

УДК 621.396.98

В.И. БАРЫШЕВ, А.В. МАЗУРЕНКО, В.В. ПЕЧЕНИН*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

РЕАЛИЗАЦИЯ БЕСКОНТУРНОГО ЧАСТОТНОГО ДИСКРИМИНАТОРА НА ЦИФРОВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

В статье предложена схема бесконтурного частотного дискриминатора, который отличается от существующих более высокой помехоустойчивостью на краях полосы пропускания. Рассмотрен практический вариант реализации аналогового частотного дискриминатора на цифровой элементной базе, что существенно повышает временную стабильность его параметров и особенно стабильность элементов задержки. Даны рекомендации по реализации цифрового частотного дискриминатора с помощью современных вычислительных устройств. Приведены результаты имитационного моделирования работы амплитудного частотного дискриминатора, выполненного на ЭВМ.

Ключевые слова: доплеровские измерительные системы, бесконтурный частотный дискриминатор, цифровой амплитудный частотный дискриминатор, модель амплитудного частотного дискриминатора.

Введение

Частотные дискриминаторы являются неотъемлемой частью радиотехнических систем, предназначенных для измерения скоростных параметров движения воздушных, космических, наземных и морских объектов, выполняющих различные целевые задачи.

Основные направления, связанные с улучшением точности частотных измерений, общеизвестны, и сводятся в основном к повышению помехоустойчивости дискриминатора при наличии расстройке доплеровского сигнала и стабильности измерений, которая зависит от изменения характеристик элементной базы, вызываемых изменениями внешних условий, таких например, как температура, влажность, давление, высотность и т.д.

Решение задачи повышения помехоустойчивости связано с разработкой таких частотных дискриминаторов, которые по своим характеристикам должны быть близки к оптимальным.

Повышение временной стабильности частотных измерений может быть достигнуто за счет использования элементной базы, нечувствительной к изменениям внешних факторов, оговоренных выше.

Цель настоящей работы состояла в разработке практического варианта цифрового частотного дискриминатора, который должен обеспечивать характеристики помехоустойчивости не хуже аналога, сохраняя высокую стабильность основных технических характеристик, при изменении внешних условий эксплуатации.

Разработка цифрового варианта амплитудного частотного дискриминатора

Существуют и используются в практике частотных измерений различные варианты их практической реализации с применением цифровой элементной базы [1, 2]. В большинстве этих цифровых дискриминаторов применены простые и удобные для технической реализации представления измерительного сигнала в виде sign-преобразования, т.е. двухстороннего ограничения входной смеси полезного сигнала и шума. Несмотря на очевидный факт отсутствия существенных информационных потерь, особенно при больших величинах энергетического отношения сигнал\помеха, возможности повышения помехоустойчивости дискриминаторов за счет обработки оказываются ограниченными, поскольку информация о параметрах аддитивной помехи резко уменьшается.

В данной работе используется другой принцип построения цифрового частотного дискриминатора [3]. Последовательность операций, которые выполняются частотным дискриминатором в аналоговом варианте реализуется с использованием структурной схемы, представленной на рис. 1. В таком частотном дискриминаторе используется амплитудный принцип определения частоты входного сигнала, поэтому он был условно назван амплитудным частотным дискриминатором (АЧД).

На вход дискриминатора поступает узкополосный сигнал

$$U(t) = U_0 \cos[2\pi(f_0 \pm F)t + \varphi_0], \quad (1)$$

где U_0 , φ_0 – амплитуда и начальная фаза сигнала; F – расстройка частоты сигнала относительно промежуточной частоты приемника f_0 ; АД₁, АД₂ – амплитудные детекторы; У – усилитель с коэффициентом усиления γ .

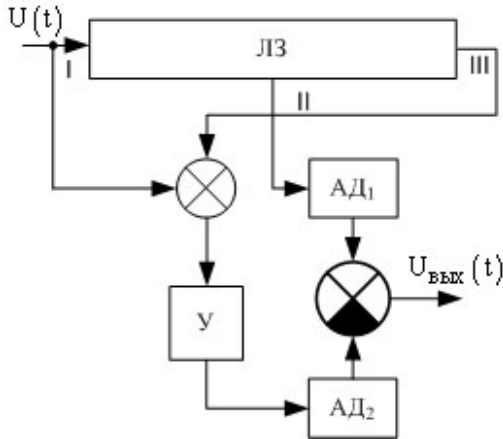


Рис. 1. Структурная схема амплитудного частотного дискриминатора

Для удобства анализа промежуточную частоту можно представить в виде:

$$f_0 = f_\phi + \Delta f_\phi,$$

где f_ϕ – фиксированная частота, определяющая выбор времени задержки $\tau_3 = \frac{1}{2f_\phi}$, между отводами I и II линии задержки линии задержки (ЛЗ); Δf_ϕ – некоторая фиксированная разность частот f_0 и f_ϕ .

Коэффициент γ определяется согласно выражению

$$\gamma = \frac{1}{2\pi\Delta f_\phi \tau_3}. \quad (2)$$

После преобразования сигнала (1) в соответствии с схемой (рис. 1) выходное напряжение будет равно:

$$U_{\text{ВЫХ}} \approx \pm U_0 K_d \frac{F}{\Delta f_\phi}, \quad (3)$$

где K_d – коэффициент передачи амплитудных детекторов (для простоты полагалось, что коэффициенты передачи АД₁ и АД₂ одинаковы).

Зависимость выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ частотного дискриминатора от частоты входного сигнала имеет вид, указанный на графике (рис. 2), который представляет собой дискриминационную характеристику разработанного устройства.

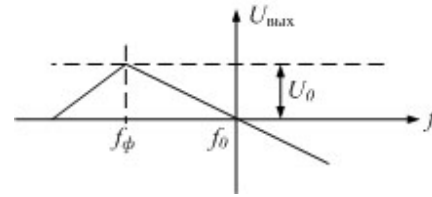


Рис. 2. Дискриминационная характеристика АЧД

Как видно из графика, на частотах ниже f_ϕ , определяемой выбранным временем задержки ЛЗ, наблюдается излом дискриминационной характеристики, что ведет к неоднозначности определения частоты сигнала. Поэтому в качестве рабочего участка дискриминатора выбирается диапазон расстроек $|F| \leq \Delta f_\phi$, в котором дискриминационная характеристика линейная.

Представленный на рис. 1 амплитудный частотный дискриминатор можно реализовать в цифровом варианте (рис. 3).

На рис.3: Z^{-1} – элемент задержки отсчета сигнала на Δt_d (Δt_d – период дискретизации сигнала);

$N = 2n$ – количество элементов задержки цифрового эквивалента ЛЗ.

Количество элементов задержки цифрового эквивалента ЛЗ зависит от соотношения требуемого времени задержки τ_3 и интервала дискретизации сигнала. Исходя из того, что время задержки между отводами I и II, а также II и III ЛЗ (рис. 1) равно $\tau_{3I-II} = \tau_{3II-III} = \frac{\tau_3}{2}$, очевидно, что N должно быть величиной четной:

$$\begin{aligned} N = 2n &= V\left(\frac{\tau_3}{\Delta t_d}\right) = V\left(\frac{1}{2f_\phi \Delta t_d}\right) = \\ &= V\left(\frac{f_d}{2f_\phi}\right) = V\left(\frac{f_d}{2[f_0 - \Delta f_\phi]}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

где $V(\bullet)$ – оператор определения ближайшего четного.

Порядок M , а также вид полинома для аппроксимации амплитудно-частотных характеристик выходных фильтров низких частот (ФНЧ) амплитудных детекторов рассчитываются исходя из необходимости обеспечения условий:

$$\left. \begin{aligned} f_{\text{пр}} &\geq F, \\ f_{\text{зд}} &\leq f_0 - \Delta f_\phi, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $f_{\text{пр}}$ – частота пропускания цифрового ФНЧ; $f_{\text{зд}}$ – частота задерживания цифрового фильтра низких частот.

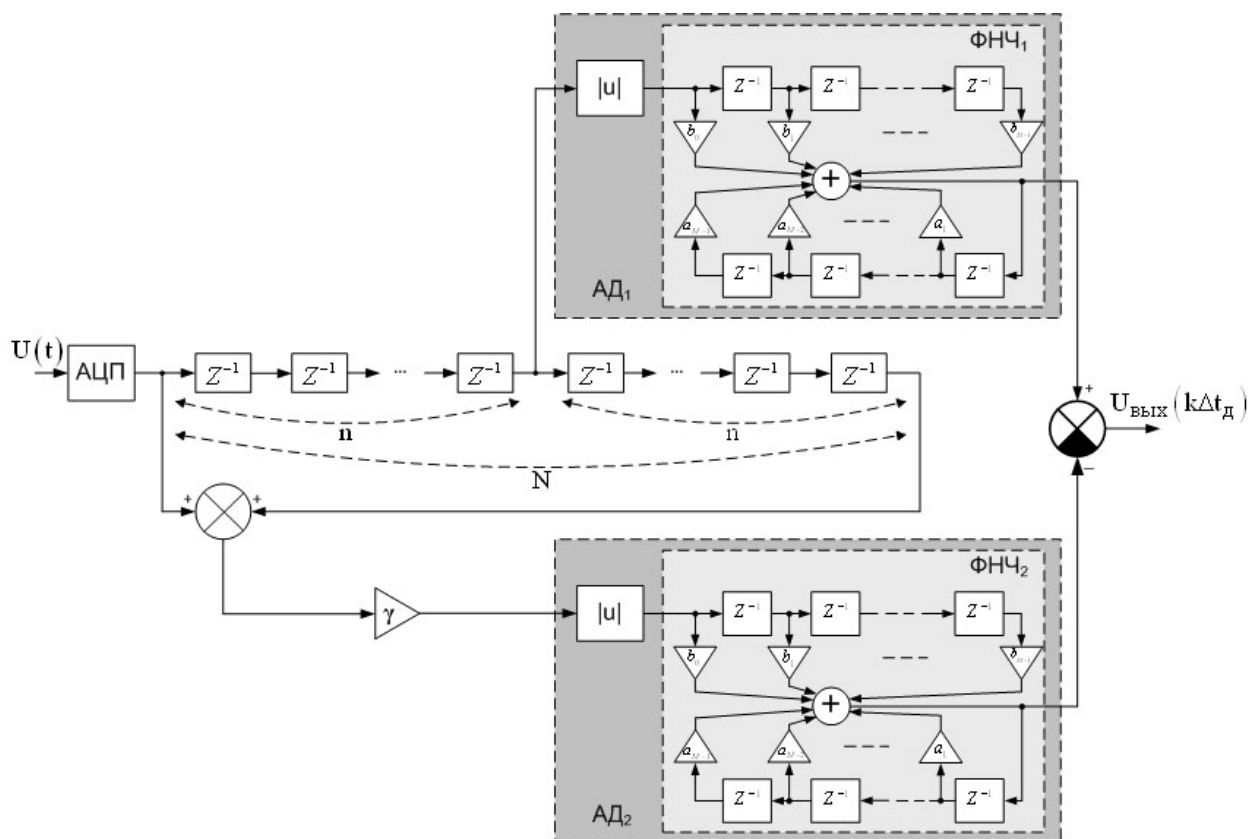


Рис. 3. Структурная схема цифрового АЧД

Схема цифрового АЧД (рис. 3) может быть реализована с использованием так называемых встроенных систем [4]. В зависимости от используемых компонентов, различают несколько типов встроенных систем:

- системы с использованием цифровых сигнальных процессоров (DSP – Digital Signal Processors) [5];
- системы, основанные на цифровой логике, реализуемой с помощью программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) [6];
- системы на основе микроконтроллеров [4].

Обобщенная структурная схема реализации частотного дискриминатора на DSP или ПЛИС представлена на рис. 4.

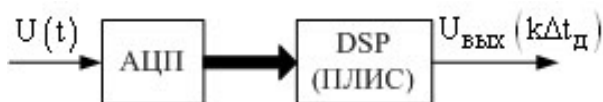


Рис. 4. Структурная схема реализации цифрового АЧД на основе цифрового сигнального процессора или ПЛИС

На рис. 4: АЦП – аналого-цифровой преобразователь; $U_{\text{ВЫХ}}(k\Delta t_d)$ – отсчеты выходного сигнала;

k – номер текущего отсчета $k \in N$, где N – число отсчетов сигнала на интервале наблюдения.

Использование микроконтроллеров для реализации разработанного цифрового АЧД ограничивается их низкой производительностью.

Результаты моделирования цифрового АЧД

Детерминированный случай. В качестве модели сигнала на входе цифрового АЧД выберем выражение для сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) вида:

$$S(t) = S_0 \sin \left[2\pi \left(f_0 - \frac{F_d}{2} + \frac{F_d t}{t_M} \right) t \right], \quad (6)$$

где S_0 – амплитуда сигнала; F_d – частота девиации; f_0 – промежуточная частота приемника; t_M – время моделирования.

Модель цифрового АЧД, синтезированная в инструментальном приложении Simulink среды моделирования Matlab, представлена на рис. 5.

При моделировании использовались следующие параметры сигнала: $S_0 = 1\text{В}$; $f_0 = 465\text{кГц}$; $\Delta f_\phi = 10\text{кГц}$; $F_d = 20\text{кГц}$; $t_M = 10\text{мс}$.

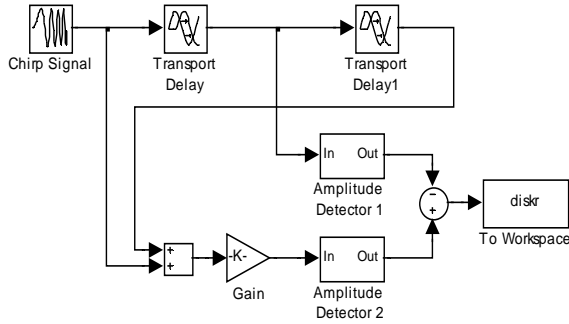


Рис. 5. Модель цифрового АЧД

В результате воздействия на схему (рис. 3) сигнала (6) в момент окончания моделирования на ее выходе получим отсчеты сигнала, представляющего собой цифровой аналог дискриминационной характеристики. Нормированная дискриминационная характеристика цифрового АЧД приведена на рис. 6.

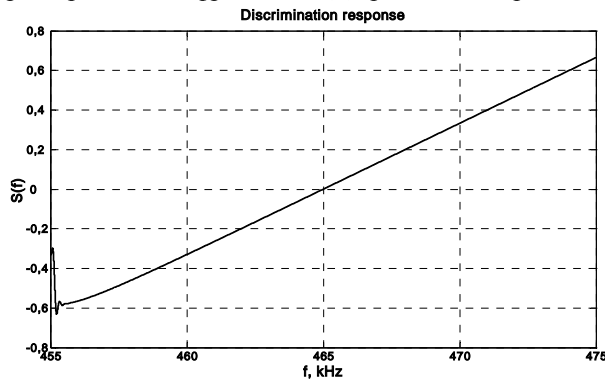


Рис. 6. Дискриминационная характеристика цифрового АЧД

Нелинейный характер начального участка дискриминационной характеристики связан с переходными процессами в цифровых фильтрах амплитудных детекторов и цифрового эквивалента ЛЗ (в начальный момент времени напряжение на отводах II и III линии задержки равны нулю).

При выходе за пределы рабочего участка АЧД наблюдается излом дискриминационной характеристики в области нижних и верхних частот (рис. 7).

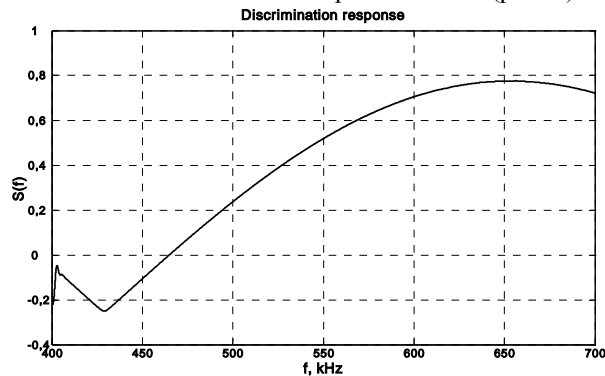


Рис. 7. Дискриминационная характеристика цифрового АЧД при $|F| > \Delta f_{\Phi}$

Стохастический анализ. На входе узкополосной части приемного тракта (далее – формирующий фильтр) действует стационарный случайный процесс, представляющий собой аддитивную смесь сигнала (6) и нормального белого шума (НБШ):

$$U(t) = S(t) + n(t). \quad (7)$$

Амплитудно-частотная характеристика формирующего фильтра (ФФ) имеет вид гауссовой кривой:

$$K(f)_{\Phi\Phi} = K_0 e^{-2\pi \left(\frac{f-f_0}{\Delta f} \right)^2}, \quad (5)$$

где K_0 – коэффициент передачи формирующего фильтра; f_0 – резонансная частота формирующего фильтра; Δf – полоса пропускания формирующего фильтра.

При воздействии на систему ФФ-АЧД сигнала (7) на выходе имеет место случайный процесс, соответствующий стохастическому эквиваленту дискриминационной характеристики (рис. 8). Примечательно, что воздействие шумов приводит к смещению дискриминационной характеристики и уменьшению ее крутизны.

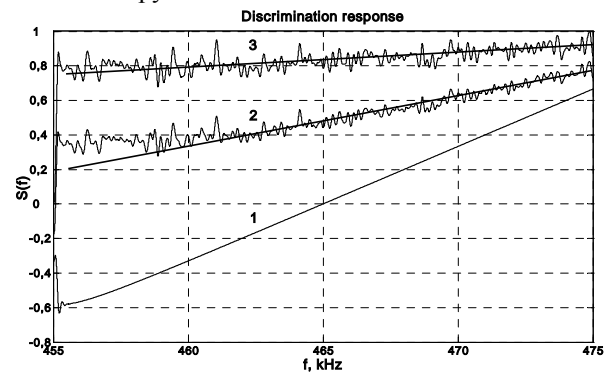


Рис. 8. Эквиваленты дискриминационных характеристик цифрового АЧД при СКО шума: 1 - $\sigma_0 = 0$; 2 - $\sigma_0 = 0,02$; 3 - $\sigma_0 = 0,05$

Заключение

В работе осуществлен синтез и анализ цифрового амплитудного частотного дискриминатора, который по своим характеристикам помехоустойчивости не хуже аналогового варианта.

Замена аналоговой структуры ее цифровым эквивалентом позволяет обеспечить более высокие показатели стабильности основных технических характеристик при изменении внешних условий эксплуатации.

Полученные результаты могут быть использованы при модернизации существующих и вновь разрабатываемых радиотехнических систем и комплексов, предназначенных для измерения параметров движения объектов различного назначения.

Литература

1. Цифровые радионавигационные устройства / В.В. Баращенко, А.Е. Лутченко, Е.М. Скороходов и др.; под ред. В.Б. Смолова. – М.: Радио и связь, 1980. – 288 с.
2. Лихарев В.А. Цифровые методы и устройства в радиолокации / В.А. Лихарев. – М.: Сов. радио, 1973. – 190 с.
3. Барышев В.И. Анализ частотных дискриминаторов, выполненных на электромагнитной линии задержки / В.И. Барышев, В.В. Печенин // Интегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні (ІКТМ-2005): тези доповідей міжнародної

науково-технічної конференції. 16 – 18 листопада 2005 р. – Харків, 2005. – С. 287.

4. Барышев И.В. Прикладные вопросы цифровой обработки информации. Часть 1. Применение микроконтроллеров в РТС сбора, обработки и передачи информации / И.В. Барышев, А.В. Мазуренко, О.А. Горбуненко. – Х.: ХАИ, 2006. – 112 с.

5. Солонина А.И. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов / А.И. Солонина, Д.А. Улахович, Л.А. Яковлев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2001. – 464 с.

6. Стешенко В.Б. ПЛИС фирмы Altera: проектирование устройств обработки сигналов / В.Б. Стешенко - М.: ДОДЭКА, 2000. – 128 с.

Поступила в редакцию 10.04.2008

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

РЕАЛІЗАЦІЯ БЕЗКОНТУРНОГО ЧАСТОТНОГО ДИСКРИМІНАТОРА НА ЦИФРОВИХ ЕЛЕМЕНТАХ

В.І. Барышев, О.В. Мазуренко, В.В. Печенин

В статті запропонована схема безконтурного частотного дискримінатора, що відрізняється від існуючих більш високою завадостійкістю на краях смуги пропускання. Розглянуто практичний варіант реалізації аналогового частотного дискримінатора на цифровій елементній базі, що істотно підвищує часову стабільність його параметрів і особливо стабільність елементів затримки. Дано рекомендації щодо реалізації цифрового частотного дискримінатора за допомогою сучасних обчислювальних пристроїв. Наведено результати імітаційного моделювання роботи амплітудного частотного дискримінатора, виконаного на ЕОМ.

Ключові слова: доплерівські вимірвальні системи, безконтурний частотний дискримінатор, цифровий амплітудний частотний дискримінатор, модель амплітудного частотного дискримінатора.

IMPLEMENTATION OF A RIPPLE-FREE FREQUENCY DISCRIMINATOR ON DIGITAL UNITS

V.I. Baryshev, O.V. Mazurenko, V.V. Pechenin

In the article the scheme of a ripple-free frequency discriminator is proposed. The discriminator has higher noise immunity in comparison with existing discriminators. The practical version of implementation of an analogue frequency discriminator on digital element base is surveyed, that essentially increases temporary stability of its parameters and especially stability of delay components. Recommendations concerning digital frequency discriminator realisation based on modern computing devices are given. Simulation results, performed using PC, are adduced.

Key words: Doppler measurements system, ripple-free frequency discriminator, digital amplitude frequency discriminator, model of amplitude frequency discriminator.

Барышев Владимир Игорьевич – аспирант кафедры проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Мазуренко Александр Владимирович - канд. техн. наук, доцент кафедры проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: almaz@xai.edu.ua.

Печенин Валерий Васильевич - д-р техн. наук, проф., проф. кафедры проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.