



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-3-36-44>

Оригинальная статья / Original paper

УДК 621.391.833.64

АЛГОРИТМ КОМПЕНСАЦИИ СЛУЧАЙНОЙ НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЫ И / ИЛИ ОТСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ С КВАДРАТУРНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

А.Л. МАТЮШКОВ, И.Н. ЖУК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 13 октября 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Цель работы, результаты которой представлены в рамках статьи, заключается в разработке, реализации и моделировании алгоритма, позволяющего компенсировать эффект случайной начальной фазы сигналов с квадратурной модуляцией, возникающий на входе цифровой части приемного тракта. Разрабатываемый алгоритм также позволяет устранять ошибку отстройки несущей частоты до значений, попадающих в полосу захвата петли фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), с использованием минимального количества ресурсов для реализации. Для достижения поставленной цели были решены задачи по устранению ошибок фазы и частоты, возникающих в модели цифровой обработки сигнала до включения в работу петли ФАПЧ, включая моделирование проблемы в среде разработки Matlab Simulink. Разработан алгоритм устранения ошибок начальной фазы и отстройки частоты для устойчивой работы петли ФАПЧ, представленной в статье в виде петли Костаса. Из полученных в статье результатов расчета и моделирования следует, что разработанная модель приемного тракта полностью устраняет вероятность возникновения ошибки случайной начальной фазы и отстройки частоты в модели приемника QPSK сигнала до включения в работу петли ФАПЧ, что значительно уменьшает время готовности к работе данной модели.

Ключевые слова: квадратурная модуляция, QPSK сигнал, компенсация, случайный параметр сигнала, ошибки в Costas PLL, устойчивость канала синхронизации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Матюшков А.Л., Жук И.Н. Алгоритм компенсации случайной начальной фазы и / или отстройки частоты в системах связи с квадратурной модуляцией. Доклады БГУИР. 2022; 20(3): 36-44.

ALGORITHM OF RANDOM START PHASE CORRECTION AND FREQUENCY OFFSET IN THE COMMUNICATION SYSTEM WITH THE QUADRATURE MODULATION

ALEXANDER L. MATIOUCHKOV, ILYA N. ZHUK

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 13 October 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The goal of the work is to find a solution, realization, and modelling of the algorithm for the compensation of a start random phase error of a quadrature signal, which began at the input of the receiver's digital part. This algorithm also solves the problem of carrier frequency error offset. These errors have enough values for the lock-band of Costas PLL using minimum hardware resources. To complete this task, the realization and modelling algorithm problems of phase and frequency offset error corrections in Matlab Simulink IDE, arising from Costas PLL, were solved. This algorithm sets values errors for Costas PLL work stability. From the results of calculation and modelling obtained in the article, it follows that the developed model of the receiving path completely eliminates the probability of the error of a random initial phase and frequency offset in the receiver model of a QPSK signal, before the PLL loop is switched on, which significantly reduces the time of readiness for operation of this model.

Keywords: quadrature modulation, QPSK signal, compensation, random parameter of the signal, Costas PLL error, channel of synchronization stability.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Matiouchkov A.L., Zhuk I.N. Algorithm of Random Start Phase Correction and Frequency Offset in the Communication System with the Quadrature Modulation. Doklady BGUIR. 2022; 20(3): 36-44.

Введение

При проектировании системы связи с использованием квадратурной модуляции разработчик столкнется с проблемой устранения эффекта случайной начальной фазы сигнала на приемной стороне. Для восстановления фазы несущей сигнала в системах с квадратурной модуляцией, в цепи восстановления несущей используется петля фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), в частности петля Костаса. При реализации пакетной передачи данных с большим темпом передачи пакетов разработчик столкнется с проблемой быстрой синхронизации несущей частоты (случайная начальная фаза или отстройка частоты), что крайне актуально для систем с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ). Для сигнала с QPSK модуляцией наибольшее время синхронизации требует сдвиг по фазе, кратный 45° . В этом случае для борьбы с возникшей, при такой отстройке фазы, ошибкой приходится увеличивать время, выделяемое на синхронизацию ФАПЧ, так как время переходного процесса увеличивается в некоторое количество раз. Данный метод не может быть применен для сигналов, жестко ограниченных по времени и полосе занимаемых частот. Для данных видов сигналов как никогда актуальна проблема быстрого восстановления фазы сигнала несущей. Гарднер [1] утверждал: «...Контур синхронизации, обрабатывающий за разумное время, может быть создан только при очень «благоприятных» условиях». Бернارد Скляр [2] же утверждает: «Такие условия на практике встречаются крайне редко».

Цель настоящей работы – предложить алгоритм, позволяющий компенсировать эффект случайной начальной фазы квадратурного сигнала на приемной стороне, а также устранять отстройку несущей частоты до значений, попадающих в полосу захвата ФАПЧ.

Моделирование проблемы начальной синхронизации

В данной статье рассмотрен случай работы предлагаемого алгоритма на кодовой последовательности Баркера разной длины и согласованного фильтра, настроенного на эти последовательности.

Для воссоздания условий возникновения случайной начальной фазы исследуемой последовательности, кратной 45° , в работе использовалась общая модель псевдо-когерентной системы. В состав модели, представленной на рис. 1, входит примитивная модель QPSK передатчика, которая замкнута на приемник через согласованную линию передачи с псевдослучайной отстройкой фазы и частоты. Реализована модель приемника, включающая в себя согласованную фильтрацию (СФ), синтезатор частоты (NCO), петлю ФАПЧ (Costas PLL), блок для вывода созвездия в фазовой плоскости (Diagram Res) и реализованный алгоритм восстановления несущей частоты (NCO correction algorithm).

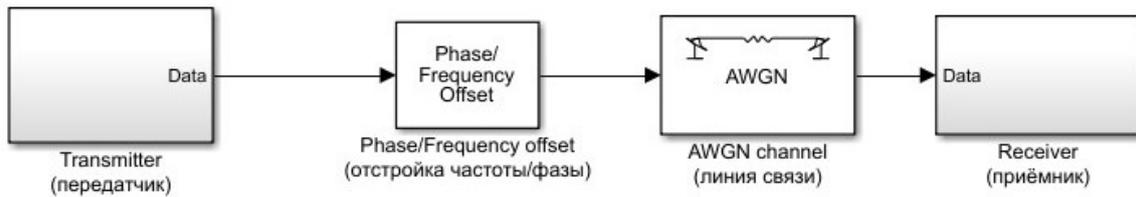


Рис. 1. Исследуемая модель обработки
Fig. 1. Processing model under study

Блок отстройки фазы и частоты реализован средствами Matlab Simulink с изменением фазы и частоты сигнала. Фаза сигнала смещена так, чтобы сигнальное созвездие было развернуто на 45° , воссоздавая эффект случайной начальной фазы.

Линия связи представлена в виде AWGN Channel с регулируемым отношением сигнал/шум (SNR). Для корректной работы алгоритма, SNR должен быть не ниже 6 dB. В реализованной модели SNR равен 8 dB.

Модель приемника, состоящая из вышеперечисленных функциональных узлов, представлена на рис. 2. Принцип работы модели приемника: сигнал ошибки с ФАПЧ, в данном случае петля Костаса (Costas PLL), поступает на сумматор, который складывает инкремент NCO и сигнал ошибки, тем самым подстраивая сигнал с NCO под фазу принимаемого сигнала. Процесс захвата фазы продемонстрирован на рис. 3. Модель петли Костаса построена согласно расчетам, представленным в статье [3]. Коэффициенты петлевого фильтра петли Костаса подобраны для максимально быстрой синхронизации с полосой, обеспечивающей безрывную работу петли, и не противоречат расчетам моделирования, представленным в статье [4].

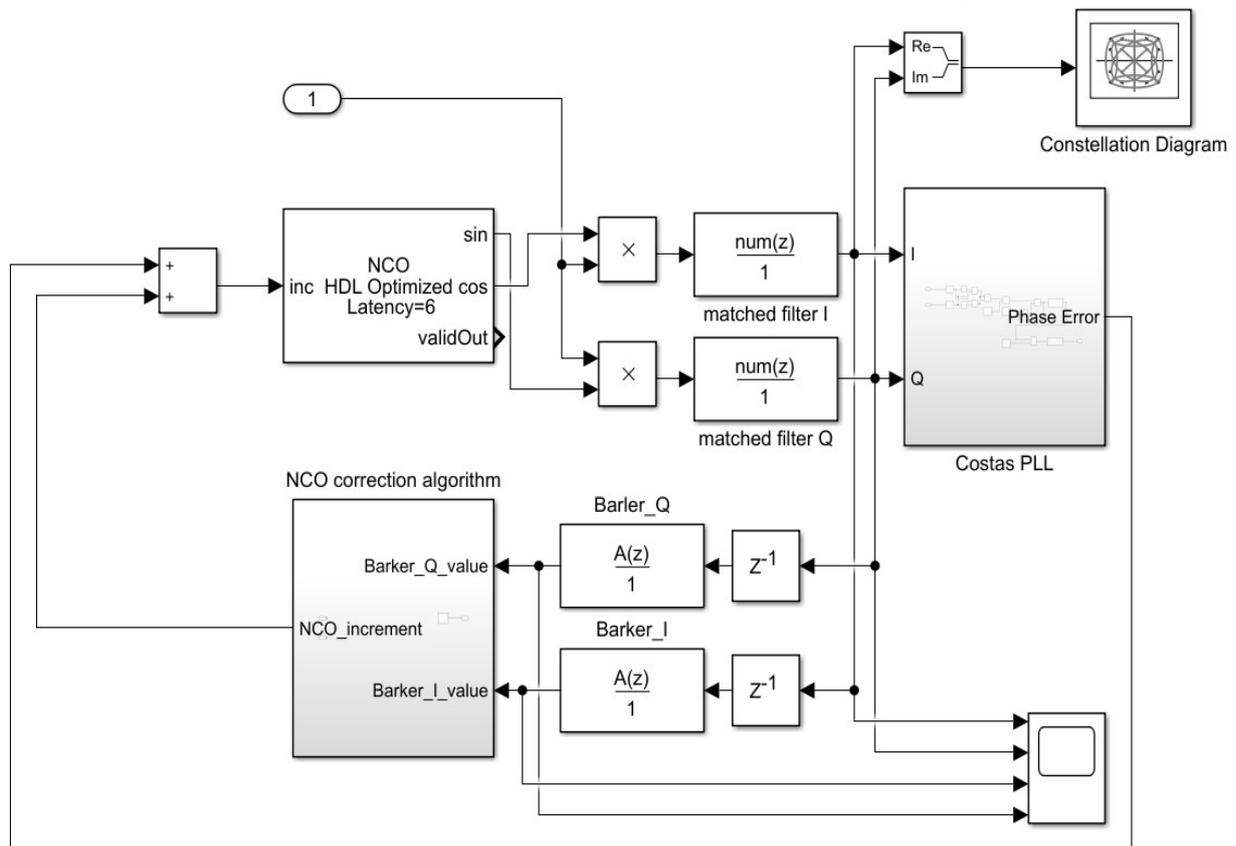


Рис. 2. Модель приемника
Fig. 2. Receiver model

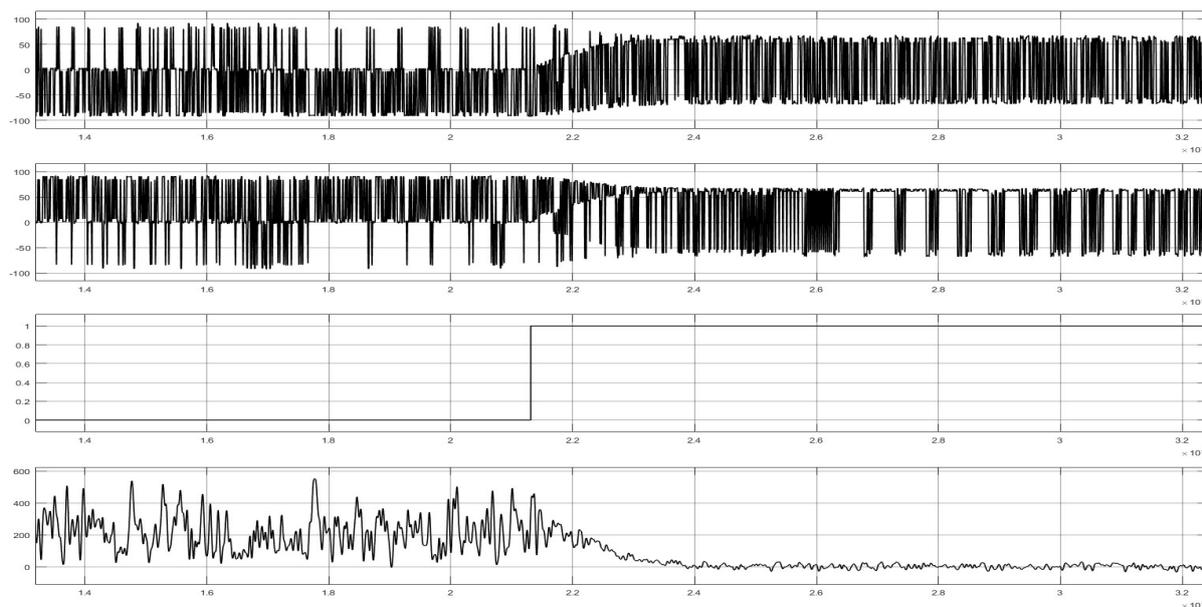


Рис. 3. Процесс захвата фазы
Fig. 3. Phase lock process

Как видно из рис. 3, скорость установления петли примерно 0,25 мс, что соответствует 12,5 % пакета, если длина всего пакета 2 мс, при высоком SNR, равном 8 dB.

Алгоритм мгновенной компенсации случайной начальной ошибки по фазе и/или частоте

Алгоритм восстановления несущей частоты, представленный на рис. 4, позволяет устранить ошибку начальной фазы до значений, при которых петля ФАПЧ не будет оказывать воздействие на прием и обработку сигнала и позволяет исправить отстройку частоты до значений, которые попадают в полосу захвата петли ФАПЧ. Преимуществом данного алгоритма является то, что не нужно вводить дополнительных синхрослов при наличии известной преамбулы сигнала.

Данный алгоритм также подходит для синхронизации FDM-сигналов с синхроканалом. Алгоритм работает параллельно с ФАПЧ, но начинает работу раньше ее, поскольку не ожидает решения о начале сообщения. Два – это минимальное число откликов СФ, необходимое для работы алгоритма. На примере данного случая и будет описана работа алгоритма. В данной модели были применены коды Баркера длиной 7, 11 и 13 и СФ, согласованные на коды Баркера соответствующих длин.

Для безошибочной работы алгоритма необходим правильно подобранный порог детектирования амплитуд откликов СФ, с которым происходит сравнение значений амплитуд откликов СФ.

При первом превышении значения порога откликом СФ, сравниваются значения амплитуд откликов квадратурной и синфазной квадратур сигнала. Если разность амплитуд откликов СФ (дельта) больше критического значения, при пороге 3000 ед. в данной модели, фиксируется дельта амплитуд откликов (разница амплитуд с учетом знака) и положение во времени (первый отклик равен нулю).

Далее ожидается второе превышение порога одним из откликов. Когда это происходит, снова фиксируется дельта амплитуд откликов СФ обеих квадратур и сравнивается с предыдущими значениями. Если дельта была в норме, а при повторном сравнении превысила норму, то такая ситуация говорит о наличии ошибки по частоте. Если же дельта была больше критической и осталась неизменной, то это говорит об ошибке по фазе. Если дельта амплитуд откликов СФ изменила значение на противоположное относительно нуля, это говорит о большой ошибке по частоте, которая изменила положение сигнала в фазовой проекции на 180 ° в пределах длительности определенной последовательности кода Баркера. Если ошибки нет, то значение дельты не изменится на протяжении длительности двух последовательностей.

Максимальная ошибка по частоте, исправляемая алгоритмом, соответствует ошибке, при которой возможна правильная работа СФ, т.е. та, при которой в течение всей последовательности не изменится полярность амплитуды кода Баркера.

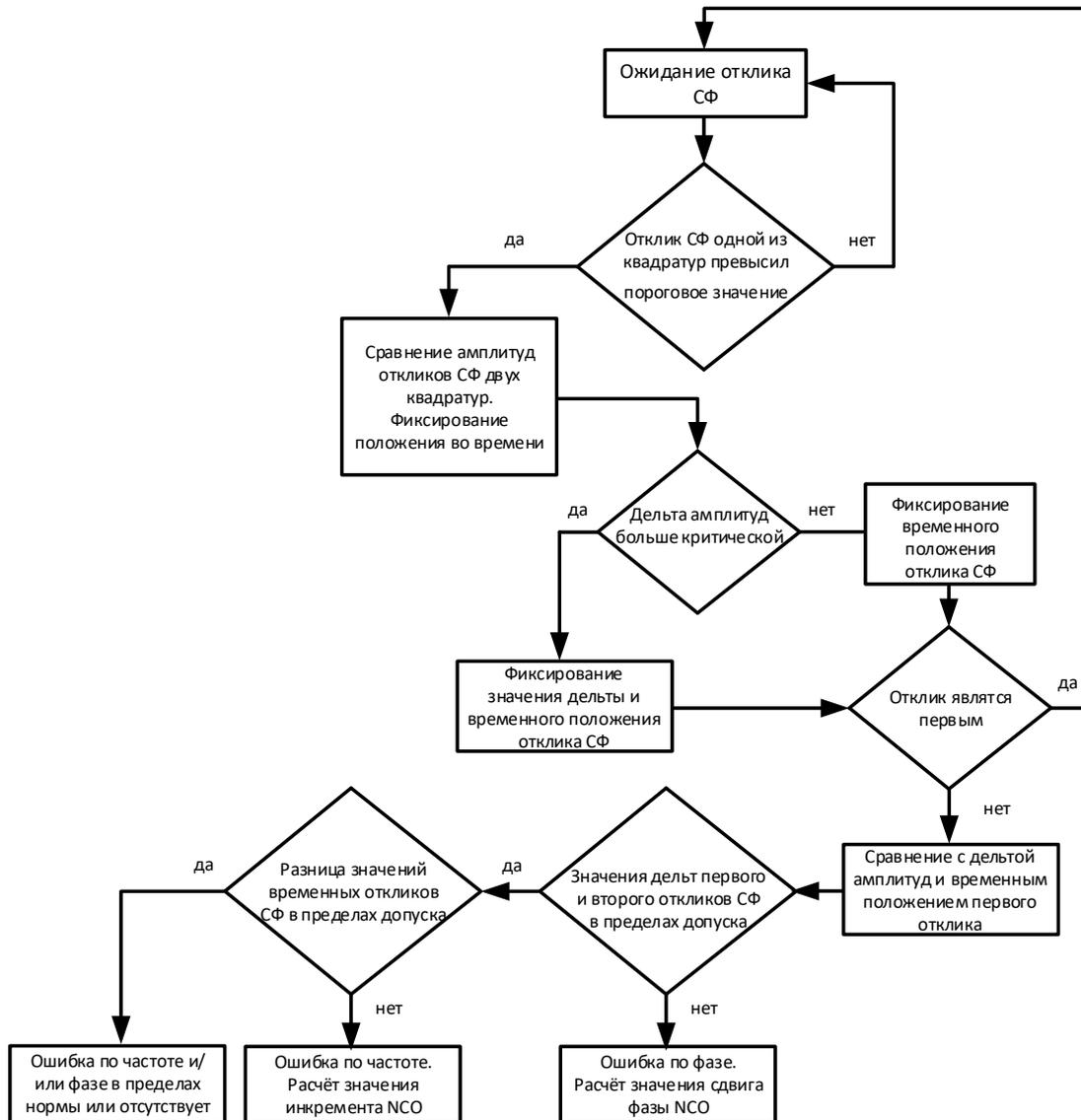


Рис. 4. Алгоритм восстановления несущей частоты
Fig. 4. Correction carrier frequency algorithm

Таким образом, максимальная исправляемая ошибка по частоте обратно пропорциональна длительности одного дискрета кода Баркера, умноженного на длину кода и деленного на 4, так как для правильной работы СФ фаза несущей частоты сигнала должна находиться в пределах одной фазовой четверти и/или на пересечении двух смежных четвертей и соответствовать значению, представленному в следующей формуле:

$$f_{err} = \frac{1}{\tau_s \cdot N_{PN} \cdot 4} = \frac{f_s}{N_{PN} \cdot 4} = \frac{f_s}{11 \cdot 4} = \frac{f_s}{44}, \quad (1)$$

где f_{err} – значение максимальной исправляемой ошибки; f_s – частота символа кодовой последовательности; N_{PN} – количество элементов кодовой последовательности; для кода Баркера, используемого в модели, это число равно 11. Таким образом, при $f_s = 1$ МГц максимальная исправляемая ошибка равна 22,728 кГц.

Вся суть работы алгоритма сводится к решению о наличии ошибки: ошибка по частоте, ошибка по фазе или отсутствие ошибки.

Критическая ошибка по фазе: на протяжении всего цикла работы алгоритма отклик одной из квадратур сигнала не превышает порог. Результат работы – выдача значений амплитуд откликов, при помощи которых происходит восстановление сигнала в фазовой области, где каждая точка соответствует своей четверти. Результат работы алгоритма, на примере отклика СФ на код Баркера длиной 13, с исправлением ошибки по фазе, представлен на рис. 5.

Допустимая ошибка по фазе: на протяжении всего цикла работы алгоритма не изменяются отклики по амплитуде обеих квадратур. Результат – фиксируются значения амплитуд, по которым рассчитывается дельта откликов, с помощью которой восстанавливается значение фазы несущей частоты.

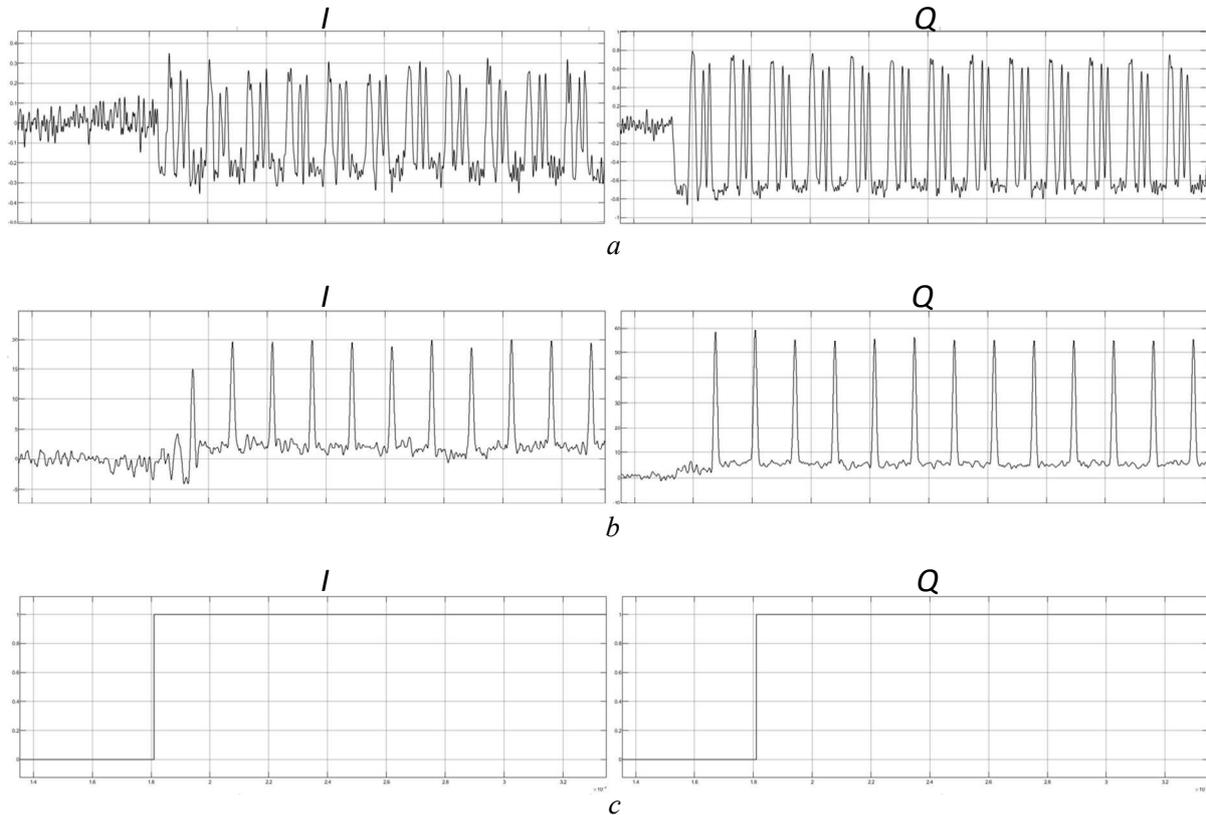


Рис. 5. Работа алгоритма в процессе захвата петли ФАПЧ при фазовой ошибке: *a* – сигналы I/Q квадратур; *b* – отклик СФ I/Q квадратур; *c* – сигнал о принятии решения I/Q квадратур
Fig. 5. Algorithm work in phase-lock PLL process with phase error: *a* – quadrature's signal; *b* – matched filter's reaction; *c* – solutions signal of algorithm

Как видно из рис. 5, *b*, в момент принятия решения по ошибке происходит мгновенное восстановление фазы сигнала, и затраты на восстановление фазы по времени эквивалентны времени, затраченному на операцию переключения фазового инкремента на NCO. Сигналы на рис. 5, *c* – это сигналы принятия решения алгоритмом, по которому происходит корректировка фазового инкремента NCO. Как видно из рис. 5, *a*, *b*, до момента принятия решения I квадратура имела нулевой отклик СФ, в момент принятия решения фаза сигнала была скорректирована к диапазону значений, при которых отклики квадратур сравнялись по амплитуде.

Ошибка по частоте: на протяжении всего цикла работы алгоритма изменяются отклики по амплитуде. Результат – фиксируется значение счетчика положения откликов во времени со значениями их амплитуд, по которым можно построить вектор изменения сигналов во времени, с помощью которого восстанавливается значение частоты несущей. На примере отклика СФ на код Баркера на рис. 6 и 7 представлен пример ошибки по частоте. Ошибка по частоте равна 22 кГц, которая в данной модели является критической для кода Баркера длиной 11.

На рис. 6, *a* продемонстрированы отклики СФ I и Q квадратур на код Баркера длиной 7. Как видно из рисунка, дельта амплитуд откликов СФ I и Q квадратур изменяется с 4000 до 0 (шаг сетки ~2000), т. е для такой последовательности ошибка по частоте не является критической при использовании алгоритма восстановления несущей, представленного на рис. 7.

На рис. 6, *b* продемонстрированы отклики СФ I и Q квадратур на код Баркера длиной 11. Как видно из рисунка, дельта амплитуд откликов СФ I и Q квадратур изменяется с 6000 до -3000 (шаг сетки ~ 2000), т.е. для такой последовательности ошибка по частоте является критической, так как согласно работе алгоритма восстановления несущей частоты, представленного на рис. 7, дельта амплитуд изменила значение на противоположное, что и является критерием определения критической ошибки по частоте.

На рис. 6, *c* продемонстрированы отклики СФ I и Q квадратур на код Баркера длиной 13. Как видно из рисунка, дельта амплитуд откликов СФ I и Q квадратур изменяется с ~ 8000 до ~ 4000 (шаг сетки ~ 2000). Для данной последовательности, в этих условиях моделирования, ошибка частоты больше критической, и решение по ошибке, которое получится в ходе работы алгоритма, будет неверным.

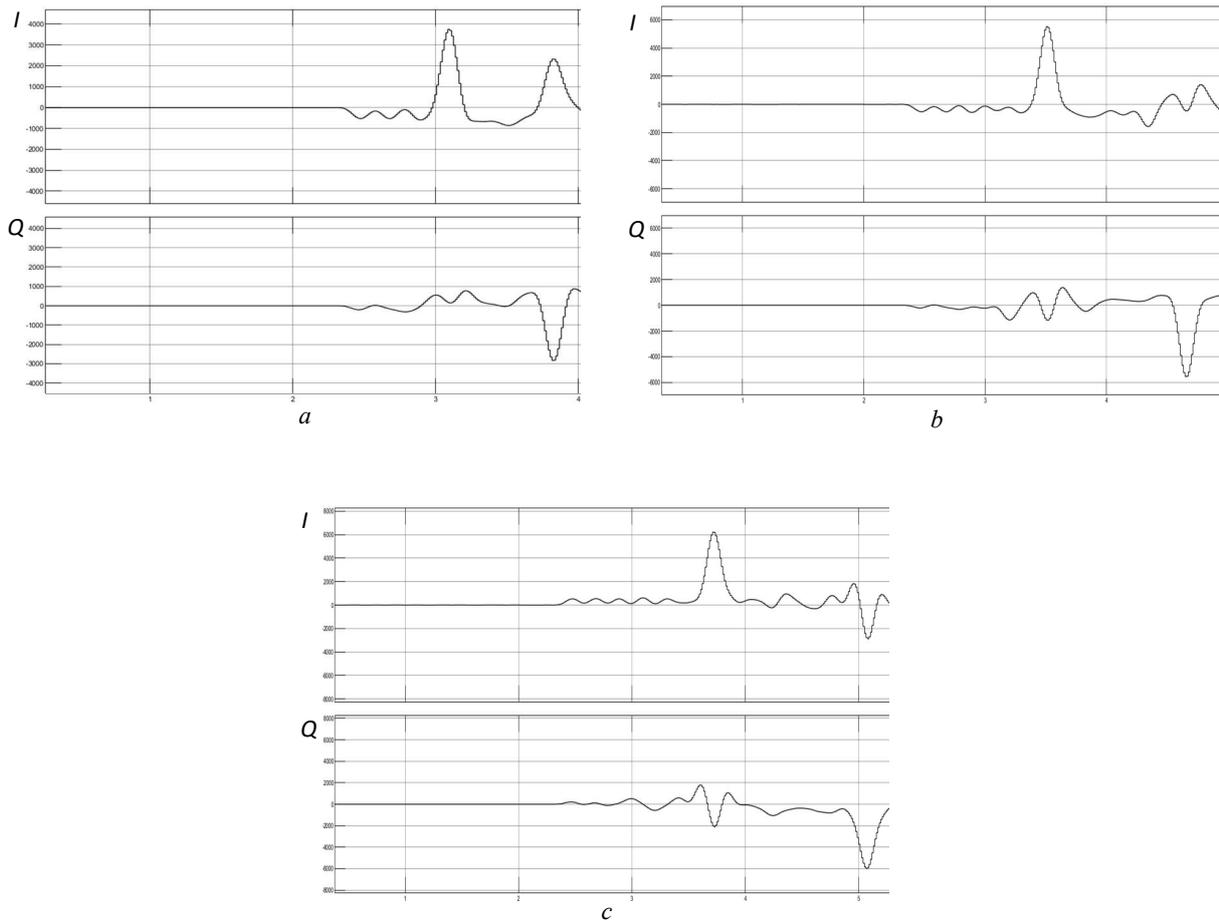


Рис. 6. Отклик СФ на код Баркера при ошибке по частоте 22кГц: *a* – длиной 7; *b* – длиной 11; *c* – длиной 13

Fig. 6. Matched filter reaction with 22 kHz frequency error for Barker code: *a* – length 7; *b* – length 11; *c* – length 13

На рис. 7 продемонстрирована работа алгоритма в процессе восстановления частоты несущей для кода Баркера длиной 11 и частотой отстройки, равной 22 кГц. Слева изображены сигналы для I квадратуры, справа – для Q квадратуры. Изображение «*a*» – сигнал квадратуры, изображение «*b*» – отклик СФ, изображение «*c*» – сигнал о принятии решения и старте коррективы частоты и фазы несущей.

Как видно из рис. 7, *в*, в момент принятия решения был исправлен фазовый инкремент NCO согласно частоте и фазе несущей частоты.

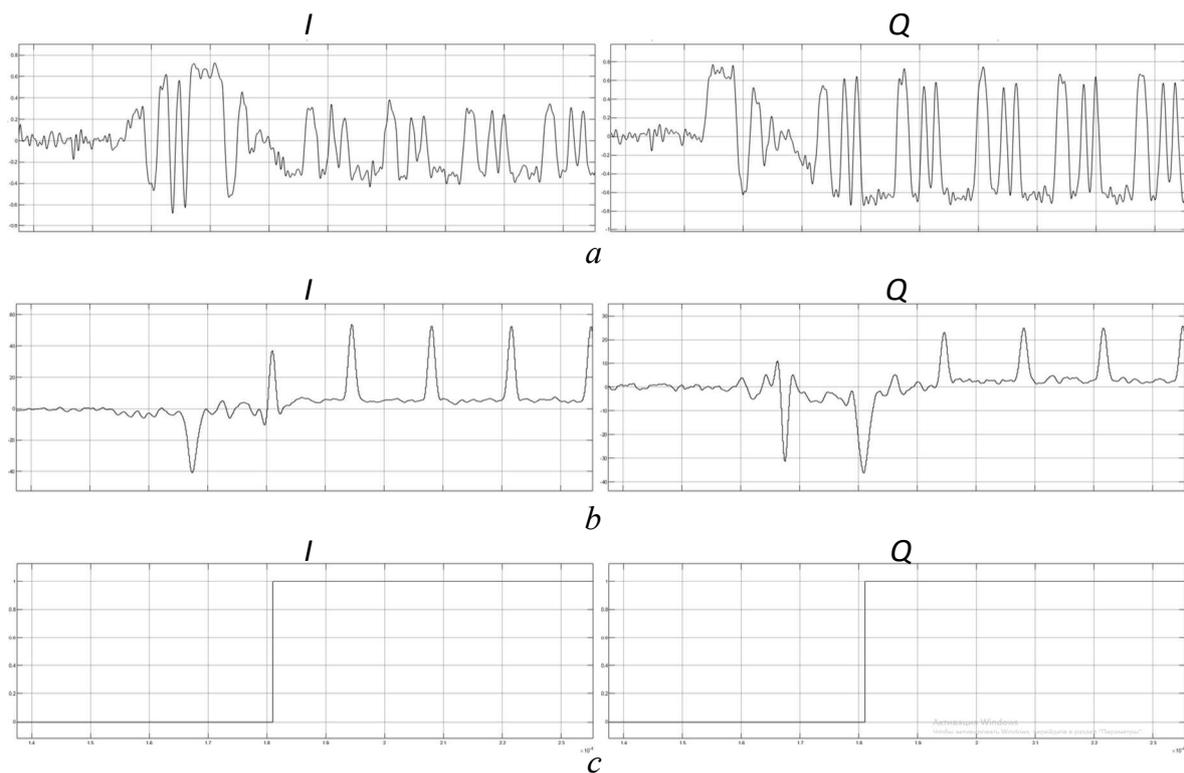


Рис. 7. Работа алгоритма в процессе захвата петли ФАПЧ при ошибке по частоте: *a* – сигнал квадратуры; *b* – отклик СФ; *c* – сигнал о принятии решения

Fig. 7. Algorithm work in phase-lock PLL process with frequency error: *a* – quadrature's signal; *b* – matched filter's reaction; *c* – solutions signal of algorithm

Заключение

Исходя из формулы (1) и результатов работы представленного алгоритма, получаем, что выбор псевдо-случайной последовательности (ПСП) для преамбулы сигнала сводится к определению решаемой проблемы: более точная подстройка начальной фазы сигнала или возможность восстановления большей ошибки по частоте. Получается, что чем длиннее ПСП, тем меньшую ошибку по частоте способен исправить алгоритм, но обладает большим разрешением по фазе, так как имеет более узкий основной лепесток отклика СФ. А чем короче ПСП, тем большую ошибку по частоте способен исправить алгоритм, но обладает меньшим разрешением по фазе, так как имеет более широкий основной лепесток отклика СФ.

Список литературы / References

1. Gardner F.M. *Phaselock Techniques*, 2nd ed. New York: John Wiley & Song Inc; 1979.
2. Sklar B., Harris J. *Digital Communication Fundamentals and Applications*, 3^d edition. 2020; ISBN: 9780134588636.
3. Kaiyu W., Zhiming S. *International Journal of Reconfigurable Computing*. Hindawi Publishing Corporation; 2014, Article ID 502942: 15. DOI: 10.1155/2014/502942.
4. Leonov G., Kuznetsov N., Yuldashev M. and Yuldashev R. Computation of the phase detector characteristic of a QPSK Costas loop. *Doklady Mathematics*; 2016;93(3):348-353. DOI: 10.1134/S1064562416030236.
5. Yuen J. *Autonomous Software-Defined Radio Receivers for Deep Space Applications*. Wiley; 2006.
6. Frantzeskakis E., Papathanasiou C., Doumenis D. *Single chip OQPSK modem appropriate for wireless burst data communications*. Orlando: Proceedings of the International Conference on Signal Processing Applications and Technology; 1999.

Вклад авторов

Матюшков А.Л. осуществил постановку задачи, проконтролировал выполнение расчетов и выполнил анализ полученных результатов.

Жук И.Н. выполнил расчеты и моделирование исследуемой модели, провел анализ полученных результатов.

Authors' contribution

Matiouchkov A.L. carried out the formulation of the problem, monitored the calculations and performed the analysis of the results obtained.

Zhuk I.N. performed calculations and modeling of the investigated model, as well as analyzed the results obtained.

Сведения об авторах

Матюшков А.Л., к.т.н., доцент кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Жук И.Н., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Matiouchkov A.L., Cand. of Sci., Associate Professor at the Information Radioengineering Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Zhuk I.N., Postgraduate at the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-33-322-21-95;
e-mail: i.nik.zhuk@gmail.com
Жук Илья Николаевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-33-322-21-95;
e-mail: i.nik.zhuk@gmail.com
Zhuk Ilya Nikolaevich