

# Линейное сопряженное фазирование независимых одномодовых излучателей

Н.А.Грязнов, В.М.Киселев

*Проанализированы проблемы построения лазерных систем, базирующихся на методах линейной адаптивной оптики и предназначенных для передачи энергии на космические расстояния. Предложены новые подходы к организации линейного фазового сопряжения выходного излучения с сигнальным. При определенном соотношении частот сигнального ( $\omega_b$ ), гетеродинного ( $\omega_h$ ) и силового ( $\omega_p$ ) излучений ( $\omega_b > \omega_h > \omega_p$  или  $\omega_b < \omega_h < \omega_p$ ) контур фазового сопряжения одновременно может играть роль прецизионного контура частотного согласования. Данное обстоятельство позволяет фазировать, в том числе и в дальней зоне, независимые одномодовые лазерные излучатели, реализовывать модульный принцип построения системы и формировать волновой фронт излучения большого поперечного сечения.*

**Ключевые слова:** одномодовый лазер, фазирование, адаптивная оптика, фазовое сопряжение, гетеродин, привязка частоты излучения, фазовый модулятор.

## Введение

Ключевой научной проблемой проекта лунного энергетического парка (ЛЭП), предложенного японскими учеными [1] и нацеленного на освоение природных ресурсов Луны для решения проблем глобального энергетического кризиса, является доставка энергии на Землю. В рамках выдвинутой концепции рассматривается транспортировка энергии при помощи лазерного излучения [2]. Для передачи излучения на приемную станцию, расположенную в определенной точке земной поверхности, предполагается использовать поворотное зеркало, размещенное на геостационарной экваториальной орбите (рис.1). Принимая во внимание сложности формирования плоского волнового фронта большого поперечного сечения, габариты зеркала не должны существенно отличаться от габаритов лунного излучателя.

С учетом требования высокой эффективности доставки излучения последнее обстоятельство определяет характерные размеры апертуры лунного излучателя при работе на заданной длине волны излучения. Требование высокой эффективности системы исключает из рассмотрения лазерные среды, не обладающие таковой при генерации мощного непрерывного излучения. В проекте ЛЭП предполагается использовать лазерную систему с активной средой на углекислом газе. В последнее время стремительно развиваются твердотельные лазеры с одной накачкой. Лазеры этого типа обладают очень высокой эффективностью преобразования электрической энергии в оптическую, но опыт их создания пока еще недостаточен. Тем не менее, учитывая перспективность подобных лазеров и их малую длину волны, нецелесообразно исключать их из рассмотрения.

В зависимости от допустимых потерь диаметр лунного излучателя должен составлять от 30 до 60 м для

излучения с длиной волны 1.06 мкм и от 90 до 180 м для излучения с длиной волны 10.6 мкм. Сравнимые габариты должны иметь и орбитальное поворотное зеркало. Предполагается, что на второй, демонстрационной стадии проекта мощность лунного излучателя составит 10 МВт. Дальнейшие планы разработчиков связаны как с экстенсивным, так и с интенсивным (до 10–30 ГВт на один излучатель) развитием системы.

По нашему мнению, одним из наиболее надежных методов, обеспечивающим работоспособность системы транспортировки излучения в космическом пространстве, является фазирование независимых одномодовых излучателей. До сих пор этот метод в оптическом диапазоне не нашел серьезного практического применения из-за своей высокой технической сложности, а следовательно, нецелесообразности использования в системах малого и среднего поперечного сечения. Цель настоящей работы – доказательство возможности фазирования независимых излучателей при обеспечении определенных параметров системы.

## 1. Достоинства методов линейной адаптивной оптики

В работе [2] анализируется возможность формирования волновых фронтов большого поперечного сечения по сигналу лазерного маяка с использованием методов нелинейно-оптического фазового сопряжения. Рассмотрены два типа систем, первая из которых предполагает ис-

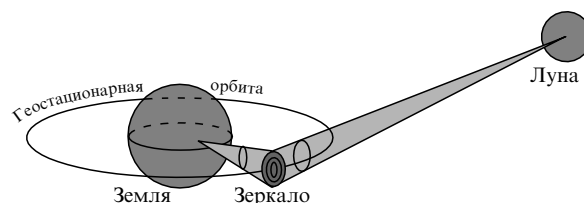


Рис.1. Схема транспортировки энергии излучением с Луны на Землю через зеркало, расположенное на геостационарной экваториальной орбите.

пользование телескопа с дифракционной структурой на главном зеркале [3] и алгоритма записи – считывание [4].

Другой тип формирования волнового фронта большого поперечного сечения базируется непосредственно на ОВФ [5] излучения маяка. Ключевой проблемой при реализации обеих рассмотренных схем является создание ОВФ-зеркала, способного одновременно и когерентным образом обращать излучение всех усилительных модулей. В настоящее время реализация фазового сопряжения непрерывного излучения нелинейно-оптическими методами является сложной задачей с незначительным опытом экспериментальной реализации. Волновой фронт сравнительно большого поперечного сечения может быть сформирован, в частности, и за счет пассивной фазовой синхронизации двумерной матрицы излучателей [6], однако разумный предел диаметра апертуры подобных систем едва ли заметно превышает 1 м. Как следствие, применение схем фазирования на основе линейной адаптивной оптики является едва ли не единственным подходом при использовании непрерывных лазеров ИК диапазона.

Особенность линейных средств адаптивной оптики [7] заключается в разделении процессов анализа и коррекции пространственного распределения фазы излучения. Это разделение является главным недостатком и одновременно главным достоинством линейных методов адаптивной оптики по сравнению с нелинейными. Оно определяет значительную техническую сложность аппаратуры, а также высокие требования к точности юстировки оптической схемы, к спектральным параметрам излучателей и к временным характеристикам корректоров. С другой стороны, применение линейных адаптивных средств обладает целым рядом достоинств.

Во-первых, такое разделение процессов позволяет простейшим образом вносить любые поправки на этапе формирования сигналов управления корректорами. В частности, при передаче излучения на удаленный движущийся объект введение углового упреждения дает возможность поместить лазерный маяк прямо на объекте. Во-вторых, процедура фазового сопряжения предполагает наличие идеального опорного волнового фронта. Разделение анализа и коррекции определяет независимость мощности выходного излучения от опорного сигнала, что позволяет обеспечить фазовое сопряжение излучения высокой мощности по опорному сигналу в сотни милливатт. Чем меньше интенсивность излучения, тем проще обеспечить идеальность его фазовой поверхности.

В-третьих, благодаря независимости мощности выходного излучения от амплитуды сигнальной волны линейные адаптивные системы предъявляют низкие требования к интенсивности последней. Как следствие, в этих системах легко решается проблема подавления суперлюминесценции, актуальность которой в нелинейно обрабатываемых схемах стремительно возрастает с уменьшением входного сигнала и увеличением выходного. В-четвертых, использование линейной адаптации оставляет большую свободу действий при разработке оптической схемы системы передачи излучения. Разнообразие методов анализа и коррекции дает возможность разделять задачи компенсации искажений различной физической природы, придавать системе модульный характер и выбирать габариты модулей с точки зрения технической целесообразности.

## 2. Преимущества системы независимых излучателей

При создании линейных адаптивных систем [7, 8] для излучателей высокой мощности возникает проблема динамического диапазона корректоров. Предельные частотные характеристики механического фазового корректора (использующего смещение зеркала при помощи пьезодвигателей) обратно пропорциональны его массе и, следовательно, габаритам. Необходимое для снижения времени отклика уменьшение размеров приводит к возрастанию лучевой нагрузки на его оптических элементах.

Размещение фазовых корректоров на входе оптических усилителей в области низкой плотности мощности имеет свои ограничения. Для гарантированной компенсации возмущений волновой фронт силового излучения необходимо анализировать в той же плоскости, что и фронт сигнальной волны. Чтобы снизить фоновые шумы, фазу последней следует анализировать на выходе усилителей мощности. Для обеспечения высокой скорости коррекции связь между фазами излучения в плоскости коррекции и в плоскости анализа скорректированного излучения должна быть однозначной.

Данное условие проще всего обеспечить при гетеродинном приеме излучения и разделении каналов усиления [9], когда одной точке измерения соответствует один канал усиления. В этом случае матрица преобразования сигналов датчиков фазы в сигналы управления корректорами является диагональной. Данный метод использует поршневую коррекцию возмущений, при которой не компенсируются локальные углы наклона волнового фронта. Малость остаточных возмущений обеспечивается выбором шага коррекции (т. е. габаритов корректора). Гетеродинный прием обеспечивает высокую точность измерения фазы даже в условиях очень низкой мощности сигнальной волны [10].

При большом числе каналов усиления возникает серьезная техническая проблема организации разводки излучения задающего генератора по каналам. На входе всех каналов излучение задающего генератора должно иметь идентичные параметры: мощность, сечение и угловой спектр. С другой стороны, операция фазового сопряжения предполагает, что излучение задающего генератора в любом случае имеет одномодовый одночастотный характер. Это означает, что у нас есть возможность отказаться от единого задающего генератора и построить линейную адаптивную систему на базе излучателей с независимыми задающими генераторами. Фазирование независимых излучателей за счет привязки к излучению гетеродина исследовалось не только аналитически (например, в [11]), но и экспериментально [12].

Ключевой проблемой при таком подходе является выравнивание частот излучения задающих генераторов. Грубое выравнивание частот может быть обеспечено при помощи внутриврезонаторных частотных модуляторов по измерению частоты и фазы биений излучения лазеров с излучением опорного источника, роль которого в данном случае играет гетеродин. Остаточную разность частот можно рассматривать как переменный фазовый набег, линейно меняющийся во времени. Фазовый модулятор, время отклика которого позволяет скомпенсировать этот набег настолько быстро, что остаточная погрешность при этом не превышает максимально допустимую погрешность фазирования, функционально экви-

валентен прецизионному контуру выравнивания частот.

Особенности гетеродинного фазового детектирования [13, 14] позволяют организовать работу адаптивного контура так, чтобы фазовый модулятор выполнял одновременно две функции: выравнивал частоты излучателей и обращал их фазы по отношению к фазовому распределению сигнала маяка. При гетеродинном фазовом детектировании разность фаз сигнального и гетеродинного излучений измеряется на разностной частоте. Если разность частот силового и гетеродинного излучений отличается по знаку от разности частот сигнального и гетеродинного излучений, процедура фазового сопряжения компенсирует заодно и фазовое возмущение, обусловленное частотным рассогласованием. Доказательство выравнивания частот излучателей при разных знаках разности частот силового и сигнального излучений по отношению к гетеродинному приведено ниже.

Предложенная процедура как бы совмещает в себе две: фазирование независимых излучателей с частотным выравниванием и фазовое сопряжение силового излучения с сигнальным. В связи с этим систему, использующую подобный подход, резонно назвать системой сопряженного фазирования независимых излучателей. Подобный подход имеет преимущество перед традиционными методами линейной адаптивной оптики: в оптической схеме установки отсутствует сложная в юстировке и неудобная в эксплуатации система разводки излучения задающего генератора по каналам. Задача же частотного согласования каналов возложена на схему фазового сопряжения, неизбежно присутствующую во всех адаптивных системах с большим временем распространения излучения от плоскости коррекции до плоскости фазирования и обратно. Это преимущество особенно ощутимо в мощных системах большого поперечного сечения.

### 3. Организация опорного волнового фронта в системе сопряженного фазирования

При заданной выходной апертуре не менее актуальна проблема формирования опорного волнового фронта, относительно которого измеряются фазовые распределения сигнального и силового излучений. Для решения проблемы рассмотрим процедуру гетеродинного фазового детектирования, в которой измеряется разность фаз анализируемого и гетеродинного излучений. С ее помощью в плоскости анализа мы можем измерить две разности фаз:  $\varphi_1 = \varphi_b - \varphi_h$  и  $\varphi_2 = \varphi_p - \varphi_h$ , где  $\varphi_b$ ,  $\varphi_p$  и  $\varphi_h$  – фазы сигнального, силового и гетеродинного излучений соответственно. Управляя фазой силового излучения так, чтобы обнулить сумму разностей фаз, мы получим выражение для фазы силового излучения:  $\varphi_p = -\varphi_b - 2\varphi_h$ . При подобном алгоритме в процедуре фазового сопряжения удвоенная фаза гетеродина остается некомпенсированной.

При малом поперечном сечении анализируемого пучка его излучение, как правило, сбивается с плоским волновым фронтом излучения гетеродина на плоской поверхности оптического элемента, что обеспечивает равенство некомпенсированного члена во всех ее точках. В рассматриваемом случае проблемы, обусловленные большими габаритами выходной апертуры, усугубляются проблемами, связанными с тепловыми деформациями поверхности, играющей роль плоскости анализа, из-за высокой интенсивности падающего на нее излучения.

Предлагаются два подхода к решению указанной проблемы. Первый заключается в разделении единой поверхности анализа на совокупность плоскостей, на каждой из которых фазовые распределения анализируются относительно фазы излучения локального гетеродина. При таком подходе целесообразно ввести понятие модуля, который содержит один гетеродин, одну плоскость анализа, один выходной расширитель пучка и матрицу лазерных блоков. Локальные гетеродины всех модулей по частоте и фазе привязываются к единому реперному гетеродину с помощью алгоритма, описанного ниже.

Второй подход используется при внутримодульном сопряженном фазировании излучателей и заключается в измерении удвоенной фазы излучения гетеродина в плоскости анализа с последующим учетом ее в алгоритме фазового сопряжения. Измерение фазы гетеродина в плоскости анализа осуществляется следующим образом. Маломощное излучение гетеродина фильтруется и коллимируется в относительно небольшое поперечное сечение. Это излучение является опорным и его волновой фронт формируется плоским с погрешностью, не превышающей максимально допустимую погрешность фазирования. Оно проходит расширитель пучка и падает нормально на плоскость анализа. После отражения от плоскости анализа излучение проходит расширитель пучка в обратном направлении и поступает на гетеродинный анализатор волнового фронта.

На анализаторе оно сбивается со вспомогательным излучением, имеющим плоский волновой фронт и смещенную частоту. В результате мы получаем информацию об удвоенной фазе излучения гетеродина в плоскости анализа вследствие двойного прохода (туда и обратно) излучения от анализатора до плоскости анализа. Для простоты построения соответствующих распределений все матрицы датчиков располагаются так, что оптическая ось излучения одного лазера попадает на центры площадок приемников данного излучателя. В этом случае учет удвоенной фазы гетеродина в плоскости анализа сводится к простому сложению фаз, измеренных соответствующими датчиками.

### 4. Сопряженное фазирование в системе с единым телескопом

Общий принцип работы системы сопряженного фазирования легче всего пояснить на примере системы с одним гетеродином и единой плоскостью анализа фазовых распределений. На рис.2 приведен возможный вариант построения системы сопряженного фазирования. Излучение лазерных блоков с помощью выходных телескопов излучателей и общего выпуклого вспомогательного зеркала преобразуется в плоскую волну меньшего сечения, падающую на плоскую пластину. На рабочей поверхности пластины сформирована дифракционная фазовая решетка, поверх которой нанесено высокоотражающее интерференционное покрытие. Данная поверхность играет роль плоскости, в которой происходит анализ пространственного распределения фазы как силового излучения, так и излучения маяка. С этой целью на нее со стороны пластины падает излучение гетеродинного лазера.

Углы падения лучей и шаг дифракционной фазовой решетки выбраны таким образом, чтобы ось излучения гетеродинного лазера при отражении в первый порядок решетки совпала с осью излучения маяка, а при отра-

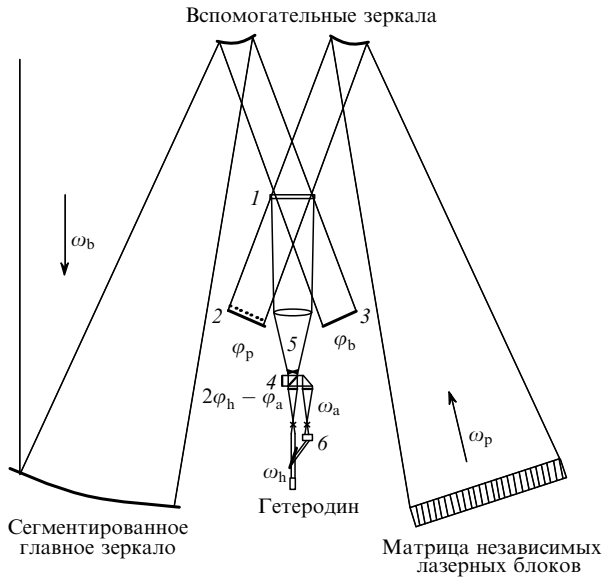


Рис.2. Система сопряженного фазирования независимых лазерных излучателей по схеме с единой плоскостью анализа: 1 – прозрачная пластина с фазовой решеткой и высокоотражающим интерференционным покрытием (плоскость анализа); 2–4 – датчики фазовых распределений силового, сигнального и гетеродинного излучений соответственно; 5 – расширитель гетеродинного пучка; 6 – акустооптический модулятор ( $\varphi_a$ ,  $\omega_a$  – фаза и частота вспомогательного излучения).

жении в минус первый порядок – с осью излучения лазерных блоков. Тогда при отражении в нулевой порядок излучение гетеродина распространяется строго назад. Матрица датчиков в первом порядке дифракционной решетки измеряет разность фаз между сигнальной волной маяка и опорной волной гетеродина. Матрица в другом первом (минус первом) порядке измеряет фазы излучателей по отношению к фазе гетеродина. Ослабление интенсивности излучения в данном канале достигается при помощи маски, диафрагм и фильтров.

Для контроля распределения фазы гетеродина в плоскости анализа его отраженное назад излучение сбивается со вспомогательным излучением и подается на третью матрицу датчиков. Она измеряет фазовое распределение, соответствующее распределению удвоенной фазы гетеродина в рабочей плоскости, поскольку на входе системы контроля опорного волнового фронта оба сбиваемых фронта являются плоскими. Это обеспечивается при помощи угловых селекторов и оптических элементов с малыми aberrациями. Для формирования волнового фронта вспомогательного излучения часть излучения гетеродина подается на акустооптический модулятор, создающий необходимое частотное смещение.

Вариант оптической схемы лазерного блока представлен на рис.3. Излучение задающего генератора, содержащего частотный модулятор и селектор мод, поступает на усилитель мощности через фазовый модулятор. Для сохранения качества пучка целесообразно использовать щелевой [15] усилитель мощности с геометрическим расширителем пучка (в случае твердотельной активной среды – слэб-усилитель [16]). Усилитель указанного типа позволяет простейшим образом обеспечить накачку активной среды и, самое главное, эффективный теплоотвод для обоих рассматриваемых типов лазеров.

Частота гетеродинного лазера привязывается к частоте излучения маяка так, что разность частот попадает в

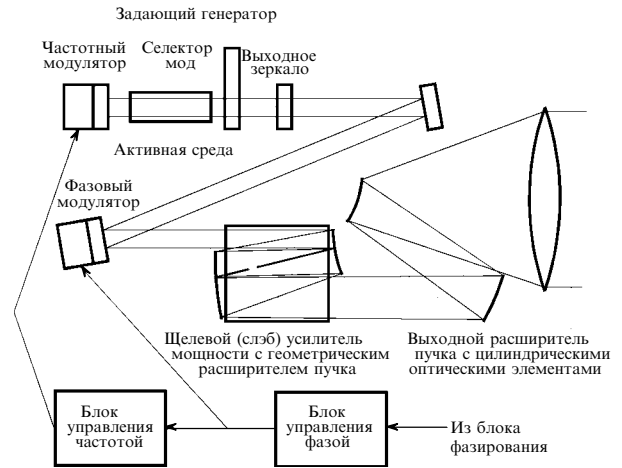


Рис.3. Оптическая схема лазерного блока.

рабочую полосу приемной системы. Частота излучения каждого лазерного блока, в свою очередь, привязывается к частоте излучения гетеродинного лазера. Динамический диапазон фазового модулятора обеспечивается при помощи блока управления частотой задающего генератора (см. рис.3), который меняет ее таким образом, чтобы вернуть сигнал, подаваемый на фазовый модулятор, в центр диапазона модулятора.

### 5. Алгоритм внутримодульного частотно-фазового согласования

Для выявления принципов сопряженного фазирования рассмотрим сигналы, наблюдаемые в плоскости анализа фазовых распределений. На матрице приемников, расположенной в первом порядке фазовой решетки рабочей пластины, поле излучения маяка  $A_b \cos(\omega_b t + \varphi_b)$  сбивается с полем излучения гетеродина  $A_h \cos(\omega_h t + \varphi_h + \varphi_g)$ . Здесь  $\varphi_g$  – случайная фаза решетки, которая прибавляется к фазе гетеродина  $\varphi_h$  при отражении его излучения в первый порядок решетки. При этом сигнал биений имеет следующий вид:

$$A_1 = 2A_b A_h \cos [(\omega_b - \omega_h)t + \varphi_b - \varphi_h - \varphi_g]. \quad (1)$$

При отражении в минус первый порядок случайный фазовый сдвиг таков же, но отличается знаком. Тогда на второй матрице поле излучения силового лазера  $A_p \cos(\omega_p t + \varphi_p)$  сбивается с полем излучения гетеродина  $A_h \cos(\omega_h t + \varphi_h - \varphi_g)$ :

$$A_2 = 2A_p A_h \cos [(\omega_h - \omega_p)t + \varphi_h - \varphi_p - \varphi_g]. \quad (2)$$

Как будет показано ниже, процедура фазового сопряжения обеспечивает взаимное сокращение случайных фазовых сдвигов на решетке при дифрагировании гетеродинного излучения в противоположные по знаку порядки фазовой решетки. Для того чтобы процедура фазового сопряжения одновременно обеспечивала и точное выравнивание частот лазеров, частота излучения гетеродина располагается между частотами излучения маяка и силовых излучателей, например  $\omega_b > \omega_h > \omega_p$ . Это определяет знаки при соответствующих фазовых слагаемых.

Реально сигналы, определяемые формулами (1) и (2), наблюдаются на выходе соответствующих узкополос-

ных усилителей. Для измерений фаз полученные сигналы сравниваются с опорными радиочастотными колебаниями  $A_{rb}\cos(\omega_{rb}t + \varphi_{rb})$  и  $A_{rp}\cos(\omega_{rp}t + \varphi_{rp})$  при помощи балансных модуляторов и квадратурного фазового детектирования. Контуров стартовой привязки частот в локальном гетеродине и лазерном блоке должны обеспечить следующие условия привязки:  $(\omega_b - \omega_h - \omega_{rb})\tau_a < \Delta\varphi$  и  $(\omega_h - \omega_p - \omega_{rp})\tau_a < \Delta\varphi$ , где  $\Delta\varphi$  – погрешность определения фазы;  $\tau_a$  – время анализа фазы. Различие радиочастот  $\omega_{rb}$  и  $\omega_{rp}$  необходимо для того, чтобы выделить слабый сигнал маяка на фоне мощной непрерывной засветки приемников излучением силовых лазеров.

Как понятно из описания оптической схемы системы, частота вспомогательного излучения жестко привязана к частоте гетеродина при помощи акустооптического модулятора. Для того чтобы избежать наводок от мощного излучения лазерных блоков, для квадратурного фазового детектирования используется третья частота биений (радиосигнал  $A_{rh}\cos(\omega_{rh}t + \varphi_{rh})$ ). При возбуждении акустической волны в модуляторе с помощью того же сигнала получается простое и не зависящее от времени выражение для фазы, измеряемой третьей матрицей гетеродинных датчиков:

$$\varphi_3 = 2\varphi_h + \varphi_c, \tag{3}$$

где  $\varphi_c$  – некая константа, единая для всех приемников матрицы.

В отличие от уравнения (3), выражения для разностей фаз, измеренных первой и второй матрицами, содержат зависящие от времени члены

$$\varphi_1 = (\omega_b - \omega_h - \omega_{rb})t + \varphi_b - \varphi_h - \varphi_{rb} - \varphi_g, \tag{4}$$

$$\varphi_2 = (\omega_h - \omega_p - \omega_{rp})t + \varphi_h - \varphi_p - \varphi_{rp} - \varphi_g.$$

С помощью фазового модулятора фаза излучения соответствующего лазерного излучателя  $\varphi_p$  изменяется таким образом, чтобы соблюдалось равенство

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \varphi_3. \tag{5}$$

Из уравнений (3)–(5) получим выражение для фазы управляемого лазерного блока:

$$\varphi_p = (2\omega_h - \omega_b - \omega_p + \omega_{rb} - \omega_{rp})t - \varphi_b - \varphi_c + \varphi_{rb} - \varphi_{rp}. \tag{6}$$

Подставим полученную фазу в выражение для поля излучения лазера

$$E_p = A_p \cos[(2\omega_h - \omega_b + \omega_{rb} - \omega_{rp})t - \varphi_b - \varphi_c + \varphi_{rb} - \varphi_{rp}]. \tag{7}$$

Из формулы (7) видно, что все лазерные блоки излучают на одной частоте  $2\omega_h - \omega_b + \omega_{rb} - \omega_{rp}$ , и фазовое распределение мощного излучения в плоскости анализа отличается от распределения фазы излучения маяка исключительно знаком. Постоянный фазовый сдвиг  $\varphi_{rb} - \varphi_{rp} - \varphi_c$ , одинаковый для всех излучателей, не играет никакой роли.

Уравнение (6) позволяет сформулировать условие эффективности работы фазовых модуляторов:

$$(2\omega_h - \omega_b - \omega_p + \omega_{rb} - \omega_{rp})\tau_c < \Delta\varphi,$$

где  $\tau_c$  – время коррекции фазы. Данное условие налагает требования на точность стартовой привязки частоты излучения гетеродина к частоте лазерного маяка и частоты излучения лазерного блока к частоте гетеродина, а также определяет чувствительность частотных модуляторов излучателей.

Все фазы сигналов определены в рабочей плоскости анализа. Несмотря на то что матрицы приемников находятся на некотором расстоянии от плоскости анализа, разницей фазовых набегов для близких частот можно пренебречь, если  $\Delta v l / c < \Delta\varphi$ , где  $c$  – скорость света;  $\Delta v$  – разность частот;  $l$  – расстояние, на котором определяется фазовый набег. Для расстояния в 10 м и погрешности определения фазы  $\pi/10$  разность частот не должна превышать 10 МГц.

### 6. Недостатки системы с единым выходным зеркалом и модульная концепция

Габариты главного зеркала выходного расширителя пучка в рассмотренной системе настолько велики, что это зеркало неминуемо должно быть секционированным. Однако даже в этом случае поворот выходного телескопа вместе со всеми вспомогательными элементами и корпусом, обеспечивающим как его жесткость, так и жесткость его связи с контррефлектором, представляет собой серьезную техническую проблему, не говоря уже о затратах энергии. Более того, выходной расширитель пучка лунного модуля принципиально не может быть укрыт от солнечного теплового воздействия, интенсивность которого при нормальном падении достигает  $1.3 \text{ кВт/м}^2$  [17]. Возникающие тепловые деформации имеют амплитуду, или стрелу прогиба, пропорциональную диаметру зер-

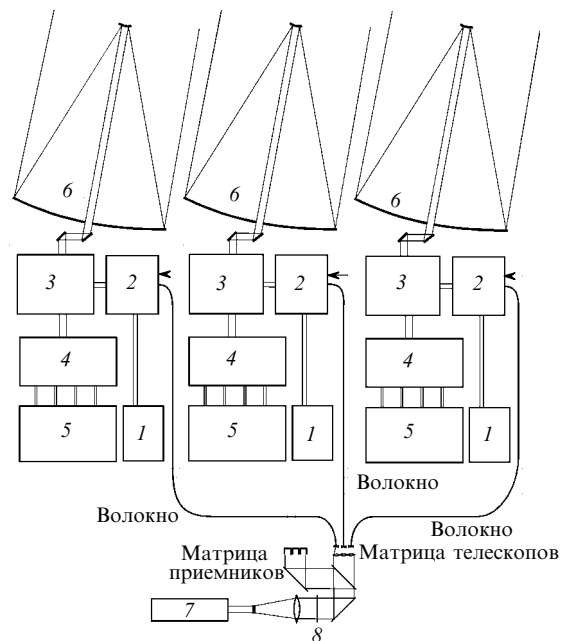


Рис.4. Взаимное расположение модулей (на примере трех соседних) и система фазирования локальных гетеродинов по излучению реперного гетеродина: 1 – локальный гетеродин модуля; 2 – система фазирования локального гетеродина модуля; 3 – система фазового сопряжения; 4 – система сведения лучей; 5 – матрица лазерных блоков; 6 – выходной телескоп; 7 – реперный гетеродин; 8 – плоскость анализа фазы реперного гетеродина.

кала, а следовательно, существует высокая вероятность того, что они выйдут за пределы рабочего диапазона рассматриваемых методов адаптивной оптики.

Решение этой проблемы заключается в отказе от единого выходного расширителя пучка и в переходе к модульной конструкции, каждый модуль которой имеет свой независимо поворачиваемый телескоп (рис.4). Подобное решение проблемы возможно благодаря относительно малому полю зрения системы, поскольку для ухода от взаимного виньетирования расширителя пучков модулей должны быть разнесены на расстояние порядка 1 % от их габаритов, что снижает эффективность доставки излучения не более чем на 2 %.

Главная особенность подобной системы с точки зрения процедуры фазирования заключается в том, что вместо единого гетеродина в ней используется матрица гетеродинов, привязываемых к общему реперному гетеродину по частоте и фазе. С одной стороны, подобная модернизация заметно усложняет конструкцию, но с другой она снимает требования к мощности гетеродина и позволяет повысить чувствительность фазовых детекторов сигнальной волны за счет увеличения мощности гетеродина на приемнике. Помимо этого она резко снижает оптическую мощность, поглощаемую в совокупности рабочих пластин.

Отличие данного алгоритма от метода, рассмотренного выше, заключается в том, что разность фаз между локальными гетеродинами не измеряется, а обнуляется. С этой целью излучение всех гетеродинов модулей поступает по оптическим одномодовым волокнам на систему сравнения с фазой реперного гетеродина, частота которого несколько сдвинута относительно частот гетеродинов модулей. Через ту же систему волокон излучение реперного гетеродина разводится по модулям.

Оптическая схема модуля приведена на рис.5. Каждый модуль состоит из выходного расширителя пучка, поперечные габариты которого равны поперечным габаритам модуля, матрицы лазерных блоков и системы сопряженного фазирования с локальным гетеродином. Помимо этого модуль включает в себя систему сведения лучей лазерных блоков, грубого наведения излучения модуля на объект, контроля волнового фронта излучения локального гетеродина и фазирования излучения последнего по излучению реперного гетеродина.

Система сведения лучей формирует единую выходную апертуру матрицы лазерных блоков и согласует ее со

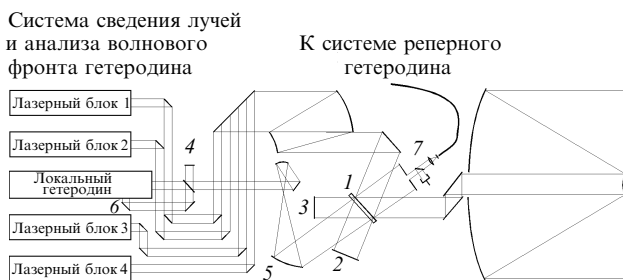


Рис.5. Оптическая схема модуля:

1 – плоскость анализа фазовых распределений в виде прозрачной пластины с фазовой решеткой и отражающим покрытием; 2 – 4 – датчики фазовых распределений силового, сигнального и гетеродинного излучений соответственно; 5 – расширитель гетеродинного пучка; 6 – акустооптический модулятор; 7 – система фазирования локального гетеродина.

входным зрачком выходного расширителя пучка. Объединенный волновой фронт излучения падает на пластину  $l$  с фазовой решеткой и отражающим покрытием, поверхность которой играет роль рабочей плоскости анализа. На ту же поверхность со стороны пластины падает излучение локального гетеродина, а со стороны отражающего покрытия – излучение реперного гетеродина из системы фазирования локального гетеродина 7. При используемом алгоритме учета фазового распределения гетеродина в плоскости анализа сильно смягчаются требования к плоскостности пластины, что особенно актуально в условиях высокой интенсивности излучения.

Взаимное расположение модулей (на примере трех соседних) и схема системы фазирования локальных гетеродинов по излучению реперного гетеродина приведены на рис.4. Фаза биений излучения локального гетеродина с излучением реперного гетеродина измеряется в рабочей плоскости анализа модуля и в плоскости анализа реперного гетеродина. Локальный гетеродин располагается в центре матрицы излучателей вместо лазерного блока, поле зрения которого соответствует центральному отверстию главного зеркала выходного расширителя пучка модуля. Для минимизации потерь габариты центрального отверстия должны совпадать с поперечными габаритами лазерного блока.

## 7. Алгоритм фазирования гетеродинов модулей по реперному гетеродину

Алгоритм фазирования модулей поясняется на рис.6. Внутримодульное фазирование лазерных блоков осуществляется по алгоритму, описанному выше. Из формулы (7) видно, что даже при равенстве частот локальных гетеродинов излучение лазерных блоков в плоскости анализа содержит случайную фазу  $\varphi_c$ , одинаковую для всех излучателей данного модуля. С целью исключения ее влияния перейдем к измерению относительной удвоенной фазы локального гетеродина. Для этого из распределения фазы, измеряемого третьей матрицей (см. уравнение (3)), вычтем фазу в центре рабочей пластины. В результате получим  $\varphi'_3 = 2\varphi_n - 2\varphi_{h0}$ . Подобная коррекция алгоритма приведет к тому, что в уравнении (7) член  $\varphi_c$  необходимо будет заменить членом  $-2\varphi_{h0}$ . В этом случае для фазирования модулей требуется сделать равными частоты всех локальных гетеродинов и их удвоенные фазы в центре плоскости анализа.

Предположим, что поле реперного гетеродина в опорной плоскости анализа А имеет вид  $E_{rh}\cos(\omega_{rh}t + \varphi_{rh})$ , а поле локального гетеродина в центре рабочей плоскости анализа модуля (плоскость В), где также возникают биения, имеет вид  $E_{loc}\cos(\omega_{loc}t + \varphi_{loc})$ . Пусть  $\omega_{rh} > \omega_{loc}$ , тог-

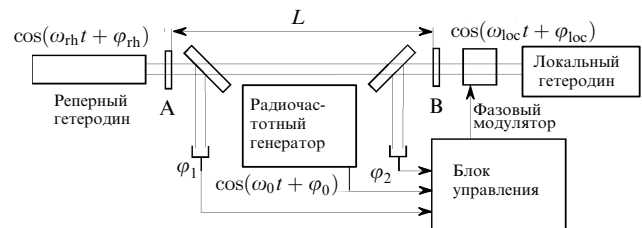


Рис.6. Схема, поясняющая алгоритм фазирования локального гетеродина по излучению реперного (А – опорная плоскость анализа, В – рабочая плоскость анализа).

да сигнал биений с фазой  $\varphi_1$  на первом приемнике (рис. 6) имеет вид  $E_1 = E_{10} \cos[(\omega_{\text{rh}} - \omega_{\text{loc}})t + \varphi_{\text{rh}} - \varphi_{\text{loc}} - k_{\text{loc}}L]$ , в то время как сигнал биений с фазой  $\varphi_2$  на втором приемнике –  $E_2 = E_{20} \cos[(\omega_{\text{rh}} - \omega_{\text{loc}})t + \varphi_{\text{rh}} - k_{\text{rh}}L - \varphi_{\text{loc}}]$ , где  $L$  – оптическая длина пути между плоскостями А и В, а  $k_{\text{rh}}, k_{\text{loc}}$  – соответствующие волновые векторы. При сравнении этих сигналов с опорным сигналом  $E_{\text{grh}} \cos(\omega_{\text{grh}}t + \varphi_{\text{grh}})$ , подаваемым на фазовые детекторы с общего для всех модулей генератора, на выходе детекторов будут получены следующие фазы:

$$\varphi_1 = (\omega_{\text{rh}} - \omega_{\text{loc}} - \omega_{\text{grh}})t + \varphi_{\text{rh}} - \varphi_{\text{loc}} - \varphi_{\text{grh}} - k_{\text{loc}}L, \quad (8)$$

$$\varphi_2 = (\omega_{\text{rh}} - \omega_{\text{loc}} - \omega_{\text{grh}})t + \varphi_{\text{rh}} - \varphi_{\text{loc}} - \varphi_{\text{grh}} - k_{\text{rh}}L.$$

С помощью фазового модулятора, управляющего фазой локального гетеродина в рабочей плоскости, фаза  $\varphi_1$  меняется таким образом, чтобы  $\varphi_1 + \varphi_2 = 0$  и остаточная погрешность не превышала максимально допустимой погрешности фазирования. В этом случае  $2\varphi_{\text{loc}} = 2(\omega_{\text{rh}} - \omega_{\text{loc}} - \omega_{\text{grh}})t + 2\varphi_{\text{rh}} + 2\pi n + (k_{\text{rh}} - k_{\text{loc}})L$ , где  $n$  – некоторое целое число. Если член  $(k_{\text{rh}} - k_{\text{loc}})L$  также не превышает максимально допустимой погрешности фазирования, то им можно пренебречь. Для расстояния 20 м и погрешности фазирования  $\pi/15$  разность частот гетеродинов не должна превышать 500 кГц. В этом случае  $\varphi_{\text{loc}} = (\omega_{\text{rh}} - \omega_{\text{loc}} - \omega_{\text{grh}})t + \varphi_{\text{rh}} + \pi n$  и сигнал локального гетеродина в рабочей плоскости анализа модуля В можно записать в следующем виде:

$$E_{\text{loc}} = E_{\text{loc0}} \cos[(\omega_{\text{rh}} - \omega_{\text{grh}})t + \varphi_{\text{rh}} - \varphi_{\text{grh}} + \pi n]. \quad (9)$$

Полученное выражение убедительно доказывает, что сигналы всех локальных гетеродинов в плоскостях анализа имеют одинаковую частоту  $\omega_{\text{rh}} - \omega_{\text{grh}}$  и одинаковую удвоенную фазу  $2\varphi_{\text{rh}} - 2\varphi_{\text{grh}}$ . При используемом алгоритме данное утверждение эквивалентно утверждению о сфазированности модулей.

## Заключение

Теоретический анализ алгоритма линейного сопряженного фазирования показал, что при определенном соотношении частот сигнального, гетеродинного и силового излучений этот алгоритм может быть использован для прецизионного выравнивания частот независимых излучателей. Необходимая точность предварительного (грубого) выравнивания частот определяется частотно-временными параметрами средств анализа и коррекции фазы. Использование алгоритма линейной частотно-фазо-

вой привязки излучения гетеродина к излучению опорного источника позволяет перейти от единой плоскости анализа к совокупности фазированных плоскостей и модульному принципу построения излучателя.

Работа выполнена при поддержке МНТЦ (грант № 929). Авторы считают необходимым выразить признательность А.А.Маку, И.М.Белоусовой, О.Б.Данилову, Е.Н.Соснову, В.В.Любимову, В.Е.Шерстобитову, В.И.Купренюку и Н.А.Романову за полезные дискуссии и интерес к работе.

1. Eguchi K., Niino M., Arashi H. et al. *WPT95 Conf.* (Kobe, Japan, 1995).
2. Мак А.А., Шерстобитов В.Е., Купренюк В.И. и др. *Оптич. ж.*, **65**, № 12, 52 (1998).
3. Васильев М.В., Венедиктов В.Ю., Лещев А.А. и др. *Изв.АН СССР. Сер. физич.*, **55**, 260 (1991).
4. Корнев А.Ф., Покровский В.П., Сомс Л.Н. и др. *Оптич. ж.*, № 1, 10 (1994).
5. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. *Обращение волнового фронта* (М., Наука, 1985).
6. CIS Selected Papers: High-power multibeam lasers and their phase locking. *Proc.SPIE*, **2109** (1993).
7. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. *Принципы адаптивной оптики* (М., Наука, 1985).
8. *Адаптивная оптика* (М., Мир, 1980).
9. Хейес К., Брэндви Р., Дэвис В. и др. В сб. *Адаптивная оптика* (М., Мир, 1980, с. 28).
10. Грязнов Н.А. *Оптич.ж.*, **65**, № 4, 32 (1998).
11. Wang C.P. *Appl.Optics*, **17**, 83 (1978).
12. Hayes G.L., Laughman L.M. *Appl.Optics*, **16**, 263 (1978).
13. Протопопов В.В., Устинов Н.Д. *Лазерное гетеродинирование* (М., Наука, 1985).
14. Белоусова И. М., Грязнов Н. А., Зюзин О. М. и др. *Квантовая электроника*, **16**, 1617 (1989).
15. Dutov A.I., Novoselov N.A., Kuleshov A.A. *Proc.SPIE*, **2788**, 103 (1996).
16. Kiriya H., Nishida K., Yamanaka M. et al. *Proc.SPIE*, **3264**, 30 (1998).
17. Макарова Е.А., Харитонов А.В. *Распределение энергии в спектре Солнца и солнечная постоянная* (М., Наука, 1972).

**N.A.Gryaznov, V.M.Kiselev. Linear conjugate phase-locking of independent single-mode emitters.**

The problems of the construction of laser systems based on the methods of linear adaptive optics and designed for energy transport over large distances in outer space are analysed. New approaches are proposed to the organisation of the linear phase conjugation of output and beacon-signal radiations. For definite ratios of the beacon-signal ( $\omega_b$ ), heterodyne ( $\omega_h$ ), and power ( $\omega_p$ ) radiations ( $\omega_b > \omega_h > \omega_p$  or  $\omega_b < \omega_h < \omega_p$ ), the phase conjugation loop may play simultaneously the role of a precision frequency matching loop. This feature permits the phase locking of independent single-mode laser emitters, including phase locking in the far-field zone, to achieve the modular principle of system design and to generate the wavefront of radiation with a large cross section.