

**В.Е. Горшков, Ю.Г. Гринь, Н.Н. Моисеев**

## **ВЕРОЯТНОСТЬ ПРИЕМА ИМПУЛЬСНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ПРОШЕДШИХ ЧЕРЕЗ ОБЛАЧНУЮ АТМОСФЕРУ**

Предложена простая модель оптического канала связи, включающего облака, позволяющая рассчитывать вероятность приема импульсного оптического сигнала, прошедшего через облачный слой. Интегральные характеристики излучения рассчитываются с помощью соотношений, полученных в результате аппроксимации данных численного эксперимента. В расчетах учитывается реальный вид импульсной характеристики приемного устройства. Разработанные программы характеризуются высокой мобильностью и возможностью простой организации работы в режиме диалога. Определены условия приема импульсных оптических сигналов для типичных параметров приемопередающей аппаратуры.

В последнее время интенсивно разрабатываются атмосферные оптические системы связи, контроля окружающей среды, видения и локации [1–5], поэтому возникает задача разработки моделей атмосферных оптических каналов и соответствующего программного обеспечения [6].

Распространение импульсного оптического излучения видимого диапазона в реальной атмосфере, включающей облака, сопровождается значительными искажениями его пространственно-временной структуры, определяющими или ограничивающими характеристики (возможности) упомянутых выше оптических систем. Расчет параметров излучения путем строгого решения уравнения переноса является сложной математической задачей, доступной лишь узкому кругу специалистов. В практической же деятельности (в инженерных разработках) нужна достаточно простая модель, позволяющая с приемлемой точностью рассчитывать основные параметры оптического канала.

В статье предлагается модель атмосферного оптического канала связи, включающего облака, основанная на аппроксимации данных численного эксперимента [7–8]. В расчетах учитывается не только энергетическое ослабление излучения [4], но и существенное для систем связи изменение амплитуды и длительности сигнального импульса [9].

### **Описание модели**

Источником сигналов является импульсный лазер с длиной волны  $\lambda$  и пиковой мощностью  $P_{s0}$ , расположенный на большой высоте над поверхностью земли и видимый под определенным зенитным углом. Сечение пучка на верхней границе атмосферы таково, что его можно считать бесконечно широким. Источник шума (в основном это Солнце или Луна) характеризуется спектральной облученностью верхней границы атмосферы и зенитным углом. Ослабление энергии сигнала и шума на участке чистой атмосферы до верхней границы облаков определяется в рамках модели чистой атмосферы, описанной, например, в ([10], гл. 10), согласно которой энергия импульса в основном сосредоточена в нерассеянной компоненте пучка и пространственно-временные искажения сигнала пренебрежимо малы.

Определение интегральных характеристик (первых и вторых пространственно-временных моментов) оптического излучения, прошедшего через облачный слой и через участок облачный слой — поверхность земли, осуществляется с помощью аппроксимационных соотношений, описанных в [7, 8]. Отметим основные особенности построения этих соотношений. Весь диапазон оптических толщин облачного слоя  $\tau$  разбивается на три области:  $\tau_1$  ограничивает область применимости малоуглового приближения, где дисперсия угла однократного рассеяния  $\gamma^2$  вычисляется по остроуправленной части индикатрисы рассеяния;  $\tau_2$  ( $\tau_2 > \tau_1$ ) ограничивает область диффузного режима, где дисперсия угла однократного рассеяния вычисляется по всей индикатрисе. В диапазоне от  $\tau_1$  до  $\tau_2$  дисперсия  $\gamma^2$  изменяется линейно. Зависимая таким образом от  $\tau$  дисперсия угла однократного рассеяния подставляется в известные соотношения для расчета пропускания рассеивающего слоя  $T$  [11, 12], расходимости излучения  $\Theta_s$  ([10], гл. 3), временной дисперсии импульса на выходе из облачного слоя [1, 12, 13]. Считаем, что при использовании этих соотношений коэффициент рассеяния  $\sigma = \sigma_m$ , где  $\sigma_m$  — среднее для данной формы облаков значение (см., например, [14]). Соответственно геометрическая толщина облака  $Z$  равна  $\tau/\sigma$ . Коэффициент рассеяния и микроструктура облаков определяют значения параметров  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ . Дисперсия  $t_s^2$  импульса, падающего на фотокатод, учитывает дополнительное затягивание импульса на участке от нижней границы облаков до поверхности земли. Считаем, что нижняя граница облаков  $H = H_m$ , где  $H_m$  — среднее для данной формы облаков значение. Амплитуда  $P_{sm}$  падающего на фотокатод импульса определяется из аппроксимационного соотношения

$$P_{sm} = F_{\Theta} T t_{s0} / t_s P_{s0}, \quad (1)$$

где угловой фактор  $F_{\Theta}$  зависит от расходимости падающего излучения  $\Theta_s$  и угла поля зрения приемника  $\Theta_d$ . В [7] для однослойного жидкокапельного облака с коэффициентом рассеяния  $\sigma = 33,33 \text{ км}^{-1}$ , высотой нижней границы  $H = 1 \text{ км}$  и индикатрисой рассеяния, соответствующей модели облака С-1 Дейрменджана на длине волны  $\lambda = 0,45 \text{ мкм}$ , проведена аппроксимация данных численного моделирования. Показано, что в этом случае  $\tau_1 = 4,5$ ;  $\tau_2 = 15$ ;  $\gamma_1 = 0,07$ ;  $\gamma_2 = 0,55$ , а точность аппроксимации амплитуды импульса, определяемая по отношению к результатам численного моделирования, составляет 20–40%.

Исходя из литературных данных [14–16], в модель включено два варианта распределения оптической толщины облаков:

$$\begin{cases} q_{\tau} = 1/(\tau_{20} - \tau_{10}), & \tau_{10} \leq \tau \leq \tau_{20}, \\ q_{\tau} = 0, & \tau > \tau_{20}, \tau < \tau_{10}, \end{cases} \quad (2a)$$

$$q_{\tau} = A/\tau \cdot \exp[-B \ln^2(\tau/\tau_m)]. \quad (26)$$

Соотношение (26) получено в [17] в результате аппроксимации данных [15, 16]. Величина  $\tau_m$  в этом соотношении является медианным значением оптической толщины,  $B$  определяет дисперсию распределения, а  $A$  — нормировочная константа. Пусть  $\tau_c$  — критическое значение оптической толщины облачного слоя, при которой еще обеспечивается заданное отношение сигнал-шум. Тогда вероятность отсутствия сигнала при прохождении сплошного облачного слоя

$$Q_{\tau} = \int_{\tau_c}^{\infty} q_{\tau}(\tau') d\tau'. \quad (3)$$

До сих пор облачный слой считался сплошным, бесконечно протяженным. Описание прохождения оптического излучения через разорванную облачность опирается на результаты [18–19], в которых, в частности, показано, что при выполнении условия

$$Z \ll L, \quad (4)$$

где  $Z$  — толщина облачного слоя, а  $L$  — характерный горизонтальный размер облаков, допускается следующий приближенный подход. Если линия визирования — прямая  $V_s$ , соединяющая приемник и источник сигналов, или прямая  $V_N$ , соединяющая приемник и источник шума, проходит через облачный слой, то поле излучения описывается соотношениями, справедливыми для сплошного слоя. Если же линия визирования не проходит через облачный слой, то используется приближение чистой атмосферы. Следует отметить, что при невыполнении условия (4) данный подход при расчете интенсивности может давать значительные (порядка 100%) ошибки [18]. Вероятность закрытия линии визирования определяется балльностью. В настоящее время статистически обеспеченные данные имеются только по повторяемости, в основном в дневное время, различных градаций общей облачности. Мы воспользовались данными многолетних спутниковых наблюдений [20], где градации облачности объединены в следующие группы: 1-я группа — 0–2 балла, 2-я — 3–7 и 3-я — 8–10 баллов. Внутри каждой группы распределение по градациям считаем равномерным, то есть вероятность закрытия линии визирования облаками определяется соотношениями  $q_1 = 0,1$ ;  $q_2 = 0,5$ ;  $q_3 = 0,9$ , где  $i = 1, 2, 3$  соответствует каждой группе градаций. Для фиксированной группы градаций  $i$  с вероятностью  $q_i^2$  возникает ситуация, когда прямые  $V_s$  и  $V_N$  одновременно проходят через облачный слой. В этом случае  $\tau_c = \tau_{c1}$  а  $Q_{\tau 1} \equiv Q_{\tau}|_{\tau_c = \tau_{c1}}$  (3). ( $Q_{\tau 1} \equiv Q_{\tau}|_{\tau_c = \tau_{c1}}$  — значение  $Q_{\tau}$  при  $\tau_c = \tau_{c1}$ ). С вероятностью  $q_i(1 - q_i)$  только прямая  $V_s$  проходит через слой,  $\tau_c = \tau_{c2} < \tau_{c1}$ ,  $Q_{\tau 2} \equiv Q_{\tau}|_{\tau_c = \tau_{c2}}$ . Наконец, с вероятностью  $(1 - q_i)$  прямая  $V_s$  не проходит через слой. Естественно предположить, что в этом случае прием сигналов обеспечивается. Тогда суммарная вероятность приема сигналов определяется из выражения:

$$Q_s = \sum_{i=1}^3 Q_i [1 - Q_{\tau 2} q_i - q_i^2 (Q_{\tau 1} - Q_{\tau 2})], \quad (5)$$

где  $Q_i$  — повторяемость  $i$ -й группы облачных градаций.

Прошедшее сквозь атмосферу излучение попадает на фотоприемник, где происходит преобразование световой энергии импульса в электрическую и принимается решение о наличии импульса. Приемная антенна описывается коэффициентом пропускания  $\eta_d$ , эффективной площадью  $S_d$  и спектраль-

ной полосой пропускания  $\Delta\lambda$ . Эти характеристики определяют мощность сигнала  $P_s(t)$  и мощность фона  $P_N$ , падающих на фотокатод. При расчете  $P_s(t)$  и  $P_N$  реальная пространственно-временная структура поля аппроксимируется эффективными функциями. Мощность  $P_s(t)$  определяется из соотношения

$$P_s(t) = P_{sm} F(t/t_s), \quad (6)$$

где  $P_{sm}$  — амплитуда;  $t_s^2$  — дисперсия импульса, а  $F(t/t_s)$  — эффективная функция, для представления которой в модель включены различные зависимости: прямоугольная, экспоненциальная и гамма-зависимость.

Фотоприемник характеризуется также квантовой эффективностью фотокатода  $\eta_q$ , фактор-шумом  $\Phi_{ЭУ} = 1 + \beta$ . Считается, что спектр пропускания видеоусилителя определяется RC-цепочкой с постоянной времени  $t_f$  и полосой  $\Delta f = 1/4t_f$ . На выходе видеоусилителя случайный процесс  $\xi(t)$  включает сигнальную компоненту  $S(t) = \langle \xi(t) \rangle$  и шумовую компоненту, которая состоит из флуктуаций сигнала  $\Delta_s(t)$  и дисперсии стационарных шумов  $\Delta_N$ . Тогда если постоянная времени фотоприемника много меньше  $t_s$ , то, воспользовавшись выводами [21] (с. 113, 119), [22] (с. 500), получаем следующие соотношения для определения  $S(t)$ ,  $\Delta_s(t)$  и  $\Delta_N$ :

$$\begin{cases} S(t) = \eta P_{sm} \Phi(t)/\hbar\nu, \\ \Delta_s(t) = 2(1 + \beta) \eta \Delta f \cdot P_{sm} \varphi(t)/\hbar\nu, \\ \Delta_N = 2(1 + \beta) \eta \Delta f P_N, \end{cases} \quad (7a)$$

$$\begin{cases} \Phi(t) = \exp(-t/t_f) \int_0^{t_f} \exp(t'/t_f) F(t'/t_s) dt', \\ \varphi(t) = 4t_f \exp(-2t/t_f) \int_0^{t_f} \exp(2t'/t_f) F(t'/t_s) dt', \end{cases} \quad (7b)$$

где  $\eta = \eta_d \cdot \eta_q$ ,  $\hbar$  — постоянная Планка;  $\nu$  — частота падающего сигнала. Тогда для отношения сигнал-шум по мощности в момент достижения максимума сигнала получаем следующее выражение:

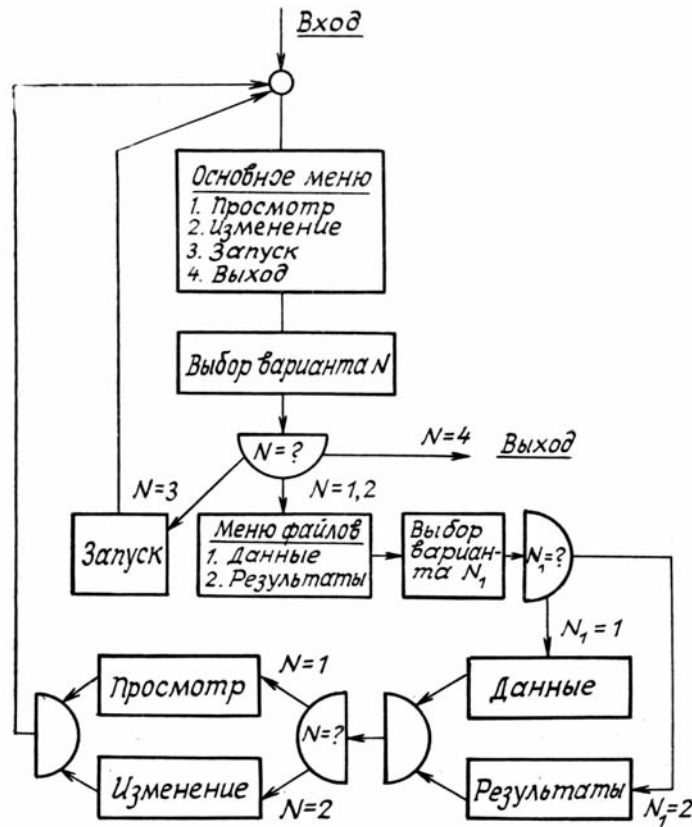
$$\rho_m = \frac{\eta P_{sm}^2 \Phi_m^2}{2(1 + \beta) \hbar\nu (P_{sm} \varphi_m + P_N) \Delta f}, \quad (8)$$

где  $\Phi_m = \Phi(t = t_{\max})$ ,  $\varphi_m = \varphi(t = t_{\max})$ .

Полученные результаты с использованием известных данных о зависимости вероятности ошибочного приема импульсов от отношения сигнал-шум [21] позволяют провести численный расчет энергетики канала и вероятности установления связи с заданной надежностью.

В алгоритм реализации модели на ЭВМ включены два способа расчета вероятности связи. В первом способе в соотношение (8) подставляются зависящие от  $\tau$  амплитуда импульса  $P_{sm}$  (1) и мощность фона  $P_N$ . Кроме того, от  $\tau$  зависит длительность импульса  $t_s$ , входящая в выражения для  $\Phi_m$  и  $\varphi_m$ . В результате получается нелинейное относительно  $\tau$  уравнение. Решением этого уравнения является критическая оптическая толщина  $\tau_c$ , определяющая вероятность  $Q_\tau$  (3) и вероятность приема сигнала  $Q_s$  (5). Во втором способе методом Монте-Карло разыгрываются «попадание в облако» и оптическая толщина облака (отдельно для источников сигнала и фона). После этого из (8) определяется отношение сигнал-шум. Если оно превышает заданную величину, то значение счетчика  $n_1$ , начальное значение которого равно нулю, увеличивается на 1. Окончательное значение  $n_1$  после  $n$  розыгрышей определяет вероятность приема сигнала:  $Q_s \approx n_1/n$ . В алгоритм включена также возможность анализа многослойной облачности. В этом случае разыгрываются различные комбинации облаков. Для каждого яруса разыгрывается оптическая толщина облаков и определяется коэффициент рассеяния. Однако расчет интегральных характеристик излучения в условиях многослойной облачности нуждается в дальнейшем уточнении аппроксимационных соотношений.

Программы написаны на языке Фортран и являются полностью мобильными. На IBM PC исполняемый модуль занимает в памяти около 80 кбайт. Время расчета одного значения  $Q_s$  при разыгрывании параметров облачности методом Монте-Карло для  $10^4$  розыгрышей равно на ЕС-1045 — 1,4, на IBM PC/AT — 3,5 и на ИЗОТ-1016С — 13 мин. С помощью стандартных программных средств организован диалоговый режим работы алгоритма. Соответствующая блок-схема приведена на рисунке.



Блок-схема диалогового режима работы алгоритма

## Результаты расчетов

Определим условия приема импульсных оптических сигналов для типичных параметров приемопередающей аппаратуры. Рассмотрим излучатель с длиной волны  $\lambda = 0,693$  мкм, энергией  $E_{s0} = 0,1$  Дж, длительностью импульса  $t_{s0} = 20$  нс и расходимостью  $\Theta_{s0} = \pm 10$  угл. мин. [23], расположенный на высоте  $R = 300$  км над поверхностью Земли. Прием импульсов осуществляется приемником с интерференционным оптическим фильтром с углом поля зрения  $\Theta_d = \pm 10^\circ$  и шириной спектральной полосы пропускания  $\Delta\lambda = 40 \text{ \AA}$  [24]. Коэффициент пропускания оптической антенны  $\eta_d = 0,6$ , а эффективная площадь  $S_d = 0,1 \text{ м}^2$ . После оптического фильтра располагается ФЭУ с квантовой эффективностью фотокатода  $\eta_q = 0,1$  [25]. Полагаем, что отношение сигнал-шум  $\rho_m = 100$ , что соответствует вероятности ошибочного приема одиночного импульса порядка  $10^{-5} \div 10^{-6}$  [21]. Расчеты, выполненные для дневного времени суток и слоистой облачности с коэффициентом рассеяния  $\sigma = 0,03 \text{ м}^{-1}$ , показывают, что критическое значение оптической толщины облаков  $\tau_c$  (3) приблизительно равно 90. В этом случае оптимальная постоянная времени RC-цепочки  $t_f$  оказывается порядка 40 мкс. При равномерном распределении оптических толщин (2а) в диапазоне от  $\tau_{10} = 5$  до  $\tau_{20} = 255$  [14] среднегодовая вероятность приема сигналов  $Q_s$  в районе Москвы приблизительно равна 0,67. Для такого же распределения оптических толщин усреднение по различным районам Мирового океана дает  $Q_s = 0,74$ . По-видимому, это значение  $Q_s$  определяет нижнюю границу вероятности, так как над океанами более характерно распределение оптических толщин (2б), для которого  $Q_s = 1$ .

Значительно снизить требования к мощности (энергии) излучателя можно за счет использования узкополосного широкоугольного фильтра, например, на основе эффекта фотовыжигания спектральных провалов [26]. В этом случае  $\Delta\lambda = 5 \cdot 10^{-2} \text{ \AA}$ , а угол поля зрения ограничен только конструктивными особенностями приемной антенны. При неизменных значениях  $\tau_c$  и длительности исходного импульса требуемая энергия оказывается в 100 раз меньше, чем при использовании интерференционного фильтра.

## Выводы

Предложена простая модель оптического канала связи, включающего облака, позволяющая рассчитывать его основные интегральные характеристики. Используемые в модели аппроксимационные соотношения обеспечивают удовлетворительное согласие с результатами численного моделирования. При расчете отношения сигнал-шум учитывается несогласованность спектров проходящего им-

пульса и видеосуилителя фотоприемника. Вероятность связи определяется из условия непревышения заданного отношения сигнал-шум. В алгоритм расчета включен блок, позволяющий смоделировать стохастичность канала. Особенности программной реализации алгоритма является его мобильность при переносе на различные ЭВМ и возможность простой организации работы в режиме диалога. Определены требования к ресурсам ЭВМ.

Показано, что для типичных параметров приемопередающей аппаратуры критическое значение оптической толщины облаков  $\tau_c$ , при которой еще обеспечивается заданное отношение сигнал-шум, равно 90. Для такого значения  $\tau_c$  при равномерном распределении оптических толщин вероятность приема сигнала  $\Theta_s \approx 0,7$ . Использование узкополосного широкоугольного фильтра может снизить требуемую мощность излучателя на два порядка.

1. Bucher E.A. //Appl. Opt. 1973. V. 12. № 10. P. 2391–2400.
2. Moogadian G.C., Geller M. //Appl. Opt. 1982. V. 21. № 9. P. 1572–1577.
3. Space-Earth optical link. //Electron. and Wireless World. 1988. V. 94. № 1634. P. 1205.
4. Гуляев Г.А., Пожидаев В.Н. //Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 3. С. 246–252.
5. Волнистова Л.П., Дрофа А.С. //Труды ИЭМ. 1988. № 45. С. 133–138.
6. Информационно-программное обеспечение задач атмосферной оптики. Новосибирск: Наука, 1988. 101 с.
7. Горшков В.Е., Гринь Ю.Г., Коршунов В.А., Моисеев Н.Н. //Техника средств связи. Сер. Техника радиосвязи. 1990. Вып. 1. С. 43–48.
8. Горшков В.Е., Гринь Ю.Г., Коршунов В.А., Моисеев Н.Н. //Оптика моря и атмосферы (Тезисы докл. XI пленума рабочей группы по оптике океана). Красноярск: ИФ СО АН СССР, 1990. Ч. 2. С. 84–85.
9. Горшков В.Е., Гринь Ю.Г., Моисеев Н.Н. //Там же. Ч. 2. С. 86–87.
10. Оптика океана: Физическая оптика океана. М.: Наука, 1983. 372 с.
11. Danielson R.E., Moore D.R., Van der Hulst H.C. //J. Atmos. Sci. 1969. V. 26. № 9. P. 1078–1087.
12. Зеге Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1985. 327 с.
13. Иванов В.В., Гутшабаш С.Д. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1974. Т. 10. № 8. С. 851–863.
14. Авасте О.А., Кярнер О.Ю., Ламден К.С., Шифрин К.С. //Оптика океана и атмосферы. М.: Наука, 1981. С. 194–229.
15. Ершов О.А., Ламден К.С., Левин И.М. и др. //Известия АН СССР. Сер. ФАО. 1988. Т. 24. № 5. С. 539–544.
16. Леонтьева Е.Н., Плахина И.Н. //Метеорология и гидрология. 1988. № 8. С. 121–124.
17. Волковицкий О.А., Павлова Л.Н. //Метеорология и гидрология, 1991. (В печати).
18. Скоринов В.Н., Титов Г.А. //Известия АН СССР. Сер. ФАО. 1984. Т. 20. № 3. С. 263–270.
19. Журавлёва Т.Б., Титов Г.А. //Оптико-метеорологическое исследование земной атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. С. 108–119.
20. Матвеев Ю.Л., Титов В.И. Данные о структуре и изменчивости климата. Глобальное поле облачности. Обнинск: ВНИИГМИ, 1985. 100 с.
21. Гальярди Р.М., Карп Ш. Оптическая связь. М.: Связь, 1978. 424 с.
22. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982. 624 с.
23. Рябов С.Г., Торопкин Г.Н., Усольцев И.Ф. Приборы квантовой электроники. М.: Радио и связь, 1985. 280 с.
24. Лебедева В.В. Техника оптической спектроскопии. М.: Изд-во МГУ, 1986. С. 153–161.
25. Аксененко М.Д., Баранчиков М.Л. Приёмники оптического излучения. /Справочник. М.: Радио и связь, 1987. 296 с.
26. Кикас Я.В. //Труды ИФ АН ЭССР. Вып. 59. Бесфотонные линии в спектроскопии и фотохимии. Тарту: АН ЭССР, 1986. С. 115–130.

Московский научно-исследовательский институт радиосвязи

Поступила в редакцию  
12 октября 1990 г.

V.E. Gorshkov, Y.G. Grin', N.N. Moiseev. **The Probability of Detecting Pulsed Optical Signals through a Cloudy Atmosphere.**

A simple model of the optical communication channel involving clouds is suggested. This model enables one to calculate the probability of detecting a pulsed optical signal passed through a cloud layer. Integral parameters of the radiation are calculated using the relationships obtained by approximation of the numerical simulation data. The calculation took into account actual pulsed characteristics of a receiver. Developed programs have high portability and allow the work to be done in the dialogue mode. The conditions for detection of pulsed optical signals at typical parameters of transmitting and receiving devices are determined in the paper.