

## Увеличение разрешающей способности акустооптических процессоров

© С.С. Шибает, Д.П. Волик, А.В. Помазанов

Южный федеральный университет,  
347922 Таганрог, Россия  
e-mail: dvlbest@mail.ru

(Поступило в Редакцию 4 апреля 2014 г. В окончательной редакции 26 июня 2014 г.)

Обсужден вопрос увеличения разрешения акустооптических средств обработки информации в рамках общей задачи совершенствования параметров подобных устройств. На рассмотрение представлен способ повышения разрешения акустооптического процессора, использующий в своей основе доплеровский сдвиг частоты дифрагированного пучка света.

В акустооптических процессорах (АОП) минимальное время реакции или время получения информации о параметрах источников обрабатываемых радиосигналов ограничивается протяженностью световой апертуры используемого в их составе акустооптического дефлектора (АОД).

Сокращение апертуры ведет к уменьшению длительности предъявляемого к фурье-анализу радиосигнала, что автоматически ухудшает разрешение измерителя, которое на уровне физической реализуемости и определяется временной протяженностью упомянутой апертуры. С другой стороны, увеличение апертуры дефлектора ограничено затуханием акустической волны в его кристалле, что ощутимо в АОД гигагерцового диапазона. Вторым источником роста разрешения АОП является снижение скорости ультразвука, но эта величина для того или иного среза кристалла дефлектора также является фиксированной.

Повышенные требования, предъявляемые к современным акустооптическим (АО) измерителям параметров радиосигналов в части времени реакции, в том числе и при приеме радиосигналов короткой длительности [1], разрешения по частоте и многосигнального динамического диапазона, заставляют разработчиков искать „нестандартные“ пути „обхода“ известных физических ограничений, один из которых использует синтезирование апертуры оптической системы процессора при помощи пары дифракционных решеток, что с достаточной подробностью рассмотрено в [2–4]. Другой способ, использующий особенность именно АО-взаимодействия, рассматривается ниже.

Специфика АО-взаимодействия такова, что при дифракции света частоты  $\nu_0$  на ультразвуке частоты  $f$  дифрагированный свет вследствие доплеровского эффекта приобретает частоту  $\nu_0 \pm f$ , причем знак „–“ соответствует рис. 1, *a*, а знак „+“ — рис. 1, *b*. На рис. 1 приведен случай АОД со сканируемым акустическим полем (САП).

Таким образом, если, например, АОД работает в диапазоне  $f_1 - f_2$  по схеме рис. 2, *b*, то частота дифрагированного света будет изменяться в диапазоне

от  $\nu_0 + f_1$  до  $\nu_0 + f_2$ , а длина волны соответственно от  $\lambda_1 = c\lambda_0 / (c + \lambda_0 f_1)$  до  $\lambda_2 = c\lambda_0 / (c + \lambda_0 f_2)$ , где  $\lambda_0 = c / \nu_0$  — длина волны падающего на АОД света, а  $c$  — скорость света в свободном пространстве.

Если теперь на пути дифрагированного пучка поставить диспергирующий элемент (призму или дифракционную решетку), то можно ожидать увеличения разрешающей способности. Схема типового АОП [5] с таким дополнительным элементом, расположенным между АОД и фурье-объективом, приведена на рис. 2.

При использовании в качестве дисперсионного элемента (ДЭ) дифракционных решеток даже в случае высших порядков дифракции, малой величины периода, множества расположенных последовательно решеток, АОД сантиметрового диапазона и длинноволнового лазерного излучения составляет лишь малые доли про-

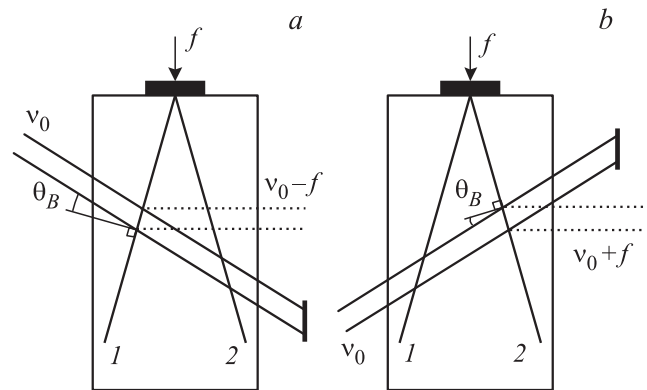


Рис. 1. Геометрия АО-взаимодействия для АОД с САП.

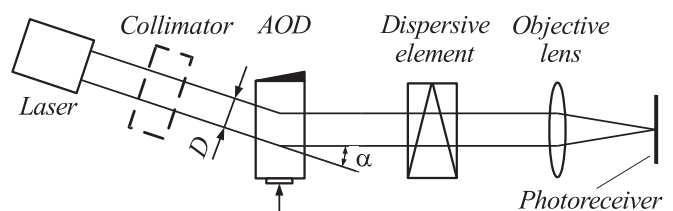


Рис. 2. Схема АОП с синтезом апертуры.

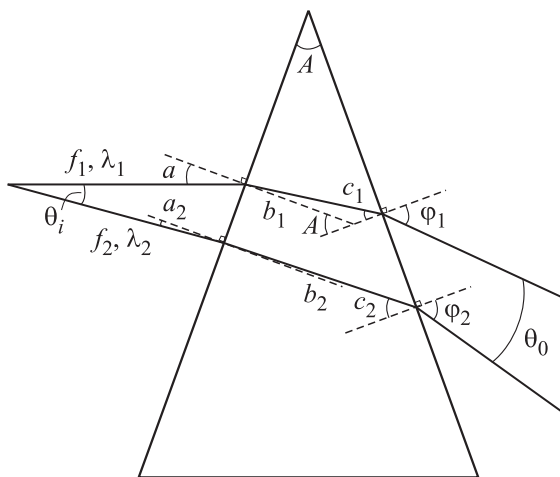


Рис. 3. Прохождение дифрагированного пучка через призму.

центра, а энергетические потери существенны. Поэтому рассмотрим это явление подробнее для случая, когда ДЭ является призма из однородного материала.

Пусть на призму с преломляющим углом  $A$  падает дифрагированный пучок (рис. 3), причем крайние пучки соответствуют граничным частотам диапазона, а угол между ними на входе в призму составляет  $\theta_i = 2(\arcsin[\lambda_0 f_2 / 2V] - \arcsin[\lambda_0 f_1 / 2V])$ , где  $V$  — скорость ультразвука.

Для произвольного пучка, падающего на призму под углом  $a$ , используя закон преломления и геометрически очевидное (рис. 3) тождество:  $b + c = A$ , для угла  $\varphi$  выхода пучка из призмы получаем

$$\varphi(a) = \arcsin\{n(\sin(A) \cos(\arcsin(\sin(a)/n)) - \cos(A) \sin(a))\}. \quad (1)$$

При наличии дисперсии входящий в (1) показатель преломления  $n$  будет зависеть от длины волны, а значит, ввиду специфики АО-взаимодействия и от частоты СВЧ-сигнала  $f$ .

Полагая, что в интересующем нас интервале длин волн  $n$  линейно зависит от  $\lambda$ , а материал призмы обладает нормальной дисперсией, т.е.  $n = n_1 - k_\lambda(\lambda - \lambda_1)$ , где  $k_\lambda = (n_2 - n_1)/(\lambda_1 - \lambda_2)$ ,  $n_1, n_2$  — показатели преломления для пучков, соответствующих границам частотного диапазона, и, учитывая зависимость  $\lambda(f) = c\lambda_0/(c + \lambda_0 f)$ , выражение (1) можно представить в виде зависимости  $\varphi(f, a)$ . При этом угол между крайними пучками в диапазоне частот на выходе из призмы составит

$$\theta_0(a) = \varphi(f_2, a - \theta_i) - \varphi(f_1, a). \quad (2)$$

В (2) учтено, что  $a$  — угол падения на призму дифрагированного на частоте  $f_1$  пучка.

Чтобы перейти к разрешающей способности, необходимо определить расходимость произвольного пучка, которая в случае равноамплитудной апподизации пучка

на входе в призму равна  $\Delta\alpha_i = 2\lambda_0/D$ , где  $D$  — апертура падающего на АОД пучка. Расходимость пучка на выходе из призмы будет определяться выражением

$$\Delta\alpha_0(f, a) = \varphi(f, a_f(f)) - \varphi(f, a_f(f) - \Delta\alpha_i), \quad (3)$$

где  $\alpha_f(f) = a + \theta(f_1) - \theta(f)$  — частотная зависимость угла падения на призму,  $\theta(f) = 2 \arcsin(\lambda_0 f / 2V)$  — частотная зависимость угла дифракции, отсчитываемого от направления непродифрагированного пучка,  $\theta(f_1)$  — угол дифракции на нижней граничной частоте  $f_1$ ,  $a$  — как и прежде, угол падения на призму дифрагированного на частоте  $f_1$  пучка.

Можно показать, что  $\Delta\alpha_0(f, a)$  — монотонно возрастающая функция частоты, поэтому в дальнейшем будем рассматривать наименее выгодный случай максимального угла расходимости пучка на частоте  $f_2$ :  $\Delta\alpha_0(f_2, a)$ .

Таким образом, разрешающая способность АОП (по критерию в 2 раза жестче рэлеевского) в отсутствие призмы равна

$$N_i = \theta_i / \Delta\alpha_i, \quad (4)$$

а с использованием призмы

$$N_0(a) = \theta_0(a) / \Delta\alpha_0(f_2, a). \quad (5)$$

В рамках численного эксперимента рассчитаем зависимость (5) для типовых исходных данных [5]: диапазон рабочих частот АОД  $(f_1 - f_2) = 1.5 - 2$  GHz, скорость ультразвука  $V = 3590$  m/s, длина волны излучения лазера  $\lambda_0 = 657$  nm, апертура падающего на АОД пучка  $D = 4$  mm,  $n_1 = 1.5, n_2 = 1.6$ .

Результаты расчета зависимости  $N_0(a)$  относительно  $N_i$  для различных преломляющих углов призмы  $A$  представлены на рис. 4. Зависимость  $N_0(a)$  при  $A = 0^\circ$  совпадает с  $N_i$ , т.е. использование плоскопараллельной пластинки даже с высокой дисперсией не дает выигрыша в разрешении.

Те же зависимости при использовании призмы, не обладающей дисперсией, приведены на рис. 5. График показывает, что при наличии призмы с недостаточно

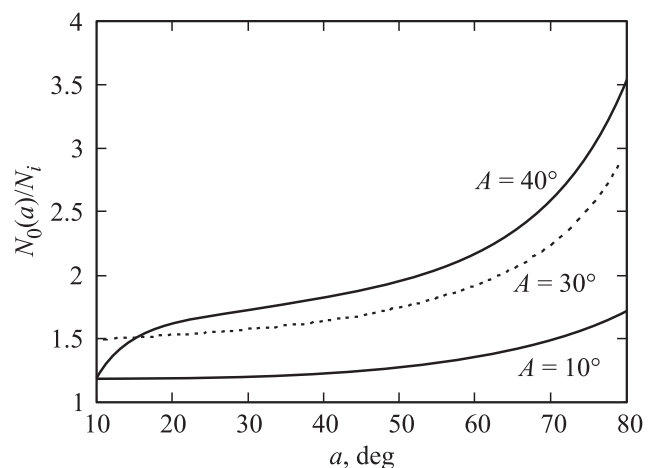


Рис. 4. Зависимости  $N_0(a)/N_i$ .

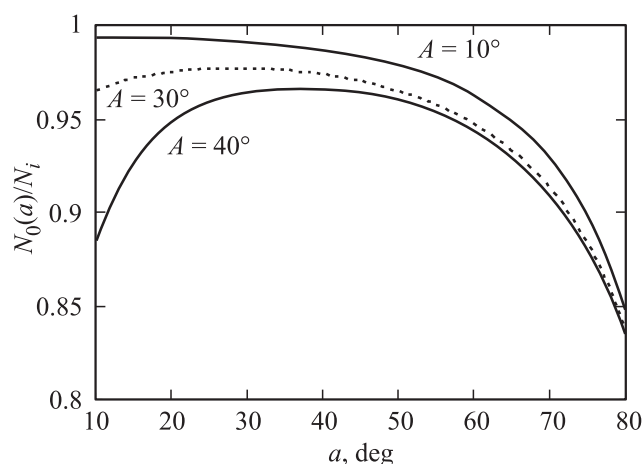


Рис. 5. Зависимости  $N_0(a)/N_i$  для бездисперсионной призмы.

большой дисперсией результат получается хуже, чем при ее отсутствии.

Анализ графиков рис. 4 показывает, что при введении в схему АОП-призмы со средним значением преломляющего угла и достаточной дисперсией ее материала можно добиться значительного выигрыша в разрешающей способности измерителя. Здесь, однако, нужно отметить, что приведенные на рис. 4 зависимости получены для очень большой дисперсии (коэффициент наклона характеристики  $n(\lambda)$  равнялся  $k_\lambda = 1.39 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-1}$ ), что требует поиска либо синтеза новых высокодисперсных материалов или попыток использования областей вблизи краев поглощения (в этих областях у обычных материалов также наблюдается резкое увеличение дисперсии).

В работе показано, что в АО-процессорах при использовании в их оптической части высокодисперсных призмных элементов может быть достигнуто ощутимое уменьшение размера минимально разрешимого элемента, которым отображается входной гармонический радиосигнал и соответственно обеспечено значительное ужесточение критерия, по которому несколько входных сигналов, одновременно действующих на входе измерителя, будут им восприниматься, измеряться или отображаться как разные сигналы.

## Список литературы

- [1] Шибает С.С. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 1. С. 29–36.
- [2] Шибает С.С., Новиков В.М., Роздобудько В.В. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. № 1. С. 55–60.
- [3] Шибает С.С., Новиков В.М., Роздобудько В.В. // Патент России № 70713. 2008. Бюл. № 4.
- [4] Шибает С.С., Новиков В.М., Роздобудько В.В. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. № 2. С. 76–82.
- [5] Волик Д.П., Шибает С.С., Помазанов А.В. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 11. С. 175–182.