

Приемная антенна поста РТН представляла собой фазированную антенную решетку с параметрами: ширина диаграммы направленности в диапазоне частот, в горизонтальной плоскости $\Theta_{0,5}=60^0\pm 10^0$; ширина диаграммы направленности в диапазоне частот, в вертикальной плоскости: $\Phi_{0,5}=20^0\pm 10^0$. На приемной антенне помещался маломощный усилитель ($K_{ш}\leq 1,5$ дБ, $K_{\gamma}\geq 25$ дБ). Длина кабеля снижения составляла 15 м. Высота подъема приемных антенн и антенн СПИ была около 10 м над поверхностью земли.

Излученные источником радиоимпульсов (ИРИ) радиоимпульсы принимались постами РТН. На постах РТН по каждому излученному радиоимпульсу измерялись несущая частота, амплитуда, длительность и время прихода. Измеренные параметры по линии связи СПИ с удаленных постов в реальном масштабе времени передавались на центральный пост, на котором вычислялись координаты цели по каждому излученному радиоимпульсу. Отображение постов РТН (кружочки) и ИРИ (треугольник) осуществлялась на электронной карте (см. рис. 3) постоянно. Траектория движения ИРИ отслеживалась по перемещению треугольника на карте.

Результаты эксперимента показывают то, что на основе АОИПС может быть построена РДС, принцип действия которой основан на измерении времени прихода по фронту радиоимпульса. Данная система может быть использована для решения задач радиоконтроля, охватывая зону контроля порядка 30 км на 30 км.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Логинов Н.А.* Актуальные вопросы радиоконтроля в Российской Федерации. – М.: Радио и связь, 2000. – 240 : ил.
2. *Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н.* Многопозиционные радиотехнические системы// Под ред. Проф. В.В. Цветнова. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.

УДК 535.375:551.521

Д.А.Безуглов, И.А.Сахаров, И.В. Решетникова

ОПТИМИЗАЦИИ ТОПОЛОГИИ ДАТЧИКА ВОЛНОВОГО ФРОНТА

Оптимизирована топология датчика волнового фронта, использующего для аппроксимации базис полиномов Цернике с использованием полярной системы координат. Предложены критерии оптимизации топологии датчика волнового фронта, что позволило существенно повысить точностные характеристики восстановления волнового фронта.

Одним из наиболее эффективных (иногда в сочетании с другими) способов ослабления возмущающего действия атмосферы на работу оптической системы является применение адаптивных методов и систем. Идеи, положенные в основу создания адаптивных систем, предложены сравнительно недавно [1].

При компенсации нестационарных волновых искажений, которые возникают при распространении излучения в оптически неоднородной среде, в качестве измерительного устройства в адаптивных оптических системах волнового сопряжения применяются датчики волнового фронта [3, 4, 5, 6, 7]. Они являются ключевыми элементами многих современных систем управления и коррекции излучения. При

создании адаптивных оптических систем волнового сопряжения проводят, как правило [5, 6, 7], косвенные измерения волнового распределения на апертуре адаптивной оптической системы. Затем эти измерения одним из численных методов пересчитывают в базис функций отклика гибкого зеркала. При этом, каждому из известных алгоритмов, как правило, присущи свои достоинства и недостатки, однако конечные характеристики разрабатываемых на их основе датчиков волнового фронта зависят от конкретной технической реализации последних. В связи с этим интерес к дальнейшему совершенствованию таких устройств не ослабевает. Хорошо известный гартмановский тест [1] предложенный первоначально для контроля телескопической оптики, был в дальнейшем использован для адаптивной оптики и является наиболее часто применяемым типом датчика волнового фронта. Изображение входного зрачка проецируется на матрицу линз. Все изображения формируются на одном фотоприемнике, обычно ПЗС-матрице. Когда проходящий волновой фронт плоский, все изображения расположены в правильной сетке, определенной геометрией матрицы линз. Как только волновой фронт искажается, изображения смещаются со своих номинальных положений.

Следует отметить, что универсальным разложением волнового фронта, отвечающим ряду условий оптимальности, является разложение Карунена—Лоэва [1]. Оно характеризуется следующими свойствами, обуславливающими его оптимальность: минимальной среднеквадратической ошибкой при удержании заданного числа членов в бесконечном ряде разложения, получением наибольшего по сравнению с любым другим разложением количества информации о представляемой усеченным рядом функции, какое бы число членов ряда ни удерживалось, а также некоррелированностью коэффициентов разложения, что упрощает дальнейшее использование результатов разложения и их анализ. Однако в силу того, что аналитическое такое разложение трудно представимо, для практических целей обычно [1] используют систему полиномов Цернике, достаточно близких к ним. Для аппроксимации функций отклика гибкого адаптивного зеркала используем систему полиномов Цернике, ортогональных (ортонормированных) внутри единичной окружности или окружности радиусом R, представленных в полярных координатах r, θ [1, 2, 8]:

$$Z_j(r, \theta) = \begin{cases} \sqrt{n+1}R_n^m(r)\sqrt{2}\cos m\theta, m \neq 0 \\ \sqrt{n+1}R_n^m(r)\sqrt{2}\sin m\theta, m \neq 0 \\ \sqrt{n+1}R_n^0(r), m = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где

$$\int_0^1 \int_0^{2\pi} Z_j(r, \theta)Z_j(r, \theta)drd\theta = \delta_j,$$

$$R_n^m(r) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)! r^{n-2s}}{s! [(n+m)/2-s]! [(n-m)/2-s]!}.$$

Величины n и m всегда целые и удовлетворяют условию $n \geq m$, $n - |m| = \text{чётно}$. Индекс j является порядковым номером моды и зависит от n и m . Условие ортогональности в круге единичного радиуса имеет вид:

$$\text{где } W(r) = \begin{cases} 1/\pi & \text{if } |r| \leq 1 \\ 0 & \text{if } |r| > 1 \end{cases}, \quad \delta_{ij} - \text{символ Кронекера.} \quad (2)$$

Волновой фронт, измеренный датчиком, в базисе Цернике имеет следующий вид:

$$\Phi(r, \theta) = \sum_{j=1}^N Z_j(r, \theta) \tilde{a}_j, \quad (3)$$

где \tilde{a}_j - коэффициенты разложения волнового фронта по полиномам Цернике (сигналы с выхода датчика волнового фронта), число полиномов N в разложении определяют с помощью выражения [2]:

$$N = \left\lceil \left(\frac{-0,2944(D/r_0)^{5/3}}{\ln St} \right)^{\frac{2}{\sqrt{3}}} \right\rceil, \quad (4)$$

где D – диаметр апертуры, r_0 – радиус когерентности, St – число Штреля.

При этом в известных устройствах подлежат измерению с помощью квадрантных фотоприемников [3, 4, 5, 6, 7] локальные наклоны волнового фронта в точках

апертуры пропорциональные величинам вида $\frac{\partial \Phi(x_i, y_j)}{\partial x}$, $\frac{\partial \Phi(x_i, y_j)}{\partial y}$, где

$i = \overline{1, L}$; $j = \overline{1, K}$; $L \times K$ – количество квадрантных фотоприемников датчика,

$\Phi(x_i, y_j)$ – значения фазы на апертуре датчика. Затем эти измерения одним из численных методов пересчитывают в значения фазы $\Phi(x_i, y_j)$ или коэффициен-

ты a_j и используют для организации управления в контуре обратной связи адаптивной оптической системы.

В отличие от известных, в предлагаемом методе подлежат измерению не локальные наклоны в плоскостях x и y , пропорциональные соответствующим производным, а тангенциальные локальные наклоны, пропорциональные величинам

вида: $\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i)}{\partial \theta}$ и радиальные наклоны пропорциональные соответственно

величинам вида, $\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i)}{\partial r}$, $i = \overline{1, M}$. Для измерения этих величин предлага-

ется использовать двухплощадные фотоприемники, расположенные в точках апертуры на концентрических окружностях, при этом граница раздела двухплощадных фотоприемников совпадает с радиусом соответствующей окружности или перпендикулярна ему (рис.1 а,б).

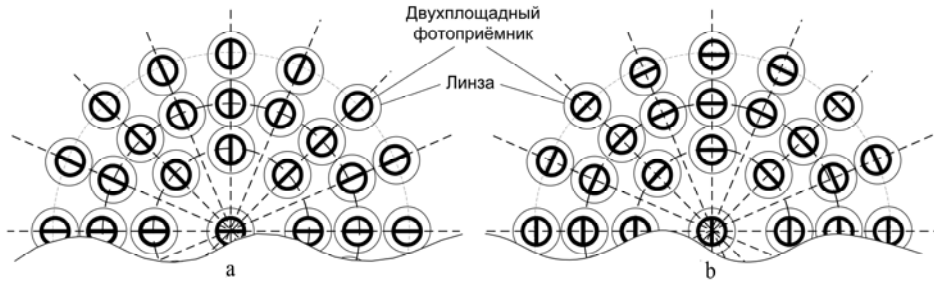


Рис. 1. Расположение фотоприемников на апертуре датчика волнового фронта: *a* – тангенциальный датчик, *b* – радиальный датчик.

Тогда решение задачи восстановления волнового фронта можно рассмотреть в следующей постановке. Пусть датчик Гартмана измеряет величины, пропорциональные локальным наклонам волнового $\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i) \dot{\epsilon} \zeta_i}{\partial \theta}$ в точках с координатами r_i , θ_i , при этом координаты точек r_i , θ_i , могут быть выбраны, в принципе, произвольно. Для определенности рассмотрим, например, расположение точек, приведенное на рис. 1а.

Для реконструкции фазы применим метод наименьших квадратов. Соответствующая квадратичная форма метода наименьших квадратов в этом случае будет иметь следующий вид:

$$J_1 = \sum_{i=0}^M \left(\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i) \dot{\epsilon} \zeta_i}{\partial \theta} - \frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i)}{\partial \theta} \right) \cdot \left(\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i) \dot{\epsilon} \zeta_i}{\partial \theta} - \frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i)}{\partial \theta} \right)^T, \quad (5)$$

где M – число точек измерений волнового фронта (фотоприемников).

Выражения для истинных значений градиента фазы можно представить в следующем виде:

$$\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i)}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial \theta} \sum_{j=1}^N a_j Z_j(r_i, \theta_i) = \sum_{j=1}^N a_j \frac{\partial Z_j(r_i, \theta_i)}{\partial \theta}. \quad (6)$$

Для вычисления в явном виде значений выражения (6) следует использовать выражение (1). Подставив (6) в (5) получим:

$$J_1 = \sum_{i=0}^M \left(\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i) \dot{\epsilon} \zeta_i}{\partial \theta} - \sum_{j=1}^N a_j \frac{\partial Z_j(r_i, \theta_i)}{\partial \theta} \right) \cdot \left(\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i) \dot{\epsilon} \zeta_i}{\partial \theta} - \sum_{k=1}^N a_k \frac{\partial Z_k(r_i, \theta_i)}{\partial \theta} \right)^T \quad (7)$$

Значения коэффициентов a_j найдем из M линейных уравнений, приравняв к нулю частные производные квадратичной формы J_1 по a_j :

$$B \cdot A = C, \quad \frac{\partial J_1}{\partial a_j} = 0 \quad (8)$$

где B – матрица с коэффициентами $b_{k,j} = \sum_{i=0}^M \frac{\partial Z_j(r_i, \theta_i)}{\partial \theta} \frac{\partial Z_k(r_i, \theta_i)}{\partial \theta}$;

A – вектор-строка искомых коэффициентов полиномов Цернике a_j ;

$$\tilde{n}_j = \sum_{i=0}^M \frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i) \partial \zeta_i}{\partial \theta} \frac{\partial Z_j(r_i, \theta_i)}{\partial \theta},$$

C – вектор-столбец правой части
 $k, j = 1, N$.

Решение системы (8) будет иметь следующий вид:

$$A = B^{-1} \cdot C \quad (9)$$

Следует отметить, что как показали исследования, структура матрицы B^{-1} (местоположение в ней нулевых и ненулевых элементов) остается неизменной при произвольном выборе точек расположения двухплощадных фотоприемников. При этом изменяются только значения этих элементов.

Рассуждая аналогично, можно построить датчик волнового фронта на основе радиальных производных (рис. 1б).

Соответствующая квадратичная форма метода наименьших квадратов в этом случае будет иметь следующий вид:

$$J_2 = \sum_{i=0}^M \left(\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i) \partial \zeta_i}{\partial r} - \frac{\partial Z_j(r_i, \theta_i)}{\partial r} \right) \cdot \left(\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i) \partial \zeta_i}{\partial r} - \frac{\partial Z_j(r_i, \theta_i)}{\partial r} \right)^T \quad (10)$$

где M – число точек измерений волнового фронта.

Значения коэффициентов a_j найдем из M линейных уравнений, приравняв к нулю частные производные квадратичной формы J_2 по a_j :

$$\frac{\partial J_2}{\partial a_j} = 0; \quad B_1 \cdot A = C, \quad (11)$$

где B – матрица с коэффициентами

A – вектор-строка искомых коэффициентов полиномов Цернике a_j ;

C – вектор-столбец правой части
 $k, j = 1, N$.

$$b_{k,j} = \sum_{i=0}^M \frac{\partial Z_j(r_i, \theta_i)}{\partial r} \frac{\partial Z_k(r_i, \theta_i)}{\partial r},$$

Решение системы (11) будет иметь следующий вид:

$$A = B_1^{-1} \cdot C \quad (12)$$

Таким образом, для заданной конфигурации точек матрицы B^{-1} или B_1^{-1} могут быть рассчитаны заранее, а алгоритм вычисления коэффициентов разложения в базисе Цернике вектора A сводится к вычислению вектора правой части C и матричному умножению на матрицу B^{-1} или B_1^{-1} .

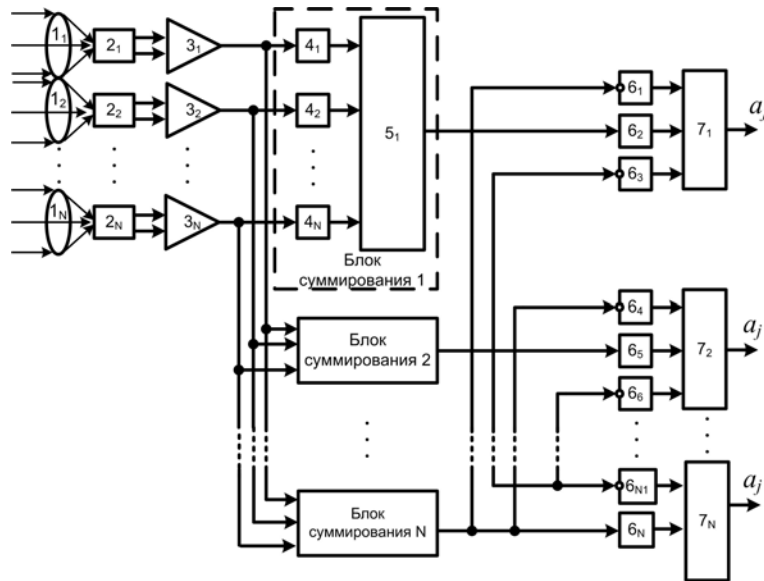


Рис.2. Функциональная схема датчика тангенциального типа: 1–линза, 2–матрица двухплощадных фотоприемников, 3–дифференциальные усилители, 4–масштабные усилители блока суммирования, 5–сумматоры блока суммирования, 6–группа масштабных усилителей, 7–вторая группа сумматоров.

На базе рассмотренного метода восстановления волнового фронта может быть построена структура соответствующего датчика. Данная структура приведена на рис. 2 и реализует алгоритм следующим образом. Искаженный волновой фронт фокусируется матрицей линз 1 на матрицу двухплощадных фотоприемников 2. При этом в каждом локальном участке, ограниченном апертурой линзы, сфокусированное пятно смещается относительно оптической оси в зависимости от локального наклона волнового фронта, пропорционального величинам вида

$$\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i)}{\partial \theta}$$

в точках с координатами r_i, θ_i .

Наличие искажений волнового фронта приводит к появлению разностных сигналов на выходе фотоприемников 2, которые усиливаются дифференциальными усилителями 3, выходные сигналы которых будут пропорциональны величинам

$$\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i)}{\partial \theta}$$

. Затем сигналы с выхода дифференциальных усилителей 3 поступают на блоки суммирования, где вычисляются сигналы, пропорциональные эле-

ментам вектор-столбца правой части c_j .

При этом коэффициенты усиления K_y масштабных усилителей 4 блока суммирования вычисляются в соответствии с выражением

$$\hat{E} \dot{o}_j = \frac{\partial Z_j(r_i, \theta_i)}{\partial \theta} \quad (13)$$

Выходные сигналы блоков суммирования 5, пропорциональные величине C_j поступают на входы группы масштабных усилителей, коэффициенты усиления которых вычисляются следующим образом:

$$K_{kj} = b_{k,j}^{-1} \quad (14)$$

При этом учитываются только ненулевые элементы. Выходные сигналы вторых масштабных усилителей 6 поступают на входы сумматоров 7, с выхода которых снимаются сигналы a_j , пропорциональные коэффициентам разложения в базе Цернике.

Сигналы с выхода датчика могут быть использованы непосредственно для подачи на вход гибкого пьезоэлектрического зеркала адаптивной оптической системы, что существенно упрощает ее конструкцию. Радиальный датчик может быть построен аналогично.

При технической реализации датчика волнового фронта, при произвольном выборе мест расположения фотоприемников оказывается, что весовые коэффициенты K_y имеют небольшие значения по модулю. Это приводит к тому что в этих каналах отношение сигнал/шум значительно меньше чем в других, что обуславливает существенное ухудшения технических характеристик датчика волнового фронта. Исследования показали, что величина данных весовых коэффициентов зависит от расположения фотоприемников. Оптимальное расположение фотоприемников следует выбирать с учетом максимума следующего критерия. Для тангенциального датчика волнового фронта (рис.4):

$$J_3 = \max \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial Z_i(r, \theta)}{\partial \theta} \right)^2, \quad (15)$$

для радиального датчика волнового фронта:

$$J_4 = \max \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial Z_i(r, \theta)}{\partial r} \right)^2. \quad (16)$$

Рассмотрим пример оптимизации топологии тангенциального датчика волнового фронта.

По формуле (4) определяем число полиномов Цернике. Так, например $D=0,05\text{м}$, $L=5\text{ км}$, максимальное значение M в соответствии с (4) не превышает $12 \div 16$. В нашем случае примем $N=16$. Для выбора координат оптимального расположения двухплощадных фотоприемников, расположенных в точках апертуры на концентрических окружностях радиуса r используем критерий (15). На рис.4. точки a, b, c, d являются оптимизированными полярными координатами расположения фотоприемников датчика на окружности $r_1=0,2$ и точки e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, которые являются координатами расположения фотоприемников датчика на окружности $r_4=0,8$. Далее аналогично выбираются оптимизированные координаты для расположения квадрантных фотоприемников на окружностях $r_2=0,4$, $r_3=0,6$, $r_5=1$. В итоге мы получаем оптимизированную топологию тангенциального датчика волнового фронта.

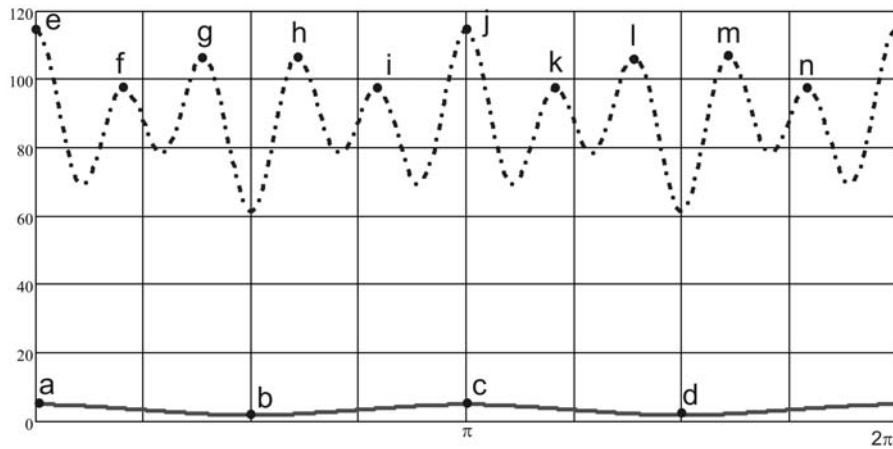


Рис. 3. Выбор оптимального расположения фотоприемников датчика.

Рассуждая аналогично, можно оптимизировать топологию радиального датчика волнового фронта используя критерий (16).

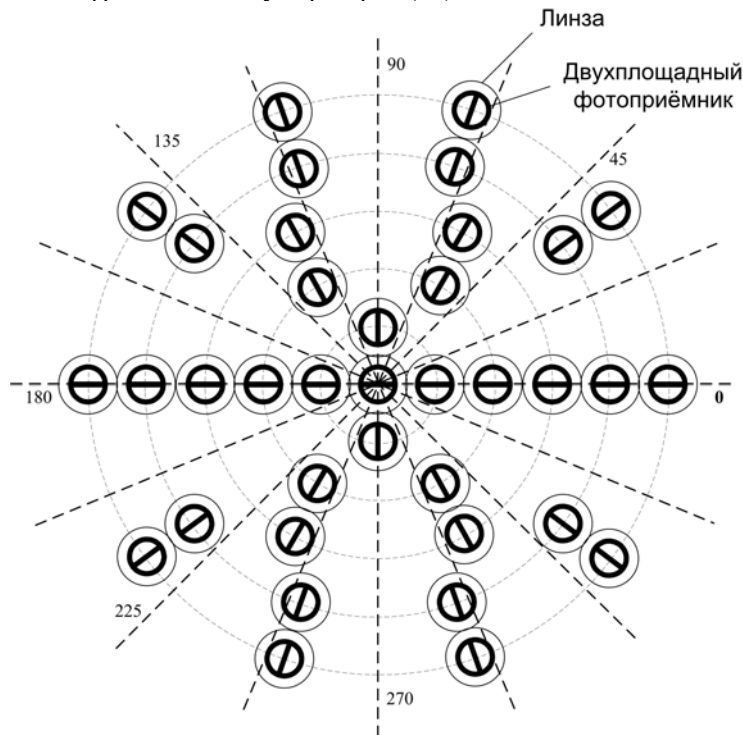


Рис. 4. Оптимизированное расположение тангенциальных датчиков на апертуре.

При проведении оценки эффективности адаптивных оптических систем на фоне гауссовских шумов следует учитывать расположение датчиков в точках апертуры на concentрических окружностях датчиков (рис. 1 а, б) и при оптимизированном расположении датчиков (рис. 4).

Также была исследована зависимость дисперсии ошибки восстановления волнового фронта D_w от дисперсии шумов D_n в каналах датчика для топологии рис.1 а, б и оптимизированная топология рис.4 при $N=16$. Анализ результатов показал, что предложенный вариант оптимизации топологии датчика волнового фронта позволяет существенно повысить точность восстановления волнового фронта.

Следует отметить, что с учетом того, что на практике часто используют сетку квадрантных фотоприемников, предложенный алгоритм восстановления волнового фронта также может быть использован, с учетом того, что:

$$\frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial r} = \frac{\partial \Phi(r \sin \theta, r \cos \theta)}{\partial r} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \sin \theta + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \cos \theta, \quad (17)$$

$$\frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial \theta} = \frac{\partial \Phi(r \sin \theta, r \cos \theta)}{\partial \theta} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} r \cos \theta - \frac{\partial \Phi}{\partial y} r \sin \theta \quad (18)$$

В выражениях (17), (18) учтена связь декартовой и полярной системы координат.

Выводы

В настоящей работе предложен новый алгоритм восстановления волнового фронта в базе Цернике с использованием полярной системы координат. Разработана новая структурная схема датчика волнового фронта. Разработан метод оптимизации топологии датчика волнового фронта, позволяющий существенно повысить точностные характеристики датчика волнового фронта. Введены критерии оптимизации топологии датчика волнового фронта (15, 16), что позволило существенно повысить точность восстановления волнового фронта. Проведенный анализ результатов математического моделирования показал, что удалось существенно повысить технические характеристики датчика волнового фронта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И.* Принципы адаптивной оптики. Москва: Наука, 1985. 336 с.
2. *Лукьянов Д.П., Корниенко А.А., Рудницкий Б.Е.* Оптические адаптивные системы. / Под ред. Д.П. Лукьянова. М.: "Радио и связь", 1989
3. *Безуглов Д.А., Мищенко Е.Н.* Метод сплайн-аппроксимации в задаче восстановления волнового фронта. // Известия РАН. Серия физическая, 12, 1992, с.156-160.
4. *Безуглов Д.А., Мищенко Е.Н., Мищенко С.Е.* Адаптивные оптические системы. Методы восстановления волнового фронта, разработка структур систем и новой элементарной базы. // Оптика атмосферы и океана, 3, 1995 (обзор), с.364-380.
5. А.с. 1647496 СССР, МКИ5 G 02 В 27/00. Датчик волнового фронта / *Безуглов Д.А., Мищенко Е.Н., Тюрников В.Л.* Оpubл. в БИ. 1991. №17
6. *Дегтярев Г.Л., Маханько А.В., Чернявский С.М., Чернявский А.С.* Модальный датчик волнового фронта. // «Оптика атмосферы и океана», 15, № 12 2002г. с.1078-1083

7. А.с. 1720051 СССР, МКИ5 G 02 В 26/06. Датчик волнового фронта / Безуглов Д.А., Мищенко Е.Н., Крымский М.И., Серпенинов О.В. Оpubл. в БИ. 1992. №.10.
8. Noll R.J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence. J. Opt. Soc. Amer. 1976. V66. P. 207-211.

УДК 681.3.067:621.396.2

Д.М. Голубчиков

СТРУКТУРА И ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ ID 3000 CLAVIS

В мире существует всего три компании, предлагающие системы квантовой криптографии, предназначенные для применения в коммерческих приложениях. Две находятся в Европе – Id Quantique и Smart Quantum, одна в США – MagiQ Technology. Производимое ими оборудование строится по схожим схемам и незначительно отличается по своим характеристикам. В данном обзоре будет детально рассмотрена система квантового распределения ключей Id 3000 Clavis, производства компании Id Quantique. Она предназначена для проведения исследований в области квантовой криптографии и предоставляет пользователю широкие возможности по настройке и оценке параметров и характеристик квантового канала и оборудования предназначенного для его формирования[1].

Вначале будут кратко рассмотрены принципы функционирования системы. Далее проведено детальное описание блоков и модулей, входящих в ее состав.

Описание системы квантового распределения ключей

Квантовая система распределения ключей Id 3000 Clavis состоит из двух устройств размещенных в 19-ти дюймовых корпусах и пакета программного обеспечения для управления устройствами. Первое устройство является приемопередающим модулем и носит кодовое название QKDS-B или Bob, второе устройство является кодирующим модулем, не содержит приемопередающей аппаратуры, работающей с квантовыми состояниями, и носит кодовое название QKDS-A или Alice[2].

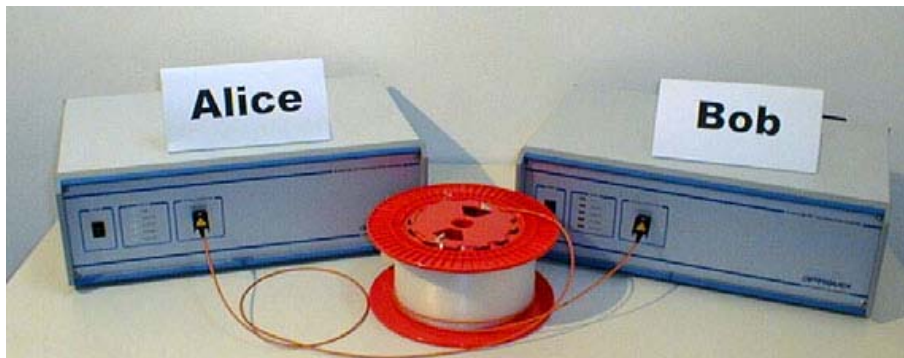


Рис. 1. Внешний вид системы квантового распределения ключей Id 3000 Clavis.