

УДК 535.43.07: 551.591: 629.7.05

## САМОЛЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ АЭРОЗОЛЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОПТИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

© 2007 г. В. С. Максимюк; В. Л. Филиппов, доктор физ.-мат. наук

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

E-mail: postmaster@gipo.kazan.ru

Обобщены методические вопросы и технические решения задачи оптического зондирования атмосферного аэрозоля с борта самолета-лаборатории, а также количественные результаты измерений. Представлены аналитические зависимости, необходимые для моделирования слоистой стратификации вертикального профиля аэрозоля как пространственно неоднородной динамической системы.

Коды OCIS: 010.1120, 120.4640.

*Поступила в редакцию 11.09.2006.*

Спектральная оптическая плотность или прозрачность является одной из важнейших характеристик атмосферы, зависящих от изменчивости объемного содержания и дисперсного состава аэрозоля. Поэтому возможность количественных измерений и, что более важно, прогнозирования пространственно-временной динамики аэрозольных слоев атмосферы по высоте над различными районами Земного шара – принципиальная составляющая задачи определения видимости по наклонным трассам визирования в интересах воздушного транспорта, связи, диагноза и прогноза оптической погоды [1].

Для изучения закономерностей формирования макромасштабных метеорологических величин (поля влажности, состояния облачности, типа барического поля в воздушной массе с внутренней слоистой структурой) в тесной связи их с пространственной стратификацией атмосферного аэрозоля необходима постановка специальных оптико-геофизических исследований [2, 3], которые широко развернуты в Западной Сибири сотрудниками Института оптики и атмосферы СО РАН (г. Томск) с использованием как стационарных, так и мобильных лидаров, нефелометров, аэрозольных счетчиков [3–6]. Известны зарубежные самолетные исследования в Европе по программе OPAQUE (Optical Atmospheric Quantities in Europe), выполненные с помощью интегрального нефелометра [7].

Первые работы данного плана в НПО ГИПО были выполнены в приземном слое в Подмоскowie и районе г. Казани [2], а затем и в других климатических зонах [8]. Одной из важнейших составляющих этого цикла работ как специализированной программы “Тропосфера” [9, 10] стали исследова-

ния атмосферного аэрозоля с борта самолета-лаборатории. Предметом изучения были пространственные вариации локальных значений объемного показателя рассеяния  $\mu$  на разных высотах  $h$  малооблачной атмосферы, которые определяют высотные профили оптической плотности аэрозоля вдоль трассы в пределах тропосферы. Массив самолетных эмпирических данных оптических характеристик фоновой атмосферы получен для Подмоскowie и района Мещерского заповедника при малооблачной погоде в дневное время суток [11], над сушей в Крыму, над акваторией Черного моря и Тихого океана, над промышленными центрами г. Казани и г. Алматы [12, 13].

Важным аспектом обозначенных исследований следует считать оптимальный выбор методов и технических средств диагностики с проведением анализа их возможностей и границ применимости для достижения необходимой степени достоверности и точности измерений. В частности, особенность обсуждаемой работы состоит в одновременной реализации в натурном летном эксперименте трех оптических методов анализа: спектральной нефелометрии, лидарного зондирования и методов, дополненных измерениями яркостного контраста объектов [14].

Было показано, что оптимальным аппаратным решением задачи бортовых измерений должно быть создание приборного комплекса, состоящего из лидара и нефелометра. В этом случае удалось сочетать характеристики оперативности и дистанционности измерений, свойственных методу лидарного зондирования, и точности измерений нефелометрическим методом. Совмещение указанных измерений позволяет также избежать неопределенности в ка-

либровке эхо-сигналов обратного рассеяния лидара за счет учета синхронных показаний нефелометра и в сотни раз повысить информативность нефелометрического метода за счет учета лидарных профилей атмосферы. Вспомогательную информацию, необходимую для интерпретации полученных результатов, обеспечили показания бортовых приборов самолета (летно-технические характеристики самолета, аэрофотосъемка, показания термогигрометра), наблюдения наземных метеорологических параметров, результаты аэрологического зондирования, синоптические карты барической топографии.

В нефелометрическом канале, как основном элементе комплекса аппаратуры, требовалось обеспечивать высокую чувствительность и точность измерений при наличии большой помехи от солнечной засветки фотоприемника. В связи с отсутствием такого класса нефелометров была реализована разработка нового оптического прибора [15], пригодного для жестких условий эксплуатации в потоке воздуха свободной атмосферы вне салона самолета, с установкой его оптико-механической части на поверхности фюзеляжа. В данном приборе предусмотрена регистрация интенсивности рассеянного излучения воздуха нефелометрическим методом анализа с фиксированным углом наблюдения  $\varphi_0 = 45^\circ$  (далее НМ45°). По данной схеме анализа выходной сигнал направленного светорассеяния линейно связан со значением показателя интегрально-углового светорассеяния атмосферы постоянным коэффициентом  $K(\varphi_0, \lambda_0) = 0,117$ .

Для решения поставленных задач исследования с корректным использованием НМ45° следовало обосновать следующие положения:

- правомерность применения НМ45° не только на одной длине волны  $\lambda_0 = 0,5$  мкм, но и для ряда длин волн в диапазоне  $\Delta\lambda = 0,4-1,0$  мкм с установлением вида функциональной зависимости коэффициента  $K(\varphi_0, \lambda_i)$  по спектральному признаку;

- поиск конструктивных и методических решений, повышающих энергетический потенциал и точность прибора при функционировании его в атмосфере с высокой прозрачностью и в условиях дневного времени суток на фоне паразитных засветок от Солнца;

- достоверность результатов нефелометрических измерений в динамических условиях полета при работе прибора в скоростном потоке воздуха и эксплуатации его при низких температурах воздуха на различных высотах.

Результатами процесса измерений являются:

- объемные показатели аэрозольного светорассеяния  $\mu(\lambda_0, h)$  на опорной длине волны  $\lambda_0$  в видимой, а также ближней ультрафиолетовой и инфра-

красной областях спектра в функции высоты  $h$  по трассе полета самолета-лаборатории;

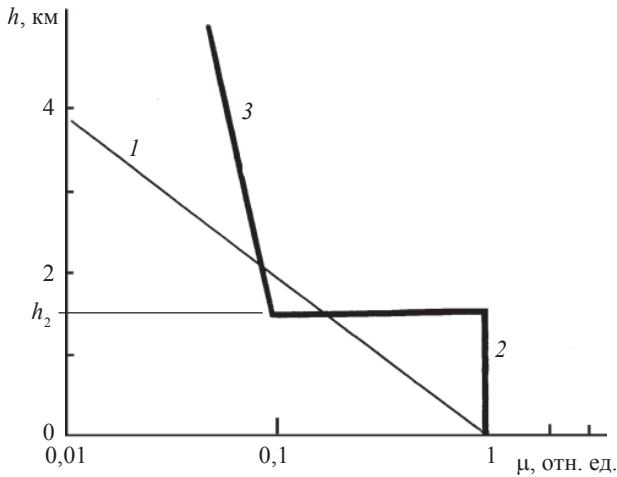
- показатель обратного рассеяния на длине волны  $0,69$  мкм с регистрацией лидарного сигнала в направлении визирования вертикально вниз;

- контрасты яркости системы объект–фон, измеренные телевизионными средствами сканирования.

В натурном эксперименте реализован и метрологически обеспечен широкий диапазон измеряемых значений  $\mu(\lambda_0, h)$  от  $0,00015$  до  $0,3$  км<sup>-1</sup>. Получены характеристики спектрального хода показателя  $\mu(\lambda_i)$  для слоя воздуха на разных высотах  $h$  в виде локальных значений показателя Ангстрема  $n$  в диапазоне от  $0,5$  до  $3,5$ . Они являются исходными данными для решения обратной задачи по восстановлению спектра размеров аэрозольных частиц атмосферы в виде значений показателя Юнге  $v$ . Перечисленные значения  $\mu$ ,  $n$  и  $v$  для слоисто-неоднородной атмосферы необходимы для более точного расчета переноса яркостного контраста в функции дальности. Диагностика и прогноз характеристик оптического излучения проводятся не только в видимой, но и в инфракрасной области спектра в научных и практических приложениях, а также в задачах разработки и испытаний авиационных телевизионных и тепловизионных систем наблюдения [10].

Полученные результаты летных измерений обобщены в виде модели, в которой рассматривается двухслойная стратификация аэрозоля нижней и средней тропосферы (рис. 1) с выделением однородного пограничного слоя и слоя свободной атмосферы, между которыми имеет место выраженный скачок концентрации аэрозоля или показателя аэрозольного светорассеяния  $\mu$  [16]. Расчетное значение показателя аэрозольного рассеяния  $\mu$  является результатом вычитания молекулярного компонента ( $\mu_{\text{мол}}$ ) из общего сигнала ( $\mu = \mu_{\text{общ}} - \mu_{\text{мол}}$ ). Эффект совместного уменьшения с высотой значений  $\mu_{\text{общ}}$ ,  $\mu_{\text{мол}}$  и плотности атмосферы по барометрической (экспоненциальной) зависимости соответствует известному физическому принципу турбулентного переноса для параметра удельной концентрации аэрозоля как пассивной примеси атмосферы. В равновесных условиях турбулентной диффузии аэрозоля без горизонтальной адвекции градиент значений  $\mu(\lambda_0, h)$  является константой, т. е. консервативной характеристикой выделенного слоя, не зависящей функционально от высоты. Возможное наличие отрицательного градиента  $\mu_c(\lambda_0, h)$  в слое свободной атмосферы является признаком неравновесных условий диффузии с упорядоченным потоком аэрозолей вверх. Источником аэрозольной эмиссии при этом является верхняя граница пограничного слоя.

Таким образом, однородный пограничный слой аэрозоля идентифицируется как минимальная вы-



**Рис. 1.** Структура вертикального профиля аэрозольного показателя рассеяния  $\mu$  по однослойной модели Эльтермана 1 и результаты наших исследований 2, 3 с выделением пограничного слоя на высоте  $h_2$  и слоя свободной атмосферы 3.

сота сохранения характеристик свободной атмосферы, ниже которой проявляется термодинамическое влияние подстилающей поверхности, выделенного слоя воздуха в сочетании с потоками воздуха свободной атмосферы. Турбулентная диффузия количества движения и тепла формирует динамический и тепловой пограничные слои атмосферы, которые существуют перманентно и независимо. Турбулентный перенос аэрозолей по высоте формирует аэрозольный пограничный слой  $h_2$ , который в представленных результатах идентифицируется с тепловым пограничным слоем при значении потенциальной температуры слоя  $\theta > -20$  °С и с динамическим пограничным слоем при  $\theta < -20$  °С.

На рис. 1 выделены следующие характерные особенности стратификации высотного профиля показателя аэрозольного светорассеяния:

1. Распределение  $\mu(\lambda_0, h)$  по высоте является однородным с градиентом  $\xi_{\text{п}} = 0$  в пределах теплового пограничного слоя толщиной  $h_2$ .

2. В слое свободной атмосферы при  $h_c > h_2$  распределение  $\mu_c(\lambda_0, h_c)$  по высоте описывается экспоненциальным убыванием с масштабным параметром  $\xi_c = 5 \pm 1$  км в формуле  $\exp(-h/\xi_c)$ . Различие градиентов  $\xi_c$  и  $\xi_{\text{мол}}$ , равное 8, является мерой среднего турбулентного потока аэрозоля в слое свободной атмосферы.

В центральной части Европейской территории России (ЕТР) для всех сезонов года получены количественные данные  $\mu(\lambda_0, h_0)$  свободной атмосферы на высоте  $h_0 = 5$  км для различных воздушных масс. По всему ансамблю реализаций для средних значений установлено, что  $\langle \mu(\lambda_0, h_0) \rangle = (0,012 \pm 0,009) \text{ км}^{-1}$ , в том числе для направления адвекции воздушных масс в центр ЕТР с севера  $\langle \mu_1(\lambda_0, h_0) \rangle =$

$= (0,008 \pm 0,004) \text{ км}^{-1}$  и для адвекции воздушных масс с юга  $\langle \mu_2(\lambda_0, h_0) \rangle = (0,020 \pm 0,010) \text{ км}^{-1}$ .

Для условий внеоблачной атмосферы по всему ансамблю реализаций установлены количественные особенности стратификации вертикального профиля аэрозоля как двухслойной структуры по признакам средних значений  $\langle \mu(\lambda_0, h_c) \rangle$  слоя свободной атмосферы на высотах 3–5 км и средних значений  $\langle \mu(\lambda_0, h_{\text{п}}) \rangle$  в толще ниже расположенного однородного пограничного слоя. Взаимосвязь средних величин может быть представлена в виде их эмпирического отношения:

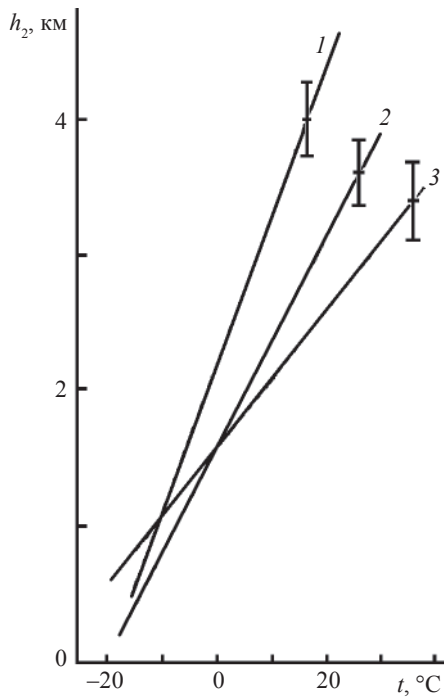
$$\eta = \langle \mu(\lambda_0, h_c) \rangle / \langle \mu(\lambda_0, h_{\text{п}}) \rangle = 0,12 \pm 0,07. \quad (1)$$

Установлена тенденция сохранения однородного распределения показателя Ангстрема и спектра размеров частиц аэрозоля по Юнге в функции высоты для всего объема одной и той же воздушной массы. При этом одновременно и существенным образом изменяется с высотой объемная концентрация аэрозоля. Для всего ансамбля реализаций показатель Ангстрема имеет среднее значение  $\langle n(h) \rangle = 2,2$  с вариацией в диапазоне от 0,5 до 3,5.

Установлены простые функциональные соотношения (рис. 2), позволяющие по стандартной метеорологической информации прогнозировать толщину аэрозольного пограничного слоя  $h_2$  с погрешностью  $\Delta h_2$  как ее линейную функциональную зависимость от значений среднесуточной температуры  $t$  приземного слоя ( $h = 2$  м), выраженной в градусах Цельсия с учетом знака. В качестве исходных данных может быть также использована потенциальная температура пограничного слоя  $\theta$ , равная ее фактическому значению на изобарической поверхности АТ850 мб ( $h \approx 1500$  м). Дополнительными предикторами прогноза толщины  $h_2$  являются направление и скорость упорядоченных вертикальных движений воздуха  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ , которые могут быть оценены по правилу ведущего потока на изобарической поверхности АТ500 мб ( $h \approx 5600$  м) для морфологических градаций типов барического поля [17]:

$$\begin{aligned} & - \text{циклон } h_2(t, \omega_1) = (0,10t + 1,6) \text{ км}, \\ & \Delta h_2(t, \omega_1) = \pm 0,35 \text{ км}; \\ & - \text{промежуточное поле} \\ & h_2(t, \omega_2) = (0,08t + 1,6) \text{ км}, \Delta h_2(t, \omega_2) = \pm 0,24 \text{ км}; \quad (2) \\ & - \text{антициклон } h_2(t, \omega_3) = (0,06t + 1,4) \text{ км}, \\ & \Delta h_2(t, \omega_3) = \pm 0,30 \text{ км}; \\ & - \text{с учетом только температуры} \\ & h_2(t) = (0,08t + 1,8) \text{ км}, \Delta h_2(t) = \pm 0,60 \text{ км}. \end{aligned}$$

На основе исходных данных характеристик приземного слоя и аналитических соотношений (1) и (2) для величин  $\eta$  и  $h_2(t, \omega)$  формируются основные черты динамической модели вертикального профиля оптических характеристик тропосферного аэрозоля.



**Рис. 2.** Температурная зависимость толщины аэрозольного пограничного слоя атмосферы  $h_2$  с погрешностью аппроксимации  $\Delta h_2$  для барической системы циклона – 1, промежуточного поля – 2 и антициклона – 3.

Представленная методика определения высоты  $h_2(t, \omega)$  по термодинамическому принципу обеспечивает точность задания верхней границы слоя со средней погрешностью  $\langle \Delta h \rangle = \pm 0,3$  км, что в два раза лучше, чем погрешность моделирования по сезонному принципу, где  $\langle \Delta h \rangle = \pm 0,5$  км [3, 18]. Напомним, что по модели Шеттла, Фенна [7, 19], принятой к широкому применению за рубежом, высота пограничного слоя постоянна и равна 2 км. Поскольку эта модель не учитывает динамических характеристик атмосферы по параметру вариаций  $h_2$ , то погрешность определения высоты пограничного слоя может достигать  $\langle \Delta h \rangle = \pm 1,5$  км, что и явилось важным критерием и побудительным мотивом для реализации обсуждаемой программы исследований.

Таким образом, при выполнении прогноза и численного моделирования вертикального профиля  $\mu(\lambda, h)$  для данного региона (в масштабе порядка 100 км) необходимо последовательно определять следующие основные оптические и геофизические характеристики: значение показателя  $\mu(\lambda_0, h = 0)$  в приземном слое, значение потенциальной температуры пограничного слоя  $\theta$  или среднесуточной приземной температуры  $t$ , спектральные характеристики атмосферы приземного слоя в виде значений показателя Ангстрема; по картам барической топографии АТ500 определяются направление циркуляции (вергенции) ведущего потока воздуха и радиусы кривизны изогипс, которые являются

признаками измерения вертикальной скорости по следующим градиентам: циклоническая кривизна ( $\omega_1 = +2 \dots +3$  см/с), антициклоническая кривизна ( $\omega_3 = -2 \dots -3$  см/с), промежуточное поле ( $\omega_2 = \pm 1$  см/с) с прямолинейными изогипсами. В качестве дополнительных признаков для анализа могут привлекаться характеристики свободной атмосферы  $\langle \mu_c(\lambda_0, h) \rangle$  и  $\xi_c$ , профиль влажности и температуры, полученные по данным сетевого радиозондирования, поскольку высота  $h_{\Pi}$  обычно совпадает с изломом профиля влажности и высотой инверсии на профиле температуры. В данной методике анализа привлечение дополнительных признаков повышает точность оценок по основным признакам, в результате чего качество прогноза определяется фактическим объемом исходных оптических и метеорологических величин, доступных для проведения анализа.

На основании полученных исходных данных и аналитических соотношений (1) и (2) для величин  $\eta$  и  $h_2(t, \omega)$  определяются основные параметры типовой модели вертикального профиля оптических характеристик аэрозоля как динамической структуры.

Оценка эффективности предлагаемой динамической структуры может быть проведена путем анализа оптической толщины вертикального столба атмосферы по двум эмпирическим моделям. При этом погрешность определяется вариациями основного переменного признака – толщины слоя  $h_2$ , определенного как по термодинамическому принципу, так и по более грубому сезонному принципу прогноза [3]. Сравнительный анализ данных показывает, что недостаточный учет тонкой структуры поля метеорологических величин и  $h_2$  может приводить к дополнительной погрешности от 24 до 300%. Отсюда следует еще один довод в пользу важности применения предлагаемого термодинамического подхода в оценке  $h_2$  на основе эмпирически установленных функциональных зависимостей [16, 17, 20].

В заключение отметим, что представленные самолетные исследования охватывают практически весь регион СНГ. При этом результаты могут экстраполироваться на более высокие слои тропосферы путем стыковки их с синхронными данными орбитальных спутниковых измерений аэрозольных профилей верхней тропосферы и стратосферы, получаемых оптическим методом затменного зондирования горизонта по международной программе SAGE (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment) [21].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Филиппов В.Л., Белозеров А.Ф., Яцык В.С. Проблемно-ориентированные базы данных для моделирования ОЭС // Вооружение. Политика. Конверсия. 1999. № 6. С. 29–32.

2. Филиппов В.Л., Иванов В.П., Колобов Н.В. Динамика оптической погоды. Казань: Изд-во КГУ, 1986. 157 с.
3. Филиппов В.Л., Макаров А.С., Иванов В.П. Оптическая погода в нижней тропосфере. Казань: Дом печати, 1998. 183 с.
4. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Задде Г.О. Оптическая погода. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. 192 с.
5. Белан Б.Д., Гришин А.И., Матвиенко Г.Г., Самохвалов И.В. Пространственная изменчивость характеристик атмосферного аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1989. 151 с.
6. Панченко М.В., Терпугова С.А. Схема восстановления коэффициентов рассеяния в нижней тропосфере // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 12. С. 1562–1572.
7. Fenn R.W., Shettle E.P., Hering W.S., Jonson R.W. Atmospheric optical properties and meteorological conditions // Atmospheric Environment. 1981. V. 15. № 10/11. P. 1911–1918.
8. Филиппов В.Л. Аэрозольное ослабление электромагнитного излучения в оптических каналах по данным экспериментальных исследований. М.: ЦНИИ информации и ТЭИ, 1984. 379 с.
9. Филиппов В.Л., Танташев М.В. Оптико-геофизическая модель атмосферы “Тропосфера-2000” // Прикладная физика. 2004. № 2. С. 114–117.
10. Танташев М.В., Филиппов В.Л. Влияние неоднородной атмосферы на условия наблюдения объектов. Казань: Каз. гос. энергетический ун-т, 2003. 132 с.
11. Максимюк В.С., Танташев М.В., Татьянанин С.В. Показатель аэрозольного ослабления тропосферы по данным нефелометрического зондирования с борта самолета-лаборатории // Тез. докл. VIII Всесоюз. симпоз. по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск, 1986. Ч. 1. С. 67–71.
12. Максимюк В.С., Танташев М.В., Татьянанин С.В. Исследование пространственной структуры оптических характеристик атмосферы над сушей и морем // Тез. докл. VI Всесоюз. симпоз. по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск, 1981. Ч. 1. С. 52–55.
13. Максимюк В.С., Файзрахманова Г.Ф. Пространственная структура показателя аэрозольного ослабления над Алма-Атой по данным нефелометрических измерений с борта самолета-лаборатории // Исследование загрязнения атмосферы Алма-Аты. Алма-Ата: Гылым, 1990. Ч. 1. Эксперимент АНЗАГ-87. С. 93–101.
14. Максимюк В.С., Танташев М.В., Татьянанин С.В. Оптический комплекс для исследования вертикальной структуры тропосферного аэрозоля // Тез. докл. VIII Всесоюз. симпоз. по распространению лазерного излучения в атмосфере. Тезисы докладов. Томск, 1986. Ч. III. С. 211–215.
15. Максимюк В.С., Танташев М.В., Семенов Л.С. Многоканальный нефелометр для определения спектральной прозрачности атмосферы с борта самолета // ОМП. 1987. № 6. С. 20–22.
16. Максимюк В.С., Татьянанин С.В. Модельные представления о структуре вертикального распределения тропосферного аэрозоля по данным нефелометрического и лазерного зондирования с борта самолета-лаборатории // Оптические свойства земной атмосферы. Томск: Изд. Томск. филиала СО АН СССР, 1988. С. 41–44.
17. Герасимов А.В., Максимюк В.С., Татьянанин С.В. О влиянии метеорологических характеристик на определение толщины пограничного слоя атмосферы методами оптического зондирования // Метеорология и гидрология. 1988. № 2. С. 25–33.
18. Белан Б.Д., Задде Г.О., Панченко М.В., Рассказчикова Т.М., Терпугова С.А., Тумаков А.Г., Фадеев В.Я. Сезонные факторы в изменчивости атмосферного аэрозоля в диапазоне высот 0–5 км // Оптические свойства земной атмосферы. Томск: Изд. Томск. филиала СО АН СССР, 1988. С. 45–51.
19. Справочник по инфракрасной технике / Под ред. У. Волф, Г. Цисис. М.: Мир, 1995. Т. 1. Физика ИК излучения. 606 с.
20. Максимюк В.С., Филиппов В.Л. Измерительная аппаратура и результаты исследований пространственно-временной структуры аэрозоля в различных климатических районах // Электронное приборостроение. Научно-практический сборник. Казань: Новое знание, 2005. В. 2(43). С. 33–46.
21. Максимюк В.С., Татьянанин С.В. Анализ количественных данных показателя аэрозольного ослабления тропосферы и стратосферы в подспутниковом эксперименте // Оптика атмосферы и океана. 1989. Т. 2. № 8. С. 891–893.

УДК 681.783.25

## КРИТЕРИИ И МЕТОД ОЦЕНКИ ИНФОРМАТИВНОСТИ ПРИЗНАКОВ ОБЪЕКТОВ В ЗАДАЧАХ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ

© 2007 г. И. А. Непогодин, доктор физ.-мат. наук

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

E-mail: postmaster@gipo.kazan.ru

Проведен анализ критериев и разработан метод оценки информативности признаков объектов в задачах лазерно-локационного обнаружения, измерения, наведения и распознавания. Описаны обобщенная структура и базовая составляющая этого метода – алгоритм математического имитационного моделирования условий локации и характеристик регистрируемых сигналов. Приведены примеры расчетов амплитудных, временных, пространственных и пространственно-временных отражательных характеристик (нормированных сигналов) объектов сложной формы (самолетов) для условий одно- и двухпозиционной лазерной локации.

Коды OCIS: 280.3400.

*Поступила в редакцию 06.07.2006.*

Лазерно-локационные системы по своему информационному назначению подразделяются на системы обнаружения объектов, измерения параметров объектов, наведения на объекты и распознавания объектов. Отличительные признаки объектов, содержащиеся в реализациях регистрируемых сигналов и положенные в основу решения задач обнаружения, измерения, наведения и распознавания, определяют специфику структуры соответствующих локаторов и алгоритмов выделения и обработки сигналов. По классам признаки объектов подразделяются на детерминированные, вероятностные, логические и структурные (лингвистические) [1]. Выбор того или иного признака или некоторой комбинации признаков объектов из возможного набора в качестве рабочего (-их) для эффективного решения конкретной локационной задачи (оптимизации построения и функционирования системы в заданных условиях применения) требует сравнительной количественной оценки их информативности.

Для получения количественной оценки информативности признаков объектов в заданных условиях локации необходимо прежде всего выбрать адекватный решаемой задаче критерий информативности признаков объектов и разработать реализующий его метод их достоверной оценки.

### 1. Критерии оценки информативности признаков объектов в задачах локации

В качестве простейших критериев оценки информативности признаков объектов в задачах обнаружения обычно используются:

в случае обнаружения сигналов от объектов на фоне шумов по амплитудному признаку – отношению пикового значения сигнала к среднеквадратическому значению шума;

в случае обнаружения (селекции) сигналов от объектов на фоне внешних помех (фон) по амплитудному, поляризованному, временному и пространственному признакам – соответственно амплитудный, поляризованный, временной и пространственный контраст, определяемый из выражения  $(C_{xj} - P_{xj})/P_{xj}$  или  $(C_{xj} - P_{xj})/(C_{xj} + P_{xj})$ , где  $C_{xj}$  и  $P_{xj}$  – сигналы от объекта и помехи, соответствующие признаку  $x_j$ .

Более полным критерием оценки информативности признаков объектов в задаче обнаружения по одному или совокупности признаков могут служить достигаемые локатором вероятности правильного обнаружения объектов с допустимой нормой ложных тревог.

В качестве критериев оценки информативности признаков объектов в задачах измерения и наведения естественно использовать достигаемые значения точностей измерения и точностей наведения с заданной достоверностью.

Задачи распознавания объектов функционально более сложны, чем задачи обнаружения и измерения, включают последние на начальных этапах своей реализации и отличаются значительно большим разнообразием признаков, которые могут быть положены в основу их решающих алгоритмов. Выбор априорных и апостериорных признаков объектов из возможного их набора для заданных условий локации является ключевым в проблеме опти-

мального (рационального) проектирования систем распознавания. Действительно, с одной стороны, он определяет необходимый объем полученной, хранимой и перерабатываемой априорной и апостериорной (текущей) информации по фоноцелевой обстановке (ФЦО), с другой стороны – структуру, алгоритмы и достигаемые характеристики системы. При этом выбор критериев информативности зависит как от содержания, так и от того, на решение какого этапа (какой характеристики) проблемы (системы) распознавания он направлен и насколько приемлемое по сложности и эффективности (приближающееся к оптимальному) решение он обеспечивает.

На этапе разработки априорного словаря признаков объектов возникает задача отбора и ранжирования признаков по их информативности в предположении, что каждый из признаков определен первым. В качестве критериев информативности признаков в данном случае могут быть использованы известные “критерии сравнения”, в том числе критерий, основанный на определении величины  $J_{xy}$ , характеризующей уменьшение энтропии системы в результате выявления  $x_j$  признака [2]. Однако информативность признаков объектов в общем случае не является безусловной величиной, она зависит от того, какие признаки были измерены ранее, какие они приняли значения и с какой точностью. Оценки информативности признаков в соответствии с “критериями сравнения” не учитывают этих факторов и, следовательно, могут использоваться только как предварительные (на этапе ранжирования одиночных признаков) для того, чтобы отбросить заведомо негодные.

В качестве критерия оценки информативности признаков объектов в задачах распознавания предпочтительно использовать вероятность правильного распознавания объектов. Этот критерий свободен от указанных недостатков “критериев сравнения”, т. е. позволяет учитывать информативность как одиночных признаков, так и комбинации априорных и апостериорных признаков, последовательность их поступления, а также учитывать параметры и алгоритмы функционирования систем, и, следовательно, пригоден для решения задач оптимизации построения систем и их функционирования в заданных условиях применения.

## 2. Метод оценки информативности признаков объектов в задачах лазерной локации

Реализация оценки информативности признаков объектов локации на основе указанных вероятностных критериев информативности в силу сложно-

сти задания ФЦО, адекватного формирования отраженных сигналов, алгоритмов выявления и обработки рабочих признаков, а также принятия решения возможна только методом математического имитационного моделирования [1, 2].

Обобщенная структурная схема математического имитационного моделирования сигналов и оценки информативности содержащихся в них признаков представлена на рис. 1. Эта схема включает следующие компоненты:

- задание исходных данных по условиям локации, в том числе параметров систем, типов объектов и фонов, параметров среды, геометрии облучения и приема в системах координат, обеспечивающих решение задачи;
- задание (описание) уравнений сигналов, модели формы поверхности объектов (фонов), модели индикатрис объектов (фонов), модели характеристик среды;
- задание и реализация процедуры счета амплитудных, поляризационных, временных, пространственно-частотных и пространственно-временных характеристик сигналов для отдельных видов или их определенной комбинации;
- задание и реализация процедуры (алгоритма) выявления рабочих признаков объектов;
- задание и реализация процедуры (алгоритма) оценки информативности признаков в зависимости от вида решаемой задачи.



Рис. 1. Обобщенная структурная схема математического имитационного моделирования сигналов и оценки информативности содержащихся в них признаков объектов.

Задание исходных данных по условиям локации в системах координат, обеспечивающих решение задачи, представляет достаточно простую и отработанную процедуру. В качестве примера на рис. 2 приведена система координат и геометрия локации объекта для двухпозиционных условий его облучения и наблюдения. Здесь СК<sub>0</sub>(X, Y, Z) – опорная система координат с центром в точке O для описания поверхности фоновых образований, СК<sub>1</sub>(X<sub>1</sub>, Y<sub>1</sub>, Z<sub>1</sub>) – система координат излучателя с центром в точке O<sub>1</sub>, оптическая ось которого O<sub>1</sub>Z<sub>1</sub> направлена в некоторую точку M поверхности объекта; СК<sub>2</sub>(X<sub>2</sub>, Y<sub>2</sub>, Z<sub>2</sub>) – система координат приемника с центром в точке O<sub>2</sub>, СК<sub>3</sub>(X<sub>3</sub>, Y<sub>3</sub>, Z<sub>3</sub>) – система координат объекта с центром в точке O<sub>3</sub> – точке центра тяжести (геометрическом центре) объекта.

### 2.1. Уравнения сигналов

Уравнение сигнала для условия квадратического приема отраженного от объекта (фона) импульсного лазерного излучения на одноэлементное фотоприемное устройство (ФПУ) в общем случае учета амплитудной, поляризационной и временной структуры сигнала записывается в виде [3]:

$$\begin{aligned} & \mathbf{P}_\xi(\alpha_1, \gamma_1; \alpha_2, \gamma_2, t) = \\ & = K \tau_1 \tau_2 \int_{S_{\text{он}}} f(t - (l_1 + l_2)/C) D_1(\theta_1, \varphi_1) D_2(\theta_2, \varphi_2) \times \\ & \times [\beta_{\xi, \varepsilon}(\theta_1, \varphi_1, \theta_2, \varphi_2)] ((\cos \theta_1 \cos \theta_2) / l_1^2 l_2^2) ds, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\mathbf{P}_\xi$  – вектор Стокса падающего на фотоприемник отраженного излучения ( $\xi = 1, 2, 3, 4$ ),  $\alpha_1, \gamma_1$  и  $\alpha_2, \gamma_2$  – углы, определяющие направление из геометрического центра объекта на источник и приемник соответственно в сферической системе координат, связанной с объектом так, что начало координат совпадает с его геометрическим центром, а ось Z является осью симметрии объекта;  $K = K_{\text{по}} \mathbf{P}_\varepsilon D_{\text{по}}^2 / 4\pi t g^2(\gamma_u/2)$ ,  $K_{\text{по}}$  – коэффициент пропускания оптики,  $\mathbf{P}_\varepsilon$  – вектор Стокса излучения лазера ( $\varepsilon = 1, 2, 3, 4$ ),  $D_{\text{по}}$  – диаметр приемного объектива,  $\gamma_u$  – угол расходимости излучения лазера,  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – коэффициенты пропускания атмосферы на пути источник–объект и объект–приемник,  $S_{\text{он}}$  – площадь облучаемой и наблюдаемой поверхности объекта,  $f(t)$  – форма зондирующего импульса,  $t$  – время,  $l_1$  и  $l_2$  – расстояние от некоторой точки M поверхности объекта до источника и приемника соответственно,  $D_1(\theta_1, \varphi_1)$  – отношение силы излучения источника в направлении на точку M к его осевой силе излучения (диаграмма излучения),  $D_2(\theta_2, \varphi_2)$  – отношение

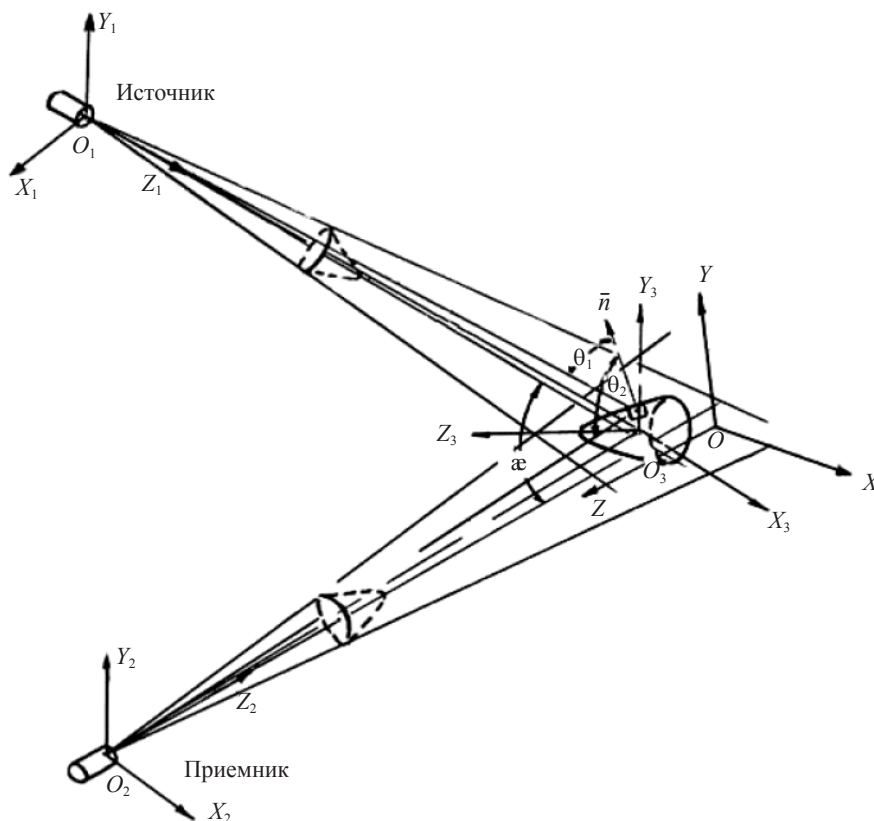


Рис. 2. Система координат и геометрия локации объекта.

чувствительности приемника в направлении на точку  $M$  к его осевой чувствительности (диаграмма приемника),  $\theta_1$ ,  $\varphi_1$  и  $\theta_2$ ,  $\varphi_2$  – зенитный (полярный) и азимутальный углы, определяющие направление нормали к поверхности в точке  $M$  по отношению к источнику и приемнику соответственно,  $\beta_{\xi, \varepsilon}(\theta_1, \varphi_1; \theta_2, \varphi_2)$  – матрица коэффициентов яркости поверхности объекта в точке  $M$ ,  $ds$  – элемент поверхности объекта.

Применительно к условиям локации объекта в дальней зоне, когда  $l_1$  и  $l_2$  оказываются много большими размеров облученной и наблюдаемой поверхности объекта, выражение (1) принимает вид (угловые аргументы в  $\mathbf{P}_{\xi}$ ,  $D_1$ ,  $D_2$  и  $\beta$  для упрощения записи опущены)

$$\mathbf{P}(t) = K_0 \int_{S_{\text{он}}} f(t - (l_1 + l_2)/C) D_1 D_2 [\beta_{\xi, \varepsilon}] \times \cos\theta_1 \cos\theta_2 ds = K_0 [\mathcal{E}_{\xi, \varepsilon}(t)], \quad (2)$$

где  $K_0 = K\tau_1\tau_2/L_1^2L_2^2$ ,  $L_1$  и  $L_2$  – расстояние от источника и приемника до геометрического центра объекта соответственно.

Величина  $[\mathcal{E}_{\xi, \varepsilon}(t)]$ , входящая в выражение (2), является инвариантом сигнала относительно расстояний  $L_1$  и  $L_2$  и определяется как некоторая обобщенная амплитудно-поляризационно-временная эффективная отражающая площадь (ЭОП) объекта (оптический аналог радиолокационной эффективной площади рассеяния) [3].

Формирование яркостных и дальностно-яркостных изображений объектов локатором с матричным ФПУ или локатором с одноэлементным ФПУ, реализующими кадровое сканирование по полю обзора узкими полями, осуществляется на основе регистрируемого излучения каждым пикселом (элементом разрешения), записываемом в виде

$$\Delta \mathbf{P}_{n,m}(t) = K_0 \int_{\Delta S_{n,m}} f(t - (l_1 + l_2)/C) D_1 D_2 [\beta_{\xi, \varepsilon}] \cos\theta_1 \cos\theta_2 ds, \quad (3)$$

где  $n$ ,  $m$  – номер пиксела (элемента) ФПУ по столбцу и строке соответственно;  $\Delta S_{n,m}$  – площадь проекции  $n$ ,  $m$ -го пиксела (элемента) ФПУ на объект наблюдения.

Следует отметить, что для получения на основании выражений (1)–(3) только амплитудных харак-

теристик сигналов  $\mathcal{E}$  в них необходимо принять  $f(t) = 1$  и  $[\beta_{\xi, \varepsilon}] = \beta_{11}$ ; для получения только поляризационных характеристик сигналов ( $[\mathcal{E}_{\xi, \varepsilon}] - f(t) = 1$ ; для получения только временных характеристик сигнала ( $\mathcal{E}(t) - [\beta_{\xi, \varepsilon}] = \beta_{11}$ ).

## 2.2. Описание (модель) формы поверхностей объектов

В большинстве известных моделей описание поверхностей объектов сложной формы осуществляется их дроблением на отдельные характерные составляющие и аппроксимацией последних наиболее близкими к ним поверхностями 1- и 2-го порядков (плоскостями, конусами, сферами, цилиндрами и т. д.). Для ряда объектов, например, высокоскоростных самолетов, имеющих обтекаемые формы, указанные аппроксимации не обеспечивают приемлемой точности расчета сигналов при направленно-рассеивающих и зеркальных покрытиях. Более точное описание таких поверхностей достигается с помощью сплайнов, однако оно встречает определенные трудности в реализации в связи с необходимостью иметь весьма подробные чертежи форм объектов. Практически же в качестве исходных данных для описания поверхностей объектов доступны лишь чертежи (фото) их трех-четырех основных ортогональных проекций (в плане, сбоку, в нос, в хвост).

В настоящей имитационной модели расчета сигналов используется разработанный автором совместно с А.М. Тимофеевым метод “гибкого контура” описания поверхностей объектов сложной формы, более точный, чем первый из указанных выше, и более простой в реализации, чем второй. Суть метода “гибкого контура” заключается в описании поверхности составной части объекта (для самолета – его крыльев, фюзеляжа, киля, колпака и т. д.) поверхностью гибкого контура  $S_{\text{гк}}$ , образованной наиболее приемлемым для данной поверхности базовым контуром  $S_0$ , заданным, например, в плоскости  $XZ$  прямоугольной системы координат, и перемещением  $S_0$  вдоль оси  $Y$  и одновременным его поворотом и деформацией (сжатием, растяжением, смещением) в соответствии с контурами проекций моделируемой поверхности на плоскости  $XY$  и  $ZY$  (рис. 3).

Уравнение поверхности гибкого контура  $S_{\text{гк}}$  может быть записано в следующем параметрическом виде:

$$\begin{aligned} X(P, Y) &= X_{\text{н}}(Y) + \left[ (X_{\text{в}}(Y) - X_{\text{н}}(Y)) (X_0^{\text{max}} - X_0^{\text{min}}) \right] [X_0(P) - X_0^{\text{min}}], \\ Z(P, Y) &= Z_{\text{н}}(Y) + \left[ (Z_{\text{в}}(Y) - Z_{\text{н}}(Y)) (Z_0^{\text{max}} - Z_0^{\text{min}}) \right] [Z_0(P) - Z_0^{\text{min}}], \end{aligned} \quad (4)$$

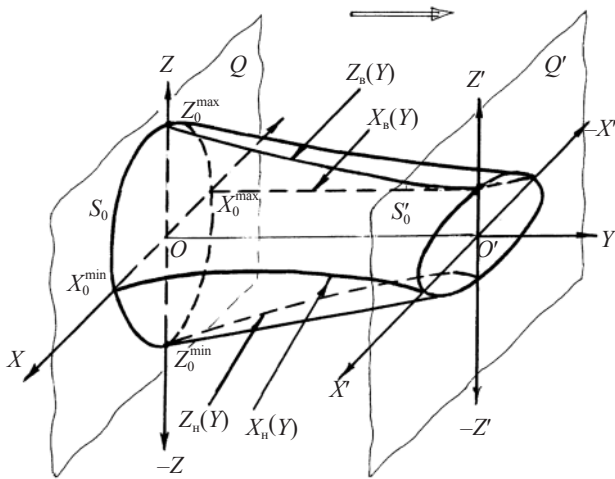


Рис. 3. К методу формирования поверхности “гибкого контура”.

где  $X_0(P)$  и  $Z_0(P)$  – уравнения базового контура  $S_0$  в параметрическом виде ( $P$  – параметр),  $X_b(Y)$  и  $X_n(Y)$  – верхняя и нижняя границы контуров проекций  $S_{ГК}$  на плоскость  $XY$ ,  $Z_b(Y)$  и  $Z_n(Y)$  – соответственно на плоскость  $ZY$ ;  $X_0^{\max}$ ,  $X_0^{\min}$  и  $Z_0^{\max}$ ,  $Z_0^{\min}$  – максимальные и минимальные значения координат точек базового контура по осям  $X$  и  $Y$  соответственно.

Поверхность объекта сложной формы в целом образуется из поверхностей его составляющих путем соответствующих поворотов и перемещений частных систем координат, в которых они заданы, в единую (опорную) систему координат объекта.

Примеры задания базовых контуров и контуров проекций составных частей поверхностей самолетов А-10А и F-16 на основании ортогональных проекций этих самолетов в плане (сверху), в нос и в бок приведены на рис. 4.

### 2.3. Задание рассеивающих свойств покрытий объектов

Вариант модели индикатрис покрытий объектов  $\beta(\theta_1, \theta_2, \chi) = \beta_{11}(\cdot)$ , где  $\chi$  – угол элонгации, разработанный автором совместно с Д.Т. Тирановым для условий лазерной локации в виде аналитических выражений  $\beta_{дн}(\cdot)$  для диффузных и направленно-рассеивающих покрытий и  $\beta_3(\cdot)$  для бликующих (зеркальных) покрытий, приведен в работе [4]. Как  $\beta_{дн}(\cdot)$ , так и  $\beta_3(\cdot)$  состоит из трех слагаемых, описывающих соответственно направленно-рассеивающую (зеркальную), диффузную и малоугловую (при  $\theta_1 > 0^\circ$ , направленную на источник) компоненты. Исходными параметрами модели  $\beta_{дн}(\cdot)$  являются 4 рефлектометрические величины образца покрытия  $\beta_0$ ,  $\rho$ ,  $\beta_{ло}$ ,  $\beta_d$ ; исходными параметрами модели  $\beta_3(\cdot)$  являются 3 рефлектометрические величины  $\rho_z$ ,  $\rho_d$ ,  $\beta_{ло}$ , где  $\beta_0$  – коэффициент яркости при  $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$ ,  $\rho$  – направленно-полусферический коэффициент отражения,  $\rho_z$  и  $\rho_d$  – соответственно коэффициенты зеркального и диффузного отражения,  $\beta_{ло}$  – коэффициент яркости ламбертовской составляющей, измеренный при  $\theta_1 = 0^\circ$  как среднее в интервале  $45^\circ \leq \theta_2 \leq 90^\circ$ ;  $\beta_d$  – коэффициент яркости образца при  $\theta_1 = 0^\circ$ ,  $\theta_2 = 60^\circ$ .

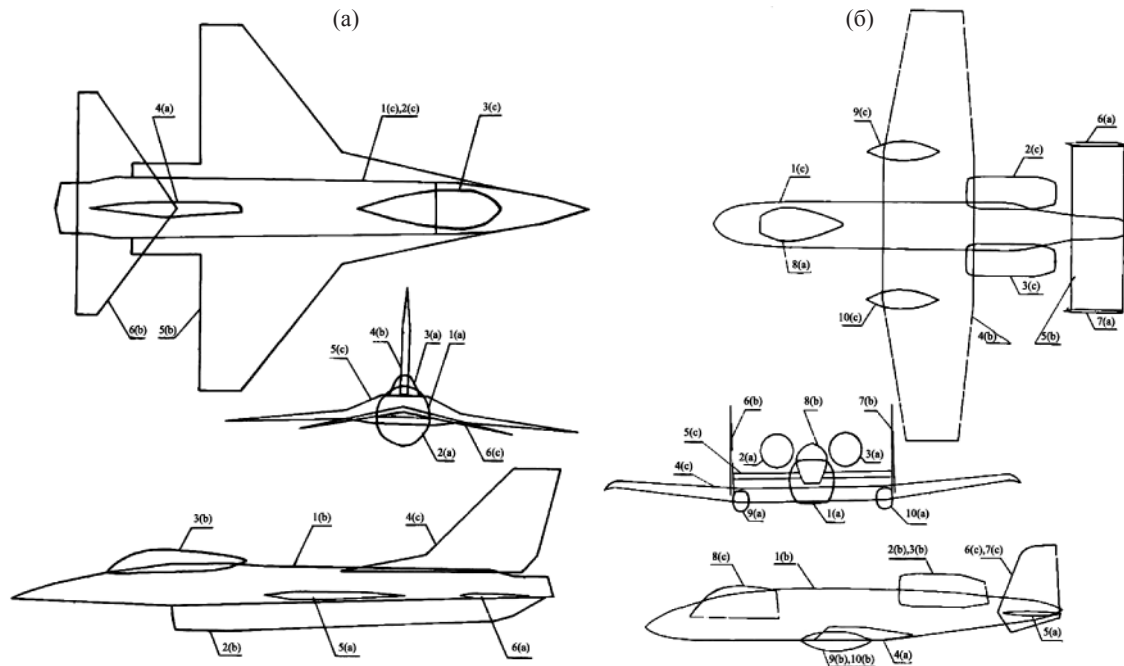


Рис. 4. Базовые и ортогональные контуры проекций составных частей поверхности самолетов А-10А (а) и F-16 (б).

Теоретические и экспериментальные исследования структуры поляризационных матриц  $[\beta_{\xi, \varepsilon}]$  образцов покрытий показали, что значимыми элементами для однородных статически изотропных покрытий, кроме элемента  $\beta_{11} = \beta$ , являются элементы  $\beta_{12} \approx \beta_{21}$ ,  $\beta_{22}$ ,  $\beta_{33}$ ,  $\beta_{34} = -\beta_{43}$  и  $\beta_{44}$ . При нормировке на  $\beta$  они записываются в виде:

$$\begin{aligned} \beta'_{22} &= (\beta - \beta_{\text{дп}}) / \beta, \quad \beta'_{44} = (\beta - \beta_{\text{дк}}) / \beta, \\ \beta'_{21} &= \beta_{21,k} |\beta'_{44}|, \quad \beta'_{31} = \beta_{34,k} |\beta'_{44}|, \\ \beta'_{33} &= \pm \sqrt{(\beta'_{22})^2 - (\beta'_{21})^2} \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\beta_{\text{дп}}$  и  $\beta_{\text{дк}}$  – соответственно коэффициенты яркостей деполаризованной и некогерентной (декоррелированной) составляющих, знак “+” – для  $\chi \leq \chi_{\text{Б}}$  ( $\chi_{\text{Б}}$  – угол Брюстера), знак “–” – для  $\chi \geq \chi_{\text{Б}}$ .

При этом

$$\begin{aligned} \beta'_{21,k} &= (\beta_s - \beta_p) / (\beta - \beta_{\text{дк}}), \\ \beta'_{34,k} &= \beta_s \beta_p \sin \Psi / (\beta - \beta_{\text{дк}}), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\beta_s$ ,  $\beta_p$  – соответственно  $s$ - и  $p$ -компоненты коэффициента яркости когерентной (коррелированной) составляющей, причем индекс  $p$  относится к плоскости элонгации, а  $s$  – перпендикулярна к ней,  $\Psi$  – сдвиг фаз между  $s$ - и  $p$ -компонентами при отражении.

Эксперимент показал, что  $\beta_{\text{дп}}$  и  $\beta_{\text{дк}}$  составляют некоторую долю от величины  $\beta_{\text{ло}}$ , причем для материалов с преобладающим поверхностным рассеиванием  $\beta_{\text{дп}} \leq 0,2\beta_{\text{ло}}$ ,  $\beta_{\text{дк}} \leq 0,4\beta_{\text{ло}}$ , а для материалов с преобладающим объемным рассеиванием  $\beta_{\text{дп}} \approx \beta_{\text{ло}}^{5/4}$ ,  $\beta_{\text{дк}} \approx \beta_{\text{ло}}^{9/8}$ .

Выражения для индикатрис элемента  $\beta'_{21,k}$  могут быть записаны через показатели преломления  $n_0$  и поглощения  $m_0$  материала из формул Френеля:

$$\beta'_{21,k} = \frac{2(n_0^2 - \sin^2 \chi/2)^{1/2} (\sin^2 \chi/2) (\text{tg} \chi/2)}{n_0^2 - \sin^2 \chi/2 + (\sin^2 \chi/2) (\text{tg}^2 \chi/2)} \quad (7)$$

при  $n_0 \gg m_0$  (диэлектрики),

$$\beta'_{21,k} = \frac{2n_0 (\sin \chi/2) (\text{tg} \chi/2)}{n_0^2 + m_0^2 + (\sin^2 \chi/2) (\text{tg}^2 \chi/2)}$$

при  $m_0^2 - n_0^2 \gg \sin^2 \chi/2$  (металлы).

Оценка погрешностей данного модельного описания индикатрис материалов покрытий показала, что для направленно-рассеивающих покрытий она не превышает 15–20%, а для зеркально-отражающих покрытий – 50–70%.

## 2.4. Процедура счета сигналов

В основе процедуры счета сигналов и отражательных характеристик объектов и фонов лежит модифицированный фасетно-лучевой метод [5], обеспечивающий разбиение поверхности объекта (фона) на элементарные площадки (фасеты) с размерами, адаптируемыми под ее кривизну в данной зоне и характер рассеяния покрытия, и расчет сигнала от облучаемых и наблюдаемых системой фасет. В случае описания поверхности методом “гибкого контура” алгоритм разбиения поверхности на элементарные площадки заключается в следующем. Базовые контуры и контуры проекций поверхностей составных частей объекта задаются в дискретном виде. Дискретное задание контуров приводит к дискретному заданию поверхности объекта в виде набора конечного числа точек. Задающие поверхность точки используются для образования системы плоских элементарных площадок (фасет), покрывающих всю поверхность. Элементарные площадки получают путем соединения ближайших трех (четырёх) точек – двух на одной стороне с одной (или двумя) ближайшей на другой – и имеют, таким образом, треугольную или трапециевидальную форму.

Аппроксимация поверхности объекта (фона) набором “плоских” элементарных площадок приводит к некоторой погрешности в оценке величины сигналов. Причиной погрешности является замена реальной площадки, обладающей некоторым “изгибом”, на плоскую. При этом очевидно, что чем больше “изгиб”, тем больше погрешность и наоборот. “Изгиб” реальной элементарной площадки между точками, ее образующими, можно определить углами  $\theta$  между нормальными к этим точкам. Очевидно, что при заданном типе покрытия существует такое значение угла  $\theta = \theta_0$ , при котором ошибка в определении, например, ЭОП элементарной площадки будет достаточно мала. Следовательно, базовый контур и контуры проекций каждой составной части поверхности объекта на плоскости  $XU$  и  $ZU$  должны быть представлены в виде системы точек таким образом, чтобы углы  $\theta$  между вершинами образующихся при этом фасет не превышали значения  $\theta_0$ .

Значение  $\theta_0$  в случае однопозиционной локации выбирается следующим образом. Сначала выбирается допустимое значение погрешности ЭОП элементарной площадки, например 5%. Затем по диаграмме  $\beta_{\text{эф}}(\theta)$  материала покрытия на участке максимальной крутизны диаграммы определяется соответствующий выбранной погрешности интервал углов  $\Delta\theta$ , который принимается за  $\theta_0$ .

Для расчета изображений объектов и объектов на фонах (яркостных  $\mathcal{E}(x, y)$ , поляризационных

$[\mathcal{E}_{\xi, \varepsilon}(x, y)]$  и дальностно-яркостных  $\mathcal{E}(x, y, t)$  необходимо знать углы  $\theta_{1, ij}$  и  $\theta_{2, ij}$  между направлениями нормалей к каждой из фасет и направлениями излучения и приема, площади фасет  $\Delta S_{ij}$ , индикатрисы их покрытий  $\beta(\theta_1, \theta_2)_{ij}$  и расстояния  $l_{1, ij}$  и  $l_{2, ij}$ .

Вектор нормали  $ij$ -й фасеты  $\mathbf{N}_{ij}$  определяется через произведение векторов  $\mathbf{N}_{1ij}$  и  $\mathbf{N}_{2ij}$ , начала которых расположены в одной из произвольных вершин фасеты, а концы в двух других ее вершинах, и находится из выражения (индексы  $ij$  далее опускаются):

$$\mathbf{N} = [\mathbf{N}_1 \times \mathbf{N}_2] = N_x \mathbf{X}_0 + N_y \mathbf{Y}_0 + N_z \mathbf{Z}_0, \quad (8)$$

где

$$\mathbf{N}_1 = (X_c - X_a) \mathbf{X}_0 + (Y_c - Y_a) \mathbf{Y}_0 + (Z_c - Z_a) \mathbf{Z}_0,$$

$$\mathbf{N}_2 = (X_b - X_a) \mathbf{X}_0 + (Y_b - Y_a) \mathbf{Y}_0 + (Z_b - Z_a) \mathbf{Z}_0,$$

$\mathbf{X}_0, \mathbf{Y}_0, \mathbf{Z}_0$ , – орты вектора  $\mathbf{N}$  фасеты;  $X_a, Y_a, Z_a, X_b, Y_b, Z_b, X_c, Y_c, Z_c$  – координаты вершин фасеты.

При этом проекции вектора  $\mathbf{N}$  фасеты на оси  $X, Y, Z$  записываются в виде:

$$\begin{aligned} N_x &= (Y_c - Y_a)(Z_b - Z_a) - (Z_c - Z_a)(Y_b - Y_a), \\ N_y &= (Z_c - Z_a)(X_b - X_a) - (X_c - X_a)(Z_b - Z_a), \\ N_z &= (X_c - X_a)(Y_b - Y_a) - (Y_c - Y_a)(X_b - X_a). \end{aligned} \quad (9)$$

Углы  $\theta_1$  и  $\theta_2$  каждой фасеты определяются из выражений:

$$\theta_1 = \arccos N_{из}/|\mathbf{N}|, \quad \theta_2 = \arccos N_{пр}/|\mathbf{N}|, \quad (10)$$

где  $N_{из}$  и  $N_{пр}$  – проекции вектора  $\mathbf{N}$  фасеты на направление излучения и приема соответственно,  $|\mathbf{N}| = \sqrt{N_x^2 + N_y^2 + N_z^2}$  – модуль вектора нормали  $\mathbf{N}$  фасеты.

Площадь фасеты находится из выражения (формулы Герона):

$$\Delta S_{i,j} = \frac{1}{2} \sqrt{P_\Delta (P_\Delta - a)(P_\Delta - b)(P_\Delta - c)}, \quad (11)$$

где  $P_\Delta$  – полупериметр,  $a, b, c$  – стороны треугольника фасеты.

Очевидно, что не все фасеты поверхности объекта участвуют в формировании сигнала, а только те, которые облучаются и наблюдаются в данном акте локации. Выявление последних в процессе счета сигнала заключается в восстановлении от каждой из фасет лучей на источник и приемник и использовании в формировании сигнала только тех из них, которые укладываются в апертуры полей излучения и приема (с соответствующими весовыми коэффициентами), имеют углы  $\theta_1$  и  $\theta_2 \leq \pi$  и не затеняются другими на пути фасета–источник и фасета–приемник. Проверка фасет на затенение осуществляется

путем определения – имеют ли место пересечения лучи фасета–источник и фасета–приемник с поверхностью объекта (фона) в других точках, и если имеют, то за незатененные принимаются те фасеты, для которых расстояния от источника до фасеты  $l_{1ij}$  и от приемника до фасеты  $l_{2ij}$  являются наименьшими.

Формирование яркостных и дальностно-яркостных изображений ФЦО, отображаемых приемной системой с равномерным шагом  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  по координатам  $(x, y, z)$ , осуществляется путем осреднения значений сигналов от фасет, попавших в каждую из ячеек разрешения:  $\Delta x \Delta y$  для яркостных полей и  $\Delta x \Delta y \Delta z$  для дальностно-яркостных полей.

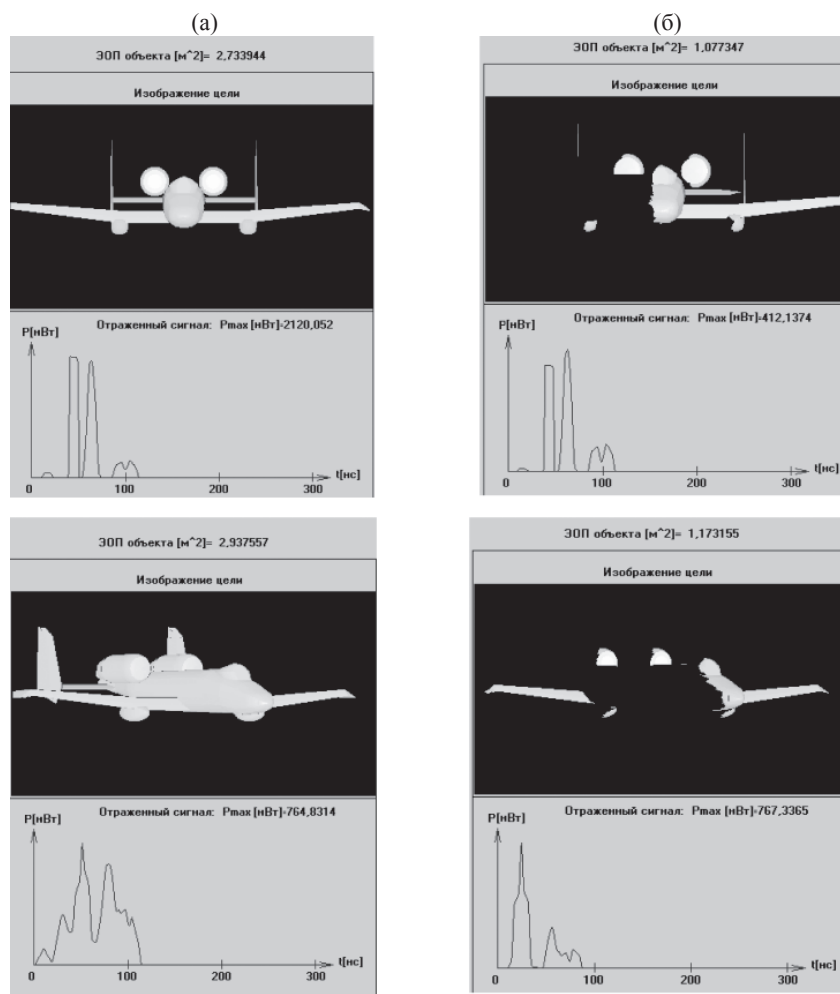
Описанные выше алгоритмы расчета сигналов (отражательных характеристик) объектов были реализованы в виде программы MLM.

### 3. Результаты моделирования отражательных характеристик самолетов-целей

На основе описанного выше метода и реализующей его программы MLM был проведен большой объем расчетных исследований амплитудных, поляризационных, временных, пространственных и пространственно-временных отражательных характеристик различных типов самолетов с различными покрытиями (от диффузного до зеркального) на типовых длинах волн лазерного излучения для условий одно- и двухпозиционной локации.

В качестве примера на рис. 5 и рис. 6 приведены результаты расчетов ЭОП, изображений и временных характеристик отраженных сигналов соответственно самолета А-10А с покрытием КО-856 (защитное) и самолета F-16 с аналогом штатного покрытия для условий однопозиционной и двухпозиционной локации на длине волны лазерного излучения 1,06 мкм при длительности зондирующего импульса  $\tau_{и} = 10$  нс. На рис. 7 приведены параметры модели индикатрис, графики и таблицы диаграмм обратного рассеяния (ДОР) указанных покрытий, представленных в виде их угловой зависимости эффективных коэффициентов яркости ( $\beta_{эф} = \beta \cos \theta$ ). В случае однопозиционной локации облучение (и наблюдение) самолетов производилось в лоб и под углом  $30^\circ$  к их оси (т. е. для курсовых углов  $0^\circ$  и  $30^\circ$ ). В случае двухпозиционной локации излучатель устанавливался под углом  $30^\circ$  справа от оси самолета, а приемник – слева от оси под углами  $0^\circ$  и  $30^\circ$ , при этом углы крена и тангажа самолета, как и в однопозиционном варианте, равнялись нулю.

На рис. 8 приведены яркостное (а) и дальностное (б) изображения самолета F-16 (ракурса “в плане”) с аналогом штатного покрытия для условия одно-



**Рис. 5.** ЭОП, изображение и отраженный временной сигнал самолета А-10А для случаев однопозиционной (а) и двухпозиционной (б) лазерной локации.

позиционной локации на длине волны излучения 1,06 мкм и длительности импульса  $\tau_{\text{и}} = 10$  нс.

Сопоставление результатов расчетов отражательных характеристик объектов с результатами экспериментальных данных, полученных методом физического моделирования и в натурных условиях, показали высокую степень их соответствия. Так, например, среднеквадратическая погрешность математического имитационного моделирования ЭОП самолетов с диффузным покрытием не превысила 5%, с направленно-рассеивающим покрытием – 10–15%, с зеркальным покрытием – 20–30% [2].

### Заключение

В качестве критериев оценки информативности признаков объектов в задачах обнаружения предпочтительно использовать достигаемую на их основе вероятность правильного обнаружения объектов с допустимой нормой ложных тревог, в задаче измерения и наведения – соответственно точность изме-

рения и точность наведения с заданной достоверностью, в задаче распознавания – вероятность правильного распознавания.

Предлагаемый метод оценки информативности признаков объектов в задачах лазерной локации включает имитационное моделирование условий локации, данных об отраженных регистрируемых сигналах, процедуры обработки сигналов и выявления рабочих признаков, а также процедуру оценки их информативности в соответствии с адекватным решаемой задаче критерием.

Базовая составляющая этого метода – математическая имитационная модель расчета отраженных регистрируемых сигналов, реализованная на основе метода “гибкого контура” описания конфигурации поверхности объектов, параметрической модели индикатрис материалов их покрытий и модифицированного фасетно-лучевого метода счета сигналов, обеспечивает достаточно высокую достоверность воспроизведения всех видов сигналов (амплитудных, поляризационных, временных, про-

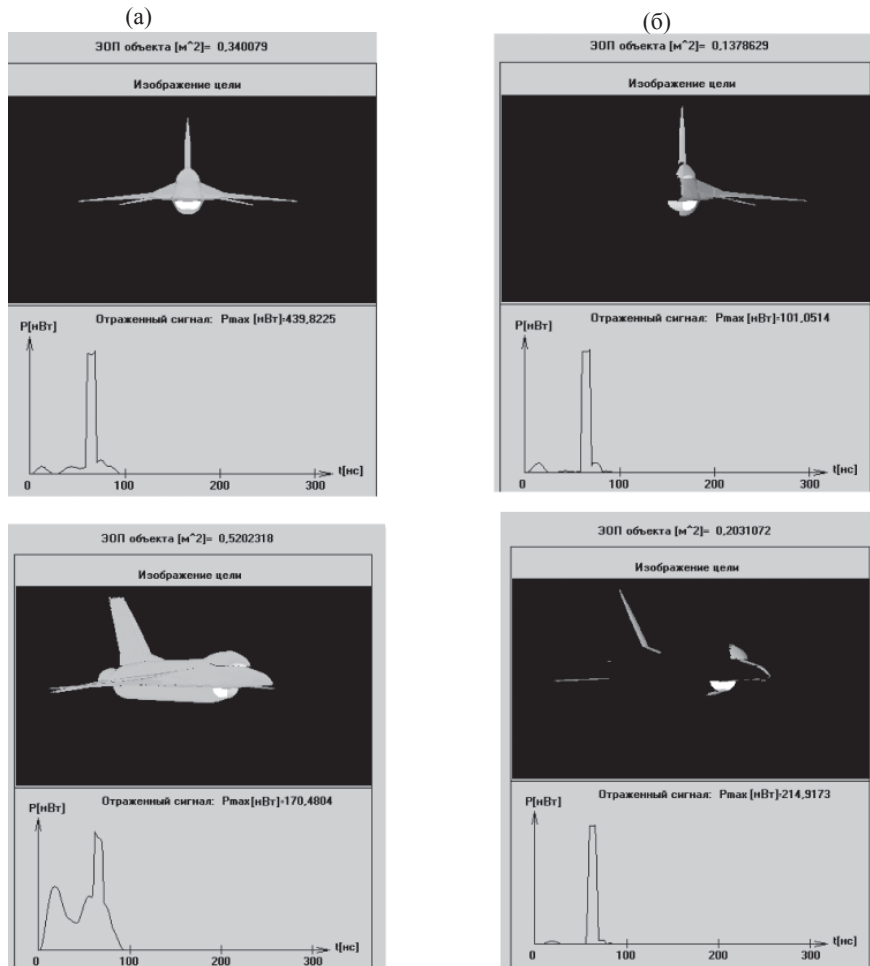


Рис. 6. ЭОП, изображение и отраженный временной сигнал самолета F-16 для случаев однопозиционной (а) и двухпозиционной (б) лазерной локации.

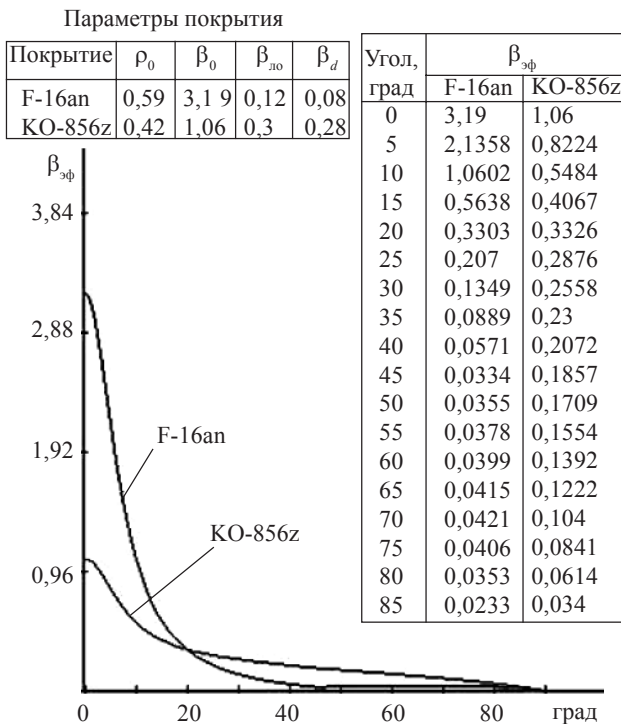


Рис. 7. Параметры модели индикатрис, графики и таблица ДОР покрытий самолетов А-10А (КО-856z) и F-16 (аналог штатного) на длине волны  $\lambda = 1,06$  мкм.

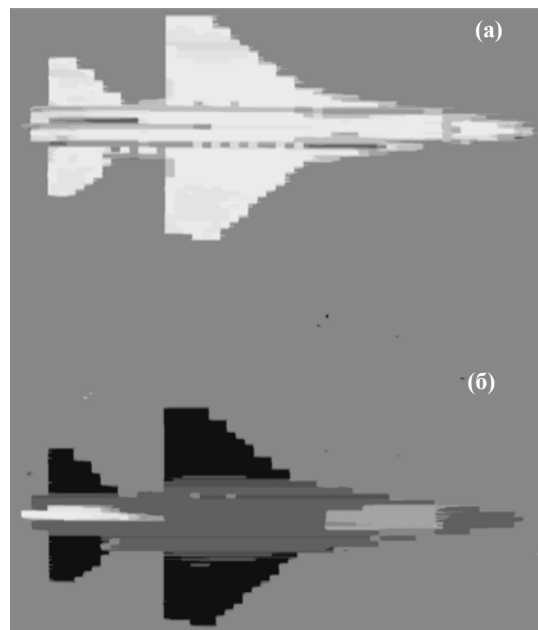


Рис. 8. Яркостное (а) и дальностное (б) изображения самолета F-16 (ракурса “в плане”) с аналогом штатного покрытия для условия однопозиционной локации на длине волны излучения 1,06 мкм и длительности импульса  $\tau_{и} = 10$  нс.

ных и пространственно-временных) для условий одно- и двухпозиционной локации.

Описанная модель задания условий локации и расчета сигналов в сочетании с приемлемой моделью процедуры обработки сигнала и решающего правила локатора может обеспечить достаточно высокую достоверность оценки информативности тех или иных используемых признаков объектов в качестве рабочих, а следовательно, оптимизировать параметры системы и характеристики ее функционирования в заданных условиях применения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горелик А.Л., Гуревич И.Б., Скрипкин В.А. Современное состояние проблемы распознавания. М.: Радио и связь, 1985. 160 с.
2. Непогодин И.А. Отражательные характеристики и информативность признаков (сигнатур) объектов и фонов в лазерной локации // НПО ГИПО. Научно-технический сборник / Под ред. Мирумянца С.О. Казань: Дом печати, 1997. Ч. II. С. 428–456.
3. Непогодин И.А. Основные виды отражательных характеристик тел в направлении приема и методы их измерения в оптике // Импульсная фотометрия. Л.: Машиностроение, 1981. В. 7. С. 124–131.
4. Непогодин И.А., Тиранов Д.Т., Пешаков А.А. Модель индикатрис отражения материалов при направленной подсветке // Импульсная фотометрия. Л.: Машиностроение, 1986. В. 9. С. 64–66.
5. Непогодин И.А., Матшин Р.М., Курочкина Е.Я. Фасетно-лучевой метод расчета энергетических отражательных характеристик объемных тел // Радиотехника. 1984. № 4. С. 90–92.

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ МУЛЬТИПЛЕКСОРОВ/ДЕМУЛЬТИПЛЕКСОРОВ С ДИФРАКЦИОННЫМИ РЕШЕТКАМИ

© 2007 г. Н. А. Кулакова, канд. физ.-мат. наук; С. О. Мирумянц, доктор физ.-мат. наук

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

При разработке новых схем мультиплексоров/демультиплексоров (МП/ДМП) с дифракционными решетками (ДР) возникает проблема выбора оптимальной конструкции. Предложена методика, позволяющая проанализировать эффективность вариантов МП/ДМП на основе плоской и вогнутой ДР. Представлены результаты расчета эффективности одномодовых десятиканальных МП/ДМП с вогнутой дифракционной решеткой (ВДР) на область спектра 1,24–1,33 мкм. Проведено сравнение результатов расчета эффективности МП/ДМП с плоской и вогнутой решетками на область 1,53–1,57 мкм.

Коды OCIS: 090.1970, 060.1810.

Поступила в редакцию 19.06.2006.

В работах [1, 2] были рассмотрены несколько конструктивных схем объемных мультиплексоров/демультиплексоров (МП/ДМП). Однако для реального использования в волоконно-оптических линиях связи МП/ДМП с дифракционными решетками (ДР) должны представлять собой полихроматоры с оптимизированными оптическими схемами и совершенными системами диспергирования и фокусировки, обеспечивающими минимизацию абберационных искажений и большую величину линейной дисперсии. Поэтому выбор оптимального варианта конструкции МП/ДМП с решетками возможен только при наличии предлагаемой методики, позволяющей оценить эффективность работы МП/ДМП в целом.

### Методика оценки эффективности работы волоконно-оптического объемного мультиплексора/демультиплексора с плоской или вогнутой решеткой

Эффективность работы оптической системы МП/ДМП с решеткой  $\eta$  определяется в основном следующими параметрами: характером вводимого в МП/ДМП излучения, энергетическими свойствами решетки, абберациями оптической системы МП/ДМП, возникающими потерями на границе раздела сред системы МП/ДМП и в материале МП/ДМП.

Рассмотрим эффективность МП/ДМП с решеткой в случае, когда в МП/ДМП вводится по волокну лазерное излучение с длиной волны  $\lambda$ . Изменение амплитуды вводимого лазерного излучения  $E$  в любом поперечном сечении радиуса  $r$  описывается гауссовой функцией [3]:

$$E = \exp(-r^2/w^2), \quad (1)$$

где  $w$  – расстояние от оси пучка, на котором амплитуда поля уменьшается в  $e$  раз по сравнению с амплитудой на оси пучка ( $e = 2,7183$ ). По мере уда-

ления от входного волокна пучок расширяется и расстояние  $w$  от оси пучка изменяется по закону

$$w^2(x) = w_0^2 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda x}{\pi w_0^2} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где  $w_0$  – радиус сечения в “перетяжке” пучка,  $x$  – расстояние до ДР. Ранее в [2] было экспериментально установлено, что  $w_0$  можно брать равным радиусу сердцевинки волокна.

Для примера на рис. 1 показана схема работы МП/ДМП с вогнутой дифракционной решеткой (ВДР). Начало системы координат  $O$  совпадает с вершиной поверхности ВДР. Ось  $Ox$  направлена по нормали к поверхности решетки, ось  $Oz$  – касательная к штриху ВДР в ее вершине.

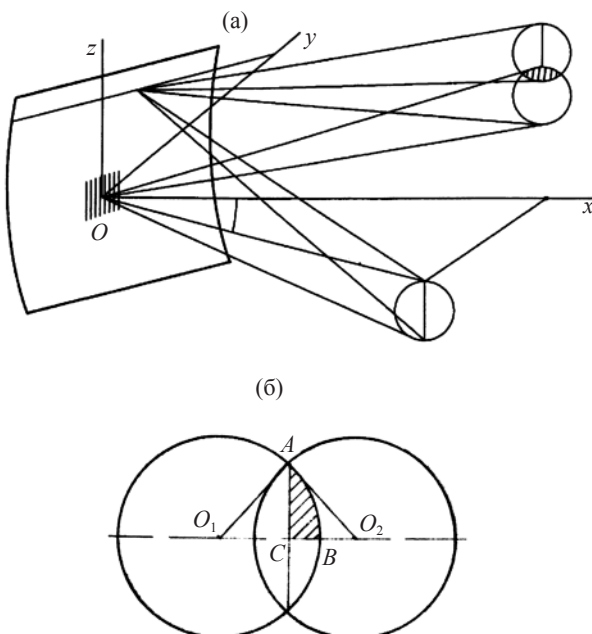


Рис. 1. МП/ДМП с ВДР: а – схема работы, б – наложение изображения входного волокна на выходное.

Энергетические характеристики решетки зависят от материала решетки и формы профиля штриха [4]. Влияние формы профиля штриха на энергетические характеристики решетки значительнее всего в направлении дисперсии ДР (ось  $Oy$ ). Из aberrаций оптической системы МП/ДМП наиболее значительным является астигматизм в направлении оси  $Oz$ .

В рассматриваемых МП/ДМП используются плоские и вогнутые ДР с алюминиевым покрытием. Метод расчета энергетических характеристик ВДР с использованием метода решения задачи дифракции на плоской решетке и методов геометрической оптики предложен нами в работе [5]. Так как метод расчета энергетических характеристик решеток, разработанный в [5, 6], не позволяет учитывать свойства материала ДР, здесь свойства материала учитываются через его коэффициент отражения. Обозначим через  $\rho_1$  коэффициент отражения напыленного на подложку алюминия (значение  $\rho_1$  при нормальном падении для различных длин волн можно найти в [7]). При расчете энергетических характеристик решетки рассматривается первый порядок дифракции и длина волны падающего излучения в объеме моноблока с учетом показателя преломления материала моноблока.

Обозначим через  $\rho_2$  часть энергии, которая попадает в выходное волокно после дифракции на решетке с учетом дифракционной эффективности ВДР  $\rho_{вдр}$ :

$$\rho_2 = \frac{\int_{-0,5A}^{0,5A} \rho_{вдр}(y) \exp\left(-\frac{2y^2}{w_y^2}\right) dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{2y^2}{w_y^2}\right) dy}, \quad (3)$$

где  $A$  – апертура ДР,  $w_y$  – проекция радиуса гауссоиды на ось  $Oy$ ,  $\rho_{вдр}$  – дифракционная эффективность ВДР. Для плоской ДР формула аналогична (3), только  $\rho_{вдр}$  заменяется  $\rho_{пл}$  – дифракционной эффективностью плоской ДР.

В направлении штрихов решетки влияние дифракции на решетке учитывается по взаимному расположению изображения входного волокна относительно выходного. Вертикальная составляющая aberrации  $\delta z'_a$ , соответствующая астигматизму, определяется по формуле [8]:

$$\rho_3 = \frac{2r^2 \int_0^z \arccos\left(\frac{K'z}{2r_b}\right) \exp\left(-\frac{2z^2}{w_z^2}\right) dz - K' \int_0^z z \sqrt{r_b^2 - \frac{(K'z)^2}{4}} \exp\left(-\frac{2z^2}{w_z^2}\right) dz}{\pi r_b^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{2z^2}{w_z^2}\right) dz}, \quad (9)$$

где  $w_z$  – проекция радиуса гауссоиды на ось  $Oz$ .

$$\delta z'_a = K'z, \quad (4)$$

где  $K'$  – коэффициент астигматизма.

Из-за поперечной aberrации на ВДР изображение входного волокна на выходе из МП/ДМП смещено относительно выходного на расстояние  $l = O_1O_2$  ( $O_1$  – центр изображения сердцевинки входного волокна,  $O_2$  – центр выходного) (рис. 1):

$$l = \delta z'_a.$$

При  $l_{\max} = 2r_b$  наблюдается максимальное смещение ( $r_b$  – радиус сердцевинки волокна), при котором осуществляется ввод излучения. Из (4) можно определить максимальное значение координаты  $z_{\max}$ , при котором осуществляется ввод излучения:

$$z_{\max} = 2r_b/K'. \quad (5)$$

Для оценки эффективности ввода определяется общая площадь  $S$  двух окружностей, одна из которых – изображение входного волокна, а другая – выходного волокна. Общая площадь двух окружностей  $4S_{ABC}$  (рис. 1). В свою очередь

$$S_{ABC} = S_{\text{сект.}AO_1B} - S_{\Delta AO_1C},$$

а площадь сектора  $AO_1B$  [9]

$$S_{\text{сект.}AO_1B} = \frac{\theta r_b^2}{2}, \quad (6)$$

где  $\theta = \angle AO_1B$ .

Из  $\Delta AO_1C$  следует, что

$$\theta = \arccos\left(\frac{l}{2r_b}\right)$$

и площадь  $\Delta AO_1C$

$$S_{\Delta AO_1C} = 0,25l\sqrt{r_b^2 - (0,5l)^2}. \quad (7)$$

Используя формулы (6), (7), находим

$$S = 2 \arccos\left(\frac{l}{2r_b}\right) r_b^2 - l\sqrt{r_b^2 - (0,5l)^2}. \quad (8)$$

Подставляя в выражение (8)  $l = K'z$  и учитывая, что энергия излучения сосредоточена в гауссоиде, а не по всей апертуре равномерно, получаем, что нормированная доля энергии, которая попадает в выходное волокно, с учетом aberrаций составит

Коэффициент пропускания  $\rho_4$  на границе раздела сред для нормального падения волны на границу можно оценить как [10]

$$\rho_4 = \frac{4n_1n_2}{(n_1 + n_2)^2}, \quad (10)$$

где  $n_1, n_2$  – показатели преломления материалов.

Коэффициент пропускания в среде системы МП/ДМП [11]

$$\rho_5 = 10^{-\mu_a l_x}, \quad (11)$$

где  $\mu_a$  – показатель ослабления, а  $l_x$  – величина оптического пути в сантиметрах.

Эффективность работы МП/ДМП в целом определяется произведением:

$$\eta = \prod_{i=1}^5 \rho_i, \quad (12)$$

где  $\rho_i$  – сомножители, определенные выше. Можно использовать коэффициенты пропускания  $T_i$ , определяемые как

$$T_i = -10 \lg(\rho_i),$$

где  $\rho_i$  – коэффициенты, входящие в выражение (12). Зная  $T_i$ , можно найти суммарный коэффициент пропускания:

$$T = \sum_{i=1}^5 T_i. \quad (13)$$

### Зависимость эффективности одномодовых мультиплексоров/демультиплексоров для области спектра 1,24–1,33 мкм от числа штрихов вогнутой дифракционной решетки

МП/ДМП с ВДР представляет собой моноблок (рис. 2), на один торец которого приклеиваются входные и выходные волокна, а на другой наносится копия нарезной ВДР с неравноотстоящими штрихами. Диаметр одномодовых волокон устройства  $d_b = 9$  мкм. Выбор нарезной ВДР связан с ее высокой дифракционной эффективностью, а также возможностью качественного копирования, что необходимо при серийном изготовлении устройств. Рассчитаны устройства с ВДР, имеющими частоту  $N = 600, 300, 150$  мм<sup>-1</sup> и апертуру  $A = 9, 18, 36$  мм. Радиусы кривизны решетки  $R$  составляют соответственно 32, 64, 128 мм, длина моноблока приблизительно равна радиусу кривизны ВДР.

В табл. 1 представлены коэффициенты астигматизма  $K'$ , размеры поперечной aberrации  $\delta z'_a(4)$ ,  $z_{\max}$  (5), значения  $\rho_2, \rho_3$ . Эффективность  $\rho_2$  ВДР, имеющих число штрихов  $N = 600, 300$  и  $150$  мм<sup>-1</sup>, составляет примерно 0,6, 0,5 и 0,3 соответственно.

Если оценивать абберационные характеристики ВДР  $\rho_3$ , то для решетки с числом штрихов  $N = 150$  мм<sup>-1</sup> для всех каналов  $z_{\max} = A$  во всей рассматриваемой области спектра. Для ВДР с числом штрихов  $N = 600$  мм<sup>-1</sup> это имеет место для двух каналов:  $z_{\max} = A$  при  $\lambda = 1,28$  и  $1,29$  мкм; для ВДР с числом штрихов  $N = 300$  мм<sup>-1</sup> – для семи каналов. Для ВДР с числом штрихов  $N = 600$  мм<sup>-1</sup> максимальное значение параметра  $\rho_3 = 0,75$  для центрального канала, а минимальное значение  $\rho_3 = 0,2$  для крайних каналов.

На рис. 3 показан график зависимости эффективности  $\eta = \rho_2 \rho_3$  для ВДР с различным числом штрихов.

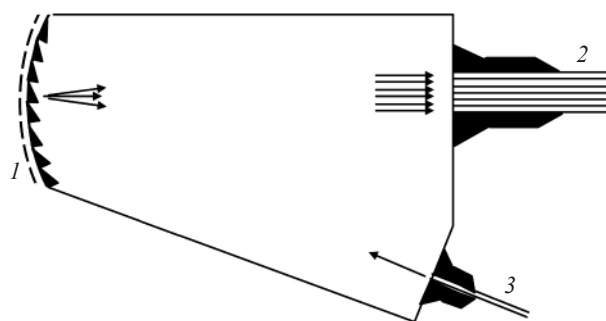


Рис. 2. Принципиальная схема волоконно-оптического блока МП/ДМП с ВДР. 1 – дифракционная решетка, 2 – выходное волокно, 3 – входное волокно.

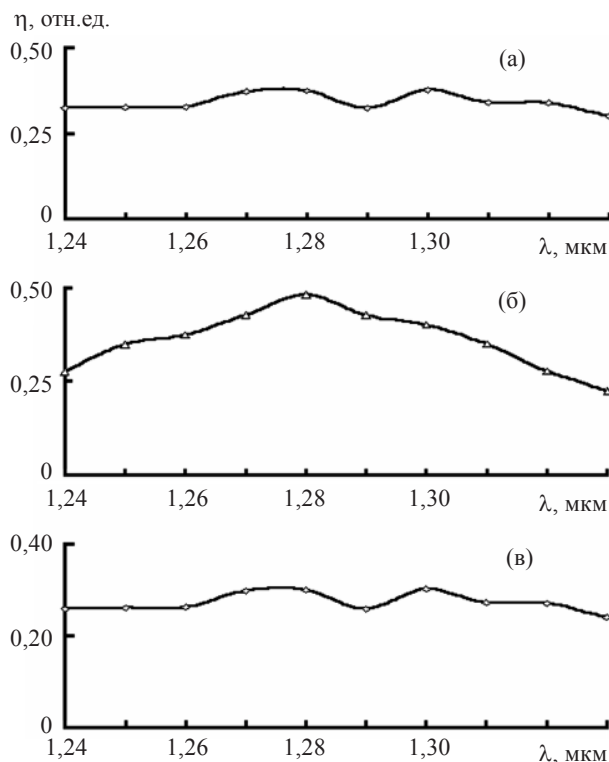


Рис. 3. Эффективность МП/ДМП с ВДР. а – 600 мм<sup>-1</sup>, б – 300 мм<sup>-1</sup>; в – 150 мм<sup>-1</sup>.

Таблица 1. Эффективность работы МП/ДМП с ВДР в области спектра 1,24–1,33 мкм

Параметры	$\lambda, \text{ мкм}$												
	1,24	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31	1,32	1,33			
ВДР $N = 600 \text{ мм}^{-1}$ $A = 9 \text{ мм}$	$K'$	-0,0042	-0,0032	-0,0021	-0,0011	0,001	0,0009	0,002	0,003	0,004	0,0051		
	$\delta z'_a$	-0,0378	-0,0288	-0,0099	-0,0099	0,009	0,0081	0,018	0,027	0,036	0,0459		
	$z_{\text{max}}$	2,1429	2,8125	4,2857	8,1818	9	9	4,5	3	2,25	1,7647		
	$P_3$	0,2139	0,2778	0,4099	0,6836	0,7261	0,7525	0,4279	0,2953	0,2242	0,177		
$R = 32 \text{ мм}$	$P_2$	0,6446	0,6409	0,6371	0,6332	0,6293	0,6253	0,6212	0,6171	0,6129	0,6086		
	$K'$	-0,0007	-0,0005	-0,0004	-0,0002	0,000	0,0002	0,0003	0,0005	0,0007	0,0009		
	$\delta z'_a$	-0,0126	-0,009	-0,0072	-0,0036	0,000	0,0036	0,0054	0,009	0,0126	0,0162		
	$z_{\text{max}}$	12,857	18	18	18	18	18	18	18	12,857	10		
$A = 18 \text{ мм}$	$P_3$	0,5752	0,7261	0,7788	0,8863	1,0	0,8863	0,8322	0,7261	0,5752	0,4667		
	$P_2$	0,4786	0,4793	0,4799	0,4804	0,4808	0,4811	0,4814	0,4815	0,4816	0,4816		
	$K'$	0,0001	0,0001	0,0001	0,000	0,0000	0,000	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0002		
	$\delta z'_a$	0,0036	0,0036	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,0036	-0,0036	-0,0036	-0,0072		
$A = 36 \text{ мм}$	$z_{\text{max}}$	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36		
	$P_3$	0,8863	0,8863	0,8863	1	1	1	0,8863	0,8863	0,8863	0,7788		
	$P_2$	0,2919	0,2938	0,2957	0,2976	0,2995	0,2919	0,3013	0,3048	0,3066	0,3083		
	$P_1$												

хов. МП/ДМП с ВДР с числом штрихов  $N = 150 \text{ мм}^{-1}$  имеет самые большие потери, так как в центре спектральной области  $\eta \approx 0,3$  и по краям  $\eta \approx 0,25$ . МП/ДМП с ВДР с числом штрихов  $N = 600 \text{ мм}^{-1}$  имеет соответственно  $\eta \approx 0,5$  и  $\approx 0,1$ . Минимальные потери имеет устройство с ВДР с числом штрихов  $N = 300 \text{ мм}^{-1}$ : эффективность в центре  $\eta \approx 0,5$  (такая же, как у ВДР с  $N = 600 \text{ мм}^{-1}$ ), а по краям  $\eta \approx 0,25$  (как у ВДР с  $N = 150 \text{ мм}^{-1}$ ).

В результате анализа работы МП/ДМП с ВДР, имеющими  $N = 150, 300, 600 \text{ мм}^{-1}$ , оказывается, что предпочтительным является вариант МП/ДМП с ВДР с числом штрихов  $N = 300 \text{ мм}^{-1}$ .

### Сравнение эффективности одномодовых мультиплексоров/демультиплексоров для области спектра 1,53–1,57 мкм с плоской и вогнутой решетками

Проведем сравнение эффективностей десятиканальных МП/ДМП на основе ВДР и плоской ДР с алюминиевым покрытием и числом штрихов  $N = 600 \text{ мм}^{-1}$  по изложенной выше методике.

При вычислении коэффициента пропускания  $\rho_5$  в среде системы МП/ДМП взяты значения для стекловидной второй категории ( $\mu_A = 0,0007$ ) [12].

В табл. 2 приведены результаты оценки эффективности работы МП/ДМП для схем с плоской ДР и ВДР. Значения коэффициентов  $T_i$  даны для крайних волокон (№ 1 и № 10) и для средних (№ 5 и № 6). Хотя характер абберационных искажений в схемах с плоской ДР и ВДР несколько различен, абберационные характеристики этих схем близки. Они составляют для крайних волокон 0,31 дБ. Как видим, наибольшие потери 0,6 дБ возникают из-за того, что ДР даже идеального треугольного профиля имеет эффективность 86–87%. Сравнение схем с ВДР и плоской ДР показывает, что схемы с ВДР имеют преимущество вследствие меньшего количества отражающих поверхностей и меньшей длины оптического пути в моноблоках. Поскольку схемы с плоскими ДР более сложны в юстировке, то предпочтение отдается производству МП/ДМП на базе ВДР. Нами было изготовлено несколько партий

Таблица 2. Энергетические потери в МП/ДМП с ВДР и плоской ДР с числом штрихов  $600 \text{ мм}^{-1}$

Тип решетки	№№ волокон	Потери, дБ					
		$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T$
Вогнутая	5,6	0,10	0,16	0,60	0	0,09	0,95
	1,10	0,10	0,16	0,60	0,31	0,09	1,26
Плоская	5,6	0,31	0	0,60	0	0,18	1,09
	1,10	0,31	0	0,60	0,31	0,18	1,40

МП/ДМП для различных областей спектра. Измерения их характеристик подтвердили достоверность выполненных расчетов. Приведенные выше расчеты для объемного варианта МП/ДМП применимы для расчетов планарных МП/ДМП с ДР.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бажанов Ю.В., Марциновский В.В., Мирумянц С.О., Багаутдинов И.Р., Стрежнев С.А. Многоканальные мульти-демультиплексоры для одномодовых и многомодовых волоконно-оптических линий связи // Оптический журнал. 1993. № 9. С. 69–73.
2. Bazhanov Yu. V., Kulakova N.A., Marzynovsky V.A., Bagautdinov I.R. Energy losses Analysis in multichannel grating multiplexer-demultiplexers // ISFOC 93: Conference Proceedings. St. Petersburg, 1993. P. 163–166.
3. Прохоров А.М. и др. Справочник по лазерам. М.: Сов. радио, 1978. С. 12–13.
4. Petite R. Electromagnetic theory of Gratings. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1980. 321 с.
5. Кулакова Н.А., Мирумянц С.О., Бугаенко А.Г. Энергетические характеристики вогнутой дифракционной решетки для случая падения сферической волны // Оптический журнал. 2006. № 10. С. 29–33.
6. Кулакова Н.А., Халикова Ф.Х. Исследование энергетических характеристик решеток с произвольным профилем штрихов // ДД 1142. Деп. рук. ВИНТИ. 21.03.1986.
7. Золотарев В.М. и др. Оптические постоянные природных и технических сред. Справочник. Л.: Химия, 1964. С. 69.
8. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1975. 312 с.
9. Выгодский М.Я. Справочник по элементарной математике. М.: Наука, 1986. С. 220.
10. Калитеевский Н.И. Волновая оптика. М.: Высшая школа, 1975. С. 56.
11. Сакин И.Л. Инженерная оптика. М.: Машиностроение, 1976.
12. Стекло оптическое бесцветное. РТМ 3-995-77. С. 41, 66.

# РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 681.7.067.2.013.5

## ОБЪЕКТИВЫ С НЕПРЕРЫВНО ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ ДЛЯ РАБОТЫ В ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

© 2007 г. В. П. Иванов, доктор техн. наук; С. Д. Козлов, канд. техн. наук; А. Е. Морозов, канд. техн. наук; Н. Г. Нигматуллина

НПО "Государственный институт прикладной оптики", г. Казань

Рассмотрены особенности конструкции и расчета панкратических объективов, работающих в областях спектра 3–5 и 8–12 мкм. Представлены оптические схемы и расчетные характеристики объективов.

Коды OCIS: 220.0220.

Поступила в редакцию 19.06.2006.

Объективы с переменным фокусным расстоянием (панкратические), обеспечивающие непрерывное изменение угловых размеров наблюдаемого участка пространства, имеют преимущества при эксплуатации перед оптическими системами с переключаемым полем зрения в различных приборах наблюдения, поиска, в специальной измерительной аппаратуре и т. д.

В НПО ГИПО имеется опыт расчета панкратических объективов для тепловизионных приборов третьего поколения. Успехи технологии создания фотоприемных устройств на полноразмерных матрицах предъявляют к объективам новые требования, что вызвало необходимость продолжения этих работ в направлении увеличения кратности, светосилы, улучшения качества изображения, уменьшения габаритов и массы.

Значительная часть объективов, обеспечивающих более чем трехкратное изменение фокусного расстояния, является четырехкомпонентными вариообъективами или комбинацией четырехкомпонентной афокальной оптической насадки переменного увеличения и объектива с постоянным фокусным расстоянием [1].

На рис. 1 изображена схема объектива из четырех бесконечно тонких компонентов. Фокусное расстояние вариообъектива определяется как

$$f' = f'_1 \beta_2 \beta_3 \beta_{\text{кор}}, \quad (1)$$

где  $f'_1$  – фокусное расстояние первого неподвижного компонента,  $\beta_2, \beta_3$  – переменные линейные увеличения второго и третьего компонентов;  $\beta_{\text{кор}}$  – увеличение корректора, остающееся неизменным.

Перемещение второго и третьего компонентов при неподвижных первом и четвертом обеспечива-

ет одновременное выполнение двух условий: изменение фокусного расстояния системы и неподвижность плоскости изображения.

В этом случае, задавая фиксированные значения одного из переменных расстояний, например,  $d_1$ , второе переменное расстояние  $d_2$  можно определить с помощью квадратного уравнения, выражающего условие неподвижности плоскости изображения после третьего компонента:

$$d_2^2 + d_2(d_1 - S'_2 - L_3) + (L_3 - d_1)(1 + \varphi_3 S'_2 - S'_2)/\varphi_3 = 0, \quad (2)$$

$$d_2 = S'_2 + f'_3 - 1/2(A + 2f'_3) \pm \sqrt{1/4(A + 2f'_3)^2 - f'^2_3}, \quad (3)$$

где

$$S'_2 = (1 - \varphi_1 d_1)/(\varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_1 \varphi_2 d_1), \quad A = L_3 - (d_1 + S'_2),$$

$S'_2$  – расстояние от задней главной плоскости второго компонента,  $L_3$  – расстояние от задней главной

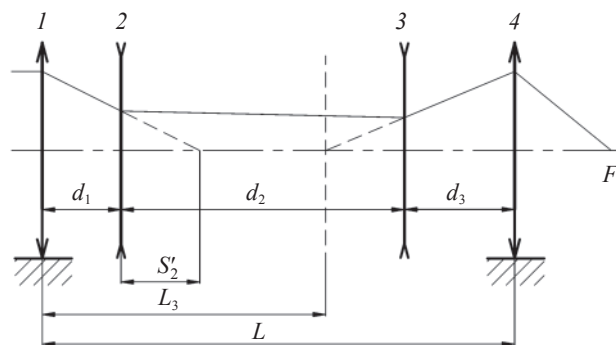


Рис. 1. Схема из четырех бесконечно тонких компонентов. 1, 2, 3 – вариатор; 4 – корректор.

плоскости первого неподвижного компонента до плоскости изображения после третьего компонента – постоянная величина для данного объектива,  $f'_3$  – фокусное расстояние третьего компонента,  $\varphi_1 = 1/f'_1$ ,  $\varphi_2 = 1/f'_2$ ,  $\varphi_3 = 1/f'_3$  – оптические силы компонентов вариатора.

Третий воздушный промежуток  $d_3$  – расстояние между главными плоскостями третьего и четвертого компонентов – определяется из условия:

$$d_3 = L - d_1 - d_2, \quad (4)$$

где  $L$  – расстояние от задней главной плоскости первого компонента до передней главной плоскости четвертого компонента (корректора) – также величина постоянная.

Объектив с последним неподвижным компонентом всегда можно преобразовать в систему четырехкомпонентная афокальная насадка–объектив. Фокусное расстояние такой системы определяется как

$$f' = \Gamma f'_{об}, \quad (5)$$

где  $\Gamma$  – переменное увеличение афокальной насадки,  $f'_{об}$  – фокусное расстояние объектива.

Увеличение насадки из четырех компонентов

$$\Gamma = -f'_1 \beta_2 \beta_3 / f'_4, \quad (6)$$

тогда

$$f' = f'_1 \beta_2 \beta_3 f'_{об} / f'_4, \quad (7)$$

где  $f'_1$  – фокусное расстояние первого неподвижного компонента насадки,  $\beta_2, \beta_3$  – переменные линейные увеличения второго и третьего компонентов;  $f'_4$  – фокусное расстояние четвертого неподвижного компонента насадки.

Если принять, что  $\beta_{кор} = -f'_{об} / f'_4$ , то из формул (1) и (7) следует, что в параксиальной области схему вариообъектива можно преобразовать в систему насадка–объектив.

Рассмотрим конструкции ряда объективов, рассчитанных в НПО ГИПО для работы в спектральных диапазонах 3–5 и 8–12 мкм (см. рис. 2–4). Все объективы имеют общую схему, в которой первый, четвертый и пятый компоненты неподвижны, второй компонент движется линейно, а третий компонент – нелинейно. Компоненты с первого по четвертый образуют афокальную насадку, а пятый компонент является объективом с постоянным фокусным расстоянием системы насадка–объектив.

Во всех объективах в пространстве между четвертым и пятым компонентами находится апертурная диафрагма, обеспечивающая максимальное заполнение входного зрачка в пределах всего поля зрения.

Для выбора системы с оптимальными габаритами и наибольшими коррекционными возможностями

ми известен метод [2], заключающийся в определении высот пересечения апертурного и главного параксиальных лучей ( $h_i, y_i$ ) с поверхностями и оптических сил компонентов  $\varphi_i$ . Соотношения, связывающие фокусные расстояния отдельных компонентов с фокусным расстоянием объектива в крайнем максимальном положении, приведены в [3] и имеют вид:

$$1,0 < f'_1 / f'_t, \quad (8)$$

$$-0,4 > f'_2 / f'_t, \quad (9)$$

$$0,35 < f'_3 / f'_t < 0,7, \quad (10)$$

где  $f'_1, f'_2, f'_3$  – фокусные расстояния компонентов;  $f'_t$  – максимальное фокусное расстояние объектива.

Значения фокусных расстояний компонентов, определенные из этих уравнений при заданном максимальном фокусном расстоянии объектива, были использованы в качестве исходных на начальной стадии расчета.

На рис. 2 показана оптическая схема объектива для области спектра 3–5 мкм, фокусное расстояние которого изменяется в интервале от 75 до 300 мм при постоянном относительном отверстии 1:2 и линейном поле зрения  $9,6 \times 7,2$  мм.

В этой области спектра качество изображения, формируемого объективом, значительно ухудшают хроматические aberrации, причем наибольший вклад вносит первый компонент объектива. Для исправления хроматических aberrаций первый компонент должен состоять либо из двух линз с разной дисперсией, либо из одной линзы с меньшей для данного диапазона спектра дисперсией показателя преломления материала. Поскольку дисперсия германия в области спектра 3–5 мкм составляет 0,0169, а кремния – 0,0059, т. е. почти в три раза больше, было принято решение в качестве первого компонента использовать одиночную кремниевую линзу. Комбинацией германиевых и кремниевых линз в других компонентах объектива удалось добиться хорошего качества изображения во всем интервале изменения фокусных расстояний. Кругок рассеяния

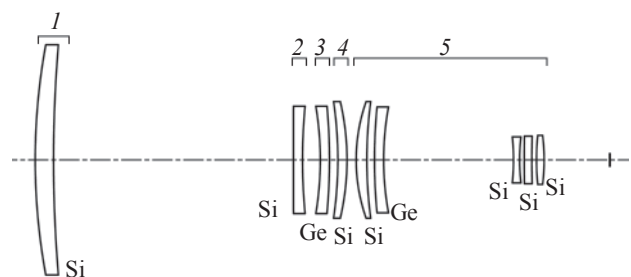
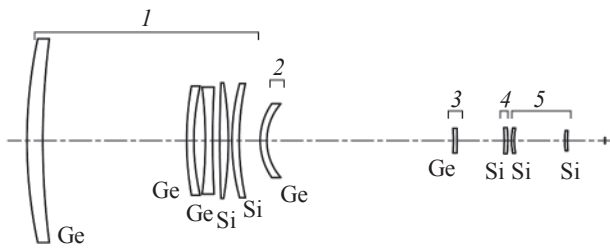


Рис. 2. Оптическая схема объектива.  $f' = 75$ –300 мм, спектральная область работы 3–5 мкм.



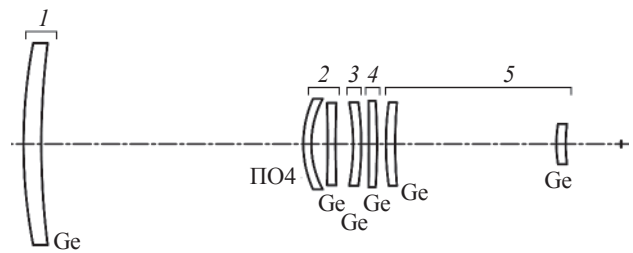
**Рис. 3.** Оптическая схема объектива.  $f' = 60\text{--}500$  мм, спектральная область работы 3–5 мкм.

лучей в пределах всего поля зрения не превышает 40 мкм.

В указанном интервале изменения фокусных расстояний концентрация энергии в кружке диаметром 30 мкм в центре поля зрения составила 86%, и только для минимального фокусного расстояния оказалась несколько ниже – 80%.

При создании объектива, схема которого представлена на рис. 3, авторами была поставлена задача расширения диапазона изменения фокусных расстояний (в сторону увеличения до 500 мм, а в сторону уменьшения – до 60 мм) при постоянном относительном отверстии 1:1,8. При этом диаметр первой линзы увеличился до 285 мм. Качество изображения удалось обеспечить во всем интервале изменения фокусных расстояний в пределах всего поля зрения  $9,6 \times 7,2$  мм. Объектив ахроматизован в спектральном диапазоне 3,75–4,85 мкм для работы с фотоприемником ID MM067 фирмы SOFRADIR. Расширение диапазона изменения фокусных расстояний объектива удалось обеспечить за счет увеличения фокусного расстояния первого компонента. При этом характер движения подвижных компонентов остался неизменным, а диапазон их перемещения увеличился [4].

Сложность при расчете объектива состояла в невозможности использовать кремний в качестве материала первой линзы из-за трудностей получения заготовок оптического монокристаллического кремния необходимых размеров. В положении объектива, соответствующем максимальному фокусному расстоянию, высота осевого луча, проходящего через край входного зрачка, на первом компоненте значительно больше, чем на втором. Выполнение этого компонента в виде одной германиевой линзы затруднило коррекцию сферической aberrации высших порядков и хроматизма при максимальном фокусном расстоянии и привело к существенному изменению конструкции первого компонента – он стал пятилинзовым. Оптическая сила первого компонента была значительно ослаблена, а наличие группы из трех линз, образующих вместе с ним афокальную комбинацию, обеспечило дополнительные



**Рис. 4.** Оптическая схема объективов.  $f' = 100\text{--}500$  мм и  $f' = 60\text{--}300$  мм, спектральная область работы 8–12 мкм.

коррекционные возможности, необходимые для получения требуемого качества изображения [5]. Меннскообразная форма линзы второго компонента позволяет исправить полевые aberrации объектива при средних и малых значениях фокусных расстояний. Усложнение конструкции первого компонента, отвечающего за исправление aberrаций при больших значениях фокусных расстояний, позволило упростить пятый компонент путем уменьшения числа линз.

В результате получен объектив, кружок рассеяния которого в указанном спектральном диапазоне во всем интервале изменения фокусных расстояний не превышает 40 мкм и только на краю поля зрения при минимальном фокусном расстоянии достигает 100 мкм.

Концентрация энергии в кружке диаметром 30 мкм в центре поля зрения составляет 86% и только для минимального фокусного расстояния составляет 80%.

Для области спектра 8–12 мкм разработаны два объектива, имеющие общую схему, которая представлена на рис. 4. Фокусное расстояние одного из них изменяется в интервале от 100 до 500 мм при диаметре первой линзы 250 мм, другого – от 60 до 300 мм при диаметре первой линзы 150 мм. Объективы работают с постоянным относительным отверстием 1:2 и линейным полем зрения  $12 \times 9$  мм.

Диаметр кружка рассеяния по всему полю зрения не превышает 50 мкм для крайних значений диапазона фокусных расстояний, а для средних значений на краю поля зрения наблюдается увеличение диаметра до 100 мкм.

Концентрация энергии в кружке диаметром 50 мкм в центре поля зрения не менее 80% в пределах всего диапазона фокусных расстояний.

Количество компонентов в этих объективах аналогично представленным выше, но общее число линз уменьшено до семи. В этой области спектра дисперсия германия меньше, поэтому первый компонент состоит из одной линзы. Для исправления хроматических aberrаций второй компонент содержит две линзы с различной дисперсией материалов

(0,0035 для германия и 0,0024 для ПО4), составляющих хроматическую пару.

Окончательная коррекция aberrаций проводилась с помощью программ ZEMAX и WinDEMOS.

Для двух последних объективов лучшие результаты расчета были получены при следующих значениях соотношений (8), (9), (10):

$$f'_1 = (\text{от } 1,22 \text{ до } 1,24)f'_i,$$

$$f'_2 = -(\text{от } 0,48 \text{ до } 0,5)f'_i,$$

$$f'_3 = (\text{от } 0,41 \text{ до } 0,42)f'_i.$$

Во всех рассмотренных объективах пятый компонент содержит асферические поверхности, позволяющие повысить требуемое качество изображения (главным образом при малых значениях фокусных расстояний).

В заключение отметим, что в НПО ГИПО разработана техническая документация, проведена работа по технологической подготовке производства, созданию средств измерения и изготовлены партии объективов по схемам, представленным на рис. 2 и 3. Измерения основных характеристик этих объективов

показали хорошее согласие с расчетными данными. При работе их в комплексе объектив–фотоприемное устройство–монитор были проведены измерения температурно-частотной характеристики всей системы, которая в высокой степени совпадала с теоретической и подтвердила эффективность схем построения и методов расчета панкратических объективов, рассмотренных в статье.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Волосов Д.С.* Фотографическая оптика. М.: Искусство, 1971. 672 с.
2. *Шнякин М.Г.* Исследование и расчет объективов с широкими интервалами изменения фокусного расстояния // Автореф. канд. дис. Л.: ГОИ, 1971.
3. Infrared Zoom Lens System // Патент США № 6.091.551. 1998.
4. Вопросы современной вычислительной оптики и теория оптических приборов // Труды ГОИ. 1980. Т. 46. В. 180. 122 с.
5. *Слюсарев Г.Г.* Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 640 с.