

Классификация оптически сформированных мод Эрмита-Гаусса с применением сверточной нейронной сети

И.А. Прокофьева^{1,2}, В.В. Подлипов^{1,2}, С.Н. Хонина^{1,2}

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34а, Самара, Россия, 443086

²Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

Аннотация

В данной работе представлены основные этапы и результаты разработки модели сверточной нейронной сети для классификации отдельных мод Эрмита-Гаусса, экспериментально сформированных с использованием пространственного модулятора света при наличии существенных отклонений от идеальных распределений. Точность классификации с помощью разработанной модели нейронной сети составила 99,27 для модельных данных и 86,47 для экспериментальных данных.

Ключевые слова

Сверточные нейронные сети, моды Эрмита-Гаусса, классификация, пространственный модулятор света

1. Введение

При оптической передаче информации уплотнение каналов связи может осуществляться за счет суперпозиции нескольких пространственных мод с заданными весами, несущими информацию, в одном пучке на входе передающей системы и с последующим распознаванием на выходе системы [1, 2]. При этом, однако, нужно учитывать негативное влияние погрешностей изготовления оптических волноводов или флуктуаций оптической среды. Внесенные искажения часто приводят к перераспределению энергии в моды более низких порядков. Данная проблема приводит к необходимости поиска модовых пучков, более устойчивых к таким искажениям [3]. В работе [4] было показано, в некоторых случаях базис мод Эрмита-Гаусса (ЭГ) демонстрирует меньшие энергетические потери и перераспределение энергии между модами, чем базис мод Лагерра-Гаусса. А в работе [5] было предложено детектировать моды ЭГ с применением сверточных нейронных сетей. Отметим, что в работе [5] оптическое формирование мод ЭГ выполнялось с применением пространственного модулятора света, на который выводилась кодированная фазовая функция. В этом случае формирование мод происходит с очень низкой погрешностью, что не отражает существенных искажений, которым может подвергаться лазерный пучок, особенно в турбулентной среде [6]. В данной работе исследуется возможность выполнения однозначной классификации отдельных мод ЭГ по интенсивности поля в некоторой плоскости при наличии значительных искажений в распределении пучка.

2. Получение данных и обучение модели

В данном исследовании мы ограничились модами $(0,0) - (5,5)$. Учитывая, что при повороте на 90° мода с индексами (n,m) переходит в моду (m,n) , мы получили в результате 21 класс для задачи классификации. Программа для генерации данных была написана на языке Python 3.7.6 с использованием библиотеки LightPipes [7]. Было получено по 200-300 изображений для каждой моды, при этом были осуществлены различные трансформации, такие как вращение, растяжение, сжатие и наложение шума (7%). Программа для обучения модели была написана

на языке Python 3.7.6 с использованием библиотеки *fastai*. Наибольшая точность была достигнута на предобученной сети ResNet-34 со следующими параметрами: темп обучения (*learningrate*) = 0.001, процесс дообучения (*fine-tuning*) проводился на 40 эпохах, в качестве валидационной выборки использовалось 20% тренировочной выборки, все картинки приводились к размеру 224x224, *batchsize* – 8. В качестве функции оптимизации был выбран алгоритм Adam, в качестве функции потерь (*lossfunction*) использовалась Cross-Entropy loss. После обучения точность модели на тестовой выборке составила 99,27. Для получения экспериментальных данных была использована лазерная установка, состоящая из лазера, работающего на длине волны 633 нм, расширителя пучка, выходной линзы с фокусным расстоянием 30 см и модулятора LC 2012. Было получено по 20-30 изображений для каждой моды. Процесс дообучения (*fine-tuning*) проводился на 20 эпохах при *batchsize* – 4, остальные параметры остались прежними. После обучения точность модели на тестовой выборке составила 86,47.

3. Заключение

В данной работе показана возможность выполнения однозначной классификации отдельных мод ЭГ по интенсивности поля в некоторой плоскости при наличии значительных искажений в распределении пучка. На этапе моделирования искажения вносились за счет астигматических искажений, поворота и зашумления. Точность классификации с помощью разработанной модели нейронной сети составила 99,27 для модельных данных. При оптической реализации на пространственный модулятор света подавалось фазовое распределение отдельной моды без дополнительного кодирования амплитудной информации [8], что соответствует значительному отклонению от идеального распределения (около 20-30%). Дополнительное обучение разработанной модели нейронной сети на экспериментальных данных позволило выполнять уверенную классификацию оптически сформированных мод ЭГ с точностью 86,47, что является достаточно высоким показателем при столь высоких погрешностях формирования.

4. Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-29-20045 в экспериментальной части и Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26) в части численного моделирования и работ по государственному заданию Самарского Университета (соглашение № 0777-2020-0017) в части обучения нейронной сети.

5. Литература

- [1] Abderrahmen, T. Communicating using spatial mode multiplexing: potentials, challenges, and perspectives / T. Abderrahmen, K.H. Park, M. Zghal, B.S. Ooi, M.-S. Alouini // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2019. – Vol. 21(4). – P. 3175-3203.
- [2] Казанский, Н.Л. Дифракционные оптические элементы для мультиплексирования структурированных лазерных пучков / Н.Л. Казанский, С.Н. Хонина, С.В. Карпеев, А.П. Порфирьев // *Квантовая электроника*. – 2020. – Т. 50, № 7. – С. 629-635.
- [3] Chen, M. Is there an optimal basis to maximize optical information transfer? / M. Chen, K. Dholakia, M. Mazilu // *Sci. Rep.* – 2016. – Vol. 6. – P. 22821.
- [4] Ndagano, B. Comparing mode-crosstalk and mode-dependent loss of laterally displaced orbital angular momentum and Hermite-Gaussian modes for freespace optical communication / B. Ndagano, N. Mphuthi, G. Milione, A. Forbes // *Opt. Lett.* – 2017. – Vol. 42. – P. 4175-4178.
- [5] Hofer, L.R. Hermite-Gaussian mode detection via convolution neural networks / L.R. Hofer, L.W. Jones, J.L. Goedert, R.V. Dragone // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2019. – Vol. 36(6). – P. 936-943.

- [6] Krenn, M. Communication with spatially modulated light through turbulent air across Vienna / M. Krenn, R. Fickler, M. Fink, J. Handsteiner, M. Malik, T. Scheidl, R. Ursin, A. Zeilinger // *New J. Phys.* – 2014. – Vol. 16. – P. 113028.
- [7] Библиотека LightPipes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://opticspy.github.io/lightpipes>.
- [8] Khonina, S.N. Generation of Gauss-Hermite modes using binary DOEs / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, J. Lautanen, M. Honkanen, J. Turunen // *Int. Soc. Opt. Eng.* – 2000. – Vol. 4016. – P. 234-239.