

УДК 621.396.622.2

В.В. Печенин, О.В. Войтенко

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского, «ХАИ», Харьков

## СЛЕДЯЩИЙ ДОПЛЕРОВСКИЙ ФИЛЬТР С РАДИОИМПУЛЬСНЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ВХОДНОЙ СМЕСИ ГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА И ШУМА И ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ СИНХРОНИЗИРОВАННОГО ГЕНЕРАТОРА

*Рассмотрен и проанализирован следящий доплеровский фильтр, обеспечивающий функционирование тракта УПЧ в режиме согласованного фильтра при непрерывном входном сигнале. Схема фильтра с принудительной перестройкой синхронизированного генератора обладает высоким быстродействием, помехоустойчивостью и практически отсутствием срыва слежения.*

**Ключевые слова:** фильтр, генератор, сигнал, перестройка резонансная, прием, шум, радиоимпульсное, смесь.

### Введение

Следящие доплеровские фильтры находят широкое применение в современных радиотехнических системах при измерении скоростных параметров воздушных и космических объектов.

При осуществлении следящего приема сигналов с изменяющейся частотой, как правило сочетают принудительную перестройку приемника по априорно известному закону изменения информационного параметра и автоподстройку, обеспечивающую слежение за остаточными априорно неизвестными изменениями частоты принимаемого сигнала.

Второй вид автоподстройки неизбежно связан с необходимостью оценивания частоты сигнала в условиях влияния нормального шума, прошедших достаточно узкополосную резонансную систему с постоянными параметрами – усилитель промежуточной частоты (УПЧ).

Теоретические аспекты следящего приема и практическая реализация следящих доплеровских фильтров рассматривается в [1 – 3] и многих других источниках.

Полученные к настоящему времени результаты теоретических и экспериментальных исследований помехоустойчивости, точности, динамической ошибки и других параметров следящих фильтров с замкнутыми системами автоподстройки типа ФАП, ЧАП и ЧФАП [4 – 6], а также системами с принудительной перестройкой и «захваченными» автогенератором (автогенератором, синхронизированным внешним информационным сигналом) [7 – 9] и комбинированными системами [10, 11] дают основание считать целесообразным применение ряда технических решений, которые в упомянутых выше источниках не рассмотрены.

### Основной материал

**Постановка задачи.** Рассмотрим воздействие смеси гармонического сигнала

$$S_c(t, \omega) = A_m \cos(\omega t + \phi_c)$$

и аддитивного нормального шума  $n(t)$  на узкополосный резонансный фильтр (УПЧ) с известной частотой резонанса  $\omega_0$  и импульсной характеристикой

$$h(t) = 2\alpha e^{-\alpha t} \cos \omega_0 t. \quad (1)$$

При этом входной сигнал, т.е. гармоническое колебание, имеет постоянную амплитуду  $A_m = 1$  на интервале наблюдения  $T$  и постоянную частоту  $\omega_c = \omega_0$ .

Стационарный «белый» шум характеризуется спектральной плотностью  $N_0$  (Вт/Гц) и корреляционной функцией  $K_n(\tau) = N_0 \delta(\tau)$ ,  $\delta(\tau)$  – дельта функция.

В формуле (1):

$$\alpha = \omega_0 \frac{\delta}{2},$$

$$\delta = \omega_0 C\tau \ll 1,$$

$C, \tau$  – параметры контура, ширина полосы пропускания резонансного фильтра (УПЧ)  $\Delta\omega_0 \ll \omega_0$ .

Оценим оптимальную длительность сигнала на входе УПЧ, для которой тракт УПЧ является оптимальным фильтром [12].

Как следует из [12] оптимальным резонансным фильтром УПЧ будет такой фильтр, который реализует на выходе отношение сигнал/шум

$$q = \frac{U(\tau_u)}{\sigma_u(\tau_u)} \rightarrow \sqrt{\frac{2E}{N_0}}, \quad (2)$$

где  $E$  – энергия сигнала на отрезке  $\tau_u$ .

$$E = A_m^2 \frac{\tau_u}{2}. \quad (3)$$

Для узкополосного резонансного фильтра, имеющего импульсную характеристику (1), дисперсия шума при  $t \rightarrow \infty$  стремится к предельному значению [10]

$$\sigma_u^2 = N_0 \cdot \alpha, \quad \alpha = \Delta_{0,7} / 2, \quad (4)$$

где  $\Delta_{0,7}$  – ширина полосы пропускания резонансного тракта УПЧ.

Подставляя (4) в (2) получим в момент окончания импульса  $\tau_u = \frac{1}{\Delta_{0,7}}$ ,  $q = q_{\max}$ .

Таким образом реализовывать максимум отношения сигнал/шум на выходе УПЧ можно, если длительность радиоимпульса и полоса УПЧ1 «согласованы».

Такой тракт УПЧ называют согласованным фильтром. На практике реальное согласование достигается, если согласована не только длительность импульса, но и форма частотной характеристики УПЧ с формой огибающей импульса (радиоимпульса), действующего на входе УПЧ1 [3].

Если длительность сигнала на входе УПЧ  $T \gg \tau_u$ , то необходимо осуществить следующие операции.

1. Преобразовать непрерывный сигнал  $S(t, \omega)$  в последовательность  $n = \frac{T}{\tau_u}$  радиоимпульсов.

2. Использовать схему синхронизированного генератора, работающего в импульсном режиме.

3. Использовать тракт принудительной перестройки импульсного автогенератора, обеспечивающий надежный захват частоты радиоимпульсов.

**Цель работы.** Исследовать основные характеристики следящего фильтра с радиоимпульсным преобразованием непрерывного входного сигнала и «захваченным» автогенератором с принудительной перестройкой.

Функциональная схема следящего доплеровского фильтра (СДФ) с радиоимпульсным преобразованием входного сигнала, реализующая вышеперечисленные технические операции представлена на рис. 1.

Как видно из анализа структурной схемы, представленной на рис. 1 в ее составе можно выделить три части.

1. Радиоимпульсный преобразователь (РП) входной смеси сигнала и шума, содержащий усилитель промежуточной частоты УПЧ1 импульсный генератор ИГ – формирующий импульсную последовательность с заданными длительностью  $\tau_u$  и периодом  $T_0$  ( $T_0 \geq 2\tau_0$ ), модулятор М, на выходе

которого формируется последовательность радиоимпульсов.

2. «Захваченный» (синхронизированный) генератор – СГ.

3. Формирователь управляющего напряжения перестройки СГ, в состав которого входят УПЧ2, частотный дискриминатор – ЧД, фильтр нижних частот – ФНЧ и управляющий элемент – УЭ.

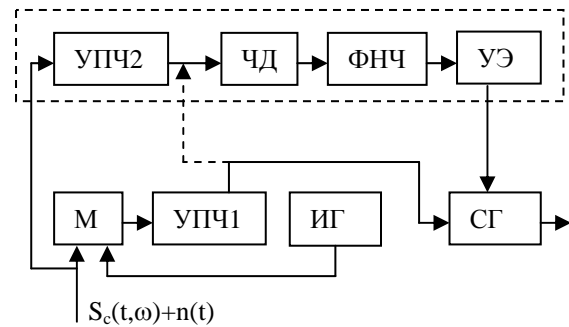


Рис. 1. Функциональная схема ФДЧ с радиоимпульсным преобразованием входного сигнала

Амплитудно-частотные характеристики УПЧ1 и УПЧ2 идентичные. В практически реализуемых схемах ФДЧ УПЧ2 можно исключить, соединив вход ЧД с выходом УПЧ1 (пунктирная линия). Приведем основные характеристики и параметры каждого из трактов.

**Радиоимпульсный преобразователь входного сигнала.** Сигнал на входе УПЧ2 представляет собой смесь информационного сигнала и нормальной помехи.

$$U_{\text{вх}}(t, \omega) = S_c(t, \omega) + n(t), \quad (5)$$

где  $\omega$  – постоянный на интервале  $T$  информационный параметр (гетеродинированная доплеровская частота).

На выходе УПЧ1 образуется смесь гармонического колебания

$$S_c(t, \omega) = A_m \cos(\omega_0 t + \phi_0), \quad \omega_c = \omega_0$$

и квазигармонического шума

$$\xi(t) = A_c(t) \cos \omega_0 t - A_s(t) \sin \omega_0 t$$

с известной функцией корреляции,  $A_c$  и  $A_s$  – косинусная и синусная составляющие огибающей представляют собой независимые нормально распределенные, медленно изменяющиеся стационарные процессы

$$U_{\text{вых.УПЧ1}}(t, \omega) = V(t) \cos[\omega_0 t + \psi(t)], \quad (6)$$

где

$$V(t) = [A_c^2(t) + A_s^2(t)]^{1/2};$$

$$\psi(t) = \arctg \frac{A_s(t) + A_m \sin \phi_0}{A_c(t) + A_m \cos \phi_0}.$$

**Генератор импульсов ГИ** формирует последовательность импульсов  $\tau_u$  (прямоугольной или иной формы) с периодом  $T_0$ .

На выходе модулятора  $M$  имеет место периодическая последовательность радиоимпульсов

$$U_M(t, \omega) = \sum_{n=0}^{\frac{T}{T_0}} V_n(t - n\tau_u) f(t - n\tau_u) \cos[\omega_0 t + \psi_n(t)], \quad (7)$$

где  $f(\cdot)$  – функция, определяющая форму импульса.

Если входной сигнал  $S_c(t, \omega)$  имеет стабильную фазу  $\phi_0$  (когерентное колебание), то сигнал на выходе модулятора представляет собой сигнал со средней фазой  $\langle \phi_0 \rangle$  и достаточно медленными шумовыми флуктуациями.

**Синхронизированный генератор СГ.** Как следует из соотношения (7) на выходе радиоимпульсного преобразователя квазигармонический сигнал представляет собой отрезки синусоиды длительностью  $\tau_0$ , как бы вырезанные из единого непрерывного колебания.

Если начальные фазы всех радиоимпульсов когерентны, то спектр такой последовательности для сильного сигнала  $q \gg 1$  может быть записан в виде

$$W(t, \omega) = \sum_{n=0}^{\infty} U_n \cos(\omega_0 + n\Omega)t, \quad (8)$$

где  $\Omega = 2\pi T_0^{-1}$ ;  $n$  – номер гармоники спектра;

$$U_n = \frac{\tau_u}{T_0} \frac{\sin n\Omega \frac{\tau_u}{2}}{n\Omega \frac{\tau}{2}}. \quad (9)$$

У такого спектра огибающая и гармоники жестко связаны между собой. Центральная частота спектра  $\omega_0$  всегда находится в максимуме огибающей. Изменение частоты  $\omega_0$  перемещает весь спектр – огибающую и гармоники по оси частот.

Выделение спектральных компонент при  $n > 1$  позволяет реализовывать режим умножения входного доплеровского сигнала, что позволяет повысить точность доплеровских измерений при использовании частотомеров.

Выходное колебание импульсного СГ будет чисто периодическим непрерывным колебанием с остаточной модуляцией по амплитуде и фазе с периодом изменения амплитуды и фазы равным  $T_0$ .

Спектр выходного колебания СГ не содержит новых частот при выполнении условий синхронизации.

Поскольку синхронизированный автогенератор находится под воздействием принудительной пере-

стройки, то максимальная расстройка между частотой синхронизации и принудительной частотой  $\omega_{ПГ}$  определится соотношением

$$\Delta\omega = \omega_{ПГ} - \omega_0.$$

Генератор с внешней синхронизацией может считаться надежно «захваченным», если

$$\Delta\omega \leq \Delta\omega_{кр},$$

где  $\omega_{кр}$  – критическая величина расстройки СГ, (полоса захвата) обеспечивающая надежную синхронизацию [13].

Аналитические расчеты, приведенные в [13] достаточно сложны. Поэтому будет правомерным на физическом уровне метод грубой оценки величины допустимой критической расстройки.

Для стандартной схемы автогенератора в режиме свободных колебаний без принятия специальных мер по стабилизации его частоты, относительная неустойчивость находится в пределах

$$\frac{\Delta f}{f_0} \approx 10^{-2} \div 10^{-3}.$$

Тогда в качестве критической величины расстройки можно принять величину:

$$\Delta\omega_k = 2\pi\Delta f;$$

$$\Delta f_k = \Delta f.$$

Например, если частота свободных колебаний генератора  $f_0 = 1$  МГц, то

$$\Delta f_k \approx 10^4 \text{ Гц} \dots 10^3 \text{ Гц}.$$

Реальны 5 кГц...10 кГц.

Таким образом, среднеквадратичная погрешность установки частоты СГ по каналу принудительной перестройки должна быть не уже  $5 \div 10$  кГц.

В [14] дается грубая оценка полосы синхронизации, которая не должна превышать величины

$$\Delta f_k \leq \frac{1}{4T_0} \quad (10)$$

при остаточной фазовой модуляции выходного сигнала СГ  $m_\phi \leq \frac{1}{8}$  рад и остаточной амплитуды модуляции

$$m_a \leq \frac{1}{8N} \frac{T_0}{\tau},$$

где  $N = \frac{\omega_0}{\Omega}$ .

Если опять положить  $f_0 = 1$  МГц и  $\Delta f_k \approx 10^4 \text{ Гц} \dots 10^3 \text{ Гц}$ , то надежно будет синхронизироваться импульсная последовательность с периодом

$$T_0 = \frac{1}{4\Delta f_k} = 0,25 \text{ мС} \div 0,025 \text{ мС}.$$

При этом полная синхронизация будет иметь место в течение  $\tau_u$  и полное выпадение из синхронизма за время  $T_0 - \tau_u$ .

**Тракт принудительной перестройки СГ.**

Данный тракт относится к одноканальному устройству нелинейной обработки, к которому применимы методы исследования статистических характеристик широко распространенных в радиотехнической практике частотных дискриминаторов (частотных детекторов). Обычно анализируются выходные характеристики частотных и фазовых дискриминаторов при действии на их входе случайных сигналов и помех.

Сигналы и помехи считаются узкополосными случайными процессами.

Рассмотрим типовое радиотехническое звено УПЧ2-ЧД-ФНЧ. Входное колебание представляет собой аддитивную смесь гармонического сигнала и нормального «белого шума» (5). При прохождении тракта УПЧ2 на выходе имеет место случайный узкополосный процесс (6).

На выходе ЧД-ФНЧ действует процесс со средним значением

$$MV(t) = MU_{\text{ЧД}}(t) \int_0^t g(\tau) d\tau, \quad (11)$$

где  $MU_{\text{ЧД}}(t)$  – среднее значение напряжения на выходе ЧД;

$g(\tau)$  – импульсная переходная характеристика ФНЧ.

Дисперсия процесса  $V(t)$  определяется по формуле

$$\sigma_V^2(t) = \int_0^t \int_0^t g(\tau_1) g(\tau_2) \tilde{k}_{\text{ЧД}}(\tau_1 - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2, \quad (12)$$

где  $\tilde{k}_1$  – корреляционная функция флуктуаций процесса  $U_{\text{ЧД}}(t)$  на выход ЧД.

Для дальнейших расчетов удобно преобразовать выражение (12) к виду

$$\sigma_V^2(t) = \int_0^t \tilde{k}_{\text{ЧД}}(x) \cdot F(x, t) dx, \quad (13)$$

где  $F(x, t)$  – функция двух переменных, определяемая лишь характеристиками ФНЧ и не зависящая от входного воздействия

$$F(x, t) = 2 \int_x^t g(\tau) \cdot g(\tau - x) d\tau, \quad (14)$$

где  $\tau = \tau_1$  и  $x = (\tau_1 - \tau_2)$ .

Значение спектральной плотности флуктуаций напряжения  $U_{\text{ЧД}}(t)$  на частотах близких к нулевой для всех типов ЧД можно рассчитать по формуле

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{\text{ЧД}}(0) &= \\ &= \varepsilon^2 \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{S}_V(\omega) \cdot \psi^2(\omega) d\omega. \end{aligned} \quad (15)$$

Энергетический спектр флуктуаций  $\tilde{S}_{\text{ЧД}}(\omega)$  определяется общей формулой

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{\text{ЧД}}(\omega) &= \\ &= \varepsilon_1^2 \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{S}_V(\xi) \cdot \tilde{S}_V(\xi - \omega) \cdot \chi(\xi, \omega) d\xi. \end{aligned} \quad (16)$$

В формулах (15), (16):

$\tilde{S}_V(\omega)$  – смещенный энергетический спектр входного колебания;

$\psi(\omega)$  – нормированная статистическая характеристика ЧД;

$\varepsilon = K_{\text{ЧД}}$  (для ЧД с расстроенными контурами),

$\varepsilon = \alpha$  (для детектора с контуром и фазовращателем) и т.д.;

$\varepsilon_1 = K_{\text{ЧД}}$  (для ЧД с расстроенными контурами),  $\varepsilon_1 = \alpha / 2$  (для детектора с контуром и фазовращателем) и т.д.;

$\chi(\xi, \omega)$  можно рассчитать по формулам, приведенным в [12] для конкретной схемы ЧД через комплексные коэффициенты передачи.

Там же приведены конкретные примеры расчета статистических характеристик для различных типов частотных дискриминаторов с использованием формул (11 ÷ 16).

**Выводы**

В результате выполненных в работе исследований получены следующие результаты:

- предложен вариант реализации ФДЧ, позволяющий обеспечить функционирование схемы УПЧ1 в режиме согласованного фильтра по отношению к входному непрерывному сигналу;

- предложено использование в разработанном ФДЧ схемы СГ с принудительной перестройкой, что обеспечивает быстроедействие и практическое отсутствие срыва слежения;

- приведены результаты аналитического описания тракта принудительной перестройки СГ.

Разработанная схема ФДЧ может быть использована в радиотехнических измерительных системах аналогичного назначения.

## Список литературы

1. Винницкий А.С. Автономные радиосистемы: учеб. пособие для вузов / А.С. Винницкий. – М.: Радио и связь, 1986. – 336 с.
2. Флеров А.Г. Доплеровские устройства и системы навигации / А.Г. Флеров, В.Т. Тимофеев. – М.: Транспорт, 1987. – 187 с.
3. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах / В.И. Меркулов, А.И. Канащенков, А.И. Перов и др.; под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. Ч. 1 – М.: Радиотехника, 2004. – 312 с.
4. Системы фазовой автоподстройки частоты с элементами дискретизации / В.В. Шахгильдяна, А.А. Ляховкин, В.Л. Карякин и др.; под ред. В.В. Шахгильдяна. – М.: Радио и связь, 1979. – 224 с.
5. Первачев С.В. Радиоавтоматика / С.В. Первачев. – М.: Радио и связь, 1982. – 286 с.
6. Тихонов А.П. Радиолокационное оборудование самолетов: учеб. пособие для сред. спец. заведений / А.П. Тихонов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1991. – 263 с.
7. Печенин В.В. Сарамолки А.Р. Следящий фильтр доплеровского сигнала на основе синхронизированного автогенератора, управляемого по двум входам / В.В. Печенин, А.Р. Сарамолки // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2009. – № 2 (36). – С. 55-59.
8. Печенин В.В. Система частотно-фазовой автоподстройки частоты на основе синхронизированного автогенератора с двухходовым управлением / В.В. Печенин, А.Р. Сарамолки // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2009. – № 4 (38). – С. 25-32.
9. Печенин В.В. Согласованная фильтрация сигнала в приемном канале фазометрической РГС / В.В. Печенин, А.Р. Сарамолки // *Проблеми інформатизації та управління: зб. наук. пр.* – К., 2010. – Вип. 1 (29). – С. 136-140.
10. Зайцев Г.Ф. Радиотехнические системы автоматического управления высокой точности / Г.Ф. Зайцев, В.К. Стеклов. – К.: Техніка, 1988. – 208 с.
11. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования / Г.Ф. Зайцев. – К.: Вища школа, 1988. – 432 с.
12. Евсиков Ю.А. Преобразование случайных процессов в радиотехнических системах: учеб. пособие для радиотехнических специальностей вузов / Ю.А. Евсиков, В.В. Чапурский. – М.: Высшая школа, 1977. – 264 с.
13. Малахов А.Н. Флуктуации в автоколебательных системах / А.Н. Малахов. – М.: Наука, Главн. ред. физ.-мат. лит., 1967. – 660 с.
14. Григулевич В.И. Радиоимпульсное преобразование частоты / В.И. Григулевич, И.Я. Имореєв. – М.: Сов. радио, 1966. – 335 с.

Поступила в редколлегию 21.08.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.В. Барышев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

**СТЕЖАЧИЙ ДОПЛЕРІВСЬКИЙ ФІЛЬТР  
З РАДІОІМПУЛЬСНИМ ПЕРЕТВОРЕННЯМ  
ВХІДНОЇ СУМІШІ ГАРМОНІЙНОГО СИГНАЛУ І ШУМУ  
І ПРИМУСОВОЮ ПЕРЕБУДОВОЮ СИНХРОНІЗОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА**

В.В. Печенин, О.В. Войтенко

*Розглянутий і проаналізований стежачий доплерівський фільтр, що забезпечує функціонування тракту ППЧ в режимі узгодженого фільтру при безперервному входному сигналі. Схема фільтру з примусовою перебудовою синхронізованого генератора володіє високою швидкістю, перешкодостійкістю і практично відсутністю зриву стеження.*

*Ключові слова:* фільтр, генератор, сигнал, перебудова резонансна, прийом, шум, радіоімпульсне, суміш.

**WATCHING DOPPLER FILTER WITH RADIOIMPULSIVE  
TRANSFORMATION OF ENTRANCE MIXTURE OF HARMONIC SIGNAL AND NOISE  
AND FORCED ALTERATION OF THE SYNCHRONIZED GENERATOR**

V.V. Pechenin, O.V. Voytenko

*Considered and analysed watching Doppler filter, providing functioning of highway of strengthener of intermediate frequency in the mode of the concerted filter at a continuous entrance signal. The chart of filter with the forced alteration of the synchronized generator possesses a high fast-acting, antijammingness and practically absence of blowing off track.*

*Keywords:* filter, generator, signal, alteration is resonance, reception, noise, radioimpulsive, mixture.