

---

---

# 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 максимальную 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-



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

Введем масштабный временной коэффициент  $\theta$ , связывающий частоту  $f$  входного сигнала и скорость перестройки частоты  $\beta$  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  $\theta$ . 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  $\tau_{\text{и}}$ ,  $\Delta f$  — 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  $\theta$ , значение которого в выражении (2) определяется входной частотой, будет изменяться временное положение отклика на выходе согласованного фильтра. Измеряя величину  $\theta$ , 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; Д<sub>1</sub>, Д<sub>2</sub>, Д<sub>3</sub> — 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 останковки; 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.

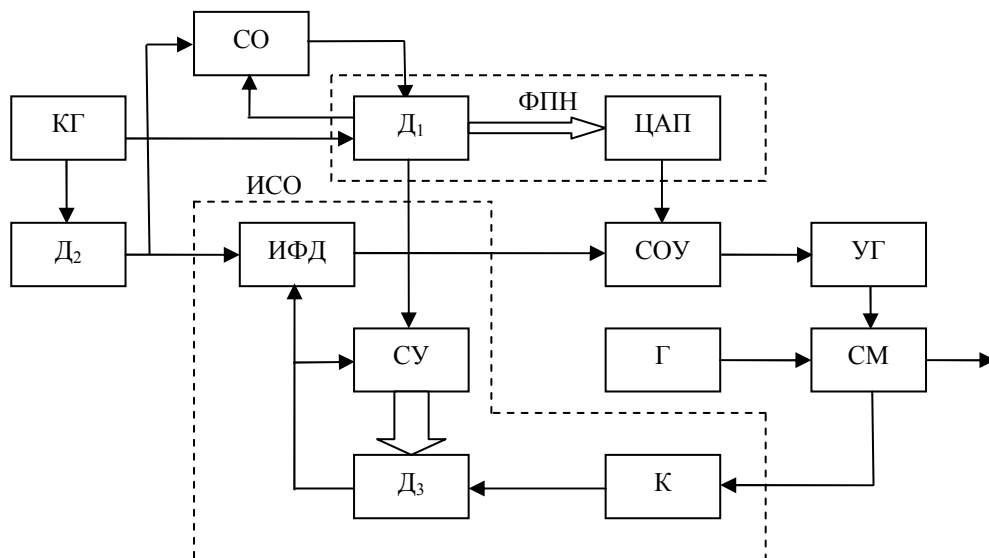


Рис. 2

Сигнал автоподстройки, поступающий на варикап, формируется измерителем сигнала ошибки. С помощью импульсно-фазового дискриминатора измеряется разность фаз между выходным сигналом делителя Д<sub>3</sub> и сигналом опорной частоты  $f_{оп}$ , поступающим с делителя Д<sub>2</sub>.

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  $2\pi$ . 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.