

К ВОПРОСУ О РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ РАДИОСИГНАЛОВ ПО ЧАСТОТЕ АКУСТООПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРОВ

д.т.н., проф. А.И. Стрелков, к.ф.-м.н. А.А. Можаяев, В.В. Марченко

Исследована разрешающая способность монохроматических радиосигналов по частоте акустооптических спектроанализаторов. Получены аналитические выражения и проведены численные расчеты для выходного сигнала двух монохроматических сигналов.

Введение. В последнее время большое внимание уделяется использованию оптических методов при анализе данных различной природы [1 – 3], что обусловлено специфическими возможностями таких методов: параллельностью обработки, высокой скоростью и частотой оптических сигналов и т.д.

Эти возможности реализованы, например, в современных акустооптических спектроанализаторах, отличающихся простотой конструкции и параллельной обработкой сигналов в широкой полосе частот и практически в реальном масштабе времени [4 – 6]. Использование достоинств беспериодического спектрального анализа и расширение полосы одновременно анализируемых частот в акустооптических спектроанализаторах обуславливает необходимость более глубокого анализа их разрешающей способности.

В большинстве работ, посвященных исследованию разрешающей способности акустооптических спектроанализаторов, эти исследования проводятся с использованием критерия Релея [7]. Так сложилось исторически, по аналогии с разрешающей способностью большинства оптических приборов, например, телескопов. Но в отличие от исследования естественных источников излучения, например, звезд, излучение которых является некогерентным, в акустооптических спектроанализаторах используется когерентное излучение лазера. Оценки разрешающей способности, проведенные по критерию Релея [7], показывают, что при расстройке сигнала $\Delta f/f \approx 0,01$ импульсы уже не различимы вне зависимости от времени задержки сигнала.

Таким образом, разрешающая способность акустооптических спектроанализаторов, основанная на применении критерия Релея, значительно меньше потенциальной разрешающей способности измерительной системы, которая, как известно из общей теории радиолокации, определяется длительностью импульса $\Delta f = 1/\tau_u$, либо параметрами дифракционной решетки спектроанализатора.

Целью данной статьи является оценка разрешающей способности монохроматических радиосигналов по частоте акустооптическими спектроанализаторами с учетом когерентности излучения в акустооптических спектроанализаторах и использованием в качестве регистрирующего устройства нелинейных элементов.

1. Основные соотношения и формулировки. Структурная схема анализатора спектра вместе с основными аналитическими соотношениями, характеризующими процессы, происходящие в акустооптических спектроанализаторах достаточно полно изложены в [7]. Воспользуемся этими данными для постановки задачи исследования взаимодействия двух близких по частоте монохроматических радиосигналов и определения предельных значений разрешающей способности акустооптических спектроанализаторов.

Будем считать, что на вход анализатора поступает радиосигнал $s(t)$, который преобразуется в бегущую акустическую волну $r(x_1) \cdot s\left(t - \frac{x_1 + D/2}{v}\right)$, распространяющуюся со скоростью v . В линейном приближении поле световой волны первого дифракционного порядка представляется в виде

$$E_1(x_1, t) = Ar(x_1) \cdot s\left(t - \frac{x_1 + D/2}{v}\right) \exp[i(\omega_L t - k_L z_1 + k_L x_1 \operatorname{tg} \theta)], \quad (1)$$

где A характеризует модулирующее воздействие акустической волны на проходящее через акустооптический модулятор лазерное излучение.

В выходной плоскости акустооптического спектроанализатора поле будет записываться в виде

$$E_2(x_2, t) = \int dx_1 E_1(x_1, t) \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda F} x_1 x_2\right). \quad (2)$$

Используя выражение (1), формулу (2) можно преобразовать к виду

$$E_2(x_2, t) = Av \exp(-i\omega_x T/2) \int_0^T d\tau \exp(i\omega_x \tau) \cdot s(t - \tau), \quad (3)$$

где опущен несущественный множитель $\exp[i(\omega_L t - k_L z_1)]$ и введено обозначение $\omega_x = v\left(\frac{2\pi}{\lambda F} x_2 + k_L \operatorname{tg} \theta_i\right)$, а $T = \frac{D}{v}$ – длительность временной выборки, соответствующей временной апертуре D . В формуле (3) и всюду ниже явно отражена зависимость поля E_2 от x_2 посредством $\omega_x = \omega(x_2)$.

2. Разрешение двух монохроматических радиосигналов. Пусть на вход нелинейного анализатора одновременно поступают два монохроматических радиосигнала единичной амплитуды, но с различными несущими

щими частотами ω_a ($a = 1, 2$):

$$S(t) = S_1(t) + S_2(t),$$

где $S_a(t) = \sin(\omega_a t + \varphi_a)$. (4)

Подстановка (4) в (3) дает:

$$E_2(\omega_x, t) = E^{(1)}(\omega_x, t) + E^{(2)}(\omega_x, t), \quad (5)$$

где слагаемое $E^{(a)}(\omega_x, t)$ – соответствующее отклику на a -й входной радиосигнал ($a = 1, 2$).

Таким образом, учитывая нелинейность элементов регистрирующего устройства, а также в силу (5) суммарный регистрируемый сигнал можно записать в виде

$$U(\omega_x, t) = U_1(\omega_x, t) + U_2(\omega_x, t) + U_{1,2}(\omega_x, t), \quad (6)$$

где

$$U_a(\omega_x, t) = \left| E_2^a(\omega_x, t) \right|^2 \quad (7)$$

представляет собой входной сигнал при наличии на входе только a -го сигнала, а третье слагаемое:

$$U_{1,2}(\omega_x, t) = E^{(1)}(\omega_x, t) * \overline{E^{(2)}(\omega_x, t)} \quad (8)$$

возникает как результат интерференции первых двух (черта сверху означает комплексное сопряжение). В отличие от [7] мы не проводили интегрирование по времени амплитуды принятого сигнала. Таким образом, были учтены особенности акустооптического спектроанализатора как устройства, в котором происходит взаимодействие когерентных сигналов.

3. Численные расчеты и обсуждения. Наиболее существенные качественные и количественные характеристики частотного разрешения можно видеть уже на примере двух монохроматических сигналов, отличающихся только несущими частотами.

Рис. 1 иллюстрирует результаты расчета по формулам (7), (8) выходного сигнала при значительной величине расстройки частот монохроматических радиосигналов. Очевидно, что в этом случае можно произвести разрешение радиосигналов и традиционным методом (например, [7]). Авторов больше интересует величина дифракционного пятна $\Delta\omega_{x1,2}$. Ввиду специфичности условий распространения радиосигналов в акустооптическом спектроанализаторе каждому входному сигналу на определенной частоте соответствует не только свое значение ω_x , но и своя ширина дифракционного пятна $\Delta\omega_x$. Это можно проверить при градуировке акустооптического спектроанализатора. Таким образом существует возможность значительно повысить разрешающую способность акустооптического спектроанализатора, так как каждому значению частоты входного сигнала соответствует два независимых параметра.

На рис. 2 представлены результаты расчетов выходного сигнала при малом значении расстройки частот входных радиосигналов.

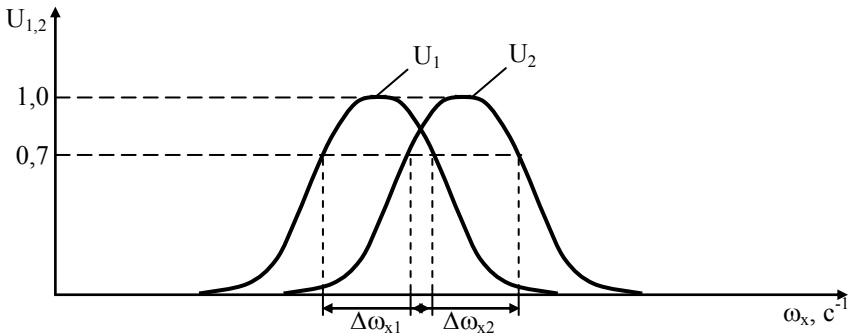


Рис. 1. Выходной сигнал при большом значении расстройки несущей частоты

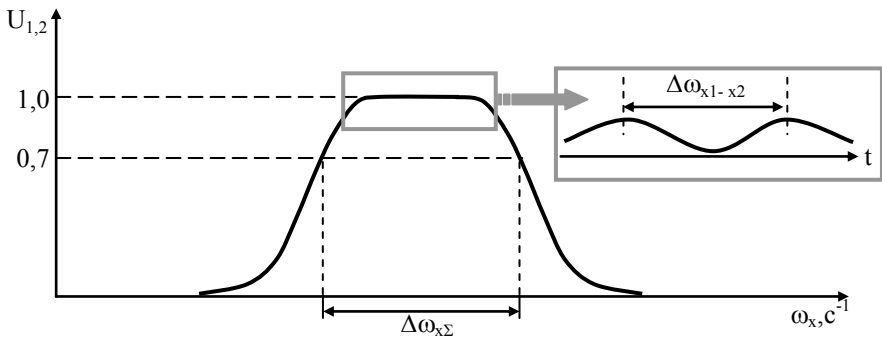


Рис. 2. Выходной сигнал при малом значении расстройки несущей частоты

Главное отличие этих расчетов от проведенных в [7] заключается в том, что в общей части двух радиосигналов на различных частотах можно обнаружить флуктуации амплитуды выходного сигнала с частотами намного ниже несущих частот исследуемых монохроматических радиосигналов. Расчеты (7), (8) проводились без интегрирования по времени, что позволило обнаружить, определить и идентифицировать биения, т.е. колебания на комбинационных частотах, что невозможно при допущениях, на которых базировались исследования [7]. Тогда измеряя и анализируя значения $\Delta\omega_{x\Sigma}$ и частоты биений $\Delta\omega_{x1-x2}$ можно значительно повысить разрешающую способность акустооптического спектроанализатора по частоте.

Для этого необходимо, во-первых, время от времени проводить градуировку акустооптического спектроанализатора как $\Delta\omega_x = f(s(t))$, т.е.

как функцию входного сигнала, а также выделять максимальное значение расстройки несущей частоты (биений). Этот алгоритм может позволить приблизить предельные значения разрешающей способности радиосигналов по частоте акустооптическими спектроанализаторами к значениям, которые предсказываются общей теорией радиолокации.

Заключение. В данной работе исследованы особенности разрешающей способности когерентных акустооптических спектроанализаторов. Получены аналитические соотношения для выходного сигнала при двух монохроматических радиосигналах на входе, учитывающие эффекты нелинейного взаимодействия выходных сигналов и априорную зависимость местоположения и ширины дифракционного пятна от частоты исследуемого сигнала. Предложены способы, которые могут значительно улучшить разрешающую способность по частоте акустооптических спектроанализаторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Парыгин В.Н., Балаковский В.И. *Оптическая обработка информации*. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 142 с.
2. Акаев А.А., Майоров С.А. *Оптические методы обработки информации*. – М.: Высш. шк., 1988. – 237 с.
3. *Оптическая обработка радиосигналов в реальном времени / Под ред. С.В. Кулакова*. – М.: Радио и связь, 1989. – 136 с.
4. Магдич Л.Н. Молчанов В.Я. *Акустооптические устройства и их применение*. – М.: Сов. радио, 1989. – 112 с.
5. Кулаков С.В. *Акустооптические устройства спектрального и корреляционного анализа сигналов*. – Л.: Наука, 1978. – 144 с.
6. Белошицкий Л.П., Комаров В.Н., Крекотень Б.Н., Сапожников Б.Т. *Акустооптические анализаторы спектра сигналов // Зарубежная радиоэлектроника*. – 1981. – №3. – С. 51 – 70.
7. Стрелков А.И., Стадник А.М., Марченко В.В. *Частотное разрешение импульсных сигналов в некогерентных акустооптических спектроанализаторах // Системы обробки інформації*. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вип. 4(20). – С. 33 – 40.

Поступила 17.09.2002

СТРЕЛКОВ Александр Иванович, доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник научного центра ХВУ. В 1965 году окончил ВИРТА ПВО. Области научных интересов – квантовая электроника, прикладная оптика, оптико-электронные средства в статистической обработке оптических сигналов.

МОЖАЕВ Александр Александрович, канд. ф.-м. наук, ст. научн. сотр., вед. научн. сотр. научного центра при ХВУ. Область научных интересов – проблемы распространения радиосигналов различных диапазонов в задачах дистанционного зондирования.

МАРЧЕНКО Василий Васильевич, сотрудник СКБ «Топаз» (г. Донецк). Область научных интересов – статистическая обработка оптических сигналов в радиотехнических системах.