

# Высокоточный метод определения положения плоскости фокусировки лазерного пучка\*

Я.И.Малашко, А.Н.Клейменов, И.Б.Потемкин, В.М.Хабибулин

Приведены результаты моделирования и экспериментального исследования метода удвоенной частоты сферической модуляции волнового фронта для определения положения перетяжки лазерного пучка. Погрешность определения положения плоскости фокусировки составила менее  $10^{-5}$  дптр. Экспериментально установлено, что амплитуда электрического сигнала управления на удвоенной частоте пропорциональна 12% от общей мощности излучения.

**Ключевые слова:** лазерный пучок, фокусировка, адаптивная оптика, удвоенная частота сферического зондирования волнового фронта.

## 1. Введение

Сферическая дефокусировка пучка (особенно в условиях мобильного базирования) является aberrацией с максимальной амплитудой, в наибольшей степени увеличивающей угловую расходимость излучения. При этом сигнал модального управления адаптивной системой по сфере, который может быть получен при зондировании по сферической составляющей волнового фронта при «приближении к вершине» в алгоритме «восхождения на холм» [1, 2], стремится к нулю (поскольку первая производная около вершины «холма» стремится к нулю), и адаптивная система не в состоянии уменьшить погрешность метода. Это связано с тем, что сигнал управления вырабатывается на частоте зондирования. В то же время сигнал на удвоенной частоте зондирования возрастает и становится максимальным на «вершине холма». Следовательно, высокоточный метод поиска положения плоскости фокусировки может быть основан на использовании сигнала на удвоенной частоте сферического зондирования волнового фронта.

В настоящей работе приводятся результаты численного моделирования и экспериментального определения таких характеристик метода удвоенной частоты сферической модуляции волнового фронта [3, 4], как погрешность нахождения положения перетяжки лазерного пучка, коэффициент преобразования мощности излучения в сигнал на удвоенной частоте и других.

Идея данного метода заключается в том, что только вблизи плоскости фокусировки и только в приосевой части перетяжки пучка изменение плотности мощности происходит на удвоенной частоте сферической модуля-

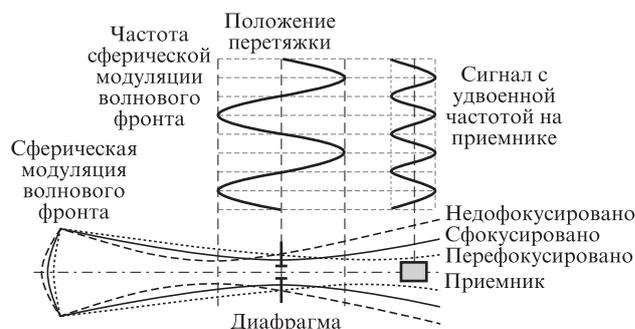


Рис.1. Схематическое изображение метода определения положения перетяжки лазерного пучка по удвоенной частоте сферической модуляции волнового фронта.

ции волнового фронта. Из рис.1 видно, что за один период сферической модуляции волнового фронта сигнал на приемнике за диафрагмой дважды проходит через максимум, что и означает генерацию сигнала на удвоенной частоте.

Наши исследования были направлены на решение следующих задач:

- поиск амплитуды сферической модуляции волнового фронта, при которой сигнал на удвоенной частоте максимален;
- определение оптимального размера диафрагмы, при котором сигнал на удвоенной частоте максимален;
- определение диапазона смещения плоскости фокусировки относительно плоскости наблюдения, в котором присутствует сигнал на удвоенной частоте;
- определение относительной доли мощности излучения, перекачиваемого в сигнал на удвоенной частоте;
- исследование погрешности метода.

## 2. Результаты численного моделирования метода удвоенной частоты

В качестве модели лазерного пучка недифракционного качества был выбран так называемый гауссовоподобный пучок, для которого угловое распределение интенсивности  $I(\varphi)$  определяется выражением

\* Доложена на конф. «Оптика лазеров», Россия, С.-Петербург, июнь 2012 г.

Я.И.Малашко, А.Н.Клейменов, И.Б.Потемкин, В.М.Хабибулин. ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей»», Россия, 125190 Москва, Ленинградский просп., 80; e-mail: malashko@yandex.ru, kleimenovandrei@rambler.ru

Поступила в редакцию 24 октября 2012 г., после доработки – 15 октября 2013 г.

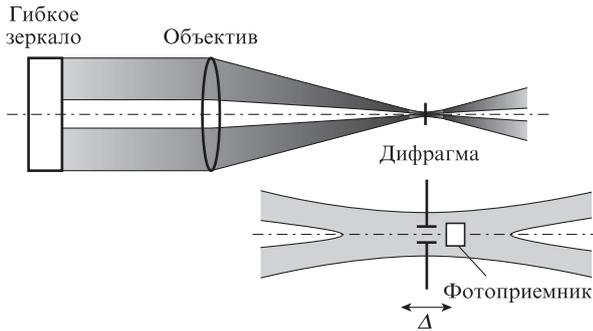


Рис.2. Схема для моделирования характеристик метода удвоенной частоты.

$$I(\varphi) = \frac{P_0}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{\varphi^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

где  $P_0$  – общая мощность излучения;  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение (СКО) локальных углов наклона волнового фронта, превышающее дифракционный предел.

Математическая модель создавалась для части экспериментальной установки, в которую входили коллиматор от ОСК-2 (используемая апертура 120 мм, фокусное расстояние  $f = 1600$  мм), гибкое биморфное управляемое зеркало с диаметром зоны управления 120 мм, диффрагма и приемник. Схема для многолучевых расчетов приведена на рис.2. В модели гауссовоподобного пучка недифракционного качества использовалось  $\sim 10^7$  лучей, равномерно распределенных по сечению пучка в узлах квадратной сетки. Угловое распределение локальных наклонов волнового фронта (лучей) задавалось генератором случайных чисел по нормальному закону с  $\sigma = \varphi_0/2.36$ , при этом  $\varphi_0 = 40''$ .

Результаты численного моделирования показали, что размер лазерного пучка в дальней зоне

$$D = 2a/\varphi, \quad (2)$$

где  $a$  – диаметр излучающей апертуры. При дальности, большей, чем (2), ширина углового распределения пучка изменяется менее чем на 1%–2%.

Расчетное угловое распределение интенсивности в фокальной плоскости при смещении диффрагмы из фокуса на величину  $\Delta$  приведено на рис.3. Видно, что снижение

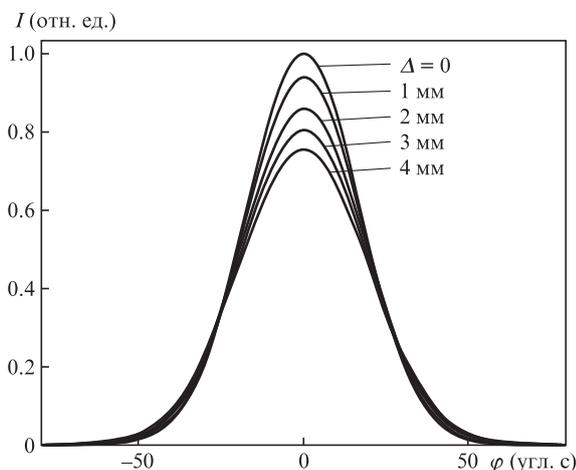


Рис.3. Угловое распределение нормированной интенсивности в сечении пучка при смещении приемника из фокуса на величину  $\Delta$ .

интенсивности на оси пучка до 0.8 от максимального значения происходит при  $\Delta = -3.22$  и  $+3.63$  мм. Таким образом, результаты моделирования позволяют предложить формулу для оценки длины эллипсоидного объема по уровню уменьшения интенсивности на оси пучка 0.8, в котором генерируется удвоенная частота:

$$l = 2|\Delta| \approx 2 \times 0.9 \frac{f^2}{a} \varphi_0, \quad (3)$$

что подтверждается нами ниже экспериментально. Отметим, что для дифракционно ограниченного пучка длина перетяжки определяется выражением [5]

$$l_{\text{dif}} = 2|A_{\text{dif}}| \approx 2 \times 0.5 \frac{f^2}{a} \frac{\lambda}{a}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения. С учетом того, что дифракционная расходимость гауссова пучка диаметром  $a$  с плоским волновым фронтом равна  $1.22\lambda/a$ , коэффициенты в формулах (3) и (4) различаются примерно вдвое.

На рис.4 представлено угловое распределение нормированной интенсивности в фокальной плоскости объектива при внесении сферической составляющей волнового фронта с амплитудой  $2h$  гибким биморфным зеркалом. На рис.5 приведены расчетные формы сигнала на удвоенной частоте при изменении амплитуды модуляции гибким зеркалом и смещении  $\Delta = 0$ . Видно, что при больших амплитудах модуляции возникает нелинейное искажение и сигнал на удвоенной частоте теряет форму синусоиды. На рис.6 показаны формы и величины сигнала на удвоенной частоте при различных смещениях  $\Delta$  плоскости фокусировки от плоскости диффрагмы и амплитуде  $h = 1.3$  мкм.

Из приведенных модельных «осциллограмм» видно, что:

1. Амплитуда сигнала на удвоенной частоте без нелинейных искажений максимальна при амплитуде  $h = 1.3$  мкм, что соответствует продольному размеру перетяжки 3.2 мм (по уровню интенсивности на оси пучка 0.8).

2. Максимальная доля мощности излучения, перекачиваемого в сигнал на удвоенной частоте, составляет 11.5%.

Обсудим способ правильного выбора углового размера диффрагмы  $\Delta\Omega$  (рис.7) при угловом распределении

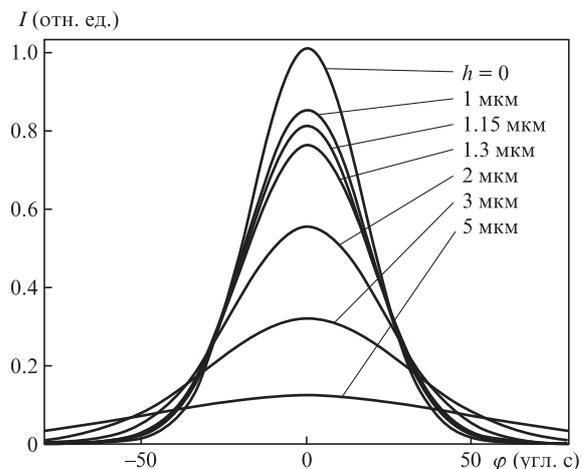


Рис.4. Угловое распределение нормированной интенсивности в фокальной плоскости коллиматора при различных амплитудах деформации гибкого зеркала  $h$ . Смещение фокальной плоскости составляет  $\sim 2.842$  мм при  $h = 1.0$  мкм,  $3.694$  мм при  $h = 1.3$  мкм и  $5.697$  мм при  $h = 2.0$  мкм.

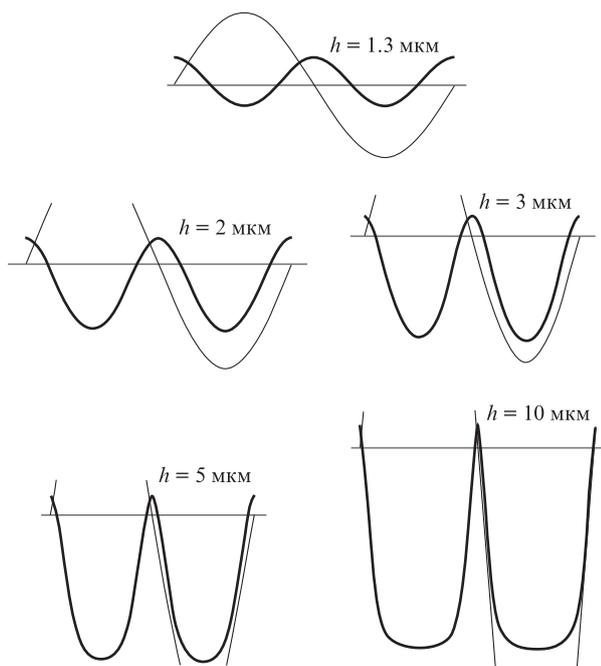


Рис.5. Формы сигнала на удвоенной частоте при различных амплитудах деформации гибкого зеркала  $h$  (жирные кривые) и формы исходного сигнала (тонкие кривые).

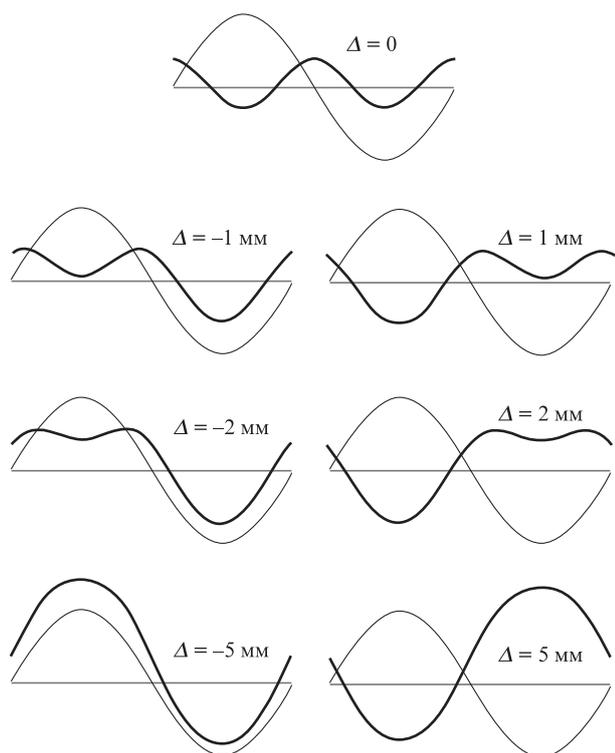


Рис.6. Формы и величины сигнала на удвоенной частоте при различных смещениях  $\Delta$  плоскости фокусировки от плоскости диафрагмы (жирные кривые) и формы исходного сигнала (тонкие кривые).

интенсивности  $I_1(\varphi)$ . При внесении сферической aberrации в волновой фронт получаемое угловое распределение  $I_2(\varphi)$  будет шире, а его амплитуда в центре – меньше (рис.7). Угловое расстояние между точками пересечения кривых  $I_1(\varphi)$  и  $I_2(\varphi)$  отделяет центральную угловую область исходного пучка, в которой происходит уменьшение мощности, от внешней, в которой, наоборот, проис-

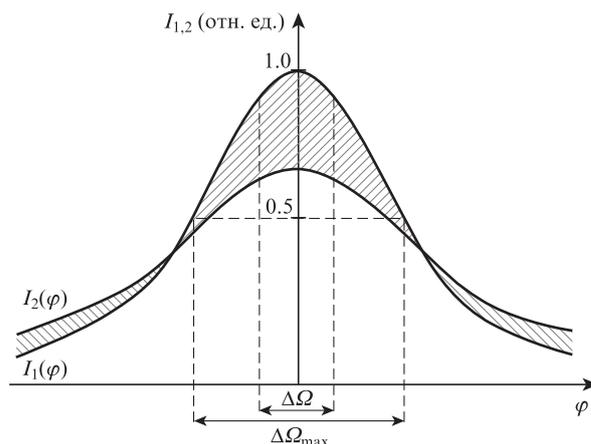


Рис.7. Точный выбор углового размера диафрагмы приемника  $\Delta\Omega$ . Величина  $\Delta\Omega_{\max}$  соответствует угловой ширине распределения  $I_1(\varphi)$  на половине высоты.

ходит эквивалентное увеличение мощности. Результаты моделирования показывают, что сигнал на удвоенной частоте максимален при снижении интенсивности на оси пучка до 0.8. При этом кривые  $I_1(\varphi)$  и  $I_2(\varphi)$  пересекаются на уровне 0.33 от исходного максимума  $I_1(0)$ . Угловое расстояние между точками пересечения в 1.3 раза больше углового расхождения. Однако максимальный угловой размер диафрагмы, обеспечивающий максимальную мощность, согласно математической модели должен быть равен угловой ширине исходной гауссоиды  $I_1(\varphi)$  на половине высоты, т.е. самой угловой расходимости излучения  $\varphi_0$ . В нашем случае ( $\varphi_0 = 40''$  (0.19 мрад) и  $f = 1600$  мм) расчетный диаметр диафрагмы  $d = f\varphi_0$ , в пределах которой генерируется сигнал на удвоенной частоте с максимальной мощностью, составляет  $\sim 0.3$  мм. Разность объемов (заштрихованная область на рис.7) между кривыми  $I_1(\varphi)$  и  $I_2(\varphi)$  с угловыми ширинами  $\varphi_0$  и  $\Delta\Omega_{\max}$  незначительна (0.8%), поэтому экспериментально обнаружить ее затруднительно.

### 3. Методика проведения экспериментальных исследований

Схема экспериментального стенда для определения погрешности нахождения положения перетяжки лазерного пучка приведена на рис.8. В качестве источника излучения используется He–Ne-лазер ГН-25, работающий в одномодовом режиме. Параметры излучения лазера были следующими: длина волны 0.63 мкм, диаметр выходного пучка 1.5 мм, мощность 25 мВт, расхождение пучка 1.2 мрад. Лазерный пучок, расширенный коллиматором до диаметра 120 мм, падает на управляемое деформируемое зеркало. Управление зеркалом осуществляется с персонального компьютера специальной программой. При подаче на все приводы одинаковых напряжений зеркало принимает сферическую форму. Программа работает в автоматическом частотном режиме. В данной работе используется частота сферической модуляции 1 Гц (эффект удвоенной частоты не зависит от частоты модуляции [3, 4]).

После отражения от деформируемого зеркала под углом менее  $10^\circ$  (деформация волнового фронта при этом вдвое больше), лазерный пучок отражается от плоского поворотного зеркала и проходит через формирующий телескоп. Затем, отражаясь от плоского эталонного зеркала диамет-

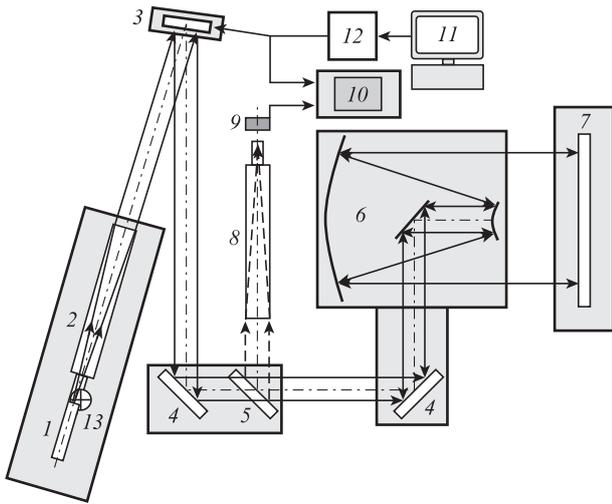


Рис.8. Схема стенда для определения погрешности нахождения положения перетяжки лазерного пучка методом удвоенной частоты сферического зондирования волнового фронта:  
 1 – He-Ne-лазер ( $\lambda = 0.63$  мкм,  $P_0 = 25$  мВт); 2 – коллиматор диаметром 150 мм; 3 – деформируемое биморфное зеркало; 4 – поворотный отражатель; 5 – плоскопараллельная пластинка; 6 – формирующий телескоп; 7 – плоское эталонное зеркало диаметром 1 м; 8 – приемный объектив (диаметр 150 мм,  $f = 1600$  мм); 9 – фотоприемник ФД-24К с диафрагмой диаметром 0.3 мм; 10 – двухлучевой осциллограф; 11 – ПК с программным обеспечением для управления деформируемым зеркалом; 12 – высоковольтный усилитель; 13 – модулятор ( $\nu_{mod} = 230$  Гц).

ром 1 м, излучение возвращается обратно в телескоп. Апертура пучка на выходе из формирующего телескопа составляет 0.7 м. Далее через плоскопараллельную пластинку пучок направляется приемным объективом с диаметром 150 мм и фокусным расстоянием 1600 мм на фотоприемник на основе фотодиода ФД-24К с диафрагмой диаметром 0.3 мм. Таким образом мы совместили передающую и приемную апертуры и с помощью плоского зеркала избежали необходимости проведения измерений в дальней зоне, что упростило эксперимент.

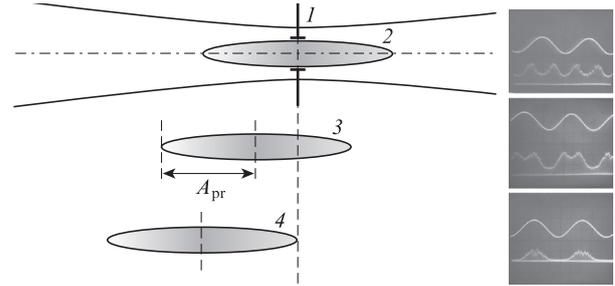


Рис.9. Средние положения перетяжек, в объеме которых может происходить удвоение частоты при амплитуде зондирования  $A_{pr}$ , равной половине длины перетяжки:  
 1 – плоскость диафрагмы (отражающая поверхность); 2 – симметричное относительно диафрагмы расположение перетяжки, в объеме которой генерируется максимальный сигнал на удвоенной частоте; 3 – смещение объема перетяжки, в котором генерируется сигнал на удвоенной частоте с искажениями; 4 – смещение объема перетяжки, в котором сигнал на удвоенной частоте не наблюдается; справа представлены картины, регистрируемые на экране осциллографа.

Фотоприемник подключен к одному из каналов двухканального осциллографа. Ко второму каналу осциллографа подключен сигнал управления зеркалом для его деформации по сфере. В результате на осциллографе одновременно можно наблюдать сигнал управления адаптивным зеркалом, т.е. сигнал сферической модуляции волнового фронта на частоте  $\nu$ , и сигнал с фотоприемника на частоте  $2\nu$  (рис.9 и 10).

Осевой размер объема, в котором генерируется сигнал на удвоенной частоте, измерялся при продольном смещении вторичного зеркала приемно-передающего телескопа до полного исчезновения сигнала на удвоенной частоте при различных амплитудах сферической модуляции волнового фронта, которым соответствовали амплитуды деформации зеркала  $h = 1.1, 1.7, 2.3$  и 3 мкм. При этом на осциллографе одновременно контролировались амплитуды и формы синусоидального сигнала на удвоенной частоте и сигнала сферической модуляции (рис.10).

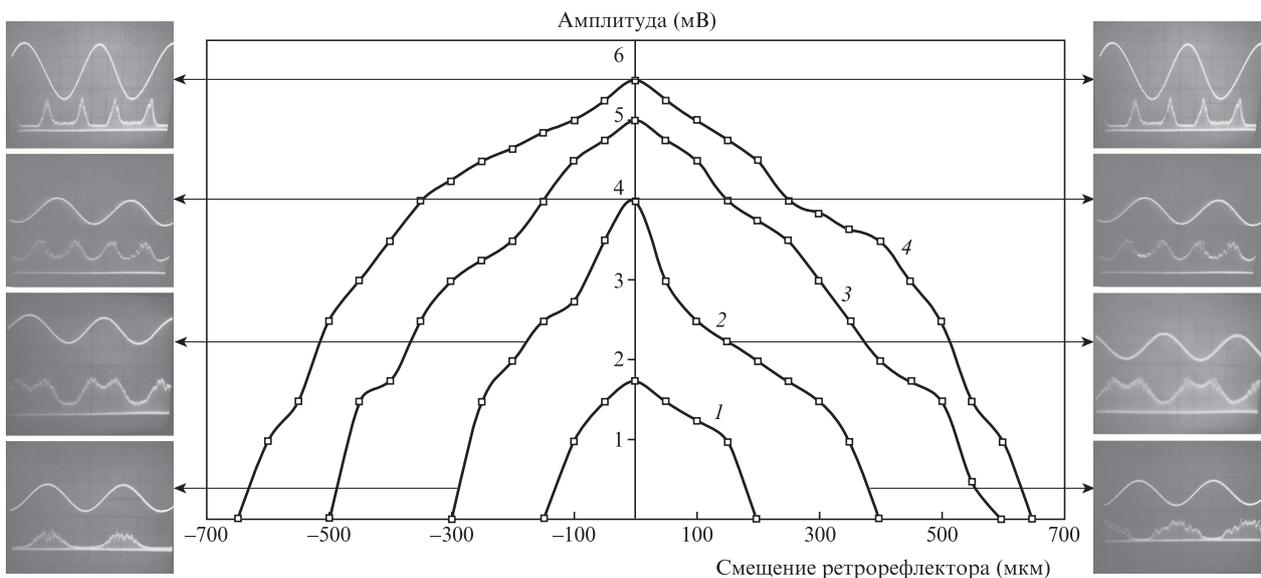


Рис.10. Зависимости амплитуды сигнала на удвоенной частоте от смещения ретрорефлектора при амплитудах сферической модуляции  $h = 1.1$  (1), 1.7 (2), 2.3 (3) и 3 мкм (4), выходной апертуре пучка 0.7 м и диаметре диафрагмы фотоприемника 0.3 мм. По краям рисунка представлены картины, регистрируемые на экране осциллографа.

Шаг осевого смещения вторичного зеркала  $\Delta f = 50$  мкм, что означало изменение оптической силы на  $\Delta f/F^2 = 1.5 \times 10^{-5}$  дптр. Здесь  $F$  – фокусное расстояние главного зеркала приемно-передающего телескопа.

Для определения поперечного сечения объема, в котором генерируется сигнал на удвоенной частоте, применялся набор калиброванных диафрагм размером 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 и 0.5 мм, размещаемых в фокальной плоскости коллиматора. Диафрагма диаметром 0.3 мм (40") являлась оптимальной и соответствовала рассмотренной математической модели.

В оптическую схему включен модулятор (прерыватель пучка), что позволяет одновременно регистрировать постоянную и переменную составляющие принимаемого фотоприемником сигнала для оценки мощности излучения, перекачиваемого в сигнал на удвоенной частоте, при этом снижается погрешность, обусловленная постоянной составляющей шума. Частота 100%-ной модуляции мощности излучения составляла 230 Гц.

Для определения доли мощности излучения, перекачиваемого в сигнал на удвоенной частоте, регистрировались постоянная составляющая сигнала (при 100%-ной модуляции), пришедшего на фотоприемник без диафрагмы, и амплитуда переменной составляющей сигнала на удвоенной частоте при использовании оптимальной диафрагмы диаметром 0.3 мм (40").

#### 4. Результаты экспериментальных исследований области возникновения сигнала на удвоенной частоте

Устойчивый неискаженный сигнал на удвоенной частоте наблюдается в ограниченных диапазонах линейных осевых смещений ретрорефлектора, амплитуд деформации зеркала и размеров диафрагм. Ограниченность объема, в котором возникает сигнал на удвоенной частоте, обуславливает высокую точность метода.

Для появления сигнала на удвоенной частоте необходимо, чтобы объем перетяжки обязательно пересекал плоскость диафрагмы (рис.9, позиции 2 и 3). Наибольший сигнал на удвоенной частоте и отсутствие нелинейных искажений имеют место при совпадении центра перетяжки с плоскостью диафрагмы (рис.9, позиция 2). При этом достигается максимальный коэффициент преобразования мощности излучения в сигнал на удвоенной частоте (рис.10, кривая 2). Максимальный сигнал получен при диаметре диафрагмы 0.3 мм, что соответствует угловой расходимости пучка. При амплитуде сферического зондирования зеркала 1.7 мкм смещение плоскости фокусировки составляло 3.2 мм, что практически совпадало с результатами математического моделирования.

В случае больших амплитуд сферической модуляции волнового фронта (рис.10, кривые 3, 4) амплитуда сигнала на удвоенной частоте велика, но значительны и нелинейные искажения (см. также рис.5).

Максимум кривой 2 на рис.10, соответствующий неискаженному сигналу на удвоенной частоте, получен при соблюдении трех условий:

- середина перетяжки совмещена с плоскостью диафрагмы;
- диаметр диафрагмы  $d \approx f\varphi_0$ ;
- амплитуда смещения перетяжки относительно плоскости диафрагмы при сферической модуляции волнового фронта равна половине длины перетяжки.

#### 5. Результаты исследования погрешности метода

На рис.10 приведены результаты регистрации амплитуды сигнала на удвоенной частоте для оптимальной диафрагмы диаметром 0.3 мм при изменении амплитуды сферической модуляции деформируемым зеркалом и при смещении ретрорефлектора формирующего телескопа, приводящем к смещению области фокусировки. Кривые охватывают всю длину перетяжки до полного исчезновения сигнала на удвоенной частоте на обоих краях перетяжки. Две верхние кривые получены при нелинейных искажениях синусоиды с удвоенной частотой. Тем не менее амплитуда сигнала еще возрастает, а центр этих кривых достаточно хорошо совпадает с центрами кривых без искажений.

Из рис.10 видно, что максимумы всех кривых определяются с точностью, большей, чем один шаг смещения ретрорефлектора (50 мкм), соответствующий дискретному изменению оптической силы на  $1.5 \times 10^{-5}$  дптр. Таким образом, при любых амплитудах сферической модуляции волнового фронта, даже в случае нелинейных искажений, погрешность метода составляет менее  $10^{-5}$  дптр.

#### 6. Исследование амплитуды сигнала управления на удвоенной частоте

Для оценки доли мощности излучения, перекачиваемого в сигнал на удвоенной частоте, нами были выбраны диаметр диафрагмы 0.3 мм, амплитуда сферического зондирования деформируемого зеркала 1.7 мкм и среднее положение перетяжки, совпадающее с плоскостью диафрагмы. Эти условия соответствуют полному использованию объема перетяжки, в котором появляется сигнал на удвоенной частоте, что обеспечивает максимальную амплитуду такого сигнала без его нелинейного искажения.

Относительная доля мощности излучения, перекачиваемого в сигнал на удвоенной частоте, определялась путем измерений полной мощности и амплитуды сигнала на удвоенной частоте. Сначала непрерывный пучок He-Не лазера напрямую направлялся на фотоприемник, а его мощность модулировалась обтюратором на частоте 230 Гц

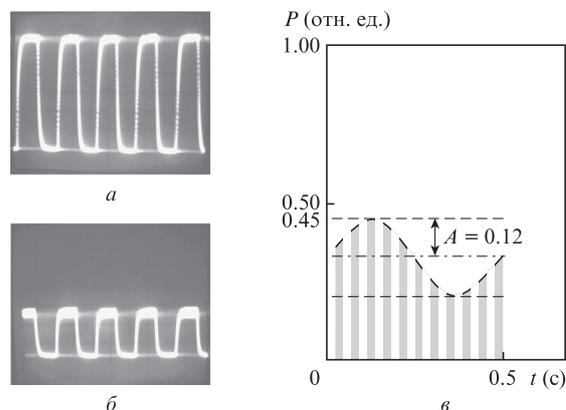


Рис.11. Способ определения относительной доли мощности излучения, перекачиваемого в сигнал на удвоенной частоте, по осциллограммам, соответствующим прерыванию пучка на частоте 230 Гц при использовании фотоприемника без диафрагмы (а), с диафрагмой диаметром 0.3 мм (б) и с той же диафрагмой при модуляции сигнала на удвоенной частоте (в);  $A$  – амплитуда сигнала на удвоенной частоте.

(рис.11,*а*). Затем перед тем же приемником устанавливалась диафрагма диаметром 0.3 мм (рис.11,*б*). Далее включалось деформируемое зеркало с амплитудой сферической деформации (1.7 мкм), обеспечивающей максимум амплитуды сигнала на удвоенной частоте (рис.11,*в*).

Из осциллограмм, приведенных на рис.11, видно, что амплитуда сигнала на удвоенной частоте составляет 12%.

## 7. Заключение

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Метод удвоенной частоты имеет высокую пространственную чувствительность, т. к. сигнал на удвоенной частоте появляется в ограниченном объеме, прилегающем к плоскости перетяжки пучка.

2. Метод удвоенной частоты обладает высокой точностью определения положения плоскости фокусировки. Для

апертуры пучка 0.7 м и угловой расходимости излучения 3.8" погрешность метода составила менее  $10^{-5}$  дптр.

3. Мощность излучения, перекачанного в сигнал на удвоенной частоте, не зависит от частоты модуляции.

4. При апертуре 0.7 м и угловой расходимости излучения 3.8" экспериментально определено, что максимальная амплитуда сигнала управления фокусировкой на удвоенной частоте пропорциональна 12% от общей мощности излучения.

1. *Адаптивная оптика*. Под ред. Э.А.Витриченко (М.: Мир, 1980).
2. Fried D.L. et al. *J. Opt. Soc. Am.*, **67**, 422 (1977).
3. Клейменов А.Н., Кочегаров Ю.М., Малашко Я.И., Хабибулин В.М. В сб.: *Проблемы создания лазерных систем* (Радужный, 2008).
4. Клейменов А.Н., Малашко Я.И., Потемкин И.Б. *Научно-технические проблемы*, **12**, 85 (2011).
5. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики* (М.: Наука, 1973).