

Е.Б. Беляев, Г.Б. Жидковский, А.И. Исакова, Ю.Д. Копытин, В.В. Носов

ДИАЛоговая СИСТЕМА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (ДСОВАРОИ)

Описана диалоговая система, предназначенная для получения прогноза и учета влияния всей совокупности линейных оптических эффектов в реальной атмосфере на точностные и энергетические характеристики оптико-электронных систем и устройств. Диалоговая система включает в себя два пакета программ, разработанных для IBM типа PC/AT/XT.

1. Введение

Для широкого круга задач атмосферной оптики — дальнометрии, локации, навигации — необходима оперативная информация о влиянии оптических эффектов в реальной атмосфере на точностные и энергетические характеристики используемых в эксперименте оптико-электронных систем [1–3].

В настоящей статье предлагается описание диалоговой системы, позволяющей прогнозировать и оперативно учитывать влияние атмосферы на характеристики оптического излучения.

ДСОВАРОИ представляет собой комплекс прикладных программ, использующих инженерные методики, обобщающие результаты фундаментальных научных исследований по оптике атмосферы.

При расчете параметров распространения локационного оптического сигнала в атмосфере необходимы данные о зональных и сезонных изменениях высотных профилей распределения параметров поглощающих газов, аэрозолей, облаков, метеопараметров, характеристик турбулентных воздушных потоков. Поскольку надежность прогноза распространения оптического излучения на разных высотах обусловлена степенью статистической достоверности используемых высотных зависимостей оптических параметров атмосферы, в ИОА СО РАН на основе большого объема экспериментальных данных разработана комплексная оптическая модель атмосферы [4], включающая высотные профили метеопараметров и оптических характеристик атмосферы и послужившая основой при создании банка данных для ДСОВАРОИ.

2. Назначение и возможности диалоговой системы ДСОВАРОИ

Диалоговая система оценки влияния атмосферы на распространение оптического излучения предназначена для получения прогноза и учета влияния совокупности линейных оптических эффектов в реальной атмосфере на точностные и энергетические характеристики проектируемых или реально существующих оптико-электронных систем и устройств.

Диалоговая система отвечает за выполнение следующих операций:

1) вычисление на наклонных и горизонтальных трассах поправки на дальность и угла рефракции при распространении лазерного и оптического излучения видимого и ИК-диапазонов в атмосфере;

2) оценка энергетических потерь за счет поглощения на трассе; определение импульсной характеристики обратного рассеяния, позволяющей рассчитывать интенсивность рассеянного назад излучения на апертуре приемной системы;

3) оценка уровня засветки приемного канала от естественных источников помех — излучения дневного безоблачного неба и теплового излучения подстилающей поверхности и атмосферы;

4) вычисление статистических характеристик оптических пучков, обусловленных влиянием атмосферной турбулентности.

Известно, что явление рефракции в земной атмосфере и изменение скорости распространения сигнала вдоль траектории луча при работе дальнометрических устройств приводят к ошибкам в определении истинных угла места и удаленности наблюдаемого объекта [5–8]. Поэтому вычисление поправки на дальность и угла рефракции особенно важно при получении оценок влияния атмосферы на распространение оптического излучения. На практике организация непосредственных измерений рефракционных поправок для произвольных трасс оказывается невыполнимой задачей, и поэтому для их оценки используют приближенные методики [5, 6]. Сущность этих методик состоит в том, что в зависимости от требуемой точности и оперативности учета рефракционных поправок задается приближенный вертикальный профиль показателя преломления или метеорологических величин, его определяющих: плотность, давление, температура, градиент температуры.

В диалоговой системе, с целью получения более точных поправки на дальность и угла рефракции, предусмотрено задание вертикальных профилей метеорологических характеристик для различных длин волн, времен года, времени суток, климатических зон Земли. Используемые алгоритмы определения поправки на дальность и угла рефракции реализованы с учетом местоположения локатора, угла наблюдения и позволяют одновременно вычислять ошибки определения этих величин (сред-

неквадратические отклонения угла рефракции и поправки к измеренной дальности) [8]. Приведем пример алгоритма определения угла рефракции r'' (угл. с) и поправки ΔS (м) в случае размещения локатора на борту летательного аппарата и при наблюдении объектов, расположенных ниже горизонта (надирный угол наблюдения $\varphi < \pi/2$).

Угол рефракции вычисляется по формулам:

$$r'' = r_f \operatorname{tg} \left\{ \varphi + \frac{3\rho' (H - H_0)}{2R_0} \operatorname{tg} \varphi \left[1 - \frac{1}{g + R_c \gamma} \left(\frac{2T_0 R_c}{H - H_0} - C_0 \frac{P(g - R_c \gamma)}{T r_f} \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

где

$$H_0 = \sqrt{S^2 + (R_0 + H)^2} - 2S(R_0 + H) \cos \varphi - R_0,$$

$$r_f = C_0 \left[\frac{R_c (P_0 - P)}{g(H - H_0)} - \frac{P}{T} \right], \quad \gamma = \frac{T_3 - T}{H - H_3},$$

$$C_0 = \begin{cases} 16,072; \\ 16,000; \\ 15,992; \end{cases} \quad \lambda = \begin{cases} 1,06, \\ 3,80, \\ 10,6 \text{ мкм}, \end{cases}$$

$P = P_3 [1 - \gamma(H - H_3) / T_3]^{g/R_c \gamma}$, если $H < 16$ км.

Температура T_0 и давление P_0 воздуха на уровне объекта соответственно равны

$$T_0 = T_3 - \gamma(H_0 - H_3); \quad P_0 = P_3 [1 - \gamma(H_0 - H_3) / T_3]^{g/R_c \gamma}.$$

Здесь H — высота локатора; H_0 — высота объекта; H_3 — высота установки датчиков температуры и давления над уровнем моря; T , T_3 — температура воздуха у локатора к поверхности Земли соответственно; P , P_3 — давление у локатора и поверхности Земли соответственно; S — расстояние до объекта; λ — длина волны излучения; ξ — зенитный угол наблюдения объекта; γ — средний градиент температуры. Постоянные величины: $R_c = 287,05 \text{ м}^2/(\text{с}^2\text{К})$ — удельная газовая постоянная сухого воздуха; $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$; $R_0 = 6371000 \text{ м}$ — радиус Земли.

Поправка на дальность определяется из следующего соотношения:

$$\Delta S = 10^3 (n_\xi^g - 1) [\sqrt{(R_0 + H_3 + H_e)^2 - (R_0 + H_3)^2} \sin \xi - (R_0 + H_3) \cos \xi] + \delta S, \quad (2)$$

где групповой коэффициент преломления находится по формуле $n_0^g = 1 + 10^{-6} N_0^g(\lambda)$; коэффициент $N_0^g(\lambda)$ для стандартных условий определяется следующим образом:

$$N_\xi^g(\lambda) = N_0(\lambda) + 0,28439 \frac{P_0}{T_0} \left[\frac{48120,6\lambda^{-2}}{(130 - \lambda^{-2})^2} + \frac{319,94\lambda^{-2}}{(38,9 - \lambda^{-2})^2} \right];$$

$$N_0(\lambda) = 0,28439 \frac{P_0}{T_0} \left[83,4213 + \frac{24060,3}{130 - \lambda^{-2}} + \frac{159,97}{38,9 - \lambda^{-2}} \right],$$

$$H_e = 10^{-3} \frac{R_c T_0}{g} \left(1 - \frac{P}{P_0} \right).$$

Для других вариантов размещения локатора и геометрии трасс расчетные формулы вычисления угла рефракции и поправки на дальность отличаются от приведенных выше и также реализованы в виде алгоритмов и прикладных программ, входящих в ДСОВАРОИ.

Оценка энергетических потерь за счет поглощения на трассе подразумевает совокупное молекулярное и аэрозольное ослабление оптического излучения.

Оценки ослабления оптического излучения за счет молекулярного поглощения на наклонных и горизонтальных трассах требуют знания распределения метеопараметров. В ДСОВАРОИ предусмотрен расчет высотного профиля коэффициента молекулярного ослабления и оптической толщи в зависимости от длины волны излучения, географической зоны, сезонных и суточных изменений метеопараметров в атмосфере на основе банка данных профилей влажности и концентрации CO_2 [10].

Вне полос молекулярного поглощения (в окнах прозрачности атмосферы) рассеяние и поглощение атмосферным аэрозолем являются наиболее важным фактором, определяющим энергетическое ослабление оптического излучения [9, 11]. Основной количественной характеристикой, определяющей аэрозольное ослабление, является коэффициент аэрозольного ослабления α_a зависящий от длины волны λ . У поверхности Земли с учетом реальной синоптической ситуации приближенное значение α_a^p для данной длины волны оценивается по формуле, представляющей однопараметрическое уравнение средней квадратической регрессии

$$\alpha_a^p(\lambda, 0) = K_1(\lambda) \alpha_a(0,55) + K_0(\lambda), \quad (3)$$

где $\alpha_a(0,55) = 3,9/S_m$, км^{-1} – коэффициент аэрозольного ослабления в видимой области спектра. Коэффициенты регрессии K_1 и K_0 выбираются для конкретных типов оптической погоды из таблиц [12].

Для вычисления более точных значений высотного профиля аэрозольного коэффициента ослабления $\alpha_a^p(\lambda, h)$ используется поправка $\alpha_a^n(\lambda, h) = \Delta e^{-h/C^2}$, которая позволяет приблизить вид модельного профиля аэрозольного коэффициента ослабления $\alpha_a^m(\lambda, h)$ к его реальному высотному распределению:

$$\alpha_a^p(\lambda, h) = \alpha_a^m(\lambda, h) + \alpha_a^n(\lambda, h), \quad (4)$$

где $\Delta = \alpha_a^p(\lambda, 0) - \alpha_a^m(\lambda, 0)$; $\alpha_a^p(\lambda, 0)$ и $\alpha_a^m(\lambda, 0)$ – реальные и модельные значения аэрозольного коэффициента ослабления для длины волны λ на высоте $h = 0$. Масштабный коэффициент C в зависимости от дальности видимости определяется следующим образом:

$$C = \begin{cases} 0,3; & 0 < S_m < 2 \text{ км}, \\ -0,375 + 0,3375 S_m; & 2 < S_m < 10 \text{ км}, \\ 3,0; & S_m > 10 \text{ км}. \end{cases}$$

В ДСОВАРОИ модельный профиль аэрозольного ослабления для конкретной длины волны вычисляется на основе существующих банков данных по аэрозольному поглощению и рассеянию в атмосфере [3, 4, 12].

При определении предельной дальности видения, обнаружении и распознавании объектов необходима оценка уровня засветки приемного канала от естественных источников фоновых засветок и помех, так как фоновые помехи снижают яркостный контраст наблюдаемого объекта и уменьшают динамический диапазон приемного тракта.

Фоновое излучение зависит от координат Солнца и направлений наблюдения, рабочего диапазона длин волн, оптико-метеорологической обстановки, сезона года и времени суток, географических факторов, а также параметров измерительной аппаратуры [14]. В связи с большим разнообразием возможных фоновых ситуаций и сопутствующих наблюдениям условий, практически невозможно получение универсальных не только средних, но даже и статистических характеристик для оценок фоновых помех. В ДСОВАРОИ реализован расчет спектральной яркости безоблачного неба, теплового излучения подстилающей поверхности и мощности засветки приемной системы рассеянным назад излучением источника. Для их расчета используются приближенные методы, дающие погрешность 15–20%.

Для расчета импульсной переходной характеристики $I(t)$ (ИПХ) в зависимости от времени прихода рассеянного назад оптического излучения используется следующая формула (угол рассеяния $\beta = \pi$):

$$I(t) = \frac{c}{2t^2} \beta_\pi(h) T_a.$$

где t – время прихода рассеянного излучения; c – скорость света; $\beta_\pi(h)$ – объемный коэффициент обратного рассеяния на высоте h ; T_a – степень ослабления излучения за счет аэрозольного и молекулярного ослабления на двойной длине трассы.

Для вычисления интенсивности рассеянного назад излучения, падающего на плоскость апертуры приемника, необходимо умножить ИПХ на энергию импульса.

Оценка спектральной яркости дневного безоблачного неба определяется рассеянным солнечным излучением и рассчитывается по формулам, применимым для углов наблюдения и высот Солнца не меньше 15° [13]:

$$b_{H\lambda} = \left\{ \pi S_{0\lambda} \frac{0,06\tau_p(1 + \cos^2 \varphi) + \eta(e^{-3\varphi} - 0,009)}{\tau} \left(\frac{e^{-\tau_a \sec Z_0} - e^{-\tau_a \sec \theta}}{\sec \theta - \sec Z_0} \right) \sec \theta + \frac{C_a}{4} S_{0\lambda} e^{-\tau_a \sec Z_0} \times \right. \\ \left. \times \tau_a \sec Z_0 \left(\frac{1 - e^{-\tau_a \sec \theta}}{1 - e^{-\tau_a \sec Z_0}} \right) \right\} e^{-\tau_{03} \sec Z_0}, \quad \theta \neq Z_0; \quad (5)$$

$$b_{H\lambda} = \left\{ \pi S_{0\lambda} \frac{0,06\tau_p(1 + \cos^2 \varphi) + \eta(e^{-3\varphi} - 0,009)}{\tau} e^{-\tau_a \sec Z_0} \times \right. \\ \left. \times \tau_a \sec Z_0 + \frac{C_a}{4} S_{0\lambda} e^{-\tau_a \sec Z_0} \tau_a \sec Z_0 \right\} e^{-\tau_{03} \sec Z_0}, \quad \theta = Z_0, \quad (6)$$

где $\pi S_{0\lambda}$ – спектральная солнечная постоянная, определяемая из следующего соотношения:

$$\pi S_{0\lambda} = \frac{0,7871529}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda^{5985}} - 1)},$$

$C_a = 0,133 + 1,33q$, где q — альbedo местности, выбираемое из таблиц [12]; τ_a , τ_p — эрозольная и рэлеевская составляющие оптической толщи τ ; τ_{oz} — оптическая толщина за счет поглощения радиации озоном; $\eta = 2,33(\tau_a + 0,062\tau_p)$; Z_0 — зенитный угол Солнца; θ — зенитный угол точки наблюдения небо свода; φ — угловое расстояние от Солнца; $C_2 = 14386,5$ (мкм · К). При реализации алгоритма τ_p и τ_{oz} принимались равными нулю ввиду незначительности их вклада в атмосферные рассеяние и поглощение в ИК-диапазоне.

Спектральная плотность теплового излучения Земли без учета энергетического ослабления в атмосфере определяется функцией Планка:

$$r(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T} - 1\right) \right]^{-1},$$

где $C_1 = 37400$ (Вт · мкм⁵ / (см · мкм)).

Мощность фона в поле зрения источника P_f (Вт · см² · мкм⁻¹) вычисляется по следующей формуле:

$$P_f = \pi R_r^2 \Omega \left(b_{H\lambda} + \frac{r(\lambda, T)}{\pi} \right), \quad (7)$$

где R_r — радиус приемной апертуры локатора; Ω — телесный угол поля зрения приемника локатора.

К статистическим характеристикам оптического пучка на наклонных трассах относятся: среднеквадратические отклонения (СКО) флуктуаций направления распространения оптического пучка и положения изображения лоцируемого объекта в фокальной плоскости приемной оптической системы. На основе алгоритмов, приведенных в [15], в системе реализован расчет этих величин.

3. Состав и особенности реализации пакета программ

ДСОВАРОИ реализована для работы на IBM совместимых ЭВМ типа РС/АТ/ХТ и состоит из двух подсистем:

- 1) подсистема выбора режима работы и уточнения входных параметров.
- 2) подсистема оценки энергетических и точностных характеристик конкретной оптической системы.

Подсистема выбора режима работы и уточнения входных параметров создана на базе СУБД «CLARION». Это позволило обеспечить систему гибкими сервисом, облегчающим работу пользователя, не являющегося специалистом в области программирования.

Подсистема выбора имеет 4-уровневую структуру меню. Верхний уровень отвечает за общую рекламу о назначении системы и содержит меню по выбору следующих 5 режимов работы:

- 1) ввод параметров расчета,
- 2) расчет по модели,
- 3) расчет,
- 4) просмотр результатов,
- 5) выход из системы.

Второй уровень — меню системы, отвечает за ввод и коррекцию входных параметров. На этом уровне входные параметры (трассы, локатора, геоатмосферы, модельные) вводятся в специально отведенные поля. Модельные параметры выбираются в отдельном меню (третий уровень), в котором представлены 5 параметров, характеризующих состояние атмосферы на трассе. Этими параметрами являются: географическая зона (подзона), сезон года, время суток, оптическая погода и тип подстилающей поверхности. Перечисленные параметры, в свою очередь, определяются конкретным перечнем их допустимых значений (четвертый уровень).

В системе предусмотрены анализ вводимых величин и контроль их на соответствие заданным диапазонам, а также предупредительные сообщения при возникновении недопустимых комбинаций входных параметров.

Особенностью данной подсистемы является возможность оценки необходимых характеристик в режиме «Расчет по модели» в условиях неопределенности геоатмосферных параметров. В режиме «Расчет» эти параметры могут быть заданы полностью или частично. Неопределенные параметры формируются согласно модельному состоянию на трассе и имеющимся банкам данных системы. Для оперативного получения массивов результатов при изменении основных входных величин (высота локатора, дальность, угол места, угол Солнца и на Солнце) предусмотрен режим расчета в цикле по этим параметрам. Полученные результаты представляются либо в виде единой таблицы, включающей основные расчетные величины по всем проведенным вычислениям, либо в виде полных таблиц для каждого варианта расчета.

Подсистема оценки энергетических и точностных характеристик представляет собой комплекс программ на языке Фортран-77, реализованный в загрузочный модуль, подключаемый автоматически из подсистемы выбора режима работы, когда пользователь входит в режим «Расчет» либо «Расчет по модели». Входные данные для этой системы расположены в файле, сформированном подсистемой выбора режима работы. Подсистема оценки имеет модульную структуру и

состоит из 20 подпрограмм общим объемом 88 Кб. Результатом ее работы является файл, передаваемый подсистеме выбора режима работы, для наглядного представления в виде таблиц рассчитанных величин.

ДСОВАРОИ имеет оверлейную структуру, позволяющую экономить оперативную память ЭВМ и в совокупности с банками данных занимает 650 Кб дисковой памяти.

Система является открытой, легко модифицируется и может быть использована для решения широкого круга задач атмосферной оптики, в том числе дальнометрии, исследования оптических характеристик наземных и других объектов при различных состояниях атмосферы

Авторы выражают глубокую благодарность за помощь в создании системы и за обсуждение материалов, вошедших в статью, к.т.н. Н.Ф. Нелюбину, к.ф.-м.н. И.П. Лукину, к.ф.-м.н. А.А. Мицелю, к.ф.-м.н. К.М. Фирсову и О.Н. Гвоздевой.

1. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 264 с.
2. Распространение лазерного пучка в атмосфере /Под ред. Д. Стробена. М.: Мир, 1981. 414 с.
3. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель континентальной атмосферы. Новосибирск: Наука. 1982. 198 с.
4. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптические модели атмосферного аэрозоля. Томск: ИОА СО АН СССР, 1986. 294 с.
5. Алексеев А.В., Кабанов М.В., Куштин И.Ф. Оптическая рефракция в земной атмосфере (горизонтальные трассы). Новосибирск: Наука. 1982. 160 с.
6. Алексеев А.В., Кабанов М.В., Куштин И.Ф., Нелюбин Н.Ф. Оптическая рефракция в земной атмосфере (наклонные трассы). Новосибирск: Наука, 1983. 230 с.
7. Куштин И.Ф. Рефракция световых лучей в атмосфере. М.: Недра, 1971. 251 с.
8. Нелюбин Н.Ф. //Рефракция оптических волн в атмосфере. Томск: ИОА СО АН СССР. 1982. С. 74–85.
9. Зуев В.Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере. М.: Радио и связь, 1981. 288 с.
10. Макушкин Ю.С., Мицель А.А., Фирсов К.М. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1983. Т. 19. № 9. С. 824–830.
11. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). М.: Советское радио, 1977. 368 с.
12. Оптическая модель атмосферы /Беленький М.С., Задде Г.О., Комаров В.С. и др. Томск: ИОА СО АН СССР, 1987. 225 с.
13. Глушко В.Н., Иванов А.И. и др. Рассеяние инфракрасного излучения в безоблачной атмосфере. Алма-Ата: Наука, 1974. 210 с.
14. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности / Под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 564 с.
15. Влияние атмосферы на распространение лазерного излучения/Аксенов В.П., Алексеев А.В., Банах В.А. и др. Томск: ИОА СО АН СССР, 1987. 247 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
5 мая 1992 г.

**E.V. Belyaev, G.B. Zhidkovskii, A.I. Isakova, Yu.D. Kopytin, V.V. Nosov.
Dialogue System for Assessing the Effect of the Atmosphere on the Optical Waves Propagation.**

A dialogue system for acquisition of information about and according for the influence of the whole combination of linear optical effects in the atmosphere on the accuracy and power characteristics of electro-optical systems and devices is presented in the paper. The dialogue system consists of two packages of programs compatible with IBM PC/AT/XT.