

## Акустооптический согласованный фильтр для сверхширокополосного ЛЧМ-сигнала

© Л.Н. Магдич, А.В. Мороз, В.П. Савченко, Н.Н. Семеновский

АО «НПО дальней радиолокации имени академика А.Л. Минца»

*Рассмотрен выбор параметров дизайна акустооптического согласованного фильтра с «самофокусировкой», основанного на объемной изотропной дифракции лазерного излучения  $\lambda = 532$  нм на быстрой акустической волне в парателлурите, для сверхширокополосного (параметр широкополосности  $\eta = 0,67$ ) сигнала с линейной частотной модуляцией.*

**Ключевые слова:** акустооптика, линейная частотная модуляция, согласованная фильтрация, пьезопреобразователь.

**Введение.** Акустооптические (АО) устройства используются для выполнения вычислительно емких операций обработки сигналов типа свертки в комбинированных аналого-цифровых процессорных системах [1]. Фильтрация радиосигналов акустооптическим согласованным фильтром (АОСФ) в режиме реального времени с высокой пропускной способностью представляет интерес для радиолокационных приложений. Первые публикации по АОСФ появились в начале 1960-х гг. [2–5], они относились к объемным (bulk) системам с пространственным интегрированием и фиксированным транспарантом (маской) опорного сигнала. Позже были описаны АОСФ с динамическим транспарантом, в которых опорный сигнал можно выбирать в реальном времени [6], системы согласованной фильтрации сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), в которых используется эффект «самофокусировки» и применения транспаранта не требуется [7, 8], а также некоторые другие. Обзор ранних публикаций по АОСФ дан в работе [10].

В 1970-е гг. стремление к миниатюризации сместило акцент исследований в область волноводной (guided-wave) акустооптики, в которой свет и звук распространяются в двумерных волноводах, что привело к появлению АОСФ на поверхностных акустических волнах (ПАВ) [10]. Было показано [11], что АОСФ для ЛЧМ на ПАВ способен эффективно работать при низких входных отношениях сигнал/шум ( $-30$  дБ), характерных для радиолокационных приложений. В ряде публикаций было рассмотрено применение АОСФ для обработки сигналов, представляющих интерес для радиолокации, но отличных от ЛЧМ, например, фазоманипулированных [12] и пачечных многочастотных сигналов [13].

В работе [14] описан АОСФ на парателлурите с полосой 200 МГц и центральной частотой 675 МГц для радиолокационного обнаружения малоразмерных целей в условиях мощных отражений от земной поверхности. В [15] показано внедрение АОСФ в РЛС X-диапазона системы MICOM, используемой US Army Missile Command с 1962 г. в рамках программы модернизации системы DARPA.

Поскольку АОСФ обычно используется в области частот ниже 1 ГГц [16], для работы в X-диапазоне на фронтенде приемника (интерфейсе согласования антенны приемника с его «ядром» — RF Front End) применяется гетеродинирование сигнала с понижением частоты. Начиная с диапазона ультравысоких (UHF) частот (обычно от 300 МГц до 1 ГГц), который актуален, например, для обслуживания малоразмерных целей в приземном слое [17, 18], гетеродинирования с понижением частоты не требуется, и реализация приемника с АОСФ существенно упрощается. Упрощается и использование сверхширокополосных (СШП) радиолокационных сигналов, которые характеризуются параметром широкополосности [19]

$$\eta = B/f_0 \geq 0,2, \quad (1)$$

где  $B/f_U - f_L$  — полоса сигнала;  $f_0 = (f_U + f_L)/2$  — центральная частота;  $f_U, f_L$  — верхняя и нижняя граничные частоты. В UHF СШП-сигналы актуальны для подповерхностной геолокации [20] и аэрокосмической разведки [21, 22].

Акустооптический фильтр для СШП-сигналов является естественным обобщением узкополосных АОСФ [23]. Радиолокационный приемник при этом обеспечивает высокое разрешение по дальности (с привлечением метода триангуляции — по трем пространственным координатам), а при высоком отношении сигнал/шум — малую случайную ошибку оценки координат, т. е. высокую точность целеуказаний.

В данной работе рассмотрен выбор параметров дизайна АОСФ с «самофокусировкой» при объемной изотропной дифракции лазерного излучения  $\lambda = 532$  нм на быстрой акустической волне в парателлурите для СШП ЛЧМ с  $f_L = 300$  МГц,  $f_U = 600$  МГц ( $\eta = 0,67$ ). Приводятся результаты измерений рабочих характеристик изготовленных экспериментальных образцов устройства.

**Дизайн АОСФ.** Сжатые сроки на разработку проекта обусловили выбор простейшего варианта построения АОСФ для ЛЧМ с «самофокусировкой» (рис. 1). Такая конфигурация АОСФ на сапфире  $\text{Al}_2\text{O}_3$  была рассмотрена в работе [7], где было экспериментально продемонстрировано сжатие ЛЧМ-сигнала с  $f_L = 1362$  МГц,  $f_U = 1437$  МГц ( $B = 75$  МГц,

$\eta = 0,05$ ) и длительностью от  $T_s = 240$  нс до  $\tau = 15$  нс. Измеренная длительность сжатого сигнала  $\tau$  близка к ожидаемому значению согласованной фильтрации  $B^{-1} \cong 13,3$  нс, а коэффициент сжатия  $T_s/\tau = 16$  примерно равен базе сигнала — произведению длительности на полосу сигнала TBP (Time Bandwidth Product, TBP),  $P = P_s = 18$ .

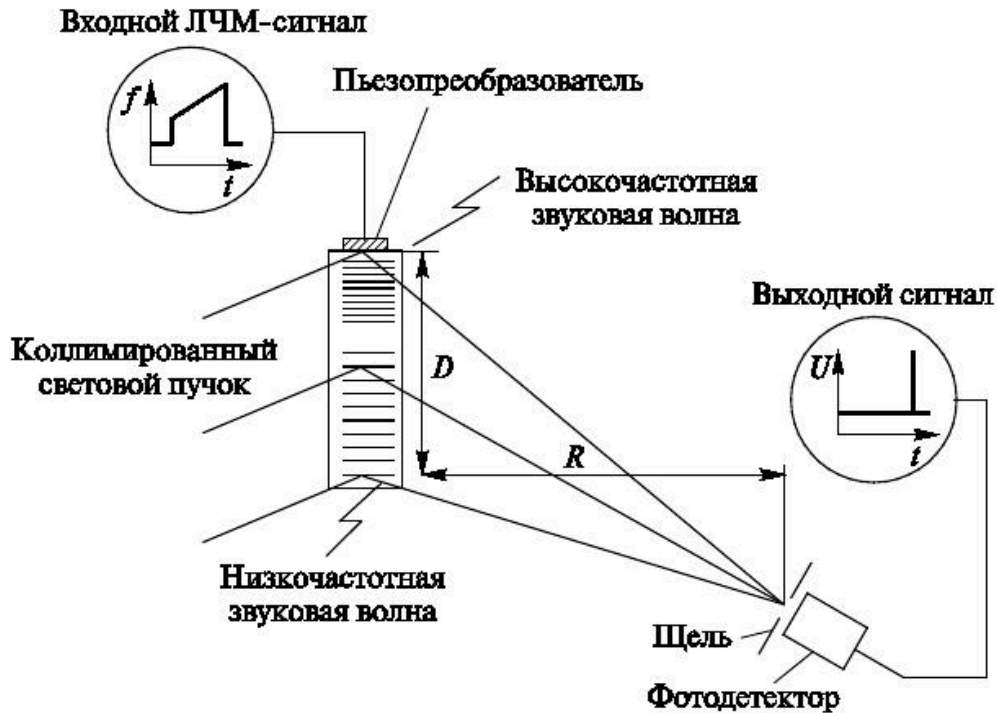


Рис. 1. Схематическое представление устройства АОСФ для ЛЧМ с «самофокусировкой» [7]

В работе [8] рассматривался АОСФ с ячейкой на кристалле  $Y_3Ga_5O_{12}$  для ЛЧМ с  $f_L = 1130$  МГц,  $f_U = 1190$  МГц ( $B = 60$  МГц,  $\eta = 0,05$ ) и длительностью сигнала  $T_s = 2$  мкс. Измеренная длительность сжатого сигнала составила  $\tau = 18$  нс, что хорошо согласуется с величиной  $B^{-1} \cong 16,7$  нс, а коэффициент сжатия  $T_s/\tau = 111$  близок к  $P = P_s = 120$ . В работе [8], в отличие от [7], для облучения ячейки использовался свет от точечного источника, что упрощало выполнение брэгговского условия дифракции для всей полосы  $B$ .

Из результатов, приведенных в [7, 8], видно, что для узкополосных сигналов с  $\eta \ll 1$  АОСФ ведет себя как обычный радиотехнический согласованный фильтр, ключевые параметры которого — длительность сжатого сигнала  $\tau \sim B^{-1}$  и коэффициент сжатия  $T_s/\tau \sim P_s$  — определяются исключительно параметрами сигнала.

Для сигналов с большой базой ТВР, в том числе для СШП-сигналов, на функционал АОСФ начинают влиять свойства фотоупругих АО-материалов, применяемых в АО-ячейке, в частности поглощение акустических волн, пропорциональное квадрату частоты волны [24]. Максимальная полоса пропускания фильтра определяется полосой пропускания АО-ячейки (при условии, что выходной фотодетектор достаточно широкополосный). Временное окно фильтра ограничено временным окном АО-ячейки, поскольку для формирования корреляции обрабатываются данные, одновременно «видимые» в ячейке. Потенциальные рабочие характеристики системы АОСФ, хотя и зависят от специфических особенностей ее дизайна, но в конечном счете всегда ограничены параметрами АО-ячейки [10]. В этом — основное отличие АОСФ для СШП-сигналов от узкополосных и радиотехнических согласованных фильтров.

Характерные графики связи (tradeoff) между  $B$  и  $P$  для некоторых фотоупругих материалов показаны на рис. 2 [9].

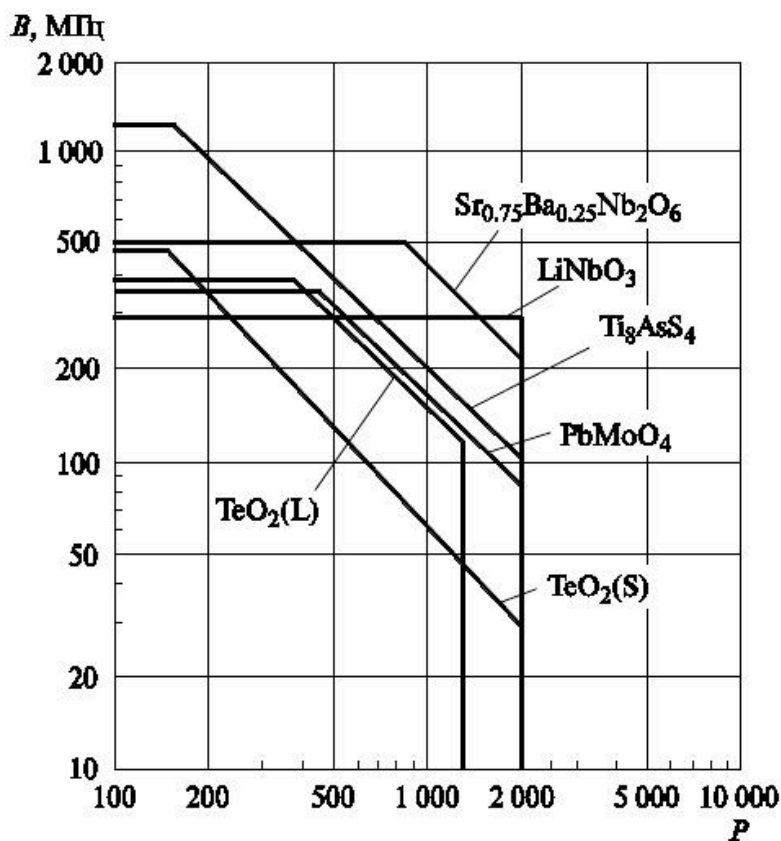


**Рис. 2.** Обобщенные графики параметров  $B$  (МГц) и  $P$  для некоторых АО-материалов (горизонтальные линии графиков представляют пределы, обусловленные акустическим затуханием, вертикальные линии определяются размером апертуры АОСФ, выбранным для представления графиков (5 см))

Рассматриваемый в нашей работе случай АОСФ на продольной акустической волне в парателлурите представлен на рис. 2 кривой  $\text{TeO}_2(L)$ . Для нее максимально возможная полоса составляет  $B_{\max} \cong 400$  МГц, возможная длительность сигнала изменяется от  $T_{\min} \cong 0,25$  мкс (для значения  $P = 100$ ) до  $T_{\max} \cong 12$  мкс (для значения  $P \cong 1400$ ). График имеет излом при  $B \cong 400$  МГц,  $P \cong 400$  (длительность временного окна в точке излома  $T = 1$  мкс). При достаточно малых длительностях входного сигнала ТВР можно считать пропорциональным  $T_s$ :  $P = P_s = B_{\max} T_s$  и длительность сжатого сигнала  $\tau \sim B_{\max}^{-1}$ , как в узкополосном АОСФ. Справа от точки излома характер зависимости ТВР от  $B$  и  $T$  изменяется:  $P = P(B, T)$  (tradeoff), при этом длительность сжатого сигнала

$$\tau = T_s / P \quad (2)$$

уже будет зависеть от конкретных значений параметров входного сигнала и особенностей кривой  $\text{TeO}_2(L)$  (см. рис. 2).

Для рассматриваемой полосы  $B = 300$  МГц, которая представлена точкой на кривой  $\text{TeO}_2(L)$  за изломом, максимально возможный коэффициент сжатия  $P = 500$ , чему соответствует величина временной апертуры ячейки  $T_{500/300} \cong 1,7$  мкс. При этом ожидаемая по аналогии с радиотехникой длительность сжатого сигнала  $\tau B^{-1} \cong 3,3$  нс может быть достигнута в АОСФ лишь при длительностях входного сигнала  $T \leq 1,7$  мкс. Для рассматриваемой в работе длительности входного сигнала  $T_s = 4$  мкс при  $B = 300$  МГц ожидаемая длительность сжатого сигнала, согласно (2), будет

$$\tau \cong 8 \text{ нс.} \quad (3)$$

Заметим, что (3) примерно в 2,5 раза больше длительности сжатого сигнала  $\tau \cong 3,3$  нс для полосы  $B = 300$  МГц радиотехнического согласованного фильтра и узкополосного АОСФ. Физическая причина, по-видимому, связана с поглощением звука в АО-кристалле, которое, как отмечается в [25], является основным фактором, ограничивающим апертуру ячейки в высокочастотных дефлекторах.

Нетрудно оценить эффект поглощения звука для простой модели поглощающей одномерной среды, следуя технике вычислений, изложенной в [26]. Пусть звуковая волна  $U(x, t)$  распространяется в положительном направлении оси  $x$ ,  $x \geq 0$ . На границе  $x = 0$  (выход пьезопреобразователя) задано граничное условие  $U(0, t) = U_0(t)$ , где  $U_0(t)$  описывает входной сигнал. Для каждой частотной спектральной компоненты Фурье поля звуковой волны среда распространения (АО-ячейка

с поглощением) описывается комплексным волновым числом, вещественная часть которого обеспечивает распространение фазы волны со скоростью звука  $V$ , а мнимая — затухание волны из-за поглощения, пропорционального квадрату частоты:

$$\begin{aligned}k &= k' + ik''; \\k' &= 2\pi/\Lambda = 2\pi f/V = \omega/V; \\k'' &= \beta\omega^2, \quad \beta > 0.\end{aligned}$$

Здесь  $\Lambda$  — длина волны на частоте  $f$ ;  $V$  — скорость звука;  $\omega = 2\pi f$ ;  $\beta$  — показатель затухания.

Несложные выкладки приводят к выражению

$$U(x, t) = (2\pi)^{-1} \int U_0(\tau + \xi) \exp(-\tau^2/(4\beta x)), \quad (4)$$

где  $\xi = t - x/V$  — запаздывающее время является точным решением рассматриваемой граничной задачи, описывающим звук в АО-ячейке в виде свертки входного сигнала с ядром диффузионного типа, которое при  $\beta x \rightarrow 0$  стремится к дельта-функции  $\delta(\tau)$ . При этом (4) будет представлять невозмущенный входной сигнал, бегущий в положительном направлении оси  $x$  со скоростью  $V$ :

$$U(x, t) = U_0(t - x/V).$$

Рассмотрим (4) для ЛЧМ-сигнала:

$$U_0(t) = \exp, \quad (5)$$

где  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $\mu = \pi(f_U - f_L)/T_s$  — девиация круговой частоты;  $T_s$  — длительность сигнала. Подстановка (5) в (4) приводит к интегралу, который не вычисляется в элементарных функциях. В данном случае достаточно приближенно вычислить этот интеграл методом перевала. В результате найдем

$$U(x, t) \cong (1 - 4i\beta x\mu)^{-1/2} \exp\left((i\omega_0\xi + i\mu\xi^2 - \beta x\omega_0^2) \parallel (1 - 4i\beta x\mu)\right). \quad (6)$$

При  $\beta x \rightarrow 0$  (6) сводится к (5) с запаздывающим временем, т. е. входной ЛЧМ-сигнал распространяется в АО-ячейке без искажений в положительном направлении оси  $x$  со скоростью  $V$ , а дифракция света на нем обеспечивает «самофокусировку» (см. рис. 1). Узкополосный сигнал, у которого центральная частота достаточно велика, так что значение

$\beta x \omega_0^2$  в (6) не мало, но девиация частоты мала, так что  $4\beta x \mu \ll 1$  для всех  $x$ , распространяется в АО-ячейке как бы под стационарной амплитудной маской  $\exp(-\beta x \omega_0^2)$ . Спад амплитуды приводит к тому, что эффективный размер апертуры АО-ячейки  $D \cong \beta^{-1} \omega_0^{-2}$  может оказаться меньше ее геометрического размера  $D$ , а угловой размер дифракционного пятна  $\lambda/D$ , соответственно, больше ожидаемого значения  $\sim \lambda/D$ . Наконец, для СШП-сигнала (1) немалым в (6) может оказаться также значение  $4\beta x \mu$ , что приведет к амплитудно-фазовым искажениям ЛЧМ-звука в АО-ячейке и еще большему снижению эффекта «самофокусировки».

Ограниченный объем статьи не позволяет рассмотреть здесь этот интересный вопрос более подробно, соответствующие результаты будут представлены в следующих публикациях.

Конструктивно изготовленный в работе макет АОСФ состоит из АО-ячейки и оптической линзово-призмной коллиматорной системы, обеспечивающей равномерную засветку апертуры ячейки (рис. 3).

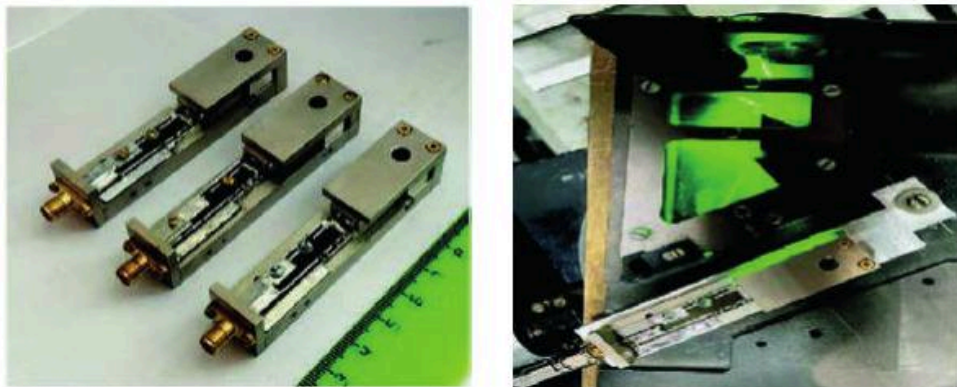


**Рис. 3.** Разработанный и изготовленный макет АОСФ:

*a* — АО-ячейка; *б* — оптическая коллиматорная система

Акустическая ячейка выполнена из кристалла парателлуриата, в котором в направлении оси  $[001]$  (рис. 4) распространяется быстрая акустическая волна со скоростью 4,2 км/с. Пространственная апертура ячейки вдоль оси  $[001]$  (рис. 4, б)  $D = 20$  мм, что соответствует временной апертуре  $T = 4,8$  мкс, так что рассматриваемый в работе ЛЧМ-импульс длительностью  $T_s = 4$  мкс может полностью заполнить ячейку. Другие размеры ячейки, показанные на рис. 4, *a*:  $20 \times 10 \times 6$  мм.

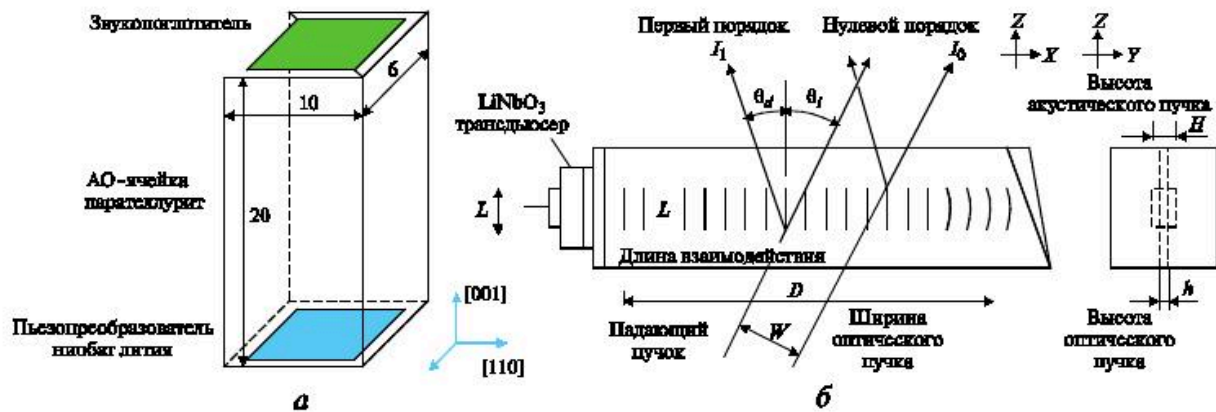


Рис. 4. Размеры АО-ячейки и геометрия взаимодействия света и звука в ней

Пьезопреобразователь — пластина из ниобата лития  $36^\circ\text{X}$  среза, сошлифованная до полуволновой толщины  $\Lambda/2 \cong 7,3$  мкм для центральной частоты диапазона  $f_0 = (f_U + f_L)/2 = 450$  МГц, для которой  $\Lambda = V/f_0 = 14,6$  мкм. Преобразователь соединен с кристаллом парателлуриг методом холодной индиевой сварки в вакууме [27]. Для передачи энергии СШП-радиосигнала в акустическую волну необходимо согласование акустических импедансов ( $pV$ ) пьезопластин из ниобата лития и парателлуриг. Здесь  $p$  — плотность материала,  $V$  — скорость звука. Для ниобата лития  $36^\circ\text{X}$  среза  $pV = 49 \cdot 10^5$  г/см<sup>2</sup>·с, а для быстрой волны в парателлуриг  $pV = 25 \cdot 10^5$  г/см<sup>2</sup>·с. Согласование выполняется в процессе диффузионной сварки подбором толщины и  $pV$  промежуточного слоя. Пьезопластина, присоединенная к звукопроводу, является комплексной нагрузкой для радиосигнала и должна быть согласована с трактом 50 Ом. Эффективность согласования определяется величиной коэффициента стоячей волны (КСВ). На рис. 5 показана частотная зависимость КСВ, измеренная на одном из изготовленных макетов АОСФ.

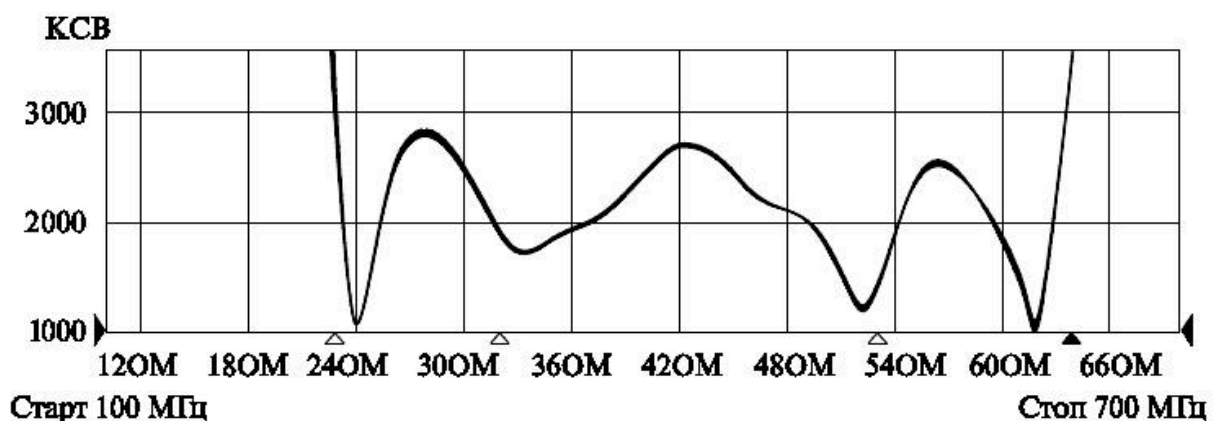


Рис. 5. Частотная зависимость КСВ от частоты тестового синусоидального радиосигнала

Важным параметром эффективности АО-ячейки является количество света, дифрагированного в первый брэгговский максимум. Для кристалла парателлурита выбранной ориентации и продольной звуковой волны при слабом взаимодействии света и звука можно пользоваться следующим выражением [27]:

$$\mu = \left( \frac{Ps}{54} \right) \left( \frac{L}{H} \right) M_2 \left( \frac{0,63}{\lambda_0} \right)^2, \quad (7)$$

где показатель качества  $M_2$  берется по отношению к  $M_2$  плавленого кварца,  $M_2 = 23$ ;  $Ps$  — акустическая мощность, Вт, здесь  $Ps \sim 0,1$ ;  $\lambda_0$  — длина волны света в вакууме, мкм,  $\lambda_0 = 0,53$ . Основным параметром, от которого существенно зависит решение уравнения (7), является отношение длины преобразователя к его ширине  $L/H$  (см. рис. 4, б). Выбору этих параметров для СШП-сигналов посвящены работы [28, 29].

Длина преобразователя  $L$  в направлении распространения света определяется из условия достаточной расходимости звуковой волны для обеспечения АО брэгговского взаимодействия во всем рабочем диапазоне частот  $f_L = 300$  МГц,  $f_U = 600$  МГц [28]:

$$L = L_0 l, \quad L_0 = n \Lambda^2 / \lambda_0, \quad (8)$$

где  $n = 2,26$  — показатель преломления парателлурита; нормализованная длина взаимодействия  $l$  зависит от величины параметра широкополосности (1) (рис. 6) и для рассматриваемого здесь случая относительной полосы  $\eta = 0,67$  в октаву  $l \cong 3$ .

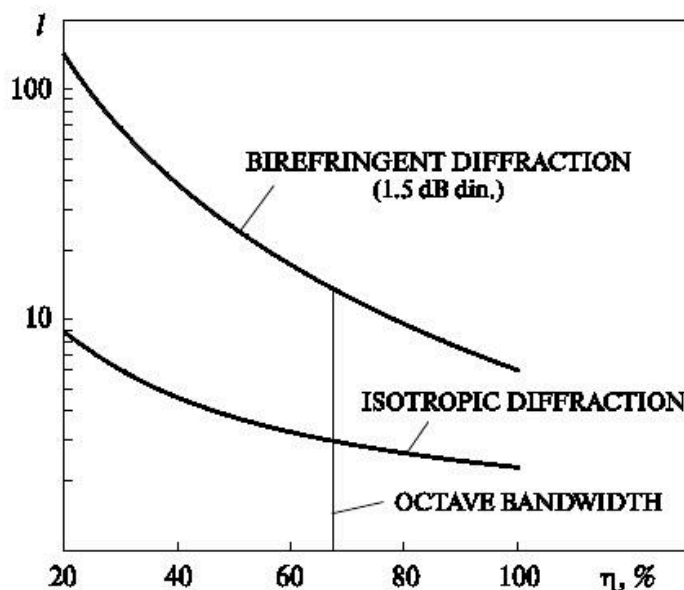


**Рис. 6.** Зависимость нормализованной длины взаимодействия  $l = L/L_0$  от относительной полосы для изотропной (isotropic) и анизотропной (birefringent) дифракции [28]

Для рассматриваемых в работе параметров  $L_0 \cong 0,37$  мм,  $L \cong 1$  мм.

Высота преобразователя  $H$  (размер в поперечном направлении  $y$ , см. рис. 4) определяется условием, что вся апертура ячейки  $D$  лежит в ближней зоне акустического излучателя размером  $H$ . Для рассматриваемого случая изотропной дифракции при равномерном возбуждении преобразователя размер ближней зоны оценивается как  $H^2/\Lambda$  [29]. Отсюда следует

$$H = (D\Lambda)^{1/2} \cong 0,4 \text{ мм.} \quad (9)$$

Подстановка (9) в (7) приводит к оценке эффективности дифракции АОСФ

$$\mu \cong 15 \text{ \%}.$$

Лучи дифракции первого порядка расходятся с лучом нулевого порядка в брэгговском ЛЧМ-дефлекторе на частоте  $f_L = 300$  МГц на  $\theta_L = \lambda_0 f_L / V = 38$  мрад, а на частоте  $f_U = 600$  МГц — на  $\theta_U = 76$  мрад и при полном заполнении ячейки ЛЧМ-сигналом пересекаются на расстоянии  $R$  [7]:

$$R = V^2 / (\lambda_0 \alpha), \quad (10)$$

где  $\alpha = B/T_s$  — девиация частоты ЛЧМ.

Диаметр дифракционного пятна при полностью освещенной апертуре  $D$ , которая из-за поглощения звука, как отмечалось выше, может отличаться от геометрического размера ячейки  $D = 20$  мм,

$$d = \lambda_0 R / D = VT_s / P, \quad (11)$$

где введен ТВР ячейки  $P = DB/V$ . Учитывая, что скорость перемещения пятна в предметной плоскости равна  $V$ , из (11) получаем длительность сжатого сигнала для АОСФ с «самофокусировкой»  $\tau = T_s / P$ , что совпадает с (2).

**Результаты измерений.** Длительность сжатого сигнала измерялась осциллографом с высоким временным разрешением, подключенным к ФП, установленным на расстоянии  $R$  (10) за коллиматорной щелью с шириной  $d_0 < d$  в соответствии с рис. 1. Измеренное значение  $\tau = 10$  нс лишь незначительно (20 %) отличается от ожидаемой теоретической оценки (3). Экспериментальная оценка коэффициента сжатия  $T_s / \tau = 400$  превосходит значения, показанные другими авторами для АОСФ с «самофокусировкой».

**Заключение.** В работе выбраны параметры и изготовлены макеты акустооптического согласованного фильтра на парателлурите для СШП ЛЧМ-сигнала с коэффициентом широкополосности 0,67. Измеренное значение длительности сжатого сигнала оказалось близким к ожидаемому теоретическому значению, коэффициент сжатия составил 400.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Lee J.N., VanderLugt A. Acoustooptic Signal Processing and Computing. *Proceedings of the IEEE*. 1989, vol. 77, no. 10, pp. 1528.
- [2] Cutrona L.J., Leith E.N., Palermot C.J., Porcello L.J. Optical Data Processing and Filtering Systems. *IRE Transactions on Information Theory*. 1960, vol. IT-6, p. 386.
- [3] Slobodin L. Optical correlation technique. *Proceedings of the IEEE*. 1963. vol. 51, p. 1782.
- [4] Arm M., Lambert L., Weissman I. Optical correlation techniques for radar pulse compression. *Proceedings of the IEEE*. 1964, vol. 52, p. 842.
- [5] Gerig J.S., Montague H. A simple optical filter for chirp radar. *Proceedings of the IEEE*. 1964, vol. 52, p. 1753.
- [6] Atzeni C., Pantani L. Optical Signal-Processing Through Dual-Channel Ultrasonic Light Modulators. *Proceedings of the IEEE*. 1970, vol. 58, p. 501.
- [7] Collins J.H., Lean E.G.H., Shaw H.J. Pulse Compression by Bragg diffraction of light with microwave sound. *Appl. Phys. Lett.* 1967, vol. 11, p. 240.
- [8] Schulz M.B., Holland M.C., Davis L. Optical Pulse Compression Using Bragg Scattering by Ultrasonic Waves. *Appl. Phys. Lett.* 1967, vol. 11, p. 237.
- [9] Chang I.C. Acousto-Optic Devices and Applications. *Handbook of Optics*. Vol. 2: Devices, Measurements and Properties. Optical Society of America. 2<sup>nd</sup> ed. McGraw-Hill, Inc., 1995.
- [10] Sprague R.A. A Review of Acousto. *Optic Signal Correlators*. *SPIE*. 1976, vol. 90, p. 136.
- [11] Chen S.T. *Guided-Wave Acousto-Optics. Interactions, Devices and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1990.
- [12] Berg N.J., Lee J.N., Casseday M.W. Acousto-Optic Implementation of Real and Near-Real-Time Signal Processing. *Optical Engineering*. 1979, vol. 18, p. 420.
- [13] Кузичкин А.В. Оптический коррелятор сложных фазоманипулированных сигналов. *Радиотехника и электроника*. 1979, т. 24, с. 2360.
- [14] Есепкина Н.А., Лавров А.П., Дмитриев С.В. Акустооптический процессор радиосигналов с дискретной частотной модуляцией. *Письма в ЖТФ*. 1997, т. 23, № 2, с. 12.
- [15] Zari M.C., Berinato R.J., Zwilling A.F. Acousto-Optic Signal Processors for Air Defense Sensors. *SPIE*. 1992, vol. 1704, p. 158.
- [16] Viveiros E.A., Harrison L.J., Patterson M.S., Berinato R.J., Williams K.W., Riasati V.R., Durrett R.A. Acousto-Optic Range Doppler Processor Design for Radar Insertion. *SPIE*. 1992, vol. 1704, p. 19.
- [17] Rhodes W.T. Acousto-Optic Signal Processing: Convolution and Correlation. *Proceedings Of The IEEE*. 1981, vol. 69, no. 1, p. 65.

- [18] Kuschel H. VHF/UHF radar. Part I: Characteristics. *Electronics & Communication Engineering Journal*. 2002, v. 14, no. 2, p. 61.
- [19] Kuschel H. VHF/UHF radar. Part II: Operational aspects and Applications. *Electronics & Communication Engineering Journal*. 2002, vol. 14, no. 3, p. 101.
- [20] Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. 1. Основные понятия, модели и методы описания. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2008, т. 13, № 2, с. 166.
- [21] Lewis C., Gogineni S., Rodriguez-Morales F., Panzer B., Stumpf T., Paden J., Leuschen C. Airborne fine-resolution UHF radar: an approach to the study of englacial reflections, firn compaction and ice attenuation rates. *Journal of Glaciology*. 2015, vol. 61, no. 225, p. 89.
- [22] Soumekh M. Reconnaissance with Ultra Wideband UHF Synthetic Aperture Radar. *IEEE Signal Processing Magazine*. 1995, vol. 12, no. 4, p. 21.
- [23] Hellsten H., Ulander L.M.H. Airborne Array Aperture UWB UHF Radar — Motivation and System Considerations. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2000, vol. 15, no. 5, p. 35.
- [24] Mcmahon D.H. Wideband Pulse Compression via Brillouin Scattering in the Bragg Limit. *Proceedings of the IEEE*. 1967, vol. 55, no. 9, p. 1602.
- [25] Балакий В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. *Физические основы акустооптики*. Москва, «Радио и связь», 1985.
- [26] Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. *Теория волн*. Москва, «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1979.
- [27] Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. *Акустооптические устройства и их применение*. Москва, «Советское радио», 1978.
- [28] Chang I.C. Design of wideband acousto-optic Bragg cells. *SPIE*. 1982, vol. 352, p. 34.
- [29] Hecht D.L., Petrie G.W. Acousto-Optic Diffraction From Acoustic Anisotropic Shear Modes in Gallium Phosphide. *Ultrasonics Symposium-1980*. Boston, p. 474.

**Магдич Леонид Николаевич** — д-р техн. наук, профессор, ведущий инженер АО «НПО дальней радиолокации имени академика А.Л. Минца». e-mail: LMagdich@npodr.ru

**Мороз Александр Васильевич** — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, начальник отдела АО «НПО дальней радиолокации имени академика А.Л. Минца». e-mail: amoroz@npodr.ru

**Савченко Владимир Петрович** — д-р тех. наук, профессор, заместитель генерального директора по науке АО «НПО дальней радиолокации имени академика А.Л. Минца». e-mail: VSavchenko@npodr.ru

**Семеновский Николай Николаевич** — ведущий инженер АО «НПО дальней радиолокации имени академика А.Л. Минца». e-mail: NSemenovskii@npodr.ru

## Acousto-optic filter matched to UWB chirp signal

© L.N. Magdich, A.V. Moroz, V.P. Savchenko, N.N. Semenovskij

Long-Range Radar, JSC

*The choice of design parameters of an acousto-optic matched filter with "self-focusing" based on volume isotropic diffraction of laser radiation  $\lambda = 532$  nm on a fast acoustic wave in paratellurite for an ultra-wideband (bandwidth parameter  $\eta = 0.67$ ) signal with linear frequency modulation is considered. The results of measurements of the operating characteristics of the device manufactured experimental samples show good agreement with theoretical estimates.*

**Keywords:** *acousto-optics, linear frequency modulation, matched filtering, piezoelectric transducer.*

**Magdich L.N.**, Dr. Sci (Eng.), Prof., Lead Engineer at the Long-Range Radar, JSC.  
e-mail: LMagdich@npodr.ru

**Moroz A.V.**, Ph.D. (Phys. and Math.), Senior Research Scientist, Head of Department at the Long-Range Radar, JSC. e-mail: amoroz@npodr.ru

**Savchenko V.P.**, Dr. Sci (Eng.), Prof., Deputy Director General for Science at the Long-Range Radar, JSC. e-mail: VSavchenko@npodr.ru

**Semenovskij N.N.**, Lead Engineer at the Long-Range Radar, JSC.  
e-mail: NSemenovskii@npodr.ru