

УДК 621.37:535.42

## ОСОБЕННОСТИ ИСКАЖЕНИЯ СПЕКТРА ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ДИФРАКЦИИ НА ОТВЕРСТИЯХ

**Борисенко А.Ю., Глущенко А.Г., Глущенко Е.П.**

*ФГБОУ «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», Самара, e-mail: gag646@yandex.ru*

Дифракция волн приводит к перераспределению энергии волн в пространстве, зависящему от длины волны и к спектральному искажению широкополосных информационных сигналов, что особенно необходимо учитывать при создании акустических устройств. В работе рассматривается влияние дифракции на искажение спектра акустических информационных сигналов, возникающее из-за зависимости распределения интенсивности от длины волны падающего излучения. Проведен расчет зависимости распределения интенсивности волн от угла дифракции и от длины волны падающего излучения. Показано, что спектр сигнала сохраняется только напротив дифракционного отверстия. Определено, что при изменении угла дифракции происходит изменение интенсивности света по длинам волн. Определены зависящие от угла дифракции критические длины волн и частоты, на которых интенсивность излучения равна нулю и наблюдается наибольшее искажение информационных сигналов. Установлено, что увеличение числа отверстий приводит к увеличению уровня сигнала, но при этом степень искажения сигнала возрастает. С увеличением угла дифракции и ширины отверстий растет расстояние между соседними частотами с минимальной интенсивностью волны. Искажение спектра информационного сигнала растет при увеличении угла дифракции, а также при увеличении ширины отверстий в экране и числа этих отверстий.

**Ключевые слова:** дифракция, распределение интенсивности, искажение акустического спектра

## FEATURES OF DISTORTION OF THE SPECTRUM OF INFORMATION SIGNALS AT DIFFRACTION ON HOLES

**Borisenko A.Yu., Glushchenko A.G., Glushchenko E.P.**

*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, e-mail: gag646@yandex.ru*

Wave diffraction leads to the redistribution of wave energy in space, depending on the wavelength and to the spectral distortion of information signals, especially broadband signals, which should be taken into account when creating acoustic devices. The paper considers the effect of diffraction on the distortion of the spectrum of acoustic information signals arising from the dependence of the intensity distribution on the wavelength of the incident radiation. The dependence of the wave intensity distribution on the diffraction angle and on the wavelength of incident radiation is calculated. It is shown that the signal spectrum is preserved only opposite the diffraction hole. It is determined that when the diffraction angle changes, the light intensity changes along the wavelengths. The critical wavelengths and frequencies depending on the diffraction angle are determined, at which the radiation intensity is zero and the greatest distortion of information signals is observed. It is established that the increase in the number of holes leads to an increase in the signal level, but the degree of distortion of the signal will increase. With increasing diffraction angle and hole width, the distance between adjacent frequencies with minimal wave intensity increases. The signal distortion increases with increasing diffraction angle, width and number of holes.

**Keywords:** diffraction, intensity distribution, distortion of the acoustic spectrum

Хорошо известно, что при прохождении волн через различные неоднородности структур наблюдается явление дифракции, огибания волнами препятствий [1–3]. Дифракция волн на экранах приводит к перераспределению энергии волн в пространстве, которое зависит от длины волны. Это явление хорошо изучено для монохроматических волн, однако реальные информационные сигналы характеризуются спектром и занимают определенную полосу частот, зависящую от типа сигнала и модуляции [4–5]. Частотная зависимость картины дифракции из-за сложного спектра реальных сигналов приводит к большему или меньшему искажению информационных сигналов при их взаимодействии с любыми неоднородностями

ми материалов сред и структур. Это может быть практически незаметным для узкополосных сигналов, но играет существенную роль для широкополосных сигналов [6–8]. В оптическом диапазоне ширина спектра сигналов существенно меньше несущих частот, на которых идет их передача, поэтому особенности влияния ширины спектра на дифракцию сигналов практически не рассматриваются.

Цель работы: изучение влияния дифракции акустических волн на одиночном отверстии или периодически расположенной системе отверстий на спектральные характеристики информационных акустических сигналов, которые в акустическом диапазоне являются широкополосными. Рассмотр-

но распределение интенсивности волн в зависимости от угла дифракции и от длины волны падающего излучения; влияние дифракции на искажение спектра информационного сигнала; определены зависящие от угла дифракции критические длины волн, на которых интенсивность излучения равна нулю. Установлены области наибольшего искажения спектра сигнала.

### Материалы и методы исследования

Проводится теоретическое исследование дифракции плоской волны на отверстии в экране в широком диапазоне частот. Пусть на тонкий плоский экран с отверстием в виде длинной щели падает плоская акустическая волна (рис. 1), характеризующаяся для простоты анализа постоянным давлением  $p$  по всей ширине отверстия [3, 5]. Волновая поверхность падающей волны, плоскость щели и экран параллельны друг другу. Считаем щель бесконечно длинной так, что зависимостью поля по оси  $Oz$  пренебрегаем, тогда  $\partial/\partial z = 0$  и структура поля в любой плоскости  $xOy$ , перпендикулярной к щели, будет одинакова. Можно представить отверстие частью волновой поверхности ( $y = 0, 0 < x < a$ ) с одинаковыми элементами излучения шириной  $dx$ . Вторичные волны, возбуждаемые этими зонами излучения в направлении произвольного угла  $\varphi$  ( $0 \leq \varphi \leq \pi/2$ ), соберутся в одной из точек экрана  $P$  (рис. 1). Пусть каждая элементарная зона излучения  $dx$  создаст в точке  $P$  колебание  $dp$ , амплитуда которого пропорциональна ширине зоны  $dx$ . Тогда можно записать

$$dp = Cdx,$$

где  $C$  – константа, коэффициент пропорциональности. Результирующая амплитуда колебаний, создаваемая всеми зонами, ищется интегрированием  $dp$ , по всей ширине источника (щели  $a$ ):

$$p_0 = \int_0^a dp = \int_0^a Cdx = Ca.$$

Отсюда  $C = \frac{p_0}{a}$  и, следовательно,  $dp = \frac{p_0}{a} dx$ . Для поиска функции распределения поля в пространстве определим фазовые соотношения между колебаниями  $dp$ , создаваемые различными элементами  $dx$ : зоной с координатой  $x = 0$  и зоной с координатой  $x$  (рис. 1).

Если начальную фазу колебания, возбуждаемого в точке  $P$  элементарной зоной, находящейся с края щели ( $x = 0$ ), принять

равной нулю, то фаза колебания, возбуждаемого зоной с координатой  $x$ , отстает на  $\alpha \approx k\Delta = kx \sin \varphi$ , где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число,  $\lambda$  – длина волны (рис. 1).

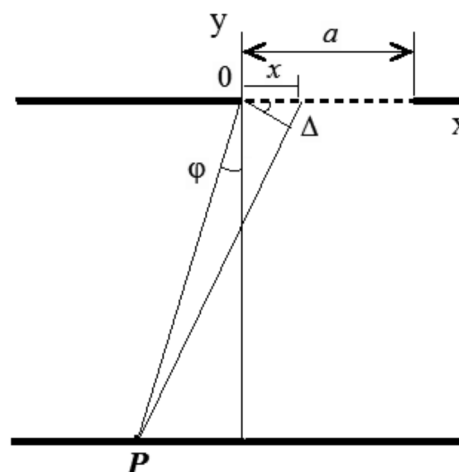


Рис. 1. Ход лучей в области дифракции

Тогда колебание, возбуждаемое элементарной зоной  $dx$  с координатой  $x$  в точке  $P$  (положение которой на экране определяется углом  $\varphi$ ), может быть представлено в виде

$$p_\varphi = \int dp_\varphi = \int_0^a \frac{p_0}{a} \exp \left[ i \left( \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x \sin \varphi \right) dx \right] = p_0 \left( \frac{\sin u}{u} \right) \cos(\omega t - u),$$

где параметр  $u = \frac{\pi}{\lambda} a \sin \varphi$ . Дифракционная картина симметрична относительно центра  $\varphi = 0$ . Амплитуда результирующего колебания:

$$p_\varphi = p_0 \left( \frac{\sin u}{u} \right)$$

зависит от угла дифракции  $\varphi$ , ширины отверстия в экране  $a$  и длины волны  $\lambda$ . Интенсивность поля за отверстием определяется соотношением

$$I_\varphi = I_0 \left( \frac{\sin u}{u} \right)^2.$$

### Результаты исследования и их обсуждение

Амплитуда коэффициента передачи одиночной щели в акустическом диапазоне ( $\nu = 50-15000$  Гц) для разных углов при разной ширине щели показана на рис. 2, а–в.

Для принятого соотношения параметров очевидно, что высокие частоты акустического диапазона для отверстий  $a = 0,5 \div 1,5$  м в зону тени  $\varphi > 20^\circ$  практически не проходят. Физически это связано с тем, что дифракция проявляется в тех случаях, когда длины волны сопоставимы с размерами препятствий. В таком случае в зоне тени наблюдается сигнал только низкочастотной части акустического диапазона.

Поскольку за разборчивость речи отвечают высокие частоты, этот эффект показывает, что разборчивость речи в зоне тени будет заметно ухудшаться. При углах дифракции  $\varphi > 20^\circ$  на частотной характеристике выделяются частоты, на которых коэффициент передачи равен нулю (частоты

нулевого коэффициента передачи). С увеличением угла дифракции  $\varphi$  при любой ширине отверстия  $a$  частотная характеристика коэффициента передачи деформируется (сжимается) так, что положение частот с коэффициентом передачи равным нулю смещается в область низких частот (рис. 2, а). Одновременно существенно уменьшается коэффициент прохождения на высоких частотах. С увеличением ширины отверстия  $a$  коэффициент прохождения высоких частот также снижается (рис. 2, б, в).

Искажение спектральной характеристики сигнала сильно зависит от угла дифракции. Чем больше угол, тем больше искажение на высоких частотах и тем хуже слышен сигнал.

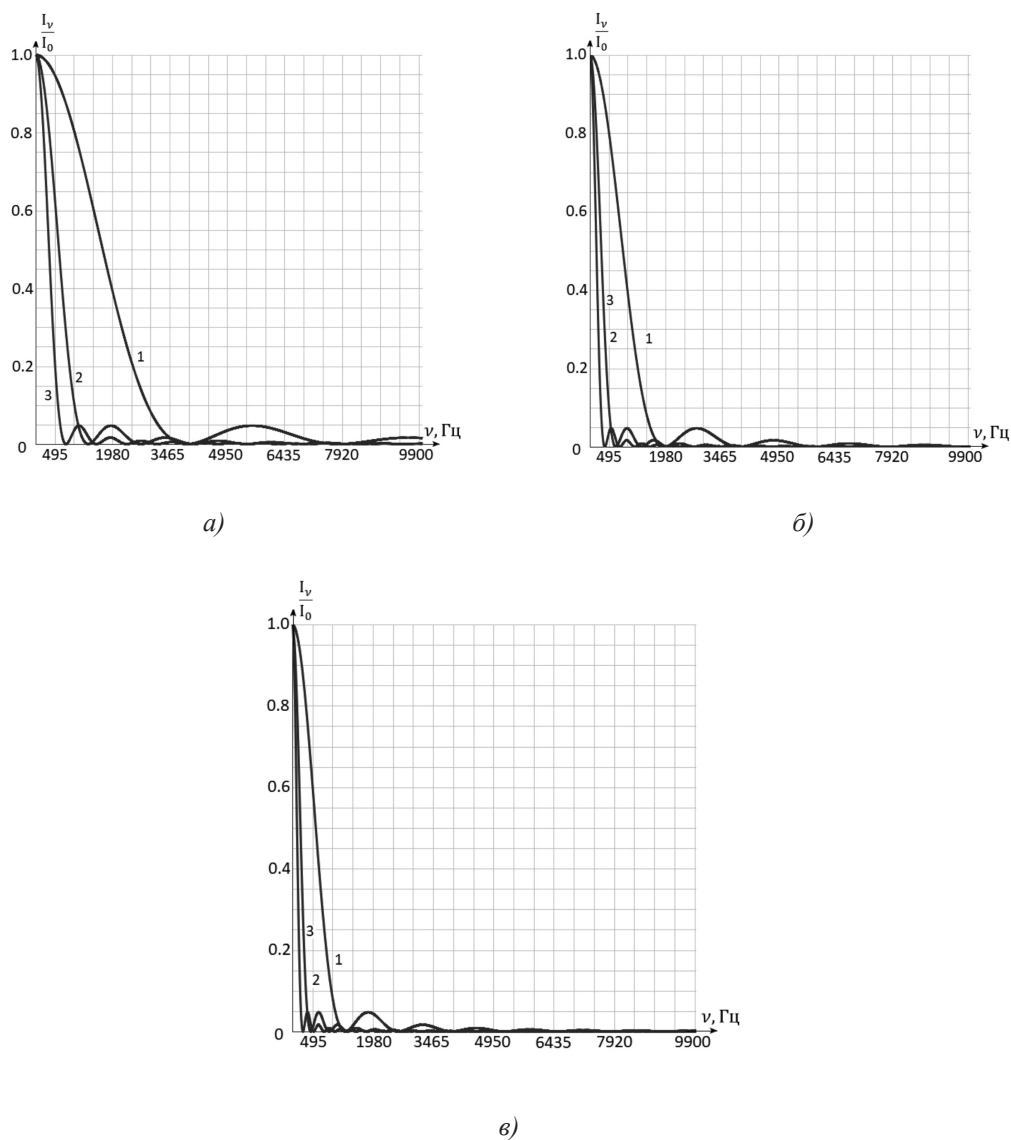


Рис. 2. Распределение интенсивности по частоте при различных углах дифракции: 1 –  $\varphi = 10^\circ$ , 2 –  $\varphi = 30^\circ$ , 3 –  $\varphi = 60^\circ$  а)  $a = 0,5$  м; б)  $a = 1,0$  м; в)  $a = 1,5$  м

При углах дифракции  $\varphi > 0$  наблюдается искажение спектра падающего на отверстие излучения с вырезанием спектральных составляющих на частотах, определяемых соотношениями

$$v_n = \frac{nc}{a \sin \varphi},$$

или на длинах волн

$$\lambda_{n,\min} = \frac{a \sin |\varphi|}{n}, \text{ где } n = 1, 2, 3, \dots$$

Эти частоты или длины волн могут попадать в акустическую область спектра и приводить к искажению сигналов. Например, при прохождении волн через отверстие шириной 1 м под углом дифракции  $\varphi = 10^\circ$  самая низкая частота, на которой будет провал интенсивности сигнала при скорости звука  $c = 340$  м/с равна 1954 Гц, при угле дифракции  $\varphi = 20^\circ$  частота провала интенсивности равна 994 Гц, при угле дифракции  $\varphi = 30^\circ$  низшая частота провала интенсивности сигнала равна 680 Гц, следующие частоты кратны  $680 \cdot n$ , т.е. 1360 Гц, 2440 Гц и т.д. Числовое значение частот, на которых интенсивность сигнала равна нулю зависит от угла дифракции. Это означает, что искажение спектра под разными углами дифракции будет различным. С увеличением угла дифракции, ширины отверстия расстояние  $\Delta v$  между соседними частотами  $v_{i+1}$  и  $v_i$  с минимальной интенсивностью волны также растет. Параметр  $\Delta v$  зависит (рис. 3) от ширины отверстия  $a$ , модуля угла дифракции  $\varphi$  и не

зависит от номера  $i$  частоты, на которых наблюдается минимум интенсивности:

$$\Delta v = v_{i+1} - v_i = \frac{c}{a \sin \varphi}.$$

Наибольшая зависимость  $\Delta v$  от угла дифракции  $\varphi$  наблюдается при малых углах дифракции  $\varphi \leq \pi/6$ . Дальнейший уход в область тени дает меньшую чувствительность параметра  $\Delta v$  от угла дифракции  $\varphi$ . Таким образом, дифракция волн приводит не только к перераспределению энергии волн в пространстве, которое зависит от частоты (или длины волны), но и к спектральному искажению сигналов (в особенности широкополосных сигналов), что необходимо учитывать при создании систем связи.

Прохождение сигнала через совокупность нескольких отверстий  $N$  при радиусе когерентности много больше длин волн, формирующих спектр сигнала, может быть представлено для периодически расположенных отверстий соотношением [3, 7]:

$$\frac{I_\varphi}{I_0} = \left( \frac{\sin u}{u} \right)^2 \cdot \left( \frac{\sin N\gamma u}{\gamma u} \right)^2,$$

$$u = \pi(a/\lambda) \sin \varphi, \quad \gamma = d/a.$$

Первый множитель описывает распределение интенсивности, формируемое одиночным отверстием шириной  $a$  в экране, второй – совокупностью  $N$  излучателей, расположенных с периодом  $d$  в плоскости экрана.

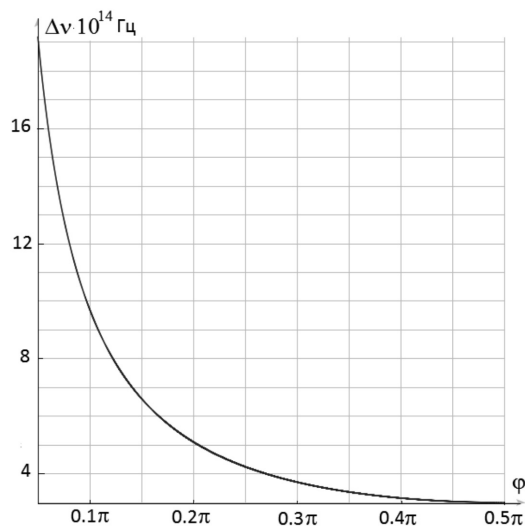


Рис. 3. Зависимость разности частот  $\Delta v$  между частотами с минимальной интенсивностью от угла дифракции

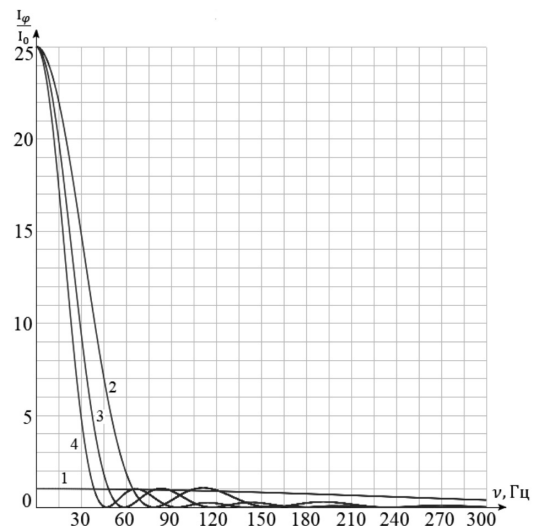


Рис. 4. Спектральное распределение интенсивности сигнала при прохождении 1 – щели и 2,3,4 – дифракционной решетки (кривая 1:  $a = 2$  м,  $N = 1$ ; кривые 2, 3, 4:  $N = 5$ ,  $a = 2, 3, 4$  м соответственно)

Зависимость интенсивности света от частоты для различных углов дифракции ( $\varphi = \pi/18, b = 1$ ) показана на рис. 4. С ростом угла дифракции степень искажения спектра сигнала возрастает [7].

### Заключение

Полученные результаты показывают, что дифракция сигнала на одиночном отверстии в экране и решетке сопровождается как перераспределением интенсивности света в области дифракции, так и искажением спектральной характеристики сигналов, вплоть до подавления отдельных спектральных компонентов сигналов.

Таким образом, дифракция волн на отверстиях в экранах приводит к перераспределению энергии волн в пространстве, которое зависит от частоты (или длины волны) и приводит, как и при интерференции [5, 7], к частотному искажению в особенности широкополосных сигналов. Таким образом, показано, что происходит искажение сигнала, особенно сильно заметное на высоких частотах. Это необходимо учитывать при создании элементов систем связи. Полученные результаты могут стать основой для разработки волновых акустических фильтров, в том числе выполненных на основе дифракционных

решеток, которые будут выделять желательные компоненты спектра информационного сигнала (и подавлять нежелательные компоненты спектра).

### Список литературы

1. Дубнищев Ю.Н. Колебания и волны. СПб.: Лань, 2011. 384 с.
2. Дифракционная нанофотоника / Под ред. В.А. Сойфера. М.: Физматлит, 2011. 680 с.
3. Гринченко В.Т., Вовк И.В., Мацыпура В.Т. Основы акустики. Киев: Наукова думка, 2007. 640 с.
4. Головастиков Н.В., Быков Д.А., Досколович Л.Л., Сойфер В.А. Дифракционные решетки для дифференцирования оптических импульсов в пропускании и отражении // Компьютерная оптика. 2013. № 37 (2). С. 138–145.
5. Глущенко А.Г., Глущенко Е.П., Борисенко А.Ю. Зависимость интенсивности света от длины волны при дифракции на щели в экране // Наука, техника и образование. 2018. № 11 (52). С. 6–12.
6. Ugwu E.I., Songden S.D., Jabil Y.Y. Attenuation of Electromagnetic Wave Propagating Through Roofing Sheet: Aluminum, Zinc and Asbestos. American Journal of Electromagnetics and Applications. 2017. Vol. 5. No. 1. P. 7–13. DOI: 10.11648/j.ajea.20170501.12.
7. Глущенко А.Г., Глущенко Е.П., Фирсова А.А. Зависимость распределения интенсивности дифрагированного света от структуры поля в отверстии плоского экрана // Научное обозрение. Технические науки. 2018. № 6. С. 11–15.
8. Григорьева Н.С., Кадыров С.Г., Куприянов М.С. Дифракция звуковых импульсов на сфере в плоскостом волноводе с градиентным слоем // Акустический журнал. 2018. Т. 64. № 3. С. 275–282.