

Влияние на работу детектора оптического вихря фазовых искажений, вносимых экраном, расположенным вблизи излучающей апертуры оптической системы связи

В.П. Аксенов¹, И.В. Измайлов², Ф.Ю. Канев¹, Б.Н. Пойзнер^{2*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Томский государственный университет

634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 4.03.2010 г.

С использованием методов численного эксперимента проведен анализ работы детектора оптических вихрей и построенной на его основе линии оптической связи. Рассмотрена работа линии при наличии искажений принимаемого излучения, вносимых фазовым экраном, моделирующим тонкий слой турбулентной среды, расположенный в непосредственной близости от апертуры источника. Получена зависимость вероятности появления ошибки регистрации данных от интенсивности искажений, установлен интервал параметров, в котором детектор обеспечивает высокую достоверность определения наличия и заряда вихря. Подтвержден сделанный ранее вывод о независимости точности работы системы от длины трассы в однородной среде.

Ключевые слова: детектор оптических вихрей, передача данных, интерферометр Рождественского, топологический заряд; detector of optical vortices, data transfer, Rozhdestvenski interferometer, topological charge.

Введение

В предыдущей статье [1] нами рассматривались метод идентификации заряда оптического вихря, конструкция соответствующего детектора, его математическая модель и результаты вычислительных экспериментов, в том числе экспериментов с «белым шумом». Было показано, что детектором заряда вихрей может служить интерферометр Рождественского, в одно из плеч которого включены устройство поворота светового пучка относительно продольной оси на угол $\Delta = 2\pi M/m$ и устройство постоянного сдвига фазы φ (см. [1, рис. 1, а]). При этом идентификацию топологического заряда V_d предложено осуществлять измерением относительной интенсивности $I_{rsp} \equiv I_\Sigma/I$ выходного пучка интерференционного поля [1, уравнение (7)]:

$$I_{rsp}(V_d) = 1 + \cos[(2\pi M V_d / m) + \varphi],$$

где $I \equiv \langle I(\mathbf{r}) \rangle_r$ и $I_\Sigma \equiv \langle I_\Sigma(\mathbf{r}) \rangle_r$ — средние по поперечному сечению интенсивности поля (т.е. интенсивности пучка) на входе $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ и выходе $\mathbf{E}_\Sigma(\mathbf{r}, t)$ детектора соответственно; $\langle I(\mathbf{r}, t) \rangle_r \equiv \frac{1}{S_b} \iint_{(S_b)} I(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r}$, (S_b) —

область поперечного сечения площадью S_b , занятая пучком, $I(\mathbf{r}) = 2\langle \mathbf{E}^2(\mathbf{r}, t) \rangle_T$ и $I_\Sigma(\mathbf{r}) = 2\langle \mathbf{E}_\Sigma^2(\mathbf{r}) \rangle_T$ — распределения интенсивности на входе и выходе детектора [1]:

$$\langle \mathbf{E}^2(\mathbf{r}, t) \rangle_T \equiv \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \mathbf{E}^2(\mathbf{r}, t') dt'.$$

Изучение влияния атмосферы на входной пучок и соответствующих особенностей в работе детектора вихрей является самостоятельной и достаточно сложной задачей, которая в настоящей статье решается на основе методов численного эксперимента. Для упрощения анализа в модель включен только один фазовый экран, представляющий собой тонкий слой искажающей среды. За экраном пучок распространяется в условиях свободной дифракции.

Определение порядка винтовой дислокации при наличии турбулентных искажений излучения

Изучение работы детектора топологического заряда V_d дислокаций волнового фронта проводилось в описанной ниже модели оптической системы. В плоскости апертуры источника амплитудное распределение пучка являлось гауссовым, в его фазовый профиль помещалась винтовая дислокация. Сформированный таким образом пучок проходил

* Валерий Петрович Аксенов; Игорь Валерьевич Измайлов; Федор Юрьевич Канев (kanev@iao.ru); Борис Николаевич Пойзнер.

фазовый экран, моделирующий атмосферные искажения, интенсивность которых характеризовалась радиусом Фрида L_F . Значения L_F варьировались в диапазоне от $5r_0$ до $0,005r_0$, где r_0 — радиус пучка. Полная длина трассы L_t составляла 0,05 и 0,5 дифракционной длины, что соответствовало 5,9 и 59 км при $r_0 = 10$ см и длине волны излучения 0,5 мкм. Для каждой комбинации значений физических параметров производился поиск минимального, максимального и среднего значений I_{rsp} по 100 реализациям поля, соответствующим различным реализациям турбулентного фазового экрана.

Применительно к трассе длиной 59 км в точке приема размер ячейки вычислительной сетки был близок к величине $r_0'/16$, где r_0' — размер пучка в плоскости приема. Погрешность расчета интенсивности, оцениваемая обработкой детектором поля с эталонным вихрем (см. [1, формула (6)]), составляла 3% и менее. Погрешность расчета I_{rsp} при повороте поля на угол 180° отсутствовала, а при $\Delta = 120^\circ$ принимала значения 0,0003 (0,22%), 0,0019 (0,1%) и 0,0012 (0,12%) для $V_d = -1, -2$ и -3 соответственно. Для придания реалистичности модельным экспериментам была задана разъюстировка оптических осей источника и приемника на расстояние $0,11r_0$ в плоскости источника, что привело к несовпадению осей в плоскости приема на величину порядка $0,044r_0'$. Погрешность, вызванная последним обстоятельством, имела определяющее значение: она привела к увеличению погрешности

расчета I_{rsp} при $\Delta = 180^\circ$ до 0,03; 0,06 (3%); 0,09, а при $\Delta = 120^\circ$ — до 0,014 (10%); 0,06 (3%); 0,04 (4%) для $V_d = -1, -2, -3$ соответственно. Эту погрешность правомерно полагать систематической, и в дальнейшем, вероятно, ее влияние можно учесть эмпирическим подбором порогов в [1, уравнение (15)]. Вычисленные зависимости трех значений I_{rsp} от радиуса Фрида показаны на рис. 1. Примечательно, что при слабой турбулентности (порядка $L_F/r_0 = 5$), например, когда $\Delta = 120^\circ$ и $V_d = -3$, отличие I_{rsp} от единицы равно 0,014 (1,4%), т.е. является достаточно близким к полученной выше оценке, равной 0,04 (4%).

Анализ результатов моделирования, частично приводимых на рис. 1, позволяет сделать следующие выводы:

1. При $L_F > r_0$ (в области слабой турбулентности) величина относительной интенсивности интерференционного поля I_{rsp} практически не изменяется. Причем значения I_{rsp} близки к значениям, регистрируемым при введении в систему «белого шума» малой интенсивности: $I_{rsp} = 0$ и 2 ([1, рис. 2] для $\Delta = 180^\circ$), 1,864 и 0,135 ([1, рис. 3] для $\Delta = 120^\circ$).

2. Совпадение графиков для трасс длиной 5,9 и 59 км (см. рис. 1) подтверждает полученное теоретически положение, согласно которому значение относительной интенсивности I_{rsp} не зависит от длины трассы [1]. То есть I_{rsp} зависит от того, какой именно экран сформировал поле, а не от длины трассы.

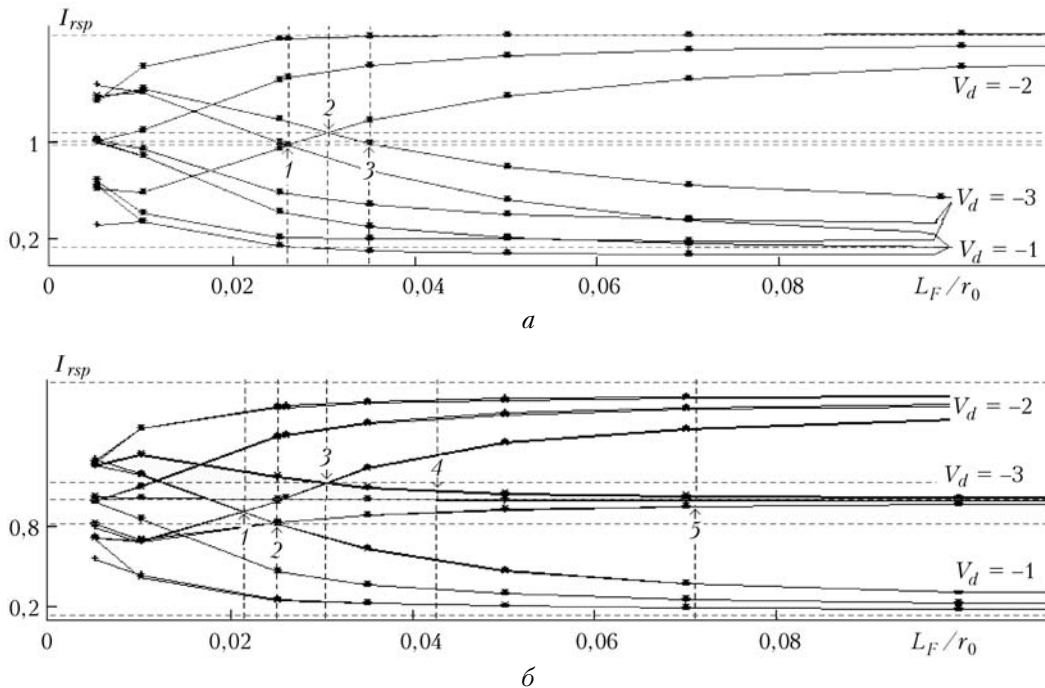


Рис. 1. Вычисленные по 150 реализациям экстремальные и средние значения относительной интенсивности интерференционного поля I_{rsp} в зависимости от радиуса Фрида L_F при $\Delta = 180^\circ$ (а) и 120° (б) для различных V_d . Штриховые прямые на краях соответствуют $I_{rsp} = 0,135$ и $1,864$, регистрируемой в отсутствие «белого шума» при $\Delta = 120^\circ$ [1, рис. 3]. Горизонтальный пунктир в центре соответствует $I_{rsp} = 1$ и ее пороговым значениям 0,97 и 1,063 (а) и 0,818 и 1,12 (б), вертикальный пунктир — значениям $L_F/r_0 = 0,0260$ и $0,0304$ (а) и $0,0216$; $0,0250$; $0,0304$; $0,0425$ и $0,0710$ (б)

3. При определении заряда V_d по единственной реализации (согласно [1, равенство (15)]) наблюдаются следующие особенности:

– при $\Delta = 180^\circ$ вихри с $V_d = -1$ и -2 различимы при $L_F > 0,026r_0$, а с $V_d = -2$ и -3 – при $L_F > 0,035r_0$ (1-й и 3-й вертикальные пунктиры, рис. 1, а);

– при $\Delta = 120^\circ$ вихри с $V_d = -1$ и -3 различимы при $L_F > 0,0710r_0$, а с $V_d = -2$ и -3 – при $L_F > 0,0425r_0$ (5-й и 4-й вертикальные пунктиры на рис. 1, б).

4. Если угол $\Delta = 180^\circ$, то при распознавании вихрей, имеющих только заряды $V_d = -1$ и -2 либо $V_d = -2$ и -3 , правило распознавания дислокаций в [1, равенство (15)] следует привести к виду

$$V_d = \begin{cases} 1, & I_{rsp} \leq 0,97 \\ 2, & I_{rsp} > 0,97 \end{cases} \text{ либо } V_d = \begin{cases} 3, & I_{rsp} \leq 1,063 \\ 2, & I_{rsp} > 1,063. \end{cases} \quad (1)$$

Заданное таким образом правило справедливо при $L_F > 0,026r_0$ либо при $L_F > 0,0304r_0$ (1-й и 2-й вертикальные пунктиры на рис. 1, а).

5. При $\Delta = 120^\circ$ [1, равенство (15)] можно изменить пороговые значения, получив следующее правило определения зарядов:

$$V_d = \begin{cases} 2 + 3i, & I_{rsp} < 0,818 \\ 0 + 3i, & I_{rsp} \in [0,818; 1,12] \\ 1 + 3i, & I_{rsp} > 1,12. \end{cases} \quad (2)$$

Правило различения вихрей с $V_d = -1$ и -3 либо с $V_d = -2$ и -3 справедливо при $L_F > 0,025r_0$ либо $> 0,0304r_0$ (2-й и 3-й вертикальные пунктиры, рис. 1, б). Когда же стоит задача распознать только вихри с $V_d = -1$ и -2 , то при $L_F > 0,0216r_0$ справедливо

$$V_d = \begin{cases} 1, & I_{rsp} \leq 0,904 \\ 2, & I_{rsp} > 0,904 \end{cases} \quad (3)$$

(1-й вертикальный пунктир, рис. 1, б).

6. При анализе большого числа реализаций [1, правило (15)] позволяет определять заряд V_d при значениях $L_F = 0,01r_0$ и даже меньших (как для $\Delta = 180^\circ$, так и для $\Delta = 120^\circ$). Но в этом случае следует измерять $\langle I_{rsp} \rangle$, а не I_{rsp} . Заметим, что в такой задаче [1, исходное выражение (15)] дает лучший результат, чем правила (1) и (2) с измененными (несимметричными относительно (1)) порогами.

Рис. 2 демонстрирует влияние на точность распознавания вихрей с различными зарядами V_d (т.е. на I_{rsp}) одного и того же фазового экрана, имитирующего турбулентность. Верхние, нижние и средние кривые на рис. 2 соответствуют заряду вихря $V_d = -2, -1$ и -3 . Видно, что на рис. 2, б, з различия кривых весьма малы, как и у зависимостей для $V_d = -1, -3$ на рис. 2, а. В первом случае это свидетельствует о высоком, для данного метода идентификации V_d , уровне турбулентности. Во втором случае это подтверждает справедливость принципа нумерации структур (2).

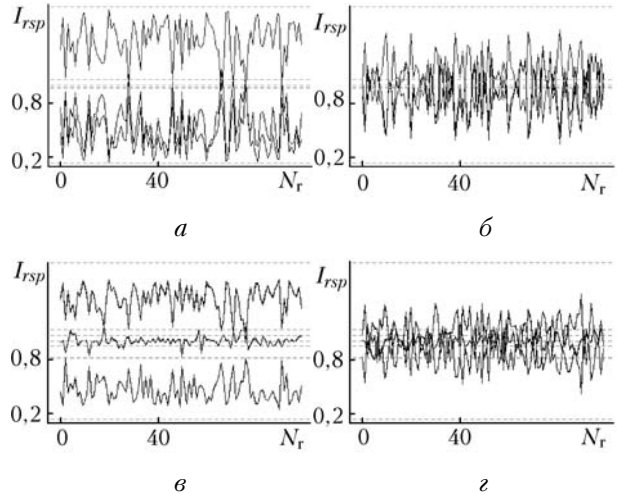


Рис. 2. Зависимость величины I_{rsp} от номера N_r реализации фазового экрана ($N_r \in [0, 99]$). Расчетные точки соединены линиями (для удобства восприятия). Угол поворота поля $\Delta = 180^\circ$ (а, б), 120° (в, з), радиус Фрида $L_F = 0,025r_0$ (а, в), $0,01r_0$ (б, з). Верхние и нижние горизонтальные пунктирные прямые соответствуют $I_{rsp} = 0,135$ и $1,864$. В центре (а, б) – горизонтальный пунктир соответствует $I_{rsp} = 1$ и пороговым значениям $I_{rsp} = 0,97$ и $1,063$; (в, з) – соответствует $I_{rsp} = 1$ и пороговым значениям $I_{rsp} = 0,818$ и $0,94, 1,06$ и $1,12$

На рис. 2 хорошо видна зеркальная симметрия, пусть и неполная, некоторых пар ($V_d = -2$ и $-1, V_d = -2$ и -3) зависимости $I_{rsp}(N_r)$. Можно ожидать, что в «сингулярных» системах связи это свойство обеспечит корректную передачу данных даже в случаях, когда заряд отправленного вихря определяется с ошибкой. Благодаря отмеченной особенности собой идентификации можно рассматривать как закономерное событие, а это означает, что оно может быть учтено алгоритмом кодирования и протоколом передачи данных.

Наблюдается и еще одна полезная особенность. Как правило, значения $I_{rsp}(N_r, V_{d1}) \neq I_{rsp}(N_r, V_{d2})$, когда $V_{d1} \neq V_{d2}$, что совместно с предыдущим свойством целесообразно использовать для построения систем связи с адаптивным (плавающим) порогом.

Анализ ошибок передачи данных

Проверка второго из приведенных выше предположений требует создания математической модели плавно изменяющейся турбулентности и выходит за рамки данной статьи. Поэтому обратимся лишь к проверке первого из них. Полагая, что симметрия зависимостей $I_{rsp}(N_r)$ для вихрей с $V_d = \pm 1$ является более выраженной, чем для $V_d = -2$ и -1 (см. рис. 2), выполним комплекс вычислительных экспериментов для полей с $V_d = +1$ на трассе длиной $L_t = 59$ км, используя для идентификации правило [1, (15)].

Моделирование показывает, что вихри с $V_d = \pm 1$ могут быть идентифицированы даже при $L_F = 0,022r_0$, а с $V_d = -1$ и -2 (см. рис. 1, б) допускающий распознавание дислокации радиус Фрида

даже несколько выше: $L_F = 0,026r_0$. Кроме того, выявленная (но не иллюстрируемая в статье) высокая степень идентичности зависимостей для $V_d = \pm 1$ при $\Delta = 180^\circ$ означает практическую неразличимость полей с такими дислокациями, что согласуется с формулой (2).

Анализ результатов моделирования идентификации вихревых пучков с зарядами дислокаций $V_d = -1, -2$ и с $V_d = +1$ показывает, что во всех случаях распознаваемость заряда $V_d = +1$ не хуже, чем заряда $V_d = -2$. Поэтому там, где это возможно, целесообразно использовать вихрь с зарядом, минимальным по модулю.

Чтобы проверить предположение о повышенной зеркальной симметричности зависимостей $I_{rsp}(N_r)$ для вихрей с $V_d = \pm 1$, были построены графики, аналогичные рис. 2. Однако их визуальный анализ не позволяет (из-за сложной конфигурации) уверенно подтвердить или опровергнуть указанное свойство.

Нужно учесть, что симметричность важна, прежде всего, для повышения надежности передачи данных в сингулярно-оптической системе связи. Поэтому необходимо исследовать вероятность появления ошибки передачи данных в системе, содержащей в приемнике детектор V_d . Ограничимся двоичной системой связи. Тогда имеет смысл рассмотреть два алгоритма кодирования: «базовый», когда символ кодируется значением V_d , и «дифференциальный», когда 0 либо 1 кодируются отсутствием либо наличием смены значения V_d . Подчеркнем, что качество «базового» алгоритма непосредственно связано с распознаваемостью значения заряда V_d . Второй алгоритм работает, пока различным величинам V_d соответствуют интенсивности I_{rsp} , расположенные по разные стороны от порога $I_{rsp th}$, задающего некоторую прямую $I_{rsp} = \text{const} =$

$= I_{rsp th}$ на графиках рис. 2. Преимущество «дифференциального» алгоритма означало бы симметрию зависимостей $I_{rsp}(N_r)$.

Численный анализ влияния величины устанавливаемого порога $I_{rsp th}$ на вероятность ошибки передачи данных (рис. 3) показывает ряд закономерностей.

Во-первых, при слабой турбулентности ($L_F = 0,025r_0$), когда датчик справляется с идентификацией V_d , оба способа кодирования одинаково эффективны. Некоторым преимуществом обладает вариант с $\Delta = 120^\circ$, при этом предпочтительно использовать вихри с $V_d = \pm 1$.

Во-вторых, при высокой турбулентности ($L_F = 0,01r_0$) «дифференциальный» способ кодирования более эффективен: для него ошибка (ее минимум) приблизительно составляет 5% по сравнению с 24% для обычного алгоритма. При использовании обычного алгоритма преимущество детектора с $\Delta = 120^\circ$ над детектором с $\Delta = 180^\circ$ растет. И по-прежнему предпочтительно использовать вихри с $V_d = \pm 1$. Если же применять «дифференциальный» алгоритм, то систему связи целесообразно строить на основе детектора с $\Delta = 180^\circ$.

В-третьих, при более сильной турбулентности ($L_F = 0,005r_0$) преимущества «дифференциального» способа кодирования сохраняются, здесь ошибка близка к 12% против 43% для обычного алгоритма. Выводы для $L_F = 0,025r_0$ относительно Δ и V_d сохраняют свою справедливость.

Обнаруженные достоинства «дифференциального» алгоритма доказывают наличие симметрии (хотя и неполной) в зависимостях $I_{rsp}(N_r)$ и, следовательно, необходимость ее учета для повышения надежности системы связи. Примечательно, что благодаря этому передавать данные можно, даже если заряды вихрей практически не распознаются.

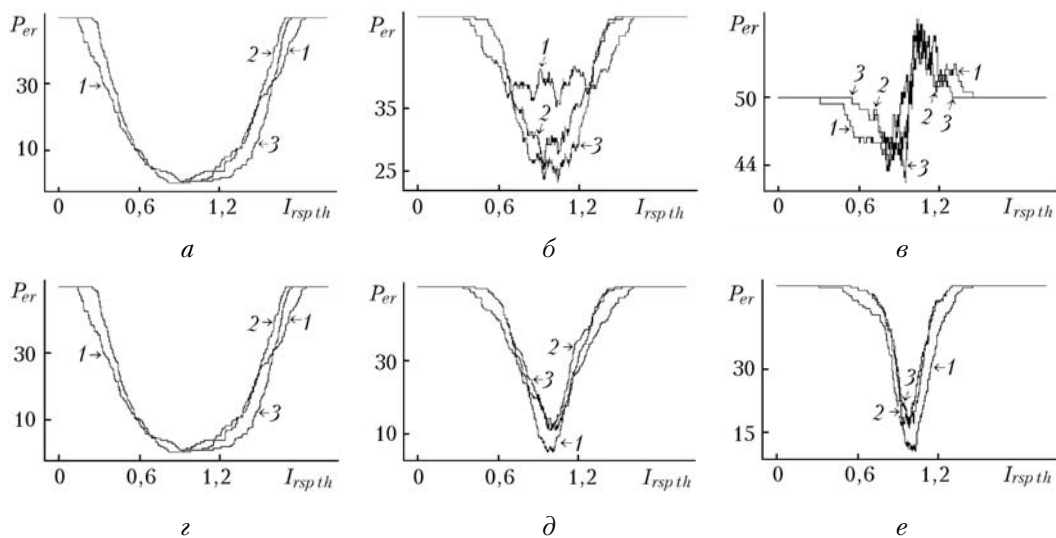


Рис. 3. Зависимость вероятности (%) ошибки передачи данных (в двоичной системе связи) от величины установленного порога $I_{rsp th}$ при кодировании символа значением V_d (а–в) либо сменой значения V_d (г–е). Радиус Фрида L_F составляет $0,025r_0$ (а, г), $0,01r_0$ (б, д), $0,005r_0$ (в, е). Кривые 1, 2, 3 соответствуют использованию полей с $V_d = -1, -2$ ($\Delta = 180^\circ$); $-1, -2$ ($\Delta = 120^\circ$) и ± 1 ($\Delta = 120^\circ$)

Заклучение

В продолжение изучения свойств предложенного ранее детектора топологического заряда V_d оптических вихрей [1] была выполнена серия численных экспериментов, моделирующих распространение пучка в турбулентной среде. Полученные данные позволяют сделать следующие выводы:

1. Имитация воздействия турбулентности различной силы на возможность идентификации V_d детектором вихрей подтверждает теоретический вывод [1] об инвариантности идентификационных характеристик детектора относительно длины трассы в линейной однородной и изотропной (в поперечной плоскости светового пучка) среде.

2. На основе анализа множества реализаций (распределения фазовых экранов, имитирующих турбулентность) обоснованы критерии и предложены простые правила распознавания значения V_d .

3. Найдена зависимость вероятности правильного распознавания V_d от уровня турбулентности, задаваемого величиной радиуса Фрида L_F . Определены области значений L_F и V_d , при которых детектор V_d работоспособен.

В части, касающейся разработки сингулярно-оптической системы связи на базе детектора топологического заряда вихрей, рассмотрена передача данных. Характеристики такой системы можно улучшить различными способами. Например, алгоритмически, при использовании «дифференциального» метода передачи данных в двоичной форме. Моделирование показывает, что такие меры (по сравнению с кодированием данных значением V_d) понижают вероятность ошибки передачи данных в 4 или даже в 5 раз. При этом передача осу-

ществима, даже если детектор не справляется с задачей идентификации порядка винтовой дислокации V_d фазы поля. Дополнительным ресурсом алгоритмических улучшений является, по-видимому, использование в детекторе адаптивного (плавающего) порога. При этом ожидается выигрыш за счет повышения вероятности успешной идентификации V_d .

Изложенный материал и сделанные выводы показывают возможность разработки адаптивной системы оптической связи, имеющей предложенную в [2] архитектуру. Здесь возникает ряд теоретико-алгоритмических, инженерно-физических и приборостроительных задач. Разумеется, компоненты системы связи могут отличаться от рассмотренных нами. По мнению авторов, преимуществом «вихревой» связи являются ее физическая стойкость к угрозе прослушивания рассеянного излучения, а также электромагнитная совместимость большого числа пар корреспондентов на одном участке длин волн и в одной области пространства.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 09-02-90452-Укр_ф_а.

1. Аксенов В.П., Измайлов И.В., Канев Ф.Ю., Пойзнер Б.Н. Определение топологического заряда оптического вихря по измерениям интенсивности сигнала на выходе интерферометра: принципы и моделирование // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 11. С. 1036–1041.
2. Аксенов В.П., Измайлов И.В., Канев Ф.Ю., Пойзнер Б.Н. Адаптивная система передачи данных с помощью оптических вихрей // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XVI Междунар. симпозиума, 12–15 октября 2009. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2009. С. 166–168.

V.P. Aksenov, I.V. Izmailov, F.Yu. Kanev, and B.N. Poizner. Influence of atmospheric turbulence on detection of an optical vortex topological charge.

Using the methods of numerical experiment, the analysis was performed of a device, intended for detection of an optical vortex topological charge and functioning of a communication line, based on this detector. Investigations were carried out, taking into account turbulent distortions of receiving radiation. Probability of error appearance was assessed as a function of turbulence intensity, and interval of parameters was found, where the quality of detection is high. The assumption, stated in our previous papers, was confirmed of independence of the detection quality on the path length.