

ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТР ДЛЯ УСТРОЙСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА РАДИОСИГНАЛА В СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

В. В. Сухотин✉, **А. С. Тихтенко**, **А. В. Жгун**, **В. А. Сидорин**

*Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Российская Федерация*

Работа посвящена исследованиям зависимости мощности сигнала, который будет использован в измерениях разности фаз и шумовых составляющих сигнала, от типа цифрового фильтра и его параметров при различных соотношениях сигнал/шум. Дано обоснование актуальности исследований, которая состоит в поиске возможности применения цифровых фильтров для устройства определения координат источника радиосигнала в спутниковых телекоммуникациях, обеспечивающего минимальную погрешность измерения разности фаз. Приведена структура системы определения координат источника радиосигнала. Приведена разработанная компьютерная модель и ее описание. Рассмотрены указанные выше исследования для цифровых рекурсивных полосно-пропускающих фильтров типа Баттерворта, Чебышева 1 рода, Чебышева 2 рода, Золотарева-Кауэра, которые задаются с помощью дискретной линейной системы. Сделаны соответствующие выводы о применимости цифровых фильтров в устройстве определения координат. Определены типы фильтров и предъявлены требования для обеспечения минимальной погрешности измерения разности фаз.

Ключевые слова: цифровой полосно-пропускающий фильтр, устройство определения координат, источник радиосигнала, рекурсивный фильтр, компьютерная модель, спутниковая система телекоммуникаций, отношение сигнал/шум.

Введение

Спутниковые телекоммуникации глубоко проникли в повседневную жизнь как любого человека, так и предприятий. Искусственные спутники Земли (ИСЗ), расположенные на геостационарной орбите, обеспечивают ретрансляцию терабайтных потоков данных между абонентами, расположенными как на поверхности Земли, так и в околоземном пространстве. Доступность и открытость ИСЗ позволяет использовать нелегитимно его частотный ресурс. Очень много публикаций посвящено данной тематике. В частности, одним из способов борьбы с данной проблемой является определение координат постановщика помех [1], являющееся самостоятельной частью основной проблемы защиты спутниковых телекоммуникаций от нелегитимного использования.

Обобщенная структурная схема системы определения координат источника радиосигнала (ИРС), расположенного на земной поверхности, представлена на рис. 1.

Очень важным элементом данной системы является устройство определения координат ИРС, в состав которого входят: аналого-цифровой преобразователь (АЦП), полосно-пропускающий фильтр (Ф), устройство выборки и хранения (УВиХ), измеритель разности фаз и вычислительное устройство (ВУ).

Для вычисления координат ИРС используется фазовый метод пеленгации [1; 2]. Погрешность измерения разности фаз сигналов [3], принятых в различные промежутки времени от ИСЗ, зависит от стабильности частоты принятого сигнала, структуры сигнала (его спектра), отношения сигнал/шум, погрешности квантования и т. д.

Точность измерения разности фаз существенно зависит от отношения сигнал/шум на входе измерителя разности фаз. Высокая точность измерения (абсолютная погрешность на уровне $0,1^\circ$) обеспечивается только при отношении сигнал/шум не менее 50–60 дБ [4; 5], вследствие чего исследуем возможность применения различных типов цифровых фильтров для обеспечения минимальной погрешности измерения разности фаз.

✉ vsuhotin@sfu-kras.ru

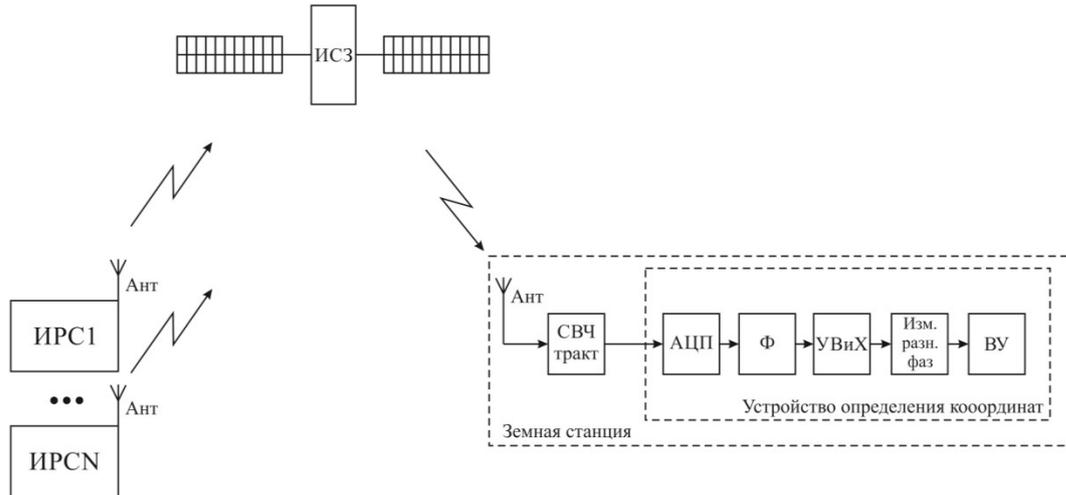


Рис. 1. Обобщенная структурная схема системы определения координат ИРС

1. Компьютерная модель

Для исследования цифровых фильтров была разработана компьютерная модель в системе MATLAB [6; 7] с использованием библиотеки FDATool.

Исходными данными для разработки явились:

- сигнал на входе – 10 гармонических синусоидальных сигналов, отстоящих по частоте от 500 кГц до 1,4 МГц и одинаковой амплитуды, равной 1 В, где полезный сигнал, используемый для измерения разности фаз, формируется на частоте 1 МГц, а остальные являются шумовыми и частоты которых равны от 500 кГц до 1,4 МГц;
- аддитивный белый шум на входе, создающий сигнал заданной мощности, модельное время выбрано равным величине шага дискретизации по времени – 10 мкс;
- отношение сигнал/шум – от 0 до 20 дБ;
- центральная частота фильтра – 1 МГц;

- полоса пропускания – от 100 Гц до 1 кГц;
- коэффициент подавления в полосе пропускания – 1 дБ;
- коэффициент подавления в полосе задерживания – 60 дБ.

Вид исследуемой компьютерной модели приведен на рис. 2.

В состав модели вошли:

- 10 источников синусоидального сигнала с частотами от 500 кГц до 1,4 МГц;
- 9 сумматоров;
- блок дискретизации сигнала во времени;
- блок квантования по уровню;
- генератор белого шума;
- цифровой рекурсивный фильтр;
- анализатор спектра и осциллограф на выходе модели.

В данной схеме при помощи 10 источников синусоидального сигнала и сумматоров формируется сложный сигнал, который проходит дальнейшую дискретизацию во времени и квантование по

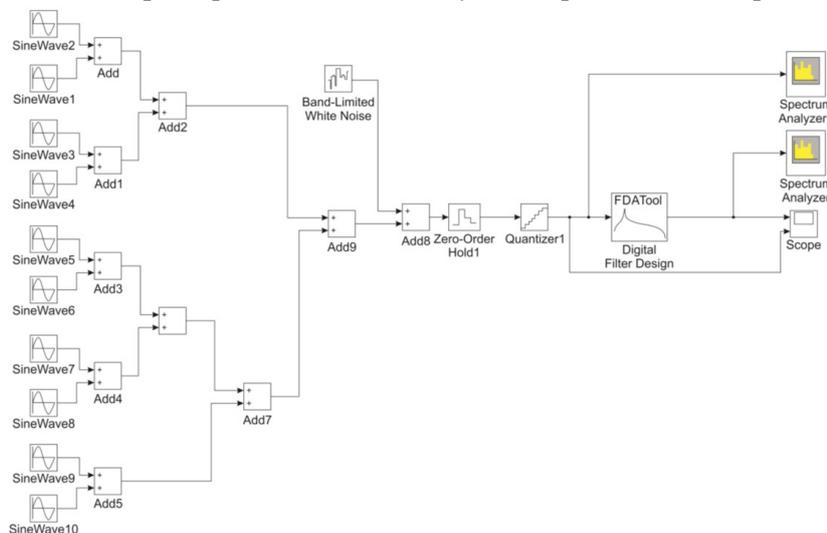


Рис. 2. Компьютерная модель для исследования фильтра

уровню. Суммируясь с источником белого шума, после оцифровки, полученный сигнал поступает на цифровой фильтр, где проходит обработку, и результат обработки отображается на анализаторе спектра и осциллографе [6–8].

2. Исследования

Для исследования были взяты 4 цифровых рекурсивных полосно-пропускающих фильтра типа Баттерворта, Чебышева 1 рода, Чебышева 2 рода, Золотарева-Кауэра, которые задаются с помощью дискретной линейной системы [9].

Зависимости и анализ влияния параметров выходного сигнала от типа фильтра, его параметров и отношения сигнал/шум приведены ниже.

В модели для исследования фильтров задавались следующие параметры:

- центральная частота фильтра – 1 МГц;
- полоса пропускания – от 100 Гц до 1 КГц;
- коэффициент подавления в полосе пропускания – 1 дБ;
- коэффициент подавления в полосе задерживания – 60 дБ.

По заданным параметрам были получены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) фильтров с соответствующими полосами и частотами срезов.

Отношение сигнал/шум на выходе имеет следующую формулу:

$$SNR = \frac{P_{с.вых}}{P_{ш.вых}}$$

Так как все составляющие выражены в децибелах, то формула может быть упрощена до [10]:

$$SNR_{dB} = P_{с.вых dB} - P_{ш.вых dB}$$

2.1. Фильтр Чебышева 2 рода

Фильтр Чебышева 2 рода является фильтром, который обладает крутым спадом АЧХ. У этого фильтра отсутствуют пульсации на частотах в полосе пропускания, но присутствуют существенные пульсации на частотах полосы подавления [11].

Графики зависимостей мощности исследуемого сигнала на выходе от отношения сигнал/шум представлены на рис. 3 и 4.

АЧХ фильтра Чебышева 2 рода имеет вид:

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \frac{1}{\varepsilon^2 T_N^2 \omega}}$$

где ε – параметр, управляющий величиной пульсации; T_N – полином Чебышева N -го порядка, ω – частота.

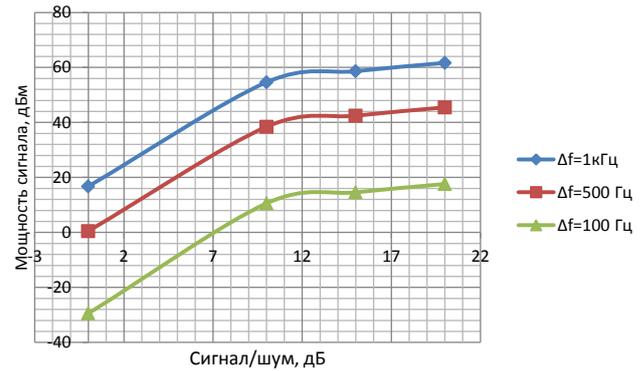


Рис. 3. Зависимость мощности выходного исследуемого сигнала от отношения сигнал/шум на выходе фильтра Чебышева 2 рода для различных полос пропускания

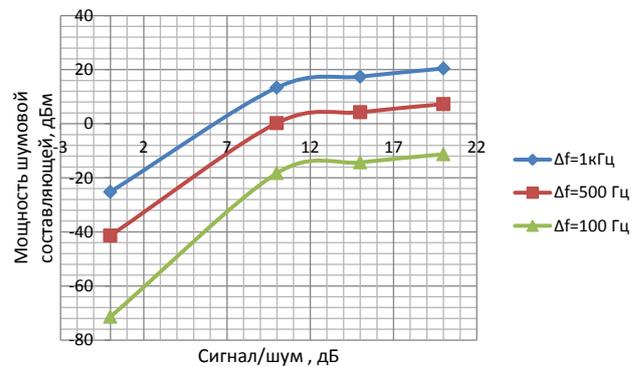


Рис. 4. Зависимость мощности шумовой составляющей выходного сигнала от отношения сигнал/шум на выходе фильтра Чебышева 2 рода для различных полос пропускания

Исходя из графиков, можно сделать вывод, что для цифрового фильтра (ЦФ) Чебышева 2 рода с увеличением полосы пропускания фильтра от 100 Гц до 1 кГц возрастает мощность выходного исследуемого сигнала на частоте 1 МГц. При полосе пропускания 1 кГц значение мощности сигнала равно 60 дБм, значение шумовой составляющей равно 20 дБм. Для полосы пропускания 100 Гц значение мощности сигнала равно 18 дБм, значение шумовой составляющей равно -16 дБм при отношении сигнал/шум 20 дБ.

2.2. Фильтр Чебышева 1 рода

Фильтр Чебышева 1 рода является фильтром, который обладает более крутым спадом АЧХ, нежели фильтр Чебышева 2 рода, а также обладает существенными пульсациями АЧХ на частотах полосы пропускания [11].

АЧХ фильтра Чебышева 1 рода имеет вид:

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 T_N^2 \omega}$$

Графики зависимостей мощности исследуемого сигнала на выходе от отношения сигнал/шум представлены на рис. 5 и 6.

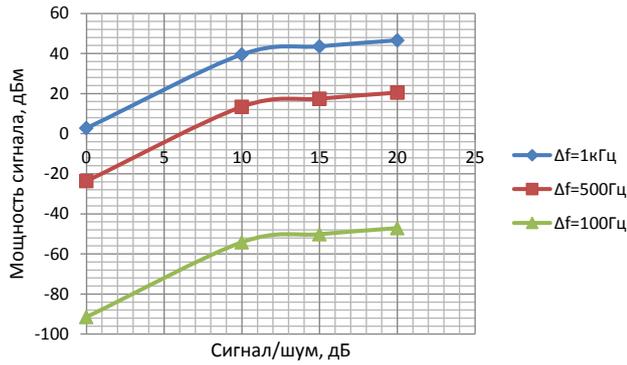


Рис. 5. Зависимость мощности выходного исследуемого сигнала от отношения сигнал/шум на выходе фильтра Чебышева 1 рода для различных полос пропускания

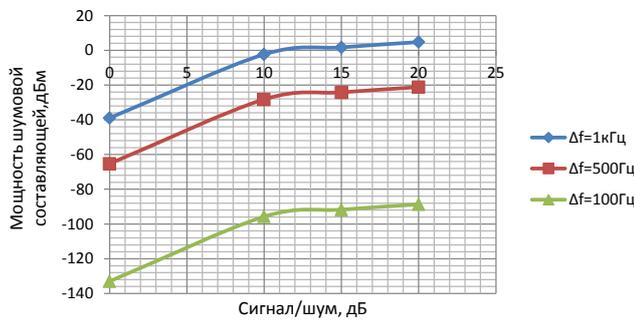


Рис. 6. Зависимость мощности шумовой составляющей выходного сигнала от отношения сигнал/шум на выходе фильтра Чебышева 1 рода для различных полос пропускания

Таким образом, графики показывают, что для ЦФ Чебышева 1 рода с увеличением полосы пропускания фильтра от 100 Гц до 1 кГц возрастает мощность выходного исследуемого сигнала на центральной частоте 1 МГц. При полосе пропускания 1 кГц значение сигнала равно 48 дБм, значение шумовой составляющей равно 4 дБм. Для полосы пропускания 100 Гц значение сигнала равно -48 дБм, значение шумовой составляющей равно -88 дБм при отношении сигнал/шум 20 дБ.

2.3. Фильтр Золотарева-Кауэра

Фильтр Золотарева-Кауэра или эллиптический фильтра – это цифровой фильтр с пульсациями АЧХ как в полосе пропускания, так и в полосе подавления.

АЧХ фильтра Золотарева-Кауэра имеет вид:

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 U_N^2 \omega}$$

где U_N – эллиптическая функция Якоби N -го порядка.

Графики зависимостей мощности исследуемого сигнала на выходе от отношения сигнал/шум представлены на рис. 7 и 8.

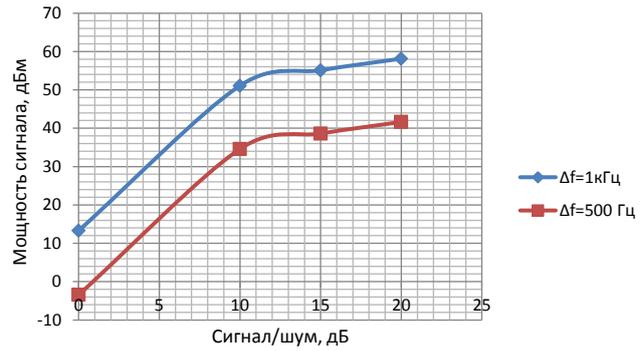


Рис. 7. Зависимость мощности выходного исследуемого сигнала от отношения сигнал/шум на выходе фильтра Золотарева-Кауэра для различных полос пропускания

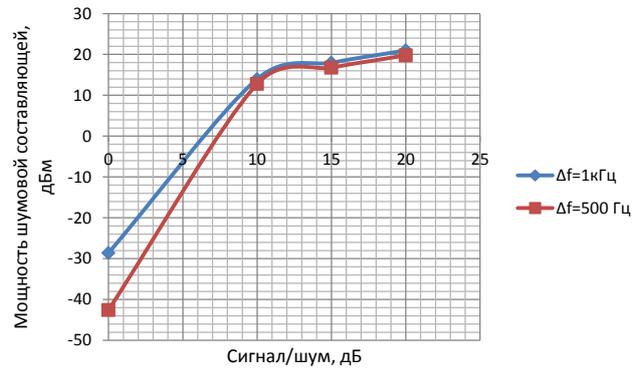


Рис. 8. Зависимость мощности шумовой составляющей выходного сигнала от отношения сигнал/шум на выходе фильтра Золотарева-Кауэра для различных полос пропускания

Из графиков видно, что для ЦФ Золотарева-Кауэра с увеличением полосы пропускания фильтра от 100 Гц до 1 кГц возрастает мощность исследуемого сигнала на центральной частоте 1 МГц. При полосе пропускания 1 кГц значение сигнала равно 58 дБм, значение шумовой составляющей равно 18 дБм. Для полосы пропускания 500 Гц значение сигнала равно 42 дБм, значение шумовой составляющей равно значению на частоте 1 кГц и составляет также 18 дБм при отношении сигнал/шум 20 дБ.

2.4. Фильтр Баттерворта

Фильтр Баттерворта способен обеспечить наиболее плоскую АЧХ в полосе пропускания. Это достигается за счет «плавности» характеристики между полосой пропускания и полосой задерживания [12].

АЧХ фильтра Баттерворта имеет вид:

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \omega^{2N}}$$

где ω – частота среза.

Графики зависимостей мощности исследуемого сигнала на выходе от отношения сигнал/шум представлены на рис. 9 и 10.

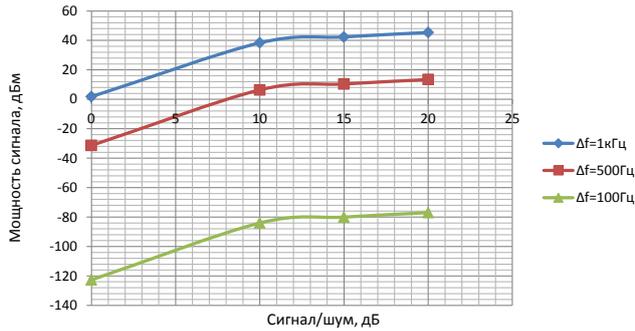


Рис. 9. Зависимость мощности выходного исследуемого сигнала от отношения сигнал/шум на выходе фильтра Баттерворта для различных полос пропускания

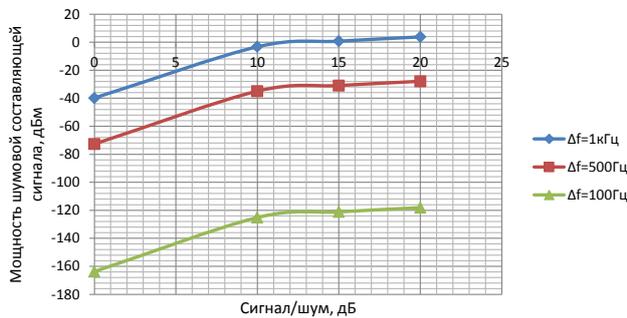


Рис. 10. Зависимость мощности шумовой составляющей выходного сигнала от отношения сигнал/шум на выходе фильтра Баттерворта для различных полос пропускания

Из графиков можно заметить, что для ЦФ Баттерворта с увеличением полосы пропускания от 100 Гц до 1 кГц возрастает мощность сигнала на частоте 1 МГц. При полосе пропускания 1 кГц значение сигнала равно 40 дБм, значение шумовой составляющей равно 4 дБм. Для полосы пропускания 100 Гц значение сигнала равно -76 дБм, значение шумовой составляющей равно -120 дБм при отношении сигнал/шум 20 дБ.

По результатам исследований всех 4 ЦФ можно сделать следующие выводы:

- наибольшее значение мощности сигнала на выходе фильтра при полосе пропускания 1 кГц имеет фильтр Чебышева 2 рода и равно 60 дБм при отношении сигнал/шум 20 дБ;
- наименьшее значение мощности шумовой составляющей сигнала на выходе фильтра при полосе пропускания 1 кГц имеет фильтр

Баттерворта и равно -120 дБм при отношении сигнал/шум 20 дБ;

- отношение сигнал/шум на выходе наибольшее у ЦФ Чебышева 1 рода при 1 кГц и составляет 44 дБм при отношении сигнал/шум 20 дБ.
- отношение сигнал/шум на выходе наибольшее у ЦФ Баттерворта при 100 Гц и составляет 44 дБм при отношении сигнал/шум 20 дБ.

Сделанные выводы говорят о том, что наибольшее отношение сигнал/шум на входе измерителя разности фаз, равное 44 дБм, может быть обеспечено с использованием фильтра Баттерворта с полосой пропускания 100 Гц или фильтра Чебышева 1 рода с полосой пропускания 1 кГц с параметрами:

- центральная частота фильтра – 1 МГц;
- коэффициент подавления в полосе пропускания – 1 дБ;
- коэффициент подавления в полосе задерживания – 60 дБ.

Используем формулу [5]:

$$\Delta\phi_{\text{погр}} = 360 \cdot$$

$$\left(\delta f_{\text{ор}} + \frac{f_{\text{пр}}}{\sqrt{6} \cdot f_{\text{ор}}} + \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot 10^{\frac{H_{\text{пр}}}{20}}} \right) [\text{град}],$$

где $\delta f_{\text{ор}}$ – относительная нестабильность частоты местного опорного генератора; $f_{\text{ор}}$ – частота местного опорного генератора; $f_{\text{пр}}$ – промежуточная частота; $H_{\text{пр}}$ – отношение сигнал/шум на входе измерителя разности фаз. Задав значения $\delta f_{\text{ор}} = 10^{-8}$ и $f_{\text{ор}} = 10$ МГц, и подставив их вместе со значениями $H_{\text{пр}} = 44$ дБм и $f_{\text{пр}} = 1$ МГц в формулу (1), мы получим $\Delta\phi_{\text{погр}} = 0,6^\circ$.

Заключение

Из четырех исследованных фильтров обеспечение погрешности измерения разности фаз, равную $0,6^\circ$, возможно достичь только с применением фильтра Баттерворта с полосой пропускания 100 Гц или фильтра Чебышева 1 рода с полосой пропускания 1 кГц. Для этого необходимо выполнение условий увеличения частоты местного опорного генератора и уменьшения промежуточной частоты, что приведет к высокоточным измерениям разности фаз, о которых говорилось в [4; 5].

Список литературы

- [1] Panko S. P., Sukhotin V. V., Ryabushkin S. A. Satellite Infocommunications Protection against Unauthorized Use // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. vol. 11. no. 3. pp. 1739–1745.
- [2] Kalashnikova A. S., Sukhotin V. V. Consideration of Methods to Protect Frequency Resources of Satellite System Against Unauthorized Access // Proceedings of 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Omsk. Omsk State Technical University. 2015. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147083.

- [3] Сухотин В. В., Овчинников Ф. В. Метод измерения разности фаз между некогерентными сигналами // Успехи современной радиоэлектроники. 2017. № 12. С. 93–96.
- [4] Саидов А. С., Тагилаев А. Р., Алиев Н. М., Асланов Г. К. Проектирование фазовых автоматических пеленгаторов. М. : Радио и связь, 1997. 160 с.
- [5] Дамдинова Д. Б., Полетаев А. С., Ченский А. Г. Сравнение точности методов вычисления разности фаз квазигармонических сигналов // Вестник СибГУТИ. 2016. № 2. С. 87–97.
- [6] Проектирование цифровых фильтров в системе MATLAB / Simulink и САПР ПЛИС Quartus [Электронный ресурс]. URL: https://www.kit-e.ru/articles/cad/2008_6_122.php (дата обращения: 11.09.2020).
- [7] Солонина А. Моделирование цифровой обработки сигналов ЦОС в Matlab. Часть 2. Синтез оптимальных БИХ-фильтров программными средствами Matlab // Компоненты и Технологии. 2008. № 12. С. 129–132.
- [8] Стучинская М. М. Выбор фильтровой характеристики устройства режекции помехи и анализ работы устройства защиты // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2018. № 7. С. 126–134.
- [9] Глинченко А. С. Цифровая обработка сигналов : учеб. пособие. 2-е изд. перераб. и доп. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2005. 482 с.
- [10] Отношение сигнал/шум [Электронный ресурс]. URL: <http://masters.donntu.org/2014/frt/atarov/library/article5.htm> (дата обращения: 11.09.2020).
- [11] Фонарь Л. С. Моделирование динамического коэффициента передачи цифровых фильтров Чебышева // Вестник Херсонского национального технического университета. 2017. Т. 1. № 3 (62). С. 248–251.
- [12] Щербина Ю. В., Зуева Е. Б. Методика проектирования цифровых фильтров Баттерворта средствами пакета MathCAD // Вестник Московского государственного университета печати. 2011. № 1. С. 67–74.
- [13] Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И. Способ измерения разности фаз гармонических сигналов на выходах линейных трактов с малыми отношениями сигнал/шум. Пат. № 2700334, Российская Федерация, 2019, бюл. № 26.

DIGITAL FILTER FOR DEVICE OF DETERMINING COORDINATES OF RADIO SIGNAL SOURCE IN SATELLITE TELECOMMUNICATIONS SYSTEMS

V. V. Sukhotin, A. S. Tikhtenko, A. V. Zhgun, V. A. Sidorin

Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russian Federation

Work is devoted research of signal power dependence that will be used in the measurements and noise components of the signal from the digital filter type, filter parameters for various signal-to-noise ratios. The substantiation of the relevance of research is given, which consists in finding the possibility of using digital filters for a device for determining the coordinates of a radio signal source in satellite telecommunications, providing a minimum error in measuring the phase difference. The structure of the system for determining the coordinates of the radio signal source is given. The developed computer model and its description are presented. The researchers are considered for digital recursive band-pass filters of the Butterworth, Chebyshev type 1, Chebyshev type 2, Zolotarev-Cauer type, which are specified using a discrete linear system. Appropriate conclusions are drawn about the applicability of digital filters in the device for determining coordinates. The types of filters are determined and requirements are presented to ensure the minimum error in measuring the phase difference.

Keywords: digital band-pass filter, coordinate detection device, radio signal source, recursive filter, computer model, satellite telecommunications system, signal-to-noise ratio.

References

- [1] Panko S. P., Sukhotin V. V., Ryabushkin S. A. Satellite Infocommunications Protection against Unauthorized Use // International Journal of Applied Engineering Research, 2016, vol. 11, no. 3, pp. 1739–1745.

- [2] Kalashnikova A. S., Sukhotin V. V. Consideration of Methods to Protect Frequency Resources of Satellite System Against Unauthorized Access // Proceedings of 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Omsk, Omsk State Technical University, 2015. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147083.
- [3] Sukhotin V. V., Ovchinnikov F. V. *Metod izmereniya raznosti faz mezhdru nekogerentnymi signalami* [Method for measuring the phase difference between incoherent signals] // Achievements of Modern Radioelectronics, 2017, no. 12, pp. 93–96. (In Russian)
- [4] Saidov A. S., Tagilayev A. R., Aliev N. M., Aslanov G. K. *Proektirovanie fazovykh avtomaticheskikh pelengatorov* [Design of automatic phase direction finders]. Moscow, Radio and communication, 1997. 160 p. (In Russian)
- [5] Damdinova D. B., Poletaev A. S., Chenskiy A. G. *Sravnenie tochnosti metodov vychisleniya raznosti faz kvazigarmonicheskikh signalov* [Accuracy comparison of methods for calculating the phase difference of quasi-harmonic signals]. Vestnik SibGUTI, 2016, no. 2, pp. 87–97. (In Russian)
- [6] *Proektirovanie cifrovyykh fil'trov v sisteme MATLAB / Simulink i SAPR PLIS Quartus* [Design of digital filters in MATLAB / Simulink and FPGA Quartus]. Available at: https://www.kit-e.ru/articles/cad/2008_6_122.php (accessed 11.09.2020). (In Russian)
- [7] Solonina A. *Modelirovanie cifrovoj obrabotki signalov COS v Matlab. CHast' 2. Sintez optimal'nykh BИH-fil'trov programmnyimi sredstvami Matlab* [Modeling of digital processing of DSP signals in Matlab. Part 2. Synthesis of optimal IIR filters using Matlab software] // Components and Technologies, 2008, no. 12, pp. 129–132. (In Russian)
- [8] Stuchinskaya M. M. *Vybor fil'trovoj harakteristiki ustrojstva rezhekcii pomekhi i analiz raboty ustrojstva zashchity* [Selecting the filter characteristics of the interference rejection device and analyzing the operation of the protection device] // Air and space forces. Theory and practice, 2018, no. 7, pp. 126–134. (In Russian)
- [9] Glinchenko A. S. *Cifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. Krasnoyarsk, KSTU, 2005. 482 p. (In Russian)
- [10] Otnoshenie signal/shum [Signal to noise ratio]. Available at: <http://masters.donntu.org/2014/frt/atarov/library/article5.htm> (accessed 11.09.2020). (In Russian)
- [11] Fonar L. S. *Modelirovanie dinamicheskogo koefficienta peredachi cifrovyykh fil'trov CHEbysheva* [Modeling of the dynamic transmission coefficient of digital Chebyshev filters] // Bulletin of the Kherson National Technical University, 2017, vol. 1, no. 3 (62), pp. 248–251. (In Russian)
- [12] Shcherbina Yu. V., Zueva E. B. *Metodika proektirovaniya cifrovyykh fil'trov Batternvorta sredstvami paketa MathCAD* [Methodology for designing digital Butterworth filters using the MathCAD package] // Bulletin of the Moscow State University of Printing Arts, 2011, no. 1, pp. 67–74. (In Russian)
- [13] Arsentiev V. G., Krivolapov G. I. *Sposob izmereniya raznosti faz garmonicheskikh signalov na viodah lineynykh traktov s malimi otnosheniyami signal/shum* [Method for measuring the phase difference of harmonic signals at the outputs of linear paths with small signal-to-noise ratios.]. Patent RU 2700334, 2019, bulletin no. 26.

Сведения об авторах

Жгун Александр Вячеславович – студент Сибирского федерального университета. Область научных интересов: радиоэлектроника, радиолокация радионавигация.

Сидорин Валерий Андреевич – лейтенант Вооруженных сил Российской Федерации. Окончил Сибирский федеральный университет в 2020 году. Область научных интересов: космическое приборостроение.

Сухотин Виталий Владимирович – кандидат технических наук, доцент Военно-инженерного института Сибирского федерального университета. Окончил Красноярский государственный технический университет в 1999 году. Область научных интересов: фазовые измерения, безопасность спутниковых информационных систем, пеленгация.

ORCID: 0000-0002-8166-5893

Тихтенко Анастасия Сергеевна – студент Сибирского федерального университета. Область научных интересов: радиоэлектроника, радиолокация радионавигация.