
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.376

В. Л. Козлов

СПЕКТРОАНАЛИЗАТОР ДОПЛЕРОВСКИХ СИГНАЛОВ

Рассматриваются вопросы построения системы спектрального анализа доплеровских локационных сигналов оптического диапазона, обеспечивающей минимальное время анализа и высокую чувствительность. При обработке сигналов с малым отношением сигнал/шум для повышения помехоустойчивости спектроанализатора применяется блок ограничения ложных срабатываний, позволяющий существенно снизить вероятность ложной тревоги при сохранении вероятности правильного обнаружения.

Ключевые слова: спектроанализатор, девиация частоты, делитель частоты, автоподстройка.

В настоящее время область применения лазерных доплеровских измерителей существенно расширилась. Специфика таких измерителей обусловлена использованием в них лазерных источников излучения, обладающих высокой спектральной яркостью, монохроматичностью, пространственной и временной когерентностью. Благодаря этому в лазерных системах можно формировать узкие диаграммы направленности и осуществлять спектральную и пространственную селекцию. Существенные доплеровские сдвиги частоты отраженного оптического излучения позволяют эффективно разделять объекты по скорости их движения, что весьма ценно при обнаружении сигналов на фоне интенсивных помех и измерении параметров движения медленно перемещающихся объектов.

При построении системы спектрального анализа доплеровских локационных сигналов оптического диапазона с неизвестной несущей частотой и случайным временем появления сигнала целесообразно применение методов согласованной фильтрации, позволяющих минимизировать время проведения анализа и обеспечивающих при этом максимально достижимую чувствительность.

При решении ряда прикладных задач время обнаружения доплеровского сигнала и измерения его параметров должно составлять примерно 200—300 мкс. Для этой цели возможно использование параллельного метода согласованной фильтрации, основанного на преобразовании входного сигнала с помощью смесителя и управляемого генератора в линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ) сигнал с последующей обработкой его набором согласованных фильтров [1]. Однако обеспечение высокого разрешения по частоте при технической реализации этого метода затруднено вследствие необходимости применения большого числа параллельных каналов. Более эффективным является не параллельный, а последовательный метод [2], при использовании которого девиация частоты генератора превышает полосу частот согласованного фильтра и соответственно увеличивается время анализа доплеровского сигнала, но при этом обработка выходного сигнала смесителя осуществляется одним согласо-

ваным фильтром, что упрощает схемотехническое решение спектроанализатора при сохранении пороговой чувствительности и разрешения по частоте. Техническая реализация этого метода спектрального анализа описана в работе [3]. При использовании такого спектроанализатора для увеличения вероятности правильного обнаружения доплеровского сигнала необходимо снизить порог принятия решения о наличии сигнала на выходе согласованного фильтра. Однако это, в свою очередь, приводит к возрастанию частоты появления ложных тревог. Поэтому в спектроанализаторе необходимо использовать блок ограничения ложных срабатываний, что позволит снизить вероятность ложной тревоги. Кроме того, для обеспечения предельной чувствительности требуется стабилизация параметров генератора ЛЧМ-сигнала.

На рис. 1 представлена функциональная схема системы, реализующей последовательный метод спектрального анализа с использованием блока ограничения ложных срабатываний и генератора ЛЧМ-сигнала с автоподстройкой по методу цифрового преобразования. На рис. 1 приняты следующие обозначения: ИНД — индикатор; Д — детектор; У — усилитель; СФ — согласованный фильтр; УМ — усилитель мощности; С — смеситель; АРУ — блок автоматической регулировки усиления; К — компаратор; КМ — коммутатор; УХК — устройство хранения кодов; ГЛЧМС — генератор ЛЧМ-сигнала; БОЛС — блок ограничения ложных срабатываний; А — анализатор; ОЗУ — оперативное запоминающее устройство; Сч — счетчик; УОЗУ — управление ОЗУ.

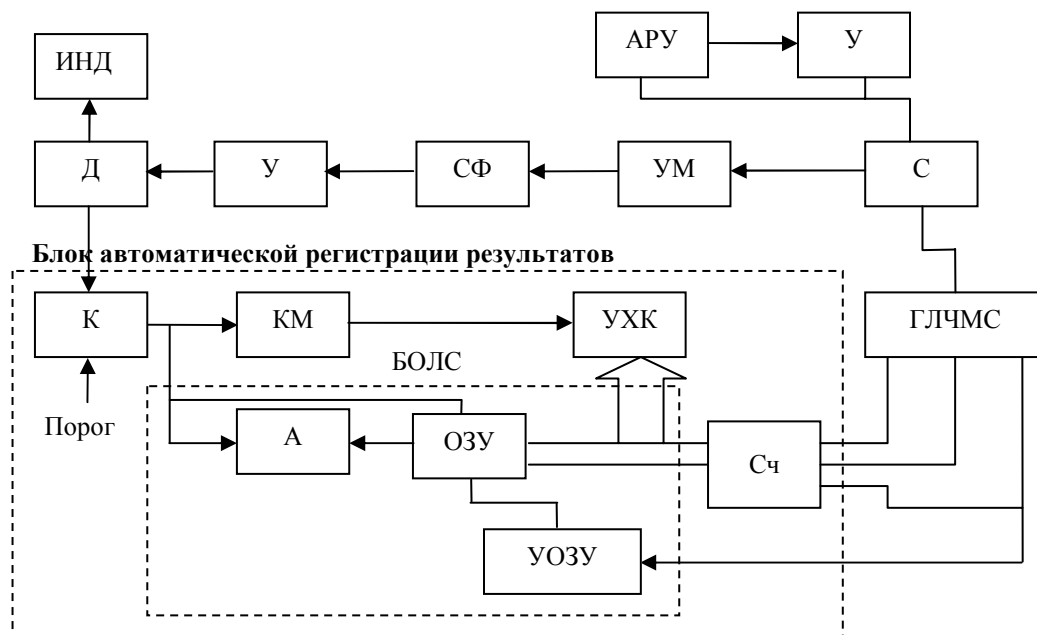


Рис. 1

Последовательный метод спектрального анализа основан на определении временного положения отклика сигнала на выходе согласованного фильтра, которое зависит от частоты входного сигнала. Покажем, как связано время появления сигнала на выходе согласованного фильтра с входной частотой. Пусть входной сигнал имеет комплексную амплитуду $U_0(t)e^{-j2\pi ft}$ на интервале $-T/2 < t < T/2$, где f — измеряемая частота. В смесителе происходит перемножение входной частоты и ЛЧМ-сигнала $U_{\text{ЛЧМ}} = U_0 e^{j\beta t^2}$, колебания которого линейно модулированы по частоте. Спектральная плотность результирующего сигнала определяется выражением

$$g(f) = \int_{-T/2}^{T/2} U(t)e^{j(\beta t^2 - 2\pi f t)} dt. \quad (1)$$

Введем масштабный временной коэффициент θ , связывающий частоту f входного сигнала и скорость перестройки частоты β гетеродина:

$$\theta = \pi f / \beta. \quad (2)$$

Используя (2), преобразуем выражение (1) к виду

$$g(\theta) = e^{-j\beta\theta^2} \int_{-T/2}^{T/2} U(t)e^{j\beta(t-\theta)^2} dt. \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что зависимость спектральной плотности сигнала на выходе смесителя от входной частоты сводится к зависимости комплексной амплитуды колебаний от временного параметра θ . Известно [2], что амплитуда сигнала на выходе оптимального фильтра, согласованного с ЛЧМ-сигналом, равна

$$w(t) = 0,5e^{-j2\pi f_0 t_0} \int_{-T/2}^{T/2} g(s)g^*(s - \Delta t) ds,$$

где f_0 — средняя частота согласованного фильтра; t_0 — временное положение максимального значения отклика на выходе согласованного фильтра относительно начала ЛЧМ-импульса; $\Delta t = t - t_0$; g^* — частотная характеристика согласованного фильтра, комплексно-сопряженная со спектральной плотностью ЛЧМ-сигнала.

Используя уравнение (3), получаем

$$w(t) = \left[0,5U^2\tau_{\text{и}}e^{-j(2\pi f_0 t_0 + \beta\theta)^2} \right] \frac{\sin[\pi\Delta f(\Delta t - \theta)]}{\pi\Delta f(\Delta t - \theta)}, \quad (4)$$

где $\tau_{\text{и}}$, Δf — длительность импульса и девиация частоты согласованного фильтра; первый и второй множители в этой формуле характеризуют соответственно амплитудно-частотный и фазочастотный спектры на выходе согласованного фильтра; формула (4) справедлива при $\tau_{\text{и}}\Delta f \gg 1$.

Из уравнения (4) следует, что в зависимости от величины временного параметра θ , значение которого в выражении (2) определяется входной частотой, будет изменяться временное положение отклика на выходе согласованного фильтра. Измеряя величину θ , находим частоту входного сигнала

$$f = \beta\theta/\pi.$$

Диапазон перестройки частоты генератора ЛЧМ-сигнала выбирается таким, чтобы любой сигнал с частотой, находящейся в полосе анализа, после преобразования полностью попадал в полосу согласованного фильтра. Разрешение по частоте спектроанализатора определяется обратным значением длительности $\tau_{\text{и}}$ импульса согласованного фильтра ($1/\tau_{\text{и}}$), а полоса анализа — разностью полосы частот перестройки генератора и полосы частот согласованного фильтра. Радиоимпульс (4) с выхода согласованного фильтра усиливается, детектируется и поступает на монитор, где можно визуально наблюдать спектр входного сигнала. Для достижения большого динамического диапазона входных сигналов использовался малошумящий усилитель с быстродействующей системой АРУ [4], позволяющий установить динамический диапазон регулировки усиления до 110 дБ и обеспечивающий подавление собственных шумов усилителя.

Спектральные составляющие входного сигнала фиксируются в блоке автоматической регистрации результатов. Если амплитуда входного сигнала, поступающего с детектора, превышает порог компаратора, то на его выходе появляется импульс, временное положение которого пропорционально значению частоты зарегистрированной спектральной составляющей.

Принцип работы используемого в спектроанализаторе блока ограничения ложных срабатываний основан на разбиении периода выполнения анализа для каждого участка перестройки генератора ЛЧМ-сигнала на элементарные интервалы меньшей длительности и запоминании состояния компаратора. Решение о наличии полезного сигнала принимается при появлении хотя бы двух импульсов с одинаковым временным положением относительно начальной стадии анализа. Поскольку вероятность возникновения шумовых импульсов в одни и те же моменты времени для разных периодов перестройки генератора ЛЧМ-сигнала мала, то такая методика обнаружения сигналов позволяет существенно (на несколько порядков) снизить вероятность ложной тревоги.

Для обеспечения предельной чувствительности спектроанализатора гетеродинный генератор должен формировать ЛЧМ-сигнал с высокой линейностью изменения частоты и устойчивыми параметрами. Для стабилизации параметров ЛЧМ-сигнала при девиациях частоты до нескольких десятков мегагерц автоподстройка по методу цифрового преобразования является наиболее рациональной [5]. Функциональная схема построения ЛЧМ-генератора с использованием этого способа стабилизации закона модуляции представлена на рис. 2, где (кроме принятых для схемы на рис. 1) использованы следующие обозначения: КГ — кварцевый генератор; Д₁, Д₂, Д₃ — делители частоты; Г — гетеродин; УГ — управляемый генератор, СОУ — суммирующий операционный усилитель; ИСО — измеритель сигнала ошибки; ИФД — импульсно-фазовый дискриминатор; СУ — схема управления коэффициентом деления; СО — схема остановки; ФПН — формирователь пилообразного напряжения; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь. Для достижения минимальных отклонений перестройки частоты от линейного закона ЛЧМ-сигнал формируется в смесителе сигналов гетеродина и управляемого генератора. Перестройка частоты осуществляется варикапом по сигналу, поступающему с формирователя пилообразного напряжения.

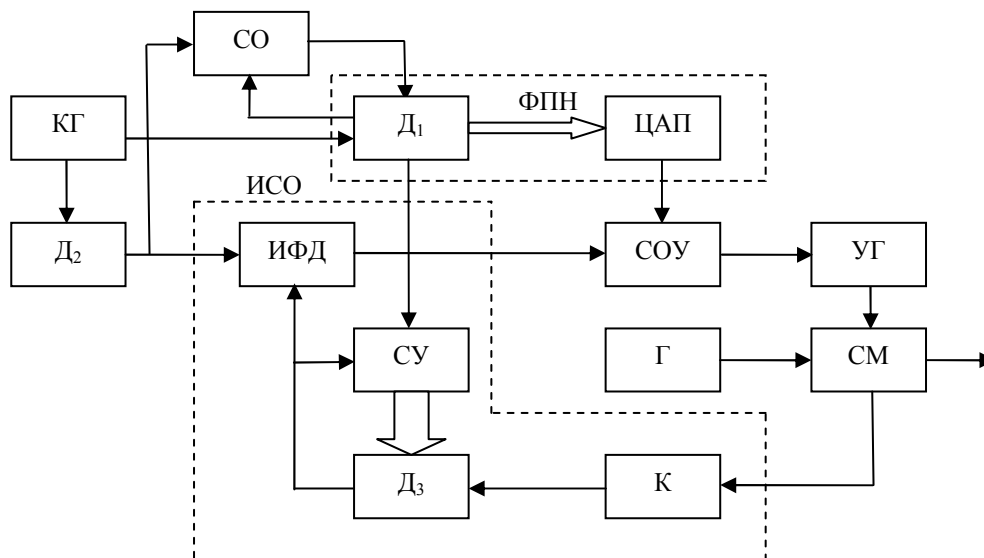


Рис. 2

Сигнал автоподстройки, поступающий на варикап, формируется измерителем сигнала ошибки. С помощью импульсно-фазового дискриминатора измеряется разность фаз между выходным сигналом делителя Д₃ и сигналом опорной частоты $f_{оп}$, поступающим с делителя Д₂.

Автоподстройка частоты по методу цифрового преобразования применяется, когда за один период измерения, равный $f_{\text{оп}}^{-1}$, приращение фазы ЛЧМ-сигнала по сравнению с предыдущим измерением составляет 2π . При этом частота опорного сигнала выбирается исходя из условия $f_{\text{оп}} = (W/T')^{1/2}$, где W — девиация частоты, T' — длительность ЛЧМ-сигнала. Управление коэффициентом деления делителя D_3 осуществляется таким образом, чтобы с каждым периодом измерения значение коэффициента изменялось на единицу. Тогда при отсутствии отклонения частоты от линейного закона модуляции последовательность импульсов на выходе D_3 будет строго равномерной с частотой $f_{\text{оп}}$, а сигнал на выходе ИФД не будет изменяться во времени. При наличии отклонений от линейности на выходе ИФД формируется сигнал рассогласования, устраняющий возникшие отклонения фазы генерируемого ЛЧМ-сигнала. Для синхронизации работ всех узлов генератора ЛЧМ-сигнала частота кварцевого генератора и коэффициенты деления K_1 , K_2 делителей D_1 , D_2 соответственно выбираются таким образом, чтобы выполнялись условия $f_{\text{КГ}} / K_2 = f_{\text{оп}}$ и $K_1 = mK_2$, где m — целое число.

Для повышения точности воспроизведения закона модуляции можно использовать методику, изложенную в работе [6].

Преимуществом разработанного генератора с линейной частотной модуляцией является более высокая точность воспроизведения линейного закона модуляции. Генератор позволяет в широких пределах варьировать параметры формируемого ЛЧМ-сигнала путем соответствующего выбора опорной частоты и коэффициентов деления делителей в цепи автоподстройки.

Основные характеристики описанного спектроанализатора определяются, главным образом, параметрами согласованного фильтра. При использовании согласованного фильтра с полосой частот 10 МГц и длительностью импульса 50 мкс спектроанализатор обладает пороговой чувствительностью, приведенной ко входу, 0,3 мкВ, разрешением по частоте 10 кГц при периоде анализа 150 мкс (при полосе анализа сигналов 20 МГц).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М.: Сов. радио, 1974. С. 78.
2. Ширман Я. Д. Разрешение и сжатие сигналов. М.: Сов. радио, 1994. С. 63.
3. Козлов В. Л., Фираго В. А., Шилов А. Ф. Быстрый последовательный спектроанализатор доплеровских сигналов // Лазерная и оптико-электронная техника: Сб. Минск: Университетское, 1989. С. 202—207.
4. Фираго В. А., Козлов В. Л., Шилов А. Ф. Широкополосный усилитель с быстродействующей автоматической регулировкой усиления // ПТЭ. 1986. № 2. С. 116—117.
5. Фираго В. А., Козлов В. Л., Коростик К. Н., Карик Е. Д. Генератор линейно-частотно-модулированных сигналов с автоподстройкой параметров // Там же. 1990. № 3. С. 91—94.
6. А.с. 1631698 СССР. Генератор с линейной частотной модуляцией / В. Л. Козлов, В. А. Фираго, А. Ф. Шилов // Б.И. 1991. № 8.

Сведения об авторе

Владимир Леонидович Козлов

— аспирант, Белорусский государственный университет, кафедра квантовой радиофизики и оптоэлектроники, Минск;
E-mail: KozlovVL@bsu.by

Рекомендована кафедрой
квантовой радиофизики
и оптоэлектроники

Поступила в редакцию
11.02.08 г.