

В.П. Будак, В.А. Селиванов

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ АТМОСФЕРЫ

Предложена простая электрическая модель передаточной функции атмосферы, реализуемая элементарными RC -звеньями. Использование электрического эквивалента позволяет визуализировать искажения изображений, вносимых атмосферой в реальном масштабе времени при изменяющихся параметрах атмосферы.

В системах дистанционного зондирования поверхности Земли в ряде случаев необходимо уделять внимание оценке пространственно-частотных искажений, вносимых атмосферой в формируемое изображение [1]. В общем случае сквозная оптическая передаточная функция (ОПФ) атмосферы может быть представлена произведением нескольких компонент: ОПФ слоя воздуха, находящегося в пограничной с обшивкой носителя области; ОПФ турбулентности атмосферы, связанная с флуктуациями показателя преломления; ОПФ собственно рассеивающего слоя [2, 3], вносящих (в силу круговой симметрии функции рассеяния точки искажающих сред) линейные искажения в изображения. Искажения, обусловленные собственно рассеивающими свойствами атмосферы, преобладают в коротковолновой области видимого диапазона. Так, в работе [4] показано, что влияние атмосферы может более чем в два раза уменьшить пространственное разрешение телевизионной спутниковой аппаратуры.

Оценка искажений может быть получена при решении соответствующего трехмерного уравнения переноса излучения для точечного изотропного источника. Однако точное решение сопряжено со значительными вычислительными трудностями и не дает наглядного представления о взаимодействии многих оптических параметров, определяющих поле рассеянного излучения. Необходимость учета атмосферных эффектов при инженерных расчетах побудила многих авторов предложить ряд аппроксимаций, нормированных ОПФ (частотно-контрастных характеристик (ЧКХ)) атмосферы, элементарными функциями. Анализ точности подобных аппроксимаций показывает, что наилучшее приближение в низкочастотной области дается выражением вида

$$T_v = (1 + \tau^2 v^2)^{-1/2}, \quad (1)$$

где τ — параметр; v — пространственная частота, рад⁻¹.

Характерным отличием функции рассеивающего слоя является δ -особенность, определяемая наличием прямого нерассеянного излучения. С учетом этого наилучшей аппроксимацией для всего диапазона пространственных частот изображения может служить выражение

$$T_v = (1 - c) (1 + \tau^2 v^2)^{-1/2}, \quad (2)$$

где c — константа.

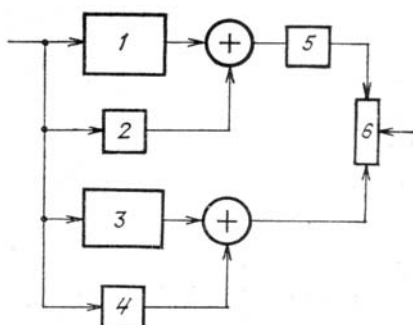


Рис. 1. Блок-схема электрической модели атмосферы: 1, 3 — фильтры нижних частот, реализующих «наилучшие» и «наихудшие» условия наблюдения; 2, 4, 5 — линии задержки; 1, 3; 6 — потенциометр

Поскольку каждому состоянию атмосферы соответствует свой набор исходных параметров для расчета по выражению (2) необходимо иметь таблицу значений c и τ во всем диапазоне изменений атмосферных условий. Для разработчиков аппаратуры наблюдения визуальная оценка искажений может

быть получена с привлечением специальных вычислителей для обработки изображений, которые не всегда дают возможность исследовать динамику искажений, особенно в реальном масштабе времени.

Возможности физического моделирования рассеивающих свойств атмосферы с регулируемыми оптическими параметрами в лабораторных условиях ограничены. Учитывая линейность рассматриваемых искажений и полагая, что апертурные искажения, вносимые оптической системой и датчиком свет-сигнал также линейны, можно моделировать рассеивающие свойства атмосферы непосредственно в электрическом тракте телевизионной системы, что дает возможность визуализировать их, например, на экране видеоконтрольного устройства.

Подобная электрическая модель атмосферы легко реализуется, поскольку аппроксимация (2) является композицией амплитудно-частотной характеристики элементарного RC -фильтра нижних частот (ФНЧ), имеющего практически линейную фазочастотную характеристику, и ослабленного прямого сигнала. Для моделирования ЧКХ атмосферы при изменяющихся атмосферных условиях необходимо варьировать параметры c и τ фильтра, что приводит не только к изменению полосы пропускания фильтра, но и к изменению общего коэффициента передачи.

Минимизировать количество расчетных параметров в электрической модели можно следующим образом. В требуемом диапазоне изменений атмосферных условий наблюдения определим «наилучшую» и «наихудшую» ЧКХ атмосферы и аппроксимируем их АЧХ двух параллельно включенных звеньев типа (2). Тогда промежуточные значения ЧКХ атмосферы будут определяться долей искажений, вносимых каждым звеном в суммарный сигнал. Суммарная АЧХ электрической модели записывается в виде

$$T_v = [(1 - c_1)(1 + \tau_1^2 v^2)^{-1/2}] (1 - a(\gamma)) + [(1 - c_2)(1 + \tau_2^2 v^2)^{-1/2}] a(\gamma), \quad (3)$$

где $\tau_{1,2}$ и $c_{1,2}$ – константы; γ – параметр условий наблюдения.

Как видно из анализа выражения (3), единственно изменяющимся параметром модели является весовой коэффициент $a(\gamma)$, не влияющий на частотные свойства ФНЧ. Блок-схема электрической модели представлена на рис. 1, где ФНЧ отражают «наилучшие» и «наихудшие» условия наблюдения соответственно.

Сквозная АЧХ каждого плеча линеаризуется (для создания симметричных искажений) с помощью линии задержки с временем задержки t_3 ФНЧ по сравнению с временем задержки прямого сигнала

$$t_{31,2} = |d \arctg(-\omega \tau_{1,2})/d\omega|; \quad (4)$$

$$t_{33} = t_{32} - t_{31},$$

где $\omega = 2\pi v$, v – скорость сканирования.

Для иллюстрации возможностей моделирования используем наблюдения в ближнем ультрафиолетовом диапазоне (0,3 ... 0,4 мкм), где влияние рассеивающих свойств атмосферы оказывается наиболее заметно [5]. Для расчетов воспользуемся выражением, полученным при решении уравнения переноса излучения для горизонтально-однородной атмосферы модифицированным методом сферических гармоник [6]

$$T_v = \exp \left\{ - \int_0^H \kappa(\xi) d\xi + \frac{H}{V\chi} \int_0^{V\chi} \sigma \left(\frac{H\xi}{V\chi} \right) x(\xi) d\xi \right\}, \quad (5)$$

где $\chi = \sqrt{v(v+1)}$; $x(\xi)$ – индикатриса рассеяния; $\kappa(\xi)$ – коэффициент поглощения среды; σ – коэффициент рассеяния; H – высота наблюдения. Параметры атмосферы на длине волны 0,35 мкм взяты из модели Грина для ультрафиолетовой области [7].

Заметим, что при постоянной высоте наблюдения для определения характеристик ФНЧ «наилучшие» условия наблюдения можно задать, рассчитав ЧКХ рэлеевской атмосферы (метеорологическая дальность видимости S_m 250 км), а «наихудшие» можно определить экспериментально. Промоделируем влияние метеорологической дальности видимости, изменяющейся по трассе наблюдения при высоте наблюдения 5 км (рис. 2).

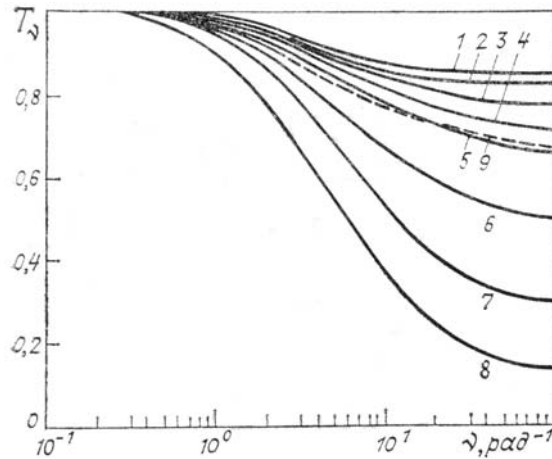


Рис. 2. Результаты аппроксимации расчетной ЧКХ атмосферы АЧХ характеристикой электрической модели: 1...8 — для метеорологической дальности видимости S_m от 250 до 3 км при $H = 5$ км и $\lambda = 0,35$ мкм; 9 — пример расчетного значения ЧКХ атмосферы

Постоянные фильтров τ_1 и τ_2 составляют 0,673 и 0,294, величины c_1 и c_2 — 0,843 и 0,1 соответственно. Точность аппроксимации крайних и промежуточных значений ЧКХ — порядка одного процента при следующих значениях весового коэффициента.

S_m , км	250	100	50	30	20	10	3
$a(S_m)$	0	0,035	0,091	0,16	0,245	0,458	1

Монотонная зависимость весового коэффициента от метеорологической дальности видимости позволяет плавно изменять атмосферные условия наблюдения при моделировании. На рис. 3 представлены осциллограммы сигнала тест-объекта, эквивалентного входному оптическому сигналу, с учетом апертурных искажений, вносимых оптико-электронной частью системы и электрической модели атмосферы.

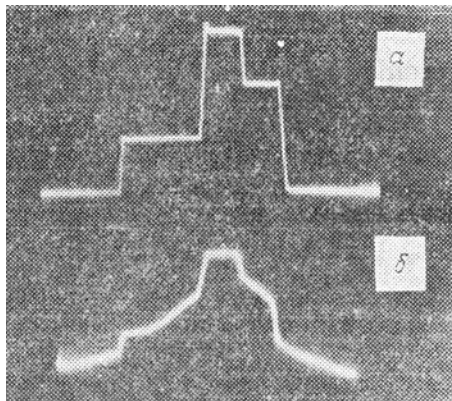


Рис. 3. Осциллограммы электрического тестосигнала для телевизионной системы: a — в отсутствие апертурных искажений; b — с учетом искажений оптико-электронного тракта и рассеивающих свойств атмосферы

Рассмотренная одномерная электрическая модель атмосферы служит аналоговым прототипом цифрового устройства, которое легко обобщается на двумерный случай, и позволяет синтезировать на своей основе схему инверсного линейного фильтра, корректирующего атмосферные искажения.

1. Кондратьев К.Я., Смокий О.И., Козодеров В.В. Влияние атмосферы на исследования природных ресурсов из космоса. М.: Машиностроение. 1985. 272 с.
2. Овечкин В.Н. //Изв. вузов. Сер. Геодезия и аэрофотосъемка. 1985. № 4. С. 81—89.
3. Компьютеры в оптических исследованиях/Под ред. Б. Фридена. М.: Мир. 1983. 488 с.
4. Kaufman Y. J. //Appl. Optics. 1984. V. 23. № 22. P. 4164—4172.
5. Селиванов В.А. //Исследование земли из космоса. 1988. № 1. С. 111—120.

6. Будак В.П., Мельников Г.А., Савенков В.И., Федосов В.П. Малоугловая модификация метода сферических гармоник //Тезисы докл. IX Пленума рабочей группы по оптике океана. Оптика моря и атмосферы. Л.: Изд. ГОИ, 1984. С. 117–118.
7. Riewe F.R., Green A.E.S. //Appl. Optics. 1978. V. 17. № 12. P. 1923–1929.

Московский институт связи

Поступило в редакцию
14 декабря 1988 г.

V. P. Budak, V. A. Selivanov. **Electrical Model of Atmospheric Optical Transfer Function.**

A simple electrical model of atmospheric optical transfer function is realized by *RC*-units. Utilization of electrical equivalent allows to visualize in real time image distortions inserted by the atmosphere with the parameter change.