

Р.Р. Агишев, А.И. Усанов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИДАРА В СЛОЖНЫХ ПОМЕХОВЫХ УСЛОВИЯХ

Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева

Поступила в редакцию 15.06.98 г.

Принята к печати 18.05.99 г.

Разработана математическая модель лидарной системы, предназначенной для дистанционного исследования приземных слоев атмосферы. Модель позволяет адекватно описать процесс измерений в реальной помеховой обстановке и провести коррекцию принимаемого лидарного сигнала для учета и компенсации фактора фона.

Введение

Статья посвящена математическому моделированию лидарной системы, предназначенной для дистанционного бесконтактного исследования приземных слоев атмосферы и определения, в частности, профилей распределения объемного показателя ослабления $\alpha(R)$. При большой глубине зондирования уровень принятых сигналов может быть очень низким по сравнению с интенсивным сигналом фоновой помехи [1–4]. Существующие методы борьбы с фоновой помехой, такие как компенсация фона или методы амплитудной и временной регулировки для предотвращения перегрузки приемника при интенсивных помехах, не дают существенного эффекта [1, 5, 6].

Одним из важнейших источников погрешности лидарных измерений в видимом и ближнем ИК-диапазонах, напрямую влияющих на достоверность восстановления оптических профилей, являются воздействие интенсивного фона на фотоприемник и обусловленные этим искажения его световых характеристик. В наибольшей степени это относится к

фото-приемникам на ФЭУ. Развиваемый нами подход позволяет учесть обусловленные интенсивным фоном изменения амплитудных характеристик фотоприемных устройств, что дает преимущество перед перечисленными методами. Нами изучены изменения характеристик фотоприемников под действием интенсивного фона, определяющегося тремя основными источниками: Солнцем, атмосферой, рассеивающей проходящий свет Солнца, и отражающими свет земными покровами. Разработана модель лидарного приемника на ФЭУ, учитывающая фоновые изменения крутизны световой характеристики приемника в зависимости от состояния атмосферы, ее прозрачности, спектральной яркости фона неба, взаимного углового положения и т.д. (рис. 1).

В результате математического моделирования фотоприемника, подверженного влиянию фона, определяется величина изменений коэффициента усиления ФЭУ, по которой производится коррекция уровня принимаемого сигнала и фона для повышения достоверности измерений и последующей регистрации профилей атмосферного коэффициента ослабления.

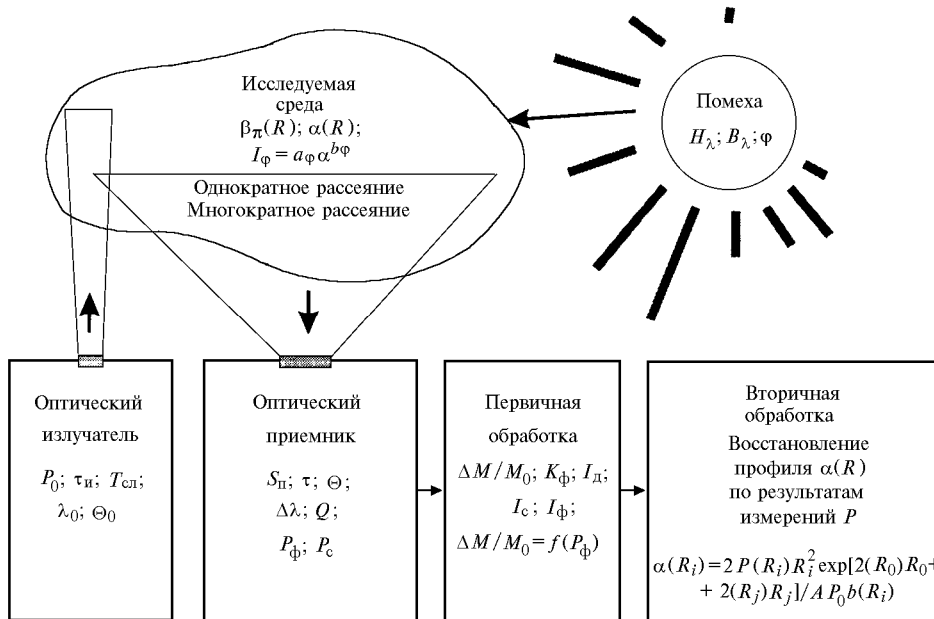


Рис. 1. Модель лидарной системы

Моделирование приемопередатчика, среды и фоновой помехи

Основными параметрами, характеризующими излучатель, являются: P_0 – излучаемая мощность; λ_0 – длина волны излучения; Θ_0 – угол расходимости зондирующего луча; τ_n – длительность зондирующего импульса; $T_{сл}$ – период следования импульсов.

Полезные сигналы моностатического лидара описываются лидарным уравнением, которое в приближении однократного рассеяния имеет вид

$$P(R) = AP_0 \beta_\pi(R) R^{-2} \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(R') dR' \right], \quad (1)$$

где P – мощность принимаемого сигнала; P_0 – мощность импульса излучения; A – аппаратная функция; β_π – объемный коэффициент обратного рассеяния; α – объемный показатель ослабления; R' – текущая дальность.

Фоновую помеху часто принято описывать выражением [5]:

$$P_\phi = (\pi/4) B_\lambda \Theta^2 S_\pi T\tau, \quad (2)$$

где P_ϕ – мощность фонового излучения; B_λ – спектральная яркость фона неба; Θ – плоский угол; S_π – площадь приемной оптической системы; T – показатель ослабления сигнала в атмосфере; τ – показатель ослабления сигнала в оптической системе.

Покажем, как влияют параметры среды на интенсивность фоновой помехи. Индикатрисы рассеяния для различных состояний атмосферы измерены и классифицированы, в частности, по коэффициенту асимметрии рассеянного светового потока. Анализ индикатрис, проведенный в работе [4], показал, что корреляционную связь индикатрисы i_ϕ и объемного показателя ослабления α можно аппроксимировать функциональной зависимостью вида

$$i_\phi = a_\phi \alpha^{b_\phi}, \quad (3)$$

где a_ϕ , b_ϕ – коэффициенты аппроксимации; ϕ – угол между оптической осью лидара и направлением на Солнце, причем при $\phi < 50^\circ$ коэффициент $b_\phi > 0$, а при $\phi > 60^\circ$ $b_\phi < 0$.

Оценку интенсивности фоновой помехи P_ϕ обычно делают при считающихся известными параметрах приемника в каком-либо предположении о величине фоновой освещенности горизонтальной поверхности: $H_\lambda = B_\lambda/i_\phi$, где максимальное значение B_λ меняется в пределах от 1 до 300 Вт/(м²·ср·мкм) [2].

Оценим уровень фонового излучения, рассеянного атмосферой и попавшего в поле зрения приемника. В предположении, что в оптическом диапазоне волн объемные коэффициенты рассеяния и ослабления равны, полная мощность фонового излучения, принимаемая со всей трассы от 0 до ∞ [2]:

$$P_\phi = H_\lambda Q \int_0^\infty i_\phi(R) \alpha(R) \exp \left(- \int_0^R \alpha(R') dR' \right) dR, \quad (4)$$

где $Q = \Omega \Delta \lambda S_\pi \tau$ определяется параметрами приемной системы лидара; $\Omega = (\pi/4)\Theta^2$, Θ – плоский угол, служащий мерой телесного угла Ω для конического поля зрения. Для

встречающихся на практике значений $\Theta = 10^{-4} \div 10^{-3}$ рад, полосы пропускания оптического фильтра $\Delta \lambda = 1 \div 10$ нм, площади приемной оптической системы $S_\pi \approx 10^{-2}$ м², пропускания приемной оптики $\tau \approx 0,5$ можно получить $Q = 3 \cdot 10^{-20} \div 4 \cdot 10^{-17}$ м²·ср·мкм.

С учетом аппроксимации (3) имеем оценку принимаемой мощности фона:

$$P_\phi = H_\lambda Q a_\phi \int_0^\infty \alpha^{b_\phi+1}(R) \exp \left(- \int_0^R \alpha(R') dR' \right). \quad (5)$$

Согласно выражению (5) просчитанные значения нормировались на максимальную величину и на их основе построен график зависимости нормированной мощности фоновой засветки от оптической плотности (рис. 2).

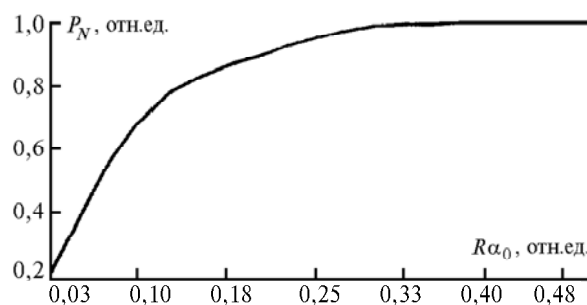


Рис. 2. Зависимости нормированной мощности фоновой засветки от оптической плотности

Как видно из рис. 2, характеристика нормированной мощности фоновой засветки имеет верхний предел. Величина этого предела соответствует максимальному значению мощности фона P_ϕ на входе фотоприемника при заданном профиле $\alpha(R)$ и величине фоновой освещенности горизонтальной поверхности H_λ .

Моделирование влияния фоновой помехи на амплитудные характеристики фотодетектора

В видимом и ближнем ИК-диапазоне фотоприемники на ФЭУ по совокупности критериев обладают преимуществами перед другими фотодетекторами. Действие интенсивного фона на такой приемник проявляется, в первую очередь, в увеличении выходного сигнала, когда сигнальная засветка на входе поддерживается неизменной. При интенсивном фоне результирующий выходной ток может быть больше, чем сумма выходных токов, обусловленных только сигнальной и только фоновой засветкой, что может быть объяснено изменением коэффициента усиления ФЭУ под воздействием фона [3, 4].

На рис. 3,а показана рассчитанная зависимость изменения коэффициента усиления ФЭУ $\Delta M/M_0$ (ΔM – абсолютное изменение коэффициента усиления ФЭУ; M_0 – коэффициент усиления ФЭУ в отсутствие фона) от интенсивности фона, охарактеризованного током фотокатода $I_{фк}$. Эта характеристика хорошо совпадает с экспериментальными зависимостями [4, с. 51, рис. 3.3], снятыми для типичных жалюзийных ФЭУ, которые выдерживают значительную токовую нагрузку. Графики на рис. 3 соответствуют ФЭУ-84 при начальном токе равномерного делителя $I_{д0} = 3,5$ мА, напряжении питания $E = 1500$ В, $M_0 \approx 10^6$.

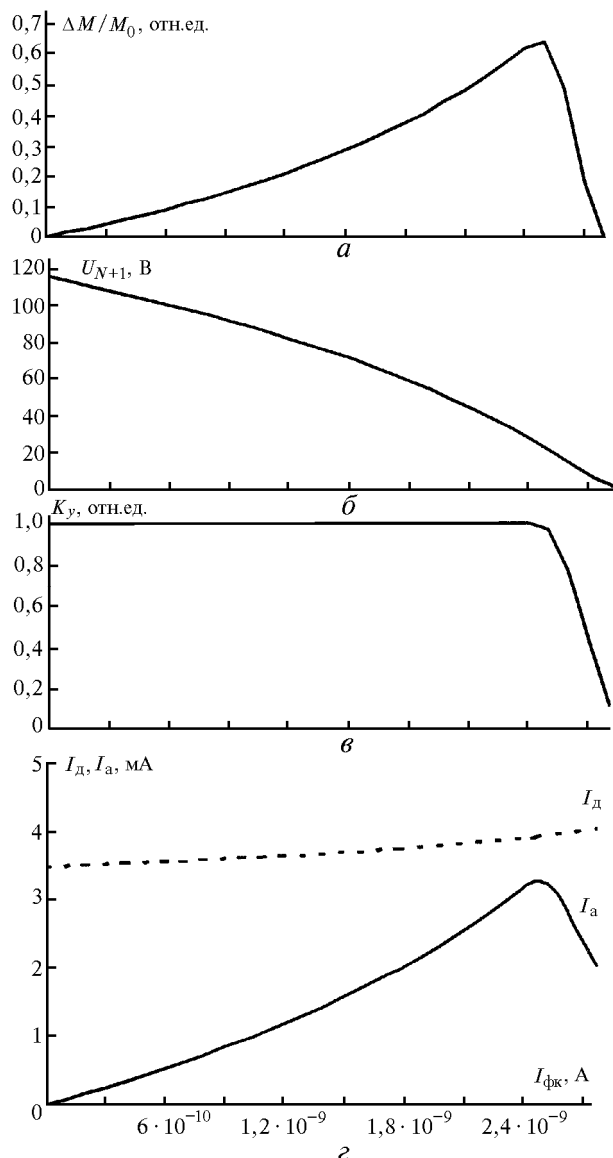


Рис. 3. Изменения характеристик ФЭУ: а – относительного коэффициента усиления $\Delta M/M_0$; б – напряжения последний диод–анод; в – коэффициента передачи последнего каскада ФЭУ; г – тока делителя и анодного фонового тока в зависимости от величины фонового тока фотокатода $I_{фк}$.

Относительное изменение коэффициента усиления жалюзийных ФЭУ можно представить как

$$\Delta M/M_0 = (I_a/I_{фк} - M_0)/M_0, \quad (6)$$

где I_a – ток анода; $I_{фк}$ – ток фотокатода; M_0 – коэффициент усиления ФЭУ в отсутствие фона.

Математическая модель фотоприемника на жалюзийных ФЭУ может быть описана следующей системой уравнений [4]:

$$\begin{cases} i_1 = i_0 (1 + kR (I_d - i_0)), \\ \dots \\ i_n = i_{n-1} (1 + kR (I_d - i_{n-1})), \\ \dots \\ i_N = i_{N-1} (1 + kR (I_d - i_{N-1}) K_y(U_{n+1})), \\ \sum (I_d - i_n) = E/R, n = 0 \dots N, \end{cases} \quad (7)$$

где N – число каскадов умножения; k – постоянный коэффициент, зависящий от материала диодов; E – напряжение питания; i_n – токи диодов; I_0 – ток фотокатода; $I_a = i_N$ – ток анода; $U_{n+1} = R(I_d - i_N)$ – напряжения 12-й диод–анод; K_y – коэффициент передачи последнего каскада ФЭУ, который описывался следующим образом [4]:

$$K_y = k_0 + k_1 U_{n+1}, \text{ если } U_{n+1} > U_n,$$

$$K_y = (1 + k_2 U_{n+1}) / (1 + kE / (N + 1)),$$

$$\text{если } 0 < U_{n+1} < U_n, \quad (8)$$

где U_n определяется маркой ФЭУ и характеризует его рабочий режим; K_y является функцией U_{n+1} – напряжения 12-й диод–анод. Изменение U_{n+1} с ростом фонового тока катода $I_{фк}$ вызывает изменение передачи последнего каскада умножителя, как показано на рис. 3,б,в. В свою очередь изменение коэффициента передачи последнего каскада K_y (спадающая часть характеристики, см. рис. 3,в) ведет к спаду характеристики анодного тока.

На основе рассмотренного выше изменения параметров, влияющих на относительный коэффициент усиления $\Delta M/M_0$, на рис. 3,г построен обобщенный график, на котором представлены изменения токов делителя I_d и анодного тока ФЭУ I_a в зависимости от величины тока фотокатода.

Результаты моделирования фоновых характеристик лидарных фотоприемников позволяют по измеренному фоновому току анода прогнозировать изменения их амплитудных характеристик (рис. 3,а,г), которые можно обобщенно представить в виде [4]:

$$M(I_{ф}) = M_0 [1 + \Delta M(I_{ф})/M_0], \quad (9)$$

и на этой базе корректировать измеренные лидарные сигналы.

Таким образом, при дальнейших расчетах по восстановлению оптических профилей объемного показателя ослабления будем вводить поправку на принимаемые составляющие сигнала и фоновой помехи согласно (9) и результатам, иллюстрированным на рис. 3.

Модельные эксперименты по восстановлению профиля объемного показателя ослабления

Численное моделирование восстановления профиля объемного показателя ослабления проводилось по следующей схеме: 1) восстановление профиля $\alpha(R)$ в отсутствие фона при вариации параметров среды; 2) восстановление профиля $\alpha(R)$ с учетом воздействия фоновой помехи и изменения характеристик фотоприемных устройств; 3) влияние шумов фотоприемника на результаты восстановления профилей.

В настоящее время существуют разнообразные методы решения уравнения оптической локации. Ниже приведены результаты, в которых использован метод последовательных слоев, основанный на предположении о постоянстве коэффициента рассеяния и индикатрисы рассеяния внутри элементарного слоя. В слабозамутненной атмосфере данный метод обладает довольно высокой точностью восстановления, хорошо «отслеживает» как фронты, так и плоские вершины модельного профиля [1]. Для расширения границ применимости метода в модели рассеяния мы принимали во внимание как однократное рассеяние, так и рас-

сеяние высших порядков, учтенное введением поправочных коэффициентов согласно [1].

Если значение объемного показателя ослабления на начальном участке известно, то для любого другого i -го слоя, в приближении однократного рассеяния, сигнал принято записывать в виде [1]:

$$P_c(R_i) = AP_0\alpha(R_i)b(R_i)R^{-2} \times \exp \left\{ -2 \left[\alpha(R_0)R_0 + \sum_{j=1}^n \alpha(R_j)\Delta R_j \right] \right\}. \quad (10)$$

Формальное решение записывают следующим образом:

$$\alpha(R_i) = 2P_c(R_i)R_i^2 \exp \left[2\alpha(R_0)R_0 + 2 \sum_{j=1}^n \alpha(R_j)\Delta R_j \right] / [AP_0b(R_i)], \quad (11)$$

где $P_c(R_i)$ – мощность сигнала, принимаемая с i -го слоя; P_0 – мощность излучателя; A – аппаратная функция, характеризующаяся параметрами приемо-передатчика, потерями в оптических системах и т.д.; b – постоянная величина, известная заранее для определенного класса сред; ΔR_i – толщина i -го слоя; n – количество слоев; α – объемный показатель ослабления.

1. Первоначально проводилось восстановление профиля $\alpha(R)$ в отсутствие фона при вариации параметров среды с целью определения условий наилучшего восстановления и проведения для них в дальнейшем расчетов с учетом фона.

Исходными параметрами моделирования являлись: модельный профиль объемного коэффициента ослабления $\alpha(R)$; средний показатель ослабления $\alpha_0 = 0,03; 0,1; 1,0$ соответствует ясной атмосфере, легкой и умеренной дымке.

Результаты расчетов методом последовательных слоев приведены на графике рис. 4. Достоверное восстановление профиля ограничивается условиями дымки и ясной погоды ($\alpha_0 = 0,3 \text{ км}^{-1} \div \alpha_0 = 0,03 \text{ км}^{-1}$), что подтверждает результаты анализа точностных характеристик [1].

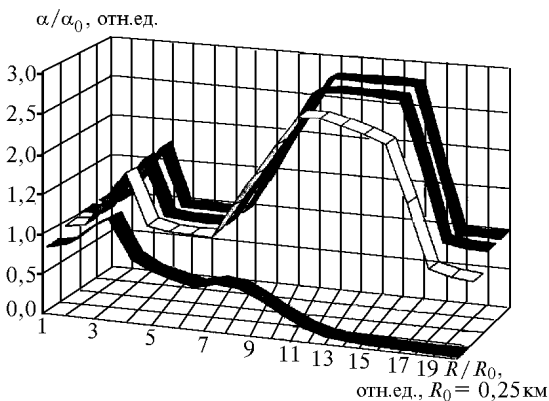


Рис. 4. Восстановление нормированного объемного показателя ослабления α/α_0 методом последовательных слоев в отсутствие фона для различных атмосферных условий; сверху вниз – модельный профиль; $\alpha_0 = 0,03 \text{ км}^{-1}$ (ясно); $\alpha_0 = 0,1 \text{ км}^{-1}$ (легкая дымка); $\alpha_0 = 1,0 \text{ км}^{-1}$ (умеренная дымка)

2. Далее рассматривалось воздействие фоновой помехи на результаты восстановления профиля $\alpha(R)$ в ясной атмосфере, в условиях которой наблюдается наиболее точное восстановление профиля показателя ослабления без учета фона. Относительной фоновой освещенности горизонтальной поверхности $h_{\text{отн}} = H_\lambda/H_{\lambda\text{max}}$, равной $10^{-2}, 10^{-1}$ и 10^0 , соответствуют значения фоновой освещенности горизонтальной поверхности $H_\lambda = 10^2, 10^3, 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм})$. Для «чистой» атмосферы ($\alpha_0 = 0,03 \text{ км}^{-1}$) были получены следующие результаты восстановления методом последовательных слоев в различных фоновых условиях при компенсации «традиционным» методом простого вычитания фона, представленные на рис. 5.

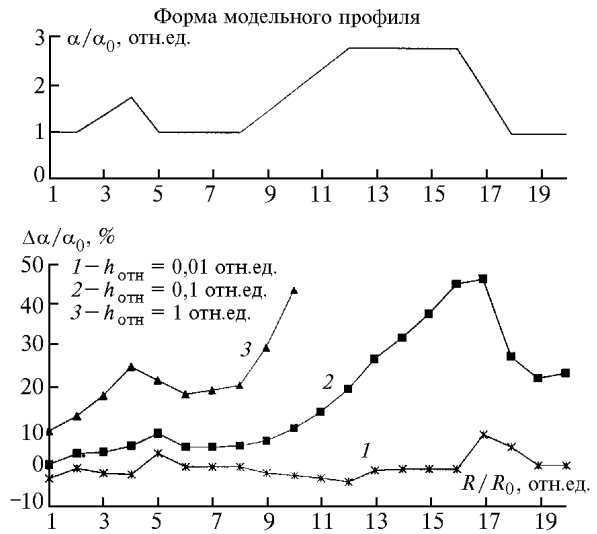


Рис. 5. Относительная погрешность восстановления объемного показателя ослабления α методом последовательных слоев с компенсацией фона по «традиционной» методике в различных фоновых условиях для $\alpha_0 = 0,03 \text{ км}^{-1}$; $R_0 = 0,25 \text{ км}$

Из рис. 5 видно, что хорошее восстановление наблюдается при низком уровне фона ($h_{\text{отн}} = 0,01$), при этом относительная погрешность восстановления не превышает 10%. При ограничении относительной погрешности восстановления в $10 \div 20\%$ относительная дальность достоверного зондирования в пределах установленной точности при относительной интенсивности фона $h_{\text{отн}} = 0,1$ оказывается в 1,5 раза меньше максимальной дальности для $h_{\text{отн}} = 0,01$. При дальнейшем росте интенсивности фона решение быстро расходится и при $h_{\text{отн}} = 1,0$ установленный предел точности восстановления достигается при относительной дальности R/R_0 , в $5 \div 8$ раз меньшей максимума, соответствующего слабому фону.

Влияние шумов приемной системы

Рассмотрим восстановление профиля объемного показателя ослабления в соответствии с разработанной методикой, учитывая изменение характеристик и возрастающее воздействие шумов фотоприемника.

Под действием интенсивной фоновой засветки значительно возрастают шумы фотоприемника. Заданное отношение сигнал-фон на выходе обобщенной системы прямого фотодетектирования с внутренним коэффициентом усиления по току ρ определяет минимальный ток сигнала [7]:

$$I_{c \min} = e \Delta f \rho \left\{ 1 + \left[1 + (I_{\phi} + I_t) / (e \Delta f \rho) \right]^2 \right\}^{1/2}, \quad (12)$$

где e – заряд электрона; $\Delta f = f_{\max}$ – частотная полоса; I_{ϕ} – фоновый анодный ток фотодетектора; I_t – темновой ток.

Флуктуации тока сигнала под действием фона возрастают. Поэтому можно считать, что восстанавливаемый профиль будет лежать внутри некоторой амплитудной полосы, соответствующей шумовой полосе лидарного сигнала. Восстановление профиля при компенсации фона на основании предложенного подхода с учетом возрастания шумов под влиянием фона дает следующий результат, показанный на рис. 6. Внешние границы полосы восстанавливаемого профиля соответствуют максимальной интенсивности фона для средних широт ($h_{\text{отн}} = 1$).

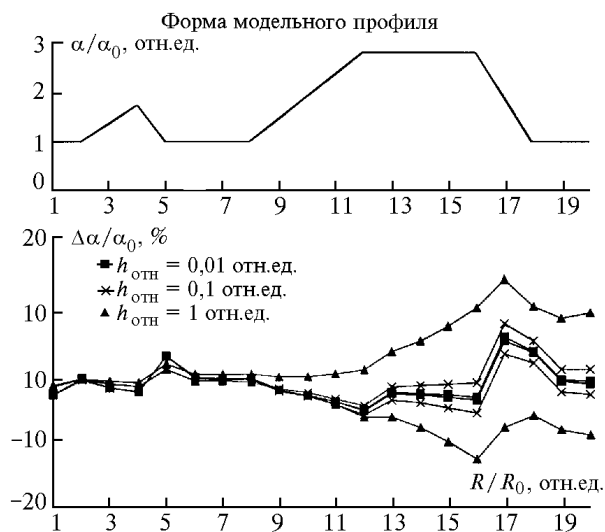


Рис. 6. Относительная погрешность восстановления объемного показателя ослабления α методом последовательных слоев на основе компенсации фона с учетом шумов фотоприемника в различных фоновых условиях для $\alpha_0 = 0,03 \text{ км}^{-1}$; $R_0 = 0,25 \text{ км}$

Максимальная погрешность восстановленного профиля относительно модельного профиля не превышает 15%, что находится в допустимых пределах. Сопоставление результатов, иллюстрированных на рис. 5 и 6, показывает высокую эффективность предложенного подхода по сравнению с «традиционным» методом.

R.R. Agishev and A.I. Usanov. **Mathematical Simulation of the Lidar Operation under Noisy Conditions.**

A mathematical model of the lidar system intended for remote study of the ground atmospheric layers is worked out. The model allows one to describe adequately the process of measuring under realistic noisy conditions and to perform corresponding correction of the received lidar signal with allowing for background factor.

Таким образом, данный подход позволяет восстанавливать профиль объемного показателя ослабления при максимальном фоновом воздействии $h_{\text{отн}} = 1$ с точностью, полученной традиционным методом при уровне фона $h_{\text{отн}} = 0,01$.

Заключение

Разработанная математическая модель системы «передатчик – исследуемая среда – приемник – устройство вторичной обработки» позволяет адекватно описать процесс измерений в реальной помеховой обстановке и провести коррекцию принимаемого лидарного сигнала с учетом влияния фактора фона. Предложенный подход обеспечивает более высокую точность измерения и восстановления оптических профилей $\alpha(R)$ в сложных помеховых условиях. Так, при максимальном значении спектральной яркости фона неба для средних широт $B_{\lambda} = 300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм})$, что соответствует $h_{\text{отн}} = 1$, относительная погрешность измерений в соответствии с предлагаемой методикой не превышает 15%, что удается достичь при традиционном подходе лишь при уровне фона, в 100 раз меньшем. Дальность достоверного зондирования при равных фоновых условиях при использовании описанного подхода увеличивается до 10 раз по сравнению с традиционно используемыми методами обработки лидарных сигналов.

1. Орлов В.М., Самохвалов И.В., Креков Г.М., Миронов В.Л., Балин Ю.С., Банах В.А., Белов М.Л., Копытин Ю.Д., Лукин В.П. Сигналы и помехи в лазерной локации. М.: Радио и связь, 1985. 247 с.
2. Нортенд К.А., Хани Р.К., Эванс В.Е. Лазерный локатор (лидар) для метеорологических наблюдений // Приборы для научных исследований. 1976. Т. 37. N 4. С. 3–11.
3. Ильичевский В.С., Нолле П.М. К вопросу о нелинейности фотоэлектронных умножителей. Измерение оптико-метеорологических параметров атмосферы с использованием лазерного излучения: Сб. статей. Томск: ИОА СО АН СССР, 1980. С. 27–31.
4. Агишев Р.Р. Защита от фоновой помехи в оптико-электронных системах контроля состояния атмосферы. М.: Машиностроение, 1994. 128 с.
5. Агишев Р.Р. Системы оптической локации и дистанционного зондирования: особенности защиты от внешних помех. Казань: изд. КГТУ, 1996. 63 с.
6. Абрамочкин А.И., Нолле П.М., Тихомиров А.А. Фотоприемное устройство на ФЭУ с временной регулировкой коэффициента усиления // Измерительные приборы для исследования параметров приземных слоев атмосферы: Сб. статей. Томск: ИОА СО АН СССР, 1977. С. 152–156.
7. Мельчиор Х., Фишер М. Фотоприемники для систем оптической связи // Тр. Института инженеров по электронике и радиотехнике. 1970. Т. 58. N 10. С. 69–90.