

СИНТЕЗ МОДУЛИРОВАННОГО ФИЛЬТРА С САМОСИНФАЗИРОВАНИЕМ ДЛЯ СЛЕДЯЩЕГО ПРИЕМА И ОБРАБОТКИ ЧАСТОТНО МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

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.

Действенным методом повышения энергетики 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 [1, 2].

Общим недостатком следящих схем ЧАП, ФАПЧ и комбинированных схем является невозможность выделения (фильтрации) спектра доплеровского сигнала, который дает более точную оценку средней доплеровской частоты $F_{\text{Д}}^*$ при выполнении вычислительных операций, например методом квазиоптимальной обработки потока нулевых переходов, формируемых из спектра $\Delta F_{\text{Д}}$ [3].

Перспективные системы следящего приема и обработки, обеспечивающие выделение и обработку доплеровского сигнала, рассмотрены в [4]. Данный класс этих систем реализован на основе применения модулированного фильтра (МФ) с самосинфазированием (СМФС). Общие вопросы теоретических основ построения таких фильтров рассмотрены в [5] применительно к приему и обработке широкополосных ЧМ сигналов в связных и телеметрических радиосистемах.

Отличительной особенностью СМФС является то, что он обрабатывает внутреннюю структуру спектра ЧМ сигнала, улучшая тем самым энергетику 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, как 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 $F_{\text{Д}}^*$.

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.

Содержание исследований

На вход СМФС поступает доплеровский ЧМ-сигнал

$$S(t, F_{\text{Д}}, \lambda_a(t), \lambda_{\text{Ч}}(t)) = E_0 [1 + M_{\text{АМ}} \lambda_{\text{А}}(t)] \sin \left[\omega_{\text{Ч}} t + M_{\text{ЧМ}} \int_0^t \lambda_{\text{Ч}}(\tau) d\tau + \varphi(t) \right] \quad (1)$$

и аддитивный нормальный шум $n(t)$ с известными статистическими характеристиками.

В формуле (1): E_0 , ω_u – амплитуда и частота принимаемого сигнала; $\lambda_a(t)$ и $\lambda_{\text{ч}}(t)$ – амплитудные и фазовые флуктуации наблюдаемого сигнала, представляющие коррелированные случайные процессы, порождаемые радиофизической структурой отражающей поверхности; M_{AM} , $M_{\text{ЧМ}}$ – индексы амплитудной и частотной модуляции; $\omega_u = \omega_0 + \omega_{\text{Д}}^*$, где $\omega_{\text{Д}}^* = 2\pi F_{\text{Д}}^*$ – средняя круговая частота доплеровского сигнала; ω_0 – частота излученного сигнала; $\varphi(t)$ – случайная начальная фаза отраженного сигнала; $F_{\text{Д}i}^* = \frac{2W_{\text{П}}}{\lambda_0} \cos \gamma_a \cos(\theta - \alpha)$ – среднее значение доплеровской частоты формируемого i -м лучом измерительной системы; $W_{\text{П}}$ – путевая скорость движущегося объекта; γ_a , θ и α – угловые параметры, определяющие пространственное положение i -го луча в трехмерной системе координат; $\Delta F_{\text{Д}i} = \frac{W_{\text{П}}}{\lambda_0} \sin \eta_{0i} \Delta \eta_i$ – спектр доплеровского сигнала, η_{0i} и $\Delta \eta_i$ – угловые величины, характеризующие угол наклона и ширину диаграммы излучения и приема по i -му лучу.

Если объект движется с «постоянной» путевой скоростью и направлением вектора $\bar{W}_{\text{П}i}$ параллельно земной поверхности, то индекс i можно опустить.

Для упрощения дальнейших выкладок будем полагать амплитудные флуктуации $S(\cdot)$ достаточно малыми, т.е. $\langle \lambda_a(t) \rangle \rightarrow 0$, а доплеровскую частоту – медленно меняющейся функцией времени, связанной с медленными эволюциями объекта, и можно записать:

$$\tilde{S}(t, F_{\text{Д}}^*, \Delta F_{\text{Д}}) = E_0 \sin \left[2\pi F_{\text{Д}}^*(t) + M_{\text{ЧМ}} \int_0^t \lambda_{\text{ч}}(\tau) d\tau \right], \quad \varphi(t) = 0. \quad (2)$$

Тогда переменное напряжение на входе СМФС:

$$U_{\text{ВХ}}(t) = \tilde{S}(t, F_{\text{Д}}^*, \Delta F_{\text{Д}}) + n(t). \quad (3)$$

Используя результаты исследований, изложенные в [4], представим структурную схему следящего доплеровского фильтра, построенного на основе МФ с самосинфазированием, в виде, показанном на рис. 1.

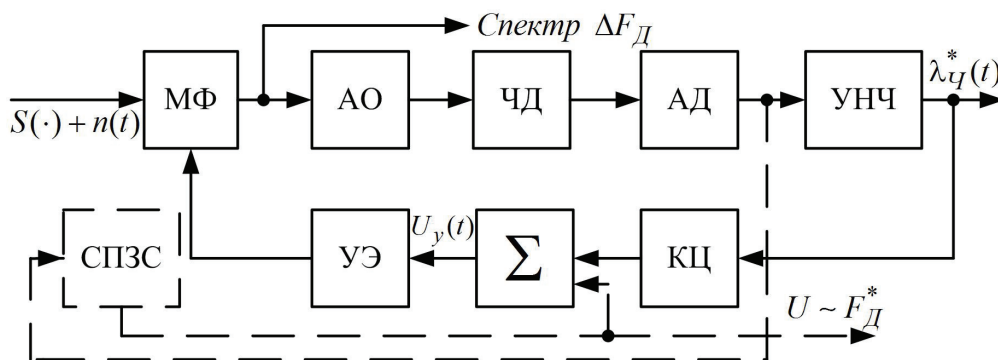


Рис. 1

Здесь МФ – модулированный фильтр, АО – амплитудный ограничитель; ЧД – частотный детектор; АД – амплитудный детектор; УНЧ – усилитель низкой частоты; КЦ – корректирующая цепь; Σ – сумматор; УЭ – управляющий элемент; СПЗС – схема поиска захвата и слежения за временными изменениями $F_{\text{Д}}^*$.

Из анализа схемы, приведенной на рис. 1, видно, что она состоит из двух частей. Первая из них содержит блоки ЧД, АД, УНЧ, КЦ, УЭ и МФ и представляет собой контур автоматической подстройки частоты, обеспечивающий при определенных параметрах блоков эффект

самосинфазирования, суть которого состоит в том, что мгновенная частота перестройки МФ изменяется синфазно с мгновенной частотой поступающего на вход внешнего ЧМ сигнала.

Вторая часть схемы СМФС, содержащая блок СПЗС, представляет схему автоматического поиска, захвата и слежения за медленно меняющейся средней частотой F_D^* , подробно описана в [6].

На рис. 2 приведена модель СМФС, синтезированная в среде имитационного моделирования динамических систем на основе использования структурной схемы, приведенной на рис.1. При этом основное назначение имитационной модели (рис. 2) состоит в дальнейшем ее практическом применении для исследований количественных и качественных характеристик СМФС.

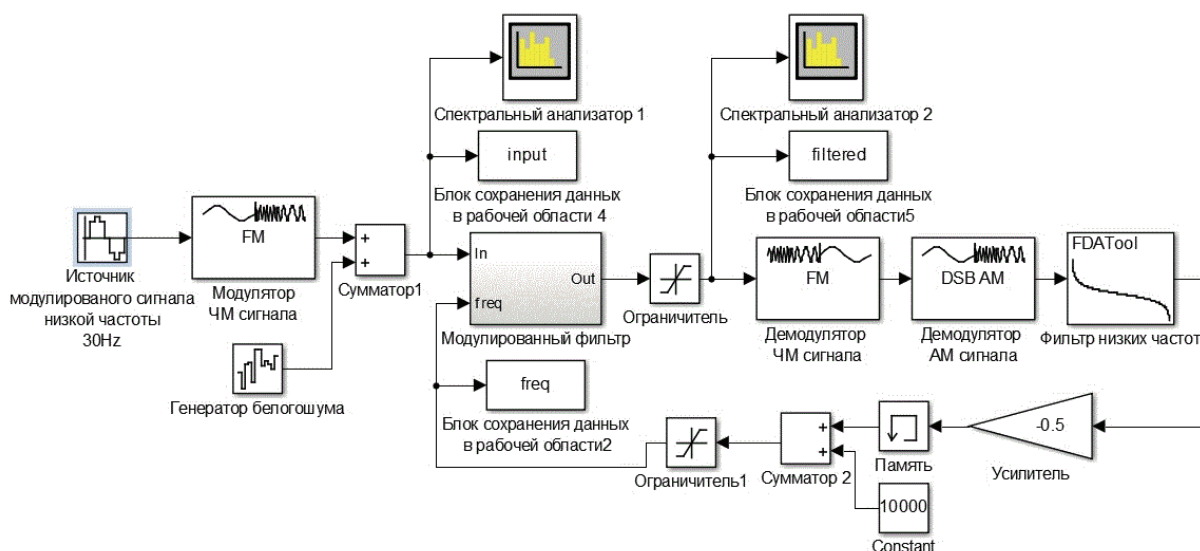


Рис. 2

Процесс формирования входного частотно-модулированного сигнала (2) осуществляется с помощью модулирующей функции $\lambda_{\text{ч}}(t)$, которая в общем случае может быть детерминированной гармонической функцией или случайным низкочастотным процессом.

В свою очередь выходной сигнал от этого источника поступает на вход генератора ЧМ сигнала, нагруженного на резонансный высокочастотный фильтр с фиксированными параметрами настройки: F_D , ΔF_D и амплитудной частотной характеристикой (АЧХ). В сумматоре осуществляется аддитивное суммирование ЧМ сигнала с нормальным белым шумом, формируемым генератором белого шума $n(t)$ с заданной спектральной плотностью N_0 и корреляционной функцией $K(\delta) = \frac{1}{2} N_0 \delta(t)$, где $\delta(t)$ – дельта функция. В данном случае блок формирует случайные числа с нормальным распределением и заданной спектральной плотностью мощности N_0 . Контроль спектра выходного сигнала сумматора осуществляется спектроанализатором 1, а сами данные с выхода первого сумматора записываются в блоке сохранения данных рабочей области, а также поступают на вход модулированного фильтра.

Модулированный фильтр представляет собой колебательный контур с модулированными реактивными параметрами. Предположим, что модулированным реактивным параметром является емкость контура. Исходное дифференциальное уравнение для тока $\lambda(t)$ в индуктивной ветви колебательного контура имеет вид

$$\ddot{\lambda}(t) + 2\alpha\dot{\lambda}(t) + \omega_0^2\lambda(t) = -\omega_0^2 U(t), \quad (4)$$

где $\alpha = \frac{R}{2L_0}$; $\omega_0^2 = \frac{1}{L_0 C_0}$; $L_0 C_0$ – резонансные значения индуктивности и емкости; точкой сверху обозначены производные по времени; R – сопротивление.

Для управляемой емкости $C(t_\Omega)$ можно записать следующее соотношение:

$$C(t_\Omega) = C_0 [1 + m_c C(t_\Omega)], \quad (5)$$

где $m_c = \frac{\Delta C}{C_0}$ – глубина модуляции емкости; $t_\Omega = \Omega t$ – «медленное» время; $\Omega \equiv \lambda_q(t)$ – малый параметр, характеризующий медленность модуляции; ΔC – максимальное отклонение $C(t_\Omega)$ от C_0 .

Сигнал перестройки емкости МФ формируется в петле частотной обратной связи, включенной между выходом МФ и одним из входов второго сумматора. Цепь частотной обратной связи включает в себя ограничитель, демодулятор ЧМ сигнала, демодулятор АМ сигнала, фильтр нижних частот (ФНЧ), усилитель и блок памяти.

Сигнал установки параметров L_0 и C_0 , определяющих резонансную частоту $\omega_0 \cong 2\pi F_D^*$, формируется блоком Constant (Константа) и поступает на вход второго сумматора.

Назначение остальных блоков, входящих в имитационную структуру моделирования, изображенную на рис. 2, не требует особых пояснений. Результаты единичного тестирования имитационной модели МФ приведены на рис. 3 – 5.

Исходные данные: $F_D^* = 10$ кГц, $\Delta F_D = 1$ кГц, $N_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ Вт/Гц, частота модулирующего сигнала (гармоническая функция $\lambda_q(t)$) $F_M = 30$ Гц, девиация частоты входного сигнала $2\beta = 800$ Гц, индекс частотной модуляции $M_{ЧМ} = \frac{\Delta F_D}{F_M} = 35$, частота среза фильтра нижних частот $F_{ФНЧ} = 70$ Гц.

На рис. 3 представлена АЧХ фильтра нижних частот, на рис. 4, 5 – входной и выходной спектры ЧМ сигнала, полученные в результате имитационного моделирования.

Прокомментируем приведенные на рис. 3 – 5 результаты исследования имитационной модели МФ:

1. Выбор полосы АЧХ фильтра низких частот $F_{ФНЧ} = 70$ Гц связан с более точным воспроизведением формы модулирующего сигнала низкой частоты $F_M = 30$ Гц.

2. Анализ и сравнение спектров входного и выходного ЧМ сигнала демонстрирует их практически полное совпадение, что свидетельствует о высокой достоверности «правильной» работы имитационной модели МФ.

3. Сравнение шумовых выбросов спектров на рис. 3 с выбросами на рис. 5 дает основание полагать, что действительно имеет место внутриспектральная обработка аддитивной смеси ЧМ сигнала и нормального шума, т.е. МФ действительно улучшает отношение сигнал/шум.

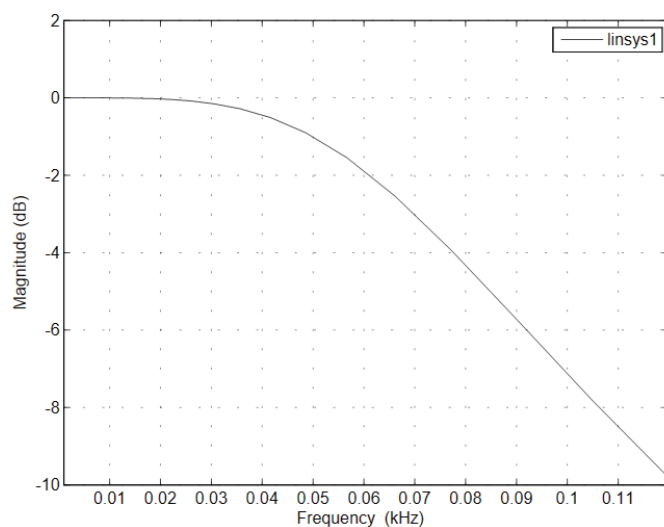


Рис. 3

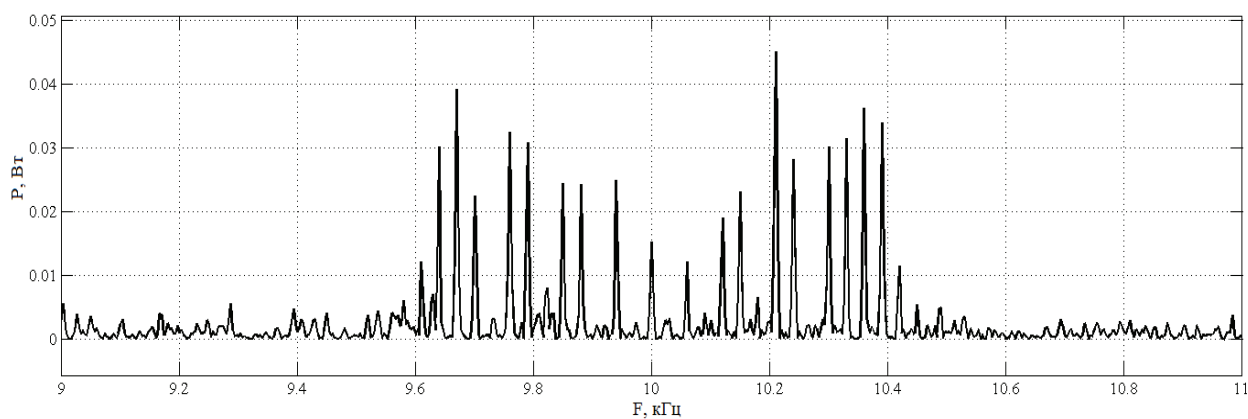


Рис. 4

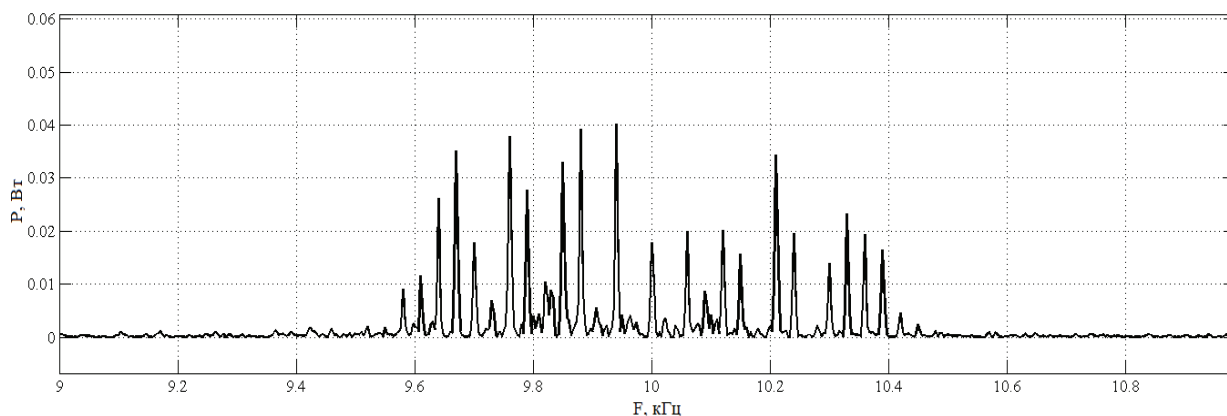


Рис. 5

Заклучение

Разработана практически реализуемая схема следящего модулированного фильтра с самосинфазированием для следящего приема и обработки доплеровского спектра в среде имитационного моделирования. Приведены результаты тестирования имитационной модели МФ, подтверждающие высокую достоверность эффективной работы модулированного фильтра с самосинфазированием при заданных исходных данных.

Сравнительный анализ схемы следящего модулированного фильтра с самосинфазированием с известной схемой следящего измерителя с перестраиваемым гетеродином и узкополосным фильтром показывает, что СМФС помимо простоты его технической реализации обладает улучшенной помехоустойчивостью.

Список литературы: 1. *Печенин, В.В.* Узкополосная фильтрация и измерение частоты сигналов в доплеровских системах навигации летательных аппаратов : учеб. пособие / В. В. Печенин, К. А. Щербина, Ю. В. Съедина и др. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2016. – 56 с. 2. *Зайцев, Г.Ф.* Радиотехнические системы автоматического управления высокой точности / Г.Ф. Зайцев, В.К. Стеклов. – К. : Техника, 1988. – 208 с. 3. *Печенин, В.В.* Потенциальная точность цифровой обработки фазовых измерений, маскируемых аддитивным нормальным шумом / В. В. Печенин, А. Р. Сарамолки // Системи обробки інформації. – Вип. 3 (77). – 2009. – С. 75–78. 4. *Печенин, В.В.* Классы следящих систем на модулированном фильтре / В. В. Печенин, К. А. Щербина, М. А. Вонсович // Акустические и радиолокационные методы измерений и обработки информации : материалы 8-й Междунар. конф., Суздаль, 20–23 сентября 2015 г. – 2015. – С. 161–163. 5. *Автономные радиосистемы* : учеб. пособие для вузов ; под ред. А.С. Виницкого. – М. : Радио и связь, 1986. – 336 с. 6. *Колчинский, В. Е.* Автономные доплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов : / В. Е. Колчинский, И. А. Мандуровский, М. И Константиновский. – М. : Сов. радио, 1975. – 432 с.

Национальный аэрокосмический
университет имени Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Поступила в редколлегию 25.09.2016