

Алгоритмы получения символьной синхронизации при использовании цифровой обработки сигналов

Филимонов Василий Александрович

кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры Общепрофессиональных дисциплин Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия, awgnp@yandex.ru

Усов Николай Александрович

кандидат технических наук, доцент, старший преподаватель кафедры Общепрофессиональных дисциплин Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия, nauvrn@rambler.ru

Остроумов Олег Александрович

кандидат технических наук, докторант Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия, oleg-26stav@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение: Система синхронизации является одной из основных частей любой системы передачи данных. Использование когерентного приема для обеспечения большей помехоустойчивости в канале связи в условиях помех определило необходимость использования систем синхронизации. Такие системы строятся на основе схем фазовой автоподстройки, которая формирует опорное колебание из принятого сигнала. Устройство синхронизации является составной частью демодулятора модулированных (манипулированных) сигналов. Одной из основных характеристик демодулятора таких сигналов является помехоустойчивость. Система синхронизации позволяет повысить помехоустойчивость приема сигналов за счет автоподстройки фазы принятого и опорного сигнала, которая неизбежно возникает из-за наличия помех в канале связи. Влияние неточности синхронизации на помехоустойчивость демодуляции при фиксированных отклонениях синхронизации определяет актуальность работы. **Цель исследования:** анализ и разработка алгоритмов тактовой синхронизации, моделирование разработанных алгоритмов символьной синхронизации на примере сигнала с ОФМ-2 при демодуляции его оптимальным некогерентным способом, проверка работоспособности, рассматриваемых алгоритмов. **Методы:** анализ, моделирование в среде MatLab. **Результаты:** проведена оценка влияния точности символьной синхронизации на помехоустойчивость оптимального некогерентного приема сигналов с относительной фазовой модуляцией, разработаны алгоритмы тактовой синхронизации, позволяющие получить заданную точность синхронизации. **Практическая значимость:** результаты исследования могут быть использованы при проектировании и построении систем передачи данных, использующих различные виды цифровой модуляции сигналов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: синхронизация; модулированные сигналы; помехоустойчивость; модулятор; демодулятор; цифровая обработка сигналов.

Введение

Современное общество является информационным [1, 2], поэтому в нем актуальны вопросы обеспечения обмена информацией. Одним из элементов процесса обмена информацией в различных физических средах является модулятор сигналов. При практической реализации демодуляторов сигналов цифровой модуляцией синхронизация является их неотъемлемой частью. Без нее демодуляция этих сигналов в принципе не возможна. Несмотря на практическую важность этого вопроса, он очень слабо освещен в научно-технической литературе. В некоторых работах материал настолько «усилен» математикой, что найти в нем алгоритмы для практической реализации весьма сложно. Немногочисленность работ по данной тематике отчасти можно объяснить тем, что не существует единых правил построения системы синхронизации. Во многих случаях ее построение напрямую зависит от способа построения системы передачи данных в целом. Однако существуют общие принципы построения различных видов синхронизаций [3, 4].

Демодуляторы сигналов цифровой модуляции предполагают наличие синхронизации [5, 6]. Разные методы демодуляции требуют разные наборы видов синхронизаций. В общем случае различают следующие виды (уровни) синхронизации: фазовая; частотная; символьная; кадровая [7, 8].

Независимо от метода приема сигналов с цифровой модуляцией, для их демодуляции необходима символьная синхронизация. Символьную синхронизацию также называют тактовой или временной.

Символьная (тактовая, временная) синхронизация заключается в знании демодулятором границ принимаемых сигнальных посылок.

Для демодулятора построенного на основе согласованного фильтра (СФ) выходной сигнал устройства символьной синхронизации (синхросигнал), используемый для управления решающим устройством, представляет собой последовательность коротких импульсов (синхроимпульсов) совпадающих по времени с концом обработки каждой сигнальной посылки (моменты принятия решения). Применительно к ЦОС, синхросигнал представляет собой последовательность нулевых отсчетов с вставками единичных отсчетов (синхроимпульсов) совпадающих с окончанием символьных интервалов. Для демодулятора построенного на основе коррелятора, устройство (алгоритм) символьной синхронизации должно выдавать временной интервал на котором производится накопление энергии принятой посылки. Однако с учетом того, что длительность передаваемой посылки на приеме известна, временной интервал может быть сформирован на основе синхросигнала.

В приемном устройстве (демодуляторе и декодере), обычно, отсутствует информация о моментах времени начала (окончании) символьных интервалов. Не имея такой информации демодулятор не будет согласован с принимаемым сигналом. В большинстве систем связи решение этой проблемы основано на извлечении этой недостающей информации (синхроинформации) из принимаемого сигнала.

Синхроинформацией называется объем данных, который необходим приемнику (демодулятору) для обеспечения соответствующего вида согласования с принимаемым сигналом.

Кроме этого, под синхронизацией может пониматься согласование, процесс приведения к одному значению одного или нескольких параметров разных объектов [9].

Синхроинформация содержится непосредственно в информационном сигнале или «закладывается» в специальный синхронизирующий сигнал (канал синхронизации). Оба варианта имеют свои преимущества и недостатки.

Применение специального синхронизирующего сигнала связано с необходимостью выделения части энергетических, частотных или временных ресурсов системы связи на синхронизацию. Выделенный канал синхронизации функционирует в несколько иных условиях, чем информационный канал, вследствие разнесения по частоте или времени, что является недостатком, свойственным этому варианту [10]. Однако наличие синхронизирующего сигнала, который наделен специальными свойствами, повышает надежность синхронизации и позволяет упростить техническую реализацию устройств (алгоритмов) синхронизации.

Основная часть

В системах пакетной радиосвязи, когда поделенные на блоки (пакеты, кадры) данные передаются с временными паузами, обычно используют синхропреамбулы, представляющие собой сигналы специальной формы, передаваемые перед информационной частью. Применение таких сигналов уменьшает время вхождения в синхронизм по сравнению с синхронизацией по информационному сигналу. Кроме того, для некоторых видов сигналов с цифровой модуляцией получить необходимую синхроинформацию по информационному сигналу невозможно. При использовании синхропреамбул в некоторых случаях можно не производить слежение за параметрами сигнала в ходе приема информационной части пакета. Производить слежение за параметрами сигнала при приеме информационных символов или нет, зависит от конкретной системы передачи данных и не имеет однозначного ответа.

Синхропреамбула может содержать в себе сигналы для различных систем синхронизаций, например, немодулированное гармоническое колебание – для синхронизации по частоте; гармоническое колебание, модулированное меандром с символьной частотой – для систем тактовой синхронизации; модулированный сигнал, передающий уникальную кодовую комбинацию – для кадровой синхронизации.

Синхронизация по информационному сигналу лишена вышеуказанных недостатков, однако надежность синхронизации по случайному сигналу, каковым является информационный, снижается, так как объем текущей синхроинформации – случайная величина. В отдельные промежутки времени синхроинформации оказывается недостаточно или она может отсутствовать. Например, при передаче серии 0 или 1, сигнал с цифровой фазовой модуляцией (ЦФМ) [11] или цифровой частотной модуляцией (ЦЧМ) [12] будет представлять собой не манипулированное гармоническое колебание. По такому сигналу невозможно определить границы символьных интервалов. Для устранения серий 1 или 0 битовый поток на передаче предварительно подвергается скремблированию, а после демодуляции производится обратная процедура – дескремблирование. Кроме того, при синхронизации по информационному сигналу, во время вхождения в синхронизм часть информации будет утеряна, так как демодуляция в это время невозможна [13].

Сглаживание фронтов сигнальных посылок, помехи, случайный характер изменений параметров среды распространения искажают передаваемый сигнал. В таких условиях можно говорить не об измерении, а только об оценке (измерении с некоторой точностью) неизвестных истинных значений параметров сигнала с цифровой модуляцией, необходимых для его демодуляции (синхропараметров). В этом случае термин «синхронизм» предполагает определенную точность соответствия между параметрами принимаемого сигнала и параметрами опорного колебания и меток времени, формируемых в приемнике (демодуляторе). То-

гда устройство синхронизации производит вычисление с некоторой точностью синхропараметров сигнала с цифровой модуляцией и формирование необходимого опорного колебания (для частотной и фазовой синхронизаций) и меток времени (для тактовой и кадровой синхронизаций) по результатам полученных измерений (оценок).

При использовании некогерентных методов демодуляции двухпозиционных сигналов на основе СФ, сигнал на выходе демодулятора, до принятия решения о переданном символе, представляет собой последовательность отсчетов (при использовании ЦОС), огибающая которых схематично представлена на рис. 1 ($s(t)$). Синхроимпульсы должны вырабатываться в моменты времени окончания сигнальных посылок – идеальные синхроимпульсы (рис. 1). Реальные синхроимпульсы, вырабатываемые устройством (алгоритмом) тактовой синхронизации могут отличаться от идеальных.

Влияние неточности символьной (тактовой) синхронизации на вероятность ошибки зависит от наличия (отсутствия) смены передаваемого символа [14, 15].

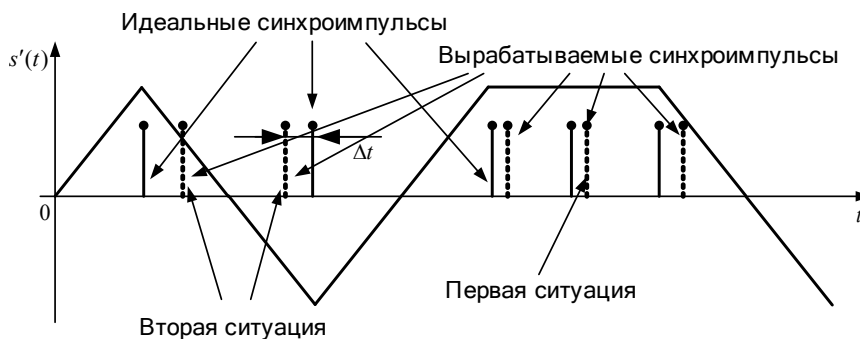


Рис. 1. Погрешность символьной синхронизации

Если на интервале длительности двух посылок (рис. 1) не произошло изменения символа (первая ситуация), то ошибка синхронизации не скажется на верности приема символа. Если два последовательных символа различны (вторая ситуация), ошибка тактовой синхронизации Δt (разница между положениями идеального и выработанным устройством синхроимпульсами) приведет к уменьшению величины h^2 (отношение энергии посылки приходящейся на один бит к спектральной плотности мощности белого шума $h^2 = \frac{E_b}{N_0}$) в $1 - \frac{2|\Delta t|}{T}$ раз, где T – длительность сигнальной посылки [2]. При этом погрешность символьной синхронизации не должна приводить к срыву синхронизма, т. е. должно выполняться условие $|\Delta t|/T < 0,5$.

Если передаваемые символы независимы и принимают значения с равными вероятностями 0,5 (дискретный симметричный канал), вероятность ошибочного приема символа при погрешности синхронизации Δt для оптимального некогерентного приема сигналов с относительной фазовой манипуляцией (ОФМ) равна

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{4}e^{-h^2} + \frac{1}{4}e^{-h^2\left(1 - \frac{2|\Delta t|}{T}\right)}, \tag{1}$$

В формуле (1) первое слагаемое учитывает первую ситуацию, второе слагаемое – вторую (см. рис. 1).

Графики (рис. 2) показывают влияние ошибки символьной синхронизации на помехоустойчивость приема. С увеличением погрешности синхронизации происходит уменьшение вероятности правильного приема символов (увеличение вероятности ошибки). Чем меньше требуемая вероятность ошибки, тем существеннее начинает сказываться неточность синхронизации [16, 17]. Анализ графиков позволяет сделать вывод, что смещение тактовой синхронизации относительно идеальной на 5 % при заданной вероятности ошибки на символ $p_{\text{ош}} = 10^{-5}$ равносильно ухудшению отношения сигнал/шум h^2 на 1 дБ.

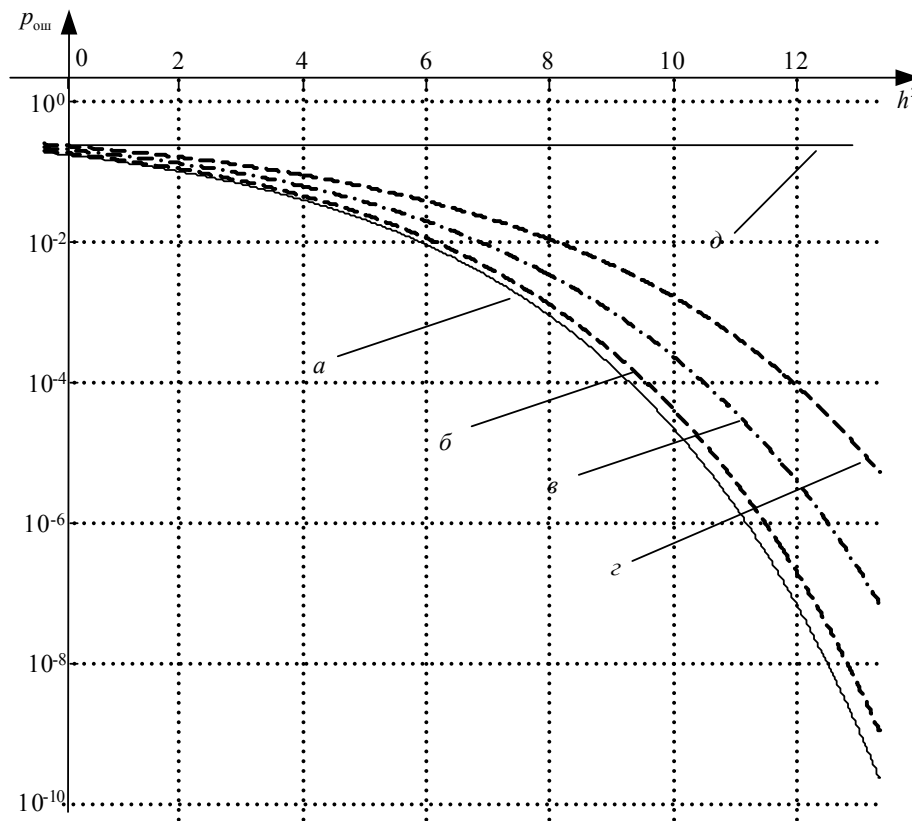


Рис. 2. Зависимость вероятности ошибочного приема символа от h^2 при относительной погрешности тактовой синхронизации $|\Delta t|/T$ для сигнала с ОФМн: *a* – $|\Delta t|/T = 0$; *б* – $|\Delta t|/T = 0,05$; *в* – $|\Delta t|/T = 0,15$; *г* – $|\Delta t|/T = 0,25$; *д* – $|\Delta t|/T = 0,5$.

При относительной ошибке тактовой синхронизации $|\Delta t|/T = 0,5$ вероятность ошибки равна 0,5 (см. рис. 2 *д*). Это связано с тем, что в этом случае вырабатываемые синхроимпульсы находятся посередине между их идеальными положениями.

Принципы построения систем (алгоритмов) тактовой синхронизации при использовании ЦОС.

Несмотря на различные способы реализации систем синхронизаций, существуют некоторые общие подходы (принципы) их построения [18, 19]. Это связано с тем, что основной задачей любого вида синхронизации является измерение (оценка) неизвестного параметра (синхропараметра) сигнала. В общем случае, для выполнения измерения какого-либо параметра, входной сигнал необходимо преобразовать к виду, позволяющему произвести оценку

этого параметра. При этом, чем дольше по времени производится измерение параметра, тем точнее будет его оценка. Если оценка параметра производится на длительности одной символической посылки (точечная оценка), то для увеличения точности результаты измерений необходимо усреднить. В этом случае также выполняется тот же принцип – чем дольше по времени производится усреднение, тем точнее оценка измеряемого параметра.

Обобщенная структурная схема системы символической синхронизации [8], которая подходит так же и для частотной, представлена на рис. 3.

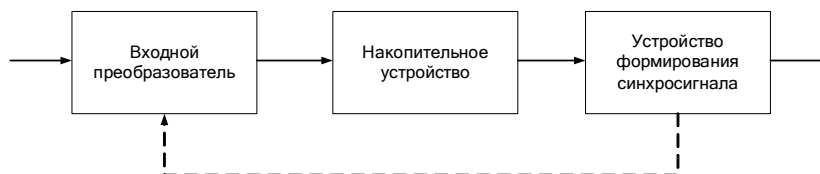


Рис. 3. Структурная схема системы синхронизации

Входной преобразователь изменяет входной сигнал в сигнал, удобный для накопительного устройства или (и) производит точечную оценку синхропараметра. При этом, в большинстве случаев, производится «снятие» (удаление) информации о передаваемом символе. В некоторых случаях входной преобразователь может отсутствовать. Усредненный в накопительном устройстве сигнал (или результат измерений) преобразуется в синхросигнал устройством формирования синхросигнала. Усреднение результатов измерений всегда связано с некоторой задержкой сигнала, поэтому необходимо согласовать по времени синхросигнал и демодулируемый сигнал.

В зависимости от наличия (отсутствия) обратной связи устройства синхронизации делятся на замкнутые и разомкнутые. Устройство (алгоритм) синхронизации называется замкнутым, если входной преобразователь и устройство формирования синхросигнала замкнуты петлей обратной связи (см. рис. 3). Петля обратной связи замыкается не на сам входной преобразователь, а на устройство, подстраивающее параметр сигнала. При отсутствии обратной связи устройство (алгоритм) называют разомкнутым.

Оба вида построения системы синхронизации имеют свои преимущества и недостатки. Так в замкнутых системах петля обратной связи уменьшает возможность увеличивать время усреднения в накопительном устройстве. С другой стороны, без коррекции параметров сигнала по петле обратной связи их измерения производятся в «худших» условиях. Тем не менее, при разработке системы передачи данных необходимо по возможности использовать разомкнутые системы синхронизаций.

В некоторых системах синхронизаций измеряемый синхропараметр может оцениваться по многоступенчатой схеме, например, грубая и точная оценка. Возможно также получение нескольких видов синхронизаций по одному измерению. При выборе схемы синхронизации нужно учитывать все необходимые виды синхронизаций и очередность их получения, т. е. данный вопрос надо рассматривать комплексно.

Необходимый набор видов синхронизаций и порядок их получения зависит от ряда факторов (вида цифровой модуляции, структуры передаваемых данных, метода демодуляции и т. д.). В большинстве случаев он «закладывается» разработчиком и лишь в некоторых случаях предоставляется возможность выбора [20].

Алгоритмы символьной синхронизации.

При использовании ЦОС алгоритмы тактовой синхронизации вырабатывают синхроимпульсы, представляющие собой отсчеты с единичной амплитудой в моменты времени соответствующие границам принимаемых сигнальных посылок. Они могут быть выполнены как по замкнутой, так и по разомкнутой схеме (см. рис. 3).

Замкнутые алгоритмы символьной синхронизации основаны на сравнении откликов двух корреляторов (запаздывающего и опережающего). При равенстве этих откликов временное положение идеального синхроимпульса находится посередине. При их неравенстве, на следующей сигнальной посылке производится смещение временного положения в сторону максимального отклика. Далее процедура повторяется. Подобный способ тактовой синхронизации применен в изделии АТ-3004Д.

Исходя из этого краткого описания, можно сделать вывод, что усреднение результатов измерения не производится. Следовательно, точность полученной оценки временного положения вырабатываемого синхроимпульса будет сильно зависеть от отношения сигнал/шум, поэтому в виду нецелесообразности использования этого типа алгоритмов, они не будут рассматриваться.

Разомкнутые алгоритмы символьной синхронизации лишены указанного недостатка. Кроме того, при использовании ЦОС их реализация получается простой и эффективной, и в них отсутствует недостаток, указанный в [6].

В качестве примера рассмотрим разомкнутый алгоритм символьной синхронизации для сигнала с ОФМ-2 при демодуляции его оптимальным некогерентным способом с использованием СФ. В этом случае на вход алгоритма синхронизации поступает сигнал, показанный на рис. 1. Его программная модель реализована в среде Matlab и представлена в листинге 1.

Листинг 1

```

clc;
clear;
%% *** Получение предварительно обработанного сигнала *****
% ***** исходные данные *****
fs = 8000; % частота дискретизации
fc = 1800; % частота передатчика
B = 100; % скорость передачи
T = fs/B; % длительность посылки
inf = [1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1]; % битовый поток
b = [0 inf]; % добавление фазового эталона
% сигнальные символы для сигнала относительной фазовой манипуляцией
% (биполярные)
b_dpsk = dpskmod(b, 2);
% манипулирующий сигнал
u_dpsk = real(rectpulse(b_dpsk, T));
figure;
plot(u_dpsk); grid on;
title('Манипулирующий сигнал');
%% *****
% *** канал связи *****

```

```

s_dpsk = awgn(u_dpsk, 100); % добавление шума
%% *** Демодуляция на основе СФ
h_sf = ones(1, T); % ИХ СФ
dem = (1/80)*filter(h_sf, 1, s_dpsk); % фильтрация СФ
figure;
plot(dem); grid on;
title('Входной сигнал для алгоритма символьной синхронизации');
    
```

Алгоритм синхронизации для сигналов такой формы (подобная форма будет и при обработке сигналов с ЦЧМ-2 представлен в виде блок-схемы на рис. 4 [8].

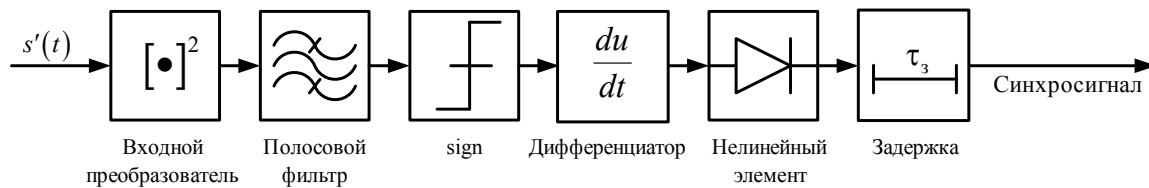


Рис. 4. Блок-схема разомкнутого алгоритма символьной синхронизации

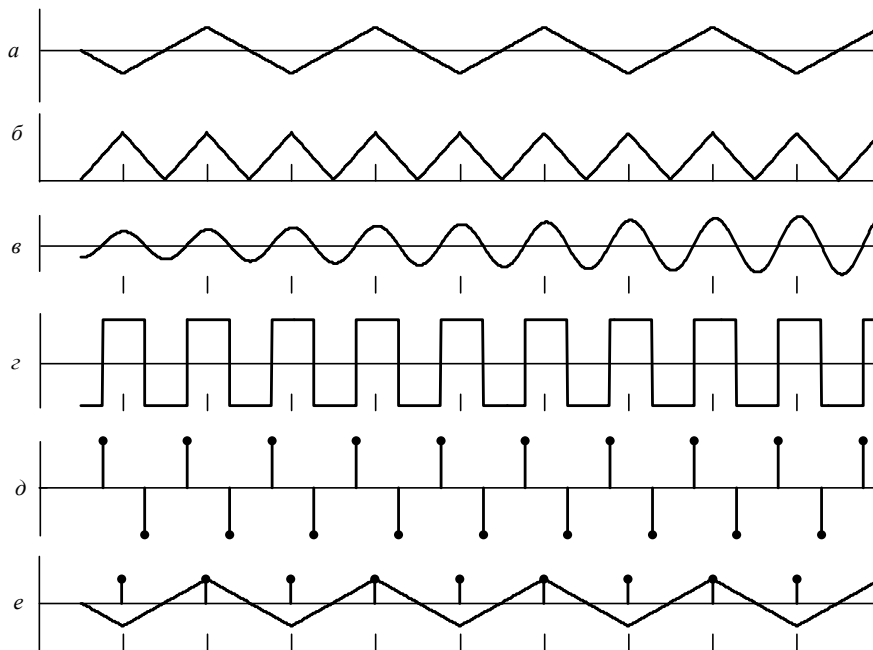


Рис. 5. Принцип работы алгоритма символьной синхронизации

Во входном преобразователе алгоритма для указанной формы входного сигнала выполняется операция взятия модуля каждого отсчета, которая может быть заменена операцией возведения в квадрат. В качестве накопительного устройства выступает полосовой фильтр. Остальная часть блок-схемы является формирователем синхроимпульсов.

Рассмотрим принцип работы данной схемы (рис. 4). При битовом потоке на передаче состоящем из чередования 1 и 0 (10101010...) сигнал после входного преобразователя пред-

ставляет собой периодическую последовательность треугольных импульсов (близких к треугольным) с периодом следования равным длительности сигнальной посылки T (рис. 5, б). Дополните набранную программу строками листинга 2.

Листинг 2

```
u_preob = abs(dem); % входной преобразователь
figure;
plot(u_preob); grid on;
title('Сигнал после входного преобразователя');
```

Входной преобразователь в большинстве случаев (и в данном в частности) является нелинейным устройством (алгоритмом), т. е. обратное восстановление сигнала не возможно. Полученная, в начале передаваемого сигнала, периодическая последовательность треугольных импульсов имеет в своем спектральном составе 1-ю гармонику с частотой численно равной скорости передачи – основная частота $F_1 = 1/T$. Дополним программу строками листинга 3.

Листинг 3

```
%% *** Оценка спектра ****
g = (1/fs)*fft(u_preob, fs); % ДПФ за время 1 сек.
g = abs(g); % модуль ДПФ
g = fftshift(g); % пересортировка коэффициентов ДПФ
kk = -fs/2:1:fs/2 - 1; % значения частот для графика
figure;
plot(kk, g); grid on;
title('Оценка спектра сигнала после входного преобразователя');
```

Выделение этой гармоники во временной области производится с помощью полосового фильтра, который выполняет роль накопительного устройства. Дополните программу строками листинга 4.

Листинг 4

```
% полосовой фильтр, представляющий собой
% БИХ-фильтр второго порядка
sinhra_filter = filter([1 -1], [1 -2*cos(2*pi*(B/fs+0.001)) 0.999], u_preob);
% просмотр характеристик фильтра
fvtool([1 -1], [1 -2*cos(2*pi*(B/fs+0.001)) 0.999]);
figure;
plot(sinhra_filter); grid on;
title('Выделенная гармоника');
```

В программе выделяющий фильтр представляет собой рекурсивный полосовой фильтр, в нерекурсивной части которого коэффициенты равны $[1, -1]$, т. е. это цифровой дифференциатор, где каждый предыдущий отсчет вычитается из вновь поступающего, таким образом удаляется постоянная составляющая. Рекурсивная часть является, по сути, затухающим генератором с частотой, равной скорости передачи (в аналоговой технике такому фильтру соответствует фильтр в виде одиночного колебательного контура). Полоса пропускания филь-

тра, теоретически, должна выделять только составляющую с частотой F_1 . Тогда, при наличии сигнала на входе фильтра, на его выходе будет гармоническое колебание с частотой, равной скорости передачи. Полученный сигнал представлен на рис. 5, в.

Выделенная гармоника не будет совпадать по фазе с входным сигналом. Смещение (сдвиг начальной фазы) зависит от порядка фильтра, однако это легко устраняется задержкой демодулируемого сигнала или синхросигнала на некоторое число отсчетов. Тогда при выборе моментов времени формирования синхроимпульсов можно использовать любое значение фазы выделенной гармоники. Так, если полученную гармонику считать синусоидой, то выбрав значение фазы равное $\pi/2$ моменты времени синхроимпульсов будут соответствовать максимумам. Однако при воздействии шума наилучшим значением фазы являются 0 или π , так как в эти моменты график синусоидальной функции имеет наибольшую скорость изменения (максимальное значение производной). Кроме того, такой выбор позволяет упростить реализацию.

Операция (блок) «sign» преобразует гармоническое колебание в биполярный сигнал прямоугольной формы. Если значение на его входе больше нуля, на выходе будет единица, а при значениях меньше и равных нулю – минус единицу (рис. 5, г). Дополните программу строками листинга 5.

Листинг 5

```
sinhra_puls = sign(sinhra_filter ); % нелинейная операция sign
figure;
plot(sinhra_puls); grid on;
title('Выделенная гармоника после операции sign');
```

Полученные биполярные импульсы поступают на блок «Дифференциатор». Для цифрового сигнала этот блок представляет собой фильтр с передаточной функцией $H(z) = 1 - z^{-1}$. Тогда на его выходе получают отсчеты противоположных полярностей в моменты смены полярности сигнала прямоугольной формы (рис. 5, д). Дополните программу строками листинга 6.

Листинг 6

```
sinhra_dif = filter([1 -1], 1, sinhra_puls); % дифференциатор
figure;
stem(sinhra_dif); grid on;
title('Сигнал после дифференциатора');
```

«Нелинейный элемент», задачей которого является приравнять к нулю отсчеты с отрицательными значениями, можно выполнить с помощью нелинейной операцией if. Однако с учетом того, что отсчеты на входе блока принимают только три возможных значения (0, -2 и 2), для решения этой задачи можно применить более оригинальный способ. Дополните программу строками листинга 7.

Листинг 7

```
sinhra = sign(sinhra_dif - 1) + 1; % нелинейный элемент
sinhra = sinhra/2; % значения синхроимпульсов равны 1
figure;
stem(sinhra); grid on;
```

```
title('Синхросигнал');
```

Таким образом, на выходе блока вырабатываются синхроимпульсы с частотой следования численно равной скорости передачи, но со сдвигом по фазе, который устраняется с помощью задержки, которую программно можно выполнить используя функцию filter() (рис. 5, e). Дополните программу строками листинга 8.

Листинг 8

```
sinhra = filter([zeros(1, 24) 1], 1, sinhra); % задержка сигнала
figure;
plot(dem); grid on; hold on;
stem(sinhra, 'r');
title('Входной сигнал и синхросигнал');
```

В качестве накопительного устройства в программе используется полосовой фильтр. Отметим, что его роль заключается в выделении только одной составляющей с частотой численно равной скорости передачи. Соответственно, чем уже полоса пропускания фильтра, тем меньше в выделенном сигнале других составляющих и, следовательно, точность положения синхроимпульсов выше. При использовании ЦОС возможно применения как БИХ так и КИХ-фильтров. В набранной программе использовался БИХ-фильтр на основе одного би-квадратного звена высокой добротности (полюса приближаются к единичной окружности). Применение фильтров такого типа в качестве накопительного устройства приводит к быстрому вхождению в синхронизм, благодаря низкому порядку фильтра (переходные процессы по времени малы).

Синтез полосового КИХ-фильтра с узкой полосой пропускания приведет к его большому порядку, длительным переходным процессам и, как следствие, большому времени вхождения в синхронизм. Однако при целочисленном отношении f_s/B , где B – символьная скорость передачи, можно предложить альтернативный вариант – КИХ-фильтр ИХ которого представляет собой отсчеты цифровой гармоники с частотой численно равной B :

$$h = \sin(2\pi nB / f_s + \varphi_0),$$

где n – номер коэффициента фильтра, $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$; φ_0 – произвольное значение начальной фазы.

Порядок фильтра ($N - 1$) не может быть произвольным. ИХ должна содержать целое число периодов цифровой гармоники. В этом случае АЧХ фильтра на частоте $f = 0$ равна 0. Программная реализация фильтра представлена в листинге 9.

Листинг 9

```
clc;
clear;
fs = 8000; % частота дискретизации
B = 100; % символьная скорость передачи
T = fs/B; % длительность сигнальной посылки в отсчетах
N = 4; % число периодов гармоники в ИХ
n = 0:1:N*T - 1; % нормированное время для ИХ
fi = pi/4; % произвольное значение начальной фазы
h = sin(2*pi*n*B/fs + fi); % ИХ фильтра
```

```
% M = 1/sum(h.*h); % масштабный множитель
% h = M*h; % введение масштабного множителя
figure
stem(h); grid on;
title('ИХ фильтра');
fvtool(h, 1); % визуализация характеристик фильтра
```

При введении масштабного множителя возможно использования формата представления чисел с фиксированной точкой.

Использование в качестве накопительного устройства КИХ-фильтра увеличивает вычислительную сложность алгоритма и время вхождения в синхронизм (окончание переходных процессов). Однако система символьной синхронизации с КИХ-фильтром всегда устойчива.

В программе на основе листингов 1-8 замените строки листинга 4 строками листинга 10 и измените задержку в строке листинга 8 на 19.

Листинг 10

```
% полосовой КИХ-фильтр
N = 8; % число периодов гармоники в ИХ
n = 0:1:N*T - 1; % нормированное время для ИХ
fi = pi/2; % произвольное значение начальной фазы
h = sin(2*pi*n*B/fs + fi); % ИХ фильтра
sinhra_filter = filter(h, 1, u_preob);
% просмотр характеристик фильтра
fvtool(h, 1);
figure;
plot(sinhra_filter); grid on;
title('Выделенная гармоника');
```

Запустите программу на исполнение и оцените правильность расстановки синхроимпульсов при различном значении N .

Вычислительную сложность рассмотренного фильтра можно уменьшить до минимально возможной, если использовать рекурсивную реализацию фильтра, подробно рассмотренную в [6].

Алгоритмы символьной синхронизации, построенные по блок-схеме, представленной на рис. 4, могут быть выполнены для любого вида цифровой модуляции. Различия будут только в построении входного преобразователя. Так для сигналов ЦФМ, паразитная амплитудная модуляция, получаемая вследствие сглаживания фронтов при формировании сигнала, является полезной для выработки синхросигнала. В этом случае входной преобразователь осуществляет только операцию взятия модуля (возведение в квадрат) каждого отсчета. Если в принимаемом сигнале с ЦФМ или ОФМ паразитная амплитудная модуляция отсутствует (или ее недостаточно), то ее можно искусственно получить с помощью узкополосного фильтра.

Для сигналов OFDM существует несколько способов построения входных преобразователей [21], но все они основаны на использовании защитного интервала. Необходимо отме-

тять, что для работоспособности алгоритма тактовой синхронизации, в OFDM-сигнале предварительно должна быть устранена частотная ошибка и принимаемая комплексная огибающая (или принимаемый сигнал) должна быть расположена на частотной оси таким образом, чтобы на длительности $T_{орт}$ было целое число периодов.

Способ получения тактовой синхронизации по групповому OFDM-сигналу основан на том, что абсолютная величина разности двух выборок (отсчетов) группового сигнала, отстоящих друг от друга на $T_{орт}$, равна 0, если выборки (отсчеты) принадлежат одной и той же сигнальной посылке OFDM-сигнала, и отлична от 0, если отсчеты принадлежат разным посылкам. Тогда входной преобразователь (рис. 6) состоит из линии задержки на $T_{орт}$, сумматора и детектора (операции взятия модуля или возведения в квадрат).

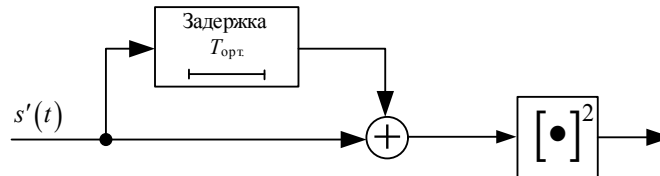


Рис. 6. Входной преобразователь алгоритма символьной синхронизации для OFDM-сигнала при синхронизации по групповому сигналу

Сигнал на выходе данного преобразователя имеет вид как показано на рис. 7.

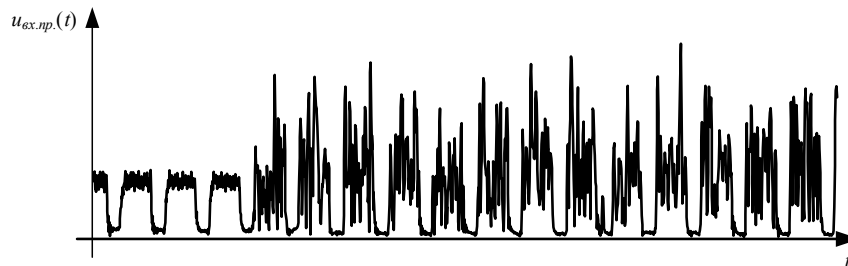


Рис. 7. Сигнал на выходе входного преобразователя

Длительность «провалов» в сигнале на выходе входного преобразователя равна длительности защитного интервала (при условии отсутствия межсимвольной интерференции). Не рассматривая спектрального представления полученного сигнала можно сказать, что его основная гармоника (F_1) равна тактовой частоте.

При другом способе построения, входной преобразователь состоит из генератора комплексной экспоненты (гармоники), умножителя, цифрового интегратора, на длительности $T_{орт}$ и детектора (операции взятия модуля или возведения в квадрат). Структурная схема приведена на рис 8.

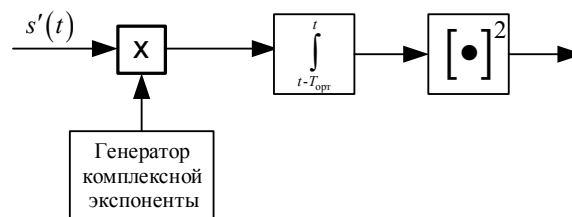


Рис. 8. Входной преобразователь алгоритма символьной синхронизации для OFDM-сигнала

Частота генератора комплексной экспоненты (или гармоники) должна быть ортогональна всем поднесущим и отсутствовать в спектре сигнала. Перенос OFDM-сигнала на эту частоту с последующим интегрированием равносильно демодуляции с помощью СФ. Однако демодуляция сигнала будет осуществляться на частоте где его нет, а так как все поднесущие сигнала являются ортогональными частоте генератора, отклик СФ на длительности защитного интервала будет равен 0 (при отсутствии межсимвольной интерференции), а на длительности $T_{\text{орт}}$, когда обрабатываемые отсчеты принадлежат двум соседним посылкам не равен 0. После выполнения операции взятия модуля сигнал на выходе входного преобразователя подобен представленному на рис. 7.

Заключение

Система синхронизации является одной из основных частей любой системы передачи данных. Однако, как это не было бы странно, она весьма слабо освещена в специальной литературе. Проведенный в статье анализ влияния точности синхронизации позволяет с одной стороны уточнить оценку помехоустойчивости приема модулированных (манипулированных) сигналов в системе связи, оценить ее влияние на помехоустойчивость демодулятора, а с другой стороны, позволяет задать точность тактовой синхронизации для достижения требуемой помехоустойчивости системы связи в целом. Рассмотренные в статье алгоритмы получения тактовой синхронизации являются работоспособными. Изменение параметров накопительного устройства позволяет изменять время достижения синхронизма с заданной точностью и достигать требуемую точность синхронизации.

Направлением дальнейших исследований является необходимость рассмотрения параметров и характеристик символьной синхронизации, без которых невозможно рассчитать (подобрать) отдельные элементы системы.

Литература

1. Инфокоммуникационные сети: энциклопедия. Том 1: Инфокоммуникационные сети: классификация, структура, архитектура, жизненный цикл, технологии / С. П. Воробьев, А. Е. Давыдов, В. В. Ефимов, С. П. Воробьева. – Изд. 2-е, перераб и доп. – СПб.: Научно-технологические технологии, 2019 – 739 с.
2. Легков К. Е., Бабошин В. А., Нестеренко О. Е. Модели и методы управления современными мультисервисными сетями связи // Техника средств связи. 2018. № 2 (142). С. 181-182.
3. Mengali U., D'Andrea Aldo N. Synchronization techniques for digital receivers. New York, Plenum Press, 1997. (ISBN 0-306-45725-3).
4. Shi F R, Tuo X G, Yang S X, Lu J, Li H L. Rapid-flooding time synchronization for large-scale wireless sensor networks. IEEE Trans. Industrial Informatics, 2020. 16(3). pp. 1581–1590.
5. Айфичер Э. С., Джервис Б. У. Цифровая обработка сигналов. Практический подход: пер. с англ. 2-е изд. М.: Вильямс, 2004. 992 с.
6. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд., испр. пер. с англ. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
7. Григорьев В. А. Синхронизация в радиоэлектронных системах. Л.: ВАС, 1983. 58 с.
8. Гинзбург В. В., Каяцкас А. А. Теория синхронизации демодуляторов. М.: Связь, 1974. 216 с.
9. Макаренко С. И. Справочник научных терминов и обозначений. СПб.: Научно-технологические технологии, 2019. 254 с.
10. Савищенко Н. В., Остроумов О. А. Расчет оптимального и рационального числа ветвей разнесения в каналах связи с аддитивным белым гауссовым шумом и общими замираниями Райса-Накагами // Информационно-управляющие системы. 2015. №6 (79). С. 71-80.
11. Zhangweiyi Lui, Weilin Xie, Wei Wei, Nan Deng Theoretical analysis for fiber-optic distribution of RF signals based on phase-locked loop, Vol. 28, No. 14 / 6 July 2020 / Optics Express 19851.
12. Wang X., Han Q., Li Y. et al. Stable frequency transfer for clock synchronization for telecom networks. EURASIP J. Adv. Signal Process. 2023, 45 (2023). <https://doi.org/10.1186/s13634-023-01010-5>.

13. Huan X. T., Kim K. S. Per-hop delay compensation in time synchronization for multi-hop wireless sensor networks based on packet-relaying gateways. *IEEE Communications Letters*, 2020. 24(10). pp. 2300–2304.
14. Jia P. Y., Wang X. B., Shen X. M. Digital-twin-enabled intelligent distributed clock synchronization in industrial IoT systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021. 8(6). pp. 4548–4559.
15. Jia P. Y., Wang X. B., Shen X. M. Passive network synchronization based on concurrent observations in industrial IoT systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021. 8(18). pp. 14028–14038.
16. Zhu S. P., Zheng X. L., Liu L., Ma H. D. AirSync: Time synchronization for large-scale IoT networks using aircraft signals. In Proc. the 17th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking, Jun. 2020.
17. Huan X. T., Kim K. S., Lee S., Lim E. G., Marshall A. A beaconless asymmetric energy-efficient time synchronization scheme for resource-constrained multi-hop wireless sensor networks. *IEEE Trans. Communications*, 2020. 68(3). pp. 1716–1730.
18. Idrees Z., Granados J., Sun Y., Latif S., Gong L., Zou Z., Zheng L. R. IEEE 1588 for clock synchronization in industrial IoT and related applications: A review on contributing technologies, protocols and enhancement methodologies. *IEEE Access*, 2020, 8. pp. 155660–155678.
19. Gore R. N., Lisova E., Åkerberg J., Björkman M. CoSiNeT: A lightweight clock synchronization algorithm for industrial IoT. In Proc. the 4th IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems, May 2021, pp.92–97.
20. Shivaraman N., Schuster P., Ramanathan S., Easwaran A., Steinhorst S. C-Sync: The resilient time synchronization protocol. In Proc. the 19th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (poster), Apr. 2020. pp.333–334.
21. Старицин С.С., Абакумов А.Н., Передрий А.В., Павлов А.В. Методика оценивания параметров сигналов с OFDM-модуляцией // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun20/12/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.6.12.

ALGORITHMS FOR OBTAINING SYMBOL SYNCHRONIZATION WHEN USING DIGITAL SIGNAL PROCESSING

VASILY A. FILIMONOV

Ph.D, Professor, Associate Professor, Military Orders of Lenin and Zhukov
Red Banner Academy of Communications named after S.M. Budyonny St.
Petersburg, Russia, awgn@yandex.ru

NIKOLAI A. USOV

Ph.D, Professor, Associate Professor, Military Orders of Lenin and Zhukov
Red Banner Academy of Communications named after S.M. Budyonny St.
Petersburg, Russia, nauvm@rambler.ru

OLEG A. OSTROUMOV

Ph.D, Professor, Associate Professor, Military Orders of Lenin and Zhukov
Red Banner Academy of Communications named after S.M. Budyonny St.
Petersburg, Russia, oleg-26stav@mail.ru

ABSTRACT

Introduction: The paper substantiates an approach to the synthesis of a subsystem for monitoring a distributed public information and telecommunications network. **Problem statement:** on the basis of a multilevel approach to the description of complex technical systems and methods for the synthesis of network infrastructures, to formulate a task for the development of a method for the synthesis of a subsystem for intelligent monitoring of a distributed public information and telecommunications network using the stages of structural and parametric synthesis, as well as structural analysis methods, allowing to identify the type of network state in the interests of its situational management system in order to prevent the transition from operational to pre-operational and inoperable (emergency) states. **Methods:** complex technical systems multilevel synthesis methods; models and methods of reliability theory; methods of object-subject description of information and telecommunication systems. **Results:** the verbal and mathematical formulation of the scientific task for research was carried out, as well as the general task was decomposed into particular tasks: conceptual modeling of the subsystem of intelligent monitoring of the state of a public information and telecommunications network, development of a synthesis method for its subsystem of intelligent monitoring of the state, as well as the formation of scientific and technical proposals for the implementation of this method. **Practical significance:** the mathematical formulation of the task of developing a method for the synthesis of a subsystem for monitoring a public information and telecommunications network allows, when solving it, to carry out not only a structural-parametric synthesis of a new generation monitoring system, but also to carry out structural analysis of the state of the network as a whole in the process of its functioning in real time. **Discussion:** the novelty of the proposed formulation of the problem is that the structure of a promising monitoring subsystem includes sensory, telecommunication and dispatcher levels of its construction in the system aspect.

Keywords: synchronization; modulated signals; noise immunity; modulator; demodulator; digital signal processing.

REFERENCES

1. Infokommunikacionnye seti: jenciklopedija. Tom 1: Infokommunikacionnye seti: klassifikacija, struktura, arhitektura, zhiznennyj cikl, tehnologii [Infocommunication networks: encyclopedia. Volume 1: Infocommunication networks: classification, structure, architecture, life cycle, technologies] / S. P. Vorobyov, A. E. Davydov, V. V. Efimov, S. P. Vorobyova. Ed. 2nd, revised and additional. St. Petersburg: Science-intensive technologies, 2019. 739 p. (In Rus).
2. Legkov K. E., Baboshin V. A., Nesterenko O. E. Models and methods of management of modern multiservice communication networks. Means of Communication Equipment. 2018. No. 2 (142). pp. 181-182. (In Rus).
3. Mengali U., D'Andrea Aldo N. Synchronization techniques for digital receivers. New York, Plenum Press, 1997. (ISBN 0-306-45725-3).
4. Shi F R, Tuo X G, Yang S X, Lu J, Li H L. Rapid-flooding time synchronization for large-scale wireless sensor networks. IEEE Trans. Industrial Informatics, 2020. 16(3). pp. 1581–1590
5. Ayficher E. S., Jervis B. U. Dzhervis B. U. Cifrovaja obrabotka signalov. Prakticheskij podhod [Digital signal processing. Practical approach]: per. from English. 2nd ed. Moscow: Vil'jams [Williams], 2004. 992 p. (In Rus).
6. Sklyar B. Cifrovaja svjaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie [Digital communication. Theoretical foundations and practical application]. 2nd ed., rev. per. from English. Moscow: Vil'jams [Williams], 2003. 1104 p. (In Rus).
7. Grigoriev V. A. Sinhronizacija v radioelektronnyh sistemah [Synchronization in radio electronic systems]. L.: VAS [MCA], 1983. 58 p. (In Rus).
8. V. V. Ginzburg and A. A. Kayatskas, Teorija sinhronizacii demoduljatorov [Theory of Demodulator Synchronization]. M.: Svjaz' [Communication], 1974. 216 p. (In Rus).
9. Makarenko S. I. Spravochnik nauchnyh terminov i oboznachenij [Handbook of scientific terms and symbols]. St. Petersburg: Naukoemkie tehnologii [Science-intensive technologies], 2019. 254 p. (In Rus).
10. Savishchenko N. V., Ostroumov O. A. Calculation of the optimal and rational number of diversity branches in communication channels with additive white Gaussian noise and common Rice-Nakagami fading. Informacionno-upravljajushhie sistemy [Information and Control Systems]. 2015. No. 6 (79). pp. 71-80.
11. Zhangweiyi Lui, Weilin Xie, Wei Wei, Nan Deng Theoretical analysis for fiber-optic distribution of RF signals based on phase-locked loop, Vol. 28, no. 14 / 6 July 2020 / Optics Express 19851.
12. Wang X., Han Q., Li Y. et al. Stable frequency transfer for clock synchronization for telecom networks. EURASIP J. Adv. signal processing. 2023, 45 (2023). <https://doi.org/10.1186/s13634-023-01010-5>.
13. Huan X. T., Kim K. S. Per-hop delay compensation in time synchronization for multi-hop wireless sensor networks based on packet-relaying gateways. IEEE Communications Letters, 2020. 24(10). pp. 2300–2304.
14. Jia P. Y., Wang X. B., Shen X. M. Digital-twin-enabled intelligent distributed clock synchronization in industrial IoT systems. IEEE Internet of Things Journal, 2021. 8(6). pp. 4548–4559.
15. Jia P. Y., Wang X. B., Shen X. M. Passive network synchronization based on concurrent observations in industrial IoT systems. IEEE Internet of Things Journal, 2021. 8(18). pp. 14028–14038.
16. Zhu S. P., Zheng X. L., Liu L., Ma H. D. AirSync: Time synchronization for large-scale IoT networks using aircraft signals. In Proc. the 17th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking, Jun. 2020.
17. Huan X. T., Kim K. S., Lee S., Lim E. G., Marshall A. A beaconless asymmetric energy-efficient time synchronization scheme for resource-constrained multi-hop wireless sensor networks. IEEE Trans. Communications, 2020. 68(3). pp. 1716–1730

18. Idrees Z., Granados J., Sun Y., Latif S., Gong L., Zou Z., Zheng L. R. IEEE 1588 for clock synchronization in industrial IoT and related applications: A review on supporting technologies, protocols and enhancement methodologies . IEEE Access, 2020, 8.pp. 155660–155678.
19. Gore R. N., Lisova E., Åkerberg J., Björkman M. CoSiNeT: A lightweight clock synchronization algorithm for industrial IoT. In Proc. the 4th IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems, May 2021, pp.92–97.
20. Shivaraman N., Schuster P., Ramanathan S., Easwaran A., Steinhorst S. C-Sync: The resilient time synchronization protocol. In Proc. the 19th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (poster), Apr. 2020.pp.333–334.
21. Staritsin S.S., Abakumov A.N., Peredriy A.V., Pavlov A.V. Method for estimating the parameters of signals with OFDM modulation. Zhurnal radioelektroniki [jelektronnyj zhurnal] [Journal of radio electronics [electronic journal]]. 2020. №6. Access mode: <http://jre.cplire.ru/jre/jun20/12/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.6.12.