

Южно-Уральский государственный университет  
Кафедра оптоинформатики

Калинушкин Иван Викторович

**Создание суперосцилляций при помощи многолучевой  
интерференции**

Выпускная квалификационная работа магистранта

Научный руководитель  
д.ф.-м.н. Микляев Ю.В.

Челябинск 2018

## Оглавление

Введение .....	3
Обзор литературных данных.....	5
1. Суперосцилляция .....	5
2. Алгоритмы сверхразрешение.....	123
Используемые методы .....	22
Экспериментальные методы.....	2022
Теоретические методы .....	25
Компьютерные методы .....	26
Закключение .....	28
Список литературы .....	29

## Введение

Разрешение оптического микроскопа ограничено половиной длины волны используемого для освещения света и числовой апертуры используемого объектива. Существует ряд техник, которыми можно воздействовать на данные параметры [1, 2]. Увеличение числовой апертуры можно добиться путем создания суперлинз [3-6] в своей основе имеющие свойство как отрицательный показатель преломления. Т.е. в них электроны движутся в направлении противоположным по отношению к силам создаваемыми электрическими и магнитными полями. На данный момент этот способ существенно ограничен сложностью изготовления метаматериалов для видимых диапазонов излучения электромагнитных волн, так еще и требует непосредственного нанесения суперлинзы на изучаемый образец.

Второй путь разработка методов управления электромагнитным излучением на наномасштабе – актуальная задача, которую сегодня решает нанофотоника. Нанофотоника является разделом фотоники изучающие физические процессы, возникающие при взаимодействии фотонов с нанометровыми объектами. Миниатюризация лазеров до субволнового масштаба является крайне перспективным направлением в свете различных прикладных применений. В их число входит создание оптических каналов связи между электронными компонентами вычислительной схемы. Другой потенциальной областью применения нанолазеров может стать томография биологических тканей и отдельных клеток. Субволновая локализация электромагнитного поля лазерной моды может быть достигнута при использовании плазмонного резонатора – наночастицы, выполненной из плазмонного металла. Тем не менее, создание нанолазеров и демонстрация лазерной генерации на субволновом масштабе затрудняются крайне высоким уровнем оптических потерь в плазмонных наночастицах [7 - 9], что приводит к увеличению порога лазерной генерации. Крайне интересный способ управления излучением и взаимодействием излучения с веществом на наномасштабе предполагает использование так называемых суперосцилляций – особых распределений электромагнитного поля, которые демонстрирует быстрые осцилляции в некоторой пространственной области, несмотря на ограниченность пространственного спектра [10 - 13]. С помощью таких полей можно добиться получения, теоретически, сколь угодно малого фокуса. Что не маловажно, это позволяет использовать оптический микроскоп для исследования живых организмов не вмешиваясь в их жизнедеятельность [14] и не убивая при нанесение вспомогательных компонентов, такие как люминофор [15 - 18], иммерсионных масел и тд.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование распределения интенсивности в сечении суперосцилляции созданной при помощи многолучевой интерференции.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Создать экспериментальную установку для регистрации изображений со суперосцилляциями.
2. Получить изображение поперечного сечения многолучевой интерференции на образце и провести сканирование образцом полос многолучевой интерференции.
3. Построить график распределение интенсивности в сечении многолучевой интерференции.

## Закключение

Хотя эксперимент не дал ожидаемых результатов метод еще не доказал свою несостоятельность, так как неудача может быть связана с чересчур чувствительной камерой или низким качеством люминофора, который не дает равномерную картину люминесценции, и сканер просто попадает в области с интерференцией от двух или более люминесцентных областей.

Таким образом в результате проведенных исследований было проведено экспериментальное исследование распределение интенсивности в сечении перетяжек суперосциллирующего пучка для выяснения возможности его использование в сверхразрешающей оптической микроскопии.

Для достижения поставленной цели было выполнено:

- 1 Создана экспериментальная установка для регистрации изображений со суперосцилляциями.
- 2 Получено изображение поперечного сечения многолучевой интерференции на образце и проведено сканирование образцом полос многолучевой интерференции.
- 3 Построен график распределение интенсивности в сечении многолучевой интерференции.

## Список литературы

1. Zheludev N.I. What diffraction limit? / Zheludev N.I. // Nature materials – 2008. – Т. 7 – № 6 – С.420–422.
2. Leach R. Applications of super-resolution imaging in the field of surface topography measurement / Leach R., Sherlock B. // Surface Topography: Metrology and Properties – 2014. – Т. 2 – № 2 – С.23001.
3. Morgado T.A. Negative refraction and partial focusing with a crossed wire mesh: Physical insights and experimental verification / Morgado T.A., Marcos J.S., Maslovski S.I., Silveirinha M.G. // Applied Physics Letters – 2012. – Т. 101 – № 2.
4. Kaina N. Negative refractive index and acoustic superlens from multiple scattering in single negative metamaterials / Kaina N., Lemoult F., Fink M., Lerosey G. // Nature – 2015. – Т. 525 – № 7567 – С.77–81.
5. Wong Z.J. Optical and acoustic metamaterials: superlens, negative refractive index and invisibility cloak / Wong Z.J., Wang Y., O'Brien K., Rho J., Yin X., Zhang S., Fang N., Yen T.-J., Zhang X. // Journal of Optics – 2017. – Т. 19 – № 8 – C.084007.
6. Putten E.G. Van Scattering lens resolves sub-100 nm structures with visible light / Putten E.G. Van, Akbulut D., Bertolotti J., Vos W.L., Lagendijk A., Mosk A.P. // Physical Review Letters – 2011. – Т. 106 – № 19 – C.1–4.
7. Chen X. High-resolution 3D imaging and quantification of gold nanoparticles in a whole cell using scanning transmission ion microscopy / Chen X., Chen C.-B., Udagama C.N.B., Ren M., Fong K.E., Yung L.Y.L., Giorgia P., Bettiol A.A., Watt F. // Biophysical journal – 2013. – Т. 104 – № 7 – C.1419–1425.
8. Saurabh S. Evaluation of sCMOS cameras for detection and localization of single Cy5 molecules / Saurabh S., Maji S., Bruchez M.P. // Optics express – 2012. – Т. 20 – № 7 – C.7338–7349.
9. Khurgin J.B. and Sun G. Comparative analysis of spasers, vertical-cavity surface-emitting lasers and surface-plasmon-emitting diodes // Nature Photonics. – 2014. – Vol. 8. – P. 468.
10. Wong A.M.H. Sub-wavelength focusing at the multi-wavelength range using superoscillations: An experimental demonstration / Wong A.M.H., Eleftheriades G. V. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation – 2011. – Т. 59 – № 12 – C.4766–4776.
11. Kempf A. Black holes, bandwidths and Beethoven // Journal of Mathematical Physics. – 2000. – Vol. 41. – P. 2360.
12. Lee D.G. Direct construction of superoscillations / Lee D.G., Ferreira P.J.S.G. // Signal Processing, IEEE Transactions on – 2014. – Т. 62 – № 12 – C.3125–3134.

13. Lee D.G. Superoscillations with Optimal Numerical Stability / Lee D.G., Ferreira P.J.S.G. // *Signal Processing Letters, IEEE* – 2014. – T. 21 – № 12 – C.1443–1447.
14. Patterson G. Superresolution Imaging using Single-Molecule Localization / Patterson G., Davidson M., Manley S., Lippincott-Schwartz J. // *Annual Review of Physical Chemistry* – 2010. – T. 61 – № 1 – C.345–367.
15. Huang B. Super resolution fluorescence microscopy / Huang B., Bates M., Zhuang X. // *Annual Review of Biochemistry* – 2010. – T. 78 – C.993–1016.
16. Dahan, M. Fluorescence microscopy for biological imaging./ Dahan, M.// *In Physics and Biology: From Molecules to Life*. Edited by ALLEMAND JEAN-FRANCOIS ET AL. Published by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015. ISBN# 9789814616485, pp. 31-48 (Vol. 1, pp. 31–48).
17. Willig K.I. STED microscopy with continuous wave beams / Willig K.I., Harke B., Medda R., Hell S.W. // *Nature methods* – 2007. – T. 4 – № 11 – C.915–918.
18. Juette M.F. Adaptive optics enables three-dimensional single particle tracking at the sub-millisecond scale / Juette M.F., Rivera-Molina F.E., Toomre D.K., Bewersdorf J. // *Applied Physics Letters* – 2013. – T. 102 – № 17.
19. Born M. Principles of Optics. / Born M., Wolf E. // Cambridge University Press, 1999.
20. Aharonov Y. Superpositions of time evolutions of a quantum system and a quantum time-translation machine / Aharonov Y., Anandan J., Popescu S., and Vaidman L. // *Physical review letters*. – 1990. – Vol. 64. – P. 2965–2968.
21. Berry M.V. Evanescent and real waves in quantum billiards and Gaussian beams // *Journal of Physics A: Mathematical and General*. – 1994. – Vol. 27. – P. 391–398.
- 22.1. Lee D.G. Direct construction of superoscillations / Lee D.G., Ferreira P.J.S.G. // *Signal Processing, IEEE Transactions on* – 2014. – T. 62 – № 12 – C.3125–3134.
23. Lindberg, J. (2012). Mathematical concepts of optical superresolution. // *Journal of Optics (United Kingdom)*, 14(8).
24. Mote R.G. Near-field focusing properties of zone plates in visible regime - - New insights / Mote R.G., Yu S.F., Ng B.K., Zhou W., Lau S.P. // *Opt. Express* – 2008. – T. 16 – № 13 – C.9554–9564.
25. Li J.-H. Modulation of optical focusing by using optimized zone plate structures / Li J.-H., Lin C.-H., Tsai Y.-J., Cheng Y.-W., Sheu T.W.-H. // *Opt. Express* – 2010. – T. 18 – № 22 – C.22772–22780.
26. Li J.-H. The influence of propagating and evanescent waves on the focusing properties of zone plate structures / Li J.-H., Cheng Y.-W., Chue Y.-C., Lin C.-H., Sheu T.-H. // *Opt. Express* – 2009. – T. 17 – № 21 – C.18462–18468.

27. Lawandy N.M. Localized surface plasmon singularities in amplifying media // *Applied Physics Letters*. – 2004. – Vol. 85. – P. 5040.
28. Stockman M.I. The spaser as a nanoscale quantum generator and ultrafast amplifier // *J. Opt.* – 2010. – Vol. 12. – P. 024004. 114
29. Sarychev A.K. and Tartakovskiy G. Magnetic plasmonic metamaterials in actively pumped host medium and plasmonic nanolaser // *Phys. Rev. B*. – 2007. – Vol. 75. – P. 1-9.
30. Rogers E.T.F. A super-oscillatory lens optical microscope for subwavelength imaging / E. T. F. Rogers, J. Lindberg, T. Roy, S. Savo, J. E. Chad, M. R. Dennis, N. I. Zheludev // *Nat. Mater.* – 2012. – T. 11 – № 5 – 432–435c.
31. Huang F.M. Super-Resolution without Evanescent Waves / F. M. Huang, N. I. Zheludev // *Nano Lett.* – 2009. – T. 9 – № 3 – 1249–1254c.
32. Rogers E.T.F. Optical super-oscillations: sub-wavelength light focusing and super-resolution imaging / E. T. F. Rogers, N. I. Zheludev // *J. Opt.* – 2013. – T. 15 – № 9 – 94008c
33. Wang, J., Qin, F., Hua Zhang, D., Li, D., Wang, Y., Shen, X., ... Teng, J. (2013). Subwavelength superfocusing with a dipole-wave-reciprocal binary zone plate. *Applied Physics Letters*, 102(6).
34. Petrov N.I. Remote focusing of a light beam / N. I. Petrov // *Laser Phys. Lett.* – 2016. – T. 13 – № 1– 15101c.
35. Berry M. V Exact nonparaxial transmission of subwavelength detail using superoscillations / Berry M. V // *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* – 2013. – T. 46 – № 20 – C.205203.
36. Greenfield E. Experimental generation of arbitrarily shaped diffractionless superoscillatory optical beams. / E. Greenfield, R. Schley, I. Hurwitz, J. Nemirovsky, K. G. Makris, M. Segev // *Opt. Express* – 2013. – T. 21 – № 11– 13425–35c.
37. Dong X.H. Superresolution far-field imaging of complex objects using reduced superoscillating ripples / Dong X.H., Wong A.M.H., Kim M., Eleftheriades G. V. // *Optica* – 2017. – T. 4 – № 9 – C.1126.
38. Eliezer Y. Breaking the Temporal Resolution Limit by Superoscillating Optical Beats / Eliezer Y., Hareli L., Lobachinsky L., Froim S., Bahabad A. // *Physical Review Letters* – 2017. – T. 119 – № 4 – C.1–5.
39. Yu Y. An Investigation of Influencing Factors on Practical Sub-Diffraction-Limit Focusing of Planar Super-Oscillation Lenses / Yu Y., Li W., Li H., Li M., Yuan W. – 2018.
40. Tang D. Ultrabroadband superoscillatory lens composed by plasmonic metasurfaces for subdiffraction light focusing / Tang D., Wang C., Zhao Z., Wang Y., Pu M., Li X., Gao P., Luo X. // *Laser and Photonics Reviews* – 2015. – T. 9 – № 6 – C.713–719.
41. Tomasi C., Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images // *Proc. IEEE 6th Int. Conf. on Computer Vision - Bombay, India, Jan. 4-7, IEEE - 1998*, - p. 839 – 846.



42. Крапчатова Т. В., Филиппов М. В. Анализ эффективности алгоритмов билатеральной фильтрации // Наука и образование - 77-30569/340957 - февраль 2012.
43. Tae-Wuk Bae, Kyu-Ik Sohng Small Target Detection Using Bilateral Filter Based on Edge Component // Infrared Milli Terahz Waves – 2010, Vol. 31 - p. 735–743.
44. Сойфер В. А. Методы компьютерной обработки изображений: 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ - 2003 - с. 784.
45. Артемьев В.М., Наумов А.О., Кохан Л.Л. Обнаружение точечных объектов на изображениях в условиях неопределенности // Информатика - апрель - июль 2010 - №2.
46. Suyog D. Deshpande, M.H. Er, V. Ronda, Phillip Chan Max-Mean and Max-Median filters for detection of small-targets // SPIE - 1999, Vol. 3809.
47. Ассельборн С.А. Сканирование оптического ближнего поля микрочастицами, взвешенными в иммерсионной жидкости / Ю.В. Микляев, С.А. Ассельборн, А.М. Герасимов // ПЖТФ, 2014, том 40, выпуск 15
48. Hyvärinen H.J. Limitations of superoscillation filters in microscopy applications / Hyvärinen H.J., Rehman S., Tervo J., Turunen J., Sheppard C.J.R. // Optics letters – 2012. – Т. 37 – № 5 – С.903–905.
49. Zalevsky Z. Super-resolved imaging with randomly distributed, time- and size-varied particles / Zalevsky Z., Fish E., Shachar N., Vexberg Y., Micó V., Garcia J. // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics – 2009. – Т. 11 – № 8 – С.85406.
50. Bechhoefer J. What is superresolution microscopy? / Bechhoefer J. // American Journal of Physics – 2015. – Т. 83 – № 1 – С.22–29.
51. Berry M. V Exact nonparaxial transmission of subwavelength detail using superoscillations / Berry M. V // Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical – 2013. – Т. 46 – № 20 – С.205203.
52. Wang Z. Optical virtual imaging at 50 nm lateral resolution with a white-light nanoscope / Wang Z., Guo W., Li L., Luk'Yanchuk B., Khan A., Liu Z., Chen Z., Hong M. // Nature Communications – 2011. – Т. 2 – № 1 – С.216–218.
53. Juette M.F. Adaptive optics enables three-dimensional single particle tracking at the sub-millisecond scale / Juette M.F., Rivera-Molina F.E., Toomre D.K., Bewersdorf J. // Applied Physics Letters – 2013. – Т. 102 – № 17.
54. Small A.R. Superresolution Localization Methods / Small A.R., Parthasarathy R. // Annual Review of Physical Chemistry – 2014. – Т. 65 – № 1 – С.107–125.
55. Tajahuerce E. Image transmission through dynamic scattering media by single-pixel photodetection / Tajahuerce E., Durán V., Clemente P., Irlés

- E., Soldevila F., Andrés P., Lancis J. // *Opt. Express* – 2014. – Т. 22 – № 14 – С.16945–16955.
56. Skupsch C. Multiple-plane particle image velocimetry using a light-field camera / Skupsch C., Brucker C. // *Optics express* – 2013. – Т. 21 – № 2 – С.1726–1740.
57. Hillman T.R. Digital optical phase conjugation for delivering two-dimensional images through turbid media / Hillman T.R., Yamauchi T., Choi W., Dasari R.R., Feld M.S., Park Y., Yaqoob Z. // *Scientific Reports* – 2013. – Т. 3 – С.1–5..
58. Dun X. Noise-robust boundary recursive algorithm for super-resolution reconstruction of staring focal plane array micro-scanning imaging / Dun X., Jin W., Lu L. // *Infrared Physics & Technology* – 2015. – Т. 68 – С.159–166.
59. Judkewitz B. Speckle-scale focusing in the diffusive regime with time reversal of variance-encoded light (TROVE) / Judkewitz B., Wang Y.M., Horstmeyer R., Mathy A., Yang C. // *Nature Photonics* – 2013. – Т. 7 – № 4 – С.300–305.
60. Park J.-H. Subwavelength light focusing using random nanoparticles / Park J.-H., Park C., Yu H., Park J., Han S., Shin J., Ko S.H., Nam K.T., Cho Y.-H., Park Y. // *Nature photonics* – 2013. – Т. 7 – № 6 – С.454–458.
61. McGregor J.E. Post-processing strategies in image scanning microscopy / McGregor J.E., Mitchell C.A., Hartell N.A. // *Methods* – 2015.
62. Dennis, M. R. Superoscillation in speckle patterns. / Dennis, M. R., Hamilton, A. C., & Courtial, J. // *Optics Letters* -2008- Т.33- №24 -С. 2976–2978.
63. Mosk A.P. Controlling waves in space and time for imaging and focusing in complex media / Mosk A.P., Lagendijk A., Lerosey G., Fink M. // *Nature Photonics* – 2012. – Т. 6 – № 5 – С.283–292.
64. Zalevsky Z. Super-resolved imaging with randomly distributed, time-and size-varied particles / Zalevsky Z., Fish E., Shachar N., Vexberg Y., Micó V., Garcia J. // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* – 2009. – Т. 11 – № 8 – С.85406.
65. Gazit S. Super-resolution and reconstruction of sparse sub-wavelength images / Gazit S., Szameit A., Eldar Y.C., Segev M. // *Optics Express* – 2009. – Т. 17 – № 26 – С.23920.
66. Дрязгов М.А. Метод получения оптических суперосцилляций на основе трехволновой интерференции / Дрязгов М.А., Свиридова И.В., Исаков Д.С., Микляев Ю.В. // *Вестник ЮУрГУ* – 2017. – Т. 9 – С.59–65.