но оконная функция Тьюки не используется (8).

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{up}[n] &= \text{FFT}\left(\left\{\mathbf{y}_3[n]\bar{\mathbf{x}}[n], \mathbf{0}_{N(8-1)}\right\}\right) + \\ &+ \text{FFT}\left(\left\{\mathbf{y}_4[n]\bar{\mathbf{x}}[n], \mathbf{0}_{N(8-1)}\right\}\right), \\ \mathbf{r}_{down}[n] &= \text{FFT}\left(\left\{\mathbf{y}_5[n]\mathbf{x}[n], \mathbf{0}_{N(8-1)}\right\}\right) + \\ &+ \text{FFT}\left(\left\{\mathbf{y}_6[n]\mathbf{x}[n], \mathbf{0}_{N(8-1)}\right\}\right). \end{aligned} \quad (8)$$

Компенсация выполняется также, как и на первом этапе. Таким образом, оценка на втором этапе позволит компенсировать возникшие на первом этапе ошибки. Но точность оценки все еще будет равна  $BW/(N*8)$  Гц для частотного смещения и  $t/8$  с для временного смещения.

На третьем этапе с помощью последних двух  $upchirp$  сигналов выполняется оценка частотного смещения по методу Шмидла и Кокса (9). Это позволит повысить точность уже

полученной ранее оценки. Дополнительная оценка временного смещения не выполняется, так как предполагается, что заданной точности достаточно для демодуляции с низкой вероятностью битовой ошибки.

$$\varphi = \arg\left(\sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{y}_7[n]\mathbf{y}_8^*[n]\right), \quad (9)$$

где  $\varphi$  – значение разности фаз между соседними символами.

Для определения качества работы алгоритма в работе будет вычислена среднеквадратичная ошибка (СКО) оценки частотного и временного смещения в зависимости от ОСШ. Сравним предложенный алгоритм с существующими алгоритмами Xhonpeux [11] и Carolyn [12]. Данные алгоритмы были выбраны по причине того, что они обладают низкой вычислительной сложностью и предназначены для борьбы как с ошибкой частотной, так и с ошибкой временной синхронизации. Параметры моделирования представлены в **Таблице 2**.

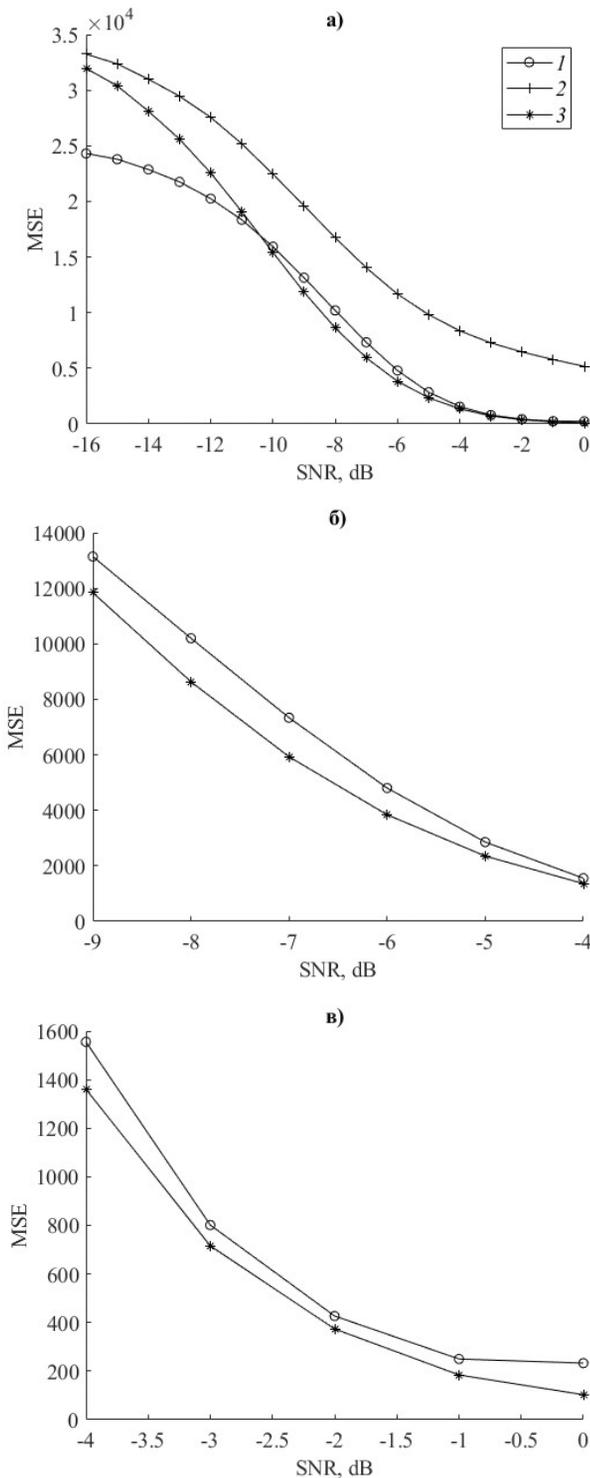
Таблица 2

Параметры моделирования

Параметр	Значение
Канал	Канал с аддитивным белым гауссовским шумом
Полоса сигнала	125 кГц
Ошибка временной синхронизации	От минус $3t$ до $3t$ , где $t$ – период дискретизации
Ошибка частотной стнхронизации	От минус $3f$ до $3f$ , где $f$ – размер частотного интервала, равный 1953 Гц
ОСШ	От минус 16 до 0 дБ

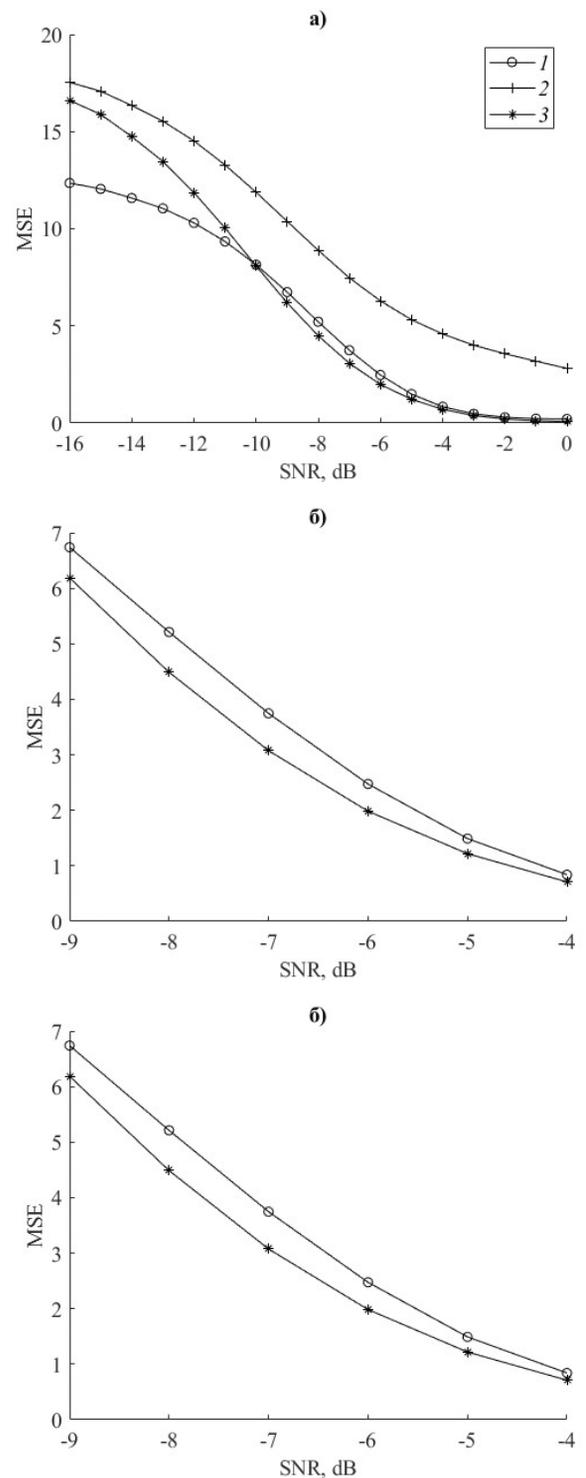
На **Рис. 4** приведены кривые зависимостей СКО от ОСШ для частотной ошибки, а на **Рис. 5** для временной ошибки. СКО ошибки временной синхронизации обозначено в периодах дискретизации. Так СКО, равное 1, соответствует временному смещению  $t$ , а СКО, равное 0.5, смещению  $0.5t$ .

На **Рис. 4** и **Рис. 5** на графиках под буквой а) размещена полная кривая, буквами б) и в) обозначены приближенные участки основной кривой. Исходя из **Рис. 4** и **Рис. 5**, алгоритм Carolyn демонстрирует наихудшие результаты, поэтому кривая для него приведена только на рисунках с буквой а). Алгоритм Xhonpeux демонстрирует более низкую ошибку оценки в



**Рис. 4.** Зависимости СКО частотного смещения от ОСШ. Рисунок а) – зависимость СКО при ОСШ от минус 16 до 0 дБ, рисунок б) – зависимость СКО при ОСШ от минус 9 до минус 4 дБ, рисунок в) – зависимость СКО при ОСШ от минус 4 до 0 дБ. 1 – алгоритм Хюппеих, 2 – алгоритм Саголуп, 3 – предложенный подход.

пределах от минус 16 до минус 10 дБ ОСШ. Так при минус 16 дБ СКО ошибки оценки временного смещения для алгоритма



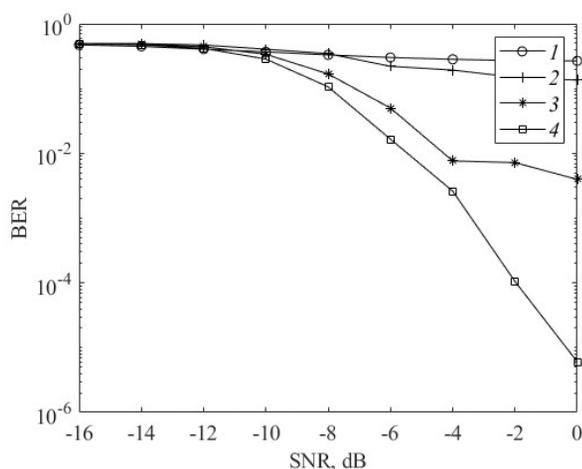
**Рис. 5.** Зависимости СКО временного смещения от ОСШ. Рисунок а) – зависимость СКО при ОСШ от минус 16 до 0 дБ, рисунок б) – зависимость СКО при ОСШ от минус 9 до минус 4 дБ, рисунок в) – зависимость СКО при ОСШ от минус 4 до 0 дБ. 1 – алгоритм Хюппеих, 2 – алгоритм Саголуп, 3 – предложенный подход.

Хюппеих на 25% превосходит предложенный. СКО ошибки оценки временного смещения для алгоритма Хюппеих уже на 29%

превосходит предложенный. Однако в данном диапазоне ОСШ демодуляция сигнала с низкой вероятностью битовой ошибки при рассматриваемых параметрах сигнала не достигается, поэтому повышенная точность не является определяющим критерием и не окажет существенного влияния на вероятность битовой ошибки. Начиная с минус 9 дБ ОСШ, предложенный алгоритм демонстрирует сопоставимую или же меньшую ошибку оценки как временного, так и частотного смещения. В диапазоне от минус 9 до минус 4 дБ ОСШ предложенный метод демонстрирует превосходство в 14% для временной синхронизации и 20% для частотной. При ОСШ в пределах от минус 4 до 0 дБ точность предложенного алгоритма возрастает еще больше и превосходит аналог на 55% для ошибки частотной синхронизации и 63% для ошибки временной синхронизации. Таким образом, начиная с минус 9 дБ ОСШ, предложенный алгоритм показывает превосходящие аналог результаты.

Также проведем сравнение зависимости вероятности битовой ошибки от ОСШ. На **Рис. 6** приведены кривые зависимостей вероятности битовой ошибки от ОСШ для следующих сценариев:

1. Синхронизация отсутствует.
2. Предложенный алгоритм синхронизации.
3. Алгоритм Xhonneux [11].



**Рис. 6.** Сравнение предложенного алгоритма синхронизации с алгоритмами Xhonneux и Carolyn. 1 – без компенсации, 2 – алгоритм Carolyn, 3 – алгоритм Xhonneux, 4 – предложенный алгоритм.

Согласно Рис. 6, предложенный алгоритм позволяет достичь меньшей вероятности битовой ошибки, чем алгоритмы Xhonneux и Carolyn, начиная с минус 12 дБ ОСШ. Так при ОСШ, равном 0 дБ, использование предложенного алгоритма обеспечивает вероятность битовой ошибки на 3 порядка меньше, чем алгоритм Xhonneux. Также отметим, что с ростом ОСШ увеличивается и разрыв между предложенным алгоритмом и алгоритмом Xhonneux, что согласуется с результатами, представленными на Рис. 4 и Рис. 5.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложен новый метод оценки ошибок временной и частотной синхронизации, а также их устранения в системах связи, использующих ЛЧМ модуляцию. Предложенный алгоритм позволяет совместно оценить ошибку временной и частотной синхронизации, а также обеспечивает более высокую точность оценки по сравнению с аналогом.

Преимуществом алгоритма помимо совместной оценки ошибки является возможность регулирования точности оценки дробной ошибки временной синхронизации. Точность частотной синхронизации не подлежит настройке, однако если высокая точность не требуется, то третий этап алгоритма может быть исключен. Чтобы избежать высокой вычислительной сложности, в работе предлагается использовать фильтр Фарроу для компенсации дробной ошибки временной синхронизации и циклический сдвиг для целой ошибки. В сравнении с существующим алгоритмом, где авторы также выполняет совместную оценку временного и частотного смещения, а также компенсацию, применение предложенного алгоритма способно уменьшить вероятность битовой ошибки более чем на 3 порядка при ОСШ, равном 0 дБ, по сравнению с аналогом. Отметим также, что точность оценки может быть увеличена при использовании большего числа символов преамбулы или же путем увеличения коэффициента расширения спектра.

Полученные результаты могут быть полезны разработчикам и исследователям помехоустойчивых или узкополосных систем связи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Foubert B, Mitton N. Long-range wireless radio technologies: A survey. *Future internet*, 2020, 12(1):13.
2. Singh RK, Puluckul PP, Berkvens R, Weyn M. Energy Consumption Analysis of LPWAN Technologies and Lifetime Estimation for IoT Application. *Sensors*, 2020, 20(7):4794.
3. Tournier J, Lesueur F, Mouël FL, Guyon L, Ben-Hassine H. A survey of IoT protocols and their security issues through the lens of a generic IoT stack. *Internet of Things*, 2020, 16(4):100264.
4. Buurman B, Kamruzzaman J, Karmakar GC. Low-power wide-area networks: Design goals, architecture, suitability to use cases and research challenges. *IEEE Access*, 2020, 8:17179-17220.
5. Jouhari M, Saeed N, Alouini MS, Amhoud EM. A survey on scalable LoRaWAN for massive IoT: Recent advances, potentials, and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2023, pp. 1841-1876.
6. TS001-1.0.4 LoRaWAN® L2 1.0.4 Specification.
7. Haxhibeqiri J, Poorter ED, Moerman I, Hoesbeke J. A survey of LoRaWAN for IoT: From technology to application. *Sensors*, 2018, 18(11):3995.
8. Vangelista L. Frequency Shift Chirp Modulation: the LoRa Modulation. *IEEE Signal Processing Letters*, 2017, 24(12):1818-1821.
9. Pasolini G. On the LoRa chirp spread spectrum modulation: Signal properties and their impact on transmitter and receiver architectures. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 21(1):357-369.
10. Milarokostas C, Tsolkas D, Passas N, Merakos L. A comprehensive study on LPWANs with a focus on the potential of LoRa/LoRaWAN systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 25(1):825-867.
11. Xhonneux M, Afisiadis O, Bol D, Louveaux J. A low-complexity LoRa synchronization algorithm robust to sampling time offsets. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 9(5):3756-3769.
12. Bernier C, Dehmas F, Deparis N. Low complexity LoRa frame synchronization for ultra-low power software-defined radios. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(5):3140-3152.
13. Savaux V, Delacourt C, Savelli P. On time-frequency synchronization in LoRa system: From analysis to near-optimal algorithm. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 9(12):10200-10211.
14. Ghanaatian R, Afisiadis O, Cotting M, Burg A. LoRa Digital Receiver Analysis and Implementation. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2019.
15. Guan P, Yu H, Zhu H, Zhao Y. A novel residual carrier frequency offset estimation approach for LoRa systems. *Proc. 5th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS)*, 2020, pp. 830-834.
16. Schmidl TM, Cox DC. Robust frequency and timing synchronization for OFDM. *IEEE transactions on communications*, 1997, 45(12):1613-1621.
17. Demeslay C, Rostaing P, Gautier R. Theoretical performance of LoRa system in multipath and interference channels. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 9(9):6830-6843.
18. Farrow CW. A continuously variable digital delay element. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 1988, pp. 2641-2645.
19. Eletreby R, Kumar S, Zhang D, Yağan O. Empowering low-power wide area networks in urban settings. *Proceedings of the Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication*, 2017, pp. 309-321.

**Мухамадиев Семен Минисович**

техник

Томский государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники  
Томск 634050, Россия

E-mail: sema.fandmc3@mail.ru

**Рогожников Евгений Васильевич**

кандидат технических наук, доцент

Томский государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники  
Томск, 634050, Россия

E-mail: evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru

**Рехаб Хашем Кхалед Хашем Абделкадер Али**

инженер

Томский государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники  
Томск 634050, Россия

E-mail: hashemkhaled950@gmail.com

**Диноченко Кирилл Вадимович**

ассистент

Томский государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники  
Томск 634050, Россия

E-mail: k.dinochenko@yandex.ru

**Крюков Яков Владимирович**

кандидат технических наук, доцент

Томский государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники  
Томск 634050, Россия

E-mail: iakov.v.kriukov@tusur.ru

**Калашникова Наталья Геннадьевна**

техник II категории

Томский государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники  
Томск 634050, Россия

E-mail: natalia.g.kalashnikova@tusur.ru.