
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.391

И. А. Ключиков

ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНЕЙ ЧАСТОТЫ СИГНАЛОВ В АКУСТООПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРАХ С ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕИНВАРИАНТНОЙ АППАРАТНОЙ ФУНКЦИЕЙ

Рассмотрен способ повышения точности измерения средней частоты спектра сигналов в акустооптических спектроанализаторах с пространственно-неинвариантной аппаратной функцией, основанный на калибровке его АЧХ и частотной шкалы. Достигнуто уменьшение инструментальной ошибки измерения средней частоты спектра энергетической аппаратной функции с 4,5 до 0,1 МГц.

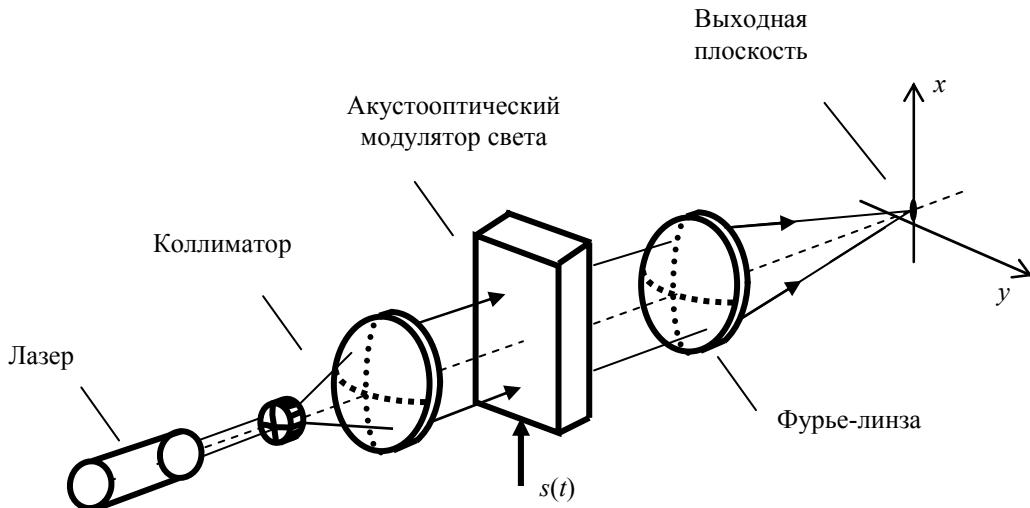
Ключевые слова: акустооптический спектроанализатор, измерение частоты, радиомониторинг.

Акустооптические спектроанализаторы (АОС) используются в системах радиоэлектронного мониторинга и радиоконтроля в качестве устройств, позволяющих производить параллельную спектральную обработку сигналов в СВЧ-диапазоне [1—4]. При моноимпульсном измерении средней частоты спектра радиотехнических излучений точность АОС СВЧ-диапазона составляет от 1 до 5 МГц, что на один-два порядка ниже точности цифровых анализаторов. В значительной степени это определяется наличием в АОС систематических ошибок измерения, вызванных влиянием частотно-зависимых факторов различной физической природы — особенностей дифракции света на акустических волнах (поглощение акустических волн, угловая расходимость акустического пучка, конечные углы дифракции, брэгговские переходные процессы), aberrаций оптической системы, выполняющей пространственное фурье-преобразование дифрагировавшего светового поля, неточности юстировки оптической системы АОС, пространственной неоднородности параметров линейки фотодетекторов. Систематические ошибки, вызванные влиянием частотно-зависимых факторов, можно рассматривать как ошибки, обусловленные пространственной неинвариантностью аппаратной функции АОС. Такой обобщенный подход позволяет предложить способы учета и коррекции ошибок без анализа конкретных механизмов их возникновения, основанные на последетекторной обработке оптических изображений — аналогов спектров сигналов, формируемых оптической системой АОС.

Распределение комплексной амплитуды дифрагировавшего света в выходной плоскости АОС (см. рисунок) с учетом зависимости от второй пространственной координаты может быть записано в следующем виде [1, 2]:

$$E(x, y, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} dx' G(x, x', y) \exp\left(j \frac{2\pi V}{\lambda F} x' t\right) S\left(\frac{2\pi V}{\lambda F} x'\right), \quad (1)$$

где λ — длина волны света; V — скорость распространения акустических волн в звукопроводе акустооптического модулятора; F — фокусное расстояние фурье-линзы; $x' = \frac{\lambda F}{2\pi V} \omega'$ — переменная интегрирования, по физическому смыслу являющаяся частотой спектральной составляющей анализируемого сигнала ω' , приведенной к размерности пространственной координаты в выходной плоскости АОС; $G(x, x', y)$ — распределение комплексной амплитуды света в выходной плоскости АОС при гармоническом входном сигнале частотой ω' ; $S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \exp(-j\omega t) dt$ — спектр анализируемого сигнала.



Если время интегрирования линейки фотодетекторов больше длительности анализируемого сигнала, а размер фотоприемной ячейки по оси y больше ширины распределения $E(x, y, t)$, то выходной сигнал АОС имеет вид

$$I(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} dt dy |E(x, y, t)|^2. \quad (2)$$

Подставив (1) в (2) и изменяв порядок интегрирования, после преобразований получим

$$I(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} dx' |G(x, x')|^2 \left| S\left(\frac{2\pi V}{\lambda F} x'\right) \right|^2,$$

где энергетическая аппаратная функция АОС имеет вид

$$G_E(x, x') = |G(x, x')|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} |G(x, x', y)|^2 dy.$$

Таким образом, пространственно-временное распределение интенсивности дифрагированного света в выходной плоскости АОС, определяемое спектром анализируемого сигнала, может быть записано как

$$I(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} dx' G_E(x, x') S_E\left(\frac{2\pi V}{\lambda F} x'\right). \quad (3)$$

Здесь опущены несущественная в данном случае зависимость от второй пространственной координаты и $S_E(\omega) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \exp(-j\omega t) dt \right|^2$ — энергетический спектр сигнала.

Исходя из аналогии с радиотехническими устройствами выражение (3) удобно записать в виде

$$I(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega' S_E(\omega') G_E(\omega, \omega'),$$

пространственные координаты приведены к размерности частоты в соответствии с соотношением $\omega = \frac{2\pi V}{\lambda F} x$.

Средняя частота спектра входного сигнала определяется выражением

$$\Omega_s = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} d\omega' \omega' S_E(\omega')}{\int_{-\infty}^{\infty} d\omega' S_E(\omega')}.$$
 (4)

Из-за погрешностей формирования спектра в АОС его выходной сигнал $I(\omega)$ отличается от сигнала $S_E(\omega)$, это обуславливает появление систематических ошибок измерения частоты. В соответствии с интегралом суперпозиции (3) погрешности формирования спектра определяются сглаживающим действием энергетической аппаратной функции (ЭАФ). Если ЭАФ известна, то принципиально возможно по наблюдаемому выходному сигналу АОС, решив уравнение (3), восстановить спектр сигнала и получить значение средней частоты в соответствии с выражением (4). Подобные задачи восстановления относятся к некорректно поставленным, для их решения разработан и успешно используется ряд математических методов [5, 6]. Однако ширина ЭАФ акустооптического анализатора спектра СВЧ-диапазона, как правило, значительно больше или сравнима с шириной спектра анализируемых сигналов, что определяет высокую чувствительность качества восстановления спектров к погрешностям исходных данных.

Методы восстановления требуют большого объема вычислений, и их использование в реальном масштабе времени представляется затруднительным. В связи с этим далее рассматривается оценка средней частоты спектра непосредственно по выходному сигналу АОС с введением поправок, в общем случае зависящих от характеристик ЭАФ и спектра исходного сигнала. Если ЭАФ спектроанализатора пространственно-инвариантная $G_E(\omega, \omega') = G_E(\omega - \omega')$, то после подстановки в выражение (4) в качестве спектра $S_E(\omega)$ выходного сигнала АОС $I(\omega)$ можно получить, что частота ω_I , соответствующая пространственному положению выходного распределения света, может быть представлена как

$$\omega_I = \omega_s + \Delta\omega_G,$$
 (5)

где $\Delta\omega_G = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} d\omega' \omega' G_E(\omega')}{\int_{-\infty}^{\infty} d\omega' G_E(\omega')}$ — постоянная величина, характеризующая смещение ЭАФ.

Как и следовало ожидать, в случае пространственно-инвариантной ЭАФ существует только постоянная ошибка измерения частоты, не зависящая от характеристик сигнала.

В случае пространственно-неинвариантной ЭАФ представим ее в виде

$$G_E(\omega, \omega') = A(\omega') g_E(\omega, \omega'),$$
 (6)

где $A(\omega') = \int_{-\infty}^{\infty} G_E(\omega, \omega') d\omega$ — АЧХ АОС; $g_E(\omega, \omega') = \frac{G_E(\omega, \omega')}{A(\omega')}$ — нормированная ЭАФ АОС.

Введенная ЭАФ $g_E(\omega, \omega')$ удовлетворяет условию нормировки

$$\int_{-\infty}^{\infty} g_E(\omega, \omega') d\omega = 1.$$

При использовании представления (6) выражение для частоты ω_I записывается как

$$\omega_I = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} d\omega' \tilde{S}_E(\omega') \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \omega g_E(\omega, \omega')}{\int_{-\infty}^{\infty} d\omega' \tilde{S}_E(\omega')},$$

где $\tilde{S}_E(\omega') = A(\omega') S_E(\omega')$.

Если пространственно-инвариантной является только нормированная ЭАФ, т. е.

$$G_E(\omega, \omega') = A(\omega') g_E(\omega - \omega'),$$

то, как следует из аналогии с (5),

$$\omega_I = \tilde{\omega}_s + \Delta\omega_g, \quad (7)$$

где $\Delta\omega_g = \int_{-\infty}^{\infty} d\omega' \omega' g_E(\omega')$ — величина, характеризующая смещение нормированной ЭАФ;

$$\tilde{\omega}_s = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} d\omega' \omega' \tilde{S}_E(\omega')}{\int_{-\infty}^{\infty} d\omega' \tilde{S}_E(\omega')} \text{ — средняя частота взвешенного спектра } \tilde{S}_E(\omega').$$

Средняя частота $\tilde{S}_E(\omega')$ характеризует ошибку измерения средней частоты спектра сигнала, обусловленную неравномерностью АЧХ АОС. Коррекция неравномерности акусто-оптического модулятора возможна путем использования радиочастотных фильтров на входе АОМ, оптических фильтров вблизи выходной плоскости АОС или при цифровой обработке после выхода с детектора.

В общем случае, используя два первых члена разложения АЧХ АОС $A(\omega)$ в ряд Тейлора в окрестности средней частоты спектра сигнала ω_s

$$A(\omega) = a_0(\omega_s) + a_1(\omega_s)(\omega - \omega_s),$$

где $a_0(\omega_s) = A(\omega_s)$, $a_1(\omega_s) = \frac{dA(\omega)}{d\omega} \Big|_{\omega=\omega_s}$, найдем $\tilde{\omega}_s = \omega_s + \alpha_{10}(\omega_s) \Delta\omega_s^2$,

$$\Delta\omega_s = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} d\omega' (\omega' - \omega_s)^2 S_E(\omega')}{\int_{-\infty}^{\infty} d\omega' S_E(\omega')} \text{ — ширина спектра сигнала; } \alpha_{10}(\omega_s) = \frac{a_1(\omega_s)}{a_0(\omega_s)}.$$

С учетом (7) получим окончательное выражение для частоты ω_I , соответствующей пространственному положению выходного распределения света, в случае пространственно-неинвариантной нормированной ЭАФ

$$\omega_I = \omega_s + \alpha_{10}(\omega_s) \Delta\omega_s^2 + \Delta\omega_g(\omega_s), \quad (8)$$

в котором учтена зависимость смещения ЭАФ от частоты.

В данном случае учет ошибки измерения частоты, представленной в виде второго и третьего членов выражения (8), может быть произведен итерационным способом с использованием в качестве начальных значений ω_s и $\Delta\omega_s$ оценок средней частоты и ширины спектра сигнала непосредственно по выходному распределению света (3). Требуемые значения параметров АОС, характеризующих форму АЧХ и смещение нормированной ЭАФ, могут быть определены при калибровке АЧХ и частотной шкалы анализатора.

Алгоритм измерения средней частоты спектра был экспериментально проверен на образце АОС гигагерцового диапазона частот. При ширине ЭАФ 4,5 МГц инструментальная ошибка измерения средней частоты спектра была снижена в 8—10 раз и составила менее 0,1 МГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулаков С. В. Акустооптические устройства спектрального и корреляционного анализа сигналов. Л.: Наука, 1978. 144 с.
2. Егоров Ю. В., Наумов К. П., Ушаков В. Н. Акустооптические процессоры. М.: Радио и связь, 1991. 160 с.
3. Паркс Д. Акустооптический приемник-спектроанализатор дециметрового диапазона // Зарубежная радиоэлектроника. 1970. № 2. С. 21—32.
4. Белошицкий А. П., Комаров В. И., Крекотень Б. П., Сапожников Б. Т. Акустооптические анализаторы спектра радиосигналов // Зарубежная радиоэлектроника. 1971. № 3. С. 28—40.
5. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 322 с.
6. Василенко Г. И. Теория восстановления сигналов: о редукции к идеальному прибору в физике и технике. М.: Сов. радио, 1979. 272 с.

Сведения об авторе

Игорь Алексеевич Ключиков

— д-р техн. наук, профессор; Курский государственный технический университет, кафедра биомедицинской инженерии;
E-mail: Igor_Klyuchikov@mail.ru

Рекомендована кафедрой
биомедицинской инженерии

Поступила в редакцию
14.04.10 г.