

Наблюдение эффекта Тальбота для ультразвуковых волн

А. Н. Морозов, М. П. Крикунова, Б. Г. Скуйбин, Е. В. Смирнов¹⁾

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005 Москва, Россия

Поступила в редакцию 19 мая 2017 г.

Исследована дифракция ультразвукового излучения на амплитудной дифракционной решетке в ближней зоне (дифракция Френеля). Впервые обнаружен эффект самоизображения решетки (эффект Тальбота) для ультразвукового излучения на расстояниях от решетки в диапазоне от $z = 0$ до $z = 2L_T$, где L_T – длина Тальбота. Наблюдался дробный эффект Тальбота – ультразвуковое изображение решетки с периодом $d/2$.

DOI: 10.7868/S0370274X17130057

В последнее время дифракция Френеля на периодических структурах вызывает большой интерес исследователей. В первую очередь это относится к явлению самоизображения периодической структуры когерентных источников – эффекту Тальбота [1–3], которое изучалось для различного типа волн – для видимого диапазона [4–8], ультрафиолетового излучения [9, 10], рентгеновских лучей [11–13], волн материи де Бройля [14–17], плазмонов [18–20], а также волн в волноводах [21, 22]. В настоящее время указанное явление широко используют в научных исследованиях и разнообразных технических приложениях [23–25].

Эффект Тальбота заключается в том, что на определенном расстоянии от периодической системы когерентных источников волн (в нашем случае – от щелей дифракционной решетки) без каких-либо преломляющих или отражающих устройств на экране возникает изображение решетки. Расстояние z за решеткой, на котором в результате интерференции волн, идущих от разных щелей, создается это изображение, называется длиной Тальбота L_T . Кроме того, изображение решетки появляется на расстояниях, кратных длине Тальбота, т.е. на $z = 2L_T, 3L_T, 4L_T$ и т.д.

Объяснивший данное явление Релей [2] показал, что длина Тальбота связана с периодом дифракционной решетки d и длиной волны λ соотношением $L_T = 2d^2/\lambda$. Кроме того, он открыл удивительную по красоте интерференционную картину, получившую название ковра Тальбота [2, 13, 22–25]. Из вида этой картины следует, что дифракционная решетка с периодом d может также создавать изображения решетки с дробным периодом d/m , где m – целое число

(дробный эффект Тальбота). Наряду с целочисленным эффектом Тальбота, дробный эффект также наблюдался экспериментально, в частности, для оптического излучения [26, 27] и волн де Бройля атомов гелия [14, 28].

В силу общности волновых явлений различной природы естественно ожидать, что отмеченные выше эффекты дифракции в ближней зоне могут наблюдаться и для ультразвуковых волн.

Целью данной работы является экспериментальное обнаружение и исследование эффекта Тальбота в ультразвуковом диапазоне.

Схема экспериментальной установки для наблюдения дифракции ультразвуковых волн на дифракционной решетке представлена на рис. 1. Ультразвуковое излучение частотой $f = 40$ кГц

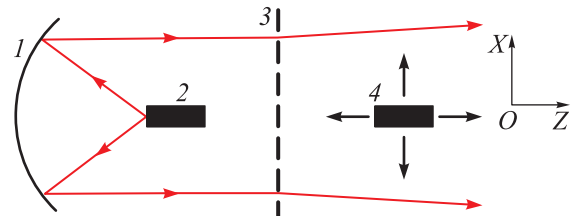


Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема экспериментальной установки: 1 – сферическое зеркало, 2 – излучатель, 3 – дифракционная решетка, 4 – приемник дифрагировавшего излучения

($\lambda = 8.3$ мм) от излучателя 2, расположенного в фокусе сферического зеркала 1, отражается от него и попадает на дифракционную решетку 3. Дифрагировавшее излучение регистрировалось ультразвуковым приемником 4, расположенным за решеткой. Приемник можно перемещать в горизонтальном направлении X , перпендикулярном оптической оси Z системы. Перемещение приемника

¹⁾e-mail: seva09@rambler.ru

в продольном Z и поперечном X направлениях осуществляется с точностью до 10 мкм.

В опытах в качестве излучателя и приемника ультразвуковой волны использовали пьезокерамические преобразователи. Сферическое зеркало представляло собой сегмент из алюминия, имеющий радиус сферы $R_{sp} = 300$ мм и радиусом основания сегмента $R_{seg} = 150$ мм. Дифракционная решетка была сделана из твердого картона и имела $N = 8$ щелей; ширина щели $b = 4$ мм, период решетки $d = 16$ мм. При указанных значениях λ и d длина Тальбота для ультразвукового излучения составляла $L_T = 62$ мм.

При настройке экспериментальной установки добивались максимального приближения геометрии фронта ультразвуковой волны к виду плоской волны с помощью перемещения излучателя вдоль оси Z и юстировок излучателя и зеркала по осям X и Y .

Результаты исследования дифракции ультразвукового излучения на решетке представлены на рис. 2 для расстояний $z = 1$ мм, $z = L_T$ и $z = 2L_T$. На

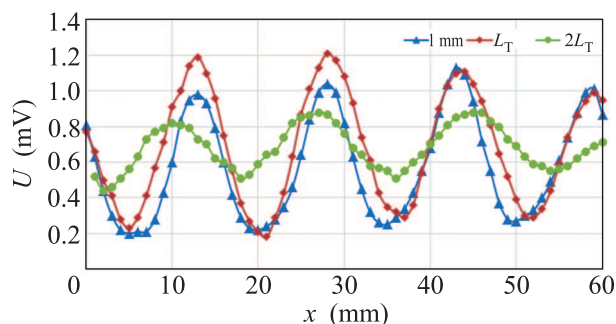


Рис. 2. (Цветной онлайн) Изображение на расстоянии $z = 1$ мм и самоизображения (на расстояниях $z = L_T$ и $z = 2L_T$) дифракционной решетки

графике приведены зависимости $U(x)$ напряжения от поперечного смещения x детектора, измеренные на приемнике. Это напряжение пропорционально амплитуде давления ультразвуковой волны на пьезоэлемент приемника.

Зависимости для всех трех значений z имеют вид, близкий к синусоиду, что может быть связано со следующим обстоятельством: размер принимающего элемента детектора $\rho = 5$ мм сравним с шириной щели дифракционной решетки b . Данное утверждение справедливо и для всех представленных ниже дифракционных кривых.

График $U(x)$, построенный при $z = 1$ мм, отвечает собственному изображению дифракционной решетки. Самоизображения решетки, полученные на расстояниях $z = L_T$ и $z = 2L_T$, представляют собой функции $U(x)$, которые меняются практически

синфазно с изображением самой решетки. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что на указанных расстояниях ультразвуковая волна, как и следует из теоретического анализа [2, 3], создает самоизображения дифракционной решетки. Незначительный сдвиг по фазе между этими изображениями обусловлен тем, что при небольшом числе щелей решетки ($N = 8$) ее период самоизображения незначительно увеличивается с ростом z [8]. Именно это увеличение и наблюдается при $z = 2L_T$.

Картины самоизображения дифракционной решетки, наблюдаемые в области расстояний за решеткой $\frac{1}{2}L_T \leq z \leq \frac{3}{2}L_T$, приведены на рис. 3. Изображения, полученные при $z = \frac{1}{2}L_T$ и $z = \frac{3}{2}L_T$,

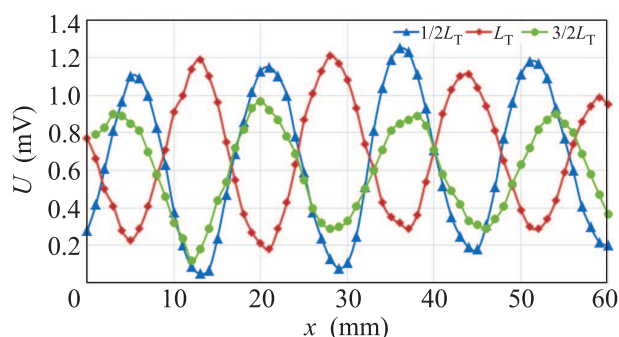


Рис. 3. (Цветной онлайн) Самоизображения дифракционной решетки на расстояниях $z = \frac{1}{2}L_T$, $z = L_T$, $z = \frac{3}{2}L_T$

как следует из теории, имеют тот же период, что и исходная решетка, но сдвинуты относительно нее вдоль оси X на половину периода. При этом функция $U(x)$ для них меняется в противофазе с самоизображением дифракционной решетки, полученным при $z = L_T$.

Исследование дробного эффекта Тальбота на расстоянии $z = 1/4L_T$ за решеткой (рис. 4) продемонстрировало удвоенную частоту изменения дифракционной картины вдоль оси x (кривая 2) по сравнению с изображением решетки при $z = 1/2L_T$ (кривая 1), что согласуется с результатами общего теоретического рассмотрения [2, 3]. Вид кривой 2 означает появление в дифракционной картине Тальбот-изображения решетки с периодом, равным $d/2$. Для наглядности масштаб кривой 2 составляет 0.6 от масштаба кривой 1 по вертикальной оси.

Результаты проведенного эксперимента позволили обнаружить эффект Тальбота (эффект самоизображения) для ультразвуковых волн и качественно подтвердить наличие дробного эффекта Тальбота. Для детального анализа этого явления и изучения ультразвуковых Тальбот-изображений более высо-

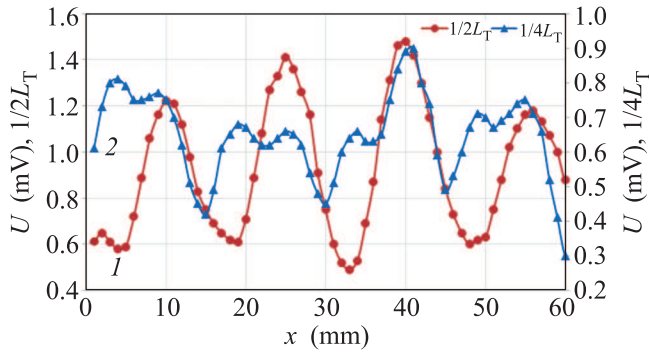


Рис. 4. (Цветной онлайн) Самоизображение дифракционной решетки с периодом d на расстоянии $z = 1/2 L_T$ (кривая 1) и дробное самоизображение с периодом $d/2$ на расстоянии $z = 1/4 L_T$ (кривая 2)

ких порядков планируется проведение новых экспериментов. Отмеченные особенности дифракционных картин в ближней зоне дифракции ультразвука, в частности, перераспределение и фокусировка ультразвуковой волны с помощью дифракционной решетки, могут найти практическое применение в биологии, медицине и целом ряде других областей.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить В.С. Горелика и Л.А. Чернозатонского за стимулирующие обсуждения, а также А.Ю. Земтура и О.Д. Орлова за помощь в проведении эксперимента.

1. H. F. Talbot, *Philos. Mag.* **9**, 401 (1836).
2. J. S. Rayleigh, *Philos. Mag.* **11**, 196 (1881).
3. K. Patorski, *Progress in Optics* **27**, 1 (1989).
4. J. T. Winthrop and C. R. Worthington, *J. Opt. Soc. Am.* **55**, 373 (1965).
5. M.-S. Kim, T. Scharf, C. Menzel, C. Rockstuhl, and H. P. Herzig, *Opt. Express* **20**, 4903 (2012).
6. J. Maass, O. Sandfuchs, D. Tomae, A. Gatto, and R. Brunner, *J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public.* **8**, 13004 (2013).
7. J. Jahns, H. Knuppertz, and A. Lohmann, *Opt. Commun.* **225**, 13 (2003).
8. A. Wang, P. Gill, and A. Molnar, *Appl. Opt.* **48**, 5897 (2009).
9. C.-H. Chang, L. Tian, W. Hesse, H. Gao, H. J. Choi,

- J.-G. Kim, M. Siddiqui, and G. Barbastathis, *Nano Lett.* **11**, 2533 (2011).
10. A. Isoyan, F. Jiang, Y. Cheng, and F. Cerrinab, *J. Vac. Sci. Technol. B* **27**, 2931 (2009).
11. J. Kim, I. Cho, S. Lee, H. C. Kang, R. Conley, C. Liu, A. T. Macrander, and D. Y. Noh, *Opt. Express* **18**, 24975 (2010).
12. S. Y. Lee, I. H. Cho, J. M. Kim, H. Yan, R. P. Conley, C. Liu, A. T. Macrander, J. M. Maser, B. Stephenson, H. C. Kang, and D. Y. Noh, *J. Appl. Phys.* **109**, 044307 (2011).
13. A. Momose, *Jap. J. Appl. Phys.* **44**, 6355 (2005).
14. A. Cronin, J. Schmiedmayer, and D. Pritchard, *Rev. Mod. Phys.* **81**, 1051 (2009).
15. K. Hornberger, S. Gerlich, Ph. Haslinger, S. Nimmrichter, and M. Arndt, *Rev. Mod. Phys.* **84**, 157 (2012).
16. B. Brezger, L. Hackermuller, S. Uttenthaler, J. Petschinka, M. Arndt, and A. Zeilinger, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 100404 (2002).
17. L. Hackermuller, S. Uttenthaler, K. Hornberger, E. Reiger, B. Brezger, A. Zeilinger, and M. Arndt, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 090408 (2003).
18. S. Cherukulappurath, D. Heinis, J. Cesario, N. F. van Hulst, S. Enoch, and R. Quidant, *Opt. Express* **17**, 23772 (2009).
19. Y. Yu, D. Chassaing, T. Scherer, B. Landenberger, and H. Zappe, *Plasmonics* **8**, 723 (2013).
20. M. Dennis, N. I. Zheludev, and F. Abadjo, *Opt. Express* **15**, 9692 (2007).
21. R. Iwanow, D. May-Arrijoja, D. Christodoulides, G. I. Stegeman, Y. Min, and W. Sohler, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 053902 (2005).
22. L. Zhi, Zh. Hai-Feng, Y. Jian-Yi, and J. Xiao-Qing, *Chin. Phys. Lett.* **25**, 3307 (2008).
23. J. Wen, Y. Zhang, and M. Xiao, *Advances in optics and photonics* **5**, 83 (2013).
24. Е. В. Смирнов, Б. Г. Скуйбин, Л. К. Мартинсон, *Физическое образование в вузах* **20**(2), 109 (2014).
25. Е. В. Смирнов, Б. Г. Скуйбин, Л. К. Мартинсон, *Физическое образование в вузах* **20**(4), 15 (2014).
26. W. Case, M. Tomandl, S. Deachapunya, and M. Arndt, *Opt. Express* **17**, 20966 (2009).
27. B. Besold and N. Lindlein, *Optical Engineering* **36**, 1099 (1997).
28. S. Novak, Ch. Kurtsiefer, T. Pfau, and C. David, *Opt. Lett.* **22**, 1430 (1997).