

А. В. ДЕМИН, Ю. Ю. ГАТЧИНА, С. И. ЖУКОВ

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Предложена численная модель для оценки коэффициента передачи мощности излучения при моделировании процесса прохождения лазерного излучения по трассе „атмосфера — водная поверхность — атмосфера“ методом Монте-Карло. Приведены результаты моделирования.

**Ключевые слова:** мониторинг, оптико-цифровые системы, светолокационные системы, пеленгация, стратификация среды.

Мониторинг окружающей среды в оптическом диапазоне спектра электромагнитного излучения — одна из актуальных проблем на современном этапе жизнедеятельности. При этом решаемый круг задач определяется как проблемами оперативного экологического контроля за состоянием среды, так и своевременным предупреждением возможных катастроф. Среди известных систем мониторинга окружающей среды в оптическом диапазоне спектра излучения наиболее широкое распространение для решения указанных задач получили оптико-цифровые системы (ОЦС) активного и пассивного типа. ОЦС пассивного типа принимают излучение среды, а системы активного типа принимают эхо-сигнал от излучателя ОЦС.

При проектировании ОЦС активного типа (далее ОЦС<sub>АТ</sub>) основной является задача расчета световых полей прохождения излучения по трассе „ОЦС<sub>АТ</sub> ⇒ атмосфера ⇒ граница раздела облучаемый объект — атмосфера ⇒ атмосфера ⇒ ОЦС<sub>АТ</sub>“ (далее трасса) и, в частности, определение такого параметра, как коэффициент передачи мощности излучения ОЦС<sub>АТ</sub>. Сложность задачи обусловлена необходимостью учета, во-первых, начальных и граничных условий, характеризующих стратификацию среды, и, во-вторых, оптико-физических параметров, характеризующих ОЦС<sub>АТ</sub>.

В этой связи для упрощения решения известного уравнения светолокации для расчета мощности эхо-сигнала целесообразно воспользоваться представлением трассы в форме численной модели [1]:

$$\left. \begin{aligned}
 P(z) &= AK(z) \frac{(z')^{-2}}{4\pi} \exp \left\{ -2 \int_0^{z'} \beta_t(z) dz \right\} \left[ \int_0^{ct_n/2} \beta_\pi(l) \exp \left\{ -2 \int_0^{z'+m} \beta_t(z) dz \right\} dm \right]; \\
 K(z) &= \exp \left[ -\frac{3\Delta^2}{\left( z\Theta_\Sigma + \frac{d_0}{z} \right)^2} \right] \Theta_\Sigma; \quad \Theta_\Sigma = \Theta + \psi,
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $P(z)$  — поток излучения на входном зрачке оптической системы в текущий момент времени  $t$ , соответствующий удвоенному расстоянию  $z$  от излучателя до „отражателя“;  $A \approx P_0 \times S_0$  — аппаратная постоянная ОЦСАТ;  $S_0$  — площадь входной апертуры ОЦСАТ;  $P_0$  — мощность излучения на выходе ОЦСАТ;  $\beta_\pi(l)$  — коэффициент обратного рассеяния в среде;  $t_n$  — длительность импульса излучателя ОЦСАТ;  $\Theta$  — телесный угол облучаемой водной поверхности на входном зрачке оптической системы;  $\psi$  — телесный угол принимающего эхосигнал блока ОЦСАТ;  $d_0$  — диаметр выходного зрачка излучающего блока ОЦСАТ;  $\Delta$  — расстояние между оптическими осями излучающего и принимающего эхосигнал блоков ОЦСАТ.

Зависимость коэффициента передачи мощности излучения по трассе от геофизической и климатической привязки ОЦСАТ (см. формулы (1)) приводит к ошибке.

В настоящей статье для расчета коэффициента передачи мощности излучения ( $K_{\text{изл}}$ ) предложена численная модель световых полей, рассчитываемая по методу Монте-Карло.

Для численного моделирования процесса мониторинга поверхности моря построим модель этого процесса в целях выявления загрязнений. Результатом моделирования в данном случае является только математическое ожидание коэффициента передачи мощности излучения ( $M_{K_{\text{изл}}}$ ). При построении численной модели учтем также толщину водного слоя, чтобы учесть геофизическую и климатическую привязку ОЦСАТ. Для этого воспользуемся вероятностно-статистической моделью распространения излучения на трассе [1]. Следует отметить преимущество метода Монте-Карло [2, 3], по сравнению с другими известными методами, при расчете световых полей (зависимости мощности эхосигнала от функции светового поля), которое заключается в том, что составления и решения интегродифференциальных уравнений переноса излучения не требуется.

Для расчета по методу Монте-Карло примем следующие допущения:

- взаимодействием фотонов излучения можно пренебречь;
- учитывается только результат взаимодействия фотонов излучения со средой распространения;
- в ходе мониторинга трасса находится в стационарном состоянии.

Процесс переноса излучения может быть аппроксимирован однородной марковской цепью [4] с распределением фотонов по трассе с плотностью

$$\left. \begin{aligned}
 f_l(l_t) &= \varepsilon(\mathbf{r}(l_t)) \exp \left( - \int_0^{l_t} \varepsilon(\mathbf{r}(l)) dl \right); \\
 \mathbf{r}(l_t) &= \mathbf{r}_0 + l_t \boldsymbol{\omega},
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\mathbf{r}_0$  — начальная точка вектора пробега фотонов;  $r(l_t)$  — оптическая длина отрезка  $[\mathbf{r}_0, \mathbf{r}(l_t)]$ ;  $\boldsymbol{\omega}$  — единичный вектор пробега фотонов.

Для нормировки значения плотности  $f_l(l_t)$  предположим, что вне среды распространения излучения коэффициенты ослабления потока  $\varepsilon = \varepsilon_0 \neq 0$ , а косинус угла направления вектора

$\mathbf{r}(l_t)$  распределен с плотностью индикатрисы рассеяния излучения. Если задано несколько типов коэффициентов и индикатрис рассеяния излучения, то вероятность поглощения ( $p(\mathbf{r})$ ) и рассеяния ( $q(\mathbf{r})$ ) фотонов при их столкновении определяется соотношениями [5]

$$\left. \begin{aligned} p(\mathbf{r}) &= \frac{\varepsilon_0(\mathbf{r})}{\varepsilon(\mathbf{r})}, \\ q(\mathbf{r}) &= \frac{\sigma_s(\mathbf{r})}{\varepsilon(\mathbf{r})}, \end{aligned} \right\}$$

где  $\sigma_s$  — коэффициент поглощения среды распространения.

Примем условие, что процесс рассеяния излучения по трассе изотропный. Тогда, проинтегрировав уравнение (2), получим функцию распределения значения длины свободного пробега фотонов по трассе [1, 4]:

$$l(t) = \int_0^{l_t} \varepsilon(\mathbf{r}(l_t, t)) dt.$$

Принимая условие, что процесс изменения азимутального угла рассеяния  $\varphi$  (для вертикальной трассы) изотропный, распределение его по потоку можно выразить формулой  $\varphi = 2\pi\alpha$ , где  $\alpha \in (0 \dots 1)$  — случайное число.

При моделировании процесса прохождения лазерного излучения по трассе методом Монте-Карло зададим функцию длины свободного пробега фотонов как функцию времени [1, 4].

На рис. 1 и 2 приведены фрагмент компьютерного изображения морской поверхности и нормированные спектры волновых чисел ( $k$ ), полученные при моделировании процесса прохождения лазерного излучения по трассе „атмосфера — морская поверхность — атмосфера“ методом Монте-Карло при следующих условиях: граница раздела нестационарна и неизотропна, а скорость ветра составляет 6, 4 и 2 м/с (кривые 1—3 соответственно на рис. 2).

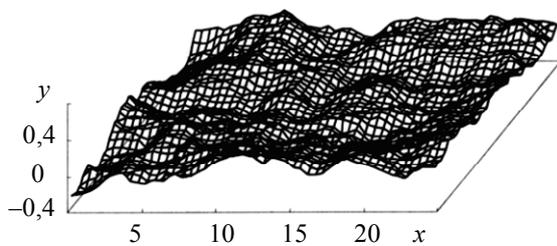


Рис. 1

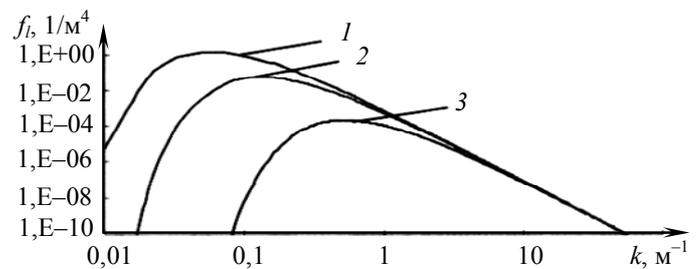


Рис. 2

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

— нестационарность коэффициента передачи излучения морской поверхности проявляется при приеме эхо-сигнала на глубинах до 50 м;

— математическое ожидание коэффициента передачи мощности излучения практически не зависит от скорости ветра в диапазоне 2...4 м/с, так же как и от глубины приема эхо-сигнала:  $M_{K_{изл}} \approx 1,3 \dots 1,5$ .

— для уточнения и верификации статистической модели влияния взволнованной поверхности моря на распространение лазерного излучения желательно получение дополнительных экспериментальных данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демин А. В., Виноградов Ю. Н., Копорский Н. С. и др. Численное моделирование оптического канала связи по трассе „атмосфера — граница раздела океан—атмосфера — толща океана“ // Авиакосмическое приборостроение. 2005. № 10. С. 23—26.
2. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике / Под ред. Г. И. Марчука. Новосибирск: Наука, 1976. 278 с.
3. Ермаков С. М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы. М.: Наука, 1975. 471 с.
4. Демин А. В., Журенков А. Г., Яковлев В. А. и др. Моделирование трасс дистанционного оптического зондирования океана // Авиакосмическое приборостроение. 2005. № 10. С. 20—23.
5. Волков О. А., Денисенко С. А., Константинов К. В. Светолокационный измеритель высоты нижней границы облаков ДОЛ-2 // Оптич. журн. 2009. Т. 76, № 10. С. 29—34.

**Сведения об авторах**

- Анатолий Владимирович Демин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информатики и прикладной математики;  
E-mail: dav\_60@mail.ru
- Юлия Юрьевна Гатчина** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; ассистент;  
E-mail: Gatchina@mail.ifmo.ru
- Сергей Ильич Жуков** — ОАО „ЛОМО“, Санкт-Петербург; гл. специалист

Рекомендована кафедрой  
информатики и прикладной математики

Поступила в редакцию  
30.03.10 г.