

РАСЧЕТ ДОЭ ДЛЯ АНАЛИЗА МОДОВОГО СОСТАВА ИЗЛУЧЕНИЯ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

С. В. Карпеев, В. С. Павельев, В. А. Сойфер
Институт систем обработки изображений РАН, г. Самара

Аннотация

Анализ амплитудно-фазовых характеристик лазерного пучка в режиме реального времени является актуальной задачей для экспериментальной физики и большого числа практических приложений лазеров, например, лазерной обработки материалов. Задача анализа амплитудно-фазовой структуры пучка может быть интерпретирована как задача анализа модового состава, если под этим понимать как анализ индивидуальных модовых мощностей, так и межмодовых фазовых сдвигов. Данная статья посвящена решению этой задачи с помощью специального дифракционного оптического элемента (ДОЭ) – МОДАНА, согласованного с группой мод лазерного излучения. Такой оптический элемент, например, может быть реализован в виде микрорельефа, нанесенного непосредственно на оптический материал выходного окна лазера. Приведены результаты вычислительно-го эксперимента, подтверждающие перспективность такого подхода.

Введение

Анализ амплитудно-фазовых характеристик лазерного пучка в режиме реального времени является актуальной задачей для экспериментальной физики и большого числа практических приложений лазеров, например, лазерной обработки материалов [1,2,3]. Данная статья посвящена решению этой задачи с помощью специального дифракционного оптического элемента – МОДАНА, согласованного с группой мод лазерного излучения. Под модами лазерного излучения понимают пучки, распределения комплексной амплитуды в сечении которых описываются собственными функциями оператора распространения света в среде [3]. Наиболее известны моды Бесселя [4] – моды свободного пространства, и моды Гаусса-Эрмита и Гаусса-Лагерра (Гауссовы моды) [3,5].

Отметим фундаментальное свойство Гауссовых мод, заключающееся в способности Гауссовых мод распространяться, не меняя своей структуры и сохраняя взаимную ортогональность, в свободном пространстве и линзоподобной среде [3,5].

Гауссовы моды описывают моды открытого пассивного резонатора со сферическими зеркалами и моды градиентного волокна с параболическим профилем [3,5].

Моды когерентного света могут быть интерпретированы как "обобщенные спектральные компоненты" так как они распространяются в своей среде с собственным модовым числом и индивидуальной поперечной амплитудно-фазовой структурой, приобретая лишь фазовую добавку [3], значение которой пропорционально пройденному оптическому пути.

Имея концепцию мод, мы можем представить любое амплитудно-фазовое распределение света $W(\mathbf{u})$ как суперпозицию множества мод $\psi_{\mathbf{n}}(\mathbf{u})$ с определенными комплекснозначными коэффициентами $C_{\mathbf{n}}$ [3].

$$W(\mathbf{u}) = \sum_{\mathbf{n}=\mathbf{0}}^{\infty} C_{\mathbf{n}} \psi_{\mathbf{n}}(\mathbf{u}), \quad (1)$$

где $\mathbf{n} = (n, m)$, $\mathbf{u} = (u, v)$. Таким образом, задача анализа амплитудно-фазовой структуры пучка может быть интерпретирована как задача анализа модового состава, если под этим понимать как измерение индивидуальных модовых мощностей $|C_{\mathbf{n}}|^2$, так и межмодовых фазовых сдвигов $\Delta\varphi_{\mathbf{n}} = \arg C_{\mathbf{n}} - \arg C_{\mathbf{n}-1}$. Тогда по измерениям, сделанным для $N_{\text{mod}} = (N+1)(M+1)$ мод ($N=(N,M)$), можно построить оценку исходного амплитудно-фазового распределения с точностью до постоянного сдвига фазы $\arg C_0 = \varphi_0$:

$$W(\mathbf{u}) \cong |C_0| \exp(i \cdot \varphi_0) \psi_0(\mathbf{u}) + \sum_{n'=1}^{N_{\text{mod}}-1} |C_{n'}| \psi_{n'}(\mathbf{u}) \exp[i(\Delta\varphi_{n'} + \arg C_{n'-1})],$$

$$\arg C_{n'} = \arg C_{n'-1} + \Delta\varphi_{n'}. \quad (2)$$

Вопросы точности оценки (2) ряда (1) рассмотрены в [3]. Отметим лишь, что в большинстве практических задач известно максимальное значение номера моды с ненулевым значением коэффициента $C_{\mathbf{n}}$ в (1).

Используя измеренные индивидуальные мощности мод и межмодовые фазовые сдвиги для мод от фундаментальной до моды отсечки резонатора, можно восстановить амплитудно-фазовое распределение в сечении пучка лазера.

Численные методы, описанные в [6,7] дают возможность восстановить распределение мощности по модам, а методы [8,9] – непосредственно амплитудно-фазовое распределение в сечении пучка с помощью численной обработки результатов измерения интенсивности пучка в разных плоскостях. Однако, такой подход требует высокоточного измерения интенсивности, аналого-цифрового преобразования и дальнейшей численной обработки распределений интенсивности или интерферограмм. К тому же, итерационное восстановление фазы [8,9] по результатам измерения интенсивности принципиально не может гарантировать сходимости итерационной процедуры.

В [3,10] показано, что использование фундаментальных свойств мод лазерного излучения позволяет синтезировать дифракционные оптические элементы – МОДАНЫ для анализа модового состава.

Современное развитие новых технологий изготовления ДОЭ, в том числе для мощных лазеров [11], открывает широкие перспективы для использования таких элементов в целях исследования поперечной структуры пучка лазера. Однако, для того, чтобы использовать такие элементы для анализа пучка в режиме реального времени, необходимо использовать дополнительные оптические компоненты для деления исходного пучка минимум на два других с сохранением исходной амплитудно-фазовой структуры в каждом и заданным распределением энергии между ними.

Энергетические потери, связанные с делением пучка и Френелевским отражением на каждой границе <воздух-оптическая среда>, могут привести к существенным проблемам, особенно в случае анализа пучка мощного лазера.

В качестве решения этой проблемы может быть рассмотрен синтез элемента, сочетающего в себе функции делителя пучка и модового корреляционного фильтра для того, чтобы уменьшить число границ <воздух-оптическая среда> (к тому же такая система будет намного компактней).

Таким образом, целесообразно рассмотреть расчет оптического элемента, позволяющего измерять индивидуальные мощности мод и межмодовые сдвиги, используя только малую часть энергии освещающего пучка в то время, когда основная часть пучка проходит через оптический элемент без сколько-нибудь значимого изменения исходной амплитудно-фазовой структуры.

Такой оптический элемент, например, может быть реализован в виде микрорельефа, нанесенного непосредственно на оптический материал выходного окна лазера.

1. Постановка задачи расчета ДОЭ для анализа модового состава пучка в режиме реального времени

В [3] рассмотрен расчет фазовых моданов для анализа модового состава когерентного пучка.

Для перехода от комплекснозначной функции пропускания (в общем случае) к чисто фазовой были разработаны как аналитические [3] (основанные на внесении кодирующей несущей в фазу элемента), так и высокоэффективные итерационные методы кодирования [9].

Однако, описанные в [3,9] элементы не позволяли измерять модовый состав пучка в режиме реального времени без использования дополнительного делителя пучка.

Для того, чтобы реализовать разделение пучка на “основной” (с той же амплитудно-фазовой структурой, как у исходного пучка) и “вспомогательные” (или “информационные” – т.е. предназначенные для измерения модового состава) пучки с помощью од-

ного элемента, можно использовать стратегию “связанных” или “виртуальных” субапертур (Рис. 1).

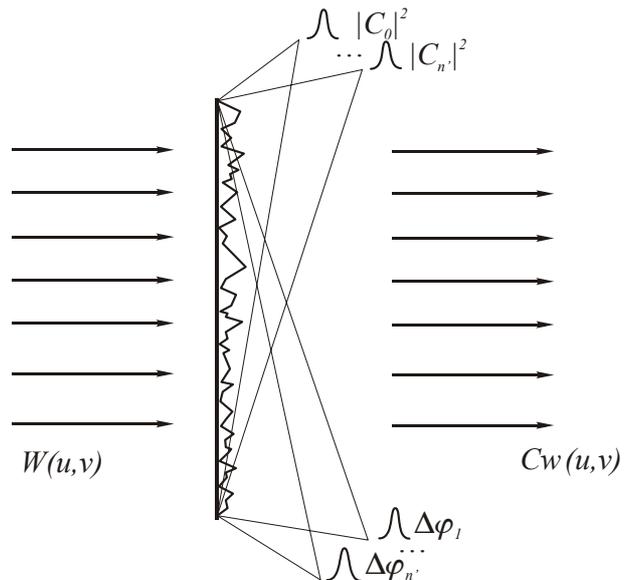


Рис. 1. Постановка задачи анализа модового состава пучка в режиме реального времени

Для этого функцию комплексного пропускания ДОЭ необходимо искать в виде суперпозиции функций комплексного пропускания “виртуальных” субапертур с соответствующими весовыми коэффициентами.

Одна из таких “виртуальных” субапертур соответствует пропусканию основного пучка без изменений амплитудно-фазовой структуры $W(\mathbf{u})$ с точностью до некоторого коэффициента $C < 1$, описывающего снижение энергии, другие – оптическим фильтрам, согласованным с модами и предназначенным для получения информации о модовых мощностях $|C_n|^2$ и/или межмодовых фазовых сдвигах $\Delta\varphi_n$.

Рассмотрим расчет функции комплексного пропускания такого элемента подробно. В [3] было показано, что взаимодействие пучка с поперечным комплекснозначным распределением $W(\mathbf{u})$ с фильтром, имеющим функцию комплексного пропускания $\psi^*_{\mathbf{n}}(\mathbf{u})$, где $\psi_{\mathbf{n}}(\mathbf{u})$ - мода с номером \mathbf{n} , * - знак комплексного сопряжения, на входе Фурье-каскада приводит к формированию комплексного распределения вида

$$w(\mathbf{0}) = \iint_D W(\mathbf{u}) \psi^*_{\mathbf{n}}(\mathbf{u}) d^2\mathbf{u} = C_{\mathbf{n}} \quad (3)$$

в центре выходной плоскости Фурье-каскада, где $C_{\mathbf{n}}$ - модовый коэффициент \mathbf{n} -ой моды в разложении (1), D – апертура элемента.

Измерение точечным датчиком значения интенсивности в центре выходной плоскости $|C_{\mathbf{n}}|^2$ позволит получить информацию о энергетическом вкладе моды с номером \mathbf{n} в пучке $W(\mathbf{u})$.

Для измерения мощностей N_{mod} мод одновременно в [3] был рассмотрен элемент с функцией комплексного пропускания вида

$$T(\mathbf{u}) = \sum_{n'=1}^{N_{\text{mod}}} \zeta_{n'} \psi_{n'}^*(\mathbf{u}) \exp(i\mathbf{v}_{n'} \cdot \mathbf{u}). \quad (4)$$

Экспоненциальные добавки $\exp(i\mathbf{v}_{n'} \cdot \mathbf{u})$ вводятся для пространственного разделения каналов, соответствующих различным модам, в плоскости элемента, $\zeta_{n'}$ - весовые коэффициенты, вводимые для заданного перераспределения энергии между субапертурами.

Взаимодействие пучка с фильтром с функцией комплексного пропускания вида (4) на входе Фурье-каскада с фокусным расстоянием f приведет к возникновению в выходной плоскости значений комплексного распределения $w(\lambda f \mathbf{v}_{n'}) \sim \zeta_{n'} C_{n'}$. Попробуем выписать формулу для функции комплексного пропускания элемента, использующего для анализа распределения индивидуальных мощностей мод только часть энергии освещающего пучка. В этом случае необходимо ввести в формулу функции комплексного пропускания ДОЭ (4) дополнительное слагаемое, соответствующее пропусканию освещающего пучка без изменения его амплитудно-фазового распределения:

$$T(\mathbf{u}) = \zeta_0 + \sum_{n'=1}^{N_{\text{mod}}} \zeta_{n'} \psi_{n'}^*(\mathbf{u}) \exp(i\mathbf{v}_{n'} \cdot \mathbf{u}). \quad (5)$$

Соотношение значений модулей весов $|\zeta_0|$ и $|\zeta_{n'}|$ определяет соотношение долей энергии, приходящихся на пучок, распространяющийся нормально, без изменения амплитудно-фазового распределения, и на “информационные” пучки $\zeta_{n'} \psi_{n'}^*(\mathbf{u}) \exp(i\mathbf{v}_{n'} \cdot \mathbf{u})$. Освещение такого элемента пучком с поперечным комплекснозначным распределением $W(\mathbf{u})$ на входе Фурье-каскада с фокусом f приведет к появлению пучка с поперечным распределением $SW(\mathbf{u})$ в плоскости сразу за элементом и значений комплексного распределения $w_{n'} = w(\lambda f \mathbf{v}_{n'}) \cong \zeta_{n'} C_{n'}$ в выходной плоскости, где величины, пропорциональные индивидуальным модовым мощностям $|\zeta_{n'} C_{n'}|^2$, могут быть измерены с помощью точечных датчиков. Для измерения межмодовых фазовых сдвигов $\Delta\varphi_{n'}$ с помощью модовых оптических корреляционных фильтров в [3] было предложено введение в фазу модана дополнительных виртуальных субапертур с функциями пропускания вида

$$\zeta_k [\psi_{n'}(\mathbf{u}) + \psi_{n'+1}(\mathbf{u})] \exp(i\mathbf{v}_k \cdot \mathbf{u}) \quad (6)$$

и

$$\zeta_s [\psi_{n'}(\mathbf{u}) + \psi_{n'+1}(\mathbf{u}) \cdot \exp(i\Delta\tilde{\varphi})] \exp(i\mathbf{v}_s \cdot \mathbf{u}), \quad (7)$$

где $\Delta\tilde{\varphi}$ - некоторый вводимый фазовый сдвиг. Можно показать [3], что значения интенсивности

$w_k = w(\lambda f \mathbf{v}_k)$ и $w_s = w(\lambda f \mathbf{v}_s)$ определяются следующим образом:

$$|w_k|^2 \sim |w_{n'}|^2 + |w_{n'+1}|^2 + 2 \cdot |w_{n'}| \cdot |w_{n'+1}| \cos(\Delta\varphi_{n'}) \quad (8)$$

$$|w_s|^2 \sim |w_{n'}|^2 + |w_{n'+1}|^2 + 2 \cdot |w_{n'}| \cdot |w_{n'+1}| \times [\cos(\Delta\varphi_{n'}) \cos \Delta\tilde{\varphi} - \sin(\Delta\varphi_{n'}) \sin \Delta\tilde{\varphi}]. \quad (9)$$

Тогда, как показано в [3], значение межмодовых фазовых сдвигов $\Delta\varphi_{n'}$ можно определить из соотношений (8) и (9).

Зная максимально допустимый номер высшей моды в исследуемом пучке, мы можем выписать формулу для функции комплексного пропускания фильтра, предназначенного для анализа амплитудно-фазового состава пучка в режиме реального времени:

$$T(\mathbf{u}) = \zeta_0 + \sum_{n'=1}^{N_{\text{mod}}} \zeta_{n'} \psi_{n'}^*(\mathbf{u}) \exp(i\mathbf{v}_{n'} \cdot \mathbf{u}) + \sum_{k=1}^{N_{\text{mod}}-1} \zeta_k [\psi_k(\mathbf{u}) + \psi_{k+1}(\mathbf{u})] \exp(i\mathbf{v}_k \cdot \mathbf{u}) + \sum_{s=1}^{N-1} \zeta_s [\psi_s(\mathbf{u}) + \psi_{s+1}(\mathbf{u}) \cdot \exp(i\Delta\tilde{\varphi})] \exp(i\mathbf{v}_s \cdot \mathbf{u}) \quad (10)$$

2. Аналитический расчет дифракционного оптического элемента

Найденную функцию комплексного пропускания элемента (10) (в общем случае, конечно, не являющуюся чисто фазовой) можно привести к чисто фазовой с помощью хорошо известных методов кодирования [3], основанных на введении несущей в фазу пучка, например, методом Кирка-Джонса [3,12]. На рис. 2 представлено распределение амплитуды в рабочем (нулевом) дифракционном порядке элемента, предназначенного для анализа наличия в освещающем пучке мод Гаусса-Эрмита (1,0) и Гаусса-Эрмита (0,1) в режиме реального времени. Элемент рассчитывался с помощью метода Кирка-Джонса. Моделировалось освещение элемента модой Гаусса-Эрмита (1,0). В центре – прошедший через ДОЭ “основной” пучок (мода Гаусса-Эрмита (1,0)), справа – корреляционный пик, соответствующий наличию моды Гаусса-Эрмита (1,0). Слева – область формирования корреляционного пика, соответствующего моде Гаусса-Эрмита (0,1). В центре области – нулевое значение амплитуды, соответствующее отсутствию моды Гаусса-Эрмита (0,1) в освещающем пучке. Отметим, что чем больше доля энергии, приходящаяся на основной пучок, тем больше будет дифракционная эффективность кодирования, так как дифракционная эффективность синтетической голограммы Кирка-Джонса тем больше, чем ближе амплитуда ее функции комплексного пропускания к константе [3]. В численных экспериментах, поставленных авторами, доля энергии, приходящейся на невозмущенный пучок доходила до 85%.

Тем не менее, введение несущей в фазу приводит к неизбежным энергетическим потерям, связанным

с формированием паразитных дифракционных порядков.

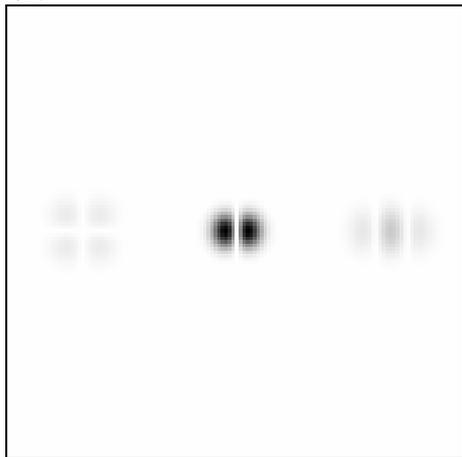


Рис.2. Результат моделирования рассчитанного ДОО

Заключение

В статье рассмотрен расчет дифракционного оптического элемента для анализа амплитудно-фазового состава пучка лазерного излучения в режиме реального времени. В дальнейшем авторы предполагают построить эффективную численную процедуру расчета таких ДОО. Приведены результаты вычислительного эксперимента, подтверждающие перспективность такого подхода.

Литература

1. "In-process sampling and analysis of the far-field of a 21kW CO₂ laser beam " B.A. Ward in *Laser Beam Characterization*, P. M. Mejias, H. Weber, R. Martinez-Herrero and A. Gonzales-Urena, editors, (SEDO, Madrid, 1993), 53-64.
2. "Diagnostic tools for laser beam characterization" E. A. Teppo in *Laser Beam Characterization*, P. M. Mejias, H. Weber, R. Martinez-Herrero and A. Gonzales-Urena, editors, (SEDO, Madrid, 1993), 23-30.
3. Soifer V.A., Golub M.A. *Laser Beam Mode Selection by Computer Generated Holograms* .- 1994.- CRC Press. 215 p.
4. J. Durnin, J.J. Miceli, Jr. And J.H. Eberly, "Diffraction-Free Beams", *Physical Review Letters* 58 (15), pp. 1499-1501.
5. Yariv A., *Optical electronics*, Holt, Rinehart, and Winston, New York, 1985.
6. "Measurement of the mode content of a laser beam" Antonello Cutolo, Tommaso Isernia Rocco Pierri, Luigi Zeni in *Laser Beam Characterization*, P. M. Mejias, H. Weber, R. Martinez-Herrero and A. Gonzales-Urena, editors, (SEDO, Madrid, 1993), 263-273.
7. "Measurement of the mode coherence coefficients" K.-M. Du, G. Herziger, P. Loosen, F. Ruhl, *Optical and Quantum Electronics*, 24, (1992), S1119-S1127.
8. Stark H., *Image Recovery: Theory and Application*, Academic Press Inc., 1987.
9. V.A. Soifer, V.V. Kotlyar, L.L. Doscolovich „Iterative Methods for Diffractive Optical Elements Computation“, „Taylor&Francis Ltd.“, 1997
10. Golub M.A., Prokhorov A.M., Sisakian I.N., Soifer V.A. Synthesis of spatial filters for investigation of transversal modal content of coherent radiation. *Quantum Electronics*, 1982, V. 9, N 9. pp. 1866-1868.
11. В.В. Кононенко, В.И. Конов, С.М. Пименов, А.М. Прохоров, В.С. Павельев, В.А. Соифер, *Квантовая электроника*, **26**(1), 9-10, (1999)
12. Kirk J.P., Jones A.L. Phase-only complex valued spatial filter. *JOSA*.- 1971.- Vol. 61, N 8 .- P. 1023-1028
13. Laser beam characterization by means of optical correlation filters. M. Duparre, V.S. Pavelyev, B. Ludge, V.A. Soifer, R. Kowarschik *Proceedings of EOS Topical Meeting in Diffractive Optics DO99*, Jena , Germany 23-25 August 1999, 284-285.

Designing DOEs for real-time analysis of beam mode content

*S. V. Karpeev, V. S. Pavelyev, V.A. Soifer
Image Processing Systems Institute of RAS*

Abstract

The real-time analysis of amplitude-phase characteristics of a laser beam is a relevant objective for the experimental physics and for a great number of laser applications, such as laser treatment of materials. The task of analyzing the amplitude-phase beam structure may be treated as a task of analyzing the modal composition, if it is understood as both analyzing individual modal powers and intermodal phase shifts. In this paper, the problem is tackled using a special diffractive optical element (DOE) called MODAN, matched to a group of laser radiation modes. By way of illustration, such an optical element may be implemented as a microrelief applied directly onto an optical material of the laser output window. The experimental results reported indicate that such an approach shows promise.

Citation: Karpeev SV, Pavelyev VS, Soifer VA. Designing DOEs for real-time analysis of beam mode content. *Computer Optics* 1999; 19: 84 - 87.

References

- [1] "In-process sampling and analysis of the far-field of a 21kW CO2 laser beam " B.A. Ward in *Laser Beam Characterization*, P. M. Mejias, H. Weber, R. Martinez-Herrero and A. Gonzales-Urena, editors, (SEDO, Madrid, 1993), 53-64.
- [2] "Diagnostic tools for laser beam characterization" E. A. Teppo in *Laser Beam Characterization*, P. M. Mejias, H. Weber, R. Martinez-Herrero and A. Gonzales-Urena, editors, (SEDO, Madrid, 1993), 23-30.
- [3] Soifer V.A., Golub M.A. *Laser Beam Mode Selection by Computer Generated Holograms*.- 1994.-CRC Press. 215 p.
- [4] J. Durnin, J.J. Miceli, Jr. And J.H. Eberly, "Diffraction-Free Beams", *Physical Review Letters* 58 (15), pp. 1499-1501.
- [5] Yariv A., *Optical electronics*, Holt, Rinehart, and Winston, New York, 1985.
- [6] "Measurement of the mode content of a laser beam" Antonello Cutolo, Tommaso Isernia Rocco Pierrri, Luigi Zeni in *Laser Beam Characterization*, P. M. Mejias, H. Weber, R. Martinez-Herrero and A. Gonzales-Urena, editors, (SEDO, Madrid, 1993), 263-273.
- [7] "Measurement of the mode coherence coefficients" K.-M. Du, G. Herziger, P. Loosen, F. Ruhl, *Optical and Quantum Electronics*, 24, (1992), S1119- S1127.
- [8] Stark H., *Image Recovery: Theory and Application*, Academic Press Inc., 1987.
- [9] V.A. Soifer, V.V. Kotlyar, L.L. Doscolovich „Iterative Methods for Diffractive Optical Elements Computation“, „Taylor&Francis Ltd.“, 1997
- [10] Golub M.A., Prokhorov A.M., Sisakyan I.N., Soifer V.A. Synthesis of spatial filters for investigation of transversal modal content of coherent radiation. *Quantum Electronics*, 1982, V. 9, N 9. pp. 1866-1868.
- [11] Kononenko VV, Konov VI, Pimenov SM, Prokhorov AM, Pavelyev VS, Soifer VA. *Soviet Journal of Quantum Electronics*; 1999; 26(1): 9-10.
- [12] Kirk J.P., Jones A.L. Phase-only complex valued spatial filter. *JOSA*.- 1971.- Vol. 61, N 8 .- P. 1023-1028
- [13] Laser beam characterization by means of optical correlation filters. M. Duparre, V.S. Pavelyev, B. Ludge, V.A. Soifer, R. Kowarschik *Proceedings of EOS Topical Meeting in Diffractive Optics DO99*, Jena, Germany 23-25 August 1999,284-285.