

ОПТИМАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В АДАПТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ФАЗОСОПРЯЖЕННЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Безуглов Д.А.¹, Решетникова И.В.²

¹ФГБОУ ВПО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия (344011, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), e-mail: bezuglovda@mail.ru

²ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Ростов-на-Дону, Россия (344038, г.Ростов-на-Дону, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, д. 2), e-mail: irina_reshetnikova@mail.ru

Проведен анализ развития оптических систем передачи информации нового поколения. Учитывались следующие характеристики, влияющие на помехоустойчивость и дальность действия систем передачи информации: рассеяние, энергетическое ослабление и турбулентность. Рассмотрены вопросы разработки научно-методического аппарата пространственно-временной обработки оптических сигналов и коррекции возмущенного турбулентной атмосферой фазового фронта в малопараметрических адаптивных оптических системах передачи информации, позволяющего повысить помехоустойчивость таких систем. 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.

Ключевые слова: оптические системы передачи, датчик фазового фронта, помехоустойчивость, В-сплайны.

OPTIMAL ALGORITHMS FOR SIGNAL PROCESSING IN AN ADAPTIVE OPTICAL PHASE CONJUGATED INFORMATION TRANSMISSION SYSTEM

Bezuglov D.A.¹, Reshetnikova I.V.²

¹FGBOU VPO "Don State Technical University", Rostov- on-Don, Russia (344011, Rostov -on-Don, pl. Gagarin, 1), e-mail: bezuglovda@mail.ru

²FGBOU VPO "Rostov State university of railway transport", Rostov- on-Don, Russia (344038, Rostov -on-Don, pl. Rostov rifle regiment of the people's militia, 2), e-mail: irina_reshetnikova@mail.ru

The analysis of the development of optical communication systems of the new generation. Taking into valis following characteristics affecting immunity and range systems, information transmission, such as scattering, the energy attenuation and turbulence. Addressed issues of development of scientific and methodological apparatus of space-time processing of optical signals and correction of perturbed turbulent atmosphere of the phase front in small parameters adaptive optical communication systems , allowing to increase the immunity of such systems. To solve the problem of optimal estimation of the sensor signals of the phase front of the optical wave traversing the turbulent atmospheric layer applied mathematical tools smoothed -down normalized B- splines, which significantly improves the accuracy characteristics small parameters phase conjugation system and effectively take into account the presence of noise registration of varying intensity.

Keywords: optical transmission systems, phase front of the sensor , noise immunity , B- splines.

Введение

В настоящее время развитие оптических систем передачи информации нового поколения основано на использовании широкополосных и сверхширокополосных сигналов с большой информационной емкостью. Потенциальная помехоустойчивость таких систем в значительной степени ограничиваются условиями распространения световых волн в реальных материальных средах. При этом дальность действия, как правило, не превышает 2÷3 км.

Основными факторами, влияющими на помехоустойчивость и дальность действия систем передачи информации является рассеяние, энергетическое ослабление и турбулентность.

Влияние энергетического ослабления и аддитивных помех рассеяния частично возможно компенсировать правильным выбором энергетике оптического канала и применением методов нелинейной фильтрации. При этом компенсация вредного влияния турбулентных неоднородностей среды распространения, создающих случайную пространственно-временную структуру показателя преломления, определяющих оптические свойства атмосферы и, фактически, помехоустойчивость системы передачи информации, является наиболее сложной задачей.

Одним из наиболее эффективных способов ослабления возмущающего действия атмосферы является применение адаптивных методов. При этом следует отметить, что применение других методов и подходов в принципе не может обеспечить такого эффекта.

Сущность адаптивных методов компенсации вредного влияния турбулентности среды распространения заключается в автоматической коррекции амплитуды и фазы волны в плоскости передающей или приемной апертуры на основании информации об искажениях при оптимизации критериев качества функционирования оптических систем передачи информации.

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 анализ показал, что применение этих методов в перспективных адаптивных оптических системах невозможно из-за присущих им недостатков, главным из которых является невозможность осуществления компенсации вредного влияния турбулентности в реальном масштабе времени. Это связано с тем, что все вышеперечисленные методы предполагают предварительное создание различных оптических масок и голограмм. Также 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 нелинейно улучшаются с их увеличением [1,2, 3,4, 5,6] .

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 [1,2, 3,4, 5,6] .Также к настоящему времени не реше-

на задача синтеза специализированных алгоритмов оптимального и квазиоптимального измерения параметров фазового фронта в таких системах.

Цель работы: разработка научно-методического аппарата пространственно-временной обработки оптических сигналов и коррекции возмущенного турбулентной атмосферой фазового фронта в малопараметрических адаптивных оптических системах передачи информации, позволяющего повысить помехоустойчивость таких систем

Фазосопряженные системы

В атмосферной линии связи передаваемый поток данных от аппаратуры пользователя поступает на интерфейсный модуль и затем на модулятор излучателя. После этого сигнал преобразуется в оптическое излучение ближнего ИК-диапазона, оптикой формируется в узкий пучок и передается через атмосферу к приемнику. На противоположном пункте принимаемое оптическое излучение фокусируется приемным объективом на площадку высокочувствительного быстродействующего фотоприемника, где детектируется. После дальнейшего усиления и обработки сигнал поступает на интерфейс приемника, а оттуда на аппаратуру пользователя.

В работах [1,2, 3,4, 5,6] проведен анализ влияния погодных условий на функционирование систем передачи информации в оптическом диапазоне, подробно исследовано влияние турбулентной атмосферы на эффективность их функционирования. Показано, что основной вклад в эффект уменьшения помехоустойчивости и дальности действия таких систем вносит турбулентность.

Рассмотрим принципы адаптивной компенсации турбулентности в оптическом канале. Сущность адаптивных методов компенсации заключается в автоматической коррекции амплитуды и фазы волны в плоскости апертуры на основании информации об их искажениях для оптимизации критерия качества функционирования оптической системы. Схема такой системы показана на рис. 1. Плоский волновой фронт, излучаемый оптическим квантовым генератором 1, преобразуется корректором 4 таким образом, чтобы после прохождения через турбулентную атмосферу плотность потока излучения на объекте была максимальной. При этом информация о неоднородностях среды может быть получена как при прямом, так и при обратном распространении излучения с помощью датчика фазового фронта 2. В обоих случаях для получения информации для выработки управляющих сигналов необходимо время двойного прохождения излучения от излучателя до объекта.

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.

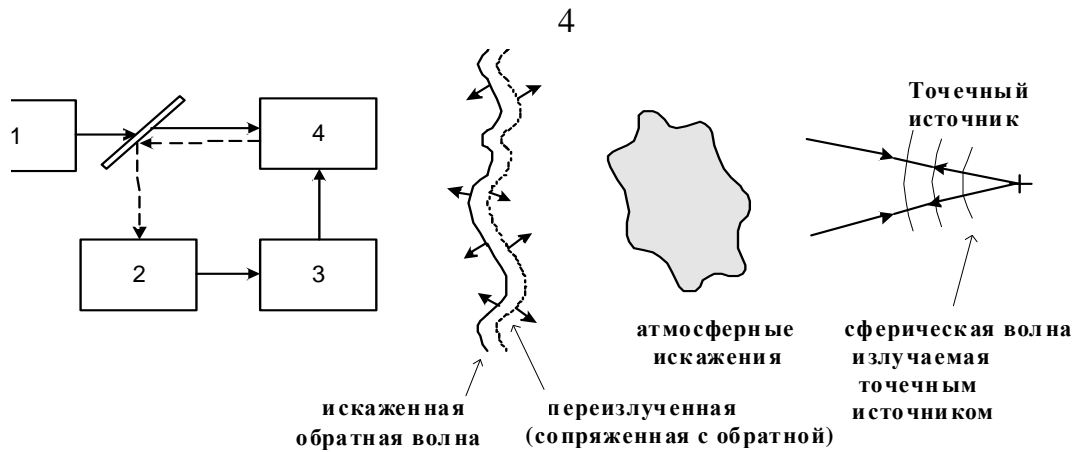


Рис. 1. Схема функционирования адаптивной оптической системы фазового сопряжения:
 1 - лазерный передатчик; 2 - датчик фазового фронта; 3 - устройство обработки;
 4 - устройство воздействия на фазовый фронт

В качестве критерия качества функционирования адаптивной оптической системы будем использовать число Штреля $St(t)$, представляющее собой отношение интенсивности в фокусе реальной оптической системы $|A(\vec{r}, t)|^2$ к интенсивности в фокусе такой же системы, функционирующей в отсутствие фазовых искажений $|A_0(\vec{r}, t)|^2$:

$$St(t) = \int \frac{|A(\vec{r}, t)|^2}{|A_0(\vec{r}, t)|^2} d\vec{r}. \quad (1)$$

Фактически, такой критерий является энергетическим, что позволит максимизировать отношение сигнал/шум и повысить помехоустойчивость системы передачи информации. В конце главы приводится строгая математическая постановка решаемой научной задачи.

Алгоритм оптимального оценивания сигналов в каналах датчика гратмановского типа

Для случая априорной неопределенности характера шумов в каналах датчика фазового фронта 2 рассмотрим метод оптимального оценивания с привлечением аппарата сглаживающих кубических нормализованных В – сплайнов. Предложенный подход обеспечивает получение субоптимальной оценки по одному из критериев оптимальности на основе выборки ограниченного объема. Метод получения эмпирической плотности распределения по малой выборке заключается в следующей последовательности операций:

- по результатам наблюдений определялась статистическая функция распределения;
- полученная функция сглаживалась нормализованным кубическим В-сплайном;
- продифференцировав этот сплайн в аналитическом виде, получали соответствующее выражение для плотности распределения случайной величины;

-далее, имея выражение для плотности распределения случайной величины представляется возможным получение оптимальных оценок одним из известных методов.

Для сокращения вычислительных затрат при нахождении коэффициентов В-сплайнов использовался итерационный метод Якоби. Для примера решалась система размерностью $M=20$. При этом предложенный метод позволяет существенно уменьшить объем вычислительных затрат и распараллелить вычислительный процесс, что важно при построении современных цифровых систем обработки сигналов. В силу диагонального вида матрицы линейных уравнений метод Якоби в нашем случае хорошо сходится уже после 6÷10 итераций (рис.2).

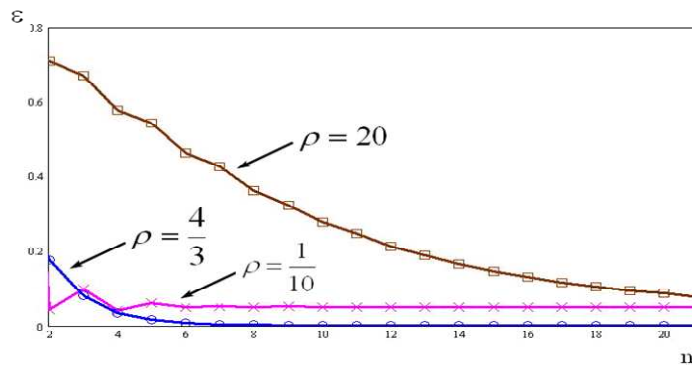


Рис. 2. Значения невязки ε метода Якоби в зависимости от числа итераций n для различных коэффициентов сглаживания ρ

Таким образом, предложенный подход позволяет для выборки ограниченного объема при априорной неопределенности характера шумов в каналах датчика фазового фронта получить плотность распределения $p(x)$ в виде линейной комбинации коэффициентов В-сплайна b_i в следующем виде:

$$p(x) = K \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{\chi^2}{2h} (b_{i+2} - 3b_{i+1} + 3b_i - b_{i-1}) + \frac{\chi}{h} (b_{i+1} - 2b_i + b_{i-1}) + \frac{b_{i+1} - b_{i-1}}{2h} \right), \quad (2)$$

где K - коэффициент нормировки; χ - нормированная координата сплайна; h - шаг сетки.

Результаты исследования влияния коэффициента сглаживания ρ на вид получаемой плотности распределения приведены рис. 3. Таким образом, увеличение коэффициента сглаживания в данном случае эквивалентно увеличению выборки.

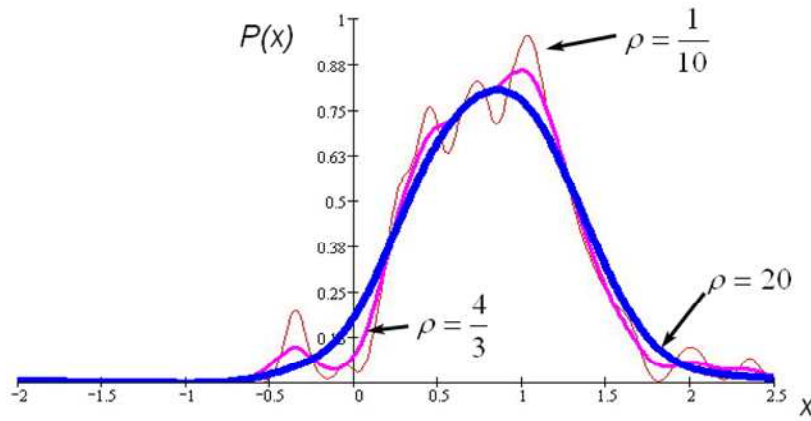


Рис. 3. Плотности распределения в зависимости от величины коэффициентов сглаживания ρ

Проведено математическое моделирование процесса восстановления плотности и сравнение предложенного алгоритма с известными. Получены графики апостериорных плотностей, полученных при произвольном и эвристически подобранном весовом коэффициенте $h(M)$ алгоритма Парзена-Надарая и синтезированного алгоритма. Их анализ показывает, что алгоритм Парзена-Надарая при произвольном $h(M)$ исключает возможность получения оценки, оптимальной по критерию максимума апостериорной плотности даже при нормальном распределении результатов наблюдения. При этом следует заметить, что вид апостериорной плотности имеет сложную зависимость от вида базисной функции, размера выборки и весового коэффициента, это затрудняет ее установление, в том числе, эвристическим путем и является серьезным препятствием практического использования данного алгоритма. Предложенный в работе метод восстановления плотности распределения свободен от указанных недостатков [7, 8, 9, 10].

На базе метода сплайн-аппроксимации плотности распределения в работе получены алгоритмы оценивания. Оценка, оптимальная по критерию максимума АПВ будет иметь вид:

$$x_{ans}^* = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} x_i (b_{i+2} - 3b_{i+1} + 3b_i - b_{i-1}) - h \sum_{i=1}^{N-1} (b_{i+1} - 2b_i + b_{i-1})}{\sum_{i=1}^{N-1} (b_{i+2} - 3b_{i+1} + 3b_i - b_{i-1})}. \quad (3)$$

При квадратической функции потерь оптимальная оценка по критерию Байеса представляет собой следующее выражение:

$$x_{\sigma}^* = K \sum_{i=1}^{N-1} (b_{i+2} - 3b_{i+1} + 3b_i - b_{i-1}) \left(\frac{1}{8}h + \frac{1}{6}x_i \right) + (b_{i+1} - 2b_i + b_{i-1}) \left(\frac{1}{3}h + \frac{1}{2}x_i \right) + (b_{i+1} - b_{i-1}) \left(\frac{1}{4}h + \frac{1}{2}x_i \right). \quad (4)$$

Произведена оценка потенциальной точности синтезированного алгоритма и в терминах сплайна получено неравенство Крамера-Рао:

$$D_x \geq \left[\int_a^b \frac{\mathbb{K} \left(\sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{\chi}{h^2} (b_{i+2} - 3b_{i+1} + 3b_i - b_{i-1}) + \frac{(b_{i+1} - 2b_i + b_{i-1})}{h^2} \right) \right)^2}{\sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{\chi^2}{2h} (b_{i+2} - 3b_{i+1} + 3b_i - b_{i-1}) + \chi (b_{i+1} - 2b_i + b_{i-1}) + \frac{b_{i+1} - b_{i-1}}{2h} \right)} dx \right]^{-1} \quad (5)$$

Для оценки эффективности синтезированного алгоритма был проведен сравнительный анализ с классическим алгоритмом.

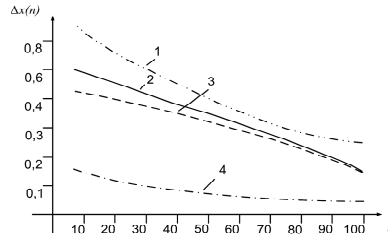


Рис.4. Результаты математического моделирования: 1-классический алгоритм; 2- метод Парзена-Надарая; 3- критерий максимума АПВ; 4- критерий Байеса; n- объем выборки

Результаты математического моделирования приведены на рис. 4. Исследовался классический алгоритм обработки результатов наблюдений по выборке ограниченного объема, алгоритм оценивания с использованием метода Парзена-Надарая восстановления плотности распределения и предложенные алгоритмы оптимального оценивания на базе сплайн-аппроксимации.

Выводы

Проведенный вычислительный эксперимент показывает, что для выборки значительного объема погрешность определения оценки с использованием синтезированного алгоритма по любому из основных критериев оптимальности в 2÷3,5 ниже, чем по классическому алгоритму. При снижении объема выборки до 10÷15, когда применение классического алгоритма не допустимо, абсолютная погрешность оцениваемого параметра соответствует 0,2÷0,5 единицам измерения. При этом наилучшие результаты показывает применение критерия Байеса.

На точность получаемой оценки существенное влияние оказывает выбор значения коэффициента сглаживания и шага сетки сплайна. При этом для выборки малого объема коэффициент сглаживания необходимо выбирать возможно большим. Для выборки распределенной по экспоненциальному закону, законам Пуассона и Релея наибольшую точность обеспечивает критерий Байеса, для которого абсолютная погрешность оценки на порядок меньше чем при использовании классического алгоритма.

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.

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 в 3÷4 раза. Выполнена оценка вычислительных затрат, обусловленных применением синтезированных алгоритмов, позволяющая наилучшим образом выбрать параметры вычислительных алгоритмов при их реализации на ЭВМ. Показано, что при использовании метода Якоби объем вычислительных затрат может быть уменьшен в 5÷10 раз.

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. Кумулянтный метод оценки эффективности сегментированного зеркала адаптивной оптической системы // Оптика атмосферы и океана. - 1996. - № 1. - С. 78.
6. Безуглов Д.А., Рытиков С.Ю., Швидченко С.А. Метод вейвлет-дифференцирования в задаче выделения контуров (статья). // Современные проблемы радиоэлектроники. №6 2012г. с.52-57.
7. Безуглов Д.А., Рытиков С.Ю., Швидченко С.А., Гаврин М.С., Гаврин Д.С. Выделение контуров изображений в информационных и управляющих системах с использованием метода вейвлет-преобразования (статья). // Нелинейный мир. № 11 2012г., с.846-852.

8. Безуглов Д.А., Цугурян Н.О. Дифференцирование результатов измерений с использованием математического аппарата вейвлет-фильтрации.// Измерительная техника. 2006. № 4. С. 12-16.
9. Безуглов Д.А., Швидченко С.А. Информационная технология вейвлет-дифференцирования результатов измерений на фоне шума// Вестник компьютерных и информационных технологий. 2011. № 6. С. 40-45.
10. Мищенко Е.Н., Мищенко С.Е., Безуглов Д.А. Алгоритм восстановления фазового фронта входного оптического пучка по результатам измерений интенсивности его фурье-образа // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. № 12. С. 1305.

Рецензенты:

Звезда М.Ю., д.ф.-м.н., доцент, зав. кафедрой «Радиоэлектроника», Минобрнауки России, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донской государственный технический университет», г.Ростов-на-Дону.

Габриэльян Д.Д., д.т.н., профессор, заместитель начальника научно-технического комплекса «Антенные системы» по науке, Федеральный научно-производственный центр ФГУП «РНИИРС» г.Ростов-на-Дону.