

УДК 621.391.272

EDN: NLDAFE

PACS: 81.05. -t



## Широкополосный амплитудный демодулятор на основе фотоупругого эффекта и оптимизация его характеристик

А. Р. Гасанов, Р. А. Гасанов, А. Р. Рустамов, Э. А. Агаев,  
Р. А. Ахмедов, М. В. Садыхов

*Фотоупругий эффект обсуждается в контексте демодуляции амплитудно-модулированного сигнала. Разработана физико-математическая интерпретация физических процессов формирования сигнала на выходе демодулятора. Доказано, что при согласовании параметров полезного сигнала с параметрами взаимодействующих оптической и упругой волн сигнал на выходе фотодетектора повторяет форму сообщения во входном амплитудно-модулированном сигнале. Это утверждение обсуждается в полосе частот ниже частоты среза, которая формируется диаметром считывающего светового пучка и скоростью распространения упругой волны в фотоупругой среде. Описаны теоретические и экспериментальные методы определения частоты среза акустооптического амплитудного демодулятора.*

*Ключевые слова:* фотоупругий эффект, амплитудно-модулированный сигнал, демодулятор, световой пучок, упругая волна, частота среза.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-1-81-87

### Общие сведения и постановка задачи

В современной радиоэлектронной борьбе обнаружение и обработка неизвестных радио-

излучений является одной из основных задач. Для решения этой задачи используются многочисленные методы и средства, в том числе акустооптические системы [1–6]. При этом радиосигнал априори представляется как высокочастотное колебание, один из параметров которого содержит полезную информацию. После выполнения необходимых процедур радиоприема полезная информация извлекается из радиочастотного сигнала с помощью соответствующего демодулятора.

Акустооптический эффект обладает некоторыми уникальными свойствами, которые можно использовать для демодуляции радиосигналов, обеспечивая при этом лучшее извлечение широкополосной информации. Имеются сведения [7] о разработке акустооптических модуляторов, возбуждаемых от подводимой мощности в несколько десятков милливатт, что еще больше повышает актуальность использования особенностей акустооптического эффекта для построения демодуляторов.

**Гасанов Афиг Рашид оглы**, д.т.н. профессор.

E-mail: afig.gasanov.51@mail.ru

**Гасанов Руслан Афиг оглы**, д.т.н. доцент.

E-mail: ruslan-icq@mail.ru

**Рустамов Асад Рустам оглы**, к.т.н., профессор.

E-mail: asad-rustam@mail.ru

**Агаев Эльгюн Агамехти оглы**, к.т.н., ст. преподаватель.

E-mail: elgun84@yahoo.com

**Ахмедов Ровшан Аррахман оглы**, к.т.н., преподаватель.

E-mail: rovshan.ahmadov96@list.ru

**Садыхов Масуд Вугар оглы**, докторант.

E-mail: sadiqovm.1999@gmail.com

Национальная Академия Авиации Азербайджана.

Азербайджан, AZ1045, г. Баку, проспект Мардакан, 30.

Поступила в редакцию 19.01.2023

После доработки 30.01.2023

Принята к публикации 04.02.2023

© Гасанов А. Р., Гасанов Р. А., Рустамов А. Р., Агаев Э. А.,  
Ахмедов Р. А., Садыхов М. В., 2023

После обнаружения параметры неизвестного радиоизлучения исследуются в различных схемах по различным алгоритмам, использующим различные модели исследуемого сигнала [8]. Если исследуемый сигнал рассматривать как высокочастотное колебание с амплитудной модуляцией (АМ), то его модель представляется как

$$u_{\text{АМ}}(t) = U_0 [1 + m \cdot s(t)] \cos \Omega_0 t, \quad (1)$$

где  $U_0$  – амплитуда немодулированного несущего колебания;  $m$  – индекс АМ;  $s(t)$  – сообщение в радиосигнале;  $\Omega_0 = 2\pi F_0$  – угловая частота несущего колебания;  $F_0$  – временная частота несущего колебания.

Одной из задач обработки неизвестного радиоизлучения является выделение полезного сообщения  $s(t)$ . Из (1) следует, что в случае АМ для выделения  $s(t)$  требуется устройство, чувствительное к изменению амплитуды высокочастотных колебаний. Этот вывод можно экстраполировать на сигналы с балансной амплитудной модуляцией, однополосной модуляцией, импульсной модуляцией и т. д. Другими словами амплитудно-чувствительное устройство позволяет извлекать информацию из сигналов, мощность которых является функцией модулирующего процесса.

Целью данной работы является анализ особенностей фотоупругого эффекта в контексте синтеза устройств для извлечения информации из неизвестного радиоизлучения с амплитудной модуляцией.

### Амплитудный демодулятор на основе фотоупругого эффекта

Применение фотоупругого эффекта для демодуляции АМ сигналов в известной литературе не обсуждалось. При этом данная процедура выполняется практически в любом акустооптическом приборе. Анализ сущности этого вопроса представляет интерес по двум причинам. Во-первых, необходимо знать предельные значения параметров такого демодулятора. Во-вторых, настройка акустооптического процессора невозможна без учета влияния детектора.

Фотоупругий эффект реализуется в акустооптическом модуляторе (АОМ), который состоит из фотоупругой среды (ФУС), к одной

грани которой крепится электроакустический преобразователь (ЭАП) длиной  $L$  и шириной  $H$ , а к другой – акустический поглотитель (АП) [9, 10]. В зависимости от несущей частоты входного сигнала толщина ЭАП может составлять от нескольких микрон до нескольких миллиметров. Электрический сигнал с частотой  $F$  (обычно выбираемой от десятков мегагерц до нескольких гигагерц) преобразуется ЭАП в упругую волну той же частоты и мощности  $P_a$ , которая распространяется в ФУС со скоростью  $v$ , зависящей как от типа материала, так и от типа волны (рис. 1). Качество ФУС оценивают коэффициентом добротности  $M = n^6 p^2 / (\rho v^3)$ , где  $n$ ,  $\rho$  и  $p$  – соответственно коэффициент преломления, плотность и фотоупругая постоянная среды взаимодействия.

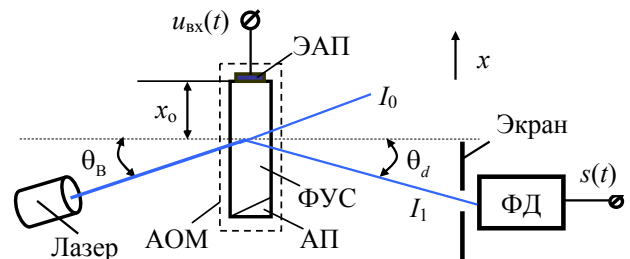


Рис. 1. Схема акустооптического амплитудного демодулятора

Возбужденная в ФУС упругая волна, являясь пространственным аналогом входного электрического сигнала, представляет собой бегущую дифракционную решетку с шагом  $\Lambda = v/F$ . Направляемое на эту решетку лазерное излучение площадью поперечного сечения  $S_0$  и мощностью  $P_0$ , при определенном выборе геометрии размещения оптического луча и АОМ, дифрагирует на упругой волне. Рис. 1 иллюстрирует режим дифракции Брэгга, при котором лазерный луч падает на поверхность ФУС под углом

$$\theta_B = \arcsin[\lambda / (2\Lambda)], \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения.

Угол  $\theta_B$ , отсчитываемый от оптической оси системы, называется углом Брэгга. В режиме дифракции Брэгга обеспечивается наибольшая мощность  $P_1$  отклоненного светового пучка с площадью поперечного сечения  $S_1$ . В этих условиях зависимость интен-

сивности отклоненного света  $I_1$  от интенсивности света  $I_0$ , падающего в апертуру АОМ, определяется следующим приближенным равенством [7]:

$$I_1 \approx I_0 \cdot \eta, \quad (3)$$

где  $\eta$  – дифракционная эффективность, которая определяется по формуле

$$\eta = (\pi^2 MP_a L) / (2\lambda^2 H). \quad (4)$$

Предполагая, что распределение плотности потока мощности в поперечном сечении лазерного излучения является однородным, выражение (3) можно переписать в следующем виде:

$$P_1 \approx P_0 \cdot \eta \cdot S_1 / S_0. \quad (5)$$

Отклоненный свет через щель в экране попадает на светочувствительную поверхность фотодетектора (ФД). При этом каждый фотон рождает  $\eta'$  электронов. Соответственно среднее значение тока ФД будет определяться как

$$\bar{i}_{\text{ФД}} = Ne\eta', \quad (6)$$

где  $N = P_1 / (h\nu)$  – число фотонов, падающих на фоточувствительную поверхность ФД в секунду;  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка;  $\nu$  – частота света;  $e = 1,6 \times 10^{-19}$  Кл – заряд протона.

Подставляя (4) и (5) в (6), получаем

$$\bar{i}_{\text{ФД}} = \frac{P_0 \cdot \pi^2 M L S_1 e \eta'}{2 h \nu S_0 \lambda^2 H} P_a. \quad (7)$$

В интервале от ЭАП до точки акустооптического взаимодействия передача полезного сообщения осуществляется упругой волной, которая представлена в формуле (7) параметром  $P_a$ . Другие параметры в этой формуле относятся к источнику света, АОМ, ФД и имеют постоянные значения для выбранных конкретных компонентов демодулятора.

### Демодуляция АМ сигнала

В этом случае на вход АОМ подается АМ сигнал, который описывается выражением (1), т. е.  $u_{\text{вх}}(t) = u_{\text{АМ}}(t)$ . В результате обеспечивается временная зависимость акустической

мощности  $P_a$  в формуле (7). Другими словами, классическая структура акустооптического процессора позволяет выделить полезное сообщение, которое содержится в изменениях мощности входного сигнала. Изменение мощности входного сигнала происходит, если этот сигнал модулирован по амплитуде.

В случае АМ сигнала (1) мощность упругой волны в ФУС будет определяться следующим образом:

$$P_a(t) = P_{a0} [1 + ms(t)]^2, \quad (8)$$

где  $s(t)$  – модулирующий процесс, который может меняться в пределах  $\pm 1$ ;  $P_{a0}$  – акустическая мощность в отсутствии полезного сообщения, т. е. при  $s(t) = 0$ .

С учетом выражений (7) и (8) запишем формулу для тока ФД в следующем виде:

$$\begin{aligned} i_{\text{ФД}}(t) &= \bar{i}_{\text{ФД}} [1 + ms(t)]^2 = \\ &= \frac{P_0 \cdot \pi^2 M L S_1 e \eta'}{2 h \nu S_0 \lambda^2 H} P_{a0} [1 + 2ms(t) + m^2 s^2(t)]. \end{aligned} \quad (9)$$

Благодаря частотно-избирательным свойствам фотоупругого эффекта на выходе ФД формируется составляющая  $i_{\text{ФД}}(t)$ , которая повторяет форму модулирующего процесса  $s(t)$ , имеющегося в входном радиосигнале, с точностью до постоянного множителя:

$$i_{\text{ФД}}(t) = \frac{P_0 \cdot \pi^2 M L S_1 e \eta'}{h \nu S_0 \lambda^2 H} P_{a0} ms \left( t - \frac{x_0}{v} \right), \quad (10)$$

где  $x_0$  – расстояние от ЭАП до точки фотоупругого взаимодействия.

Вышеприведенная физико-математическая интерпретация формирования выходного отклика показывает, что рассматриваемый акустооптический процессор (рис. 1) чувствителен, как к изменению амплитуды входного электрического сигнала  $s(t)$ , так к изменению поперечного сечения отклоненного светового пучка  $S_1$ . В стационарном режиме обеспечивается примерное равенство  $S_0 \approx S_1$  и формулу (10) можно переписать в следующей форме:

$$i_{\text{ФД}}(t) = \frac{P_0 \cdot \pi^2 M L e \eta'}{h \nu \lambda^2 H} P_{a0} ms \left( t - \frac{x_0}{v} \right). \quad (11)$$

Из формулы (11) следует, что показанное на рис. 1 акустооптическое устройство может быть использовано в качестве амплитудного демодулятора. Кроме того, это устройство также выполняет функцию фильтра нижних частот с характерной частотой среза [11]. В случае широкополосной информации частота среза демодулятора должна быть оптимизирована по отношению к ширине полосы

$$K_p(\omega) = \left\{ \left[ \int_0^{d/v} \sqrt{\frac{d}{v} \xi - \xi^2} \cos(\omega \xi) d\xi \right]^2 + \left[ \int_0^{d/v} \sqrt{\frac{d}{v} \xi - \xi^2} \sin(\omega \xi) d\xi \right]^2 \right\} / \left[ \int_0^{d/v} \sqrt{\frac{d}{v} \xi - \xi^2} d\xi \right]^2 \quad (12)$$

или переходной характеристики

$$g(t) = \frac{8}{\pi(d/v)^2} \int_{x_0/v}^t \sqrt{(d/v)(\xi - x_0/v) - (\xi - x_0/v)^2} d\xi, \text{ при } x_0/v \leq t \leq x_0/v + d/v \quad (13)$$

акустооптической линии задержки. В этих уравнениях  $d$  – диаметр светового пучка.

В первом случае частота среза находится путем замены  $\omega$  на  $\omega_{\text{ср}}$  в уравнении (12) и приравняв его правой части к 0,5.

Во втором случае из системы уравнений  $g(t_1) = 0,1$ ;  $g(t_2) = 0,9$ ;  $\tau_n = t_2 - t_1$  находят время нарастания переходной характеристики  $\tau_n$ , которое определяется как время, необходимое для изменения переходной характеристики с 0,1 до 0,9. Затем частота среза  $\omega_{\text{ср}}$  вычисляется по следующей формуле:

$$\omega_{\text{ср}} \approx \ln(9) / \tau_n.$$

Анализируя (12) и (13) легко установить, что частота среза демодулятора формируется под влиянием диаметра светового пучка  $d$  и скорости распространения упругих волн  $v$  в ФУС.

### Экспериментальные исследования

Приведенные выше трактовки процессов в акустооптическом амплитудном демодуляторе, установленные на их основе положения и результаты численного анализа были проверены экспериментально. При этом в качестве источника несущего колебания был использован высокочастотный генератор типа Г4-107, частота которого выбирается равной цен-

этой информации. Учитывая высокую значимость, остановимся на этом вопросе более подробно.

Для определения частоты среза амплитудного демодулятора можно опираться на идентичность его схемотехники с акустооптической линией задержки. При этом частоту среза демодулятора можно вычислить из уравнений амплитудно-частотной характеристики

тральной частоте АОМ, что в данном случае составляет 80 МГц. АОМ выполнен на стеклообразном фотоупругом материале типа ГФ-7. Отметим, что при необходимости извлечения низкочастотной и инфранизкочастотной информации наилучшие результаты можно получить, используя в качестве ФУС кристаллы парателлуриата  $\text{TeO}_2$ . Так как, скорость поперечных волн в этих материалах составляет примерно 616 м/с. Однако следует учитывать, что эти кристаллы обладают анизотропией [12].

ФД выполнен на основе фотоэлектронного умножителя типа ФЭУ-114. Сигнал на выходе фотодетектора регистрируется осциллографом MSO4052.

На первом этапе исследовался случай демодуляции амплитудно-модулированного сигнала. Генератор Г4-107 работает в режиме внешней амплитудной модуляции. Модулирующий процесс (в данном случае гармоническое колебание с частотой 700 кГц) с заданными параметрами формировался в генераторе сигналов Г4-102, выход которого подключен к входу генератора Г4-107. Модулирующий процесс также синхронизирует осциллограф MSO4052.

На рис. 2 показаны осциллограммы модулирующего напряжения (рис. 2а) и напряже-

ния на выходе акустооптического демодулятора (рис. 2б).



Рис. 2. Осциллограммы модулирующего гармонического колебания (а) и гармонического колебания на выходе демодулятора (б)

На втором этапе был исследован случай демодуляции амплитудно-манипулированного сигнала. При этом генератор Г4-107 переводится в режим внешней импульсной модуляции. Модулирующий процесс (в данном случае импульсный сигнал длительностью 1 мкс) формировался в генераторе импульсов Г5-54, выход которого подключен к входу генератора Г4-107. На рис. 3 представлены осциллограммы модулирующего импульса (рис. 3а) и импульса на выходе акустооптического демодулятора (рис. 3б).

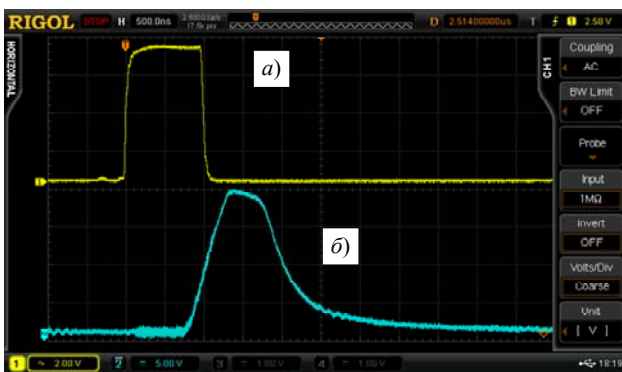


Рис. 3. Осциллограммы модулирующего импульса (а) и импульса на выходе демодулятора (б)

Из сравнения осциллограмм импульсов на рис. 3 следует, что длительность импульса на выходе демодулятора (рис. 3б), определенная на уровне 0,5 от максимального значения, равна длительности модулирующего импульса (рис. 3а) и составляет 1 мкс.

## Обсуждение результатов

Постулат об однозначном соответствии сигнала на выходе демодулятора модулирующему процессу, присутствующему во входном радиочастотном сигнале, подтверждается осциллограммами напряжения на рис. 2. В данном случае модулирующий процесс представляет собой гармоническое колебание с частотой 700 кГц. Осциллограммы на рис. 2а и на рис. 2б почти не отличаются по форме. Такое условие обеспечивается для всех составляющих на частотах ниже частоты среза. Это положение подтверждается осциллограммами на рис. 3.

На этапе проектирования частота среза может быть определена выбранными значениями диаметра светового пучка и скорости распространения упругих волн в фотоупругой среде с использованием уравнений (12) и (13).

На этапе наладки и настройки частота среза может определяться временем нарастания  $\tau_{н.ФД}$  переднего фронта импульса на выходе фотодетектора (рис. 3б).

В случае рис. 3б время нарастания составляет  $\tau_{н.ФД} \approx 415$  нс. Соответственно, частота среза составляет  $\omega_{ср} \approx \ln(9)/\tau_{н.ФД} \approx 5,3$  мкс<sup>-1</sup> или  $f_{ср} = \omega_{ср}/(2\pi) \approx 0,843$  МГц.

Можно показать, что расхождение между значениями частоты среза, рассчитанными по уравнениям (12), (13) и определенным из осциллограммы на рис. 3б не превышает одного процента.

## Выводы

Разработанная физико-математическая интерпретация фотоупругого взаимодействия позволяет установить связь между параметрами сигнала на выходе демодулятора, диаметром считывающего светового пучка и скоростью распространения упругой волны в звукопроводе. Полученные модели и установленные положения могут быть использованы для оптимизации параметров и характеристик любого акустооптического процессора, в котором информация считывается световым пучком малого (по отношению к апертуре фотоупругой среды) сечения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Ivanenko S., Bezruk V.* / 2016 Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), 2016. P. 199–200. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2016.7905380.
2. *Bezruk V., Ivanenko S., Fedorov O., Němec Z., Pidaníč J.* (2022). Methods of Signal Detection and Recognition to Perform Frequency Resource Sharing in Cognitive Radio Networks. In: Klymash M., Beshley M., Luntovskyy A. (eds) Future Intent-Based Networking. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2022. Vol. 831. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-92435-5\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92435-5_22)
3. *Ierley Glenn, Kostinski Alex.* / Physical Review E. 2020. Vol. 102. Iss. 3. P. 022130-1–022130-13. [doi.org/10.1103/PhysRevE.102.032221](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.102.032221)
4. *Yeste Ojeda O. A., Grajal J.* / 14th European Signal Processing Conference, 2006. P. 1–5.
5. *Проклов В. В., Ушаков В. Н.* Акустооптические процессоры спектрального типа. – М.: Радиотехника, 2012.
6. *Shakin O. V., Nefedov V. G., Churkin P. A.* / Conference “Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems”. – St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia, Nov 26–30, 2018. P. 340.
7. *Lee J. N., Van der Lugt A.* / Proc. IEEE. 1989. Vol. 77. № 10. P. 1528–1536.
8. *Alencar M. S., da Rocha Jr. V. C.* Amplitude Modulation. In: Communication Systems. – Springer, Cham. 2022. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-12067-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-12067-1_4)
9. *Балакиев В. И., Парыгин В. И., Чирков Л. Е.* Физические основы акустооптики. – М.: Радио и связь, 1985.
10. *Davis Christofer C.* Lasers and Electro-optics. – Cambridge University Press, 2014.
11. *Hasanov A. R., Hasanov R. A., Akhmedov R. A., Sadikhov M. V.* / Russian Microelectronics. 2021. Vol. 50. № 7. P. 538–542. DOI: 10.1134/S1063739721070143
12. *Akhmedzhanov F., Mirzaev S., Saidvaliev U.* / Proc. Mtgs. Acoust. 2018. Vol. 34. P. 045045. <https://doi.org/10.1121/2.0000937>

PACS: 81.05. –t

## Broadband amplitude demodulator based on the photoelastic effect and optimization of its characteristics

*A. R. Hasanov, R. A. Hasanov, A. R. Rustamov, E. A. Agayev, R. A. Ahmadov and M. V. Sadikhov*

Azerbaijan National Aviation Academy  
30 Mardakan Ave., AZ1045, Baku, Azerbaijan Republic  
E-Mail: [afig.gasanov.51@mail.ru](mailto:afig.gasanov.51@mail.ru)

*Received 19.01.2023; revised 30.01.2023; accepted 04.02.2023*

***The photoelastic effect is discussed in the context of demodulation of an amplitude modulated signal. A physico-mathematical interpretation of the physical processes of signal formation at the demodulator output has been developed. It is proved that when the parameters of the useful signal are matched with the parameters of the interacting optical and elastic waves, the signal at the output of the photodetector repeats the form of the message in the input amplitude-modulated signal. This statement is discussed in the frequency band below the cutoff frequency, which is formed by the diameter of the reading light beam and the propagation velocity of an elastic wave in a photoelastic medium. Theoretical and experimental methods for determining the cutoff frequency of an acousto-optic amplitude demodulator are described.***

***Keywords:*** photoelastic effect, amplitude-modulated signal, demodulator, light beam, elastic wave, cutoff frequency.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-1-81-87

## REFERENCES

1. Ivanenko S. and Bezruk V., 2016 Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), 2016, p. 199–200. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2016.7905380.
2. Bezruk V., Ivanenko S., Fedorov O., Němec Z. and Pidanič J. (2022). Methods of Signal Detection and Recognition to Perform Frequency Resource Sharing in Cognitive Radio Networks. In: Klymash M., Beshley M., Luntovskyy A. (eds) Future Intent-Based Networking. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 831. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-92435-5\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92435-5_22)
3. Ierley Glenn and Kostinski Alex., Physical Review E **102** (3), 022130-1–022130-13 (2020). [doi.org/10.1103/PhysRevE.102.032221](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.102.032221)
4. Yeste Ojeda O. A. and Grajal J., 14th European Signal Processing Conference, 2006, pp. 1–5.
5. Proklo V. V. and Ushakov V. N., Akustoopticheskie protsessory spektral'nogo tipa, Moscow, Radiotekhnika, 2012.
6. Shakin O. V., Nefedov V. G. and Churkin P. A., Conference “Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems”, St Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St Petersburg, Russia, Nov 26–30, 2018. P. 340.
7. Lee J. N. and Van der Lugt A., Proc. IEEE **77** (10), 1528–1536 (1989).
8. Alencar M. S. and da Rocha Jr. V. C., Amplitude Modulation. In: Communication Systems. Springer, Cham., 2022. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-12067-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-12067-1_4)
9. Balakshii V. I., Parygin V. I. and Chirkov L. E., Fizicheskie osnovy akustooptiki. Moscow, Radio i svyaz', 1985.
10. Davis Christofer C., Lasers and Electro-optics. Cambridge University Press, 2014.
11. Hasanov A. R., Hasanov R. A., Akhmedov R. A. and Sadikhov M. V., Russian Microelectronics **50** (7), 538–542 (2021). DOI: 10.1134/S1063739721070143
12. Akhmedzhanov F., Mirzaev S., and Saidvaliev U., Proc. Mtgs. Acoust. **34**, 045045 (2018); <https://doi.org/10.1121/2.0000937>