

УДК 621 391

## ОСОБЕННОСТИ ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА РЕГУЛЯРНЫХ ОТРАЖЕНИЯХ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ

В. В. Клудзин

Рассматриваются особенности акустооптического взаимодействия при использовании многократных отражений акустической волны, разделенных фиксированным углом. Представлены основные характеристики акустооптического взаимодействия системы, использующей брэгговский режим Экспериментальные результаты показывают хорошее соответствие с расчетными данными.

Наиболее широкое применение акустооптические устройства находят в быстродействующих системах обработки информации и устройствах управления оптическим излучением [1, 2]. Традиционные акустооптические устройства используют энергию акустического сигнала, запасенного в объеме оптической апертуры  $D$ . Эта энергия, сохраняющая информацию в течение времени  $T=D/V$ , где  $V$  — скорость акустической волны, в дальнейшем не используется и либо поглощается в акустическом поглотителе, либо рассеивается за счет диффузионного отражения акустических колебаний от торца светозвукопровода. Поэтому эффективность использования акустической мощности в одноходовых акустооптических устройствах оказывается невысокой. В многоходовых акустооптических модуляторах [3] эффективность использования акустической мощности увеличивается в  $M$  раз (где  $M$  — число акустических отражений), что обуславливает увеличение длительности обрабатываемого сигнала или информационной емкости системы также в  $M$  раз. Использование метода многократных акустических отражений позволяет увеличивать информационную емкость системы обработки не только за счет увеличения длительности обрабатываемой выборки, но и за счет расширенной полосы пропускания устройства, если используемые отражения детерминированно ориентированы под углом друг относительно друга. Устройства такого типа могут быть применены в основном для обработки радиосигналов с полигармоническим спектром.

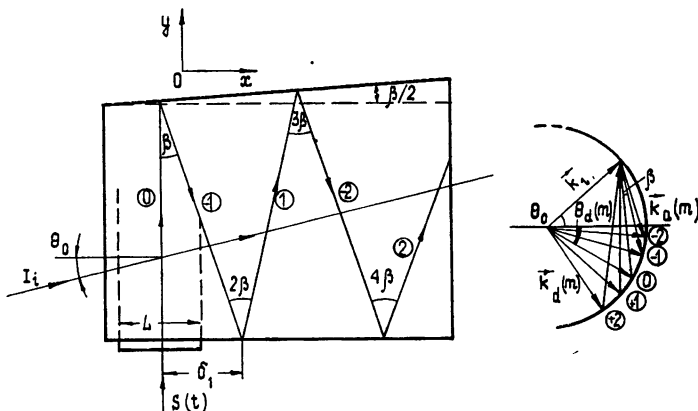


Рис. 1. Геометрия акустооптического взаимодействия и суперпозиция волновых векторов.

Описываемая геометрия представлена на рис. 1.

Если входное воздействие является гармоническим, то акустический сигнал в системе может быть записан в виде

$$\begin{aligned} S(t, m) &= e^{j\Omega t} \sum_{m=-M/2}^{M/2} S_m \exp [j(m\Omega T + \varphi_m)] = \\ &= e^{j\Omega t} \sum_{m=-M/2}^{M/2} S_m \exp [j(mk_a D + \varphi_m)], \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\Omega$  — частота входного воздействия,  $\varphi_m$  — фазовый набег, обусловленный неортогональностью геометрии акустооптического взаимодействия,  $k_a = 2\pi/\lambda_a = \Omega/V$  — волновое число акустической волны.

Полагая режим акустооптического взаимодействия брэгговским и пользуясь выводами [4, 5], при слабом взаимодействии относительную интенсивность полезного дифракционного порядка можно представить в виде

$$I_d/I_i = \left( \xi \int_{-\infty}^{\infty} S(x, m) \exp [j(\Delta\theta + \beta_m) k_a x] dx \right)^2, \quad (2)$$

где

$$S(x, m) = \sum_{m=-M/2}^{M/2} S_m \exp [j(mk_a D + \varphi_m)] |_{|x+\delta_m| < L/2} \quad (3)$$

— распределение амплитуды акустических отражений,  $\delta_m$  — пространственное смещение  $m$ -го акустического отражения вдоль координаты  $x$  (рис. 1),  $\beta$  — угол, формирующий последовательность акустических отражений,  $\Delta\theta = \theta_i - \theta_0$  — рассогласование между углом падения оптического луча  $\theta_i$  и брэгговским углом  $\theta_0$  внутри среды для заданной частоты акустического сигнала  $F_0 = \Omega_0/2\pi$ ,

$$\theta_0 = \arcsin(\lambda_0 F_0 / 2Vn), \quad (4)$$

$\xi$  — постоянный множитель, определяемый параметрами среды взаимодействия [1, 2].

На рис. 1 представлена графическая иллюстрация закона сохранения волнового вектора для ряда последовательных отражений акустической волны. Здесь  $k_a(m)$  принимает ряд дискретных значений, причем направление этого вектора определяется значением угла  $m\beta$ , а модуль его

$$k_a(m) = 2\pi(F(m)/V), \quad (5)$$

где  $F(m)$  — значение частоты акустического сигнала, определяющее максимум интенсивности дифракционного порядка  $m$ -го акустического отражения при неизменном угле падения светового потока  $\theta_0$ .

Направление волнового вектора дифрагированной волны  $k_d(m)$ , энергия которой полезно используется, определяется соотношением

$$\theta_d(m) \approx (\lambda_0/nV)F(m) = 2(\theta_0 + m\beta), \quad (6)$$

причем угол дифракции  $\theta_d(m)$  в этом случае отсчитывается от направления распространения падающей световой волны ( $k_i$ ).

Амплитуда  $m$ -го акустического отражения определяется условиями затухания, дифракционного рассеяния и отражения акустической волны в среде

$$S_m = S_0 e^{-\alpha m}, \quad (7)$$

$\alpha$  — коэффициент поглощения акустической энергии, приходящийся на однократное отражение.

Принцип построения устройств предполагает использование здесь акустически высокодобротных материалов, таких, например, как монокристалл ниобата лития. Поэтому при оптимальном выборе частотного диапазона потерями на физическое затухание акустической волны можно пренебречь. Минимум потерь за счет переизлучения на активном торце светозвукопровода определяется условием

$$\beta LF/V \gg 1, \quad (8)$$

здесь  $L$  — длина акустооптического взаимодействия.

Известно [4, 5], что соотношение (2) представляет угловую или частотную зависимость полезного дифракционного порядка  $I_d(\Delta\theta, k_a)$ . При рассмотрении этой зависимости приводятся следующие упрощающие предположения:

— малость углов дифракции,

$$\sin\theta_0 \simeq \theta_0, \quad \beta < \theta_0,$$

— равномерное распределение акустической амплитуды вдоль координаты  $x$ ,

$$S(m, x) = S_m e^{i\psi_m} \Big|_{|x| < L/2}, \quad (9)$$

где

$$\psi_m = mk_a D + \varphi_m,$$

— для малого значения угла  $\beta$  пространственное смещение  $\delta_m$  мало вследствие того, что  $\delta_m \ll L$ ,

— пренебрежимо мала расходимость оптического столба,  $\lambda_0/D \ll \lambda_a/L$ .

Тогда соотношение (2) можно привести к виду

$$\frac{I_d(\Delta\theta, k_a)}{I_i} = \xi^2 \left\{ \sum_{m=-M/2}^{M/2} S_m \frac{\sin [(\Delta\theta + m\beta) k_a (L/2)]}{(\Delta\theta + m\beta) k_a} \right\}^2. \quad (10)$$

Если наложить дополнительное ограничение на выбор угла  $\beta$ , определяющее угловую зависимость акустических отражений,

$$\beta \geq 2V/LF_0, \quad (11)$$

то в выражении (10) можно пренебречь комбинационными членами:

$$\frac{I_d(\Delta\theta, k_a)}{I_i} \simeq \xi^2 \sum_{m=-M/2}^{M/2} S_m^2 \frac{\sin^2 [(\Delta\theta + m\beta) k_a (L/2)]}{[(\Delta\theta + m\beta) k_a]^2}. \quad (12)$$

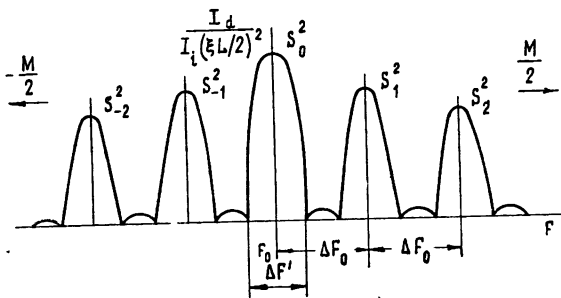


Рис. 2. Частотная зависимость нормированного распределения интенсивности дифракционного порядка,  $\Delta F' = 2V^2n/\lambda_0 F_0 L$ ,  $\Delta F_0 = 2n\beta V/\lambda_0$ .

Типичное распределение интенсивности дифракционного порядка при фиксированном угле падения светового потока  $\Delta\theta = \theta_i - \theta_0 = 0$  в зависимости от частоты акустического сигнала  $F$  представлено на рис. 2.

Характерной особенностью в данном случае является то, что смежные максимумы этого распределения разнесены по частоте на величину

$$\Delta F_0 = 2n\beta V/\lambda_0, \quad (13)$$

$n$  — показатель преломления.

Кроме того, следует отметить, что  $m$ -й максимум будет соответствовать фазовому углу  $\psi_m$  (9) или временной задержке  $\tau_m$ , определяемой из соотношения (1) с учетом ограничивающих условий:

$$\tau_m = mD/V = mT. \quad (14)$$

Таким образом, описываемая система обладает частотно-временной дискретной дисперсией. Строго говоря, наличие фазового набега  $\psi_m$  в выражении (1) свидетельствует о существовании в этой системе дискретной фазовой дисперсии. Сигнал с выхода фотоприемника здесь может быть получен на радиочастотной несущей при использовании какого-либо способа оптического гетеродинарования [1, 6].

Экспериментальное исследование проводилось в системе, использующей монокристалл ниобита лития в качестве среды взаимодействия, источника когерентного оптического излучения ЛГ-38 ( $\lambda_0 = 0,6328$  мкм) и фотоприемника ФЭУ-38. Направлением распространения акустической волны было выбрано направление [100] кристалла ( $V = 6,57 \cdot 10^5$  см/с), поляризация световой волны совпадала с направлением  $+40^\circ$  *yz*. В качестве пьезонизлучателя использовалась пластина  $\text{LiNbO}_3$   $+36^\circ$  *yz*-среза, прикрепленная к светозвукопроводу с помощью медно-индиевой термокомпрессионной связки и доведенная до толщины порядка 10 мкм. Величина угла скоса тыльного торца светозвукопровода  $\beta/2$  контролировалась оптическим методом и составляла  $1,25 \cdot 10^{-3}$  рад. В этой системе при использовании радиоимпульсного возбуждения в диапазоне частот 300—1000 МГц удавалось надежно наблюдать дифракцию света на 7—8 акустических отражениях.

Экспериментальная угловая зависимость нормированной интенсивности дифракционного порядка для центрального акустического прохода ( $m=0$ ), снятая на частоте  $F_0 = 500$  МГц, представлена на рис. 3. Как известно [5], угловая зависимость (рис. 3) эквивалентна зависимости частотной с учетом пересчетного соотношения

$$\Delta\theta = (\lambda_0/2V)\Delta F. \quad (15)$$

Экспериментальное значение полосы акустооптического взаимодействия  $\Delta F'$ , определенное на уровне половинной интенсивности, составляет 63 МГц, в то время как теоретическое значение [1, 2]

$$\Delta F' = 1,8nV^2/\lambda_0LF_0 = 54 \text{ МГц}.$$

Отличие теоретического значения от экспериментального, очевидно, может быть объяснено, если учесть конкретную конечную расходимость падающей световой волны.

На рис. 4 представлена экспериментальная дисперсионная угловая зависимость, измеренная на частоте  $F_0 = 1000$  МГц и характеризующая частотно-временное положение максимумов дифракции для различных акустических отражений. Экспериментальное частотное разделение смежных акустических отражений  $\Delta F_0$ , рассчитанное в соответствии с (15), составило  $\sim 120$  МГц.

Следует отметить, что небольшое число полезно используемых акустических отражений здесь ограничено заметным затуханием акустической энергии, возникающим при переотражении акустической волны от торцов светозвукопровода. Причем экспериментально отмечено, что если затухание при отражении от тыльного (свободного) торца свето-

звукпровода составляет  $\sim 0,5-1,5$  дБ в частотном диапазоне 500—1000 МГц, то затухание при отражении от фронтального (нагруженного пьезопреобразователем) торца заметно больше и в заданном диапазоне составляет 4,0—6,0 дБ. Объяснение этого заметного различия в затуханиях заключается в том, что во втором случае сказывается влияние индиевого связующего слоя, который и вызывает значительную величину затухания акустической волны.

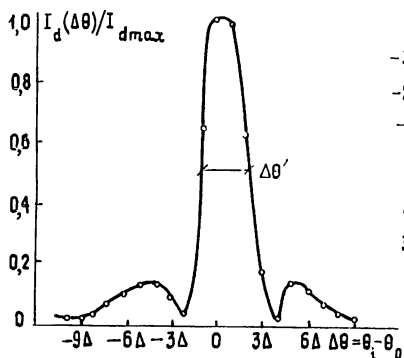


Рис. 3.

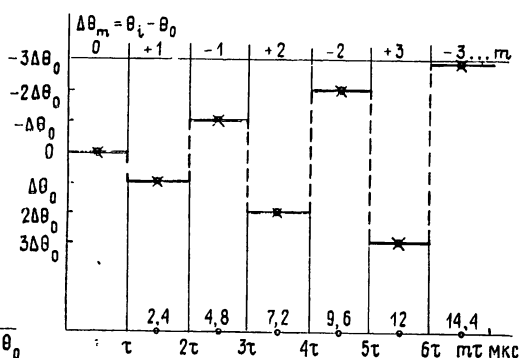


Рис. 4.

Рис. 3. Угловое распределение интенсивности дифракционного порядка от единичного акустического отражения;  $\Delta\theta' = \lambda_0 \Delta F' / 2V$ ,  $\Delta = 0,87 \cdot 10^{-3}$  рад,  $F_0 = 500$  МГц,  $m = 0$ ,  $L = 10$  мм.

Рис. 4. Дисперсионные угловые зависимости ( $F_0 = 1000$  МГц)  $\Delta\theta_0 = n\beta = 5,8 \cdot 10^{-3}$  рад.

Видимо, более рациональным решением с рассматриваемых позиций будет использование систем возбуждения, в которых применяется слабая акустическая связь между пьезоизлучателем и звукпроводом, например «нерезонансное» возбуждение [5]. Кроме того, использование материалов с низкими значениями скоростей акустических волн (например  $\text{TeO}_2$ ) позволит снизить величину средних рабочих частот, при которых сохраняются условия брэгговского режима дифракции, и одновременно значительно уменьшить потери при отражении акустической волны в связующих слоях. Дополнительное увеличение информационной емкости таких устройств может быть получено при использовании корректирующих цепей со специальной формой амплитудно-частотных характеристик.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кулаков С В Акустооптические устройства спектрального и корреляционного анализа сигналов — Л.: Наука, 1978.
2. Ребрин Ю. К. Управление оптическим лучом в пространстве — М.: Сов. радио, 1977.
3. Gottlieb M., Songro T. T. — Appl. Opt., 1972, 12, № 8, p. 1922
4. Cohen M. G., Gordon E. J. — Bell Syst. Techn. J., 1965, 14, № 4, p. 693
5. Клудзин В. В. — Изв вузов — Радиофизика, 1974, 17, № 2, с. 261.
6. Клудзин В. В., Пресленев Л. Н. — Межвузовский сб. Акустооптические методы и техника обработки информации. — Л.: ЛЭТИ, 1980, с. 54.

Ленинградский институт авиационного приборостроения

Поступила в редакцию  
5 октября 1981 г.

#### PECULIARITIES OF LIGHT DIFFRACTION BY REGULAR REFLECTIONS OF AN ACOUSTIC WAVE

V. V. Kludzin

Peculiarities are considered of the acoustooptical interaction in multiple acoustic wave reflections divided by a fixed angle. The main characteristics are presented of the system acoustooptical interaction on the basis of the Bragg regime. Experimental results show a good agreement with the calculation data.