

УДК 621.396

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2025-13-1-23-39>

EDN: TOKWFI

Экспериментальная реализация алгоритмов синхронизации OFDM с использованием системы программного радио (SDR)

Калачиков А. А. ✉, Попович И. А., Пушница В. А.

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Новосибирск, 630102, Российская Федерация

Постановка задачи. Программное радио позволяет гибко реализовывать алгоритмы обработки сигналов в радиосвязи. Прием сигналов возможен только при наличии синхронизации во временной и частотной областях, учитывающих свойства сигналов. При разработке систем связи требуется выбрать алгоритмы, позволяющие эффективно решить задачу синхронизации. Выбор алгоритма выполняется с использованием моделирования и тестовой реализации. В работе представлен прототип системы связи с ортогональным частотным мультиплексированием, реализованный на платформе *Adalm Pluto* с использованием библиотеки *libiio*. **Цель исследования** – анализ и программная реализация алгоритмов символьной и частотной синхронизации при приеме сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием. Для этого применена преамбула на основе последовательности Задова – Чу. Оценка частотного смещения выполнена двумя **методами**: с использованием циклического префикса символов и с применением преамбулы Задова – Чу. **Новизна.** Разработанные алгоритмы реализованы в виде программ, без применения специализированных библиотек готовых модулей и протестированы на аппаратной платформе *Adalm Pluto*. **Практическая значимость** состоит в экспериментальном подтверждении работоспособности предложенных решений, что позволяет использовать их в системах программного радио при реализации каналов связи различных автономных систем.

Ключевые слова: программное радио, временная синхронизация приема сигналов, частотная синхронизация приема сигналов

Введение

Ортогональное частотное разделение каналов (OFDM, аббр. от англ. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) является одним из наиболее эффективных методов модуляции, применяемых в современных беспроводных системах связи, включая стандарты 802.11n, LTE и 5G. Популярность OFDM обусловлена его высокой спектральной эффективностью и устойчивостью к межсимвольной интерференции, возникающей в каналах с многолучевым распространением. При практической реализации алгоритмов формирования и приема OFDM-сигнала необходимо осуществить основные преобразования сигнала, связанные

Библиографическая ссылка на статью:

Калачиков А. А., Попович И. А., Пушница В. А. Экспериментальная реализация алгоритмов синхронизации OFDM с использованием системы программного радио (SDR) // Информационные технологии и телекоммуникации. 2025. Т. 13. № 1. С. 23–39. DOI: 10.31854/2307-1303-2025-13-1-23-39. EDN: TOKWFI

Reference for citation:

Kalachikov A., Popovich I., Pushnitsa V. Experimental Implementation of OFDM Synchronization Algorithms Using Software Radio System (SDR) // Telecom IT. 2025. Vol. 13. Iss. 1. PP. 23–39 (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2025-13-1-23-39. EDN: TOKWFI

с его первоначальным обнаружением, символьной и частотной синхронизацией, оценкой и компенсацией влияния канала. В настоящее время OFDM-сигналы также используются в системах программного радио при реализации каналов связи автономных систем, связанных с передачей телеметрии различного вида.

Основным принципом OFDM является разбиение доступной полосы частот на множество узкополосных подканалов, в каждом из которых передается модулированная поднесущая. Ортогональность поднесущих обеспечивается посредством использования обратного быстрого преобразования Фурье при формировании передаваемого сигнала. Для минимизации межсимвольных помех, вызванных эффектами многолучевого распространения, применяется циклический префикс, представляющий собой повторение конечной части OFDM-символа в его начале. Длина циклического префикса выбирается исходя из максимальной задержки распространения в канале, что позволяет сохранить ортогональность поднесущих.

Одним из ключевых факторов, влияющих на корректность приема OFDM-сигнала, является синхронизация во временной и частотной областях. Несоответствие временной синхронизации может привести к межсимвольной интерференции, а частотные ошибки вызывают утрату ортогональности между поднесущими, что приводит к межканальной интерференции. В связи с этим задачи точного определения начала OFDM-символа и компенсации частотных сдвигов являются критически важными для обеспечения корректной работы системы.

Настоящая работа посвящена исследованию методов синхронизации OFDM-сигнала в виде моделирования алгоритмов и определения их характеристик в условиях воздействия помех. Представлены результаты работы данных алгоритмов синхронизации, реализованные в виде макета на базе системы программного радио (SDR, *аббр. от англ.* Software-Defined Radio).

Модель сигнала

Передача данных с использованием метода OFDM осуществляется на параллельных ортогональных поднесущих. Однако смещение синхронизации символов (STO, *аббр. от англ.* Symbol Timing Offset) и смещение несущей частоты (CFO, *аббр. от англ.* Carrier Frequency Offset) приводят к нарушению ортогональности поднесущих, что существенно ухудшает качество принимаемого сигнала. Эти искажения вызывают деформацию сигнального созвездия и снижение показателей битовой ошибки (BER, *аббр. от англ.* Bit Error Rate). Для обеспечения корректного приема сигнала необходимо выполнение синхронизации как во временной, так и в частотной областях.

В процессе формирования OFDM-сигнала передаваемый поток битов разделяется на группы по M бит, каждая из которых преобразуется в комплексный символ, соответствующий определенному алфавиту модуляции. Затем к каждому набору комплексных символов применяется обратное быстрое преобразование Фурье размерности N , что позволяет получить представление OFDM-символов во временной области. Для устранения межсимвольной ин-

терференции, вызванной многолучевым распространением, в начало каждого OFDM-символа вставляется циклический префикс (CP, *аббр. от англ.* Cyclic Prefix) длиной N_g , который представляет собой повторение последних N_g выборок символа.

Передача данных осуществляется в виде радиокадров. В рамках рассматриваемой системы каждый радиокадр содержит один OFDM-символ с первичным сигналом синхронизации (PSS, *аббр. от англ.* Primary Synchronization Signal), за которым следуют пять OFDM-символов, несущих информационные данные. Последовательность отсчетов PSS формируется в частотной области на основе последовательности Задова – Чу длиной 63 символа и используется для обнаружения начала кадра, а также для оценки смещения частоты. OFDM-символ во временной области может быть выражен следующим образом:

$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H[k] X[k] e^{j \frac{2\pi(n-\delta)(k-\epsilon)}{N}} + N(n),$$

где $H[k]$ – частотная характеристика канала на k -й поднесущей; $X[k]$ – переданный комплексный символ на k -й поднесущей; ϵ – нормированное на величину интервала между поднесущими CFO; δ – STO; N – количество поднесущих. Наличие случайного смещения δ во временной и частотной областях приводит к случайному изменению фазы принятого сигнала, что ухудшает качество приема OFDM-сигнала и увеличивает вероятность ошибки. Смещение принятого сигнала на δ отсчетов во временной области соответствует фазовому сдвигу $2\pi k\delta/N$ на поднесущей с номером k .

Относительный случайный сдвиг фазы и частоты будет существовать между передатчиком и приемником из-за электрического шума, температурной зависимости генераторов. Из-за нестабильности генератора SDR частота локального генератора отличается от несущей частоты принимаемого сигнала f_c . Разницей $f_d = f_c - f_{Lo}$ является CFO.

Синхронизация частоты используется для восстановления ортогональности поднесущих путем компенсации смещения частоты, вызванного нестабильными осцилляторами SDR. Смещение частоты измеряется в миллионных долях (PPM, *аббр. от англ.* Parts Per Million), а для аппаратного модуля Adalm Pluto внутренний осциллятор имеет нестабильность частоты 2,5 PPM [2].

Символьная синхронизация

Первоначальная синхронизация выполняется во временной области и заключается в нахождении начала каждого кадра, в состав которого входит OFDM-символ, используемый как преамбула. Для обнаружения преамбулы сигнала PSS приемник вычисляет корреляцию отсчетов принятого сигнала $y(n)$ и отсчетов последовательности PSS $s_{pss}(n)$ на длительности OFDM-символа в виде:

$$\rho(k) = \left| \sum_{n=0}^{N-1} y(n+k) s_{pss}^*(n) \right|.$$

Определение границ отсчетов текущего OFDM-символа выполняется путем оценки STO. Значения Ng отсчетов циклического префикса и соответствующие им последние отсчеты текущего принимаемого OFDM-символа используются для оценки STO, максимизируя корреляцию между выборками [3].

Алгоритм временной синхронизации основан на вычислении взаимной корреляции $ccf(n)$ между отсчетами принимаемого сигнала на временных окнах, соответствующих защитному интервалу и последним отсчетам OFDM-символа:

$$ccf(n) = \frac{\left| \sum_{m=n-Ng+1}^n y(m) y^*(m-N) \right|}{\sqrt{\sum_{m=n-Ng+1}^n |y(m)|^2} \sqrt{\sum_{m=n-Ng+1}^n |y(m-N)|^2}}.$$

Индекс n номера текущего отсчета применяется для определения границ отсчетов, используемых при вычислении взаимной корреляционной функции. Для вычисления используются два временных окна отсчетов. Так как обработка сигналов производится при наличии шума, то для точного определения максимумов функции $ccf(n)$ используется нормирование на величину произведения нормы векторов принятых отсчетов сигнала, по которым вычисляется указанная функция.

Индекс n максимального значения $ccf(n)$ соответствует первому отсчету текущего принимаемого OFDM-символа, и после удаления отсчетов CP полученные отсчеты сигнала, составляющие текущее временное окно отсчетов, подаются на вычисление дискретного преобразования Фурье для разделения поднесущих и демодуляции сигналов [6, 7].

Метрика символьной синхронизации записывается в виде:

$$M_x(n) = \frac{|P_x(n)|^2}{|R_x(n)|^2},$$

где: $P_x(n)$ – корреляционная функция; $R_x(n)$ – нормализация по энергии сигнала; n – индекс отсчетов принятого сигнала.

Далее приводятся выражения для указанных функций в различных методах.

1) Метод Шмидла – Кокса

Преамбула состоит из двух идентичных половин:

$$S_{Schmidl} = [A_{N/2}, A_{N/2}],$$

где $A_{N/2}$ – случайная последовательность длиной $N/2$.

Корреляция и энергия определяются как:

$$P_{Schmidl}(n) = \sum_{k=0}^{N/2-1} r^*(n+k) \cdot r(n+k+N/2),$$

$$R_{Schmidl}(n) = \sum_{k=0}^{N/2-1} |r(n+k+N/2)|^2.$$

Метод прост, но имеет эффект плато в величине метрики, создающий неопределенность.

2) Метод Минна

Преамбула модифицируется для устранения эффекта плато:

$$S_{Minn} = [A_{N/4}, A_{N/4}, -A_{N/4}, -A_{N/4}],$$

где $A_{N/4}$ – последовательность длиной $N/4$.

Корреляция и энергия сигнала вычисляются как:

$$P_{Minn}(n) = \sum_{m=0}^1 \sum_{k=0}^{N/4-1} r^*(n + N/2 \cdot m + k) \cdot r(n + N/2 \cdot m + k + N/4),$$

$$R_{Minn}(n) = \sum_{m=0}^1 \sum_{k=0}^{N/4-1} |r(n + N/2 \cdot m + k + N/4)|^2.$$

Метод устраняет плато, но появляются боковые лепестки в метрике синхронизации.

3) Метод Парка

Используется симметричная структура преамбулы:

$$S_{Park} = [A_{N/4}, B_{N/4}, A_{N/4}^*, B_{N/4}^*],$$

где $A_{N/4}$ и $B_{N/4}$ – различные последовательности.

Корреляция и энергия вычисляются в виде:

$$P_{Park}(n) = \sum_{k=0}^{N/2} r(n-k) \cdot r(n+k),$$

$$R_{Park}(n) = \sum_{k=0}^{N/2} |r(n+k)|^2.$$

Метод обеспечивает резкий пик, снижая влияние боковых лепестков метрики.

4) Метод Кима

Модификация метода Парка для увеличения разницы между парами выборок:

$$S_{Kim} = [A_{N/4}, B_{N/4}^*, A_{N/4}, B_{N/4}^*].$$

Корреляция и энергия определяются схожим образом.

5) Метод Рена

Используется последовательность постоянной амплитуды с нулевой автокорреляцией (CAZAC, аббр. от англ. Constant Amplitude Zero Auto Correlation), обладающая нулевой автокорреляцией:

$$S_{Ren} = [C_{N/2}, C_{N/2}] \odot S_N,$$

где $C_{N/2}$ – CAZAC последовательность; S_N – псевдошумовая последовательность; \odot – покомпонентное умножение.

Корреляция и энергия рассчитываются по формулам:

$$P_{Ren}(n) = \sum_{k=0}^{N/2-1} s_k s_{k+N/2}^* r^*(n+k) \cdot r(n+k+N/2),$$

$$R_{Ren}(n) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} |r(n+k)|^2.$$

Метод обеспечивает резкий пик и высокую точность при низком отношении сигнал / шум (SNR, *аббр. от англ.* Signal-to-Noise Ratio).

Последовательности CAZAC определяются как:

$$c(n) = e^{\frac{j\pi\mu n^2}{N_p}}, 0 \leq n < N_p,$$

где N_p – период; μ – параметр, взаимно простой с N_p .

Эти алгоритмы применяются для повышения точности синхронизации и снижения ошибок при декодировании OFDM-символов.

Приведенные выражения для методов символьной синхронизации далее используются для моделирования алгоритмов синхронизации и при реализации алгоритмов на платформе SDR.

Частотная синхронизация

После обнаружения кадра и синхронизации по времени оценивается смещение частоты для коррекции отклонения частоты локального генератора SDR от несущей частоты принимаемого сигнала. Алгоритмов частотной синхронизации достаточно много, в работе рассмотрены и реализованы два из них.

Частотная синхронизация по PSS использует первичные синхронизационные сигналы, которые являются специальными последовательностями (Задова – Чу), передающимися на начальном этапе. Преимущества метода – в высокой точности синхронизации и эффективности в условиях низкого уровня сигнала; недостатки состоят в необходимости знания образца сигнала на приемной стороне и дополнительных требованиях к вычислительным ресурсам для обработки PSS.

Для больших значений отклонения частоты могут использоваться опорные сигналы PSS. Корреляция между блоками отсчетов со смещением, равным половине символа, вычисляется между выборками части PSS полученного сигнала $y(n)$ и повторением последовательности PSS как:

$$C_0 = \sum_{n=0}^{N_{FFT}/2-1} y(n) s_{pss}^*(n),$$

$$C_1 = \sum_{n=0}^{N_{FFT}/2-1} y(n + N_{FFT}/2) s_{pss}^*(n).$$

Фазовый сдвиг на интервале $N_{FFT}/2$ отсчетов, вызванный смещением частоты, вычисляется по формуле:

$$\Delta\theta = \arg \left\{ \frac{\text{Im}(C_1 C_0^*)}{\text{Im}(C_1 C_0^*)} \right\}.$$

Величина частотного смещения Δf вычисляется как:

$$\Delta f = \frac{\Delta\theta f_s}{\pi N_{FFT}}.$$

Вычисленное смещение частоты Δf применяется к отсчетам текущих принятых OFDM-символов для коррекции, которая выполняется путем умножения отсчетов принятого сигнала на корректирующий множитель:

$$\exp(-j2\pi\Delta f/N_{FFT}n).$$

Частотная синхронизация по СР основана на использовании повторяющейся части OFDM-символа. Этот подход позволяет выполнять частотную подстройку системы непосредственно в процессе передачи данных за счет анализа фазового сдвига между отсчетами СР и концом символа.

Частотное смещение вызывается фазовым сдвигом между СР и соответствующей частью OFDM-символа, который пропорционален CFO. Для измерения частотного смещения сравнивается фазовый угол сигнала в СР с фазой в конце символа. Эта разница фаз используется для вычисления CFO.

Преимущества метода заключаются в простоте реализации (обусловленной тем, что СР является неотъемлемой частью каждого OFDM-символа) и низких вычислительных затратах (что делает метод энергоэффективным и подходящим для аппаратных реализаций); недостатки – в ограниченной точности (по сравнению с методами, использующими синхронизационные сигналы, например, PSS), необходимости выполнять тонкую подстройку частоты (в связи с чем метод не способен компенсировать частотное смещение, превышающее интервал между поднесущими), а также в высокой чувствительности к изменяющимся условиям передачи (включая эффекты многолучевого распространения, что может снижать точность оценки частотного отклонения).

Фазовый сдвиг между отсчетами принятого сигнала с интервалом в N отсчетов вычисляется как:

$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \arg \left\{ \sum_{n=0}^{Ng} y^*(n) y(n+N) \right\},$$

где Ng – длина циклического префикса; $y^*(n)$ – отсчеты СР.

Для повышения точности берется среднее значение фазового сдвига по всем отсчетам внутри интервала СР.

Результаты практической реализации алгоритмов

Описанные алгоритмы реализованы в составе программно-аппаратного комплекса по формированию и приему OFDM-сигналов на основе аппаратного модуля SDR Adalm Pluto. Передатчик и приемник включают ноутбуки с операционной системой Ubuntu 22 (рисунк 1).

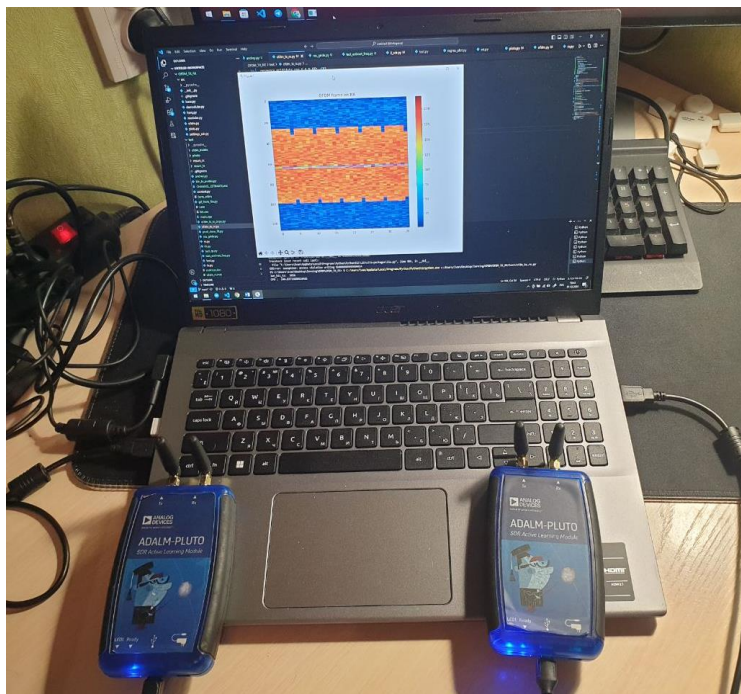


Рис. 1. Макет системы SDR из двух Adalm Pluto

Реализация алгоритмов синхронизации проводится с параметрами SDR, представленными в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры системы

SDR оборудование	Adalm Pluto
Драйвер программного обеспечения	LibIIO + PyADI
Несущая частота, ГГц	2
Количество поднесущих	128
Длина защитного интервала	32
Количество пилотных поднесущих	6
Частота дискретизации, МГц	1,92
Интервал поднесущих, кГц	15
Форматы модуляции	QPSK

Эффективность результатов реализации оценивается с точки зрения диаграммы сигнального созвездия поднесущих данных, соответствующей спектрограммы принятых OFDM-символов и с точки зрения величины вектора ошибок символов созвездия после синхронизации.

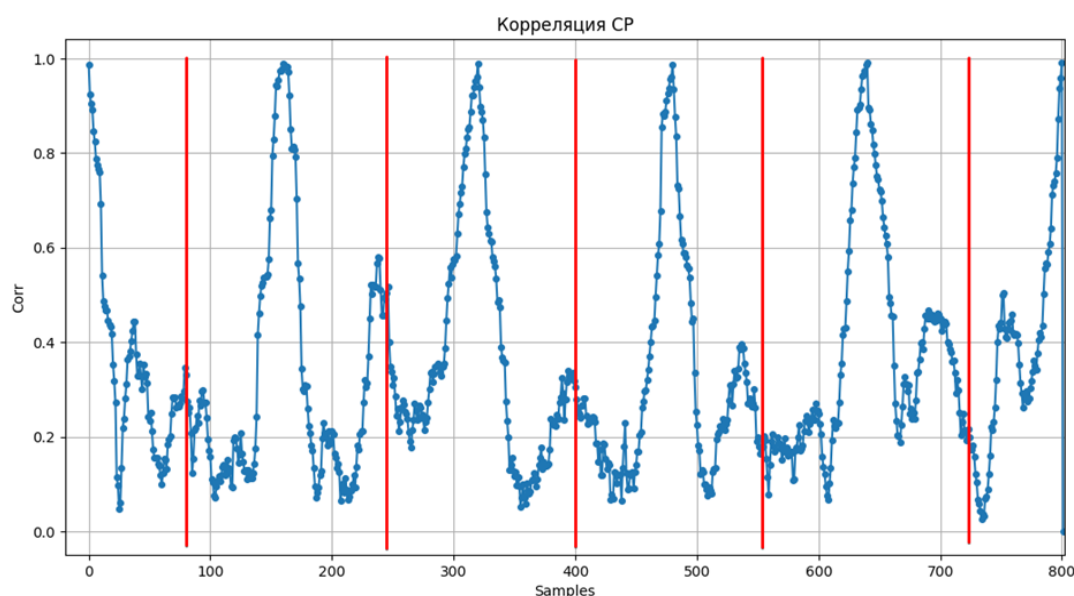


Рис. 2. Взаимная корреляция префиксных и последних отсчетов OFDM-символов

Рисунок 2 отражает наличие регулярных максимумов функции взаимной корреляции отсчетов сигнала с интервалом в N отсчетов. Индекс отсчета максимума $scf(n)$ показывает начало отсчетов текущего принятого OFDM-символа, и последующие N отсчетов используются как окно дискретного преобразования Фурье для разделения поднесущих и демодуляции.

Для решения задач поиска соты и первоначальной синхронизации используются PSS, являющиеся последовательностью Задова – Чу, имеющей хорошие свойства автокорреляции. График автокорреляции PSS показан на рисунке 3.

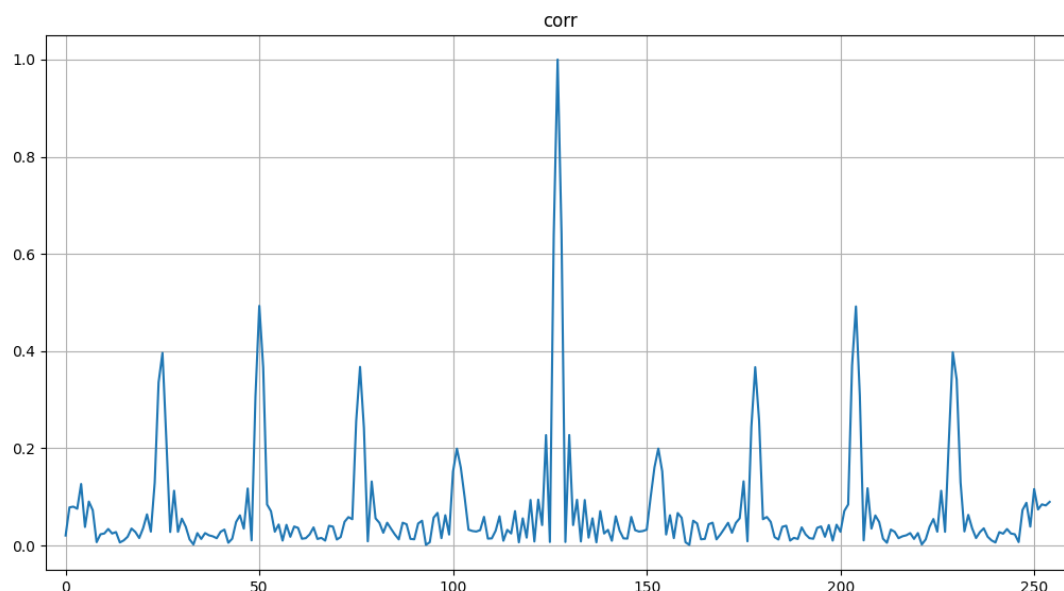


Рис. 3. График автокорреляции PSS

Также по принятым отсчетам OFDM-сигнала были вычислены метрики символьной синхронизации метода Шмидла – Кокса. График автокорреляции преамбулы метода Шмидла – Кокса показан на рисунке 4.

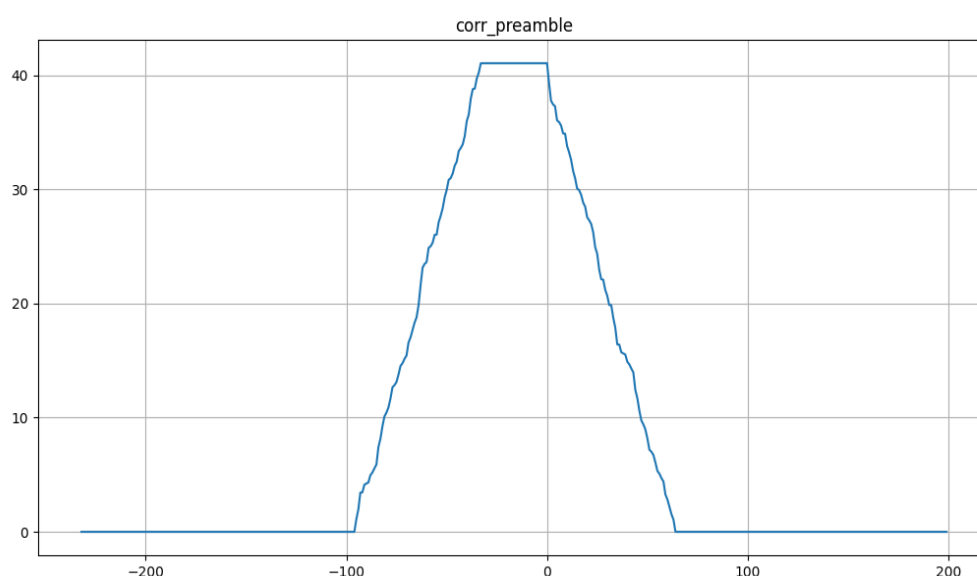


Рис. 4. График автокорреляции преамбулы метода Шмидла – Кокса

Также по принятым отсчетам OFDM-сигнала были вычислены метрики символьной синхронизации метода Минна. График метрики (автокорреляции преамбулы) метода Минна показан на рисунке 5.

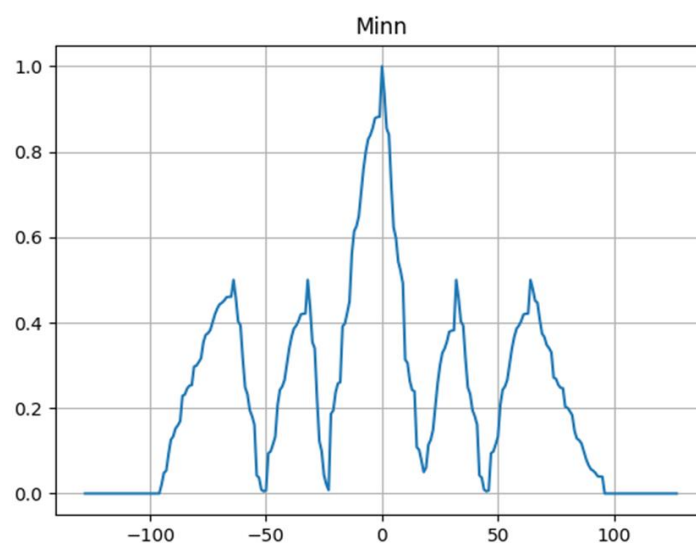


Рис. 5. График автокорреляции преамбулы метода Минна

Для сравнения качественных характеристик указанных методов символьной синхронизации было проведено моделирование методов в канале с нормальным шумом. Сравнительные результаты величины среднеквадратической ошибки (MSE, *аббр. от англ.* Mean Square Error) определения индекса отсчета начала символа от SNR трех разных преамбул показаны на рисунке 6.

Результаты реализации алгоритмов показывают, что их применение для повышения точности символьной синхронизации и снижения ошибок при декодировании OFDM-символов возможно в реальной аппаратуре связи. Синхронизация частоты PSS основана на алгоритме автокорреляционной синхронизации. Смещение частоты, возникающее в результате эффекта Доплера или раз-

ницы частот между передатчиком и приемником, вызывает фазовый сдвиг сигналов и проявляется как линейная фаза автокорреляции сигнала.

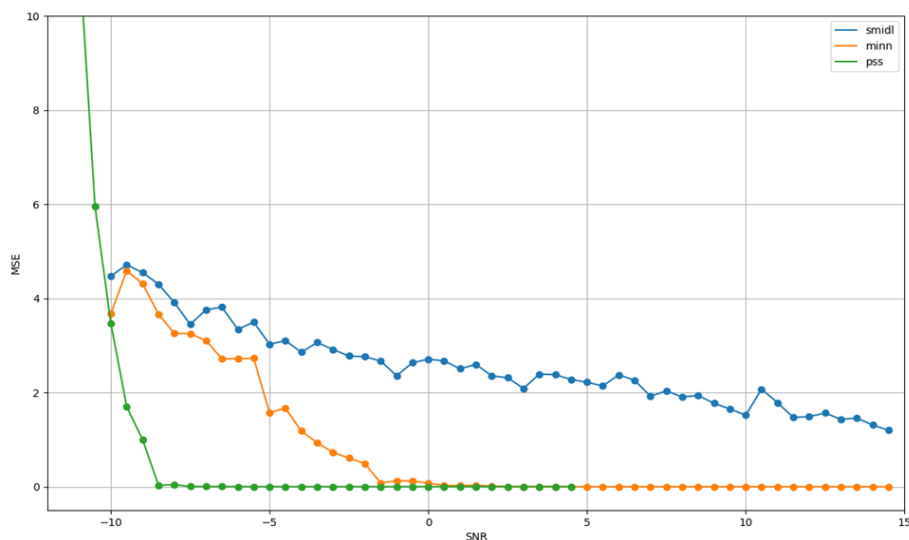


Рис. 6. Величина MSE от SNR трех разных преамбул

В алгоритме автокорреляции фазовый сдвиг определяется посредством анализа разности фаз PSS в OFDM-сигнале, он связан с CFO и может быть оценен как фаза автокорреляционной функции на временном интервале между символами, содержащими отсчеты PSS. Сдвиг частоты вызывает фазовый сдвиг между CP и соответствующей обратной частью OFDM-символа, пропорциональный CFO. Фазовый угол сигнала в CP сравнивается с фазой в конце символа: разность фаз используется для расчета CFO.

Чтобы уменьшить шум, берется среднее значение фазового сдвига по всем выборкам в пределах интервала CP, чтобы повысить точность оценки. Спектрограмма принятого сигнала с наличием частотного смещения после вычисления быстрого преобразования Фурье показана на рисунке 7а.

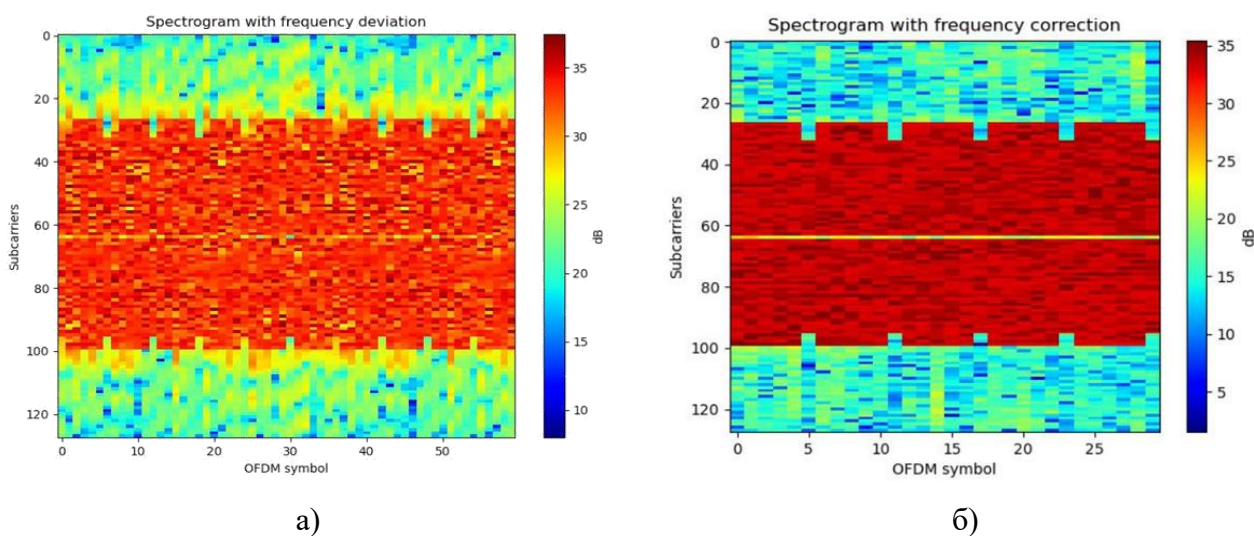


Рис. 7. Спектрограмма принятого сигнала до (а) и после (б) частотной коррекции

Заметно спектральное размытие, вызванное интерференцией между поднесущими при потере ортогональности. Сигнальная диаграмма поднесущих с данными показана на рисунке 8а. Эффект смещения частоты проявляется в повороте точек сигнальной диаграммы. Смещение фазы поднесущей приводит к повороту сигнальной диаграммы на величину, пропорциональную частотному смещению.

Полученные результаты оценки и коррекции смещения частоты показаны на рисунках 7б и 8б. Использование символов PSS с периодом пять последовательных OFDM-символов позволяет оценить значение сдвига частоты, равное 3864,6 Гц.

На рисунке 7б представлена спектрограмма принятого кадра после применения оцененного смещения к полученным отсчетам сигнала. Видно отсутствие помех между поднесущими.

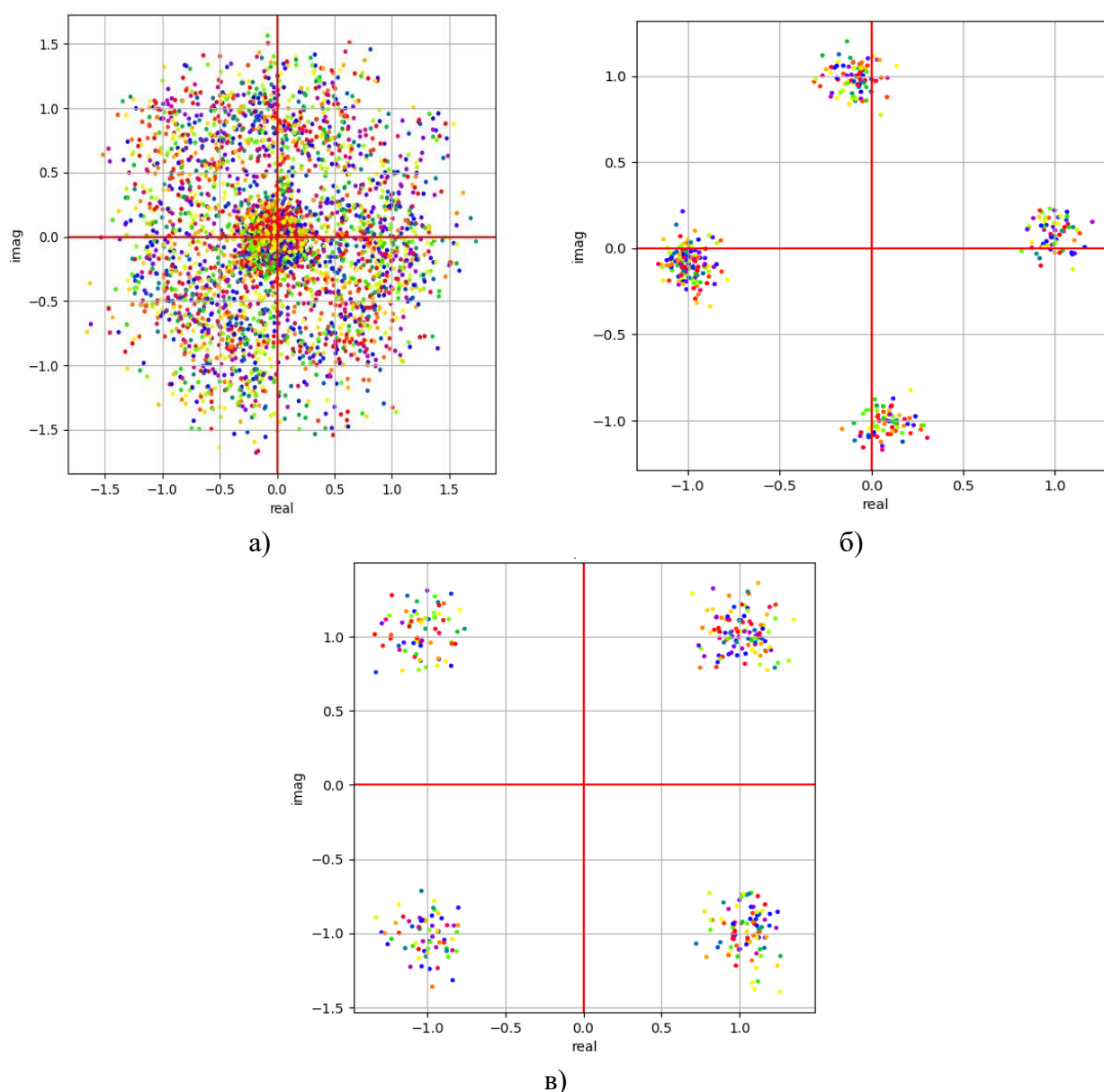


Рис. 8. Сигнальное созвездие до коррекции частотного смещения (а); после коррекции частотного смещения (б); после оценки канала (в)

На рисунке 8б представлено сигнальное созвездие после компенсации искажений, однако остающийся фазовый сдвиг свидетельствует о необходимости проведения оценки канала связи. Эта процедура необходима для получения информации о воздействии радиоканала на передаваемый сигнал и последующей компенсации в приемнике.

Для обеспечения достоверного восстановления передаваемой информации требуется знание характеристик канала и применение методов, компенсирующих его влияние на приемной стороне. Поскольку OFDM-сигнал формируется как сумма ортогональных модулированных поднесущих, каждая из которых представляет собой независимое узкополосное колебание, можно рассматривать прохождение каждой поднесущей через индивидуальный линейный фильтр. Таким образом, характеристика канала на k -й поднесущей может быть описана выражением:

$$H[k] = \frac{Y[k]}{X[k]},$$

где $Y[k]$ – принятый комплексный символ на k -й поднесущей; $X[k]$ – переданный символ на той же поднесущей; $H[k]$ – комплексный коэффициент передачи канала на соответствующей частоте.

Поскольку пилотные сигналы, предназначенные для оценки канала, размещаются лишь на части поднесущих, комплексная частотная характеристика канала $H[k]$ известна только в дискретных точках спектра. Для восстановления значений $H[k]$ на всех поднесущих, используется интерполяция – математическая процедура, позволяющая аппроксимировать характеристики канала в промежуточных частотах.

Коррекция принятого сигнала на поднесущих с данными осуществляется путем эквализации, заключающейся в комплексном делении каждого принятого символа на соответствующий коэффициент передачи канала на данной поднесущей. Это позволяет компенсировать амплитудные и фазовые искажения:

$$\hat{Y}[k] = \frac{Y[k]}{\hat{H}[k]},$$

где $\hat{Y}[k]$ – принятый символ после коррекции; $Y[k]$ – переданный символ на той же поднесущей; $\hat{H}[k]$ – проинтерполированное значение комплексной частотной характеристики канала на поднесущей k .

На рисунке 8в представлено созвездие принятых символов после выполнения оценки и компенсации частотной характеристики канала (эквализации). Видно, что точки сигнального созвездия сгруппированы вблизи теоретически заданных положений на комплексной плоскости, соответствующих использованной модуляционной схеме QPSK. Это свидетельствует о корректной работе алгоритма эквалайзера и об успешной компенсации амплитудных и фазовых искажений, внесенных радиоканалом.

Для количественной оценки точности частотной синхронизации использовалась MSE, рассчитываемая по формуле:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{f}_{off} - f_{off})^2,$$

где \hat{f}_{off} – оценка нормированного частотного сдвига; f_{off} – истинное (заданное) значение частотного сдвига; n – количество единиц наблюдения.

Для каждого значения SNR проводилось моделирование (1000 реализаций), в ходе которого вычислялись оценки \hat{f}_{off} с использованием двух методов синхронизации: по PSS и по CP.

Также стоит отметить, что рост MSE при высоких значениях SNR может быть связан с численными неточностями, так как измерения проводились во временной области. Возможные причины включают ошибки округления, влияние фазового шума и ограниченную точность корреляционных методов.

Показатели MSE двух алгоритмов оценки CFO отражены на рисунке 9. Алгоритм на основе PSS дает меньшую MSE из-за большего расстояния между соответствующими OFDM-символами, используемыми для оценки.

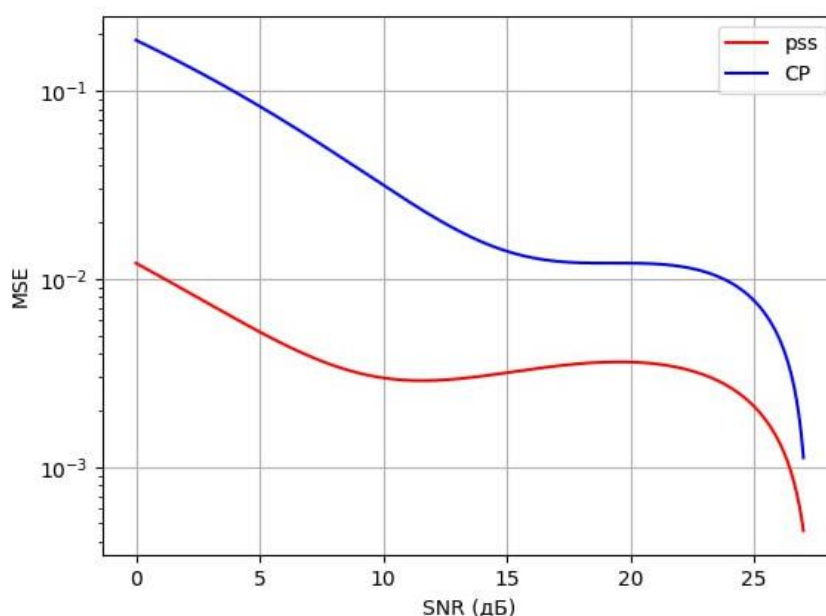


Рис. 9. Величина MSE коррекции частоты в зависимости от SNR

Заключение

В статье представлены результаты реализации OFDM-системы связи на основе SDR с использованием программной платформы LibIO+PyADI и устройств Adalm Pluto. Экспериментально оценена работоспособность выбранных алгоритмов временной и частотной синхронизации. Разработанное программное обеспечение продолжает развиваться и используется для реализации и оценки современных методов обработки сигналов, используемых в OFDM-системах, в реалистичных сценариях. Экспериментальные результаты показы-

вают, что синхронизация символов на основе корреляции позволяет выбирать выборки OFDM в окне дискретного преобразования Фурье, но для правильного приема данных необходимо корректировать сдвиг частоты. Оценка смещения частоты на основе циклического префикса и алгоритма автокорреляционной синхронизации на основе PSS реализована в виде программного обеспечения. Для оценки CFO использование корреляции символов PSS дает лучшие результаты и позволяет корректировать сдвиг частоты с лучшими характеристиками в смысле ошибки MSE.

Результаты могут использоваться при выборе оптимального метода синхронизации и демонстрируют возможности систем SDR для практической реализации и проверки алгоритмов синхронизации.

Литература

1. Ahmadi S. LTE-Advanced: A Practical Systems Approach to Understanding the 3GPP LTE Releases 10 and 11 Radio Access Technologies. Oxford: Elsevier Science, 2014.
2. Tuninato R., Riviello D. G., Garello R., Melis B., Fantini R. A Comprehensive Study on the Synchronization Procedure in 5G NR with 3GPP-Compliant Link-Level Simulator // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2023. Iss. 1. P. 111. DOI: 10.1186/s13638-023-02317-5. EDN: VSWKBI
3. Smaini L. RF Analog Impairments Modeling for Communication Systems Simulation: Application to OFDM-Based Transceivers. John Wiley & Sons, 2012. DOI: 10.1002/9781118438046
4. Collins T., Getz R., Wyglinski A. Software-Defined Radio for Engineers. Artech House, 2018. 378 p.
5. Cho Y. S., Kim J., Yang W. Y., Kang Ch. G. MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB. John Wiley & Sons, 2010.
6. Morelli M., Kuo C.-C. J., Pun M.-O. Synchronization Techniques for Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA): A Tutorial Review // Proceedings of the IEEE. 2007. Vol. 95. Iss. 7. PP. 1394–1427. DOI: 10.1109/JPROC.2007.897979
7. Minn H., Bhargava V. K., Letaief K. B. A Robust Timing and Frequency Synchronization for OFDM Systems // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2003. Vol. 2. Iss. 4. PP. 822–839. DOI: 10.1109/TWC.2003.814346
8. Shi K., Serpedin E. Coarse Frame and Carrier Synchronization of OFDM Systems: A New Metric and Comparison // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2004. Vol. 3. Iss. 4. PP. 1271–1284. DOI: 10.1109/TWC.2004.828282
9. Yagli K., Aldirmaz Colak S. Preamble-Based Symbol Timing Algorithms in OFDM Systems // The European Journal of Research and Development. 2022. Vol. 2. Iss. 2. PP. 445–458. DOI: 10.56038/ejrnd.v2i2.91
10. Wang M. M., Agrawal A., Khandekar A., Aedudodla S. Preamble Design, System Acquisition, and Determination in Modern OFDMA Cellular Communications: An Overview // IEEE Communications Magazine. 2011. Vol. 49. Iss. 7. PP. 164–175. DOI: 10.1109/MCOM.2011.5936170

11. Morelli M., Moretti M. Carrier Frequency Offset Estimation for OFDM Direct Conversion Receivers // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2012. Vol. 11. Iss. 7. PP. 2670–2679. DOI: 10.1109/TWC.2012.051512.120057

12. Golnari A., Shabany M., Nezamalhosseni A., Gulak G. Design and Implementation of Time and Frequency Synchronization in LTE // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. 2015. Vol. 23. Iss. 12. PP. 2970–2982. DOI: 10.1109/TVLSI.2014.2387861

**Статья поступила 23 декабря 2024 г.
Одобрена после рецензирования 06 мая 2025 г.
Принята к публикации 23 июня 2025 г.**

Информация об авторах

Калачиков Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехнических систем Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики. E-mail: 330rts@gmail.com

Попович Иван Артемьевич – техник НИЛ-54 Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики

Пушница Владимир Алексеевич – техник НИЛ-54 Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2025-13-1-23-39>
EDN: TOKWFI

Experimental Implementation of OFDM Synchronization Algorithms Using Software Radio System (SDR)

A. Kalachikov ✉, I. Popovich, V. Pushnitsa

Siberian State University of Telecommunications and Informatics,
Novosibirsk, 630102, Russian Federation

Statement of the problem. Software radio allows flexible implementation of algorithms for processing signals in radio communications. Reception of signals is possible only with synchronization in the time and frequency domains, taking into account the properties of the signals. The paper presents a prototype of a communication system with orthogonal frequency multiplexing, implemented on the Adalm Pluto platform using the libiio library. **The aim of the study** is to analyze and implement software algorithms for symbolic and frequency synchronization when receiving signals with orthogonal frequency multiplexing. For this purpose, a preamble based on the Zadoff – Chu sequence is used. The frequency shift was estimated using two **methods**: using a cyclic prefix of symbols and using the Zadoff – Chu preamble. **Novelty.** The developed algorithms are implemented as programs, without using specialized libraries of ready-made modules and tested on the Adalm Pluto hardware platform. The obtained **results** confirm the operability of the proposed solutions, which allows them to be used in software radio systems when implementing communication channels of various autonomous systems. **The practical significance** lies in the experimental confirmation of the functionality of the proposed solutions, which allows their use in software radio systems when implementing communication channels for various autonomous systems.

Key words: software radio, time synchronization of signal reception, frequency synchronization of signal reception

Information about Authors

Kalachikov Alexander – Ph. D. of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Radio Engineering Systems (Siberian State University of Telecommunications and Informatics). E-mail: 330rts@gmail.com

Popovich Ivan – Technician of NIL-54 (Siberian State University of Telecommunications and Informatics)

Pushnitsa Vladimir – Technician of NIL-54 (Siberian State University of Telecommunications and Informatics)