

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.13>

УДК: 629.396

## АЛГОРИТМ АДАПТИВНОЙ КАДРОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ В СИСТЕМАХ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ РАДИОСВЯЗИ

И.В. Зайцев<sup>1</sup>, С.Н. Жарков<sup>1</sup>, К.Д. Титов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил  
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»  
394064, Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54а

<sup>2</sup> Воронежский государственный университет  
394018, Воронеж, Университетская площадь, д. 1

Статья поступила в редакцию 25 июля 2023 года

**Аннотация.** Разработан алгоритм адаптивной кадровой (фреймовой) синхронизации для систем Интернета вещей, функционирующей в режиме с использованием сигналов со сверхширокой полосой частот, в условиях мешающего воздействия сигналов системы, работающей в сверхширокополосном режиме с применением линейно-частотно-модулированных сигналов. Адаптация осуществляется на основе изменения количества добавляемых в последовательность кадровой синхронизации нулевых сигналов в зависимости от результатов контроля вероятности доставки пакетов. В среде MATLAB создана имитационно-статистическая модель непреднамеренного помехового воздействия, с помощью которой показана эффективность предлагаемого алгоритма. Получены зависимости вероятности правильного обнаружения от отношения мощностей синхронизирующего сигнала исследуемой и мешающей систем от количества добавочных нулевых сигналов. Определено предельное количество добавочных нулевых сигналов, при котором наблюдается улучшение качества обнаружения сигнала кадровой синхронизации.

**Ключевые слова:** адаптивная кадровая синхронизация, сверхширокополосный сигнал, непреднамеренная помеха, помехоустойчивость, имитационно-статистическое моделирование.

**Финансирование:** Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-21-00452, <https://rscf.ru/project/23-21-00452/>.

**Автор для переписки:** Жарков Сергей Николаевич, [szharkov@mail.ru](mailto:szharkov@mail.ru)

## Введение

Для обеспечения информационного обмена и объединения устройств в беспроводную компьютерную сеть широкое применение в последние годы получили технологии Интернета вещей [1-3]. При этом, в условиях массового применения таких радиоустройств на ограниченной площади остро встает проблема обеспечения их электромагнитной совместимости, особенно в случае функционирования в одной полосе частот.

Так, одним из основных стандартов, регламентирующим функционирование устройств в системах Интернета вещей, является IEEE 802.15.4-2020 [4], который предусматривает использование сверхширокополосных (СШП, UWB) сигналов (ширина полосы частот равна 500 МГц и более), либо с использованием импульсов типа «приподнятый косинус» (режим HRP), либо дополнительно умноженных на сигнал с линейной частотной модуляцией (режим CoU) [4, 5].

Совместное функционирование радиоустройств в режимах HRP и CoU может приводить к возникновению взаимных непреднамеренных помех, и как следствие, к снижению скорости и/или достоверности передачи данных. При этом в значительной степени воздействию таких помех подвержена кадровая (фреймовая) синхронизация (КС) передающих и приемных устройств, при нарушении которой вероятность битовой ошибки увеличивается, вплоть до невозможности функционирования системы с заданной достоверностью.

Целью данной работы является разработка алгоритма адаптивной кадровой синхронизации в системах СШП радиосвязи на основе имитационно-статистического моделирования взаимных непреднамеренных помех совместно функционирующих радиоустройств стандарта IEEE 802.15.4-2020.

## 1. Описание кадровой синхронизации в системах радиосвязи стандарта IEEE 802.15.4-2020

Разрабатываемый и анализируемый в настоящей работе алгоритм КС разрабатывается на основе алгоритмов стандарта IEEE 802.15.4-2020, в которых так же, как и во всех цифровых системах радиосвязи, синхронизирующие сигналы излучаются перед отправкой кадра с полезной информацией. Сигналы КС IEEE 802.15.4-2020 формируются на основе троичной кодовой последовательности, элементы которой принимают значения  $(-1)$ ,  $0$  и  $(+1)$ . Обнаружение таких сигналов позволяет определить момент начала отправленных кадров, т.е. осуществить КС. Наличие синхронизирующих сигналов определяется с помощью вычисления в приемнике корреляции отсчетов опорного сигнала (известного синхронизирующего сигнала), принимаемых отсчетов аддитивной смеси сигнала и шума, и последующего сравнения с пороговым значением, которое определяется согласно критерию Неймана-Пирсона. Отсчеты являются результатом аналоговой обработки в радиотракте и цифровой фильтрации, согласованной с формирующим сигналом [6]. На рис. 1 показана общая структура корреляционного приемника, используемого для КС по  $M$  принимаемым отсчетам сигнала  $r_k$ , которые могут содержать как отсчеты аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ)  $n_k$ , так и аддитивную смесь отсчетов синхронизирующего сигнала  $s_k$ , помехового сигнала  $s_k^I$  и АБГШ  $n_k$ .

Корреляционный приемник вычисляет в момент времени  $t_n$ , соответствующий приему  $n$ -го отсчета, корреляцию  $C(n)$  отсчетов принимаемого сигнала  $x_k$  и опорного сигнала  $y_m$ , равную:

$$C(n) = \sum_{k=n}^{n+M-1} x_k y_k.$$

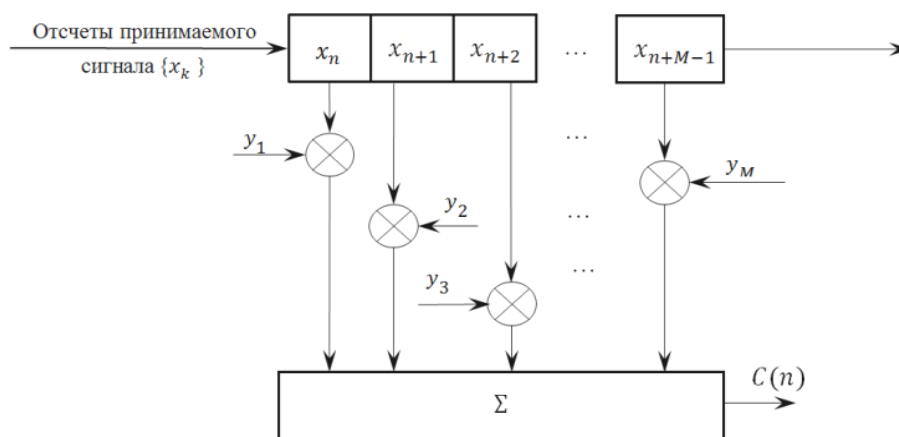


Рис. 1. Общая структура корреляционного приемника.

Для вынесения решения о наличии/отсутствии сигнала КС применяется критерий Неймана-Пирсона, согласно которому значение корреляции  $C(n)$  сравнивается с пороговым значением  $h$ . Если значение корреляции  $C(n)$  превышает заданное пороговое значение (порог)  $h$ , то принимается решение о наличии сигнала КС в момент времени  $t_n$ , иначе – сигнал КС отсутствует. Значение порога  $h$  выбирается так, чтобы вероятность ложной тревоги была не ниже  $10^{-3}$ .

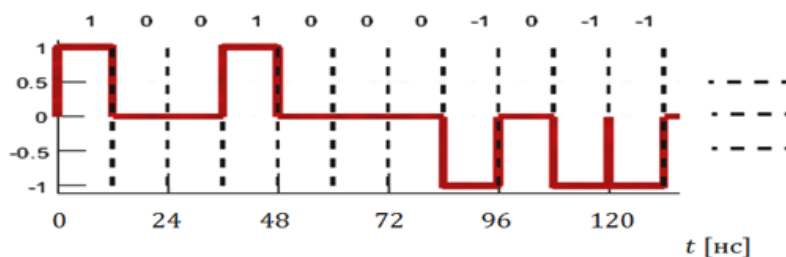
Сигнал КС радиосистемы стандарта IEEE 802.15.4-2020, функционирующей в режиме HRP, формируется следующим образом.

1) Выбирается троичная последовательность из списка, приведенного в стандарте [4]. В работе без потери общности сделан выбор последовательности с индексом «9»:

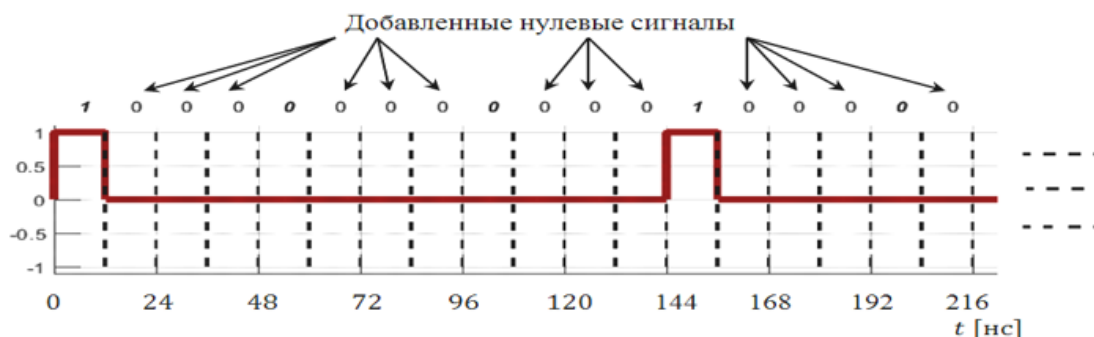
$q_9 = +00 + 000 - 0 - -00 - - + 0 + 0 + 00 - + - + + 0 + 0000 + + - 00 + 00... \\ ... - 00 - -0 - +0 + 0 - -0 - + + +0 + +000 + -0 + 00 - 0 + + - + + +00 - +... \\ ... 00 + 0 + 0 - 0 + + - + - - + 000000 + 00000 - +0000 - 0 - 000 - - +.$

Формируется первая последовательность прямоугольных импульсов  $y_1$ , соответствующих выбранной троичной последовательности  $q_9$ , так что «-» соответствует импульсу с отрицательным единичным значением амплитуды, «0» – импульсу с нулевым значением амплитуды, а «+» – импульсу с положительным единичным значением амплитуды. На рис. 2а показан пример последовательности  $y_1$ , когда амплитуды импульсов принимают значения (-1), 0 или (+1).

2) Формируется вторая последовательность прямоугольных импульсов  $y_2$ , соответствующих  $q'_9$  – последовательности, формируемой добавлением  $N_0$  нулевых сигналов между элементами  $q_9$ . На рис. 2б показан пример последовательности  $y_2$  при  $N_0 = 3$  (рекомендуется стандартом [4]).



а) Первая последовательность  $y_1$ .



б) Вторая последовательность  $y_2$  при  $N_0 = 3$  (рекомендовано стандартом).

Рис. 2. Пример первой и второй последовательностей  $y_1$  и  $y_2$ , используемых для формирования синхронизирующего сигнала в СШП системе стандарта IEEE 802.15.4-2020.

3) Каждому прямоугольному импульсу в последовательности  $y_2$  ставится в соответствие формирующий импульс (рис. 3, 4), которым в дальнейшем модулируют несущий сигнал. Данная процедура может быть реализована пропусканием отсчетов  $y_2$  через цифровой фильтр Найквиста [6] с импульсной характеристикой, равной формирующему импульсу, с 4 или 8 отсчетами на символ (аналогично тому, как данная процедура реализуется в системах радиосвязи других стандартов, например, DECT NR, IEEE 802.11ax и др.) и последующей обработкой с помощью устройства цифро-аналогового преобразования.

В режимах HRP и CoU используется формирующий импульс типа «приподнятый косинус»:

$$r(t) = \frac{4\beta}{\pi\sqrt{T_p}} \times \frac{\cos\left(\frac{(1+\beta)\pi t}{T_p}\right) + \frac{\sin\left(\frac{(1-\beta)\pi t}{T_p}\right)}{4\beta\left(\frac{t}{T_p}\right)}}{1 - \left(\frac{4\beta t}{T_p}\right)^2},$$

где  $\beta = 0,5$ , а  $T_p$  – длительность отсчета, равная  $1/f_p$  ( $f_p$  – частота дискретизации). В данной работе используется рекомендованное стандартом значение  $T_p$ , равное 2 нс, что соответствует длительности основного пика  $T_w = 0,5$  нс (рис. 3).

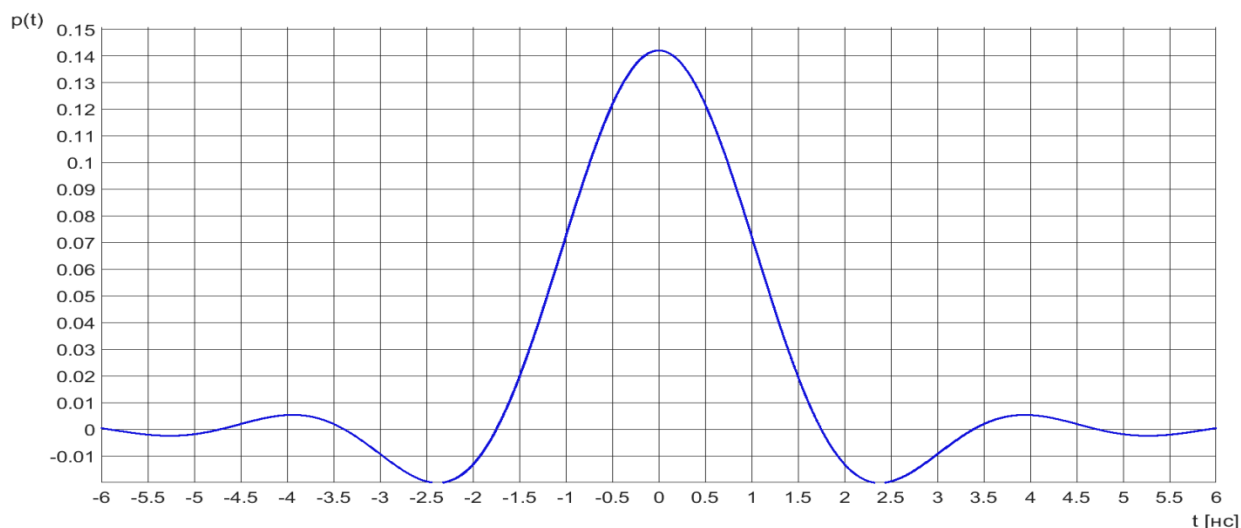


Рис. 3. Пример формирующего импульса типа «приподнятый косинус», используемого в СШП радиосистеме стандарта IEEE 802.15.4-2020 в режиме HRP

В режиме CoU формирующий импульс  $r(t)$  дополнительно умножается на импульс с линейной частотной модуляцией той же длительности, формируемой в полосе 500 МГц:

$$p(t) = r(t) \cos\left(\frac{b t^2}{2}\right),$$

где  $b = 500$  [МГц] / 2,5 [нс]. Соответствующий формирующий импульс в режиме CoU показан на рис. 4. Следует отметить, что в стандарте [4] приведена комплексная форма записи ЛЧМ сигнала. Тем не менее, так как при формировании сигнала в передатчике и его обработке в приемнике

используется только синфазная составляющая, то мнимую часть можно не рассматривать.

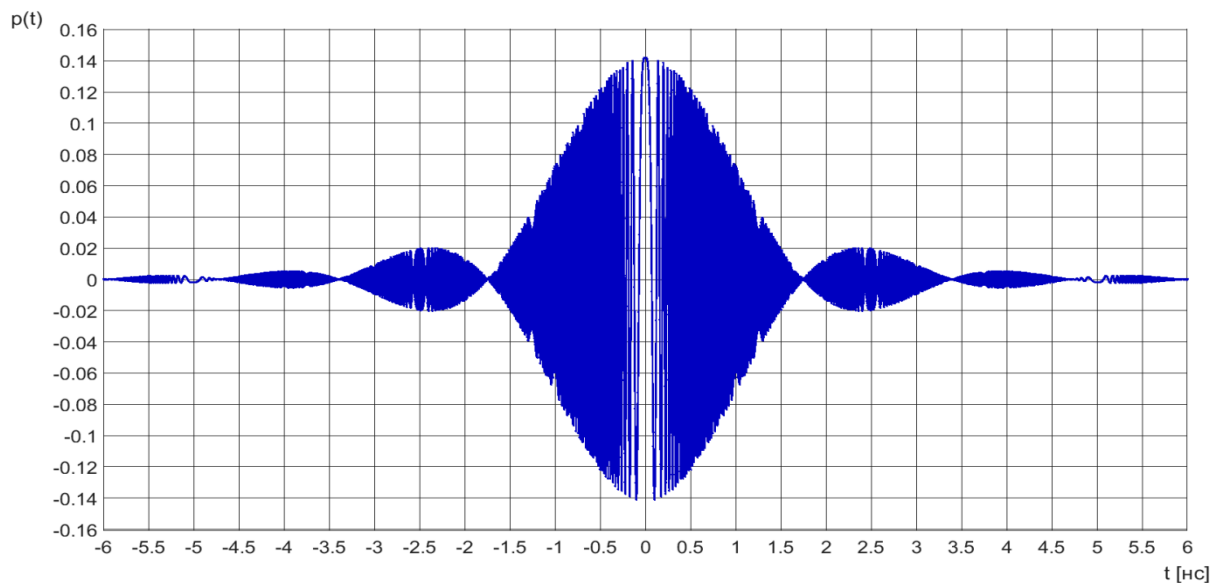


Рис. 4. Пример формирующего импульса, используемого в СШП радиосистеме стандарта IEEE 802.15.4-2020 в режиме CoU.

### 3. Имитационно-статистическая модель кадровой синхронизации системы, использующей сверхширокополосные сигналы

Моделирование непреднамеренного воздействия на КС в СШП системе проводилось в среде MATLAB. Функционально-структурная схема модели приведена на рис. 5. Арабскими цифрами обозначены блоки модели, а римскими – модули, из которых состоят блоки. Каналы взаимодействия блоков описаны в табл. 1, модулей – в табл. 2. Аналоговая демодуляция предполагается не подверженной искажениям, так как устройства стандарта IEEE 802.15.4-2020 функционируют как стационарные в условиях прямой радиовидимости, поэтому аналогично [6] перенос с частоты несущей на нулевую в приемном устройстве предполагается без искажений.

Модель позволяет оценить значение вероятности правильного обнаружения сигнала КС в режиме HRP (кадровой синхронизации в режиме HRP)  $P_1$  при вероятности ложной тревоги  $P_L = 10^{-3}$ , в условиях воздействия сигнала другой СШП системы, функционирующей в режиме CoU.

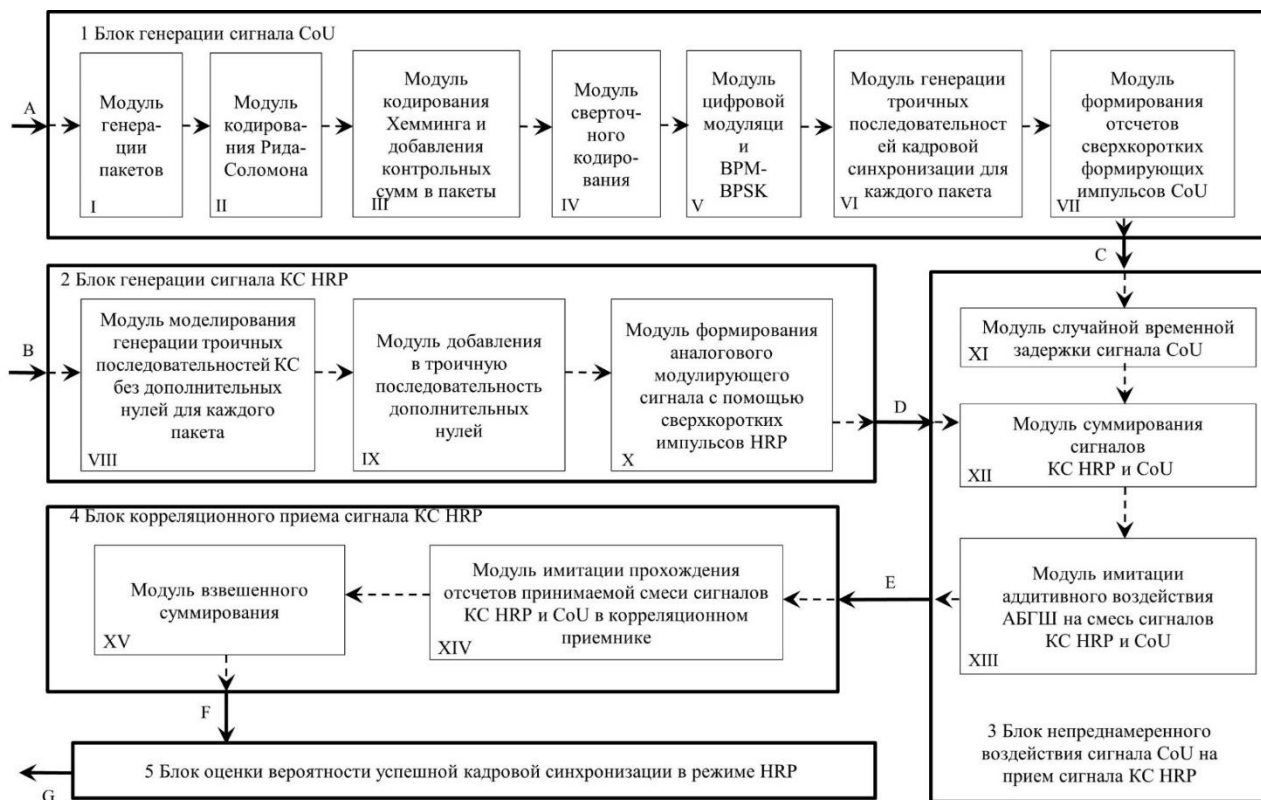


Рис. 5. Функционально-структурная схема модели непреднамеренного воздействия сигнала CoU на сигнал KC HRP.



Таблица 1. Краткое описание основных каналов взаимодействия блоков в имитационно-статистической модели.

Канал	Передающий блок	Принимающий блок	Содержание передаваемой информации
A	Данные передаются от пользователя	Блок моделирования генерации сигнала CoU (блок 1)	Количество передаваемых пакетов (другие входные данные по каналу не передаются; их значения задаются внутри блока)
B		Блок генерации сигнала КС HRP (блок 2)	Входные данные, в том числе количество дополнительных нулевых сигналов, используемых при формировании сигнала КС HRP
C	Блок генерации сигнала CoU (блок 1)	Блок непреднамеренного воздействия сигнала CoU на прием КС HRP (блок 3)	Временные отсчеты сигнала CoU
D	Блок генерации сигнала КС HRP (блок 2)	Блок непреднамеренного воздействия сигнала CoU на прием КС HRP (блок 3)	Сгенерированные временные отсчеты сигнала КС HRP
E	Блок непреднамеренного воздействия сигнала CoU на прием КС HRP (блок 3)	Блок корреляционного приема сигнала КС в режиме HRP (блок 4)	Временные отсчеты сигнала, образуемого в результате непреднамеренного воздействия сигнала CoU на прием сигнала КС HRP
F	Блок корреляционного приема сигнала КС в режиме HRP (блок 4)	Блок оценки вероятности успешной КС в режиме HRP (блок 5)	Значения оценки временного положения сигнала КС HRP
G	Блок оценки вероятности успешной КС в режиме HRP (блок 5)	Данные передаются пользователю	Выходные данные (значений вероятности правильного обнаружения сигнала КС HRP $P_1$ , вероятности ложной тревоги $P_L$ и вероятности пропусков сигнала $P_0$ )

Таблица 2. Основные входные данные имитационно-статистической модели.

Название параметра	Значение параметра	Комментарий
Количество добавляемых нулевых сигналов в сигнале КС, $N_0$	3	В соответствии со стандартом IEEE 802.15.4-2020
Количество итераций, $N_e$	10000	Значение параметра выбрано так, чтобы дисперсия значений оценок искомых вероятностей была меньше $10^{-3}$
Количество отсчетов, $K$	1270	Время наблюдения, задаваемое количеством отсчетов $K$ , выбрано так, чтобы интервал наблюдения был в 2 раза больше длительности синхронизирующего сигнала, т.е. предполагается, что длительность временного интервала между пакетами не превышает удвоенной длительности сигнала КС
Количество пакетов, $N$	10000	Количество пакетов при моделировании функционирования СШП системы в режиме CoU
ОСШ (отношение сигнал/шум), SNR [дБ]	10	Моделирование выполнялось практически в условиях отсутствия влияния АБГШ на характеристики приема сигналов для того, чтобы более точно оценить воздействие мешающего сигнала другого режима стандарта IEEE 802-15.4-2020
Отношение мощности мешающего сигнала к мощности сигнала КС [дБ], $\eta$	$-5 \leq \eta \leq 5$	Выбранные значения позволили оценить минимальные значения $\eta$ , при которых качество КС начинает ухудшаться
Вероятность ложной тревоги, $P_L h$	$10^{-3}$	Значение порога $h$ выбирается так, чтобы обеспечить заданное значение вероятности ложной тревоги

Алгоритм моделирования непреднамеренного воздействия сигнала CoU на сигнал КС HRP состоит в выполнении следующих шагов.

- 1) В блок генерации сигнала CoU передаются входные данные (табл. 2).
- 2) Модуль (I) генерирует пакеты данных и передает их модулю кодирования Рида-Соломона (II) в виде матрицы битовых значений.

3) Модуль (II) кодирует биты пакетов, принятых от модуля (I), согласно алгоритму кодирования Рида-Соломона и передает матрицу кодированных бит модулю (III) – модулю кодирования Хемминга и добавления контрольных сумм в пакеты.

4) Модуль (III), приняв кодированные биты от модуля (II), вычисляет шестибитные контрольные суммы пакетов с использованием кодирования Хемминга и добавляет их в пакеты. Далее модуль (III) передает матрицу пакетов модулю (IV) – модулю сверточного кодирования.

5) Модуль (IV), приняв матрицу битовых пакетов с контрольными суммами, кодирует согласно алгоритму сверточного кодирования стандарта IEEE 802.15.4-2020 со скоростью  $1/2$  и кодовым ограничением 7, и отправляет матрицу кодированных бит модулю (V) – модулю цифровой модуляции BPSK-BPSK.

6) Модуль (V), приняв кодированные биты от модуля (IV), выполняет их преобразование согласно цифровой модуляции BPSK-BPSK с использованием скремблирования и отправляет сформированные чипы модулю (VI) – модулю генерации троичных последовательностей КС и добавления их в пакеты.

7) Модуль (VI), приняв чипы от модуля (V), генерирует троичные последовательности КС для каждого пакета.

8) Модуль (VII), приняв чипы модулирующего сигнала и троичные последовательности, формирует отсчеты сверхкоротких формирующих импульсов CoU.

9) Блок (1) по каналу (C) передает сгенерированные временные отсчеты сигнала CoU, сформированного модулем (VII), блоку (3).

10) Модуль (VIII), приняв входные данные по каналу (B) (табл. 1), моделирует генерацию троичных последовательностей КС без дополнительных нулей для каждого пакета и отправляет матрицу с троичными последовательностями модулю (IX) – модулю добавления в троичную последовательность дополнительных нулей.

11) Модуль (IX), приняв матрицу сгенерированных троичных последовательностей без дополнительных нулей, добавляет заданное количество нулей, формирует и отправляет новую матрицу последовательностей модулю (X) – модулю формирования аналогового модулирующего сигнала.

12) Модуль (X), приняв матрицу сгенерированных троичных последовательностей, формирует аналоговые модулирующие сигналы с помощью сверхкоротких импульсов HRP в виде временных отсчетов и передает их значения по каналу (D) (табл. 1) блоку (3) – блоку непреднамеренного воздействия сигнала CoU на прием сигнала КС HRP.

13) Модуль (XI), приняв по каналу (C) (табл. 1) сформированные временные отсчеты сигнала CoU от модуля (VII), генерирует случайную временную задержку в виде количества нулевых временных отсчетов, добавляет их в отсчеты сигнала CoU и отправляет их модулю (XII) – модулю суммирования сигналов CoU и КС HRP.

14) Модуль (XII), получив отсчеты аналоговых модулирующих сигналов КС HRP и CoU, проводит их суммирование и отправляет их модулю (XIII) – модулю имитации аддитивного воздействия АБГШ на смесь сигналов КС HRP и CoU.

15) Модуль (XIII), получив отсчеты смеси сигналов КС HRP и CoU, генерирует соответствующее количество временных отсчетов АБГШ и проводит их суммирование с отсчетами смеси КС HRP и CoU, далее отправляет итоговые отсчеты по каналу (E) в блок (4) модулю (XIV) – модулю имитации прохождения отсчетов принимаемой смеси сигналов КС HRP и CoU.

16) Модуль (XIV), приняв по каналу (E) (табл. 1) от модуля (XIII) отсчеты, сформированные в результате моделирования аддитивного воздействия АБГШ на смесь сигналов КС HRP и CoU, моделирует прохождение отсчетов принимаемой смеси сигналов КС HRP и CoU в корреляционном приемнике и отправляет матрицу отсчетов сигналов, проходящих через корреляционный приемник, модулю (XV) – модулю взвешенного суммирования.

17) Модуль (XV), приняв от модуля (XIV) матрицу отсчетов сигналов, проходящих через корреляционный приемник, вычисляет значения корреляции

с помощью взвешенного суммирования (умножения отсчетов сигналов на отсчеты опорного сигнала и суммирования результатов произведения), отправляет по каналу (F) матрицу значений корреляции блоку (5) – блоку оценки вероятности успешной КС в режиме HRP.

18) Блок (5) проводит оценку вероятности успешной КС в режиме HRP (вероятности правильного обнаружения, см. рис. 6), оценку вероятности ложной тревоги и вероятности пропуска сигнала, и отправляет их значения по каналу (G) (табл. 1) пользователю через интерфейс имитационно-статистической модели.

Дополнительно представим алгоритм моделирования через описание выполнения шагов, отображаемых блок-схемой (рис. 6). Алгоритм состоит в следующем:

- 1) вводятся данные (блок 1 и их описание в табл. 3);
- 2) переменной  $i$  присваивается единичное значение (блок 2);
- 3) переменной  $n_1$  присваивается нулевое значение (блок 3);
- 4) переменной  $n_L$  присваивается нулевое значение (блок 4);
- 5) переменной  $n_0$  присваивается нулевое значение (блок 5);
- 6) моделируется формирование сигнала КС в СШП радиосистеме, функционирующей в режиме HRP (блок 6, см. также описание функционирования модулей блока 2 на рис. 5);
- 7) моделируется распространение сигнала КС СШП радиосистемы, функционирующей в режиме HRP, в гауссовском радиоканале и непреднамеренное воздействие сигналов в режиме CoU (блок 7, см. также описание функционирования модулей блоков 1 и 3 на рис. 5) и оценивает прошедшее время моделирования, измеряемое количеством временных отсчетов;
- 8) моделируется корреляционный прием отсчетов сигнала (блок 8, см. также описание функционирования модулей блока 4) и оценивает прошедшее время моделирования, измеряемое количеством временных отсчетов;

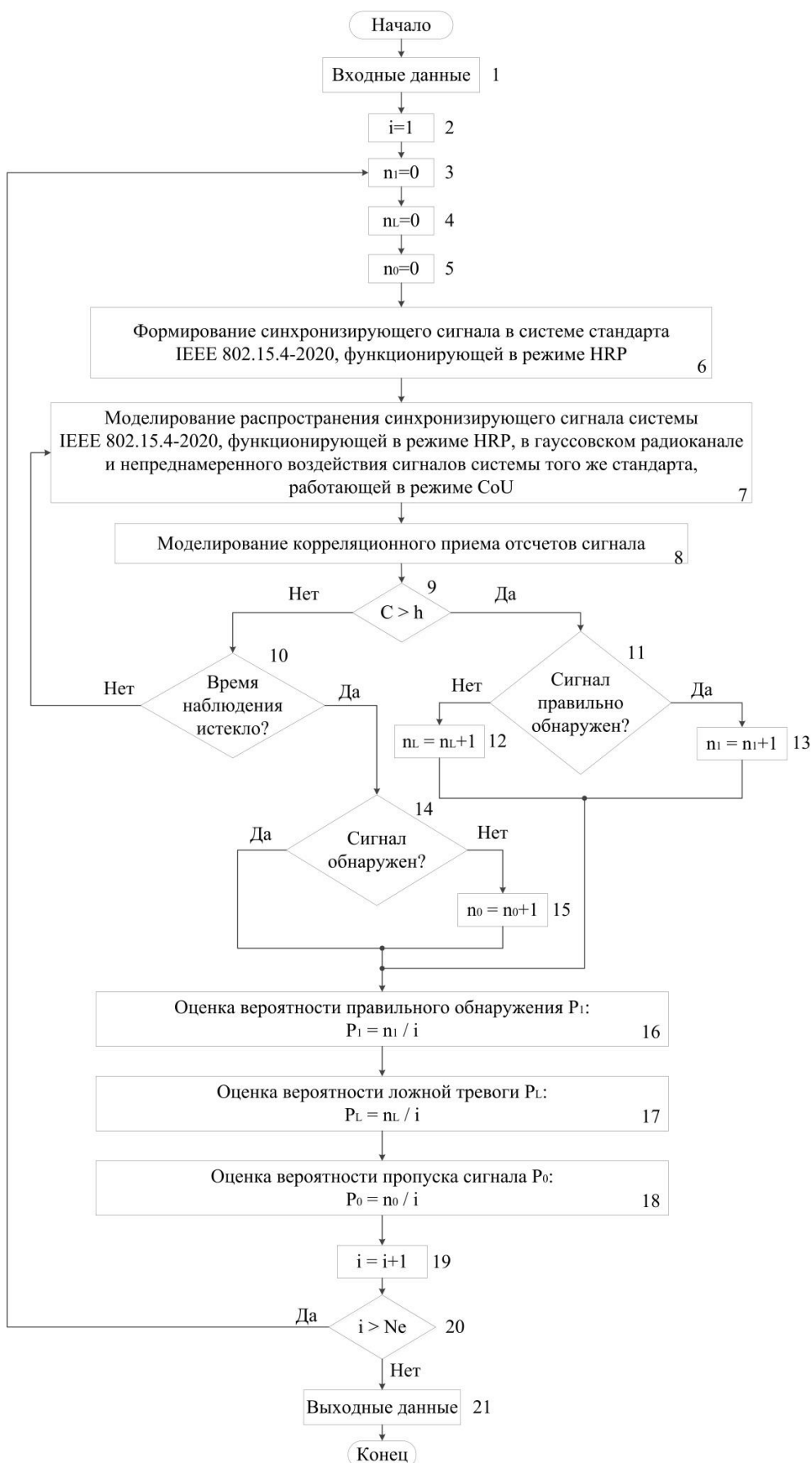


Рис. 6. Блок-схема моделирования непреднамеренного воздействия передатчика радиосистемы в режиме CoU на кадровую синхронизацию приемника в режиме HRP.

9) проводится проверка, правильно ли обнаружен сигнал (блок 11): если временное положение синхронизирующего сигнала определено верно с помощью корреляционного приемника (см. описание блока 4 на рис. 5), то выносится решение о правильном приеме и происходит переход к шагу 10, иначе – к шагу 11;

10) значение переменной  $n_1$  увеличивается на единицу (блок 10) и происходит переход к шагу 14;

11) значение переменной  $n_L$  увеличивается на единицу (блок 11) и происходит переход к шагу 12;

12) проводится сравнение прошедшего времени моделирования, измеряемое количеством временных отсчетов, с заданным значением  $K$  (блок 12): если время моделирования истекло, то происходит переход к шагу 13, иначе – к шагу 14;

13) значение переменной  $n_0$  увеличивается на единицу (см. блок 13) и происходит переход к шагу 14;

14) проводится оценка вероятности правильного обнаружения  $P_1$  по формуле  $P_1 = \frac{n_1}{i}$ ;

15) проводится оценка вероятности ложной тревоги  $P_L$  по формуле  $P_L = \frac{n_L}{i}$ ;

16) проводится оценка вероятности пропуска сигнала  $P_0$  по формуле  $P_0 = \frac{n_0}{i}$ ;

17) значение переменной  $i$  увеличивается на единицу (блок 17) и происходит переход к шагу 18;

18) проводится сравнение значения переменной  $i$  с количеством итераций,  $N_e$  (блок 18): если  $i > N_e$ , то происходит переход к шагу 3, иначе – к шагу 19;

19) модель представляет пользователю выходные данные:

- значение оценки вероятности правильного обнаружения  $P_1$ ;
- значение оценки вероятности ложной тревоги  $P_L$ ;
- значение оценки вероятности пропуска сигнала  $P_0$ .

С помощью имитационно-статистической модели в работе получены зависимости:

1) зависимость вероятности правильного обнаружения сигнала КС  $P_1$  от отношения мощностей мешающего сигнала к синхронизирующему сигналу  $\eta$ , заданного в дБ, при количестве добавочных нулей в синхронизирующей последовательности  $N_0$ , равном 0, 3, 7, 11 и 15 (рис. 7);

2) зависимость минимального значения отношения мощностей мешающего и синхронизирующего сигналов  $\eta_0$ , при котором вероятность правильного обнаружения сигнала КС  $P_1$  становится меньше 0,999, от количества добавочных нулевых сигналов в сигнале КС  $N_0$  (рис. 8).

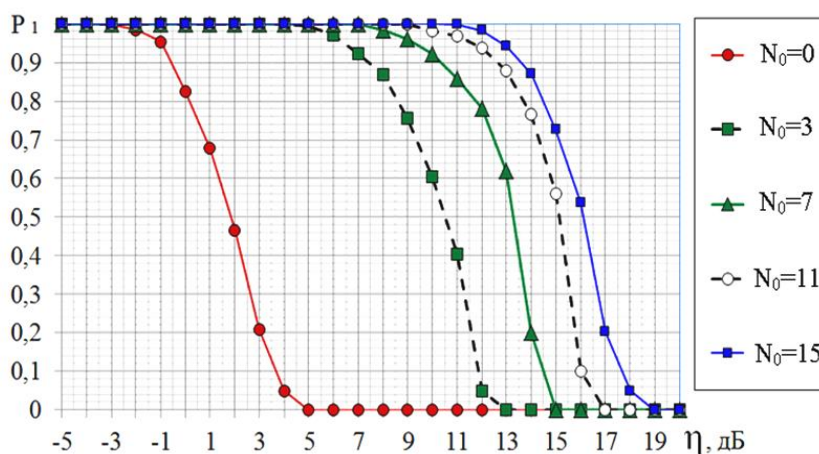


Рис. 7. Зависимость вероятности правильного обнаружения сигнала кадровой синхронизации стандарта IEEE 802.15.4-2020  $P_1$  от отношения мощностей мешающего и синхронизирующего сигналов  $\eta$  при разных значениях  $N_0$ .

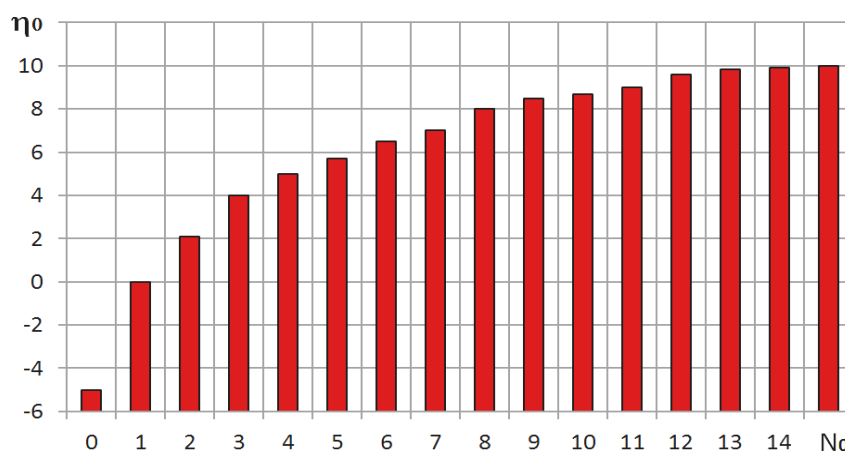


Рис. 8. Зависимость минимального значения отношения мощностей мешающего и синхронизирующего сигналов  $\eta_0$  от количества добавочных нулевых сигналов  $N_0$ .



Анализ зависимостей (рис. 7 и 8) показывает, что при воздействии мешающего сигнала вероятность правильного обнаружения синхронизирующего сигнала  $P_1$  зависит от количества нулей  $N_0$ , добавляемых в исходную синхронизирующую последовательность (без дополнительных нулевых сигналов). При увеличении значения  $N_0$  влияние на вероятность  $P_1$  становится менее сильной. Например, при добавлении трех нулевых сигналов между элементами  $S_0$  значение  $P_1$  становится меньше 0,999 при  $\eta_0 = 4$  дБ, т.е.  $\eta_0$  изменится на 7 дБ по сравнению со случаем недобавления нулевых сигналов. Если между элементами синхронизирующей последовательности при  $N_0 = 3$  добавить еще четыре нуля, так что  $N_0$  станет равным 7, то значение  $P_1$  станет меньше 0,999 при  $\eta_0 = 7$  дБ, т.е.  $\eta_0$  изменится на 3 дБ по сравнению со случаем при  $N_0 = 3$ . Таким образом, возможности улучшения качества обнаружения синхронизирующего сигнала с помощью добавления нулевых сигналов имеет предел  $N_0^{lim}$ . При непреднамеренном мешающем воздействии на КС системы радиосвязи стандарта IEEE 802.15.4-2020, работающей в режиме HRP, сигналов другой системы того же стандарта, функционирующей в режиме CoU,  $N_0^{lim}$  приблизительно равно 15.

Полученные результаты показывают возможность создания системы адаптивной КС на основе добавления нулевых сигналов при наличии контроля вероятности доставки пакетов. На рис. 11 представлена блок-схема такого алгоритма, на которой узел, принимающий сигнал КС HRP в условиях непреднамеренного воздействия сигнала CoU, обозначается как «Прм1» (приемопередатчик 1), а устройство отправляющее сигнал КС – «Прм2» (приемопередатчик 2). Без потери общности рассмотрен вариант отправки пакетов с полезной информацией Прм1. Отправка пакетов Прм2 выполняется аналогично. На рисунке 12 представлена схема отправки и приема пакетов со служебной и полезной информацией.

При реализации алгоритма выполняются следующие шаги.

1) Прм1 отправляет приветственный пакет Пр1 (блок 1, рис. 11, см. также рис. 12), формируемый согласно требованиям, например, протокола маршрутизации AODV [7, 8], который успешно применяется в системах, функционирование которых основано на стандарте IEEE 802.15.4.

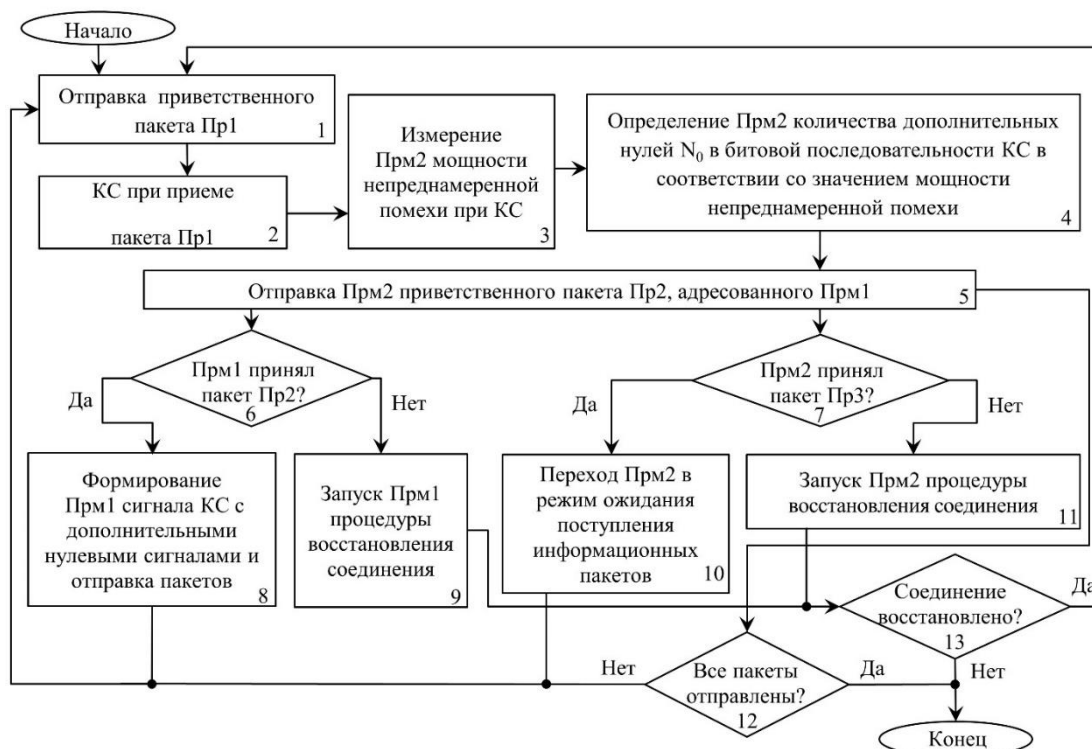


Рис. 11. Общая блок-схема алгоритма применения адаптивной кадровой синхронизации с использованием дополнительных нулевых сигналов.

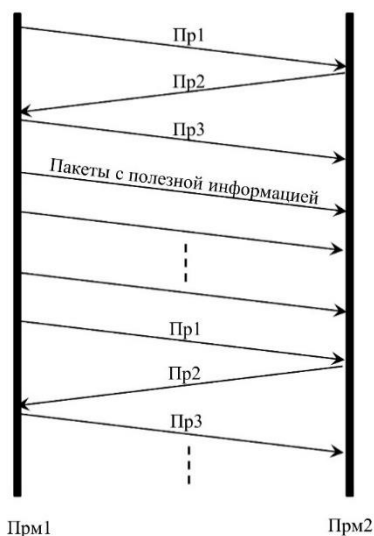


Рис. 12. Схема отправки и приема пакетов со служебной и полезной информацией.

2) Прм2 осуществляет КС при приеме Пр1 (блок 2), согласно описанию, приведенному в разделе 1.

3) Прм2 измеряет мощность непреднамеренной помехи при КС, используя известную информацию о мощности синхронизирующего сигнала (блок 3).

4) Прм2 определяет количество дополнительных нулей  $N_0$  в битовой последовательности КС соответственно измеренному значению мощности (блок 4).

5) Прм2 формирует и отправляет сигнал на сетевом уровне с приветственным пакетом Пр2 (блок 5). Преамбула Пр-пакета должна содержать последовательность КС, определенную на шаге 4, кроме этого, в Пр2 должно быть указано, сколько дополнительных нулей  $N_0$  следует Прм1 использовать в последовательности КС в ответном приветственном пакете Пр3 и далее в передаваемых пакетах с полезной информацией.

6) Если Прм1 получает Пр2 от Прм2 в течение настраиваемого времени ожидания, то передатчик принимает решение, что канал между передатчиком и приемником существует и начинает выполнять действия шага 8, иначе – шага 9.

7) Прм1 формирует и отправляет сигнал с Пр3, сигнал КС которого содержит количество дополнительных нулевых сигналов, требуемое Прм2. Далее в течение настраиваемого времени Прм1 отправляет пакеты с полезной информацией. После этого Прм1 отправляет приветственное сообщение Пр1 (блок 1).

8) Прм1 запускает процедуру восстановления соединения.

9) Если соединение восстановлено (блок 13), то начинают выполняться действия шага 1, иначе соединение признается разорванным и система прекращает свою работу.

Процедура восстановления соединения заключается в том, что устройство-инициатор отправляет специальный пакет «Ошибка», формируемый аналогично тому, как требуют многие протоколы маршрутизации, например, AODV [7]. Устройство, принимающее пакет «Ошибка», в ответ должно отправить приветственное сообщение, после чего инициатор отправляет ответное

приветственное сообщение. Если соединение восстановлено, то начинается выполнение действия шага 1, иначе соединение признается разорванным и система прекращает свою работу. Прием приветственных сообщений приемником и выполнение процедуры восстановления происходит аналогично (см. блоки 9-11, 13, рис. 11).

Система также прекращает работать, если все информационные пакеты отправлены.

### **Заключение**

Электромагнитная совместимость радиоустройств, функционирующих с применением технологий Интернета вещей согласно стандарту IEEE 802.15.4-2020, может быть существенно улучшена за счет реализации предложенного алгоритма адаптивной кадровой синхронизации на основе исследования синхронизирующей последовательности с изменяемой избыточностью (количеством дополнительных нулевых сигналов). Степень избыточности в зависимости от мощности непреднамеренного помехового сигнала может быть определена с применением разработанной в среде MATLAB имитационно-статистической модели.

Анализ полученных графических зависимостей показал, что возможности улучшения качества обнаружения синхронизирующего сигнала с помощью добавления нулевых сигналов ограничено их количеством и не превышает 15. Система адаптивной кадровой синхронизации в системе СШП радиосвязи может быть реализована на основе стандарта IEEE 802.15.4-2020, модифицированного в соответствии с предложенным алгоритмом, в части изменения избыточности синхронизирующих сигналов (количества добавляемых нулевых сигналов) с учетом результатов контроля вероятности доставки пакетов.

**Финансирование:** Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-21-00452, <https://rscf.ru/project/23-21-00452/>.

## Литература

1. Летфулин И.Р. Стандарты и технологии беспроводных сетей связи ближнего радиуса действия // Труды МАИ. 2022. № 124.
2. Gavra V.P. Usage of ZigBee and LoRa wireless technologies in IoT systems // 2020 IEEE 20<sup>th</sup> international symposium for design and technology in electronic packaging. 2020. P. 221–224.
3. Noor-A-Rahim M., Khyam M.O., Mahmud A., Li X., Pesch D., Poor H. V. Hybrid Chirp Signal Design for Improved Long-Range (LoRa) Communications // Signals. 2022. № 3. P. 1–10.
4. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks (IEEE 802.15.4-2020). 2020. 800 p.
5. Корчагин Ю.Э., Титов К.Д., Петров Ю.Г. Исследование особенностей беспроводных персональных сетей передачи данных стандарта IEEE 802.15.4-2020 // Теория и техника радиосвязи. 2022. № 3. С. 30–44.
6. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Вильямс. 2004. 1104 с.
7. Perkins C., Belding-Royer E., Das S. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing. RFC 3561. 2003. URL: [www.ietf.org/rfc/rfc3561](http://www.ietf.org/rfc/rfc3561) (дата обращения: 17.07.2023).
8. Таненбаум Э.С. Компьютерные сети. Санкт-Петербург: Питер. 2010. 992 с.

### Для цитирования:

Зайцев И.В., Жарков С.Н., Титов К.Д. Алгоритм адаптивной кадровой синхронизации в системах сверхширокополосной радиосвязи. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.13>