

## Синхронизация в системах с прямым расширением спектра

*А.В. Тихомиров, Е.В. Омелянчук, А.Ю. Семенова, А.А. Смирнов*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва*

**Аннотация:** Статья посвящена вопросам синхронизации расширяющей последовательности в системах с прямым расширением спектра. Рассматривается предложенный авторами метод передачи информационных и синхронизирующих сигналов на одной несущей частоте, позволяющей осуществление передачи данных в сложной помеховой обстановке. Проведен краткий обзор существующих решений в области временной синхронизации систем с расширением спектра. Предлагаемое решение рассмотрено с точки зрения передачи данных в широкополосных системах в условиях отрицательных отношений сигнал/шум, при этом рассмотрены ограничения данного решения. Проведено имитационное моделирование схемы, реализующей предложенный метод синхронизации, и определены требования к отношению сигнал/шум в информационном канале и канале синхронизации.

**Ключевые слова:** временная синхронизация, прямой метод расширения спектра, широкополосные системы связи, Internet of Things, BER.

### Введение

В системах связи, использующих расширение спектра, для эффективного приема цифровых сигналов необходима синхронизация опорной последовательности, организованной в приемном устройстве, с принимаемой последовательностью, то есть определение границ последовательности и времени ее прихода. В ряде случаев возможна организация служебных каналов синхронизации с более высоким соотношением сигнал/шум в радиоканале в сравнении с каналами передачи данных, однако для систем, работающих в сложной помеховой обстановке, реализация такого решения становится затруднительной. Задача синхронизации расширяющей последовательности при этом должна решаться по возможности без существенного усложнения структуры радиотракта приемопередающей аппаратуры. Это особенно актуально для систем связи, которые должны обеспечивать энергетическую скрытность, а

также для систем с кодовым разделением каналов. В дальнейшем речь пойдет о синхронизации в системах с прямым расширением спектра.

Прямое расширение спектра применяется как в мобильной связи, так и в IoT (Internet of Things, интернет вещей). Стоит отметить, что последнее применение отличается условиями распространения радиоволн, при которых узкополосные системы связи не обеспечивают требуемое качество связи.

IoT – системы с высокой плотностью устройств, генерирующих потоки данных со сравнительно невысокими скоростями и требующих большого числа каналов [1 – 4]. Для систем связи промышленного интернета вещей распространение радиоволн носит многолучевой характер из-за многократных отражений от поверхностей помещения, а используемое оборудование имеет высокий уровень шума. Постоянное увеличение количества устройств связи, расширение применения сенсорных систем в быту и промышленности приводят к возрастанию роли IoT, что обуславливает актуальность организации большого количества помехоустойчивых радиоканалов.

### **Обзор существующих решений**

Задача синхронизации расширяющей последовательности в системах с прямым расширением спектра сводится к тому, чтобы правильно определить положение начала заранее известной последовательности. Существующие решения можно разделить на две группы: осуществляющие выделение сигнала синхронизации из информационного сигнала и требующие организации служебного канала.

К первой группе относятся схемы последовательного и параллельного поиска и их возможные вариации [5]. Такие схемы работают по принципу выделения корреляционного пика при совпадении ожидаемого положения

---

расширяющей последовательности с ее действительным положением в принятом сигнале, что подразумевает необходимость компромисса между сложностью приемного тракта и временем синхронизации.

Очевидно, что в рассматриваемых системах связи, характеризующихся низким отношением сигнал/шум (ОСШ) и наличием глубоких замираний, при наличии требований к простоте радиотракта возможно только применение схемы последовательного поиска, приведенной на рисунке 1. Такое решение, однако, подходит только для систем, к которым не предъявляются высокие требования по скорости передачи данных.

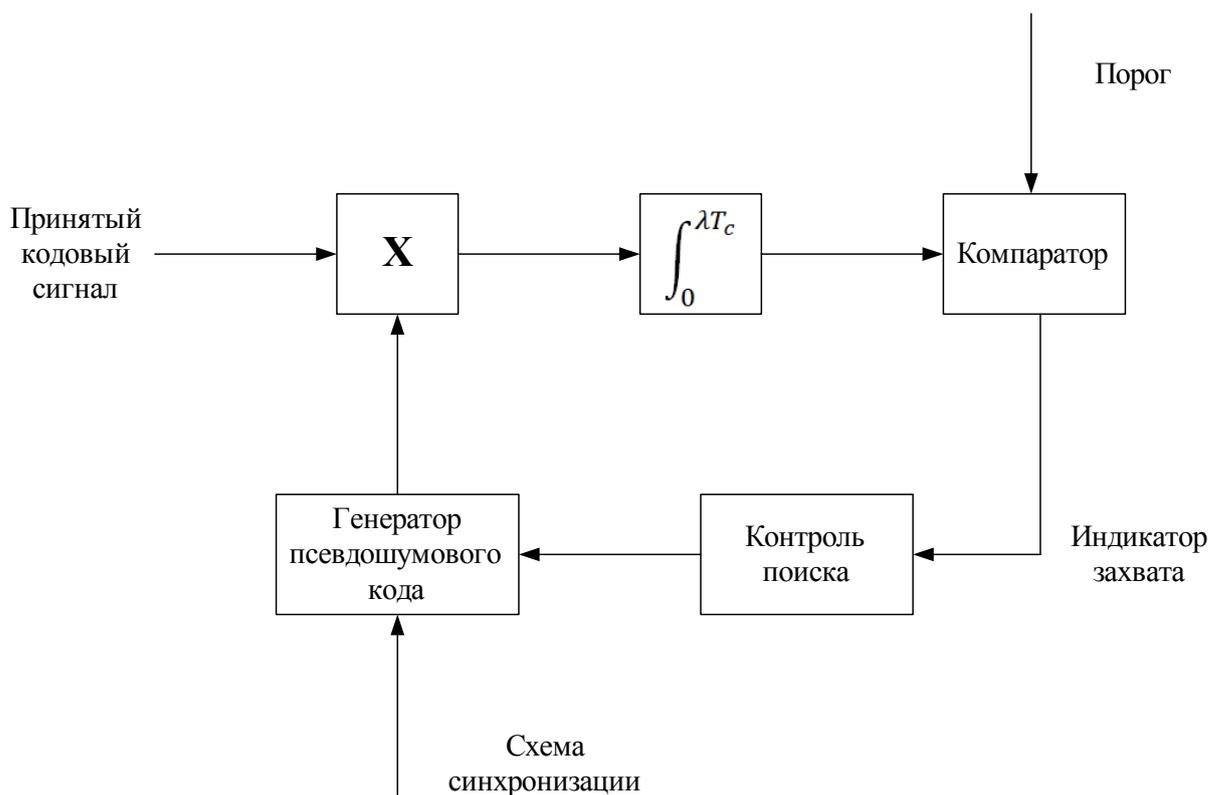


Рисунок 1 – Схема последовательного поиска

Вторая группа решений сводится к передаче по служебному каналу сигнала тактовой частоты, фронт которого совпадает с началом расширяющей последовательности.

Сигнал, содержащий информацию для синхронизации, может быть передан на частоте, не совпадающей с несущей частотой полезного информационного сигнала [6]. В таком случае требуется использование двухканального передатчика с разными несущими частотами. Недостатком такого способа является избыточное использование частотного ресурса.

Осуществление синхронизации возможно также путем возведения во вторую степень принятого фазоманипулированного сигнала, прошедшего через усилитель и полосовую фильтрацию [7, 8]. Недостатком такого способа при работе в условиях шумов и помех является невозможность достоверного приема и детектирования информационного сигнала указанным способом при отрицательных ОСШ.

### **Предлагаемое решение**

В статье рассматривается предложенный авторами метод осуществления синхронизации расширяющей последовательности в условиях значительного превышения уровня шума над уровнем информационного сигнала, заключающийся в том, что для синхронизации используется служебный канал, работающий на одной частоте с информационным [9]. Разделение каналов производится при формировании сигналов квадратурных каналов: синфазный канал используется для формирования фазоманипулированного сигнала с расширением спектра, квадратурный канал используется для передачи сигнала тактовой частоты.

Как известно, проблема синхронизации расширяющей последовательности может быть решена с помощью организации дополнительного служебного канала для передачи сигнала синхронизации, фиксирующего начало псевдослучайной последовательности (ПСП).

---

---

Достаточно очевидно, что этот канал не должен нарушать основных параметров линии передачи основного канала (то есть параметров сигнала с расширенным спектром, таких как скрытность, помехоустойчивость, энергетический потенциал). Это в свою очередь означает, во-первых, что он должен быть приблизительно сравним по энергетике с основным каналом (а желательно иметь меньшую энергетику) и, во-вторых, его задержка в эфире и в блоках передатчика и приемника должна быть равна задержке основного сигнала. Разумеется, некоторые узлы в приемнике при выделении синхросигнала (например, узкополосный фильтр) могут вносить дополнительные задержки, которые в некоторой мере могут быть скомпенсированы.

Кроме того, неточность синхронизации может быть окончательно снята одной из известных схем выделения тактовой синхронизации [10], в том числе с использованием системы ФАПЧ с узкой шумовой полосой.

Таким образом, предлагается передача сигнала синхронизации с амплитудой, меньшей амплитуды информационного сигнала. Графически требуемая последовательность действий представлена на рисунках 2 и 3 в виде блок-схем передающей и приемной частей системы связи соответственно.

В целом работа предлагаемой схемы приемопередатчика сводится к следующим шагам. В синфазном канале формируется фазоманипулированный сигнал (ФМ-2) с расширением спектра (1), то есть производится логическое перемножение потока данных на псевдослучайную последовательность, затем осуществляется перенос на несущую частоту (3). В квадратурном канале формируется меандр с тактовой частотой информационного сигнала (2), который также переносится на несущую частоту (4), но имеет меньшую амплитуду. На рисунке 4 представлено сигнальное созвездие, которое получается в результате данных операций.

---

После этого производится полосовая фильтрация, передача в радиоканале и повторная полосовая фильтрация для выделения сигнала на нужной частоте из эфира.

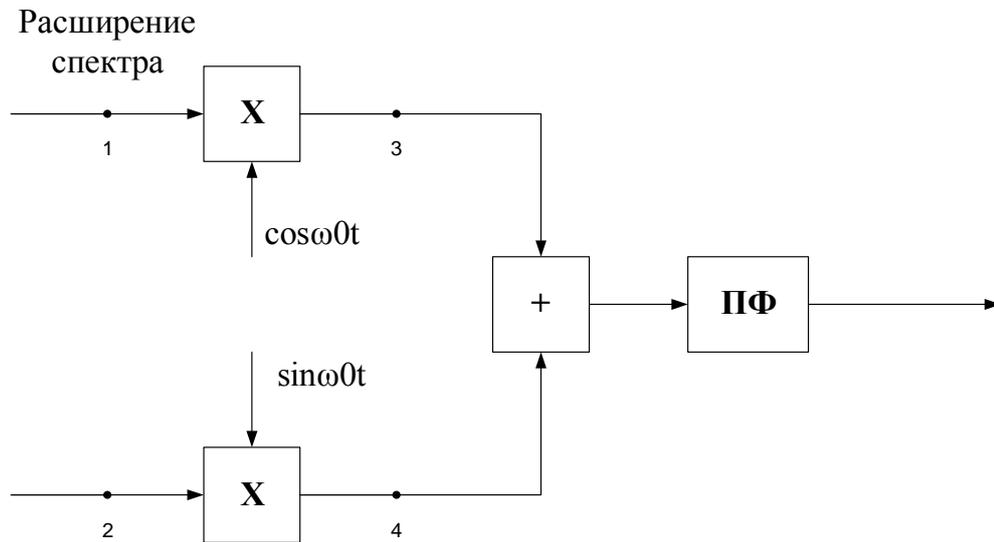


Рисунок 2 – Блок-схема передающей части системы связи

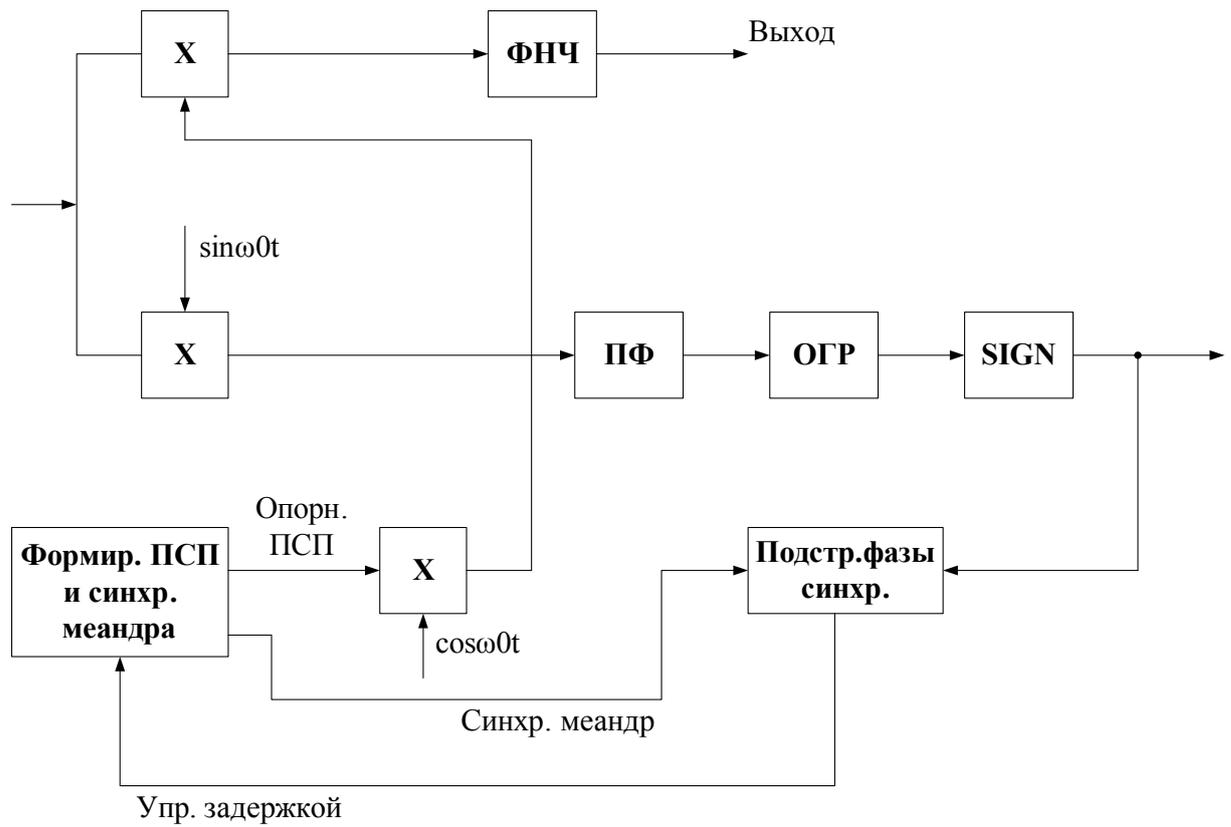


Рисунок 3 – Блок-схема приемной части системы связи

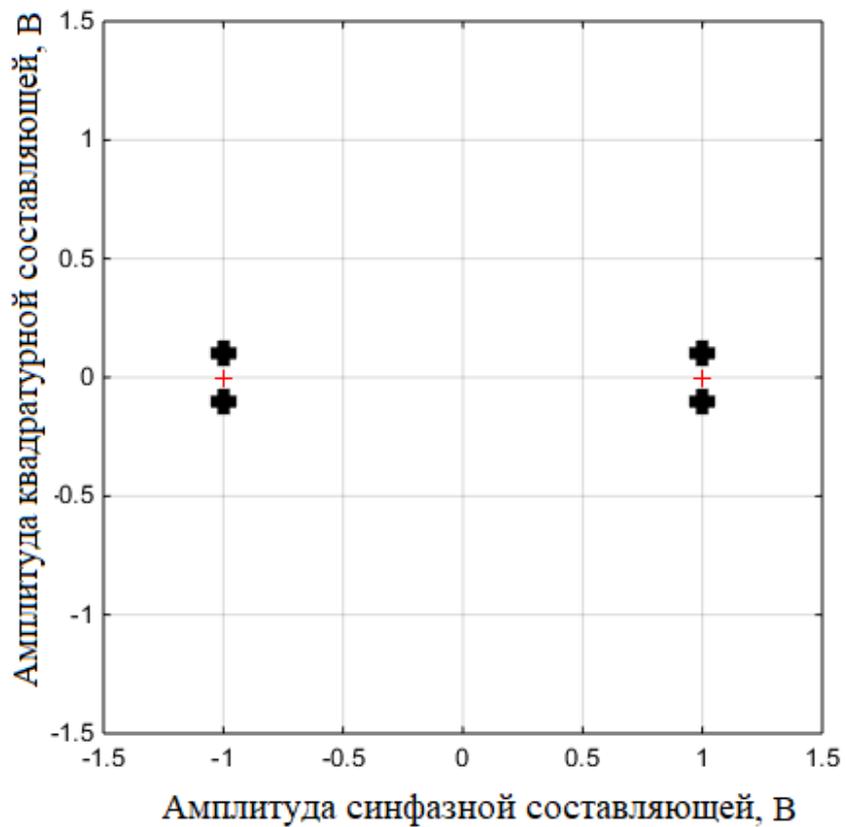


Рисунок 4 – Сигнальное созвездие для предлагаемой структуры сигнала при соотношении амплитуд квадратурного и синфазного каналов 1:10

В приемнике сигнал разделяется на синфазную и квадратурную составляющие, причем для демодуляции сигнала синхронизации используется гармонический сигнал опорного генератора, а для демодуляции информационного сигнала используется гармонический сигнал, перемноженный с ПСП, выровненной по сигналу синхронизации. Для выделения синхросигнала используется узкополосная фильтрация. При помощи ограничителя и блока выделения знака осуществляется преобразование принятого сигнала в меандр. Так как узкополосный фильтр вносит задержку, производится ее компенсация, а затем происходит формирование ПСП, начало которой совпадает с фронтом сигнала синхронизации.

Очевидно, предлагаемое решение имеет как свои преимущества, так и недостатки, которые будут описаны далее и проанализированы по результатам проведенного имитационного моделирования рассматриваемой схемы приемопередатчика.

### **Анализ работы предложенной системы**

Для определения корректности работы схемы было проведено имитационное моделирование в условиях задержки в канале с целью определения вероятности битовой ошибки (BER) при приеме информационного сигнала. Параметры схемы были выбраны следующими:

- тактовая частота 25 кГц (символьный интервал 40 мкс),
- частота выдачи чипов 25,6 МГц (длина ПСП 1024 символа),
- несущая частота 256 МГц,

- сигнал в квадратурном канале ослаблен относительно синфазного в 10 раз,
- полоса канального фильтра 80 МГц,
- центральная частота узкополосного фильтра в квадратурном канале 25 кГц, полоса пропускания 2,5 кГц.

Результаты моделирования показаны на рисунке 5 в сравнении с теоретической зависимостью BER от отношения сигнал/шум на бит ( $E_b/N_0$ ) в канале связи для системы с прямым расширением спектра. Из рисунка видно, что теоретическая и определенная в ходе моделирования кривые практически совпадают, что подтверждает возможность использования предложенной схемы синхронизации.

Отдельно показана вероятность ошибки для сигнала в квадратурном канале. Меньшее количество ошибок объясняется использованием для выделения этого сигнала фильтра со значительно более узкой полосой. Разница в ОСШ для рассматриваемых шумовых полос составляет 45 дБ, но так как амплитуды сигналов в синфазном и квадратурном каналах не равны, разница между графиками меньше.

Немаловажным является выбор уровня синхросигнала. С одной стороны, он должен быть достаточно большим для обеспечения ОСШ в канале синхронизации, которое позволит выделять сигнал тактовой частоты для обеспечения синхронизации системы связи. С другой стороны, при повышении уровня синхросигнала меняется форма результирующего сигнального созвездия и в спектре сигнала возникают дополнительные составляющие около несущей частоты, что представляет собой нежелательное явление в рассматриваемых системах связи и создает помехи другим устройствам.

---

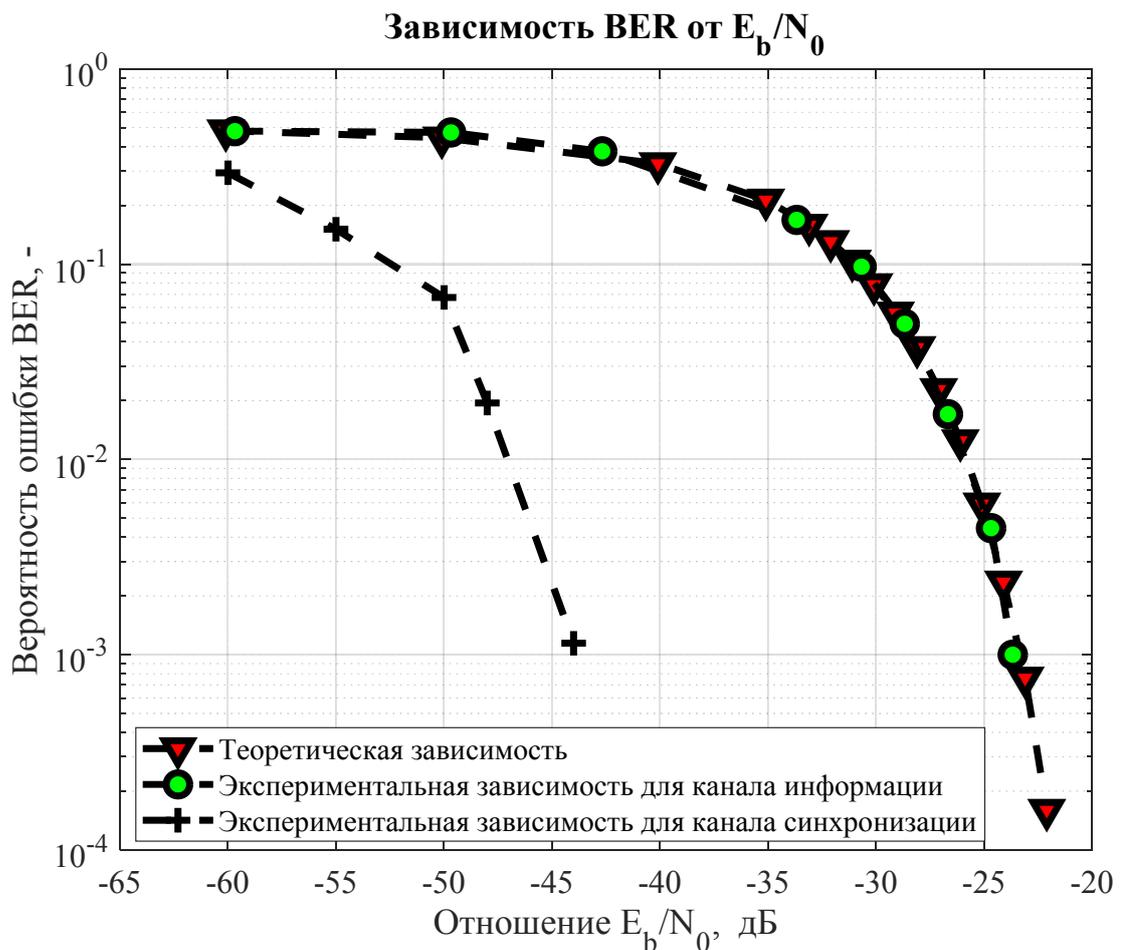


Рисунок 5 – BER для информационного канала и канала синхронизации

Как видно из рисунка 5, для обеспечения приемлемой вероятности битовой ошибки при передаче информационного сигнала требуется  $E_b/N_0$  около «минус» 20 дБ. Это означает, что отношение сигнал/шум на символ синхронизирующего сигнала будет составлять 25 дБ при амплитуде, соответствующей амплитуде информационного сигнала. Это достаточно большая величина, которая может быть уменьшена для обеспечения приемлемой точности до уровня около 5 дБ, что соответствует ослаблению синхросигнала в 10 раз относительно информационного. Пример результирующего спектра сигнала приведен на рисунке 6 для канала с АБГШ, что соответствует сигнальному созвездию на рисунке 4.

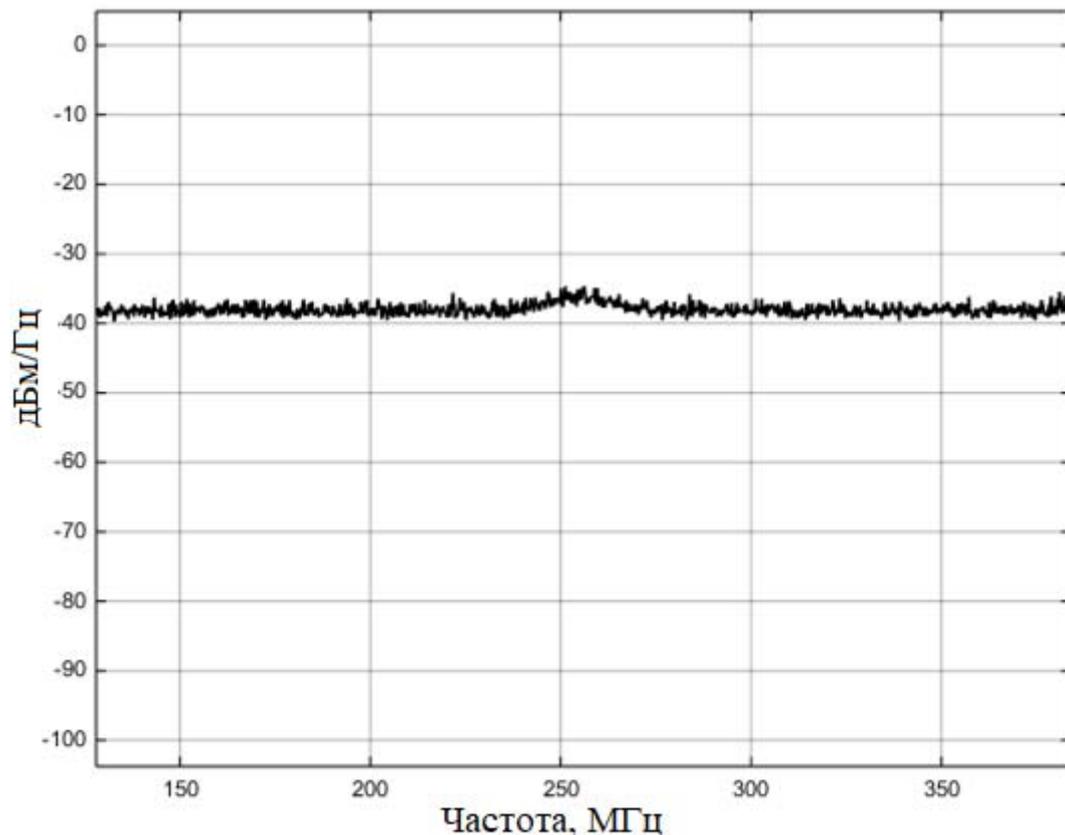


Рисунок 6 – Спектр сигнала с АБГШ при амплитуде Q-канала 0,1 В

Таким образом, выбор амплитуды сигнала квадратурного канала сводится к определению компромисса между точностью синхронизации и энергетическими параметрами системы связи. Для повышения точности синхронизации возможно введение в приемную схему дополнения в виде узкополосного ФАПЧ, поддерживающего тактовую частоту сигнала.

Далее проводилось имитационное моделирование для определения влияния на прием сигнала сосредоточенной (синусоидальной) помехи. Моделирование осуществлялось следующим образом: для различных значений частоты синусоидальной помехи определялось такое минимальное отношение сигнал/помеха, при котором вероятность битовой ошибки при приеме информационного сигнала не превышает  $4 \cdot 10^{-5}$ . Такая величина была

выбрана исходя из возможностей используемого для моделирования оборудования. Результаты приведены на рисунке 7.

Из рисунка видно, что сосредоточенная помеха оказывает заметное влияние на прием в том случае, если находится в полосе информационного сигнала или в полосе синхросигнала. Как можно заметить, форма приведенной зависимости повторяет форму АЧХ фильтров, выделяющих сигналы в синфазном и квадратурном каналах. Таким образом, отношение сигнал/помеха в полосе информационного сигнала не должно превышать «минус» 30 дБ для обеспечения заданной величины BER, в то же время для канала синхронизации для обеспечения приема сигнала отношение сигнал/помеха в полосе узкополосного фильтра должно быть значительно выше (порядка 0 дБ).

Ранее было рассмотрено, каким образом осуществляется выбор уровня синхросигнала, откуда следует, что обеспечение приемлемого отношения сигнал/помеха в канале синхронизации желательно производить не увеличением мощности сигнала, а другими методами. Одним из вариантов является использование расширения спектра в канале синхронизации с малым коэффициентом расширения. Коэффициент расширения тогда должен выбираться исходя из необходимости обеспечения компромисса между отношением сигнал/помеха в канале синхронизации и простотой установления синхронизации этой новой последовательности известными способами.

Другим способом избавиться от негативного эффекта сосредоточенной помехи является введение в схему дополнительного блока узкополосной фильтрации. Наилучшим решением в этом случае была бы адаптация тактовой частоты и соответствующего фильтра при наличии помехи в соответствующей полосе, однако такое решение представляет собой значительное усложнение рассматриваемой схемы.

---

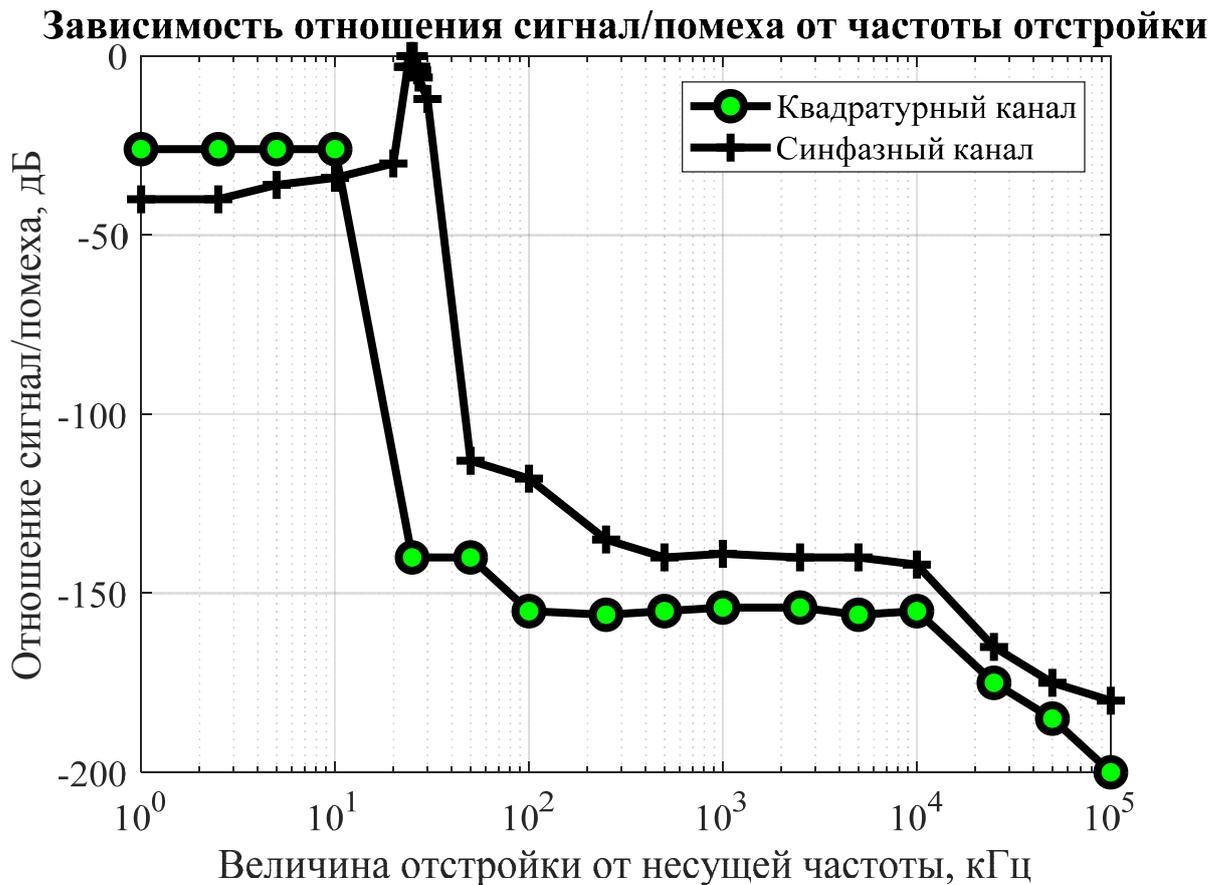


Рисунок 7 – Зависимость отношения сигнал/помеха от величины отстройки сосредоточенной помехи от несущей частоты при условии, что доля ошибок не превышает  $4 \cdot 10^{-5}$

Особенностью предлагаемого решения, частично снижающего его эффективность, является неизбежное возникновение задержки при выделении синхросигнала в узкополосном фильтре. При этом до установления на выходе фильтра уровня амплитуды синхросигнала, обеспечивающего необходимое ОСШ в канале синхронизации, возникают дополнительные потери в информационном канале за счет нестабильности фронтов выделенного тактового сигнала, которая приводит к несоответствию положения этих фронтов началу ПСП.

На рисунке 8 представлен пример переходного процесса в узкополосном фильтре при выделении сигнала синхронизации. Из рисунка видно, что для рассматриваемого фильтра (фильтр Баттерворта 2 порядка с

полосой пропускания 2,5 кГц) прием информации может осуществляться начиная с 3-6 фронта синхросигнала.

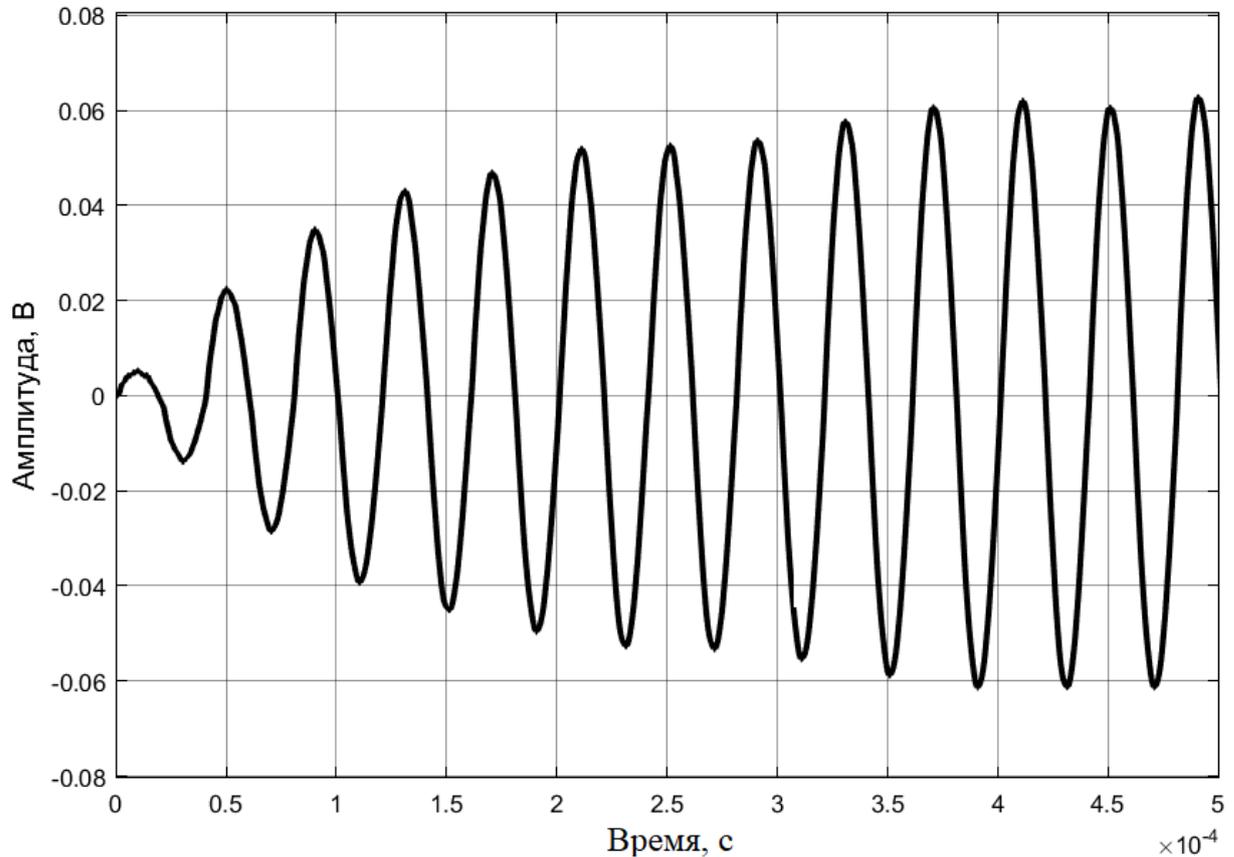


Рисунок 8 – Переходной процесс на выходе УПФ в канале синхронизации

Таким образом, предлагаемая схема обеспечивает прием сигнала с прямым расширением спектра в условиях отрицательных ОСШ, при этом реализация данного решения сопряжена с определенными трудностями, главной из которой является возникновение дополнительной задержки при выделении синхросигнала. Стоит отметить, что для решения такой проблемы, как необходимость обеспечения достаточного ОСШ в канале синхронизации, использование узкополосного фильтра является основным решением. Другим вариантом могло бы быть использование в качестве сигнала синхронизации сигнала с расширением спектра, что в свою очередь приводит к необходимости установления первичной синхронизации.

### **Выводы**

В целом результаты проведенного имитационного моделирования показывают, что предложенный способ синхронизации в системах с прямым расширением спектра делает возможным достоверный прием и детектирование информационного сигнала при отрицательных соотношениях сигнал/шум, при этом такой способ не требует избыточного использования частотного ресурса.

Существенным преимуществом предлагаемого способа является возможность обеспечения практически одинаковых задержек в информационном канале и канале синхронизации, так как передача информации и синхронизирующего сигнала осуществляется по одному каналу и на одной частоте.

Предложенный способ может найти применение в системах с кодовым разделением каналов, в том числе в современных системах IoT.

### **Литература**

1. Qian Y., Ma L., Liang X. "Symmetry chirp spread spectrum modulation used in LEO satellite Internet of Things" IEEE Commun. Lett. vol. 22 no. 11 pp. 2230-2233 Nov. 2018. URL: [ieeexplore.ieee.org/document/8444661](http://ieeexplore.ieee.org/document/8444661)
2. Wang H., Fapojuwo A. O. "A survey of enabling technologies of low power and long range machine-to-machine communications", IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 19, no. 4, pp. 2621-2639, 1st Quart. 2017. URL: [ieeexplore.ieee.org/document/7962157](http://ieeexplore.ieee.org/document/7962157)
3. Лященко А.М., Пачев А.Н., Манучарян Л.Х. Реализация приложений Интернета вещей агентной моделью Akka // Инженерный вестник Дона. 2019. №5. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_65\\_\\_6y2019\\_Lyashchenko\\_Pachev\\_Manucharyan.pdf\\_f00093e477.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_65__6y2019_Lyashchenko_Pachev_Manucharyan.pdf_f00093e477.pdf)

4. Соколова Э.С., Багиров М.Б., Женарстанов А.М., Бородина Т.Л., Дмитриев Д.В. Система управления сетью «Интернета вещей» для удаленной идентификации радиометок // Инженерный вестник Дона. 2019. №6. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_67\\_6y2019\\_Sokolova\\_edit\\_.pdf\\_aa8fdec401.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_67_6y2019_Sokolova_edit_.pdf_aa8fdec401.pdf)
  5. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – Москва: Издательский дом Вильямс, 2003. – 1104 с.
  6. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. Пер. с англ. Под ред. Журавлева В.И. – М.: Радио и связь, 2000. – 520 с.
  7. Журавлев В.И., Руднев А.Н., Трусевич Н.П. Устройство для передачи и приема дискретных сообщений с использованием сигналов с прямым расширением спектра: пат. 2358402 Рос. Федерация. № 2008109593/09; заявл. 14.03.08; опубл. 10.06.09, Бюл. № 16.
  8. Журавлев В.И., Руднев А.Н., Трусевич Н.П. Устройство для передачи и приема дискретных сообщений с использованием сигналов с прямым расширением и автокорреляционным сжатием спектра: пат. 2358401 Рос. Федерация. № 2008107081/09; заявл. 27.02.08; опубл. 10.06.09, Бюл. № 16.
  9. Тихомиров А.В., Омелянчук Е.В., Семенова А.Ю., Смирнов А.А. Способ синхронизации в системах с прямым расширением спектра: пат. 2703509 Рос. Федерация. № 2018137462; заявл. 24.10.18; опубл. 18.10.19, Бюл. № 29.
  10. Спилкер Дж. Дж. Цифровая спутниковая связь / Пер. с англ. под ред. Маркова В.В. - Москва: Связь, 1979. - 592 с.
-

### References

1. Qian Y., Ma L., Liang X. "Symmetry chirp spread spectrum modulation used in LEO satellite Internet of Things" IEEE Commun. Lett. vol. 22 no. 11 pp. 2230-2233 Nov. 2018. URL: [ieeexplore.ieee.org/document/8444661](http://ieeexplore.ieee.org/document/8444661)
2. Wang H., Fapojuwo A. O. "A survey of enabling technologies of low power and long range machine-to-machine communications", IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 19, no. 4, pp. 2621-2639, 1st Quart. 2017. URL: [ieeexplore.ieee.org/document/7962157](http://ieeexplore.ieee.org/document/7962157)
3. Ljashhenko A.M., Pachev A.N., Manucharjan L.H. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №5. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_65\\_6y2019\\_Lyashchenko\\_Pachev\\_Manucharyan.pdf\\_f00093e477.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_65_6y2019_Lyashchenko_Pachev_Manucharyan.pdf_f00093e477.pdf)
4. SokolovaJe.S., Bagirov M.B., Zhenarstanov A.M., Borodina T.L., Dmitriev D.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №6. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_67\\_6y2019\\_Sokolova\\_edit\\_.pdf\\_aa8fdec401.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_67_6y2019_Sokolova_edit_.pdf_aa8fdec401.pdf)
5. Skljар B. Cifrovajasvjaz'.Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie.[Digital communication. Theoretical foundations and practical application] Moskva: Izdatel'skij dom Vil'jams, 2003.1104 p.
6. Feer K. Besprovodnaja cifrovaja svjaz'. Metody moduljicii i rasshirenija spektra.[Wireless digital communication. Modulation and spreading methods]. Per. s angl. Pod red. Zhuravleva V.I. M.: Radio isvjaz', 2000. 520p.
7. Zhuravlev V.I., Rudnev A.N., Trusevich N.P. Ustrojstvo dlja peredachi i priema diskretnyh soobshhenij s ispol'zovaniem signalov s prjamym rasshireniem spektra [Device for transmitting and receiving discrete messages using signals with direct expansion of the spectrum]: pat. 2358402Ros. Federacija.№ 2008109593/09; zajavl.14.03.08 ;opubl. 10.06.09, Bjul.№ 16.
8. Zhuravlev V.I., Rudnev A.N., Trusevich N.P. Ustrojstvo dlja peredachi i priema diskretnyh soobshhenij s ispol'zovaniem signalov s prjamym rasshireniem i avtokorreljacionnym szhatiem spektra [Device for transmitting and



receiving discrete messages using signals with direct expansion and autocorrelation compression of the spectrum]: pat. 2358401Ros. Federacija.№ 2008107081/09; zajavl.27.02.08 ;opubl. 10.06.09, Bjul.№ 16.

9. Tikhomirov A.V., Omeluchuk E.V., Semenova A.Y., Smirnov A.A. Sposob sinhronizacii v sistemah s prjamym rasshireniem spectra [Synchronization method in direct spread spectrum systems]: pat. 2703509Ros. Federacija. № 2018137462; zajavl. 24.10.18 ;opubl. 18.10.19, Bjul.№ 29.

10. Spilker J. J. Cifrovajasputnikovajasvjaz' [Digital Satellite Communications] Per. s angl.pod red. Markova V.V. Moskva: Svjaz', 1979.592 p.