

Несколько слов следует также сказать о величине константы диполь-дипольных сил. Для всех исследованных ядер были получены близкие значения этого параметра:  $\kappa=0,40-0,46 \text{ МэВ} \cdot \text{фм}^{-2}$ . Найденная величина  $\kappa$  в 3–3,5 раза меньше значения, предсказываемого моделью объемных колебаний [17] ( $\kappa=(5/3)\pi\eta A^{-2/3}/r_0^2$ ). Это подразумевает, что на изовекторные дипольные колебания ядер  $1d_{2s}$ -оболочки оказывают сильное влияние поверхностные эффекты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Варламов В. В. и др. // Ядерная физика. 1978. 28. С. 590–603. [2] Варламов В. В. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1979. 43. С. 186–193. [3] Ishkhanov B. S. et al. // Nucl. Phys. 1979. A313. P. 317–332. [4] Гутый А. И. и др. // Ядерная физика. 1981. 33. С. 581–590. [5] Ишханов Б. С., Капитонов И. М., Шведун В. И., Шумаков А. В. // Там же. 1981. 33. С. 865–874. [6] Wu C. P., Firc F. W. K., Bergman B. L. // Phys. Lett. 1970. B32. P. 675–677. [7] Ishkhanov B. S. et al. // Nucl. Phys. 1983. A405. P. 287–300; Ишханов Б. С., Канзюба В. Г., Орлин В. Н. // Ядерная физика, 1984. 40. С. 9–15. [8] Orlin V. N. // Nucl. Phys. 1983. A405. P. 263–286; 1985. A443. P. 445–460. [9] Rowe D. J., Wong S. S. M. // Nucl. Phys. 1970. A153. P. 561–585. [10] Ishkhanov B. S., Kapitonov I. M., Orlin V. N., Shvedunov V. I. // Ibid. 1979. A318. P. 413–441. [11] Drechsel D., Seabern J. B., Greiner W. // Phys. Rev. 1967. 162. P. 983–991. [12] Kamimura M., Ikeda K., Arima A. // Nucl. Phys. 1967. A95. P. 129–160. [13] Neudachin V. G., Shevchenko V. G. // Phys. Lett. 1964. 12. P. 18–20. [14] Eramzhyan R. A., Ishkhanov B. S., Kapitonov I. M., Neudachin V. G. // Phys. Reports. 1986. N 4–6. P. 229–400. [15] Danos M. // Nucl. Phys. 1958. 5. P. 23–32. [16] Okamoto K. // Phys. Rev. 1958. 110. P. 143–153. [17] Бор О., Моттельсон Б. Структура атомного ядра. М., 1977. Т. 2. [18] Прокопчук Ю. И. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Киев, 1980. [19] Ahrens J. et al. // Nucl. Phys. 1975. A251. P. 479–492. [20] Горячев Б. И., Ишханов Б. С., Шевченко В. Г., Юрьев Б. А. // Ядерная физика. 1968. 7. С. 1168–1179.

Поступила в редакцию  
31.03.86

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1987. Т. 28. № 4

#### ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535.8

#### ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ЗОНДИРОВАНИЕМ

М. А. Воронцов, И. А. Кудряшов

(кафедра общей физики для физического факультета;  
кафедра общей физики и волновых процессов)

1. В существующих в настоящее время адаптивных оптических системах апертурного зондирования, как правило, используется метод многоканальной фазовой модуляции. Такие системы достаточно хорошо изучены как теоретически, так и экспериментально [1, 2]. Вместе с тем развитие микропроцессорной техники стимулировало появление адаптивных систем с последовательным введением вариаций в фазу световой волны. Первые эксперименты показали высокую эффективность систем такого типа [1]. Основными достоинствами метода последовательного зондирования является относительная простота его технической реализации и возможность программным образом изменять алгоритм работы. Такие системы целесообразно использовать в тех случаях, когда для управления фазой световой волны необходимо приме-

нять алгоритмы, сложные для реализации в аналоговых устройствах, например в задачах компенсации нелинейных искажений [3], формирования заданного распределения интенсивности [4] и т. п. Вопросы организации управления системой с последовательным зондированием (эффективность алгоритмов, влияние шумов и т. д.) целесообразно исследовать на лабораторных моделях со сравнительно небольшим числом каналов управления.

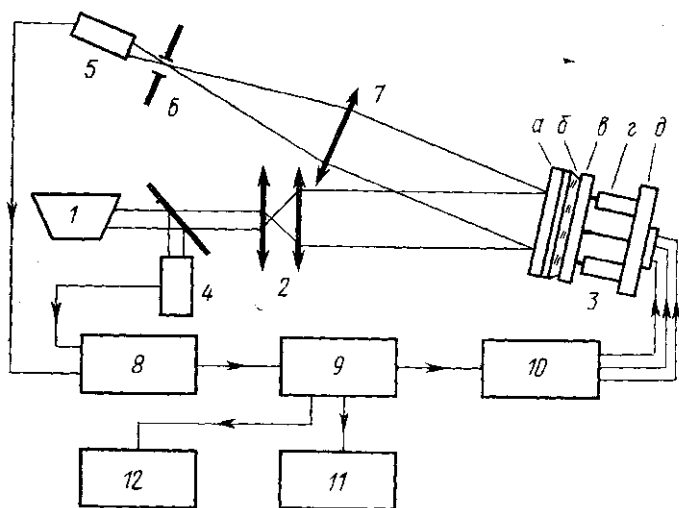


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — лазер, 2 — коллиматор, 3 — адаптивное зеркало (а — гибкое зеркало, б — прокладка, в — металлический диск, г — поршневой привод, д — каркас), 4, 5 — ФЭУ, 6 — диафрагма, 7 — линза, 8 — крайт КАМАК, 9 — микро-ЭВМ, 10 — блок управления зеркалом, 11 — цветной растровый дисплей, 12 — графопостроитель

В настоящей работе экспериментально исследуется модель адаптивной оптической системы последовательного зондирования с тремя контурами управления. Такая система позволяет, в частности, осуществлять стабилизацию положения когерентного светового луча в пространстве (два контура управления по наклонам) и его автоматическую подфокусировку. Ее можно использовать и в задачах фокусировки излучения на удаленный объект.

2. Структурная схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Излучение однододового лазера 1 после прохождения через коллиматор 2 направляется на адаптивное зеркало 3. Диаметр пучка на зеркале 3 составляет 30 мм. Профиль интенсивности пучка близок к гауссовому. Диаметр зеркала 45 мм. Линза 7 с фокусным расстоянием 30 см расположена непосредственно за управляемым зеркалом и позволяет сфокусировать излучение в пределах малой ( $\sim 0,3$  мм) диафрагмы 6, расположенной в ее фокальной плоскости. Мощность излучения, прошедшего через диафрагму, регистрируется фотоэлектронным умножителем (ФЭУ-79) 5. Сигнал с ФЭУ 4 используется для нормирования рабочего сигнала на мгновенную мощность излучения лазера. Целью адаптации является максимизация уровня сигнала с ФЭУ 5 (рабочий сигнал), который и служит критерием настройки системы.

Рабочий и нормирующий сигналы подаются на входы 10-разрядных

аналого-цифровых преобразователей, установленных в крейте КАМАК 8. По магистрали КАМАК значения этих сигналов поступают в микро-ЭВМ «Электроника 80» 9. В зависимости от алгоритма настройки по измеренным значениям сигналов вычисляются величины управляющих напряжений на усилителях постоянного тока (УПТ), управляющих зеркалом 3. Вычисленные значения напряжений поступают в блок управления зеркалом 10. Блок управления содержит дешифратор адреса канала управления и собственно каналы управления, каждый из которых включает 8-разрядный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и УПТ. Дешифратор адреса подключает вход одного из ЦАП к шинам данных ЭВМ. После преобразования сигнала из цифровой формы в аналоговую он поступает на вход УПТ. Высоковольтный сигнал с выхода УПТ подается на один из приводов адаптивного зеркала. Диапазон изменения управляющего напряжения  $\pm 300$  В, число уровней квантования сигнала 256.

Адаптивное зеркало представляет собой биморфный элемент (стеклянная подложка толщиной 2 мм с наклеенным на обратную сторону тонким ( $\sim 0,5$  мм) пьезокерамическим диском [5]). При подаче управляющего напряжения на пьезокерамику изменяется общая кривизна зеркала, что приводит к изменению размера пятна в плоскости диафрагмы 6. При изменении напряжения от  $-300$  до  $+300$  В центр зеркала смещается на 6 мкм, что соответствует изменению его фокусного расстояния от бесконечности до 40 м. При этом диаметр фокального пятна изменяется от 0,3 до 0,5 мм. Для управления наклоном зеркала используются два пьезокерамических привода поршневого типа. Каждый привод собран из двух пьезокерамических пакетов. При подаче на привод напряжения  $\pm 300$  В происходит его удлинение на  $\pm 2,4$  мкм, что обеспечивает наклон волнового фронта лазерного пучка на  $\pm 30''$ .

3. В качестве базовых используются хорошо известные методы по координатного спуска и градиентный [6]. Особенность их применения в данной системе заключается в том, что их эффективность исследуется в реальных условиях, для которых характерно наличие гистерезиса в пьезоприводах управляемого зеркала, сравнительно высокий уровень шума в каналах управления, присутствие aberrаций в оптической части системы и т. п.

Алгоритм настройки реализован в виде программы, написанной на языке «Фортран 4». Это оказалось удобным для лабораторного исследования системы, хотя и ограничило ее быстродействие. Характерное время на одну итерацию по одной степени свободы системы составляет 15 мс. В серии экспериментов для управления адаптивной системой использовался метод покоординатного спуска. Процесс настройки системы состоит из последовательности однотипных операций (шагов). Пусть на  $n$ -м шаге процесса управления напряжением на приводах зеркала составляют  $U_i^{(n)}$ . Этим напряжениям соответствует некоторая величина критерия настройки (мощности излучения в пределах малой диафрагмы 6)  $J^{(n)}$ . На привод управления зеркалом по одному из углов наклона подается сравнительно малое приращение напряжения  $h_1$ . Это приводит к изменению критерия  $\Delta J_1^{(n)}$ . Если  $\Delta J_1^{(n)} > 0$ , то новое значение управляющего напряжения на этом приводе полагается равным  $U_i^{(n)} + h_1$ . В противном случае (при  $\Delta J_1^{(n)} < 0$ ) новое значение управляющего напряжения выбирается в виде  $U_i^{(n+1)} = U_i^{(n)} - h_1$  и на следующей итерации приращение напряжения  $h_1$  берется со знаком минус.

Далее приращение управляющего напряжения поступает на другой привод зеркала, соответствующий второму наклону. Новое значение

напряжения  $U_2^{(n+1)}$  выбирается аналогичным образом. Такая же процедура повторяется для третьего канала управления, осуществляющего изменение кривизны волнового фронта излучения.

Таким образом, новые значения управляющих напряжений вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} U_i^{(n+1)} &= U_i^{(n)} + h_i, \\ h_i &= h_i, \quad \text{если } \Delta J_i^{(n)} > 0, \\ h_i &= -h_i, \quad \text{если } \Delta J_i^{(n)} < 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Также исследовалась работа адаптивной системы с градиентным методом. В градиентном методе на каждый привод зеркала последовательно подаются малые приращения  $h_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) управляющих напряжений и измеряются соответствующие приращения критерия  $\Delta J_i$ . После измерения  $\Delta J_i$  восстанавливаются исходные величины напряжений на приводах. Новые значения управляющих напряжений вычисляются по формулам

$$U_i^{(n+1)} = U_i^{(n)} + \alpha_i \Delta J_i^{(n)} / J^{(n)}, \quad i=1, 2, 3. \quad (2)$$

Отметим, что в описанных алгоритмах настройки величина приращения напряжения  $h_i$  (в методе покоординатного спуска) и величина градиентного шага  $\alpha_i$  (в градиентном методе) не изменялись. Эти параметры подбирались экспериментально.

4. Эффективность работы системы проиллюстрируем на примере метода покоординатного спуска. Основными параметрами данного метода являются величины приращений напряжений  $h_i$  ( $i=1, 2, 3$ ), которые полагались одинаковыми для всех каналов управления ( $h_i=h$ ,  $i=1, 2, 3$ ). Типичное значение  $h$  составляло 0,016 (приращения нормированы на весь диапазон изменения напряжений). Соответствующие изменения наклона волнового фронта и фокусного расстояния легко пересчитать, зная чувствительность приводов. Так, при  $h=0,016$  изменение наклона составляет  $1''$ , а изменение прогиба зеркала (смещение центра относительно края) 0,1 мкм.

Процесс настройки системы (зависимость величины сигнала с ФЭУ 5 от времени) иллюстрируется рис. 2. При малой величине  $h$  возрастание критерия происходит монотонно, но сравнительно медленно. При увеличении  $h$  время настройки уменьшается, однако начинается процесс осцилляций. Характерное время настройки системы составляет  $\sim 0,5$  с, что соответствует примерно 10 итерациям по методу покоординатного спуска.

Работа системы с алгоритмом покоординатного спуска исследовалась в условиях шумов, введенных в канал регистрации. Аддитивный  $\delta$ -коррелированный шум вносился программным образом с помощью датчика случайных чисел. При наличии шума (рис. 2, б) процесс настройки системы с малым значением приращения управляющего напряжения  $h$  сильно затягивается. Оптимальное значение  $h$  в этом случае составляет  $h_{\text{опт}}=0,023$ . При возрастании уровня шума до 10% (по отношению к максимальному значению критерия  $J$ ) величина  $h_{\text{опт}}$  возрастает до 0,028.

Приведенные выше результаты получены для одних и тех же начальных условий путем усреднения по 20 реализациям процесса настройки.

Для исследования качества настройки системы из различных начальных условий были проведены эксперименты, в которых начальные условия задавались случайным образом с помощью датчика случайных чисел. Результаты адаптации, усредненные по 100 реализациям, приведены на рис. 3. С возрастанием шума максимальное значение уровня адаптации достигается при увеличении параметра  $h$  (рис. 3, а).

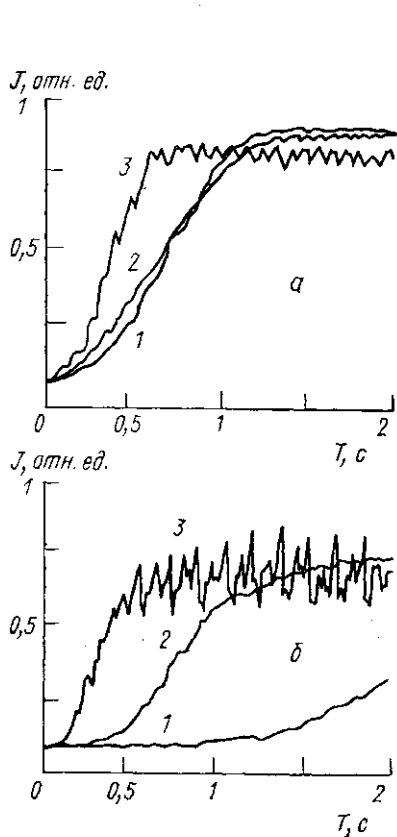


Рис. 2. Зависимость критерия адаптации от времени в процессе настройки системы при различной величине  $h$  в отсутствие шума (а):  $h=0,013$  (1), 0,016 (2), 0,023 (3) и при уровне шума 5% (б):  $h=0,013$  (1), 0,023 (2), 0,046 (3)

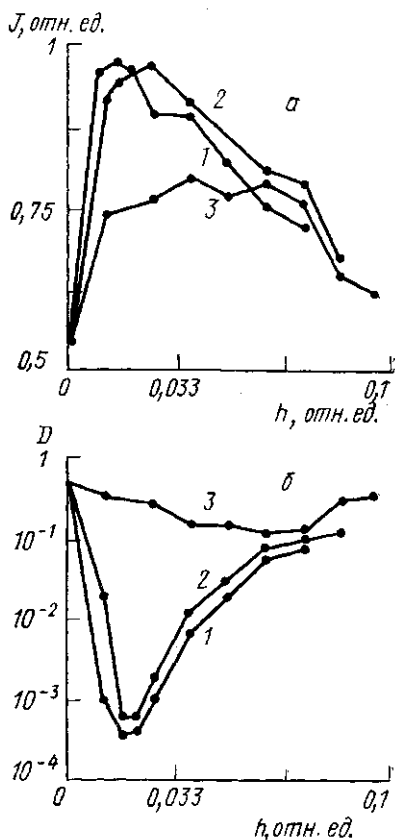


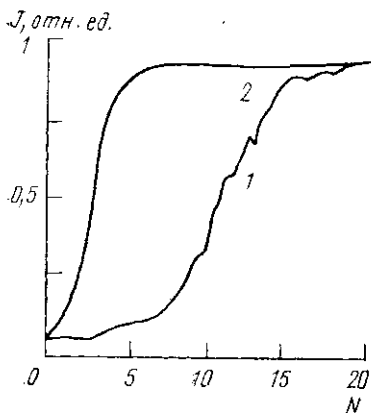
Рис. 3. Зависимость установившегося значения критерия  $J$  (а) и дисперсии флуктуаций уровня адаптации  $D$  (б) от величины  $h$  при различном уровне шума  $S$ :  $S=0$  (1), 5 (2) и 20% (3)

Адаптация приводит не только к возрастанию сигнала, но и позволяет уменьшить дисперсию его флуктуаций относительно среднего уровня (рис. 3, б). Оказалось, что для разного уровня шума величины  $h_{\text{опт}}$  существенно отличаются. Значение приращения напряжения  $h_{\text{опт}}$  является оптимальным как по уровню адаптации, так и по дисперсии флуктуаций сигнала относительно среднего уровня.

По аналогичной методике исследовался градиентный метод. Величина пробного приращения управляющего напряжения  $h$  была постоянна ( $h=0,008$ ). Величина градиентного шага  $\alpha$  в (2) полагалась одинаковой для всех каналов управления ( $\alpha_i=\alpha$ ,  $i=1, 2, 3$ ) и выбира-

лась из условия максимума уровня адаптации при настройке системы из различных начальных условий.

Процесс настройки системы при одних и тех же начальных условиях с различными методами иллюстрируется рис. 4. Параметры алгоритмов выбраны на основании проведенных экспериментов. В целом градиентный метод оказался более быстрым в реальном времени, однако более чувствительным к шуму.



В данной системе при небольшом уровне аддитивного  $\delta$ -коррелированного шума ( $\sim 5\%$ ) градиентный метод оказался предпочтительнее. При более высоком уровне шума предпочтение отдавалось методу покоординатного спуска.

В работе рассмотрена относительно простая модель адаптивной системы последовательного зондирования, поскольку

Рис. 4. Зависимость критерия адаптации от номера итерации  $N$  в процессе настройки системы по методу покоординатного спуска (1) и по градиентному методу (2)

ку основное внимание уделяется вопросам организации управления и эффективности используемых алгоритмов настройки. Тем не менее описанная система представляет и самостоятельный интерес. Она с успехом использовалась для автоматической юстировки диагностического интерферометра. Возможны и другие применения, например в качестве системы стабилизации лазерного резонатора.

Рассмотренные методы управления использовались в 15-канальной адаптивной системе последовательного зондирования. Проведенные эксперименты показали высокую эффективность работы такой системы [7].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] О'Мира Т.//Адаптивная оптика/Под ред. Э. А. Витриченко. М., 1980. С. 140—168; Пирсон Дж., Хансен С.//Там же. С. 203—226; Кокоровски С. Пединоф М., Пирсон Дж.//Там же. С. 227—261. [2] Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. Принципы адаптивной оптики. М., 1985. С. 25. [3] Карамзин Ю. Н., Сухоруков А. П., Трофимов В. А. Оптимальное управление световыми пучками в нелинейных средах. М., 1986. С. 15. [4] Воронцов М. А., Матвеев А. Н., Сивоконь В. П.//ДАН СССР. 1986. 290, № 6. С. 1354—1358. [5] Воронцов М. А., Кудряшов А. В., Шмальгаузен В. И.//Изв. вузов. Радиофизика. 1984. 27, № 10. С. 1419—1430. [6] Васильев Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач. М., 1980. С. 117. [7] Воронцов М. А., Кудряшов И. А., Шмальгаузен В. Н.//Мат. конф. «Лазеры в народном хозяйстве». М., 1986. С. 28—31.

Поступила в редакцию  
26.03.86

После переработки  
24.12.86