

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ УСТРОЙСТВА ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛА ДЛЯ МОНИТОРИНГОВОЙ ЗЕМНОЙ СТАНЦИИ

М. Р. Сосновский, В. В. Сухотин✉, А. П. Басков

Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Российская Федерация

Системы спутниковой связи имеют преимущество перед другими системами связи, так как имеют большой охват территории. Земная станция может располагаться в любой точке данной территории и может быть как легитимным пользователем, так и спутниковым пиратом (нелегитимным пользователем). Перед разработчиками стоит задача определить координаты незаконно занимающего частотный ресурс нелегитимного пользователя. В статье предложена структурная схема устройства фильтрации сигнала, которое входит в состав устройства определения координат нелегитимного пользователя мониторинговой земной станции. Определены назначение, требования и основная задача каждому составному блоку устройства фильтрации. Произведен поиск и анализ фильтров-аналогов и методов фильтрации сигналов. В программной среде MatLAB Simulink по структурной схеме разработана компьютерная модель устройства фильтрации сигнала с возможностью определения набега фазы, а также раскрыты настройки блоков устройства фильтрации, которые в процессе исследования модели можно корректировать. Для находящихся в составе устройства фильтрации полосовых фильтров по фазочастотным характеристикам построены зависимости изменения фазы принимаемого сигнала от частоты этого сигнала. Сформирована система фазовой автоподстройки частоты с возможностью изменения ее параметров. Произведены расчеты набега фаз через элементы устройства фильтрации.

Ключевые слова: устройство определения координат, устройство фильтрации, фазовая автоподстройка частоты, компьютерное моделирование, земная станция, набег фазы.

Введение

На сегодняшний день большое значение в жизни общества оказывают технические средства связи, коммуникации и навигации. В зависимости от назначения и условий использования данные системы и их техническая реализация могут быть различны. Для того чтобы определить координаты объекта либо же обеспечить передачу информации из отдаленных территорий земного шара, где установка наземных систем связи нерентабельна или даже невозможна, применяются системы спутниковой связи. Они имеют преимущество перед другими системами связи, так как имеют большой охват территории. Земная спутниковая станция может быть как спутниковым пиратом (нелегитимным пользователем) так и легитимным пользователем. Перед разработчиками стоит задача определить координаты незаконно занимающего частотный ресурс нелегитимного пользователя [1].

Рассмотрим реализацию фильтра, входящего в состав устройства определения координат (УОК) [2]. Для этого сформируем структуру устройства фильтрации, проведем обзор существующих аналогов устройства фильтрации и разработаем компьютерную модель устройства фильтрации с возможностью определения набега фазы.

1. Формирование структуры устройства фильтрации

На рис. 1 приведена общая структурная схема мониторинговой земной станции [2], в состав которой входит УОК.



Рис. 1. Общая структурная схема мониторинговой земной станции: УВЧ – усилитель высокой частоты, ПЧ – преобразователь частоты

УОК должна содержать [2]: фильтр (Ф), который позволит выделить гармоническую составляющую сигнала (нелегитимного пользователя) с неизвестной структурой, принятую с иску-

✉ vsuhotin@sfu-kras.ru

ственного спутника земли (ИСЗ); фазометр (Фаз.), который содержит, кроме измерителя разности фаз, аналого-цифровой преобразователь и память и который, в свою очередь, позволит произвести измерение разности фаз по алгоритму, изложенному в [3]; ЭВМ, в которой заложен алгоритм [1], с помощью которого будет произведено определение координат нелегитимного пользователя. Структурная схема УОК представлена на рис. 2.

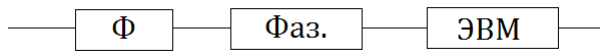


Рис. 2. Структурная схема УОК

В связи с тем, что используется фазовый метод определения координат, на выходе фильтра (устройства фильтрации) требуется знать набег фазы при прохождении через него сигнала. Также для высокоточного определения разности фаз должно быть минимальное искажение сигнала и постоянное слежение за частотой [4]. Учитывая предъявляемые требования, структура устройства фильтрации должна состоять из двухуровневой фильтрации и системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) (рис. 3).

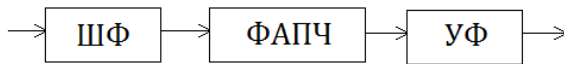


Рис. 3. Структурная схема фильтра (устройства фильтрации): ШФ – широкополосный фильтр, предназначен для предварительной фильтрации сигнала на входе ФАПЧ; ФАПЧ – предназначен для слежения за частотой; УФ – узкополосный фильтр, предназначен для увеличения отношения сигнал/шум на выходе устройства фильтрации

Проведем обзор существующих имитационных моделей устройств фильтрации.

2. Аналоги устройства фильтрации

Существует патент «Способ восстановления несущей частоты фазоманипулированного сигнала и слежения за ней» [5]. Предложенный в патенте способ относится к области радиотехники и может быть использован при реализации систем

связи и радионавигации с фазоманипулированными сигналами. Достижимый технический результат – восстановление сигнала несущей частоты из принятого фазоманипулированного сигнала, искаженного шумами, с уменьшением дисперсии фазовых шумов в шумовой полосе ФАПЧ. Способ восстановления несущей частоты фазоманипулированного сигнала и слежения за ней характеризуется тем, что синфазный опорный сигнал, являющийся сигналом восстановленной несущей, формируются посредством фазовой модуляции гармонического сигнала, создаваемого автономным генератором, в соответствии с сигналом, получаемым при интегрировании профильтрованного сигнала в фильтре кольца ФАПЧ.

Структурная схема восстановления несущей частоты фазоманипулированного сигнала и слежения за ней представлена на рис. 4.

Данный способ восстановления сигнала для использования в устройстве определения координат не подходит, так как в данном случае извлекается несущая из сигнала с заранее известным видом, а именно фазоманипулированного сигнала. Устройство фильтрации, входящее в состав УОК, в свою очередь должно выделять любую спектральную составляющую. Кроме того, на данную структурную схему восстановления несущей частоты фазоманипулированного сигнала нет ее компьютерной модели для анализа работы схемы.

Существует патент «Фильтр с переменной полосой пропускания для подавления узкополосного шума и модуль регулируемой задержки» [6]. Данное запатентованное изобретение относится к технике связи. Его цель заключается в повышении помехоустойчивости. Для достижения повышения помехоустойчивости в системе используют фильтры управляемой ширины полосы пропускания для фильтрации принимаемого сигнала. Управляющая схема генерирует сигнал управления, чтобы управлять шириной полосы пропускания фильтров. Если интенсивность принимаемого сигнала выше первого порогового значения, то для фильтров может использоваться более широкая полоса пропускания. Если принимаемый сигнал ниже второго порогового значения, то управляющая схема ге-

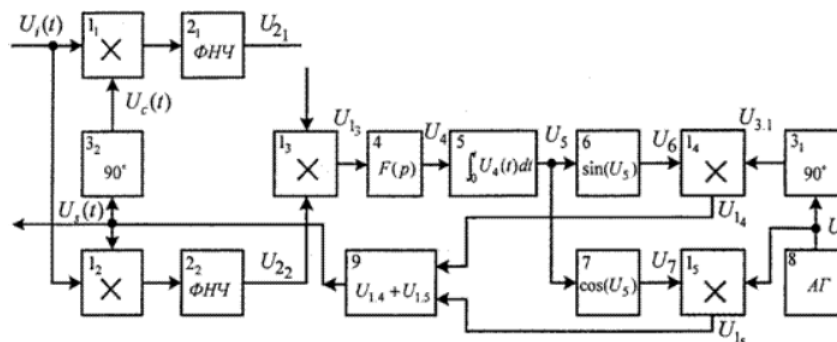


Рис. 4. Структурная схема восстановления несущей частоты фазоманипулированного сигнала и слежения за ней

нерирует сигнал управления для настройки фильтров на более узкую полосу пропускания. Ширина полосы пропускания фильтра также изменяется в зависимости от присутствия источника узкополосных радиопомех (преднамеренных радиопомех). Блок регулируемой задержки гарантирует постоянное групповое время задержки между всеми возможными конфигурациями фильтра.

Данное изобретение не подходит для использования в УОК, так как в данной модели фильтра устройства определения координат нет возможности слежения за частотой принимаемого сигнала для измерения фаз, которое требуется. Уход частоты сигнала не позволит снимать ее истинные значения, что приведет к невозможности применения данного фильтра для определения координат фазовым методом.

Существует научная статья «Цифровой фильтр для устройства определения координат источника радиосигнала в спутниковых системах телекоммуникаций» [2]. В данной статье проводится исследование зависимости мощности сигнала,

который используется в измерениях разности фаз устройством определения координат, и шумовых составляющих сигнала от типа цифрового фильтра и его параметров при различных соотношениях сигнал/шум.

В качестве устройства фильтрации разработчики предлагают использовать полосно-пропускающий цифровой фильтр. В ходе научной работы авторами была создана компьютерная модель для исследования цифрового фильтра, которая изображена на рис. 5, а также рассмотрены исследования для цифровых рекурсивных полосно-пропускающих фильтров типа Баттерворта, Чебышева 1 рода, Чебышева 2 рода, Золотарева-Кауэра, которые задаются с помощью дискретной линейной системы.

В данной модели фильтра устройства определения координат нет возможности слежения за частотой принимаемого сигнала для высокоточного измерения фаз.

Разработаем компьютерную модель устройства фильтрации, используя программу MatLAB Simulink.

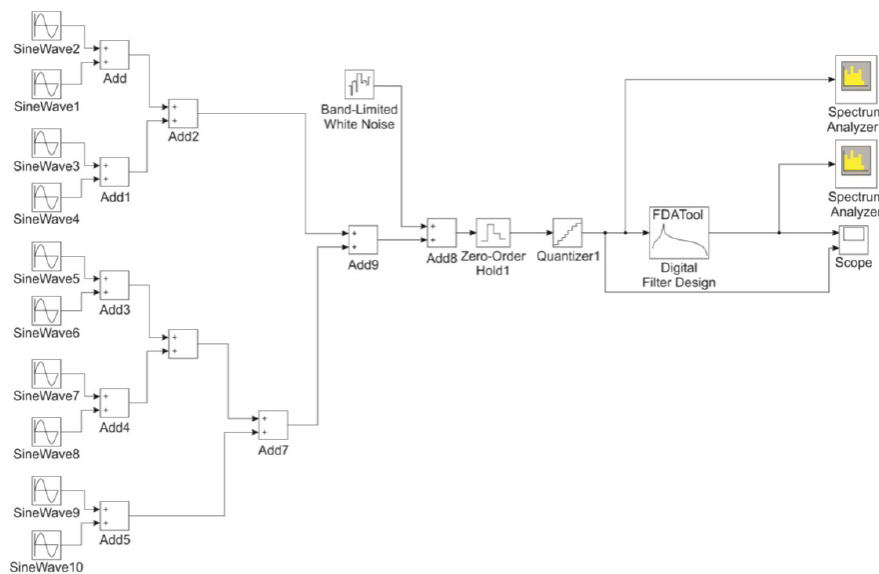


Рис. 5. Компьютерная модель для исследования цифрового фильтра

3. Компьютерная модель устройства фильтрации

В качестве широкополосного и узкополосного фильтра устройства фильтрации применим блок аналогового фильтра Analog Filter Design, который представлен на рис. 6.



Рис. 6. Блок аналогового фильтра Analog Filter Design

ШФ и УФ являются полосно-пропускающим фильтром с настройками, приведенными на рис. 7а (для ШФ) и на рис. 7б (для УФ). В настройках блока можно установить: метод проектирования (Design method), тип фильтра (Filter type), порядок фильтра (Filter order), верхнюю (Lower passband edge frequency) и нижнюю частоты полосы пропускания (Upper passband edge frequency).

На рис. 8 рассмотрены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и фазочастотные характеристики (ФЧХ) пяти возможных типов проектирования полосовых фильтров первого порядка с заданными верхней (f_B) и нижней (f_H) частотами среза: Баттерворда (Butterworth), Чебышева 1 (Chebyshev1) с пульсацией полосы пропускания

2 дБ, Чебышева 2 (Chebyshev2) с затуханием в полосе задерживания 40 дБ, Эллиптический (Elliptic)

с пульсацией полосы пропускания 2 дБ и затуханием в полосе задерживания 40 дБ, Бесселя (Bessel).

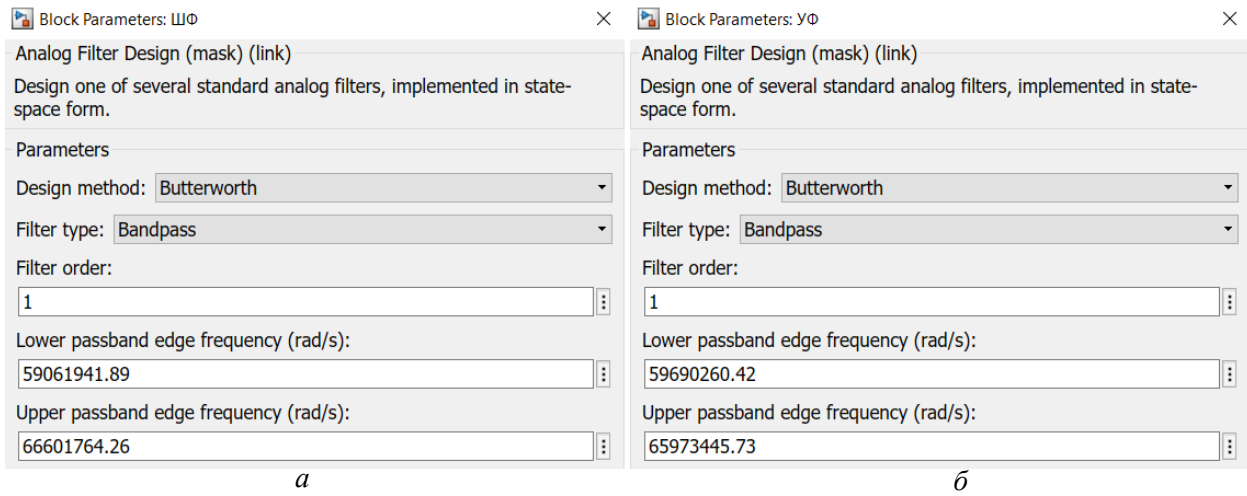


Рис. 7. Панель настройки: а – ШФ, б – УФ

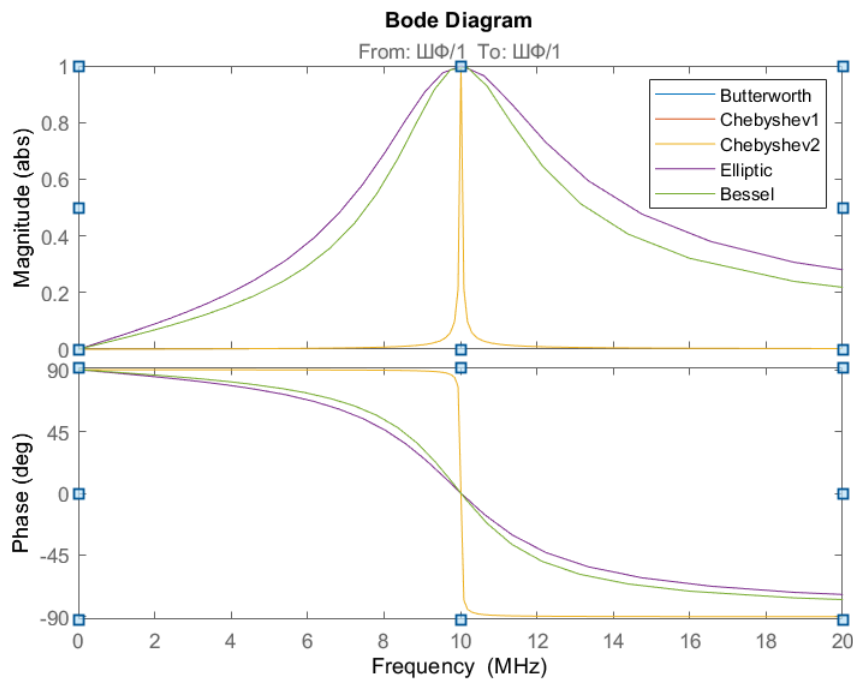


Рис. 8. АЧХ и ФЧХ фильтров Баттерворда (Butterworth), Чебышева 1 (Chebyshev1), Чебышева 2 (Chebyshev2), Эллиптический (Elliptic), Бесселя (Bessel)

По рис. 8 видно, что при данных настройках фильтры Чебышева 1 и Эллиптический одинаковы между собой. Также при данных настройках одинакова пара фильтров Баттерворда и Бесселя. Таким образом, зная возможности регулировки данных фильтров, анализируя АЧХ и ФЧХ и уже подавая в систему сигнал с шумом, можно исследовать фильтр под заданные требования с настройками как у широкополосного фильтра, так и у узкополосного фильтра для того, чтобы получить требуемое значение сигнала на выходе устройства фильтрации.

Возьмем фильтр для проверки влияния с типом реализации Баттерворда. Порядок ШФ принимаем равным 3.

Нижняя и верхняя частоты среза подбираются таким образом, чтобы на центральной частоте, например 10 МГц, ФЧХ равнялась нулю, то есть на этой частоте не было фазового сдвига. Аналитическим методом определяем верхнюю (f_B) и нижнюю (f_H) частоты среза ШФ. Анализ показал следующие значения частот: $f_H = 8,5$ МГц; $f_B = 11,760323$ МГц. Диаграмма АЧХ и ФЧХ ШФ приведена на рис. 9.

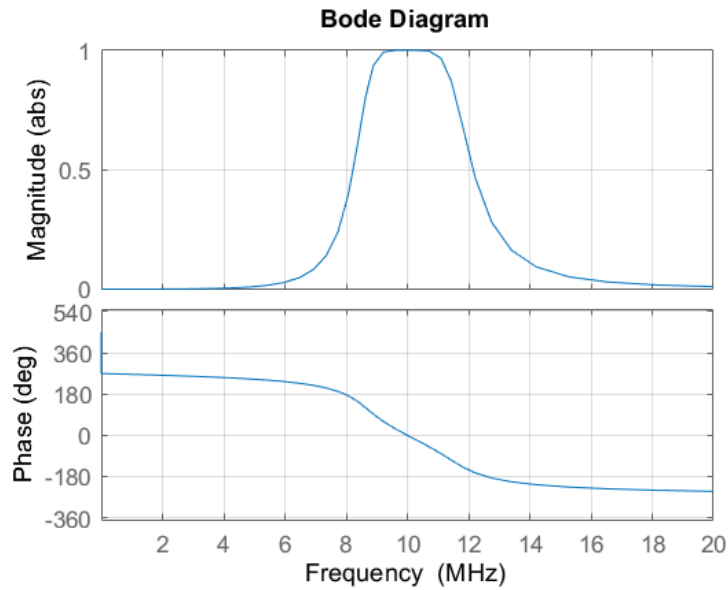


Рис. 9. Диаграмма АЧХ и ФЧХ ШФ

Для того чтобы определить изменения фазы сигнала, вносимые данным фильтром в систему, следует зафиксировать значения ФЧХ ШФ. Зная частоту сигнала на выходе устройства и отклонение фазы фильтром на этой частоте, можно математически рассчитать фазу сигнала на входе фильтра.

Фиксированные значения ФЧХ, где $\Delta\phi$ – отклонения фазы (град.) при значении частот f в по-

лосе 9–11 МГц с дискретностью взятия отсчетов по частоте 100 кГц, приведены в табл. 1.

По частоте сигнала с помощью данных значений отклонения фаз на выходе фильтра можно восстановить входную фазу сигнала. Произведем проверку восстановления сигнала, подавая на вход данного фильтра сигнал с частотой 9,5 МГц. Результат приведен на рис. 10.

Таблица 1

ФЧХ ШФ от частоты входного сигнала фильтра

f	$\Delta\phi$	f	$\Delta\phi$	f	$\Delta\phi$
9	81,5	9,7	21,4	10,4	-28,2
9,1	71,7	9,8	14,2	10,5	-35,3
9,2	61,8	9,9	7,12	10,6	-42,3
9,3	53,5	10	0	10,7	-49,4
9,4	45,4	10,1	-7,17	10,8	-57,1
9,5	37	10,2	-14,1	10,9	-64,8
9,6	29	10,3	-21,2	11	-72,6

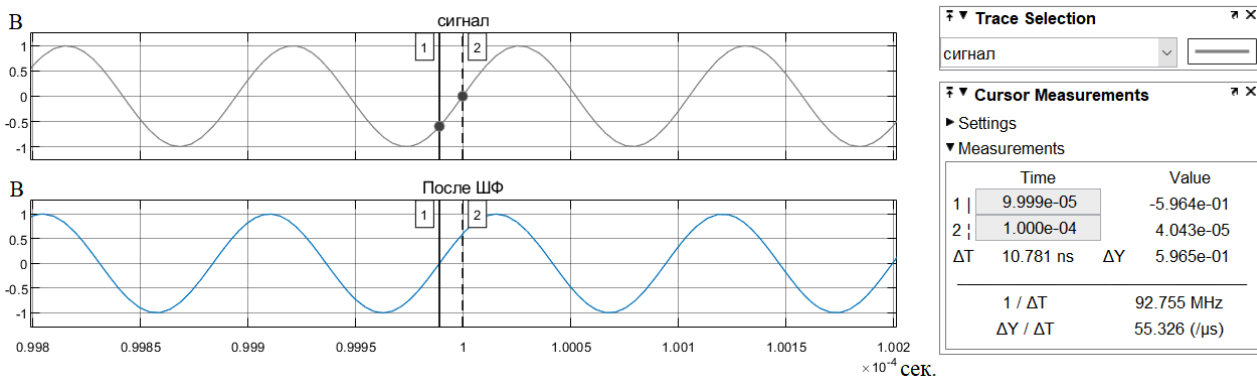


Рис. 10. Временной график входного и выходного сигнала ШФ

Параметр $\Delta T = 10,781 \cdot 10^{-9}$ с на рис. 11 показывает разницу во времени между маркерами 1 и 2. Маркеры установлены в нулевых фазах входного и выходного сигнала фильтра соответственно. Таким образом, зная смещение сигнала во времени, можно получить разность фаз сигнала на входе и выходе ШФ:

$$\frac{360}{1} = \frac{\Delta\varphi_{f_{\text{сигн}}}}{\Delta T}, \quad (1)$$

$$f_{\text{сигн}}$$

где $f_{\text{сигн}}$ – частота входного сигнала; $\Delta\varphi_{f_{\text{сигн}}}$ – разность фаз входного и выходного сигнала.

$$\Delta\varphi_{f_{\text{сигн}}} = 360 \cdot 10,781 \cdot 10^{-9} \cdot 9500000 = 36,87^\circ.$$

Расчетное математически значение из временных графиков рис. 11 и значения ФЧХ из табл. 1 практически равны, что доказывает возможность определения набега фазы сигнала после прохождения его через ШФ.

Для УФ, анализируя графики типов проектирования фильтров рис. 9, выбор останавливается на типе реализации Баттерворда. Данный фильтр имеет максимально гладкую АЧХ на частотах полосы пропускания и снижающуюся почти до нуля на частотах подавления [7]. УФ должен не исказить амплитуду сигнала в полосе пропус-

ния и при этом иметь полосу пропускания меньше, чем у ШФ. Также, УФ должен иметь более высокое отношение сигнал/шум, чем ШФ, обладая высоким уровнем затухания в полосе задерживания. Для того чтобы АЧХ имела резкий переход между полосами среза и задерживания, необходимо выбрать высокий порядок фильтра.

Корректируя АЧХ под требуемую форму, уменьшая уровень затухания в полосе задерживания, получаем требование для порядка ШФ, равное 15. Такой высокий порядок фильтра приводит к тому, что фильтр будет иметь высокие искажения фазы, следовательно, дискретность взятия отсчетов ФЧХ по частоте нужно взять заметно больше, чем у ШФ.

Нижняя и верхняя частоты среза подбираются таким образом, чтобы АЧХ имела максимально ровную полосу пропускания в диапазоне частот от 9 до 11 МГц. Аналитическим методом определяем значения верхней ($f_{\text{в}}$) и нижней ($f_{\text{н}}$) частотам среза УФ. Анализ показал следующие значения: $f_{\text{н}} = 8,8$ МГц, $f_{\text{в}} = 11,2$ МГц. Диаграмма АЧХ и ФЧХ УФ приведена на рис. 11.

Фиксированные значения ФЧХ, где $\Delta\varphi$ – отклонения фазы (град.) при значении частот f в полосе 9–11 МГц с дискретностью взятия отсчетов по частоте 10 кГц, приведены в табл. 2.

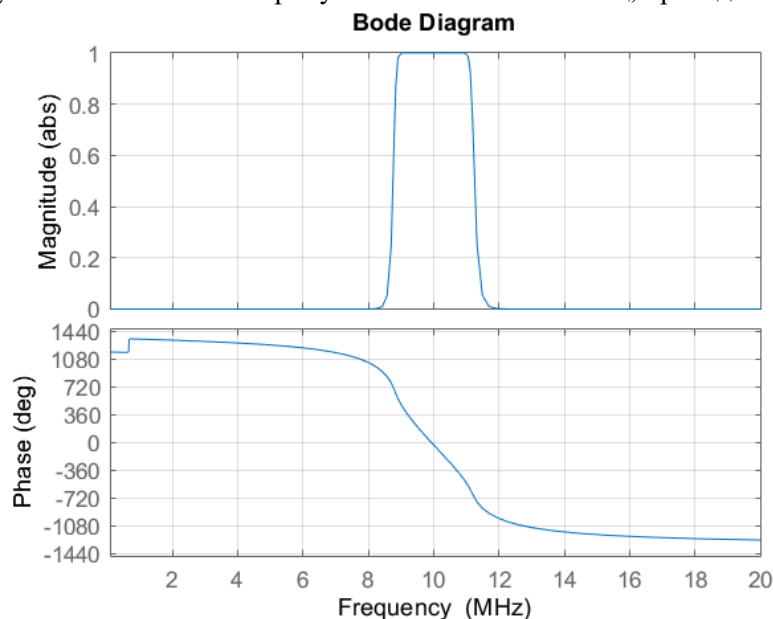


Рис. 11. Диаграмма АЧХ и ФЧХ УФ

Таблица 2

ФЧХ УФ от частоты входного сигнала фильтра

f	$\Delta\varphi$	f	$\Delta\varphi$	f	$\Delta\varphi$	f	$\Delta\varphi$	f	$\Delta\varphi$
9	493	9,41	249	9,82	49,7	10,23	-137	10,64	-328
9,01	486	9,42	244	9,83	45	10,24	-142	10,65	-333
9,02	478	9,43	239	9,84	40,4	10,25	-146	10,66	-338
9,03	471	9,44	234	9,85	35,8	10,26	-151	10,67	-343

f	$\Delta\phi$	f	$\Delta\phi$	f	$\Delta\phi$	f	$\Delta\phi$	f	$\Delta\phi$
9,04	468	9,45	229	9,86	31,2	10,27	-155	10,68	-348
9,05	458	9,46	224	9,87	26,6	10,28	-160	10,69	-353
9,06	451	9,47	219	9,88	21,9	10,29	-164	10,7	-358
9,07	445	9,48	214	9,89	17,4	10,3	-169	10,71	-363
9,08	439	9,49	208	9,9	12,8	10,31	-173	10,72	-368
9,09	432	9,5	203	9,91	8,15	10,32	-178	10,73	-373
9,1	429	9,51	198	9,92	3,56	10,33	-183	10,74	-378
9,11	420	9,52	193	9,93	-1,03	10,34	-187	10,75	-383
9,12	413	9,53	188	9,94	-5,57	10,35	-192	10,76	-388
9,13	407	9,54	183	9,95	-10,2	10,36	-196	10,77	-393
9,14	400	9,55	178	9,96	-14,7	10,37	-201	10,78	-398
9,15	394	9,56	173	9,97	-19,2	10,38	-206	10,79	-403
9,16	388	9,57	168	9,98	-23,8	10,39	-210	10,8	-409
9,17	382	9,58	164	9,99	-28,3	10,4	-215	10,81	-414
9,18	376	9,59	159	10	-32,9	10,41	-219	10,82	-419
9,19	370	9,6	154	10,01	-37,4	10,42	-224	10,83	-425
9,2	364	9,61	149	10,02	-42	10,43	-229	10,84	-430
9,21	358	9,62	144	10,03	-46,5	10,44	-233	10,85	-436
9,22	353	9,63	139	10,04	-51	10,45	-238	10,86	-441
9,23	347	9,64	134	10,05	-55,6	10,46	-242	10,87	-447
9,24	342	9,65	130	10,06	-60,1	10,47	-247	10,88	-452
9,25	336	9,66	125	10,07	-64,7	10,48	-252	10,89	-457
9,26	330	9,67	120	10,08	-69,7	10,49	-256	10,9	-463
9,27	325	9,68	115	10,09	-73,7	10,5	-261	10,91	-469
9,28	319	9,69	111	10,1	-78,2	10,51	-266	10,92	-475
9,29	314	9,7	106	10,11	-82,7	10,52	-271	10,93	-481
9,3	308	9,71	101	10,12	-87,2	10,53	-275	10,94	-486
9,31	302	9,72	96,5	10,13	-91,8	10,54	-280	10,95	-492
9,32	297	9,73	91,7	10,14	-96,3	10,55	-285	10,96	-498
9,33	291	9,74	87	10,15	-101	10,56	-289	10,97	-504
9,34	286	9,75	82,3	10,16	-105	10,57	-294	10,98	-510
9,35	281	9,76	77,6	10,17	-110	10,58	-299	10,99	-516
9,36	275	9,77	72,9	10,18	-114	10,59	-304	11	-523
9,37	270	9,78	68,1	10,19	-119	10,6	-309		
9,38	265	9,79	63,5	10,2	-123	10,61	-314		
9,39	259	9,8	58,9	10,21	-128	10,62	-319		
9,4	254	9,81	54,2	10,22	-132	10,63	-323		

С помощью значений отклонения фаз сигнала УФ табл. 2 и значения частоты сигнала на выходе этого фильтра можно установить набег фазы.

Основными элементами системы ФАПЧ являются фазовый детектор (ФД), фильтр нижних частот (ФНЧ) и генератор, управляемый напряжением (ГУН). Существенной особенностью системы

ФАПЧ является то, что выходной величиной ГУН является частота, а входной величиной ФД – разность фаз управляющего сигнала и сигнала обратной связи, поступающего с выхода ГУН [8].

Фазовый детектор – устройство, осуществляющее сравнение двух входных частот, и формирующее выходной сигнал, длительность которого

пропорциональна этой разности. При реализации цифрового ФД используется схема «исключающего или», а при реализации аналогового ФД используется схема аналогового умножителя сигналов [9]. При сборке в программе схемы фазового детектора необходимо выбрать блок аналогового умножения сигналов и блок усиления сигнала. Блок аналогового умножения сигналов Product приведен на рис. 12а. Результат перемножения двух сигналов необходимо усилить. Для этого необходимо применение блока усиления сигнала Gain, который приведен на рис. 12б.



Рис. 12. Составной блок ФД: а – аналогового умножения сигналов Product, б – усиления сигнала Gain

Таким образом, с помощью блоков Product и Gain сформирована схема фазового детектора, собранная в один блок, изображенный в модели ФАПЧ на рис. 13.

На выходе ФД применяется ФНЧ. Цель ФНЧ – подавить высокочастотную составляющую сигнала, сохранив сигнал нулевой частоты, который должен регулировать ГУН. Для выполнения функций ФНЧ в программе MatLAB Simulink подходит блок Analog Filter Design. Блок ФНЧ Analog Filter Design приведен в модели ФАПЧ на рис. 13. Данный блок такой же, как у ШФ и УФ, отличающийся только настройкой параметра типа фильтра. Он имеет настройки: метод проектирования (Design method), тип фильтра (Filter type), порядок фильтра (Filter order) и граничная частота полосы пропускания (Passband edge frequency (rad/s)).

В ФАПЧ ГУН является генератором, у которого частота на выходе зависит от напряжения на его управляющем входе [10]. Блоком ГУН в программе MatLAB Simulink является блок Continuous-Time VCO, изображенный в модели ФАПЧ на рис. 13. Данный блок предназначен для непрерывных сигналов. Под действием управляющего на-

пряжения данный блок смещает частоту генерируемого сигнала в зависимости от величины управляющего напряжения. Если входной сигнал равен $u(t)$, то выходной сигнал соответствует формуле:

$$y(t) = A_{cg} \cos(2\pi f_{co}t + 2\pi k_c \int_0^t u(\tau) d\tau + \varphi), \quad (2)$$

где A_{cg} – амплитуда входного сигнала, f_{co} – частота покоя, t – время, k_c – входная чувствительность, φ – начальная фаза.

Блок ГУН Continuous-Time VCO имеет настройки: выходная амплитуда (Output amplitude), частота покоя (Quiescent frequency), входная чувствительность (Input sensitivity) и начальная фаза (Initial phase).

Сборная модель системы ФАПЧ приведена на рис. 13.

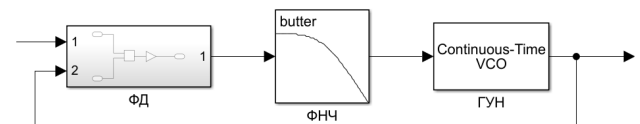


Рис. 13. Модель системы ФАПЧ

Таким образом, цель сборки модели ФАПЧ успешно достигнута.

В результате моделирования системы ФАПЧ в диапазоне частот от 9 МГц до 11 МГц фаза сигнала на выходе смещается на 90 градусов относительно входного сигнала за счет ГУНа.

На рис. 14 представлена разработанная общая компьютерная модель устройства фильтрации в программе MatLAB Simulink.

Входной сигнал формируется из суммы двух блоков генерации: генератор сигнала (Signal Generator) и генератор нормального распределения случайных чисел (Random Number). Параметры сигнала и белого шума также регулируются.

Заключение

Таким образом, проведенный обзор аналогов предложенной структуры устройства фильтрации показал отсутствие компьютерной модели с возможностью слежения за частотой сигнала и оценки влияния параметров элементов устройства на фазу сигнала. В результате была разработана ком-

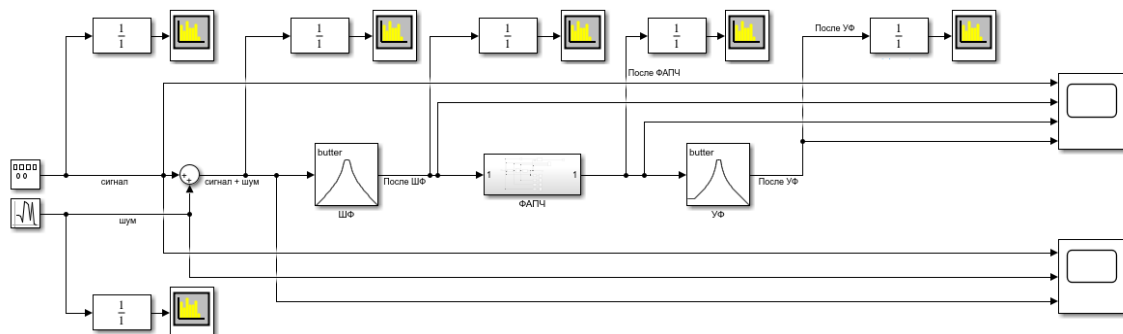


Рис. 14. Модель устройства фильтрации

пьютерная модель устройства фильтрации в программе MatLAB Simulink, в которую вошли: ШФ и УФ с возможностью изменения их параметров (частоты среза и задерживания, типа реализации фильтра, порядка фильтра), ФАПЧ с возможностью изменения ее параметров (коэффициента усиления в ФД, чувствительности ГУН, частоты покоя ГУН и ряда других параметров) и схемотехнического решения.

Разработанная компьютерная модель позволит провести исследования влияния блоков устройства фильтрации на фазу сигнала.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (номер FSRZ-2023-0008).

Список литературы

- [1] Панько С. П., Сухотин В. В. Фазовая пеленгация в спутниковой связи // Исследовано в России. 2003. С. 380–388.
- [2] Сухотин В. В., Тихтенко А. С., Жгун А. В., Сидорин В. А. Цифровой фильтр для устройства определения координат источника радиосигнала в спутниковых системах телекоммуникаций // Космические аппараты и технологии. 2020. Т. 4. № 4. С. 226–232. doi: 10.26732/j.st.2020.4.05.
- [3] Овчинников Ф. В., Сухотин В. В. Измерение разности фаз сигналов в системах спутниковой связи с использованием одного геостационарного ИСЗ // Исследования наукограда. 2017. Т. 1. № 1. С. 30–37.
- [4] Сосновский М. Р., Сухотин В. В. Разработка компьютерной модели устройства фильтрации гармонической составляющей сигнала с неизвестной структурой // Материалы XVIII Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектив – 2022». Красноярск. 2022. С. 2082–2084.
- [5] Романов А. П., Алешечкин А. М. Способ восстановления несущей частоты фазоманипулированного сигнала и слежения за ней. Пат. № 2510145 Российская Федерация, 2014. Бюл. № 8.
- [6] Чиккарелли С., Рагхупати А., Банистер Б. Фильтр с переменной полосой пропускания для подавления узкополосного шума и модуль регулируемой задержки. Пат. № 2384942 Российская Федерация, 2010. Бюл. № 8.
- [7] Сорокин Г. А. Фильтр нижних частот // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2015. С. 100–106.
- [8] Голуб В. Несколько слов о системе ФАПЧ // Компоненты и технологии. 2003. № 8. С. 92–96.
- [9] Тельнов А. А. Проектирование систем фазовой автоподстройки частоты // Электроника. 2022. Т. 15. № 7. С. 37–46.
- [10] Харни О., Иоффе Д. Разработка точной петли фазовой автоподстройки частоты с высоковольтным ГУН // Компоненты и Технологии. 2010. № 7. С. 138–142.

COMPUTER MODEL OF A SIGNAL FILTERING DEVICE FOR A MONITORING EARTH STATION

M. R. Sosnovsky, V. V. Sukhotin, A. P. Baskov
Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russian Federation

Satellite communication systems have an advantage over other communication systems, as they have a large coverage of the territory. The Earth station can be located anywhere in this territory and can be either a legitimate user or a satellite pirate (an illegitimate user). The developers are faced with the task of determining the coordinates of an illegitimate user illegally occupying a frequency resource. The article proposes a block diagram of a signal filtering device, which is part of a device for determining the coordinates of an illegitimate user, a monitoring Earth station. The purpose, requirements and main task of each composite block of the filtration device are defined. The search and analysis of analog filters and signal filtering methods was carried out. In the Mat-Lab Simulink software environment, a computer model of a signal filtering device has been developed according to a block diagram with the possibility of determining the phase run, as well as the settings of the filtering device blocks are disclosed, which can be adjusted during the study of the

model. For the bandpass filters included in the filtering device, the phase frequency characteristics of the phase change of the received signal on the frequency of this signal are constructed. A phase lock loop system has been formed with the possibility of changing its parameters. Calculations of the phase incursion through the elements of the filtration device are made.

Keywords: coordinate determination device, filtering device, phase lock loop, computer simulation, Earth station, phase shift.

References

- [1] Panko S. P., Sukhotin V. V. *Fazovaya pelengaciya v sputnikovoj svyazi* [Phase direction finding in satellite communications] // Investigated in Russia, 2003, pp. 380–388. (In Russian)
- [2] Sukhotin V. V., Tikhtenko A. S., Zhgun A. V., Sidorin V. A. *Cifrovoy fil'tr dlya ustrojstva opredeleniya koordinat istochnika radiosignala v sputnikovyh sistemah telekommunikacij* [Digital filter for device of determining coordinates of radio signal source in satellite telecommunications systems] // Spacecrafts & Technologies, 2020, vol. 4, no. 4, pp. 226–232. doi: 10.26732/j.st.2020.4.05. (In Russian)
- [3] Ovchinnikov F. V., Sukhotin V. V. *Izmerenie raznosti faz signalov v sistemah sputnikovoj svyazi s ispol'zovaniem odnogo geostacionarnogo ISZ* [Measurement of a difference phases of signals in satellite communication systems with use of one geostationary artificial earth satellite] // The Research of the Science City, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 30–37. (In Russian)
- [4] Sosnovsky M. R., Sukhotin V. V. *Razrabotka komp'yuternoj modeli ustrojstva fil'tracii garmonicheskoy sostavlyayushchej signala s neizvestnoj strukturoj* [Development of a computer model of a device for filtering the harmonic component of a signal with an unknown structure] // Materials of the XVIII International Conference of students, postgraduates and young scientists «Prospect Svobodny – 2022», Krasnoyarsk, 2022, pp. 2082–2084. (In Russian)
- [5] Romanov A. P., Aleshechkin A. M. *Sposob vosstanovleniya nesushchej chastoty fazomanipulirovannogo signala i slezheniya za nej* [A method for restoring the carrier frequency of a phase-manipulated signal and tracking it]. Patent RU 2510145, 2014, bulletin no. 8.
- [6] Ciccarelli S., Raghupati A., Banister B. *Fil'tr s peremennoj polosoj propuskaniya dlya podavleniya uzkopolosnogo shuma i modul' reguliruemoy zaderzhki* [Variable bandwidth filter for narrowband noise suppression and adjustable delay module]. Patent RU 2384942, 2010, bulletin no. 8.
- [7] Sorokin G. A. *Fil'tr nizhnih chastot* [Low-pass filter] // Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technology, control, radio electronics, 2015, pp.100–106. (In Russian)
- [8] Golub V. *Neskol'ko slov o sisteme FAPCH* [A few words about the PLL system] // Components and Technologies, 2003, no. 8, pp. 92–96. (In Russian)
- [9] Telnov A. A. *Proektirovanie sistem fazovoj avtopodstrojki chastoty* [Designing systems of phase auto-tuning of frequency] // Electronics, 2022, vol. 15, no. 7, pp. 37–46. (In Russian)
- [10] Harney Au., Ioffe D. *Razrabotka tochnoj petli fazovoj avtopodstrojki chastoty s vysokovol'tnym GUN* [Development of an accurate loop of phase-locked frequency with a high-voltage GUN] // Components and Technologies, 2010, no. 7, pp. 138–142. (In Russian)

Сведения об авторах

Басков Андрей Петрович – аспирант Сибирского федерального университета. Окончил Красноярский государственный технический университет в 2001 году. Область научных интересов: системы спутниковой связи.

Сосновский Максим Романович – студент Сибирского федерального университета. Область научных интересов: моделирование радиотехнических устройств, применяемых в спутниковых системах связи.

Сухотин Виталий Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент Сибирского федерального университета. Окончил Красноярский государственный технический университет в 1999 году. Область научных интересов: измерения параметров сигналов в радиотехнике, радиотехнические методы измерения координат источников радиоизлучения.

ORCID: 0000-0002-8166-5893