

## Раздел IV. Радиотехника и акустика

УДК 621.372

DOI 10.23683/2311-3103-2018-2-174-184

Д.П. Волик

### КОРРЕКЦИЯ АЧХ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ДЕФЛЕКТОРА С ЩЕЛЕВЫМ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

*Применительно к акустооптическому дефлектору СВЧ диапазона длин волн, в котором ультразвук возбуждается с поверхности пьезоэлектрического кристалла – ниобата лития щелевым пьезопреобразователем, проанализирована возможность коррекции основных параметров его амплитудно-частотной характеристики. Управление амплитудно-частотной характеристикой и, в частности, расширение полосы рабочих частот, а также подавление паразитных полос пропускания, осуществляется путём формирования соответствующего амплитудного распределения электрического и, как следствие, акустического поля в пространстве между планарными электродами. Проанализированы несколько частных случаев распределения сформированного поля, спадающего от центра к краям по направлению падающего света электродинамической возбуждающей ультразвук структуры: по линейному закону, по закону косинус на «пьедестале», а также по закону Гаусса. Для исследуемых распределений проанализированы формы амплитудно-частотных характеристик и их отличия от традиционной, описываемой функцией вида  $[\sin(x) / x]^2$ , которая формируется неаподизированным щелевым поверхностным пьезопреобразователем. Показано, что степень подавления паразитных (боковых) полос пропускания акустооптического дефлектора может составлять порядка (30–40) дБ, при расширении полосы рабочих частот, составляющем для разных распределений от 10 % до 30 %, сопровождающееся незначительным снижением эффективности дифракции. Предложены конструкции пьезопреобразователей, позволяющих обеспечить исследуемые распределения возбуждаемых полей, изготовление которых может быть реализовано стандартными методами микроэлектроники, которые широко используются при изготовлении устройств на поверхностных акустических волнах.*

*Акустооптический дефлектор; щелевой пьезопреобразователь; поверхностное возбуждение ультразвука; ниобат лития; аподизация; амплитудно-частотная характеристика.*

D.P. Volik

### CORRECTION OF THE AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTIC OF AN ACOUSTOOPTICAL DEFLECTOR WITH A GAP PIEZO TRANSDUCER

*For an acousto-optic deflector of the microwave range of wavelengths in which ultrasound is excited from the surface of a piezoelectric crystal-lithium niobate by a gap piezoelectric transducer, the possibility of correcting the main parameters of its amplitude-frequency characteristic is analyzed. The control of the amplitude-frequency characteristic and, in particular, the widening of the band of operating frequencies, as well as the suppression of parasitic transmission bands, are carried out by forming the corresponding amplitude distribution of the electric and acoustic fields in the space between the planar electrodes. Several special cases of the distribution of the generated field, decreasing from the center to the edges in the direction of the incident light, of the electrodynamic ultrasound-exciting structure are analyzed according to the linear law, the cosine-on-pedestal law, and the Gauss's law. For these distributions, the shapes of the amplitude-frequency characteristics and their differences from the traditional one, described by a function of*

*the form  $[\sin(x)/x]^2$ , which is formed by a unapodized gap surface piezo transducer are analyzed. It shown is that the degree of suppression of parasitic transmission bands of an acousto-optic deflector can be of the order of (30–40) dB, with an increase in the band of operating frequencies for different distributions from 10 % to 30 %, accompanied by a slight decrease in diffraction efficiency. Proposed are the constructions of piezoelectric transducers that allow providing the investigated field distributions, the production of which can be realized by standard microelectronics methods widely used in the manufacture of devices on surface acoustic waves.*

*Acoustooptical deflector; gap piezo transducer; surface excitation of ultrasound; lithium niobate; apodization; amplitude-frequency characteristic.*

**Введение.** Основной областью применения акустооптических дефлекторов (АОД) с поверхностным возбуждением ультразвука [1–4] являются СВЧ измерительные устройства радиотехнического назначения: СВЧ частотомеры, спектроанализаторы, корреляторы, демодуляторы ЧМ и ФМ сигналов [5–8]. В таких АОД ультразвуки в объём светозвукопровода, выполненного на основе пьезоэлектрического кристалла, чаще всего  $\text{LiNbO}_3$ , генерируется с помощью двухэлектродных [2, 4, 9], многоэлектродных [1, 3, 10] или торцевых [11] металлических преобразователей, нанесённых непосредственно на верхнюю грань упомянутого пьезоэлектрика определённого среза. По той причине, что при поверхностном возбуждении коэффициент преобразования электрической мощности в акустическую невелик, то в большинстве практических случаев стараются выбирать срез и геометрию акустооптического (АО) взаимодействия, обеспечивающую максимальную величину произведения  $kM_2$ , где  $k$  – коэффициент электромеханической связи,  $M_2$  – показатель АО качества, что при прочих равных условиях, гарантирует получение в АОД максимального значения дифракционной эффективности. Как для АОД с пластинчатым и плёночным преобразователями, так и АОД с поверхностным возбуждением ультразвука, актуальным является задача синтеза их АЧХ с заданными свойствами и параметрами. Для низкочастотных АОД с пластинчатыми преобразователями в работах [12, 13] формирование АЧХ с подавленными боковыми полосами пропускания предложено осуществлять путём секционирования преобразователей и подачи на них разного уровня возбуждающих напряжений, или, например, выполнения самих преобразователей с изменяющимся сечением в направлении распространения света. В работе [14] секции поверхностного многоэлементного пьезопреобразователя изготавливались с разным периодом расположения встречных штырей.

Однако по причине известных технологических трудностей изготовления пластинчатых преобразователей результаты упомянутых работ не могут быть непосредственно распространены на АОД СВЧ диапазона частот, для которых толщины пластинчатых или плёночных преобразователей составляют доли или единицы микрон.

**Задачей, решаемой в данной работе, является** анализ влияния аподизации щелевого поверхностного пьезопреобразователя на основных технические параметры и характеристики АОД. На основе использования результатов работ [12, 13] предложено и проанализировано несколько вариантов аподизации, обеспечивающих формирование заданных АЧХ, в частности, с расширенными полосами пропускания, лучшей неравномерностью, а также с подавленными каналами внеполосного приёма радиосигналов.

Рассмотрим эскиз конструкции АОД (см. рис.1) с щелевым пьезопреобразователем (1), светозвукопровод (2) которого выполнен на основе  $\text{LiNbO}_3$ , возбуждающее напряжение  $U_0 \cos(2\pi f t)$  с амплитудой  $U_0$  и частотой  $f$  прикладывается к двум электродам, нанесённым на верхнюю грань кристалла, а на противоположную грань кристалла нанесён поглотитель (3), на переднюю грань подаётся модулируемое лазерное излучение (4); геометрические размеры электродов: их длина и, соответственно, длина АО взаимодействия –  $l$ , ширина каждого электрода –  $a$ , рас-

стояние между внутренними краями электродов –  $2b$ , а между внешними –  $2d$ .  $\text{LiNbO}_3$ , благодаря хорошему сочетанию пьезоэлектрических и упругооптических свойств, является основным материалом, используемым для разработки АОД. Для АОД СВЧ диапазона длин волн особый интерес представляет плоскость  $yOz$  кристалла  $\text{LiNbO}_3$ , для которой значение коэффициента электромеханической связи по тангенциальному полю достигает наибольшей величины, в частности, для направления ( $Y-120^\circ$ )  $k = 0,68$ ; с поверхности данного среза эффективно возбуждается сдвиговая волна с поляризацией по оси  $y$ , скорость распространения которой  $v = 3,6$  км/с. При изменении направления распространения этой поперечной волны в плоскости  $xOz$  в пределах  $20^\circ$  её скорость, как показывает расчёт [2], изменяется на  $0,2\%$ , т.е. анизотропией  $v$  можно пренебречь.

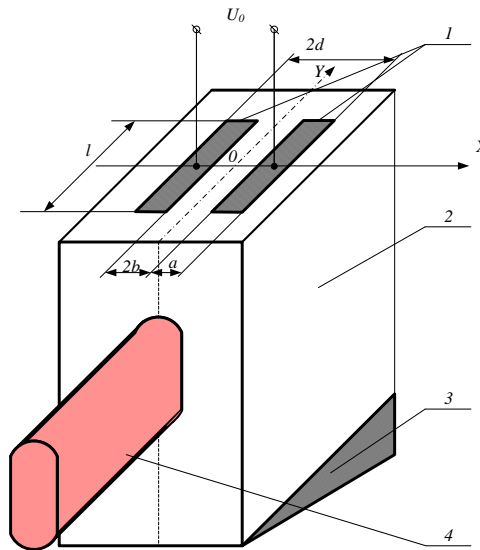


Рис. 1. АОД с щелевым пьезопреобразователем

Немаловажно также отметить, что в данном случае для двух других типов волн – продольной с поляризацией по оси  $z$  и сдвиговой с поляризацией по оси  $x$  имеет место  $k = 0$ . Последнее обстоятельство обеспечивает возможность реализации в АОД повышенного динамического диапазона уровней модулируемых радиосигналов. При этом на основе данных работ [2, 9] в случае падения света на АОД с  $\lambda = 0,63$  мкм и поляризацией перпендикулярной направлению распространения звука, значение  $M_2$  также является одним из наибольших, и составляет величину, равную  $24 \cdot 10^{-15}$  с<sup>3</sup>/кг. Как показывают экспериментальные исследования, значение дифракционной эффективности для АОД с данной геометрией АО взаимодействия, при условии согласования щелевого преобразователя с 50-омным СВЧ трактом [18, 19], в диапазоне (1,5 ÷ 2,0) ГГц составляет (10 ÷ 30) % при 1 Вт входной электрической мощности, что, в целом, сопоставимо с дифракционной эффективностью современных АОД с пластинчатыми и плёночными преобразователями [17].

Таким образом, в рассматриваемой задаче исходным является то, что с поверхности сечением ( $l \times 2b$ ) возбуждается ультразвуковая волна, амплитудное распределение которой вдоль оси  $y$ :

$$A(y) = a(y) \exp[j(Kz - \omega t)], \quad (1)$$

где  $K = 2\pi/\Lambda$ ,  $\omega = 2\pi f$ ,  $\Lambda = v/f$ .

В линейном режиме работы АОД при изотропной дифракции угловая и частотная зависимости интенсивности дифрагированного света  $I_g = \Psi(f)$  и, соответственно, АЧХ представляют собой диаграмму направленности поверхностного пьезопреобразователя [15] в плоскости  $yOz$ , т.е. Фурье-образ распределения амплитуды  $a(y)$  упругой деформации вдоль оси  $Oz$ . Следовательно, записав выражение для нормированной амплитуды дифрагированного света [15]

$$C = \frac{q^*}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} a(y) \exp(j\eta y) dy, \quad (2)$$

где  $q^* = \pi n^3 p_{эф} / \lambda$ ,  $\eta = 0,5K(\Theta_0 - \Theta_\delta)$  – параметр расстройки,  $\Theta_0$  – угол падения света на АОД,  $\Theta_\delta = -\lambda f / (2nv)$  – угол Брэгга,  $p_{эф}$  – упругооптическая постоянная,  $n$  – коэффициент преломления, АЧХ можно представить в виде

$$\frac{I_d}{I_0} = \Psi(f) = |H_a|^2, \quad (3)$$

где  $H_a = \frac{q^*}{2} \int_{-l/2}^{l/2} a(y) \exp(jK(\Theta_0 - \Theta_\delta)y) dy$  – передаточная функция АОД.

При равноамплитудном возбуждении раскрыва поверхностного преобразователя  $a(y) = a_0$  и из (3) выражение для АЧХ следует в виде [15]:

$$\Psi(f) = (0,5ql)^2 \operatorname{sinc}^2 \left( \frac{f_0^2 l \lambda}{2nv^2} F(F+1) \right), \quad (4)$$

в котором  $f_0$  выбрано из условия равенства  $\Theta_0 = \Theta_\delta(f_0)$ ,  $F = (f - f_0) / f_0$  – нормированная частота входного сигнала,  $q = \frac{\pi}{\lambda \cos \Theta_0} \sqrt{\frac{M_2 P_a}{2lb}}$ ,  $\operatorname{sinc}[x] = \frac{\sin(\pi[x])}{\pi[x]}$  –

функция отсчёта,  $P_a = k \cdot P_{ex}$  – мощность бегущей в светозвукопроводе АОД звуковой волны,  $k$  – коэффициент трансформации электрической мощности входного сигнала –  $P_{ex}$  в акустическую –  $P_a$ .

Рассмотрим имеющее значительный практический интерес амплитудное распределение вида «косинус  $m$ -й степени на пьедестале» (рис. 2):

$$a(y, m) = a_0 \left[ A + (1 - A) \cos^m(\pi y / l) \right], \quad (5)$$

где  $a_0 A$  – значение амплитуды ультразвукового поля на краю пьезопреобразователя (пьедестал), причём  $A \leq 1$ ,  $m = 1, 2, 3, \dots$  – целое число. После введения новых переменных [16]  $y = 0,5l \cdot \xi$  и  $0,5l \cdot \eta = \chi$ , интеграл (2) запишется в виде:

$$C = 0,5q^* \int_{-1}^1 a(0,5l \cdot \xi) \exp(j\xi\chi) dy. \quad (6)$$

Последний вид записи выражения для нормированной амплитуды дифрагированного света и принятая форма амплитудного распределения ультразвука обеспечивают возможность расчёта АЧХ АОД путём использования известных из антенной техники соотношений, описывающих соответствующие диаграммы направленности антенн с произвольным амплитудно-фазовым распределением.

Принимая во внимание тождество

$$\cos^m \left( \frac{\pi \xi}{2} \right) e^{j\xi\chi} = \frac{1}{2^m} \sum_{i=0}^m C_m^i e^{j \left[ \chi + (m-2i) \frac{\pi}{2} \right] \xi},$$

где  $C_m^i = \frac{m!}{(m-i)!i!}$  – коэффициенты бинома Ньютона и, воспользовавшись упомя-

нутыми известными результатами [16], обобщённое выражение для АЧХ АОД можно записать в виде:

$$\Psi(f) = \left( \frac{q^* l a_0}{2} \right)^2 \left( A \cdot \text{sinc} \left( \frac{f_0^2 l \lambda}{2 n v^2} F(F+1) \right) + \frac{1-A}{2^m} \sum_{i=0}^m C_m^i \cdot \text{sinc} \left( \frac{f_0^2 l \lambda}{2 n v^2} F(F+1) + \frac{m-2i}{2} \right) \right)^2. \quad (7)$$

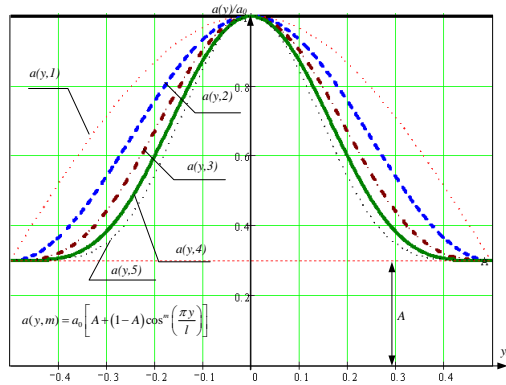


Рис. 2. Вид амплитудного распределения поля типа «косинус  $m$ -й степени на пьедестале»

Рассмотрим АЧХ АОД соответствующие частным случаям распределения (5).

При равноамплитудном возбуждении раскрыва преобразователя, когда  $A=1$ , (7) переходит в выражение (4) из которого следует, что ширина АЧХ АОД по уровню 3 дБ, следующая из условия  $(\sin(x)/x)^2 = 0,5$ , составляет величину, равную

$\Delta f_{\Sigma} = \pm 1.8 n v^2 / (l \lambda)$ , т.е.  $\Delta f_{\Sigma} = 0,317$  ГГц. Вышесказанное иллюстрируется нормированной АЧХ (рис. 3), рассчитанной для следующих данных:  $\lambda = 0,6328$  мкм;  $f_0 = 1,75$  ГГц;  $v = 3,6$  км/с;  $k = 0,68$ ;  $n = 2,29$ ;  $l = 150$  мкм,  $M_2 = 24 \cdot 10^{-15}$  с<sup>3</sup>/кг.

Из рис. 3 следует, что «уровень» первых двух боковых полос пропускания составляет  $\approx 4,7$  % от основного уровня АЧХ, а ширина этих паразитных полос пропускания «по нулям» примерно равна  $0,11 \cdot F$ .

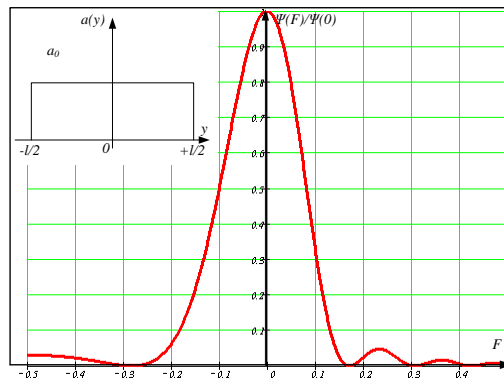


Рис. 3. Нормированная АЧХ для АОД с равномерным распределением возбуждающего поля

Если амплитуда возбуждения ультразвука спадает к краям апертуры преобразователя по закону косинуса, т.е. в соотношении (5) имеет место  $m = 1$  и  $A \neq 1$ , то выражение для АЧХ такого АОД выглядит следующим образом:

$$\Psi(f) = (0,5q^*l \cdot a_0)^2 \left( A \cdot \text{sinc} \left( \frac{f_0^2 l \lambda}{2nv^2} F(F+1) \right) + \frac{1-A}{2} \left[ \text{sinc} \left( \frac{f_0^2 l \lambda}{2nv^2} F(F+1) + \frac{1}{2} \right) + \text{sinc} \left( \frac{f_0^2 l \lambda}{2nv^2} F(F+1) - \frac{1}{2} \right) \right] \right)^2. \quad (8)$$

Соотношение (8) состоит из трёх слагаемых вида  $A \cdot \text{sinc}(x)$ . Первое слагаемое имеет максимум на частоте  $F=0$ , последние два слагаемых представляют собой функции  $\text{sinc}(x)$ , которые сдвинуты вдоль оси  $F$  на величину  $\pm nv^2 / (l \lambda f_0^2)$  от начала координат. Из (8) видно, что эффективность дифракции задаётся первым слагаемым, тогда как уширение АЧХ определяется последними двумя слагаемыми. При увеличении амплитуды пьедестала дифракционная эффективность АОД возрастает, а полоса рабочих частот уменьшается.

На рис. 4 приведены нормированные АЧХ, соответствующие данному амплитудному распределению, а также зависимость эффективности дифракции от величины пьедестала  $A$ ; они рассчитывались при тех же численных данных, что и АЧХ, изображенные на рис. 3.

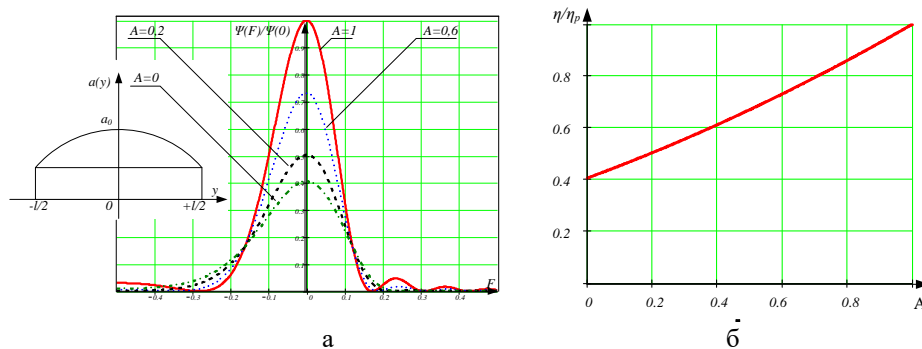


Рис. 4. Нормированные АЧХ для АОД с возбуждающим полем типа косинус на пьедестале

Из расчётов следует, что при спаде амплитуды ультразвука к краям преобразователя в два раза, т.е. при  $A = 0.5$ , полоса рабочих частот АОД по уровню 3дБ составит  $\Delta f_{\Sigma}^c = 0,355$  ГГц, т.е. расширится на  $\sim 12\%$ , а уровень первого бокового максимума составит 22,4 % от аналогичного уровня, характерного для первого случая.

При спаде амплитуды до нуля, т.е. при  $A = 0$ , полоса рабочих частот ещё больше расширяется:  $\Delta f_{\Sigma}^c = 0,438$  ГГц, а величина первого максимума уменьшается ещё в 5,3 раза и составляет  $\sim 4,0$  % от значения этого же максимума, соответствующего АЧХ АОД при равноамплитудном распределении ультразвука.

Для амплитудного распределения с равномерным спадом от середины пьезо-преобразователя к краям, описываемым выражением (9):

$$a(y) = a_0 \begin{cases} 1 + \frac{y}{0.5l}, & \text{при } -0.5l \leq y < 0, \\ 1 - \frac{y}{0.5l}, & \text{при } 0.5l > y \geq 0, \\ 0, & \text{при } y < -0.5l, y \geq 0.5l, \end{cases} \quad (9)$$

после подстановки (9) в выражение (2), получим:

$$\begin{aligned} \frac{I_d}{I_0} = \Psi(f) = |H_a|^2 &= \left| \frac{q^*}{2} \int_{-l/2}^{l/2} a(y) \exp(j\eta y) dy \right|^2; \\ \int_{-l/2}^{l/2} a(y) \exp(j\eta y) dy &= \int_{-l/2}^0 \left(1 + \frac{2y}{l}\right) \exp(j\eta y) dy + \int_0^{l/2} \left(1 - \frac{2y}{l}\right) \exp(j\eta y) dy = \\ &= l \left[ \frac{\sin^2(\eta l / 4)}{(\eta l / 4)^2} \right] = l \cdot \text{sinc}^2 \left( \frac{f_0^2 l \lambda}{4nv^2} F(F+1) \right). \end{aligned}$$

Таким образом, АЧХ для третьего случая амплитудного распределения будет описываться соотношением:

$$\Psi(f) = |H_a|^2 = \left( \frac{q^* l a_0}{2} \right)^2 \text{sinc}^4 \left( \frac{f_0^2 l \lambda}{4nv^2} F(F+1) \right). \quad (10)$$

Как показывает анализ [19] АЧХ АОД с таким распределением симметрична относительно  $f_0$  вне зависимости от знака и величины коэффициента, стоящего перед  $y$ . Что касается паразитных боковых полос пропускания, то их наличие не является ярко выраженным как в предыдущих случаях (они сливаются с основной полосой пропускания), однако их уровень также уменьшается. Нормированная АЧХ для данного случая  $\Psi_3(F)$ , рассчитанная при тех же численных данных, что и в предыдущих вариантах, приведена на рис. 5 вместе с АЧХ для равноамплитудного распределения ультразвука  $\Psi_1(F)$ .

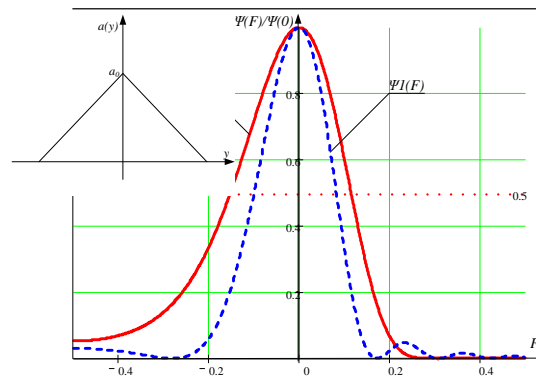


Рис. 5. АЧХ АОД с равномерно спадающим от середины к краям преобразователя возбуждающим полем

Расчёты показывают, что ширина полосы рабочих частот достигает  $\Delta f_{\Sigma} = 0,471$  ГГц, а амплитуда первого максимума составит 4.7 % от аналогичного уровня, характерного для случая равноамплитудного распределения возбуждаемого пьезопреобразователем ультразвука.

В принципиальном плане следует отметить, что, как хорошо известно [16], при амплитудном распределении вида:

$$a(y) = a_0 \exp\left[-(\alpha \cdot y)^2\right], \quad (11)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, и бесконечно большой протяженности преобразователя паразитные полосы пропускания в АЧХ АОД можно полностью подавить.

Подставив амплитудное распределение (16) в выражение (2), получим соотношение для расчёта АЧХ:

$$\begin{aligned} \Psi(f) &= \left| \frac{q^*}{2} \int_{-l/2}^{l/2} a(y) \exp(j\eta y) dy \right|^2 = \\ &= \left| \frac{q^* a_0}{2} \int_{-l/2}^{l/2} \exp\left[-(\alpha \cdot y)^2\right] \exp\left(j \frac{f_0^2 \lambda}{nv^2} F(F+1)y\right) dy \right|^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Как следует из проведённого анализа, параметры АЧХ АОД со щелевым поверхностным преобразователем зависят и задаются, помимо его протяжённости –  $l$ , выбором соответствующего вида распределения амплитуды ультразвука вдоль оси  $y$ .

Виды возможных поверхностных пьезопреобразователей, межэлектродное расстояние между которыми формирует рассмотренные выше амплитудные распределения ультразвука, приведены на рис. 6.

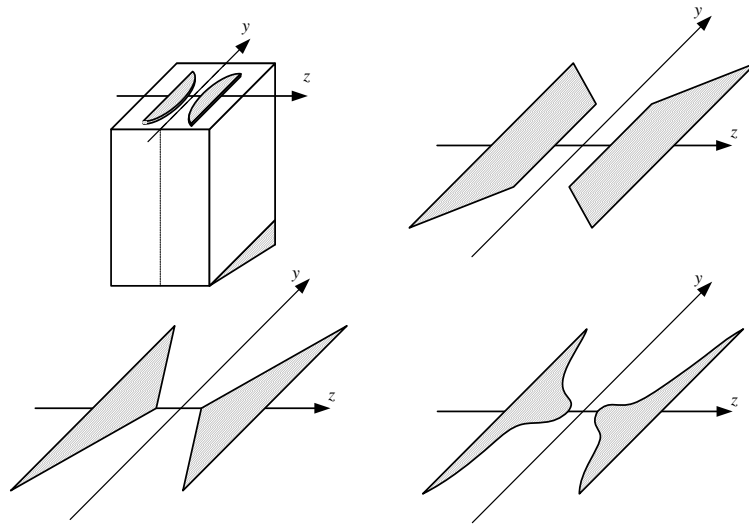


Рис. 6. Некоторые конструкции щелевых пьезопреобразователей, обеспечивающие спадающее по амплитуде от центра к краям поле

**Выводы.** На основе использования известных результатов работ, касающихся улучшения параметров АОД с пьезопреобразователями произвольной формы, и данных, известных из антенной техники, относящихся к расчёту диаграмм направленности антенн с изменяющейся по тому или иному закону амплитудой возбуждения их раскрытов, показало, что применительно к изотропным АОД со щелевыми поверхностными преобразователями возможна коррекция их АЧХ.

Коррекция АЧХ АОД, осуществляемая технологически простым образом, может сводиться к уменьшению неравномерности АЧХ в полосе частот, к расширению самой полосы рабочих частот, и, главное, возможно подавление паразитных полос пропускания. Степень улучшения указанных параметров определяется ис-



пользуемым законом аподизации щелевого преобразователя и, например, подавление уровня паразитных полос пропускания может составить десятки децибел при умеренной потере дифракционной эффективности АОД.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Rozdobudko V.V., Bakaryuk T.V.* An acoustooptical microwave deflector with the surface excitation of ultrasound // Instruments and Experimental Techniques. – 2003. – Vol. 46, No. 1. – P. 67-69.
2. *Краковский В.А.* Возбуждение объёмных упругих волн с поверхности пьезокристаллов симметрии 3m // Известия ВУЗов. Физика. – 1997. – Т. 40, № 5. – С. 27-34.
3. *Volik D.P., Rozdobudko V.V.* Amplitude-frequency response of an acoustooptical deflector with an apodized surface piezoelectric transducer // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. – 2009. – Vol. 54, No. 6. – P. 888-893.
4. *Пивоваров И.И., Волик Д.П., Роздобудько В.В.* Акустооптический СВЧ-дефлектор на основе анизотропного LiNbO<sub>3</sub> X-среза с поверхностным пьезопреобразователем // Вопросы специальной радиоэлектроники. – 2012. – № 1. – С. 94-103.
5. *Роздобудько В.В.* Широкополосные акустооптические измерители частотных и фазовых параметров радиосигналов // Радиотехника. – 2001. – № 1. – С. 79-92.
6. *Волик Д.П., Шibaев С.С., Помазанов А.В.* Принципы построения и реализация акустооптических измерителей параметров радиосигналов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 11 (148). – С. 175-182.
7. *Роздобудько В.В., Пелипенко М.И.* Быстродействующий измеритель параметров СВЧ радиосигналов // Специальная техника. – 2006. – № 1. – С. 28-36.
8. *Шibaев С.С., Волик Д.П., Роздобудько В.В.* Акустооптический приемник-частотомер на основе дефлектора с противофазным возбуждением ультразвука // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2008. – Вып. 4. – С. 32-38.
9. *Демидов А.Я., Задорин А.С.* Исследование аномального акустооптического взаимодействия в кристалле ниобата лития // Известия ВУЗов СССР. – Физика. – 1981. – № 7. – С. 42-47.
10. *Rozdobudko V.V., Shibaev S.S., Pelipenko M.I.* A multichannel acoustooptical deflector with a planar delay-line structure for ultrasound excitation // Instruments and Experimental Techniques. – 2005. – Vol. 48, No. 4. – P. 509-514.
11. *Ефанов В.И., Коваленко Е.С.* Двумерное сканирование света акустическими модами пластин // Автометрия. – 1985. – № 6. – С. 87-90.
12. *Волошинов В.Б., Князев Г.А.* Акустооптические ячейки с неодинаковой длиной взаимодействия в поперечном сечении светового пучка // ЖТФ. – 2003. – Т. 73, № 11. – С. 118-122.
13. *Парыгин В.Н., Вершубский А.В., Филатова Е.Ю.* Оптимизация функции пропускания акустооптической ячейки с аподизированным пьезопреобразователем // ЖТФ. – 2001. – Т. 71, № 9. – С. 73-78.
14. *Волик Д.П., Роздобудько В.В.* Разработка и исследование акустооптического СВЧ-дефлектора с секционированным поверхностным пьезопреобразователем // Вопросы специальной радиоэлектроники. – 2010. – № 2. – С. 110-122.
15. *Балакиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е.* Физические основы акустооптики. – М.: Радио и связь. – 1985. – 280 с.
16. *Шубарин Ю.В.* Антенны сверхвысоких частот. – Харьков: Изд-во Харьковского университета, 1960. – 284 с.
17. [www.brimrose.com](http://www.brimrose.com).
18. *Шарангович С.Н.* Особенности аномальной широкополосной дифракции света на фокусированном акустическом луче // Оптика и спектроскопия. – 1985. – Т. 59, № 4. – С. 835-840.
19. *Вахтин Ю.В., Волик Д.П., Малышев В.А.* Широкополосные согласователи больших частотнозависимых перепадов активных сопротивлений в микроволновых трактах на сосредоточенных параметрах // Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн – 2009», Таганрог-Дивноморское, 2009 г. – С. 296-299.
20. *Ерохин Г.А., Чернышёв О.В., Козырев Н.Д., Кочержевский В.Г.* Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн: учебник для ВУЗов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 491 с.

## REFERENCES

1. Rozdobudko V.V., Bakaryuk T.V. An acoustooptical microwave deflector with the surface excitation of ultrasound, *Instruments and Experimental Techniques*, 2003, Vol. 46, No. 1, pp. 67-69.
2. Krakovskiy V.A. Vozbuzhdenie ob'emnykh uprugikh voln s poverkhnosti p'ezokristallov simmetrii 3m [The excitation of bulk elastic waves from the surface of the piezoelectric crystal of symmetry 3m], *Izvestiya VUZov. Fizika* [Russian Physics Journal], 1997, Vol. 40, No. 5, pp. 27-34.
3. Volik D.P., Rozdobudko V.V. Amplitude-frequency response of an acoustooptic deflector with an apodized surface piezoelectric transducer, *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2009, Vol. 54, No. 6, pp. 888-893.
4. Pivovarov I.I., Volik D.P., Rozdobudko V.V. Akustoopticheskiy SVCh-deflektor na osnove anizotropnogo LiNbO<sub>3</sub> X-sreza s poverkhnostnym p'ezopreobrazovatelem [Acousto-optic microwave deflector based on anisotropic LiNbO<sub>3</sub> X-cut with surface piezoelectric transducer], *Voprosy spetsial'noy radioelektroniki* [Questions of special radio electronics], 2012, No. 1, pp. 94-103.
5. Rozdobudko V.V. Shirokopolosnye akustoopticheskie izmeriteli chastotnykh i fazovykh parametrov radiosignalov [Broadband acousto-optic meters of frequency and phase parameters of radio signals], *Radiotekhnika* [Radiotechnics], 2001, No. 1, pp. 79-92.
6. Volik D.P., Shibaev S.S., Pomazanov A.V. Printsipy postroeniya i realizatsiya akustoopticheskikh izmeriteley parametrov radiosignalov [The principles of construction and realization of the acousto-optic measuring parameters of radio signals], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 11 (148), pp. 175-182.
7. Rozdobudko V.V., Pelipenko M.I. Bystrodeystvuyushchiy izmeritel' parametrov SVCh radiosignalov [High-speed measuring parameters microwave radio signals], *Spetsial'naya tekhnika* [Special technique], 2006, No. 1, pp. 28-36.
8. Shibaev S.S., Volik D.P., Rozdobudko V.V. Akustoopticheskiy priemnik-chastotomer na osnove deflektora s protivofaznym vozbuzhdeniem ul'trazvuka [Acoustooptic receiver-cymometer on the base of deflector with anti-phase excitation of ultrasound], *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities: Radioelectronics], 2008, Issue 4, pp. 32-38.
9. Demidov A.Ya., Zadorin A.S. Issledovanie anomal'nogo akustoopticheskogo vzaimodeystviya v kristalle niobata litiya [The study of anomalous acousto-optical interaction in the lithium niobate crystal], *Izvestiya VUZov SSSR. Fizika* [Russian Physics Journal], 1981, No. 7, pp. 42-47.
10. Rozdobudko V.V., Shibaev S.S., Pelipenko M.I. A multichannel acoustooptical deflector with a planar delay-line structure for ultrasound excitation, *Instruments and Experimental Techniques*, 2005, Vol. 48, No. 4, pp. 509-514.
11. Efanov V.I., Kovalenko E.S. Dvumernoe skanirovanie sveta akusticheskimi modami plastin [Two-dimensional scanning of light by acoustic modes of plates], *Avtometriya* [Autometry], 1985, No. 6, pp. 87-90.
12. Voloshinov V.B., Knyazev G.A. Akustoopticheskie yacheyki s neodinakovoy dlinoy vzaimodeystviya v poperechnom sechenii svetovogo puchka [Acousto-optic cells with different length of interaction in the cross section of the light beam], *ZhTF* [Journal of Applied Physics], 2003, Vol. 73, No. 11, pp. 118-122.
13. Parygin V.N., Vershubskiy A.V., Filatova E.Yu. Optimizatsiya funktsii propuskaniya akustoopticheskoy yacheyki s apodizirovannym p'ezopreobrazovatelem [Optimization of the transmission function of acousto-optic cells with a piezoelectric transducer abolitionism], *ZhTF* [Journal of Applied Physics], 2001, Vol. 71, No. 9, pp. 73-78.
14. Volik D.P., Rozdobudko V.V. Razrabotka i issledovanie akustoopticheskogo SVCh-deflektora s sektionirovannym poverkhnostnym p'ezopreobrazovatelem [Development and investigation of acoustooptical microwave deflector with a partitioned surface with a piezoelectric transducer], *Voprosy spetsial'noy radioelektroniki* [Questions of special radio electronics], 2010, No. 2, pp. 110-122.
15. Balakshiy V.I., Parygin V.N., Chirkov L.E. Fizicheskie osnovy akustooptiki [Physical foundations of acousto-optics]. Moscow: Radio i svyaz', 1985, 280 p.
16. Shubarin Yu.V. Antenny sverkhvysokikh chastot [Ultra-high frequency antennas]. Khar'kov: Izd-vo Khar'kovskogo universiteta, 1960, 284 p.
17. Available at: [www.brimrose.com](http://www.brimrose.com).

18. *Sharangovich S.N.* Osobennosti anomal'noy shirokopolosnoy difraktsii sveta na fokusirovannom akusticheskom luche [Features of anomalous broadband light diffraction on a focused acoustic beam], *Optika i spektroskopiya* [Optics and spectroscopy], 1985, Vol. 59, No. 4, pp. 835-840.
19. *Vakhtin Yu.V., Volik D.P., Malyshev V.A.* Shirokopolosnye soglasovateli bol'shikh chastotnozavisimyykh perepadov aktivnykh soprotivleniy v mikrovolnovykh traktakh na sosredotochennykh parametrakh [Broadband coordinators of large frequency-dependent active resistance drops in microwave paths on concentrated parameters], *Trudy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Izlučenje i rasseyaniye elektromagnitnykh voln – 2009», Taganrog-Divnomorskoye, 2009 g.* [Proceedings of the International scientific conference "radiation and scattering of electromagnetic waves – 2009", Taganrog-Divnomorskoye, 2009], p. 296-299.
20. *Erokhin G.A., Chernyshev O.V., Kozyrev N.D., Kocherzhevskiy V.G.* Antenno-fidernyye ustroystva i rasprostraneniye radiovoln: uchebnyk dlya VUZov [Antenna-feeder devices and distribution of radio waves: textbook for Universities]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2004, 491 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.Е. Лысенко.

**Волик Денис Петрович** – Южный федеральный университет; e-mail: DVolik@sfedu.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: +78634361573; кафедра радиотехнической электроники; ассистент.

**Volik Denis Petrovich** – Southern Federal University; e-mail: DVolik@sfedu.ru; 2, Shevchenko, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634361573; the department of radioengineering electronics; assistant.

УДК 658.51.011

DOI 10.23683/2311-3103-2018-2-184-193

**А.В. Палий, Н.Н. Чернов**

### **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛОТВОДА С ТЕПЛОАГРУЖЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ВОЗДУХА**

*Приведено численное исследование эффективности поверхности тепловода, в основу которого заложены уравнения Навье-Стокса и переноса энергии, включенные в математический аппарат решателя системы автоматического проектирования Ansys Fluent. Проведено исследование неэффективности неравномерной прогрева площади поверхности штыревого тепловода, взятого в качестве примера типичной классической конструкции радиатора. Необходимость оптимизации теплоотводящей поверхности радиатора обоснована: во-первых, отсутствием общего подхода к проблеме неэффективности использования материалов; а во-вторых, повышенная температура эксплуатации изделий электронной техники является не только причиной отказов, но и значительно ухудшает их основные параметры, что приводит к необходимости поиска и применения различных способов и методов охлаждения, обеспечивающих сохранение параметров в заданных нормах. По мере усложнения аппаратуры, увеличения количества применяемых элементов и степени их интеграции, вопросы отвода тепла, а также методы расчетов тепловых режимов приобретают особое значение. Исходными данными проведенного вычислительного эксперимента являются следующие. На вход канала с заданной скоростью и температурой подается воздушный поток, обтекающий штыревой тепловод с внутренним точечным источником тепла. Скорость потока соответствует числу Маха  $M \ll 1$ . Внешняя температура (в том числе начальная температура радиатора)  $22^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент теплопередачи медь/воздух  $11,3 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ . Мощность источника  $5 \text{ W}$ . Требуется определить распределение температурного поля на поверхности радиатора с целью выявления неэффективных участков площади тепловода. Внешняя среда в рабочем пространстве – воздух, считается несжимаемой невесомой вязкой теплопроводной жидкостью. Обтекание сим-*