

# Радіолокація і радіотехніка

УДК.621.396.62.33

И.В. Барышев, К.А. Щербина, М.А. Вонсович, Е.П. Мсаллам

*Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ФИЛЬТРАЦИИ СПЕКТРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ДОПЛЕРОВСКОГО СИГНАЛА МОДУЛИРОВАННЫМ ФИЛЬТРОМ

*Синтезирована схема модулированного фильтра с самосинфазированием для следящего приема и обработки частотно модулированного сигнала на основе имитационного моделирования. Приведены результаты тестирования имитационной модели, подтверждающие высокую достоверность эффективной работы схемы при заданных исходных данных. Сравнительный анализ схем следящего модулированного фильтра с самосинфазированием и следящего измерителя с перестраиваемым гетеродином и узкополосным фильтром в петле автоподстройки показал, что разработанная схема обладает простотой технической реализации и улучшенной помехоустойчивостью.*

**Ключевые слова:** следящий доплеровский фильтр, фильтрация, модулированный фильтр, показатели качества, следящий прием, частота.

### Введение

Общая тенденция дальнейшего совершенствования и развития радиотехнических систем автономной навигации связана с расширением круга целевых задач и ужесточением требований к показателям точности измерений скоростных параметров движущегося объекта по результатам приема и обработки частотно-модулированного сигнала, формируемого отражающей поверхностью самой различной физической природы [1, 2].

Действенным методом повышения энергетичности измерительного канала, является ограничение полосы пропускания фильтра доплеровских частот до ширины спектра входного ЧМ-сигнала, или даже до части ширины этого спектра.

При этом сам следящий доплеровский фильтр может быть реализован на основе схемы следящего гетеродина, следящих схем частотной или фазовой автоподстройки частоты (ЧАП или ФАПЧ), а также по так называемым комбинированным схемам [3, 4].

Общим недостатком следящих схем ЧАП, ФАПЧ и комбинированных схем является невозможность выделения (фильтрации) спектра доплеровского сигнала, который дает более точную оценку средней доплеровской частоты  $F_d^*$  при выполнении вычислительных операций, например, методом квазиоптимальной обработки потока нулевых переходов, формируемых из спектра  $\Delta F_d$  [5].

Перспективные системы следящего приема и обработки, обеспечивающие выделение и обработку доплеровского сигнала, рассмотрены в [6]. Данный

класс этих систем реализован на основе применения модулированного фильтра (МФ) с самосинфазированием (СМФС). Общие вопросы теоретических основ построения таких фильтров рассмотрены в [7-9] применительно к приему и обработке широкополосных частотно-модулированных (ЧМ) сигналов в связанных и телеметрических радиосистемах.

Отличительной особенностью СМФС является то, что он обрабатывает внутреннюю структуру спектра ЧМ сигнала, улучшая тем самым энергетичность измерительного канала по сравнению с каналом в котором применяется фиксированное ограничение доплеровского спектра. Однако фильтрующие свойства СМФС применительно к внутриспектральной обработке доплеровского сигнала, отражаемого подстилающей поверхностью, что это имеет место в автономных системах навигации подвижных объектов, практически не исследованы.

Наиболее перспективным направлением исследования фильтрующих свойств СМФС является имитационное моделирование фильтра в составе следящего приема и обработки доплеровского сигнала по средней частоте его доплеровского спектра  $F_d^*$ .

**Цель статьи:** синтез следящего модулированного фильтра с самосинфазированием в среде имитационного моделирования динамических систем для следящего приема и обработки доплеровского ЧМ сигнала, отражаемого подстилающей поверхностью.

### Теоретическая часть

Выбор показателя качества фильтрации следящего модулированного фильтра с самосинфазирова-

нием и методика его оценки по спектральным измерениям.

Из приведенного [10, 11] упрощенного рассмотрения следящего МФ с самосинфазированием следует, что основным показателем качества работы СМФС является помехоустойчивость приема ЧМ сигнала, зависящая от соотношения шумовой полосы резонансного тракта приемника до частотного дискриминатора в надпороговой области.

Как следует из теории СМФС, как системы с замкнутой петлей управления [10], основой оценки помехоустойчивости МФС, а следовательно, и СМФС является эквивалентная частотная характеристика (ЭЧХ) управляемого контура

$$K_{\Sigma}(j\Omega) = 1 / \left( 1 + (j\Omega / \Delta\omega_{\text{ЭФ}}) \cdot [1 - K_{\Sigma}(j\Omega)] \right). \quad (1)$$

ЭЧХ дает возможность рассчитать частотные искажения ЧМ сигнал и нелинейные искажения модулирующей функции.

Воспользуемся на формальном уровне таким же определением качества работы, а именно, фильтрации СМФС как и для обычного ЧМ приемника с той лишь разницей, что соответствующие соотношения сигнал/шум по мощности будем оценивать (измерять) на входе и выходе МФ считая, что центральная частота, настройки МФ является постоянной величиной  $f_{0, \text{МФ}} = \omega_{\text{Д}}^* / (2\pi)$ , а полоса пропускания  $\Delta\omega_{\text{ЭФ}} \geq \Delta\omega_{\text{Д}}$ .

Запишем выражение для оценки качества фильтрации спектра (т.е. качества работы МФ) доплеровского сигнала при наличии шума

$$A = (\bar{P}_{\text{С.ВЫХ}} / \bar{P}_{\text{Ш.ВЫХ}}) / (\bar{P}_{\text{С.ВХ}} / \bar{P}_{\text{Ш.ВХ}}), \quad (2)$$

где  $\bar{P}_{\text{С.ВЫХ}}$ ,  $\bar{P}_{\text{С.ВХ}}$  – средние значения мощностей сигнала на выходе и входе МФ;  $\bar{P}_{\text{Ш.ВЫХ}}$ ,  $\bar{P}_{\text{Ш.ВХ}}$  – средние значения мощности шума на выходе и входе МФ. Черта сверху означает усреднение по спектральным компонентам ЧМ сигнала и шума.

Из теории спектрального анализа [10] известно, что средняя мощность сигнала  $x(t)$ , прошедшего узкополосный фильтр  $F$  (по предположению идеальный) с полосой пропускания  $\Delta\omega$ , центральной частотой  $\omega_0$  и коэффициентом усиления внутри полосы  $(\omega_0 - \Delta\omega/2, \omega_0 + \Delta\omega/2)$  равным 1, будет определяться выражением

$$\bar{P}_{\text{С.ВЫХ}} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |x_F(t)|^2 dt. \quad (3)$$

Так как фильтр пропускает только часть спектра сигнала, заключенную в полосе  $\Delta\omega$ , то средняя мощность сигнала на выходе

$$\bar{P}_{\text{С.ВЫХ}} = \int_{\omega_0 - \Delta\omega/2}^{\omega_0 + \Delta\omega/2} S_x(\omega) d\omega. \quad (4)$$

Величина  $S_x(\omega)$ , входящая в (4), – спектральная плотность. Сравнивая (3) и (4) получим

$$\int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) d\omega = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |x_F(t)|^2 dt = \bar{P}_{\text{С.ВЫХ}}. \quad (5)$$

Для определения  $S_x(\omega)$  нужно устремить  $\Delta\omega \rightarrow 0$ . Но это означает, что на выходе фильтра будет очень слабый сигнал, который трудно измерить (кроме случая при котором спектр содержит дискретную компоненту)

На практике для вычисления  $\bar{P}_{\text{С.ВЫХ}}$ ,  $\bar{P}_{\text{С.ВХ}}$  нужен спектроанализатор, вычисляющий спектры сигнала и шума на входе и выходе МФ в заданной полосе частот  $(\omega_0 - \Delta\omega/2, \omega_0 + \Delta\omega/2)$ . Далее нужно выполнить возведение в квадрат и усреднение по количеству  $M$  вычисленных значений. Тогда

$$\bar{P}_{\text{С}} = \frac{1}{M} \sum_{q=1}^M S_q^2(m); \text{ мВт/Гц.} \quad (6)$$

Величина  $M$  выбирается в виде степени числа  $M$ . Обычно не более  $M = 1024$  для цифровых спектроанализаторов.

## Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования фильтрующих свойств СМФС выполнялись на основе цифровой имитационной модели фильтра, синтезированной в среде имитационного моделирования динамических систем на основе использования функциональной схемы. Детальное описание динамической модели СМФС приведено в [11].

В составе имитационной модели СМФС содержится источник модулирующего сигнала, который обеспечивал формирование модулирующей функции  $\Omega$  в виде низкочастотной гармонической функции вида  $\lambda_{\text{Ч}}(t) \approx \sin \Omega t$  и случайной моделирующей функции без учета коэффициента корреляции амплитудных флуктуаций ЧМ сигнала.

Генератор шума имитировал «белый» шум  $n(t)$  с заданной спектральной плотностью  $N_0$  и корреляционной функцией  $K(\tau) = N_0 \delta(\tau) / 2$  в виде случайных чисел с нормальным распределением.

Контроль спектра ЧМ сигнала на входе и выходе МФ осуществлялся встроенным в имитационную модель цифровым спектроанализатором.

Остальные элементы имитационной модели СМФС выполнены на основе стандартных цифровых блоков с известной программной реализацией (модулятор ЧМ сигнала, сумматоры, ФНЧ фильтры, блоки сохранения данных и т.д.).

Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 1-3. На рис. 3 жирной линией

нанесена умовно спектральна лінія  $S^2$  на частоті 10 кГц, відповідуюча  $\delta(f)$  для  $f_0 = 10$  кГц.

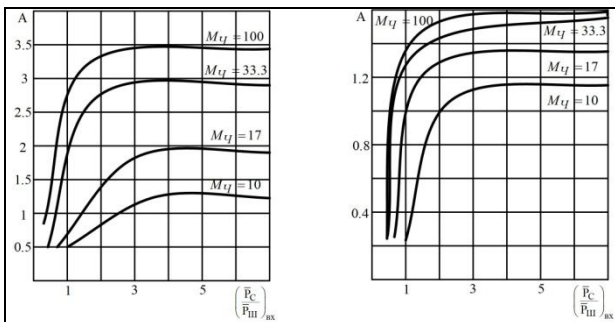


Рис. 1. Зависимость коэффициента фильтрации от  $(P_C / P_{Ш})_{вх}$  при: а – гармонической модулирующей функции  $\lambda_{ч}(t)$ ; б – случайной модулирующей функции  $\lambda_{ч}(t)$

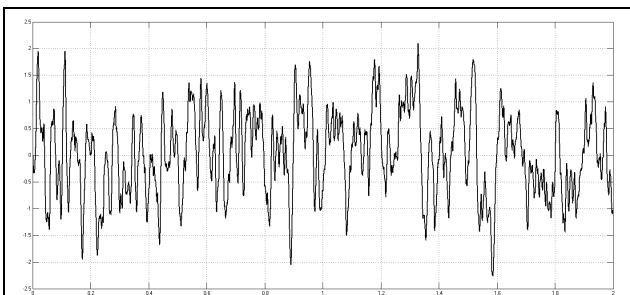


Рис. 2. Вид случайной модулирующей функции ЧМ сигнала при частоте среза ФНЧ  $F_M = \Omega/2\pi = 30$  Гц

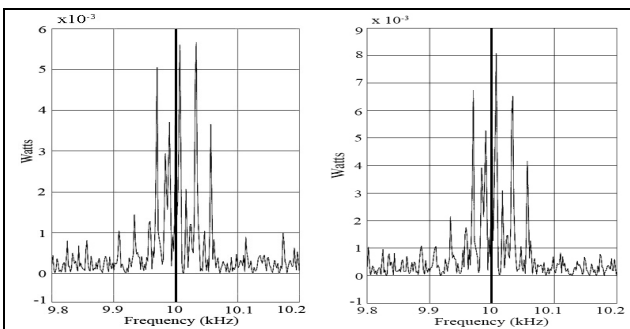


Рис. 3. Спектр ЧМ сигнала  $S^2(t)$  на входе а) и выходе б) модулированного фильтра при  $(P_C / P_{Ш})_{вх} = 14$  и  $\beta = \pm 100$  Гц

**Исходные данные моделирования:**

$F_0 = F_D^* = 10$  кГц – резонансная частота МФ (эквивалентна  $W_{П}^* \approx 900$  км/ч);

$\Delta F = \Delta F_D^* = 1$  кГц – ширина полосы пропускания МФ;

$F_M = \Omega/(2\pi)$  – гармоническая и характеристическая частота модулирующей функции равнялась  $10 \div 100$  Гц;

полоса УНЧ составляла  $0 \div 200$  Гц с дискретами 10, 30, 60, 90, 100 Гц;

девиация частоты ЧМ модулятора составляла  $\pm 500$  Гц и  $\pm 100$  Гц;

индекс частотной модуляции  $M_{ч} = \Delta F/F_M$  составлял 10, 30, 17, 11, 10;

спектральная плотность мощности шума  $N_0 = 5 \cdot 10^{-5} \div 100 \cdot 10^{-5}$  Вт/Гц.

Приведены экспериментальные исследования комбинированной системы ЧАП, реализованной на модулированном фильтре с самосинфазированием. Экспериментальные исследования выполнены с применением цифровой имитационной модели в среде имитационного моделирования динамических систем. При заданных исходных данных коэффициент фильтрации помехи (выигрыш) в отношении сигнал/шум на выходе по отношению сигнал/шум на входе в зависимости от параметров модулирующей функции и индексу частотной модуляции находился по максимуму от 1,5 до 3 раз.

Дальнейшее совершенствование комбинированных систем ЧАП, обеспечивающих согласованную обработку спектральной структуры доплеровского сигнала может идти по пути стабилизации уровня входных сигналов, подверженных паразитной амплитудной модуляции и больших диапазонах изменениях отношения сигнал/шум на входе.

**Заключение**

В работе исследована задача оценки качества фильтрации спектра доплеровского сигнала, отраженного от подстилающей поверхности следящим модулированным фильтром.

Полагается, что в процессе зондирования подстилающей поверхности непрерывным гармоническим сигналом, происходит его преобразование в амплитудно-частотно модулированный сигнал, который принимается в виде аддитивной смеси с “белым” гауссовским шумом.

При выбранном показателе качества фильтрации спектра доплеровского сигнала СМФС, формально совпадающем с известным показателем помехоустойчивости приема ЧМ сигнала в канале передачи непрерывных сообщений, отличающимся расчетом средних мощностей сигнала и шума на входе и выходе МФ, получены следующие результаты.

Максимальное значение коэффициента фильтрации при гармонической модулирующей функции ЧМ сигнала не превышает  $3 \div 3,5$  раз или примерно 5 дБ по мощности для индекса ЧМ модуляции стремящемуся к максимуму при  $F_D$ , стремящейся к минимуму.

Область пороговых значений коэффициента фильтрации примерно одинакова для различных

значений індекса модуляції ЧМ сигналу і знаходиться в межах  $3 \div 5$  дБ по відношенню середніх потужностей сигналу і шуму на вході МФ, розрахованих по їх спектрам.

Аналогічні висновки можна зробити і для випадкової модулюючої функції ЧМ сигналу на вході МФ. Відмінність складає лише в тому, що максимальне значення коефіцієнта фільтрації не перевищує  $1,2 \div 1,4$  раз, або приблизно  $1,5$  дБ по відношенню середніх потужностей сигналу і шуму на вході МФ, розрахованих по їх спектрам.

При цьому область порогових значень коефіцієнта фільтрації для різних значень індекса модуляції знаходиться в межах  $0,8 \div 1,5$  дБ по відношенню середніх потужностей сигналу і шуму на вході МФ.

Таким чином, заміна резонансних узкополосних фільтрів з фіксованими параметрами, які застосовуються в існуючих трактах прийому і обробки доплерівської інформації слідячим модульованим фільтром з самосинфазуванням для реальних умов формування модулюючої функції в формі випадкового процесу, дає покращення стійкості до  $1,5 \div 2$  дБ.

### Список літератури

1. V. K. Volosyuk, S. S. Zhyla, M. O. Antonov and O. A. Khaleev, "Optimal acquisition mode and signal processing algorithm in synthetic aperture radar," 2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kiev, 2017, pp. 511-516.
2. V. Pavlikov, V. Volosyuk, S. Zhyla, H. N. Van and K. N. Van, "A new method of multi-frequency active aperture synthesis for imaging of SAR blind zone under aerospace vehicle," 2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), Lviv, 2017, pp. 118-120.
3. Печенин, В.В. Узкополосная фильтрация и измерение частоты сигналов в доплеровских системах навига-

ции летательных аппаратов / В.В. Печенин, К.А. Щербина, Ю.В. Съедина и др. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2016. – 56 с.

4. Зайцев, Г.Ф. Радиотехнические системы автоматического управления высокой точности [Текст] / Г.Ф. Зайцев, В.К. Стеклов. – К. : Техника, 1988. – 208 с.
5. Печенин, В.В. Потенциальная точность цифровой обработки фазовых измерений, маскируемых аддитивным нормальным шумом [Текст] / В.В. Печенин, А.Р. Сарамолки // Системи обробки інформації. – Вип. 3 (77). – 2009. – С. 75–78.
6. Печенин, В.В. Классы следящих систем на модульованном фильтре [Текст] / В.В. Печенин, К.А. Щербина, М.А. Вонсович // Акустические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: мат. 8-й Межд. конф., Суздаль, 20–23 сентября 2015 г. – С. 161–163.
7. Автономные радиосистемы [Текст] / А.С. Виницкий. – М.: Радио и связь, 1986. – 336 с.
8. Колчинский, В.Е. Автономные доплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов [Текст] / В.Е. Колчинский, И.А. Мандуровский, М.И. Константиновский. – М. : Сов. радио, 1975. – 432 с.
9. Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К. Комбинированные следящие системы. К.: Техника, 1978.
8. Виницкий, А.С. Модульованные фильтры и следящий ЧМ прием [Текст] / А.С. Виницкий. – М.: Советское радио, 1960. – 548 с.
10. Вонсович М.А., Синтез модульованного фильтра с самосинфазуванням для слідячого прийому і обробки частотно модульованного сигналу методом імітаційного моделювання [Текст] / М.А. Вонсович, К.А. Щербина, В.В. Печенин, Ю.В. Съедина // Радиотехніка. – Вип. 186. – Х., 2016. – С. 211-216.
11. Вонсович, М.А. Структурный синтез комбинированной системы частотно-фазовой автоподстройки частоты, совмещенной с фильтрующей схемой спектра входного сигнала [Текст] / М.А. Вонсович, К.А. Щербина, В.В. Печенин, Е.П. Мсаллам // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2015. – № 4 (36). – С. 38-43.

Надійшла до редколегії 30.10.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук, с.н.с. В.В. Павліков, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ», Харків.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ФІЛЬТРАЦІЇ ДОПЛЕРІВСЬКОГО СИГНАЛУ МОДУЛЬОВАНИМ ФІЛЬТРОМ

І.В. Барішев, К.О. Щербина, М.А. Вонсович, Є.П. Мсаллам

Синтезовано схему модельованого фільтра з самосинфазуванням для слідуючого прийому та обробки частотно модульованого сигналу на основі імітаційного моделювання. Наведені результати тестування імітаційної моделі підтверджують високу вірогідність ефективної роботи схеми при заданих початкових даних. Порівняльний аналіз схем слідуючого модульованого фільтра з самосинфазуванням та слідуючим вимірювачем з перестроюємим гетеродіном і вузькосмуговим фільтром в петлі автопідстроювання показав, що розроблена схема володіє простотою технічної реалізації і покращеною заводстійкістю.

**Ключові слова:** слідуючий доплерівський фільтр, фільтрація, модульований фільтр, показники якості, слідуючий прийом, частота.

### EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE SPECTRAL QUALITY FILTRATION OF DOPPLER SIGNAL GENERATED BY UNDERLYING SURFACE

I.V. Baryshev, K. A. Shcherbina, M. A. Vonsovich, E.P. Msallam

The simulation approach has been used to synthesis the modulated filter model with self-cophasing for tracking and processing modulated signal. The high reliability of the efficient circuit performance for the given initial data has been proved by the results of the simulation model test. The comparative analysis of self-cophasing modulated tracking filter circuit and tracking meter circuit with tuned heterodyne and narrow-band filter in the locking loop has shown that the developed circuit has simple technical implementation and shows improved noise immunity.

**Key words:** Doppler tracking filter, filtration, modulated filter, quality indicators, tracking, frequency.