

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АДАПТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ НА КОРОТКИХ ТРАССАХ

Безуглов Д. А., Решетникова И. В., Асатрян М. А., Агоян П. С.

Минобрнауки России, Ростовский технологический институт сервиса и туризма (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса», 344016, г. Ростов-на-Дону, ул. Варфоломеева 215, e-mail: bezuglovda@mail.ru

Существующие методы и алгоритмы функционирования адаптивных оптических систем позволяют решить задачу компенсации вредного влияния турбулентности. Однако получаемые при этом технические решения достаточно сложны. До настоящего времени с целью компенсации вредного влияния турбулентности использовали различные интерференционные методы. В данной работе описано функционирование перспективных адаптивных оптических систем передачи информации в турбулентной атмосфере и проведена оценка помехоустойчивости адаптивных оптических малопараметрических систем передачи информации в турбулентной атмосфере на коротких трассах. Рассмотрена возможность улучшения тактико-технических характеристик таких систем за счет использования предложенных алгоритмов на примере малопараметрической системы передачи информации. Даны рекомендации по практическому применению данных систем.

Ключевые слова: адаптивная оптика, турбулентность атмосферы, малопараметрические системы.

THE ANALYSIS OF EFFICIENCY OF LOW-PARAMETRIC ADAPTIVE OPTICAL SYSTEMS OF INFORMATION TRANSFER ON SHORT ROUTES

Bezuglov D. A., Reshetnikova I. V., Asatryan M. A., Agoyan P. S.

Russia, Rostov institute of technology of service and tourism (branch) of Federal public budgetary educational institution of the higher professional education «Southern Russian state university of economy and service», 344016, Rostov-on-Don, Varfolomeyev St. 215, e-mails: bezuglovda@mail.ru

Existing methods and algorithms of functioning of adaptive optical systems allow to solve a problem of compensation of an adverse effect of turbulence. However, technical solutions received thus are rather difficult. So far for the purpose of compensation of an adverse effect of turbulence used various interferential methods. In this work functioning of perspective adaptive optical systems of information transfer in the turbulent atmosphere is described and the assessment of a noise stability of adaptive optical low-parametrical systems of information transfer in the turbulent atmosphere on short routes is carried out. Possibility of improvement of tactical technical characteristics of such systems at the expense of use of the offered algorithms on an example of low-parametrical system of information transfer is considered. Recommendations about practical application of data of systems are made.

Keywords: adaptive optics, turbulence to the atmosphere, low-parametrical system.

Существующие методы и алгоритмы функционирования адаптивных оптических систем позволяют решить задачу компенсации вредного влияния турбулентности. Однако получаемые при этом технические решения достаточно сложны. До настоящего времени с целью компенсации вредного влияния турбулентности использовали различные интерференционные методы. Проведенный авторами ранее [6, 8] анализ показал, что применение этих методов в перспективных адаптивных оптических системах невозможно из-за присутствующих им недостатков. Это связано с тем, что все вышеперечисленные методы предполагают предварительное создание различных оптических масок и голограмм.

В работах авторов [1, 2, 3, 4] нашли дальнейшее развитие методы адаптивной оптики в следующих направлениях. На базе метода кумулянтного анализа синтезирован алгоритм

оптимального оценивания сигналов датчика фазового фронта малопараметрических адаптивных оптических систем передачи информации, позволяющий учесть пуассоновский характер шумов в квадрантных фотоприемниках [1, 3, 5, 7]. Разработан новый метод слайн-аппроксимации плотности распределения оптических сигналов на основе сглаживающих нормализованных В-сплайнов и метода решения системы линейных уравнений Якоби. Получены соотношения, описывающие потенциальную точность предложенных алгоритмов [6, 8]. Разработан принципиально новый метод восстановления фазового фронта в базисе Цернике для радиальных двухплощадных фотоприемников в датчике гартмановского типа, позволяющий при уменьшенном количестве фотоприемников и числе каналов управления использовать его в малопараметрических системах фазового сопряжения при передаче информации в турбулентной атмосфере. В данной работе будет проведена оценка помехоустойчивости перспективных адаптивных оптических малопараметрических систем передачи информации в турбулентной атмосфере на коротких трассах. Даны рекомендации по практическому применению данных систем.

Следует отметить, что существующие адаптивные оптические системы представляют собой по существу многоканальные системы автоматического управления. При этом показатели качества таких систем в общем случае нелинейно зависят от числа каналов управления и улучшаются с их увеличением.

Однако технически реализация каждого канала управления представляет собой достаточно сложную задачу. Это связано с особенностями построения существующих датчиков фазового фронта и гибких адаптивных зеркал. С экономической точки зрения для того, чтобы адаптивные оптические системы передачи информации обеспечивали повышенную помехоустойчивость, и как следствие – большую дальность действия при минимуме аппаратных затрат, число каналов необходимо ограничить при обеспечении заданного значения критерия качества. В дальнейшем такие системы мы будем называть малопараметрическими адаптивными системами передачи информации.

Таким образом, задача оценки помехоустойчивости малопараметрических адаптивных оптических системах передачи информации на коротких трассах, является актуальной.

Цель работы: оценка помехоустойчивости перспективных адаптивных оптических систем передачи информации в турбулентной атмосфере на коротких трассах.

Рассмотрим функционирование перспективных адаптивных оптических систем передачи информации в турбулентной атмосфере. В системе фазового сопряжения пучок света отражается от малого участка объекта, образуя сферическую волну, которая проходит обратно по пути распространения света и претерпевает те же самые искажения, что и излученная волна. В качестве критерия качества функционирования адаптивной оптической системы

будем использовать число Штреля $St(t)$, представляющее собой отношение интенсивности в фокусе реальной оптической системы $|A(f, t)|^2$ к интенсивности в фокусе такой же системы, функционирующей в отсутствие фазовых искажений $|A_0(f, t)|^2$:

$$St(t) = \int \frac{|A(f, t)|^2}{|A_0(f, t)|^2} df \quad (1)$$

Фактически такой критерий является энергетическим, что позволит максимизировать отношение сигнал / шум и повысить помехоустойчивость системы передачи информации.

Системы атмосферных оптических линий связи могут использоваться не только на «последней миле» каналов связи, но также и в качестве вставок в волоконно-оптические линии на отдельных труднопроходимых участках; для связи в горных условиях, в аэропортах, между отдельными зданиями одной организации (органы управления, торговые центры, промышленные предприятия, университетские городки, больничные комплексы, стройплощадки и т. д.); при создании разнесенных в пространстве локальных компьютерных сетей; при организации связи между центрами коммутации и базовыми станциями сотовых сетей; для оперативной прокладки линии при ограниченном времени на монтаж. Лазерная линия связи состоит из двух идентичных станций, устанавливаемых соответственно напротив друг друга в пределах прямой видимости – на крышах или стенах домов или на других высоких опорах.

Рассмотрим возможность улучшения тактико-технических характеристик таких систем за счет использования предложенных алгоритмов [1, 2, 3,4] на примере перспективной адаптивной малопараметрической системы передачи информации. Данная система предназначена для организации высокоскоростного канала передачи информации при решении проблемы последней мили. В качестве источника оптического излучения используется оптический квантовый генератор, способный формировать узкую диаграмму направленности излучения, коэффициент пропускания атмосферы будем считать не менее 0,7.

Рассматриваемая система имеет следующие характеристики:

1. Длина волны $\lambda = 10^{-6}$ м;
2. Длина трассы $L = 5 \cdot 10^3$ м;
3. Структурная характеристика показателя преломления $C_n^2 = 0,5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$;
4. Эффективность системы будем описывать критерием Штреля, при этом положим пороговое значение $St = 0,8$;
5. Диаметр входной апертуры $D = 0,05$ м.

При этом потенциально возможная расходимость излучения:

$$\Delta\varphi = \frac{1.22\lambda}{D} \approx 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ рад}. \quad (2)$$

Тогда диаметр пятна на приемной стороне должен быть:

$$d_{\text{ид}} = \frac{1.22\lambda L}{D} = 0,12 \text{ м}. \quad (3)$$

То есть теоретически, излучение должно полностью перекрывать приемную оптику. Однако благодаря воздействию атмосферы расходимость будет намного больше. В реальной системе, с учетом турбулентности, расходимость пучка будет составлять $\Delta\varphi = 10^{-3}$, тогда истинный размер пучка составит:

$$d_{\text{реал}} = \Delta\varphi * L = 5 \text{ м} \quad (4)$$

Очевидно, что с учетом турбулентности атмосферы приемной оптикой будет захватываться незначительная часть энергии оптического передатчика.

Оценим радиус когерентности атмосферы:

$$r_0 = \left[0.423 \cdot 4\pi^2 C_n^2 \frac{L}{\lambda^2} \right]^{-3/5} = 1,69 \text{ см}, \quad (5)$$

то есть в данном случае это соответствует отношению $\frac{D}{r_0} = 2,95$, значение критерия

Штреля при этом будет равно $St_1 = 0,167$.

Из анализа этих величин следует, что, во-первых, характеристики существующей системы, вследствие вредного влияния турбулентности атмосферы, на порядок ниже потенциально возможных. Во-вторых, при компенсации воздействий атмосферы на оптическое излучение и приближении характеристик расходимости к потенциально возможным такая система могла бы осуществлять передачу информации на расстояние до 5 км или иметь более высокую помехоустойчивость при меньших длинах трасс.

Рассмотрим один из возможных способов практической реализации контура адаптации к нестационарным искажениям фазового фронта оптической волны в адаптивной оптической системе, на базе метода фазового сопряжения с датчиком фазового фронта гартмановского типа [6]. Предположим, что применение адаптивной оптики позволит почти полностью компенсировать влияние турбулентности атмосферы и приблизить систему к идеальной. Рассмотрим малопараметрическую адаптивную оптическую систему, которая компенсирует фазовые искажения, описываемые несколькими первыми полиномами Цернике. Как следует из графика на рис. 2, уже при коррекции первых одиннадцати полиномов Цернике возможно достижение значения критерия Штреля, равного $St_2 = 0,8$, так как:

$$St(M, D/r_0) = \exp(-0,2944M^{-\frac{2}{3}}(D/r_0)^{\frac{5}{3}}), \quad (7)$$

таким образом, выигрыш в дальности действия системы составит для данного примера

$$\sqrt{\frac{St_1}{St_2}} \approx 2 \text{ раза.}$$

Для расчета дисперсии фазовых возмущений воспользуемся приближенной формулой Фрида:

$$\sigma_s^2 = 1,013 \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3}, \quad (8)$$

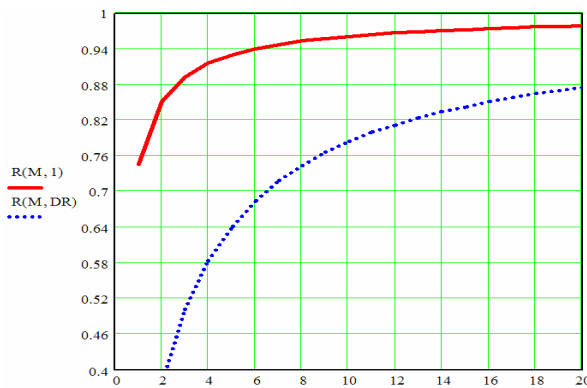


Рис. 1. Зависимость критерия Штреля от степени турбулентности атмосферы

Для другого количества корректируемых полиномов возможный выигрыш в дальности действия приведен в таблице 1. Третий столбец соответствует гипотетическому случаю практически полного отсутствия турбулентности. Из анализа данных видно, что в таком случае предложенные методы не позволяют увеличить дальность действия.

Таблица. 1. Величина выигрыша в дальности действия малопараметрической адаптивной систем в зависимости от числа полиномов Цернике

M	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$St(M, D/r_0)$ При $D/r_0 = 1$	0,97	1	1,1	1,12	1,25	1,13	1,135	1,139	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
$St(M, D/r_0)$ При $D/r_0 = 2,95$	0,97	1,14	1,65	1,85	1,90	2,0	2,05	2,1	2,15	2,16	2,17	2,18	2,19	2,2	2,3

Таким образом, выигрыш в дальности действия может составлять до двух раз и более, что соответствует повышению помехоустойчивости системы.

При достаточно сильной турбулентности, соответствующей значению структурной характеристики показателя преломления $C_n^2 = 0,5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^{-2/3}$, в зависимости от количества полиномов Цернике и соответственно, числа каналов управления адаптивной оптической си-

стемы достаточно использования 6÷7 полиномов для получения выигрыша в помехоустойчивости (отношении сигнал / шум) на 6 дб. При использовании 12÷16 полиномов Цернике возможно получение выигрыша в помехоустойчивости на 7 дб. Дальнейшее увеличение числа полиномов (каналов управления адаптивной оптической системы) не дает значительного выигрыша при увеличении аппаратных затрат.

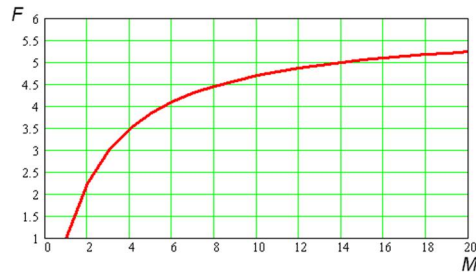


Рис. 2. Увеличение интенсивности оптического сигнала в F раз на апертуре адаптивной оптической системы в зависимости от числа M используемых полиномов Цернике

Рассмотрим также влияние вибрации опоры на характеристики фазовых флуктуаций, которые предстоит компенсировать малопараметрической адаптивной оптической системе. Рассмотрим адаптивную оптическую систему, установленную на опоре высотой $H=50\text{м}$, расстояние между приемником и передатчиком $L=5000\text{м}$, тогда из геометрических соотношений (рис. 3) следует:

$$\frac{L}{H} = \frac{\Delta L}{\Delta H}, \quad (9)$$

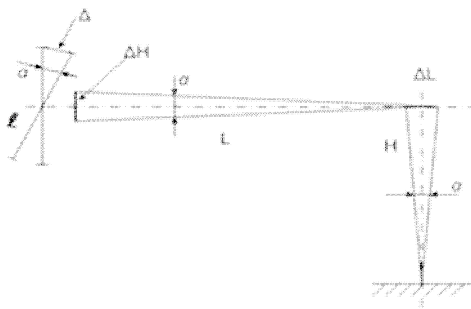


Рис. 3. Геометрические соотношения

Тогда:

$$\Delta H = \frac{\Delta L L}{H}, \quad \text{при } \Delta L = 10^{-2}\text{м} \quad \Delta H = 1\text{ м}, \quad (10)$$

То есть сдвиг пучка будет незначительным. Рассмотрим фазовые соотношения на апертуре оптической системы:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{H}; \quad \Delta = \frac{D}{2} \alpha = \frac{D \Delta L}{2H}. \quad (11)$$

Приравняв величину Δ к целому числу длин волн n , получим:

$$\Delta = n\lambda. \quad (12)$$

Тогда число фазовых сдвигов, соответствующих длине волны, то есть 2π , в соответствии с выражениями (11), (12) будет равно:

$$n = \frac{D\Delta L}{2H\lambda}, \quad n = 5. \quad (13)$$

Таким образом, за один период колебаний опоры на апертуре адаптивной оптической системы будет наблюдаться около 5 полных фазовых сдвигов на 2π . С учетом того, что частоты колебаний опоры лежат в диапазоне 1÷5 Гц, такая ситуация эквивалентна дополнительным фазовым флуктуациям с частотой 5÷25 Гц. Диапазон частот, который должна обрабатывать адаптивная оптическая система – 500÷1000 Гц. Таким образом, дополнительная вибрация опоры не должна сказываться на работе системы и будет устраняться как низкочастотная составляющая фазовых флуктуаций.

Выводы

Для решения задачи оптимального оценивания сигналов в датчике фазового фронта оптической волны, прошедшей слой турбулентной атмосферы, применен математический аппарат сглаживающих нормализованных В-сплайнов, позволяющий существенно повысить точностные характеристики малопараметрических систем фазового сопряжения и эффективно учитывать наличие шумов регистрации различной интенсивности. Синтезирован принципиально новый метод восстановления фазового фронта для радиальных датчиков гартмановского типа, позволяющий при уменьшенном количестве фотоприемников и числе каналов управления с использованием базиса Цернике использовать его в малопараметрических системах фазового сопряжения, для компенсации нестационарных искажений оптического излучения, вызванных его распространением в турбулентной атмосфере. Использование разработанных методов восстановления фазового фронта обеспечивает получение, в зависимости от степени турбулентности атмосферы, минимального числа членов ряда Цернике, что позволяет существенно повысить быстродействие системы при снижении аппаратных затрат. Применение синтезированных методов и алгоритмов оптимальной и квазиоптимальной обработки оптических сигналов позволит на 6÷7 дБ повысить помехоустойчивость (увеличить отношение сигнал / шум) и увеличить дальность действия оптических систем передачи информации.

Список литературы

1. Безуглов Д. А., Забродин Р. А., Решетникова И. В. Оптимальное оценивание наклонов фазового фронта в оптическом датчике положения на фоне пуассоновских шумов // Наука производству.– 2004. – № 2. – С. 2–7.

2. Безуглов Д. А., Скляр А. В., Забродин Р. А., Решетникова И. В. Субоптимальный алгоритм оценивания на основе аппарата сглаживающих В-сплайнов // Измерительная техника. – 2006. – № 10. – С. 14–17.
3. Безуглов Д. А., Скляр А. В., Забродин Р. А., Решетникова И. В. Алгоритмы оценивания негауссовских процессов на основе математического аппарата сглаживающих В-сплайнов // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2005. – № 4. – С. 99–106.
4. Безуглов Д. А., Калиенко И. В., Решетникова И. В. Численно-аналитический метод моделирования систем дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2006. – № 3. – С. 10–14.
5. Безуглов Д. А., Мищенко Е. Н., Мищенко С. Е. Алгоритм восстановления фазового фронта входного оптического пучка по результатам измерений интенсивности его фурье-образа // Оптика атмосферы и океана. – 1992. – Т. 5. – № 12. – С. 1305.
6. Безуглов Д. А., Мищенко Е. Н., Мищенко С. Е. Адаптивные оптические системы. Методы восстановления фазового фронта, разработка структур систем и новой элементарной базы // Оптика атмосферы и океана. – 1995. – Т. 8. – № 3. – С. 364.
7. Безуглов Д. А. Кумулянтный метод оценки эффективности сегментированного зеркала адаптивной оптической системы // Оптика атмосферы и океана. – 1996. – № 1. – С. 78.
8. Безуглов Д. А., Мищенко Е. Н., Мищенко С. Е. Адаптивные оптические системы. Методы восстановления фазового фронта // Оптика атмосферы и океана. – 1996. – Т. 9. – № 3. – С. 44.

Рецензенты:

Звезда Марина Юрьевна, д.ф.-м.н., доцент, зав. кафедрой «Радиоэлектроника», Минобрнауки России, Ростовский технологический институт сервиса и туризма (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса», г. Ростов-на-Дону.

Мищенко Сергей Евгеньевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Радиоэлектроника», Минобрнауки России, Ростовский технологический институт сервиса и туризма (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса», г. Ростов-на-Дону.