

УДК 621.372.2 : 535 312

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕРКАЛЬНЫХ ПЕРИСКОПИЧЕСКИХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

А. А. Дяченко, О. Е. Шушпанов

Рассматриваются квазиоптические линии, корректоры которых состоят из перископической пары сферических зеркал. Вводимая в статью система мод астигматичной линии экспериментально проверена, т. е. наблюдалось устойчивое распространение отдельных типов колебаний. Определены разности фазовых скоростей нескольких мод. Экспериментально найдены дифракционные потери двух первых собственных волн системы.

### 1. ЗЕРКАЛЬНАЯ ПЕРИСКОПИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ

В работе [1] рассмотрена квазиоптическая линия передачи, фазовые корректоры которой представляют собой перископические пары сферических зеркал (рис. 1). Из-за наклонного падения волнового пучка на зеркала корректора последний является астигматичным, т. е. преобразует поле в двух взаимно перпендикулярных плоскостях по-разному:

$$u^+(x, y) = u^-(x, y) \exp \left\{ \frac{ik}{L} (v_x x^2 + v_y y^2) \right\}, \quad (1)$$

где  $u^+$  и  $u^-$  — поля на входе и выходе корректора,  $k$  — волновое число,  $v_x = 2L/R \sin \alpha$ ,  $v_y = 2L \sin \alpha/R$ ,  $L$  — расстояние между корректорами,  $R$  — радиус кривизны сферических зеркал,  $\alpha$  — угол скольжения пучка.

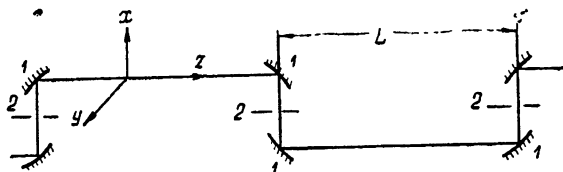


Рис. 1. Схема зеркальной перископической линии:  
1—сферические длиннофокусные зеркала, 2—диафрагмы.

Поля собственных волн такой линии являются решениями интегрального уравнения

$$\chi_n u_n(\xi, \eta) = \frac{ik}{2\pi L} e^{-ikL} \int_S u_n(x, y) \exp \left\{ -\frac{ik}{2L} [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2] \right\} \times \\ \times \exp \left\{ \frac{ik}{L} (v_x x^2 + v_y y^2) \right\} dx dy, \quad (2)$$

в котором  $S$  — апертура корректора в поперечном сечении пучка;  $\chi_n$  — комплексное число, модуль которого определяет дифракционные потери  $n$ -й собственной волны.

Если апертуры корректоров прямоугольные, то переменные в уравнении (2) разделяются. Свойства решений [2] соответствующих одномерных интегральных уравнений таковы, что при выполнении условия

$$v_x - 1 = 1 - v_y \quad (3)$$

дифракционные потери собственных волн рассматриваемой астигматичной и стигматичной линии, у которой  $v'_x = v_y$ , совпадают.

Можно предположить, что сформулированное утверждение справедливо и в случае корректоров, ограниченных круглыми апертурами. Тогда результаты вычислений дифракционных потерь мод, полученных на ЭВМ для резонаторов лазеров [3], будут применимы и к астигматичным линиям, для которых выполняется условие (3). Эксперимент показывает (см. ниже), что в пределах точности измерений это справедливо по крайней мере для двух первых мод.

Фазовые скорости собственных волн астигматичной и стигматичной линий различны. При достаточно больших значениях параметра  $S = ka^2/L$  ( $a$  — характерный размер апертуры корректора), когда форма ограничивающей диафрагмы корректора слабо сказывается на структуре поля, фазовые сдвиги различных мод относительно геометрического набега фазы выражаются формулой, которую легко получить из соответствующей формулы в [4]:

$$(m + n + 1) \frac{\pi}{2} - \frac{2m + 1}{2} \arcsin(1 - v_x) - \frac{2n + 1}{2} \arcsin(1 - v_y), \quad (4)$$

где  $m$  и  $n$  характеризуют изменение поля моды соответственно по осям  $OX$  и  $OY$ .

Рассмотрим структуру собственных волн астигматичной линии с круглыми апертурами. Для таких линий переменные в уравнении (2) не разделяются, и решений вида

$$u(r, \varphi) = R(r)\Phi(\varphi) \quad (5)$$

это уравнение не имеет. (Здесь  $r$  и  $\varphi$  — полярные координаты на эквивалентной апертуре корректора.) Поэтому структуры собственных волн астигматичных и стигматичных линий с круглыми апертурами корректоров различны.

Здесь уместно ввести обозначения мод зеркальной перископической линии. В обозначениях мод астигматичной линии удобно указывать форму апертур корректоров и систему координат, в которой производится классификация. Будем указывать форму апертур корректоров — круглую или прямоугольную — соответственно круглыми или квадратными скобками, а системы координат — буквами  $D$  (в случае декартовой системы координат) и  $P$  (в случае полярной системы координат). Таким образом, например, волна  $TEM_{mn}$  линзовой линии с круглыми апертурами корректоров обозначается  $P(m, n)$ , а волна  $TEM_{mn}$  линии с квадратными апертурами корректоров —  $D[m, n]$ .

На структуру мод зеркальной перископической линии большее влияние оказывает астигматизм, чем форма апертуры корректора. Действительно, рассмотрим, например, моду  $P(0, 1)$  неастигматичной линии с круглыми апертурами. Для простоты будем исходить из аналитических выражений полей мод для линии с неограниченными апертурами. Тогда моду  $P(0, 1)$  можно представить как суперпозицию мод  $D[0, 2]$  и  $D[2, 0]$  линии с прямоугольными апертурами. Благодаря тому, что в стигматичной линии моды  $D[0, 2]$  и  $D[2, 0]$  распространяются с одинаковыми фазовыми скоростями, их линейная суперпозиция  $P(0, 1)$  также является модой рассматриваемой линии. Если, однако, коррек-

торы таковы, что по осям  $OX$  и  $OY$  поле преобразуется ими по-разному, то фазовые скорости мод  $D[0, 2]$  и  $D[2, 0]$  становятся различными, т. е. мода  $P(0, 1)$ , являющаяся суммой синфазных волн  $D[0, 2]$  и  $D[2, 0]$ , не может существовать в астигматичной линии. Из сказанного выше следует, что в астигматичных линиях классификацию мод необходимо проводить в декартовых координатах.

На рис. 2 приведены структуры мод зеркальной перископической линии. Как видно из рис. 2, в астигматичной линии появляются моды, например,  $D(2, 0)$  и  $D(0, 2)$ , не свойственные обычным линиям с круглыми апертурами корректоров. Моды  $D(0, 1)$  и  $D(1, 0)$ ,  $D(0, 2)$  и  $D(2, 0)$  обладают одинаковыми дифракционными потерями, но разными фазовыми скоростями. При достаточно больших значениях  $C$  фазовые набегии мод зеркальной перископической линии с круглыми апертурами выражаются формулой (4), в которой  $v_x - 1 = 1 - v_y$ .

Распространение мод  $D(0, 0; 0, 1; 1, 0; 2, 0; 0, 2; 1, 1)$  (рис. 2) в зеркальной астигматичной линии исследовалось экспериментально, и результаты исследования изложены ниже.

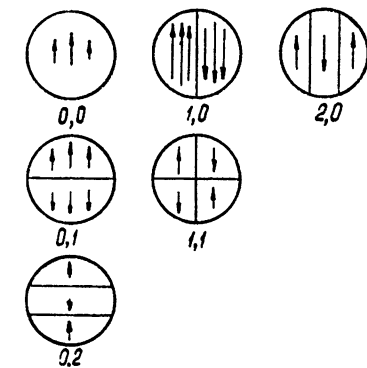


Рис. 2. Конфигурация полей собственных волн астигматичной линии с круглыми апертурами.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ

1. Экспериментальное изучение условий формирования и распространения собственных типов волн в зеркальной астигматичной линии проводилось на лабораторном макете\*, схема которого приведена на рис. 3. Линия собрана из двадцати корректоров, представляющих собой уголкового отражатели, состоящие из двух сферических зеркал с большими радиусами кривизны. Радиус апертуры корректора изменяется с помощью ирисовой диафрагмы, помещенной между зеркалами. Зеркала корректора устанавливаются так, что угол между нормальными к их вершинам близок к  $90^\circ$  (рис. 4). Такая схема установки зеркал в корректоре сохраняет величину фазовой коррекции такой же, какой бы она была для зеркальных перископических корректоров в линии, приведенной на рис. 1, и позволяет осуществлять обратный ход пучка, благодаря чему линия километровой длины размещается в пятидесятиметровом коридоре.

Расстояние между корректорами  $L=47,5$  м лимитировалось длиной коридора, при этом из требования симметрии световых пятен (3) радиус кривизны сферических зеркал получился равным

$$R = L \frac{1 + \sin^2 \alpha}{\sin \alpha} = 105 \text{ м}$$

при

$$\alpha \sim 45^\circ, \text{ а } |1 - v| = 0,33.$$

Линия (рис. 3) возбуждается видимым светом  $\lambda = 0,63 \mu$ , генерируемым газовым лазером, работающим в одномодовом режиме. Для

\* В разработке конструкции линии принимали участие Аверкиев И. В., Марьин В. И. и Нефедов В. Г.

согласования лазера с линией используется телескопическая система, состоящая из двух короткофокусных линз, и перископический зеркальный корректор. Зеркальный корректор системы возбуждения является одновременно первым корректором линии.

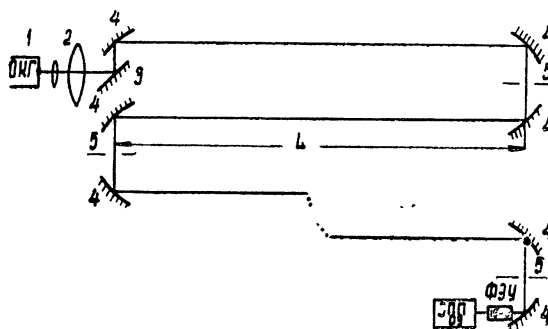


Рис. 3. Схема лабораторного макета зеркальной перископической линии с астигматичными корректорами:

1, 2—линзы системы возбуждения, 3—плоское зеркало, 4—сферические линнофокусные зеркала, 5—ирисовые диафрагмы.

Телескопическая система трансформирует поле, выходящее из лазера, делая размер пятна возбуждающего поля равным размеру пятна моды зеркальной линии; небольшое изменение расстояния между линзами телескопа позволяет подобрать кривизну фазового фронта возбуждающего поля. После телескопа поле с нужным размером пятна попадает на перископический зеркальный корректор, отличающийся от остальных корректоров линии тем, что одно из сферических зеркал заменено плоским. Это дает возможность получить поле с нужным размером пятна и примерно плоским фазовым фронтом в «средней плоскости» первого корректора линии. Возбуждение линии получается при этом довольно чистым. Потери на возбуждение вышних мод линии при различных  $C$  неодинаковы и в худшем случае составляют 0,7 дб.

2. На макете зеркальной перископической линии измерялись дифракционные потери двух первых мод  $D(0, 0)$  и  $D(1, 0)$ ,  $D(0, 1)$ . Обычный способ измерения потерь, основанный на сравнении интенсивности пучка, поступающего на вход линии, с интенсивностью пучка, получающегося на ее выходе, приводит к значительным ошибкам измерений малых дифракционных потерь в линии из-за влияния среды, находящейся в пространстве между корректорами.

Турбулентность воздуха вызывает случайные перемещения пучка по апертуре корректора. Амплитуда таких перемещений может быть порядка размера пятна поля моды. Это ведет к появлению значительного шума в регистрирующем приемнике.

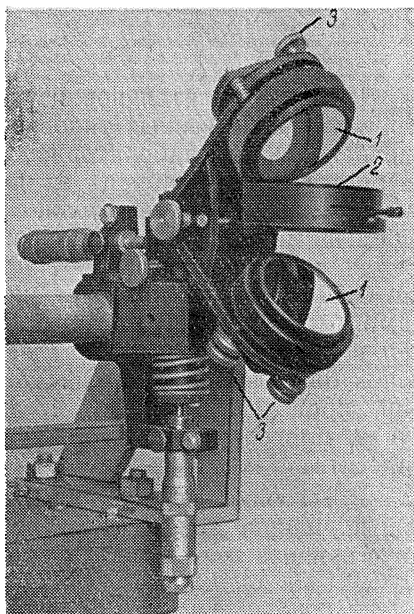


Рис. 4. Корректор, применяемый в макете перископической линии:

1—сферические зеркала, 2—ирисовая диафрагма, 3—юстировочные винты.

Присутствие водяных паров и аэрозолей в воздухе вызывает поглощение и рассеяние энергии поля, распространяющегося в линии. Потери, обусловленные поглощением и рассеянием света в нашем эксперименте, проводившемся в коридоре с сильно запыленным воздухом, составляли в худшем случае  $1,5 \text{ дб} \cdot \text{км}^{-1}$ . В этих условиях затруднено выделение уровня сигнала, соответствующего малым дифракционным потерям в линии. Поэтому обычный способ измерения потерь применялся лишь в условиях незначительной турбулентности воздуха при определении достаточно больших дифракционных потерь.

В остальных случаях дифракционные потери на каждом из корректоров измерялись непосредственно с помощью дополнительного поглощающего экрана, заменяющего диафрагму корректора; при этом отношение энергии, проходящей мимо экрана, к энергии пучка, падающего на корректор, равняется дифракционным потерям. Таким способом удается исключить потери энергии, вызванные поглощением и рассеянием в воздухе.

Влияние турбулентности используется для исключения дополнительных потерь, вызываемых неточной юстировкой фазового корректора. При хаотическом движении светового пятна по поглощающему экрану возможны случаи, когда центр пучка совпадает с центром экрана. В этот момент приемник регистрирует минимальный сигнал, который и характеризует величину дифракционных потерь моды в точно съюстированной линии.

Необходимо заметить, что масштаб турбулентности в наших экспериментах значительно превосходил поперечные размеры пучка, поэтому смещение светового пятна по экрану происходило без заметной его деформации.

На рис. 5 приведены результаты измерения дифракционных потерь двух первых мод зеркальной астигматичной линии. На этом же графике приведены значения дифракционных потерь, полученные при расчете на ЭВМ [3]. Как видно из графика, измеренные значения потерь астигматичной линии хорошо согласуются с расчетными значениями потерь стигматичной линии.

3. Кроме дифракционных потерь двух первых собственных волн, измерялась также разность фазовых скоростей различных мод при больших значениях параметра  $C$ . В экспериментах, описанных ниже,  $C = 11, 12$ .

Если возбуждать линию суперпозицией волн  $D(1, 0)$  и  $D(0, 1)$ , то поле не будет повторяться на каждом корректоре: линия минимума интенсивности поля будет поворачиваться при распространении этой суперпозиции от корректора к корректору. Структура поля, существовавшая на каком-либо корректоре линии, в точности повторяется через несколько корректоров, когда благодаря разнице в величине

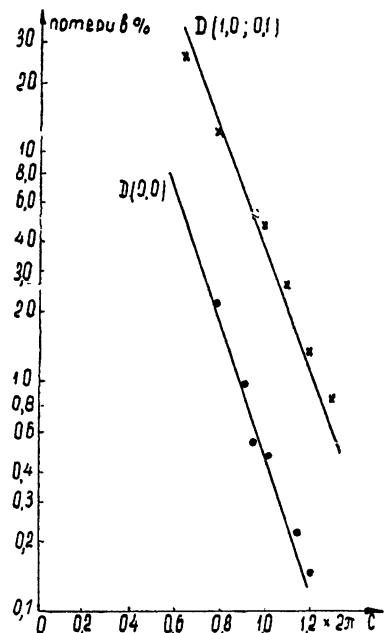


Рис. 5. Зависимость дифракционных потерь на один проход от параметра  $C$  для зеркальной астигматичной линии (сплошные кривые — теоретические значения потерь, рассчитанные на ЭВМ).

фазовых скоростей между модами  $D(1, 0)$  и  $D(0, 1)$  накопится разность фаз, кратная  $2\pi$ . Эксперимент показывает, что разность хода, равная  $2\pi$ , набегают на десяти корректорах. Таким образом, разность фазовых скоростей волн  $D(1, 0)$  и  $D(0, 1)$  приводит к сдвигу фазы поля одной волны относительно другой на  $36^\circ$  за один прогон. Из формулы (4) для этих волн получается сдвиг, равный  $38,5^\circ$ .

Кроме этого, измерялась разность фазовых скоростей мод  $D(0, 2)$ ,  $D(2, 0)$  и  $D(1, 1)$ . Зеркальная линия возбуждалась суперпозицией этих мод, причем основную долю энергии пучка несла мода  $D(1, 1)$ . При больших величинах параметра  $C$ , когда дифракционные потери очень малы, поля собственных волн хорошо аппроксимируются полями соответствующих мод линии, апертуры корректоров которой неограничены. Используя известные формулы для полей мод линии с неограниченными корректорами, легко показать, что, если все три моды находятся в фазе, или мода  $D(1, 1)$  — в противофазе с волнами  $D(2, 0)$  и  $D(0, 2)$ , то линиями минимума интенсивности поля будут гиперболы, ориентация которых и значения осей зависят от фаз и амплитуд собственных волн.

При распространении суперпозиции полей в лучевом трубе легче всего наблюдать за линиями минимума интенсивности полей. Можно следить, например, за повторением структуры поля, нули которого расположены на гиперболах. Точного повторения гипербол, однако, не получается, поскольку дифракционные потери мод  $D(0, 2)$ ,  $D(2, 0)$  и  $D(1, 1)$  различны и фазовые набеги не кратны  $2\pi$ . На рис. 6 приведены фотографии структур полей на корректорах линии, возбуждаемой суперпозицией трех мод  $D(0, 2)$ ,  $D(2, 0)$  и  $D(1, 1)$ . Нужно иметь в виду, что из-за турбулентности воздуха поля несколько искажаются при фотографировании. Из рис. 6 видно, что на 19-м корректоре получаются гиперболы, ориентированные приблизительно так же, как и на 9-м корректоре. Из формулы (4) легко получить, что за один проход для волн  $D(1, 1)$  и  $D(2, 0)$  набегают фазы соответственно  $38,5^\circ$  и  $77^\circ$  относительно моды  $D(0, 2)$ . Эксперимент для этих набегов фаз дает значения  $36^\circ$  и  $72^\circ$ .

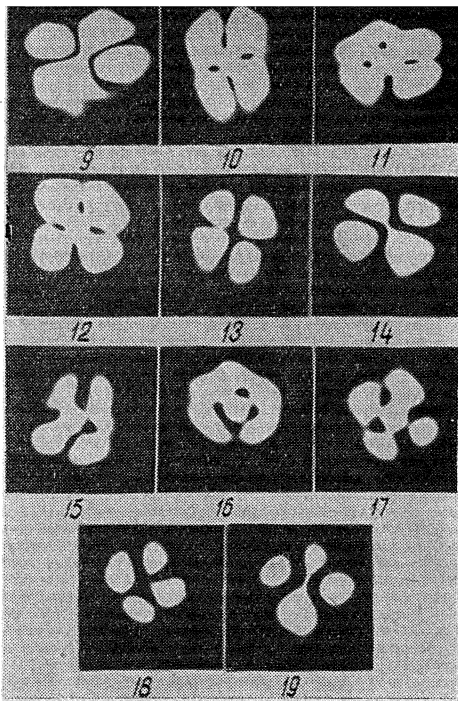


Рис. 6. Распределение интенсивности поля на корректорах линии при распространении в ней суперпозиции трех мод  $D(1, 1)$ ,  $D(0, 2)$  и  $D(2, 0)$ . Числа под фотографиями обозначают номер корректора в линии.

Краткие выводы работы заключаются в следующем:

1. В диапазоне видимого света ( $\lambda = 0,63 \mu$ ) экспериментально наблюдались собственные типы волн зеркальной квазиоптической линии передачи.

2. Экспериментально показано существование устойчивых, повторяющих самих себя на каждом корректоре, структур полей в астигматичной квазиоптической линии, т. е. линии, не передающей изображения в геометро-оптическом смысле.

3. Измеренные дифракционные потери для первых двух мод зеркальной астигматичной линии хорошо совпадают с потерями, вычисленными на ЭВМ.

4. Измерены разности фазовых скоростей нескольких первых мод зеркальной астигматичной линии. Значения этих скоростей хорошо согласуются с расчетом.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Б. З. Каценеленбауму за постоянный интерес к работе и полезные дискуссии, а также А. Б. Догадкину за внимание к работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Б. Ваганов, А. Б. Догадкин, Б. З. Каценеленбаум, Радиотехника и электроника, 10, № 9, 1672 (1965).
2. В. С. Авербах, С. Н. Власов, В. И. Таланов, Радиотехника и электроника 10, № 6, 1150 (1965).
3. Tunge Li, Bell Syst. Techn. J., 44, № 5, 917 (1965).
4. В. М. Файн, Я. И. Ханнин, Квантовая радиофизика, изд. Сов. радио, М., 1965.

Институт радиотехники и электроники  
АН СССР

Поступила в редакцию  
2 марта 1967 г.

#### INVESTIGATION OF MIRROR PERISCOPE TRANSMISSION LINES

*A. A. Dyachenko, O. E. Shouspanov*

Quasi-optical lines are considered the correctors of which consist of a periscope pair of spherical mirrors. The mode system of an astigmatic line introduced in the paper is experimentally checked up, i. e. steady-state propagation of individual modes was observed. The differences in phase velocities of some modes are defined. The diffraction losses of the two first modes of the system are experimentally found.