

Исследование профиля оптоакустического сигнала в биологических тканях

Д. А. Кравчук

Южный федеральный университет, Таганрог

Аннотация: оптико-акустические акустические переходные процессы, возникающие в результате оптического поглощения и термоупругого расширения, содержат информацию об оптических свойствах облучаемой среды. Профиль оптоакустического сигнала, генерируемого поглотителем, например от раковых клеток, имеет сложную геометрическую структуру, может быть представлен сверткой акустических волн, излучаемых рядом мелких сферических источников. Рассчитан профиль оптоакустического сигнала полученный в результате воздействия лазерного излучения с длиной волны 1064 нм на модельную жидкость, содержащую сферические поглотители.

Ключевые слова: оптоакустика, оптоакустические волны, поглощение, сферический поглотитель.

Рассмотрим сферу радиуса r , где коэффициент поглощения $\mu_{\text{погл}} \gg \mu_{\text{рассеян}}$ и выполняются следующие условия (τ_p длительность лазерного импульса):

1. Равномерное поглощение оптической энергии, то есть $\mu_{\text{погл}} \ll 1/r$,
2. $\tau_p < \tau_{\text{th}}$ (τ_{th} - время тепловой релаксации),
3. Время стресса, $\tau_p < \tau_{\text{стр}}$
4. Акустические свойства сферического поглотителя идентичны окружающей среде, то акустический импульс, создаваемый из-за термоупругого расширения поглотителя, будет распространяться во всех направлениях, где генерируемое давление может быть выражено как [1]:

$$p\left(\tau = t - \frac{r}{v_{\text{ср}}}\right) = \frac{1}{2r} \frac{\mu_{\text{погл}} F}{V_{\text{сферы}}} \quad (1) \quad (2.3.16)$$

Здесь объем сферы равен $V_{\text{сферы}} = \frac{4}{3} \pi a^3$, r - расстояние от точки наблюдения до центра сферического поглотителя, a - радиус сферы, $v_{\text{ср}}$ - скорость звука в среде, а F - плотности энергии лазерного излучения, падающей на сферу.

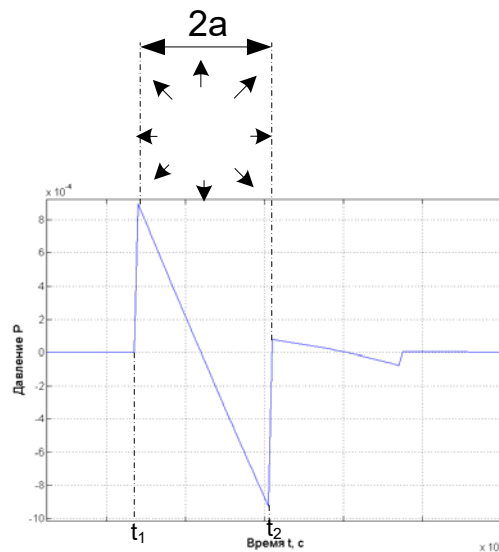


Рисунок 1. Форма оптико-акустического сигнала, генерируемого сферой радиуса a .

Полученная оптико-акустическая волна представляет типичный профиль N-формы с угловым сжатием треугольника с последующей антисимметричной фазой растяжения (Рис. 1) [1, 3, 8-10]. Длительность оптико-акустического сигнала определяется скоростью распространения звука по диаметру сферы, как [1- 3]:

$$2a = \frac{(t_2 - t_1)}{2} v_{cp} \quad (2)$$

Информация о частотном спектре переходных процессов акустического сигнала, генерируемых оптическим взаимодействием со сферой, предоставляется из преобразования Фурье временного сигнала, приведенного в [3-6]:

$$P(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (3)$$

Если спектр имеет следующий вид [3]:

$$p(\omega) = \frac{\left(\frac{\omega a}{v_{среды}}\right) \cos\left(\frac{\omega a}{v_{среды}}\right) - \sin\left(\frac{\omega a}{v_{среды}}\right)}{\left(\frac{\omega a}{v_{среды}}\right)^2}, \quad (4)$$

где ω - частота ультразвуковых сигналов.

Из спектра сигнала полученного в [10] можно получить частоту, когда спектр максимален (уравнение (5)), и полосу пропускания оптоакустической эмиссии, в уравнении (6).

$$f_{\max} = 0.33 \frac{v_{\text{среды}}}{a} \quad (5)$$

Вышеприведенное выражение описывает полосу акустического сигнала для поглощающей сферы. Однако эта полоса пропускания подходит только для низкочастотной части акустического сигнала, которая линейно уменьшается (рис.1). Для обнаружения нарастания и падения акустического сигнала на границах требуется более высокая пропускная способность.

Однако, увеличивая пропускную способность, тепловой шум в процессе обнаружения также увеличивается, поэтому должен быть сделан компромисс. Это обычно делается с учетом того, что время нарастания акустического сигнала в 0,3 раза больше общего времени импульса, в этом случае $0,3 \frac{2a}{v_{\text{среды}}}$, что по частоте эквивалентно

$$f_{\max} = 1.5 \frac{v_{\text{среды}}}{a} \quad (6)$$

В мягких тканях могут существовать сферические частицы разных размеров, необходимо, чтобы полоса пропускания приемника была способна определять временной профиль каждой сферы. Математическое моделирование таких частиц, с разными свойствами, на разных длинах волн проводилось в работах [11-20], эксперименты по обнаружению оптоакустического взаимодействия в движущихся жидкостях проведены в работе [7].

Литература

1. Oraevsky A. A., Karabutov A. A. Biomedical Photonics Handbook. Vo-Dinh, T., editor. Vol. PM125. 2003. pp. 3401-3434.

2. Kumar, S. and V.B. Singh, Indian Journal of Pure & Applied Physics, 1992. 30(3): pp. 89-93.
3. Oraevsky, A.A. and A.A. Karabutov. SPIE, 2000. 3916(1): pp. 228-239.
4. Petrova I.Y. et al. Optoacoustic monitoring of total hemoglobin concentration: In vitro, and in vivo studies. Biomedical Topical Meeting. Optical Society of America. 2004, paper FN4.
5. M. Soehle, M. Jaeger, J. Meixensberger, Neurological Research 25, no. 4, pp. 411-417 (2003).
6. J. P. Coles, Current Opinion in Critical Care 10, no. 2, pp.120-125 (2004).
7. Старченко И.Б., Кравчук Д.А., Кириченко И.А. Прототип оптоакустического лазерного цитомера. Медицинская техника. 2017. №5. С. 4-7.
8. Кравчук Д.А., Старченко И.Б. Математическое моделирование оптоакустического сигнала от агрегированных эритроцитов для оценки уровня агрегации. Санкт-Петербург. Российская академия наук Институт аналитического приборостроения РАН. Научное приборостроение, 2018, том 28, № 1, с. 30–36.
9. Д. А. Кравчук, И. Б. Старченко Моделирование процесса насыщения кислородом биологических тканей с помощью оптоакустического метода. Санкт-Петербург. Российская академия наук. Институт аналитического приборостроения РАН. Научное приборостроение, 2018, том 28, № 2, с. 20–25.
10. Кравчук Д.А., Старченко И.Б. Математическое моделирование оптикоакустического сигнала от эритроцитов. Вестник новых медицинских технологий. 2018. № 1. С. 96-101.
11. Кравчук Д.А., Старченко И.Б. Математическое моделирование оптикоакустического сигнала от сферических поглотителей на примере эритроцитов. "Известия Юго-Западного государственного



университета". Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2017. Т.7. №3 (24) с. 101-107.

12. Кравчук Д.А. Система проточной лазерной диагностики жидкостей при генерации оптоакустического сигнала на рассеивателях сферической формы. Качество и жизнь. Москва 2017. №4. с.74-78

13. Кравчук Д.А. О методе моделирования оптоакустических сигналов от источников сферической формы на примере эритроцитов. Качество и жизнь. Москва 2017. №4. с.78-80

14. Кравчук Д.А. Теоретические исследования генерации оптоакустических волн в жидкости цилиндрическими поглотителями // Инженерный вестник Дона. 2017. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4350

15. Кравчук Д.А. Аналитический результат генерации оптоакустических волн для сферических поглотителей в дальнем поле// Инженерный вестник Дона. 2017. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4436.

16. Кравчук Д.А. Применение оптоакустических методов в биомедицинских исследованиях // Инженерный вестник Дона, 2017, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4484

17. Математическая модель агрегации эритроцитов для исследования оптоакустическим методом. Качество и жизнь. Москва. 2018. № 1 (16). С. 41-43.

18. Кравчук Д.А. Математическая модель изменения формы эритроцитов для регистрации патологии оптоакустическим методом Качество и жизнь. Москва. 2018. № 1 (16). С. 44-46.

19. Кравчук Д.А. Особенности формирования оптоакустических волн в биологических тканях. Инженерный вестник Дона, 2018. № 1. ivdon.ru/magazine/archive/n1y2018/4766

20. Кравчук Д.А., Созинова А.М. О возможности обнаружения вирусов оптоакустическим методом с использованием углеродных наночастиц.

Инженерный вестник Дона, 2018. № 1.
ivdon.ru/magazine/archive/n1y2018/4976.

References

1. Oraevsky A. A., Karabutov A. A. Biomedical Photonics Handbook. Vo-Dinh, T., editor. Vol. PM125. 2003. pp. 3401-3434.
2. Kumar, S. and V.B. Singh, Indian Journal of Pure & Applied Physics, 1992. 30(3): pp. 89-93.
3. Oraevsky, A.A. and A.A. Karabutov. SPIE, 2000. 3916(1): pp. 228-239.
4. Petrova I.Y. et al. Optoacoustic monitoring of total hemoglobin concentration: In vitro, and in vivo studies. Biomedical Topical Meeting. Optical Society of America. 2004, paper FH4.
5. M. Soehle, M. Jaeger, J. Meixensberger, Neurological Research 25, № 4, 411-417 (2003).
6. J. P. Coles, Current Opinion in Critical Care 10, no. 2, pp.120-125 (2004).
7. Starchenko I.B., Kravchuk D.A., Kirichenko I.A. Medicinskaya tekhnika. 2017. №5. pp. 4-7.
8. Kravchuk D.A., Starchenko I.B. Rossijskaya akademiya nauk. Institut analiticheskogo priborostroeniya RAN. Nauchnoe priborostroenie, 2018, tom 28, № 1, pp. 30–36.
9. D. A. Kravchuk, I. B. Starchenko. Sankt-Peterburg. Rossijskaya akademiya nauk. Institut analiticheskogo priborostroeniya RAN. Nauchnoe priborostroenie, 2018, tom 28, № 2, pp. 20–25.
10. Kravchuk D.A., Starchenko I.B. Vestnik novyh medicinskih tekhnologij. 2018. № 1. pp. 96-101.
11. Kravchuk D.A., Starchenko I.B. "Izvestiya YUgo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta". Seriya Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie. 2017. T.7. №3 (24) pp. 101-107.



12. Kravchuk D.A. Kachestvo i zhizn'. Moskva 2017. №4. pp.74-78
13. Kravchuk D.A. Kachestvo i zhizn'. Moskva 2017. №4. pp.78-80
14. Kravchuk D.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4350 ISSN 2073-8633.
15. Kravchuk D.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4436.
16. Kravchuk D.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4484
17. Kravchuk D.A. Kachestvo i zhizn'. Moskva. 2018. № 1 (16). pp. 41-43.
18. Kravchuk D.A. Kachestvo i zhizn'. Moskva. 2018. № 1 (16). pp. 44-46.
19. Kravchuk D.A. Inzhenernyj vestnik Dona 2018. №1. ivdon.ru/magazine/archive/n1y2018/4766
20. Kravchuk D.A. Inzhenernyj vestnik Dona 2018. № 1. ivdon.ru/magazine/archive/n1y2018/4976.