

ДИФРАКЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АКУСТООПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ СИСТЕМЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА КОРОТКИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИМПУЛЬСОВ

д.т.н., проф. А.И. Стрелков, д.т.н., проф. Л.Ф. Купченко, В.В. Коротков

Рассмотрены особенности обработки коротких радиолокационных импульсов с постоянной энергией в акустооптических спектроанализаторах. Теоретически обоснована и получена зависимость дифракционной эффективности акустооптических модуляторов систем спектрального анализа в зависимости от длительности принимаемых радиолокационных импульсов.

Приемное устройство быстрого распознавания радиолокационных СВЧ сигналов является основной частью систем радиоэлектронной борьбы. Задача этих устройств состоит в обнаружении и обработке сигналов с целью определения их параметров для последующей классификации. Одним из перспективных направлений построения приемников с параллельной аналоговой обработкой является применение в их составе акустооптических анализаторов спектра, которые зачастую выполняют роль частотно определительных устройств. Такой спектроанализатор можно считать аналогом многоканального приемника, в котором частотное разделение каналов основано на принципах акустооптического взаимодействия.

Обычно полагают, что сигнал, поступающий на вход акустооптического анализатора спектра, достаточно мал и характер акустооптического взаимодействия можно считать линейным процессом.

В настоящей статье обсуждается вопрос о влиянии особенностей акустооптического взаимодействия на характеристики приемных устройств быстрого распознавания коротких радиоимпульсов переменной длительности. Известно, что в процессе боевой работы современные радиолокационные системы обнаружения изменяют не только частоту излучения, но и длительность зондирующих импульсов. При этом, как правило, для сохранения характеристик обнаружения, энергию излучаемых импульсов сохраняют неизменной. Поэтому задача изучения особенностей функционирования акустооптических модуляторов при анализе коротких импульсов актуальна и представляет практический интерес.

Будем считать, что характеристики обнаружения радиотехнических сигналов приемной системой остаются постоянными. При этом будем полагать, во-первых, что энергия сигнала, поступающая на вход радио-

приемного устройства, постоянна. Подобная ситуация возникает в том случае, когда радиолокационное устройство, подлежащее обнаружению, переходит в режим излучения коротких и сверхкоротких зондирующих импульсов, сохраняя при этом энергию сигнала постоянной. Во-вторых, приемное устройство радиотехнической системы обнаружения сигнала обеспечивает усиление сигнала в широком динамическом диапазоне.

Известно, что при некотором значении акустической мощности, определяющей величину относительного изменения коэффициента преломления звуковой решетки $\Delta n/n$, величина дифракционной эффективности, представляющей собой отношение интенсивности дифракционной составляющей первого порядка к интенсивности падающего излучения I_1/I_0 , достигает максимума, а затем уменьшается.

Авторы считают целесообразным обратить внимание разработчиков радиотехнических систем разведки, использующих в качестве устройств определения частоты акустооптические спектроанализаторы, на этот очевидный факт и указать те предельные значения параметров акустооптического взаимодействия, которые приводят к указанным ограничениям.

Выражение, позволяющее вычислить амплитуду и фазу дифракционной составляющей первого порядка, имеет вид [1]:

$$E_1 = E_0 \frac{2q}{\sqrt{\varepsilon^2 + 4q^2}} \exp \left[-\frac{1}{2} (\varepsilon^2 + q^2) ax - i \frac{\pi}{2} \right] \sin \left(\frac{\sqrt{\varepsilon^2 + 4q^2}}{2} ax \right), \quad (1)$$

где E_0 – амплитуда падающей волны;

$$q = \frac{\Delta n}{n} \left(\frac{k}{k_0} \right)^2 - \text{параметр Рытова};$$

$$\varepsilon = 1 + \frac{2k \sin \Theta}{k_0} - \text{параметр расстройки, характеризующий отличие}$$

параметров и геометрии акустооптического взаимодействия от условий брэгговского синхронизма;

k_0 и k - волновой вектор звука и света соответственно;

k_1 - проекция волнового вектора света на ось x ;

$$a = -k^2 / 2k_1.$$

Это выражение описывает взаимодействие плоских световых и ультразвуковых волн в широком диапазоне расстроек относительно условий брэгговского синхронизма и справедливо как для слабого, так и сильного акустооптического взаимодействия. Для дифракционной эффективности, используя (1), получим выражение

$$|\eta_1|^2 = \left| \frac{\mathbf{E}_1}{\mathbf{E}_0} \right|^2 = \frac{1}{1 + \gamma^2} \sin^2 \left(\frac{\Delta n}{n} \frac{kl}{2} \sqrt{1 + \gamma^2} \right), \quad (2)$$

где l – длина взаимодействия света с ультразвуковой волной, а $\gamma = \varepsilon/2q$.

Из выражения (2) следует, что максимальная дифракционная эффективность может быть обеспечена при достижении аргументом синуса значения

$$\frac{\Delta n}{n} \frac{kl}{2} \sqrt{1 + \gamma^2} = \frac{\pi}{2}. \quad (3)$$

Будем считать, что частота анализируемого сигнала соответствует частоте, обеспечивающей условие брэгговского синхронизма, и, следовательно, параметр расстройки $\varepsilon = 0$. Тогда предельные значения величины изменения $\Delta n/n$ могут быть найдены из условий $\Delta n/n = \pi/kl$.

В [2] приведена зависимость изменения $\Delta n/n$ от величины акустической мощности в звукопроводе $\mathbf{P}_{\text{ак}}$, геометрических размеров возбуждителя ультразвука l и \mathbf{b} , а также от свойств материала звукопровода, который обычно характеризуется коэффициентом \mathbf{M}_2 - параметром акустооптического качества. Эта зависимость имеет вид

$$\frac{\Delta n}{n} = \sqrt{\frac{\mathbf{M}_2 \mathbf{P}_{\text{ак}}}{l \mathbf{b}}}. \quad (4)$$

Так как мощность ультразвука связана с энергией звукового поля $\mathbf{W}_{\text{ак}}$ и длительностью анализируемого импульса τ соотношением $\mathbf{P}_{\text{ак}} = \mathbf{W}_{\text{ак}}/\tau$, то величина дифракционной эффективности будет определяться при $\mathbf{W}_{\text{ак}} = \text{const}$ (при сохранении прочих параметров взаимодействия постоянными) лишь длительностью регистрируемого импульса τ :

$$|\eta_1|^2 = \sin^2 \left(\frac{kl}{2} \sqrt{\frac{\mathbf{M}_2 \mathbf{W}_{\text{ак}}}{l \mathbf{b} \tau}} \right). \quad (5)$$

Существенно, что при некоторых параметрах акустооптического взаимодействия можно ожидать уменьшения сигнала на выходе акустооптического спектроанализатора при уменьшении длительности анализируемого импульса.

На рис.1 изображена зависимость дифракционной эффективности от длительности импульса, когда в качестве звукопровода используются кристаллы, обладающие различными акустооптическими свойствами. На графике штриховая линия отображает зависимость дифракционной эффективности, когда в качестве рабочего материала используется кристалл ниобата лития, для которого параметр акустооптического качества $\mathbf{M}_2 = 2.92 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$, а величина коэффициента преломления $n = 2.29$.

Точками изображена зависимость для стекла ТФ-10, для которого $M_2 = 7,5 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$, а $n = 1.806$, а сплошной линией - для танталата лития с характеристиками $M_2 = 36 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ и $n = 2.38$. При расчете зависимостей предполагалось, что длина световой волны $\lambda = 0.633 \text{ мкм}$. При этом геометрические размеры возбуждителя ультразвука составляли $l = b = 0.3 \text{ см}$.

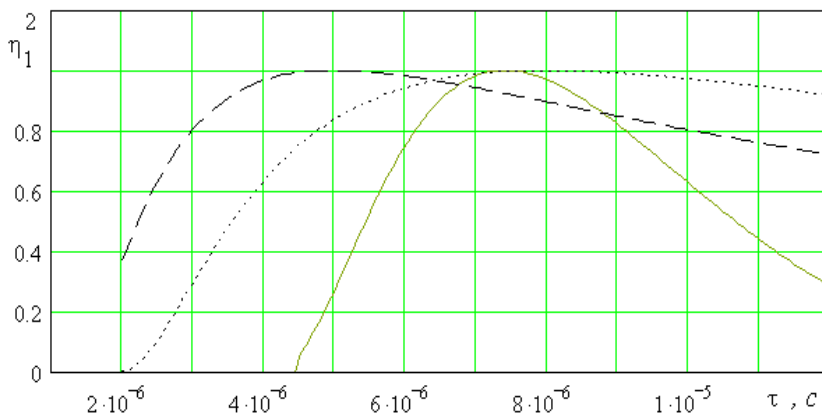


Рис.1. Зависимость дифракционной эффективности от длительности импульса

Как видно из графика, при постоянной энергии звуковой волны, которая была выбрана $W_{ак} = 3,265 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$, для материалов, обладающих большим значением акустооптического качества, максимум дифракционной эффективности возникает при больших значениях длительности акустического импульса. Из представленного графика также следует, что в диапазоне изменения длительности исследуемого импульса от 2 мкс до 12 мкс выходной сигнал претерпевает существенные изменения. Это свойство акустооптического взаимодействия следует учитывать на практике при анализе характеристик существующих и разработке новых акустооптических систем спектрального анализа радиолокационных импульсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зильберман Г.Е., Сидоров И.Н., Купченко Л.Ф. К теории дифракции света на ультразвуке // Радиотехника и электроника. – 1982. – Т. 27, № 2. – С. 241 - 247.
2. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. – М.: Радио и связь, 1985. – 285 с.

Поступила в редколлегию 06.08.2001