



Метод определения коэффициента экстинкции атмосферы по данным гиперспектрального сенсора УФ-А диапазона



Егоров В.В.¹, Калинин А.П.², Родионов И.Д.³, Родионов А.И.³, Родионова И.П.³

1. Институт космических исследований РАН, 2. Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, 3. АО «НТЦ «Реагент»

Введение

Оперативное определение ослабления световых волн в атмосфере Земли – важная научно-техническая задача, решение которой имеет большое научное и практическое значение. Выявление зависимости коэффициента экстинкции атмосферы от длины волны при гиперспектральном зондировании в УФ-А диапазоне (300-400 нм) позволяет эффективно исследовать процессы молекулярного и аэрозольного рассеяния и поглощения. Результатом такого исследования служит информация о загрязнении атмосферы выбросами промышленных предприятий, автотранспорта и других источников, определении концентраций озона и о ряде других экологических процессов. Выбор УФ-А диапазона имеет целью получение высокого спектрального разрешения при проведении измерений рассеивающих и поглощающих свойств атмосферы, а также излучений различных природных и антропогенных объектов. Кроме того, актуальным представляется подход, базирующийся на определении отрицательного контраста (контраст Вебера) изображений объектов, наблюдаемых на фоне небосвода.

Для практической реализации указанных исследований в АО «НТЦ «Реагент» была выполнена разработка высокочувствительного монофотонного гиперспектрального сенсора УФ-ВИД диапазона (300-550 нм), имеющего 100 спектральных каналов со спектральным разрешением 0,3 нм.

Внешний вид монофотонного гиперспектрометра приведен на рис. 1.



Рис. 1. Монофотонный гиперспектрометр УФ-ВИД.

Для определения коэффициента экстинкции атмосферы по данным указанного сенсора был разработан метод измерения, основанный на оценке отрицательного контраста изображения объекта на фоне излучения небосвода и оценена точность метода.

Кроме гиперспектрометра в АО «НТЦ «Реагент» был создан прибор УФ-А диапазона (см. рис. 2), включающий в себя съемочную камеру на ПЗС матрице, объектив и набор сменных фильтров. Прибор, обладающий большей чувствительностью за счет более широкополосных фильтров, позволяет работать на больших расстояниях, правда с худшим спектральным разрешением. Это прибор также может использоваться для изучения экстинкции атмосферы.



Рис. 2. Сенсор, включающий камеру УФ-А диапазона, объектив и сменные фильтры.

Контраст объекта на фоне небосвода при дистанционном наблюдении

В качестве такого объекта могут быть выбраны: телевизионные башни, высотные здания, трубы предприятий и летательные аппараты. Эти объекты служат своего рода экраном, заслоняющим излучение небосвода. Измеряя спектральные плотности энергетической яркости (СПЭЯ) объекта и излучения небосвода, по значениям которых вычисляется контраст (1).

$$K = (L_o - L_\phi) / L_\phi \quad (1)$$

где L_o – светимость объекта, L_ϕ – светимость фона (небосвода).

Светимость объекта включает в себя следующие компоненты: собственную светимость, обусловленную рассеянием падающей на объект солнечной радиации со светимостью L_c и равную $\rho_o \cdot L_c \cdot e^{-\alpha_o R}$, светимость небосвода в направлении объект-приемник, равную $\sim L_n(1 - e^{-\alpha_o R})$, где L_n – собственная светимость небосвода, которая равна светимости фона, т.е. $L_n = L_\phi$ в соответствии с (1) и суммарную светимость Солнца и небосвода, обусловленную рассеянием радиации этих двух источников земной поверхностью и объектом, которая равна $\rho_o \cdot \rho_s (L_c + L_n) e^{-2\alpha_o R}$.

Здесь ρ_o спектральное альbedo объекта, α_o – коэффициент экстинкции атмосферы, ρ_s – спектральное альbedo земной поверхности, на которой расположен приемник УФ-А излучения, R – расстояние от объекта до приемника излучения.

Подставляя в (1) значения перечисленных выше светимостей, после небольших преобразований получим

$$K \approx [\rho_o \cdot k + \rho_o \cdot \rho_s (1+k) e^{-2\alpha_o R} - 1] e^{-\alpha_o R} \quad (2)$$

Здесь $k = L_c / L_n$ – отношение светимости Солнца к светимости небосвода.

Располагая данными о дальности объекта R , спектральных альbedo ρ_s и ρ_o , можно определить величину коэффициента экстинкции α_o .

Метод определения коэффициента экстинкции и его относительная точность

Формула определения коэффициента экстинкции

В качестве исходной берется формула (2) расчета контраста объекта на фоне небосвода для случая пасмурной погоды, т.е. при $k = 0$. Такой выбор обусловлен тем, что формула в этом случае обладает меньшей неопределенностью, поскольку точное знание параметра k сопряжено с необходимостью получения информации о высоте и азимуте Солнца, метеословий, угла визирования объекта и множества других условий. Тогда, полагая в (2) значение $k = 0$ будем иметь

$$K \approx (\rho_o \cdot \rho_s e^{-\alpha_o R} - 1) e^{-\alpha_o R} \quad (3)$$

Величину экстинкции целесообразно определять на сравнительно большой дальности до объекта зондирования или когда значение оптической толщины атмосферы $\alpha_o R$ много больше 1. В этом случае можно пренебречь первым слагаемым в скобках формулы (3), положив $\rho_o \cdot \rho_s e^{-\alpha_o R} = 0$.

Физически это означает, что влияние подсветки объекта излучением Солнца и небосвода, рассеянным земной поверхностью, становится пренебрежимо малым по сравнению со свечением столба воздуха на линии объект-приемник. При этом получим:

$$K \approx - e^{-\alpha_o R} \quad (4)$$

Очевидно, что контраст будет всегда отрицательным.

Прологарифмируем левую и правую части (4) и решим полученное равенство относительно α_o .

$$\alpha_o = - 1/R \ln(-K) \quad (5)$$

Из (3) следует, что на величину α_o и на ошибку ее оценки будут влиять измеряемые значения R и K . Введем следующее обозначение $-K = |K|$ из-за отрицательности контраста.

Взяв логарифмическую производную левой и правой частей (5), переходя от приращений к среднеквадратическим отклонениям (СКО) и считая слагаемые ошибок независимыми, получим выражение для относительной погрешности оценки α_o :

$$\frac{\sigma_{\alpha_o}}{\alpha_o} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{|K|}}{|K| \cdot \ln|K|}\right)^2} \quad (6)$$

Относительная погрешность σ_R/R измерения дальности определяется типом используемого в измерениях дальномера. Она хорошо известна и может меняться в пределах от сотых долей процента до единиц процентов, поэтому останавливаться далее на ней не имеет смысла. Целесообразно поэтому подробнее рассмотреть вопрос об относительной погрешности оценки контраста K .

Относительная погрешность оценки контраста

Средним значением контраста K_c , определяемого в эксперименте, будем считать величину отношения разности средней яркости объекта S_o и средней яркости небосвода S_n к средней яркости небосвода, т.е.

$$K_c = (S_o - S_n) / S_n \quad (7)$$

Рассчитаем величину относительной погрешности контраста по аналогии со случаем получения формулы для относительной погрешности оценки α_o . Для этого прологарифмируем (7), затем продифференцируем обе части полученного результата и после перехода от приращений к СКО получим

$$\frac{\sigma_{|K|}}{|K|} = \frac{1}{S_n - S_o} \sqrt{\sigma_{S_o}^2 + \left(\frac{S_o}{S_n}\right)^2 \cdot \sigma_{S_n}^2}, \quad (8)$$

где $\sigma_{S_o}^2$ – дисперсия оценки S_o , а $\sigma_{S_n}^2$ дисперсия оценки S_n . Поскольку точность определения относительной погрешности α_o , задаваемая (6), не критична по отношению к небольшим изменениям входящих в нее параметров, то в нее вместо $\sigma_{|K|}$ можно подставлять величину σ_{K_c} / K_c . Тогда в результате получим

$$\frac{\sigma_{\alpha_o}}{\alpha_o} \approx \sqrt{\left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 + \frac{1}{\ln^2|K|} \cdot \left(\frac{1}{S_n - S_o}\right)^2 \cdot \left[\sigma_{S_o}^2 + \left(\frac{S_o}{S_n}\right)^2 \cdot \sigma_{S_n}^2\right]} \quad (9)$$

Подкорненное выражение формулы (9) состоит из двух слагаемых. Первое символизирует относительную дисперсию оценки дальности до объекта, о чем было сказано выше. Второе слагаемое являет собой произведение трех сомножителей. Первый сомножитель указывает на рост этого слагаемого, вызванного падением контраста изображения объекта.

Второй определяет степень близости S_n и S_o . Чем ближе величины этих яркостей друг к другу, что имеет место на больших дальностях зондирования объекта, тем больше относительная погрешность. Третий сомножитель отвечает за сумму дисперсии оценки яркости объекта $\sigma_{S_o}^2$ и дисперсии яркости небосвода $\sigma_{S_n}^2$ с относительным множителем $(S_o/S_n)^2$, характеризующим весовой вклад каждой из яркостей.

Заключение

Оценка спектральных свойств коэффициента экстинкции атмосферы в УФ-А диапазоне позволит определять состав и свойства ее газовых компонент и аэрозолей, поскольку именно в спектре заключена вся информация, содержащаяся в принимаемом излучении. Представленный в докладе метод определения спектральных свойств коэффициента экстинкции атмосферы по данным наблюдений различных объектов на фоне небосвода в УФ-А диапазоне позволяет решить эту задачу. Он особенно эффективен, при выполнении измерений в пасмурную погоду, когда светимость Солнца практически равна нулю. Это позволяет избавиться от ряда неопределенностей, связанных с рассеянием УФ-А излучения небом и зондируемым объектом.

По данным оценки коэффициента экстинкции, определяемой представленным методом, можно оперативно получать данные о локальных свойствах атмосферы: степени ее загрязнения антропогенными выбросами, озонем, генерируемым мощными силовыми электроустановками, а также о газовом составе атмосферного воздуха.