

В.В. Белов, Б.Д. Борисов, А.Б. Серебrenников

## ПЕРЕДАТОЧНЫЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ СВЯЗИ НАД ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 1.02.99 г.

Принята к печати 4.06.99 г.

Методом Монте-Карло исследованы импульсные реакции оптических каналов связи через отражающие поверхности, а также отраженные и пропущенные рассеивающей средой потоки. Рассмотрено влияние на них модели отражения, геометрических параметров схемы излучения и регистрации сигналов, оптической плотности среды.

## Введение

Оптические системы связи по их назначению и особенностям работы в открытой атмосфере можно условно разделить на линии дальней связи (например, загоризонтной) и наземные линии связи в пределах прямой видимости. Идея создания загоризонтных линий оптической связи с использованием рассеяния света на облачных или других рассеивающих образованиях обсуждалась, например, еще в начале 70-х гг. [1]. Возможность использования рассеянного вперед оптического излучения для передачи информации на коротких приземных линиях связи отмечается в [2]. В монографии [3] рассмотрены некоторые аспекты работы таких систем связи.

Интерес исследователей к проблеме передачи оптической информации по каналам рассеяния связан с необходимостью повышения надежности и расширения возможностей работы таких систем в сложных атмосферно-оптических условиях.

В большинстве случаев трасса короткой линии связи проходит на малых высотах над подстилающей поверхностью. Очевидно, что в схемах передачи информации с использованием рассеянного вперед оптического излучения необходимо учитывать переотраженную покровом радиацию. При этом структуры строения и типы этих поверхностей могут быть самые разнообразные.

Обычно угловую отражательную способность естественных и искусственных шероховатых поверхностей характеризуют направленным коэффициентом отражения, определяемым как отношение яркости поверхности, измеренной в заданном направлении, к ее освещенности в заданном спектральном интервале (индикатриса спектральной яркости). Безразмерным аналогом этой характеристики является коэффициент яркости, определяемый как отношение яркости поверхности в соответствующем направлении к яркости абсолютно белой отражающей по закону Ламберта поверхности [4].

Наиболее обширный материал по полевым наземным измерениям угловой отражательной способности различных объектов ландшафта накоплен для интервала спектра от 0,4 до 1,0 мкм (фотографический диапазон аэрокосмической съемки). В меньшей степени такие исследования охватывают участок спектра 1,0–2,5 мкм [5–8].

Необходимо отметить одну особенность, присущую наземным, но в большей мере самолетным измерениям коэффициентов яркости элементов ландшафта, – это значительное пространственное усреднение по поверхностям объектов. В основной массе имеющийся материал не позволяет оценить тонкую структуру углового рассеяния подстилающей поверхности.

Характеристики отражательной способности естественных поверхностей сложным образом зависят от направления падения радиации и от угла наблюдения. Экспериментальные и расчетные данные показывают, что практически для всех реальных поверхностей закон Ламберта не выполняется. Примеры измеренных индикатрис яркости некоторых естественных поверхностей можно найти в [7, 9]. Результаты расчетов углового распределения отраженного излучения от модельных поверхностей приведены в [8].

## Постановка задачи, метод решения

В данной статье рассмотрено влияние отражательных свойств поверхности, над которой функционирует линия связи, и рассеивающих свойств среды на отраженные, пропущенные световые потоки и импульсную реакцию оптического канала связи.

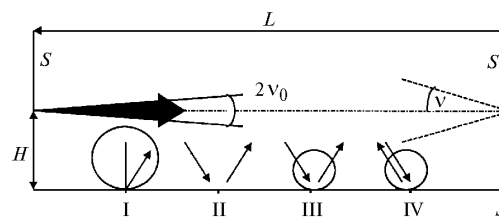


Рис. 1. Геометрическая схема экспериментов

Источник лазерного излучения (рис. 1) расположен на высоте  $H$  над однородной плоской отражающей поверхностью  $S$ . Он характеризуется монохроматичностью излучения на длине волны  $\lambda$ . Рассмотрены варианты точечного мононаправленного излучателя, характеризуемого угловой расходимостью  $\nu_0$ . Его оптическая ось параллельна отражающей плоскости. Приемник излучения ориентирован на источник, т. е. их оптические оси совпадают, угол его поля зрения равен  $2\nu$ .

Оптические свойства поверхности задаются индикатрисой (или диаграммой) отражения  $f(\theta, \varphi)$  и коэффициентом поглощения  $\alpha$ . Обе эти характеристики не зависят от координат точки на поверхности, т.е.  $f(\rho, \theta, \varphi) = f(\theta, \varphi)$ ,  $\alpha(\rho) = \alpha$  (здесь  $\rho$  – радиус-вектор точки на поверхности  $S$ ). Рассмотрены четыре модели отражательных свойств поверхности (как некоторые предельные случаи): ламбертовское I, зеркальное II, композиции ламбертовское + зеркальное III и ламбертовское + антизеркальное IV на рис. 1. Композиция законов отражения составлена так, что энергии ее отраженных компонент равны. Это значит, что при взаимодействии фотона с поверхностью отраженная энергия с вероятностью 0,5/0,5 распределяется между компонентами композиции, например в случае III с вероятностью 0,5 фотон отражается по закону Ламберта и с такой же вероятностью происходит зеркальное отражение.

Однородная рассеивающая и поглощающая среда заполняет пространство между отражающей поверхностью  $S$  и плоскостями, перпендикулярными ей и оптической оси приемника и проходящими через входные зрачки приемной и излучающей оптики. Ее оптические свойства задаются индикатрисой рассеяния  $g(\theta)$  и коэффициентами поглощения  $\beta_{ab}$  и рассеяния  $\beta_{sc}$  и соответствуют дисперсным средам, образованным сферическими частицами.

Исследования проведены в рамках линейно-системного подхода [3] методом Монте-Карло. В разработанной для этой цели программе реализован метод прямого моделирования и метод локального счета [10]. Рассматривались следующие характеристики оптического излучения:

- поток  $P_1$ , отраженный средой и поверхностью и пересекающий плоскость  $S_1$ ;
- поток излучения  $P_2$ , пересекающий плоскость  $S_2$ ;
- поток фотонов  $P_{1s}$ , отраженных поверхностью и пересекающих плоскость  $S_1$ ;
- импульсная реакция  $h(t)$  канала связи на рис. 1;
- компоненты  $h_c(t)$  и  $h_{1s}(t)$  импульсной реакции  $h(t)$ , образованные соответственно многократно и однократно отраженным излучением от поверхности.

Оптическая толщина среды в численных экспериментах принимала значения  $0,5 \leq \tau \leq 10$ , расстояние  $1 \leq H \leq 50$  м. Приведенные ниже результаты получены для  $\lambda = 0,85$  мкм. Модели среды найдены с помощью программного комплекса LOWTRAN-7 [11].

### Результаты статистического моделирования

Типичные результаты расчетов отраженных потоков  $P_1$  как функций оптической толщины среды для мононаправленного источника представлены на рис. 2. Обратим внимание на зависимость  $P_1 = P_1(\tau)$  для II–IV моделей отражения (см. рис. 1). Известен и легко объясним монотонный рост потока излучения, отраженного рассеивающей средой при увеличении ее оптической толщины, если отсутствует отражающая поверхность  $S$  (см. рис. 1) или она чисто поглощающая. Действительно, допустим, что  $\tau = 0$ , тогда  $P_1 = 0$ . Пусть  $\tau = \tau_1 > 0$  и  $P_1 = P_{11} > 0$ . Предположим, что к среде добавился слой некоторой оптической толщины  $\Delta\tau$ , тогда суммарная оптическая толщина среды  $\tau_2 = \tau_1 + \Delta\tau$ . Очевидно, что отраженный от нее поток  $P_{12} = P_{11} + \Delta P$ , а так как  $\Delta P \geq 0$ , то и  $P_{12} \geq P_{11}$ . Следовательно, в подобных случаях зависимость  $P_1(\tau)$  всегда монотонна.

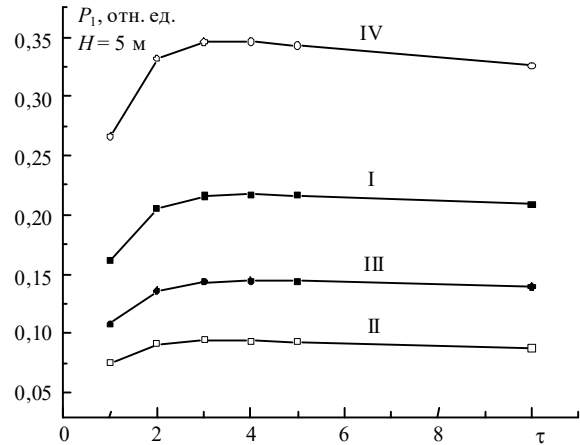


Рис. 2. Зависимость отраженного потока от оптической протяженности линии связи

Немонотонный характер  $P_1(\tau)$  на рис. 2 может быть объяснен следующим образом. Прежде всего, необходимо иметь в виду, что приведенные на нем результаты получены для фиксированных значений геометрических параметров  $L$  и  $H$ , т.е. возрастание оптической толщины обуславливалось ростом коэффициента ослабления (и, прежде всего, рассеяния). Разложим поток  $P_1$  на сумму двух компонент  $P_{1m}$  и  $P_{1s}$ , где  $P_{1m}$  – поток излучения, отраженный средой и не испытавший взаимодействия с поверхностью  $S$ , а  $P_{1s}$  – излучение, отраженное поверхностью  $S$ . Разделяя поток  $P_1$  на две компоненты, мы тем самым предполагаем, что первая из них соответствует схеме эксперимента, изображенной на рис. 1, но при абсолютно поглощающей поверхности  $S$ , а компонента  $P_{1s}$  обусловлена отражением излучения, падающего из среды на поверхность  $S$ . Ясно, что  $P_{1m}(\tau)$  – монотонная функция. Несложно показать, что функция  $P_{1s}(\tau)$  имеет максимум. Действительно, пусть  $\tau = 0$ , тогда, очевидно, и  $P_{1s} = 0$ . Пусть  $\tau \rightarrow \infty$ , тогда (по крайней мере в предположении, что среда пусть незначительно, но поглощает излучение) можно утверждать, что и  $P_{1s} \rightarrow 0$ . Поскольку для  $0 < \tau < \infty$  отраженный поток  $P_{1s} > 0$ , то функция  $P_{1s}(\tau)$  имеет максимум.

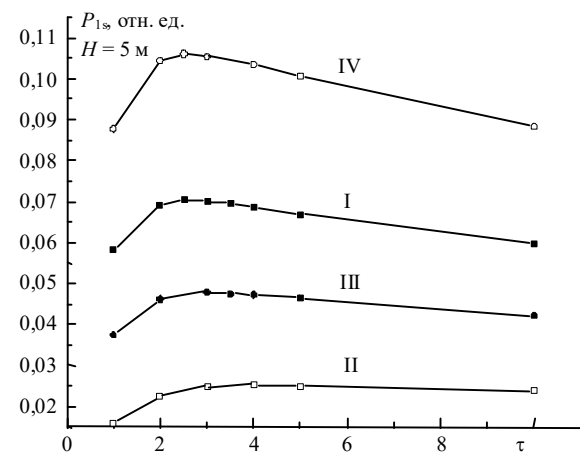


Рис. 3. Влияние модели отражения на поток  $P_{1s}$  от  $\tau$

Результаты расчетов, представленные на рис. 3, подтверждают этот вывод, где показано влияние закона отраже-

ния на величину потока  $P_{1s}$  в зависимости от  $\tau$  при  $H = \text{const}$  и  $L = \text{const}$ . Как и следовало ожидать, наименьшие значения потока соответствуют зеркальному закону отражения, наибольшие – композиции ламбертовского и антизеркального. Это объясняется тем, что при малых значениях  $H$  (в приведенном случае  $H = 5$  м) наиболее вероятные углы падения рассеянных фотонов на плоскость  $S$  таковы, что зеркальное отражение происходит в направлении на плоскость  $S_2$ , а антизеркальное – на  $S_1$ .

Увеличение коэффициента ослабления среды хотя и приводит к росту оптической толщины ее слоя, отделяющего линию связи от отражающей поверхности (что, в свою очередь, должно вести к более однородному и диффузному освещению поверхности  $S$ ), незначительно подавляет влияние диаграммы отражения  $f(\theta, \varphi)$  на  $P_{1s}$ . Так, увеличение параметра  $\tau$  в 10 раз приводит в рассмотренном случае к изменению этого влияния (если характеризовать его отношением  $P_{1s(IV)}/P_{1s(II)}$ , где IV, II – модели  $f(\theta, \varphi)$  на рис. 1) с 5 (при  $\tau \approx 1$ ) до 3 (при  $\tau = 10$ ) раз.

Отметим, что значение оптической толщины среды, при которой достигается максимум отраженного потока  $P_{1s}$ , определяется как видом  $f(\theta, \varphi)$ , так и геометрическими параметрами. Например, при фиксированных  $H, L$  max  $P_{1s}$  для IV модели  $f(\theta, \varphi)$  достигается при  $\tau_{\text{max}} \approx 2,25$ , а для модели II при  $\tau_{\text{max}} \approx 4$  (для моделей I и III  $\tau_{\text{max}} \approx 2,25$  и  $2,5$  соответственно).

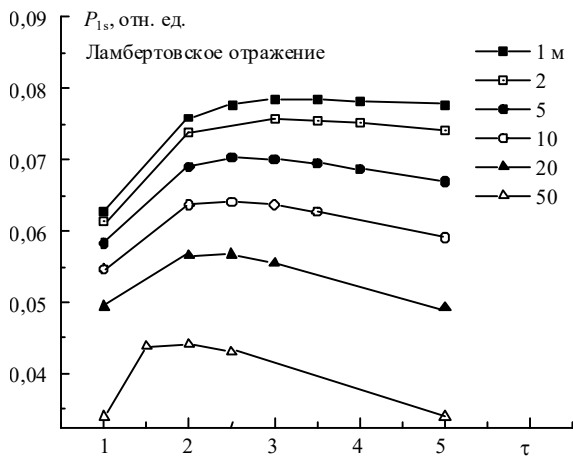


Рис. 4. Влияние высоты источника на поток  $P_{1s}$  от  $\tau$

Влияние высоты расположения линии связи над поверхностью  $S$  на  $\tau_{\text{max}}$  иллюстрирует рис. 4, где для ламбертовской модели  $f(\theta, \varphi)$  приведены потоки  $P_{1s}$  для  $1 \leq H \leq 50$  м. Приближение отражающей поверхности к оси излучателя приводит к возрастанию величин  $P_{1s}$  и  $\tau_{\text{max}}$ , что несложно объяснить трансформацией пространственно-угловой структуры рассеянного излучения, падающего на плоскость  $S$  при изменении параметра  $H$ .

Влияние отражающей поверхности на пропущенные потоки показано на рис. 5 при  $H = 5$  м. В целом с увеличением оптической плотности среды и удалением поверхности от оси светового пучка это влияние ослабевает, что связано с увеличением оптической толщины рассеивающего слоя, экранирующего поверхность от источника.

Форма отклика  $h_s(t)$  поверхности  $S$  на  $\delta(t)$ -импульс (или импульсная переходная характеристика системы «излучатель – поверхность – приемник») и влияние на

нее высоты линии связи и диаграммы отражения показаны на рис. 6–9. В характеристиках  $h_s(t)$  можно выделить передний фронт, область формирования максимального отклика и задний фронт импульса, который характеризуется значительной продолжительностью, а также время  $t_{\text{max}}$ , при котором  $h_{\text{max}} = h_s(t_{\text{max}})$  и само значение  $h_{\text{max}}$  определяются и индикатрисой отражения  $f(\theta, \varphi)$ , и оптической плотностью среды (см. рис. 6).

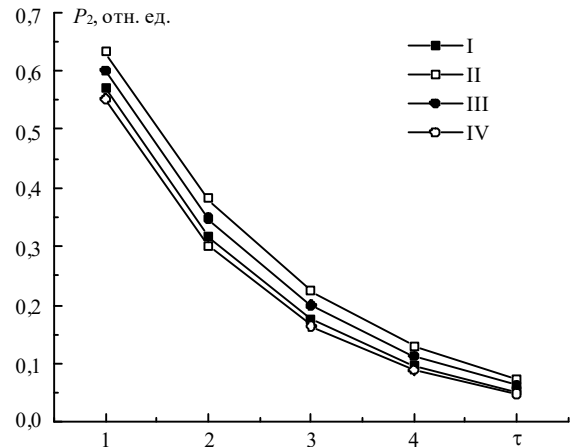


Рис. 5. Пропущенный поток  $P_2$ , отраженный от поверхности  $S$ , в зависимости от оптической толщины среды

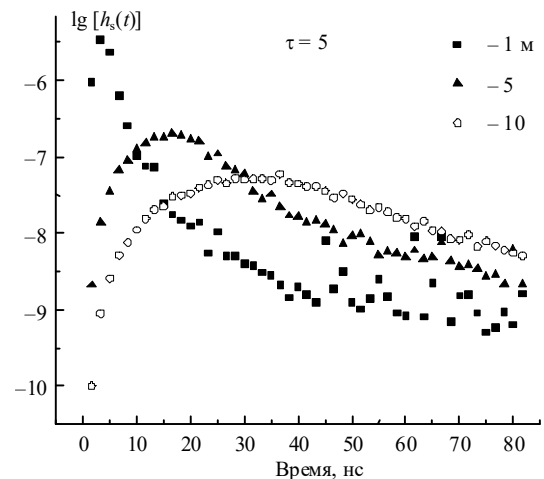


Рис. 6. Импульсные реакции  $h_s(t)$  для ламбертовской модели отражения

Для зеркального отражения, показанного на рис. 7, вид импульсной переходной характеристики сильно отличается от предыдущего случая. Зеркальная поверхность дает возможность фотонам после отражения от нее двигаться в том же направлении относительно оси канала передачи. Так как среда имеет вытянутую вперед индикатрису рассеяния, то вероятность того, что фотоны, испытав небольшое число рассеяний и отразившись от поверхности, сохраняют направленность в сторону плоскости приемника, в этом случае выше, чем в других. Поэтому максимум импульсной переходной характеристики в данном временном масштабе достигается в первых же значениях и затем происходит монотонное убывание исследуемой величины. Влияние высоты источника сказывается только на величине максимумов и близких к ним значений.

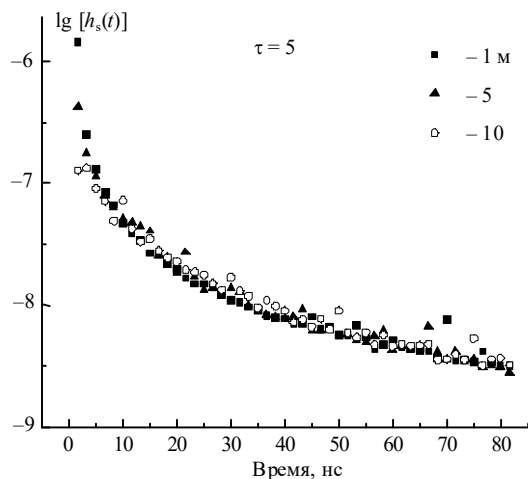


Рис. 7. Импульсные реакции  $h_s(n)$  для зеркальной модели отражения

Как видно из рис. 8, в случае композиции ламбертова отражения и отражения, обратного зеркальному, мы получаем зависимости, близкие к первому случаю, отличающиеся лишь несколько меньшими значениями импульсной реакции поверхности.

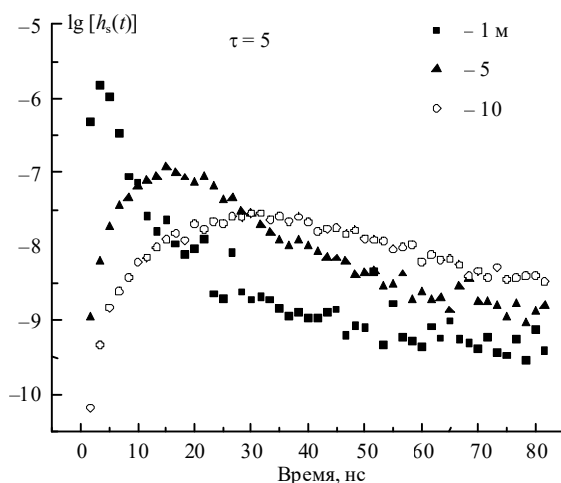


Рис. 8. Импульсные реакции  $h_s(n)$  для модели отражения «Ламберт + зеркальное»

Для поверхности, удовлетворяющей закону смешанного (Ламберт + зеркальное) отражения, наиболее интересным представляется результат, полученный для высоты 5 м. Здесь участие различных законов отражения привело к появлению двух ярко выраженных максимумов значений импульсной переходной характеристики, первый из которых дает частичная зеркальность поверхности, а более поздний обусловлен влиянием диффузного отражения (см. рис. 9).

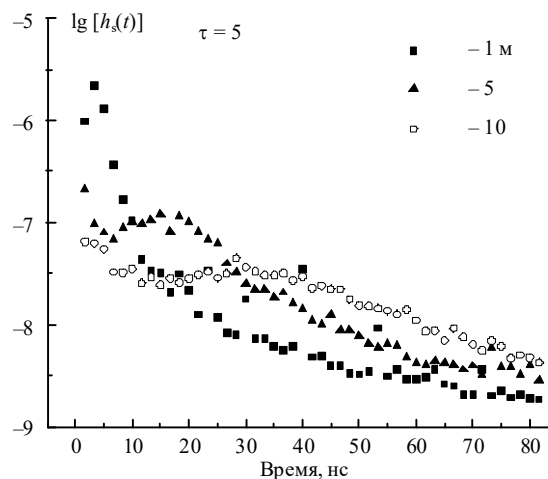


Рис. 9. Импульсные реакции  $h_s(n)$  для модели отражения «Ламберт + обратное»

Таким образом, в результате статистических экспериментов установлена возможность немонотонной зависимости отраженных рассеивающей средой потоков от ее оптической плотности, если оптическая связь осуществляется над отражающей поверхностью. Выявлены причины и условия возникновения этой особенности функций  $P_1(\tau)$ . Получены оценки импульсных переходных характеристик канала связи через отражающую поверхность, исследовано влияние на них геометрических и оптических условий распространения и регистрации излучения.

1. Росс М. Лазерная связь // Применение лазеров. М.: Мир, 1974. С. 318–402.
2. Bucher E.A. // Propagation models for optical communication through fog and clouds. Proc. Nat. Electron. Conf., Chicago. 3. 1974. V. 29. Oak Brook, 3., 1974. P. 180–185.
3. Зуев В.Е., Белов В.В., Веретенников В.В. Теория систем в оптике дисперсных сред. Томск: Изд-во СО РАН, 1997. 403 с.
4. Альbedo и угловые характеристики отражения подстилающей поверхности и облаков / Под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 232 с.
5. Кринов Е.И. // Спектральная отражательная способность природных образований. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1947. 138 с.
6. Толчельников Ю.С. // Оптические свойства ландшафта. Л.: Наука, 1974. 252 с.
7. Кондратьев К.Я., Федченко П.П. // Спектральная отражательная способность и распознавание растительности. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 216 с.
8. Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Федченко П.П. // Аэрокосмические исследования почв и растительности. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 231 с.
9. Малкевич М.С. // Оптические исследования атмосферы со спутников. М.: Наука, 1973. 303 с.
10. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике / Под ред. Г.И. Марчука. Новосибирск: Наука, 1976. 216 с.
11. Kneizys F.X., Shettle E.P., Abreu L.W., et al. User's Guide to LOWTRAN-7. AFGL-TR-88-0177. ERP. No. 1010. AFGL, Hansom AFB. MA 01731. August 1988.

*V.V. Belov, B.D. Borisov, A.B. Serebrennikov. Communication Properties of Optical Channels above Reflecting Surface.*

Pulse responses of optical communication channels with reflections from underlying surfaces have been investigated by the Monte Carlo method together with the radiation fluxes reflected from and transmitted through a scattering medium. The effect of reflection model, geometric parameters of transmitting and signal recording systems, and optical density of the medium on the responses have been analyzed.