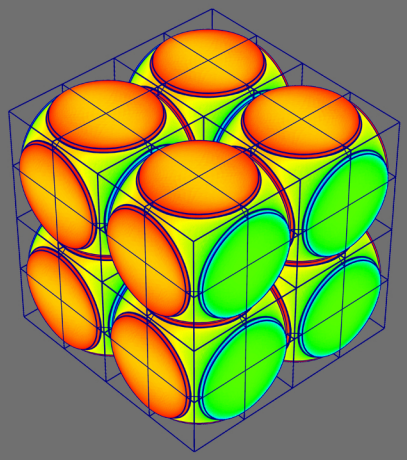
ISSN 2309-3684



# Математическое моделирование и численные методы

Иванов С. Е., Городничев В. А., Белов М. Л., Михайловская М. Б. Моделирование двумерных полей атмосферных параметров в задачах лазерного дистанционного зондирования. Математическое моделирование и численные методы, 2015, №4 (8), с. 110-121

Источник: https://mmcm.bmstu.ru/articles/66/

Параметры загрузки:
IP: 216.73.217.22
18.11.2026 21:35:06

УДК 551.521

# Моделирование двумерных полей атмосферных параметров в задачах лазерного дистанционного зондирования

© С.Е. Иванов, В.А. Городничев, М.Л. Белов, М.Б. Михайловская

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Рассмотрена задача моделирования двумерных полей аэрозольного коэффициента обратного рассеяния атмосферы и скорости атмосферного ветра, актуальная при математическом моделировании работы систем лазерного дистанционного зондирования атмосферы и систем лазерной локации. Для ветрового корреляционного лидара проведен выбор оптимальных параметров математического моделирования с точки зрения времени моделирования и соответствия статистических характеристик моделируемых полей атмосферных параметров заданным статистическим характеристикам. Показано, что при малых размерах неоднородностей атмосферы более эффективно использовать метод формирующего фильтра, а при больших — спектральный метод.*

***Ключевые слова:*** *лазерное дистанционное зондирование, моделирование, поля атмосферных параметров.*

**Введение.** Создание систем лазерного дистанционного зондирования невозможно без всестороннего учета свойств принимаемых лазерных сигналов. Более того, успех как анализа, так и синтеза систем в значительной мере определяется тем, насколько правильно построены модели сигналов и помех, регистрируемых приемником лазерной системы [1, 2].

Наиболее сильное влияние на характер принимаемых лазерных сигналов оказывает земная атмосфера. Во многих задачах лазерного дистанционного зондирования атмосферы для математического моделирования работы лазерных систем необходимо моделирование двумерных или трехмерных полей атмосферных параметров. Например, в [3, 4] приведены алгоритмы и примеры моделирования двумерных полей для лидарного зондирования атмосферы. Однако многие вопросы моделирования двумерных полей атмосферных параметров остаются не исследованными, в частности выбор оптимальных параметров моделирования [5]. С одной стороны, смоделированные поля должны соответствовать заданным статистическим характеристикам с необходимой точностью, с другой — время, затрачиваемое на их моделирование, должно быть минимально (поля атмосферных параметров — только исходные данные, а основная задача — моделирование работы самих лазерных систем). Последнее требование (ми-

нимальное время моделирования полей) обычно трудно реализовать, поскольку для моделирования работы лазерных систем дистанционного зондирования необходимо моделировать поля больших размеров, временну́ю эволюцию полей и большое количество реализаций этих полей.

Для задачи лазерного зондирования атмосферы рассмотрим два наиболее распространенных метода моделирования двумерных полей атмосферных параметров: формирующего фильтра и канонического разложения в ряд Фурье (спектральный метод). Для ветрового корреляционного лидара выбраны оптимальные параметры моделирования полей с точки зрения времени моделирования и соответствия статистических характеристик полей атмосферных параметров заданным статистическим характеристикам.

**Метод канонического разложения в ряд Фурье.** Пусть требуется сформировать случайное поле атмосферного параметра $\alpha$ (например, коэффициента обратного рассеяния атмосферы). Представим дискретное случайное поле атмосферного параметра $\alpha_{p,\,s}$ в виде двумерного ряда Фурье (индексы $p, s$ определяют узлы пространственной двумерной сетки):

$$\alpha_{p,\,s} = \sum_{k=0}^{\infty}\sum_{n=0}^{\infty} A_{k,n}\cos\left(p\frac{k}{T}+s\frac{n}{T}\right)+B_{k,\,n}\sin\left(p\frac{k}{T}+s\frac{n}{T}\right)+\overline{\alpha}\,, \quad (1)$$

где $A_{k,n}$ и $B_{k,n}$ — элементы матриц случайных коэффициентов, используемые при формировании случайных полей (считается, что эти коэффициенты распределены по нормальному закону и их средние значения равны нулю); $T$ — интервал, на котором задано поле $\alpha_{p,s}$, $p = 0, 1, ..., T$ и $s = 0, 1, ..., T$; $\overline{\alpha}$ — среднее значение атмосферного параметра.

Найдем из (1) пространственную корреляционную функцию атмосферного параметра $\alpha$:

$$K(p_1, p_2, s_1, s_2) = M\left\{\alpha_{p_1,s_1}\alpha_{p_2,s_2}\right\} = \sum_{k=0}^{\infty}\sum_{n=0}^{\infty} M\left\{A_{k,n}^2\right\}\cos\left(p_1\frac{k}{T}+s_1\frac{n}{T}\right)\times$$

$$\times\cos\left(p_2\frac{k}{T}+s_2\frac{n}{T}\right)+M\left\{B_{k,n}^2\right\}\sin\left(p_1\frac{k}{T}+s_1\frac{n}{T}\right)\sin\left(p_2\frac{k}{T}+s_2\frac{n}{T}\right).$$

Здесь $M\{\ \}$ — математическое ожидание; $p_{1,2} = 0, 1, ..., T$ и $s_{1,\,2} = 0, 1, ..., T$; $M\left\{A_{k,n}^2\right\}$, $M\left\{B_{k,n}^2\right\}$ — дисперсии случайных независимых коэффициентов $A_{k,\,n}$ и $B_{k,n}$.

Для простоты математического описания предположим, что поле атмосферного параметра $\alpha$ является однородным (корреляционная функция поля зависит только от разности координат точек наблюдения). Чтобы смоделированное поле $\alpha_{p,s}$ было однородным, необходимо полагать, что дисперсии случайных коэффициентов $A_{k,n}$ и $B_{k,n}$ равны. При $M\left\{A_{k,n}^2\right\}=M\left\{B_{k,n}^2\right\}=\sigma_{k,n}^2$ выражение для корреляционной функции поля можно записать в более простом виде:

$$K(p_1,p_2,s_1,s_2)=\sum_{k=0}^{\infty}\sum_{n=0}^{\infty}\sigma_{k,n}^2\cos\left((p_1-p_2)\frac{k}{T}+(s_1-s_2)\frac{n}{T}\right).$$

Таким образом, корреляционная функция зависит лишь от разности аргументов $p_1-p_2=\Delta p$ и $s_1-s_2=\Delta s$:

$$K(\Delta p,\Delta s)=\sum_{k=0}^{\infty}\sum_{n=0}^{\infty}\sigma_{k,n}^2\cos\left(\Delta p\frac{k}{T}+\Delta s\frac{n}{T}\right). \qquad (2)$$

Выражение (2) совпадает с разложением корреляционной функции $K(\Delta p,\Delta s)$ в двумерный ряд Фурье (с учетом четности корреляционной функции). При этом аналитическое выражение для коэффициентов $\sigma_{k,n}$ имеет вид

$$\sigma_{k,n}^2=\frac{4}{T^2}\int_{-T/2}^{T/2}\int_{-T/2}^{T/2}K(x,y)\cos\left(\frac{2\pi}{T}(kx+ny)\right)dxdy, \qquad (3)$$

где $K(x,y)$ — заданная корреляционная функция атмосферного параметра.

Если интервал $T$ выбрать достаточно большим, то пределы интегрирования в (3) можно приближенно заменить на бесконечные:

$$\sigma_{k,n}^2\cong\frac{4}{T^2}S\left(\frac{k}{T},\frac{n}{T}\right). \qquad (4)$$

Здесь $S\left(\frac{k}{T},\frac{n}{T}\right)$ — спектральная плотность мощности флуктуаций рассматриваемого атмосферного параметра,

$$S\left(\frac{k}{T},\ \frac{n}{T}\right)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}K(x,y)\exp\left(-i\frac{2\pi}{T}(kx+ny)\right)dxdy. \qquad (5)$$

Вид корреляционной функции этого атмосферного параметра считается известным. Например, в работе [3] показано, что корреляционная функция флуктуаций поля аэрозольного коэффициента обратного рассеяния атмосферы имеет вид

$$K(\xi,\eta)=\sigma^2\exp\left(-\frac{\xi^2}{b^2}-\frac{\eta^2}{c^2}\right), \tag{6}$$

где $\sigma$ — среднеквадратическое отклонение (СКО) коэффициента обратного рассеяния; $b$ и $c$ — пространственные радиусы корреляции флуктуаций по каждой из координат.

Будем считать, что корреляционная функция рассматриваемого атмосферного параметра имеет вид (6). Кроме того, поле атмосферного параметра является изотропным $(b=c)$. Тогда корреляционная функция (6) примет вид

$$K(r)=\sigma^2\exp\left(-\frac{r^2}{b^2}\right),\quad r=\sqrt{\xi^2+\eta^2}\ . \tag{7}$$

Поскольку корреляционная функция изотропная, выражение (5) есть преобразование Ганкеля [6], и соотношение (4) можно представить в виде

$$\sigma_{k,n}^2=4\int_0^\infty K(r)J_0\left(\frac{t}{T}r\right)rdr\,, \tag{8}$$

где $J_0(z)$ — функция Бесселя нулевого порядка.

Подставляя в формулу (8) выражение (7) для корреляционной функции, получаем

$$\sigma_{k,n}^2=\frac{\sigma^2b^2}{T^2\pi}\exp\left(-\frac{k^2+n^2}{4T^2}b^2\right). \tag{9}$$

Выражение (9) дает возможность вычислить дисперсии случайных коэффициентов для алгоритма (1) моделирования двумерного поля атмосферного параметра $\alpha$. Для практической реализации этого алгоритма ограничим суммирование $M$ членами:

$$\alpha_{p,s}=\sum_{k=0}^{M}\sum_{n=0}^{M}A_{k,n}\cos\left(p\frac{k}{T}+s\frac{n}{T}\right)+B_{k,n}\sin\left(p\frac{k}{T}+s\frac{n}{T}\right)+\overline{\alpha}\,. \tag{10}$$

После преобразований выражение (10) можно представить как

$$\alpha_{p,s} = \frac{\sigma b}{\sqrt{\pi}}\left[\sum_{n=1}^{M}\left( A_{0_{n,p}} \cos\left( s\frac{n}{T}\right) + B_{0_{n,p}} \sin\left( s\frac{n}{T}\right)\right) + \frac{1}{2} A_{0_{n,p}} \right] + \bar{\alpha}, \qquad (11)$$

где $A_{0_{n,p}} = \sum_{k=1}^{M}\left[ A_{k,n} \cos\left(\frac{k}{T} p\right) + B_{k,n} \sin\left(\frac{k}{T} p\right)\right] + \frac{1}{2} A_{0,n}$; $B_{0_{n,p}} = \sum_{k=1}^{M} \times$

$\times\left[ B'_{k,n} \cos\left(\frac{k}{T} p\right) - A'_{k,n} \sin\left(\frac{k}{T} p\right)\right] + \frac{1}{2} B_{0,n}$; $A'_{k,n}$, $A_{k,n}$, $B'_{k,n}$, $B_{k,n}$ — случайные независимые коэффициенты, распределенные по нормальному закону с нулевым средним значением и СКО

$$\sigma_{k,n} = \frac{1}{T} \exp\left( -\frac{(k^2 + n^2) b^2}{8T^2}\right). \qquad (12)$$

Точность формирования дискретного случайного поля (соответствие статистических характеристик сформированного поля заданным характеристикам), согласно алгоритму (11), зависит от двух параметров: количества членов ряда $M$ и интервала $T$, на котором задано поле.

**Метод формирующего фильтра.** Согласно этому методу (см., например, [4, 7]), дискретное поле атмосферного параметра $\alpha_{p,s}$ можно представить в виде

$$\alpha_{p,s} = \sum_{k=-N}^{N} \sum_{n=-N}^{N} h(k\Delta, n\Delta) u(k\Delta + p\Delta, n\Delta + s\Delta) + \bar{\alpha}, \qquad (13)$$

где $N$ — порядок фильтра; $h(k\Delta, n\Delta)$ — импульсная характеристика фильтра; $\Delta$ — шаг пространственной дискретизации поля атмосферного параметра (предполагается, что шаг дискретизации одинаков по двум осям); $u(x, y)$ — формирующий шум с нормальным распределением, нулевым средним значением и единичной дисперсией.

Импульсная характеристика фильтра определяется из выражения

$$h(k\Delta, n\Delta) = \frac{1}{\Delta} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{S(x, y)} \exp\left( i_2 \pi (xk\Delta + yn\Delta)\right) dxdy. \qquad (14)$$

Подставляя в соотношение (14) выражение (5) для спектральной плотности мощности $S(x, y)$ рассматриваемого атмосферного параметра, получаем

$$h(k\Delta, n\Delta) = \frac{1}{\Delta}\frac{2\sigma}{\sqrt{\pi}b}\exp\left(-\frac{(k\Delta)^2 + (n\Delta)^2}{0,5b^2}\right). \qquad (15)$$

Используя формулу (15), запишем выражение (13) в виде

$$\alpha_{p,s} = \frac{2\sigma\Delta}{\sqrt{\pi}b}\left\{\sum_{k=1}^{N}\exp\left(-\frac{(k\Delta)^2}{b^2}\right)\times\right. \qquad (16)$$
$$\left.\times\left[Q\left(\Delta(k+p), s\right) + Q\left(\Delta(-k+p), s\right)\right] + Q\left(\Delta p, s\right)\right\},$$

где $Q(i,s) = \sum_{n=1}^{N}\exp\left(-\frac{(n\Delta)^2}{b^2}\right)\left[u\left(i, \Delta(n+s)\right) + u\left(i, \Delta(-n+s)\right)\right] + u\left(i, \Delta s\right)$.

В алгоритме (16) формирования двумерных полей атмосферных параметров точность формирования дискретного случайного поля зависит только от порядка фильтра $N$.

Для моделирования работы ветрового корреляционного лидара интерес представляет математическое моделирование двумерных полей аэрозольного коэффициента обратного рассеяния атмосферы и скорости атмосферного ветра.

Математическое моделирование двумерных полей аэрозольного коэффициента обратного рассеяния атмосферы, скорости и направления атмосферного ветра проведены с использованием алгоритмов (11) и (16). Цель математического моделирования — выбор оптимального количества гармоник $M$ (см. (11)) для спектрального метода, оптимального порядка фильтра для метода формирующего фильтра (16) и сравнение этих методов применительно к задачам лазерного корреляционного измерения скорости ветра.

Для оценки качества моделирования двумерных полей коэффициента обратного рассеяния атмосферы исследованы различия статистических величин смоделированного поля и заданных статистических характеристик.

Корреляционная функция поля коэффициента обратного рассеяния атмосферы задана в виде (7). Рассмотрены две статистические характеристики полей: СКО флуктуаций коэффициента обратного рассеяния и радиус корреляции флуктуаций (определяющий размер аэрозольных неоднородностей атмосферы). Размер моделированных полей составил $1000\times1000$ отсчетов, шаг дискретизации поля $\Delta$ = 1 м (минимальный размер аэрозольных неоднородностей около 1 м [3]), СКО флуктуаций коэффициента обратного рассеяния $\sigma = 0,006$ км$^{-1}$, радиус корреляции флуктуации — 6, 30 и 60 м. Для нахождения погрешностей статистических характеристик смоделированных полей (по сравнению с заданными) использовали не менее 30 реализаций полей. Результаты моделирования представлены в табл. 1–3.

*Таблица 1*

**Результаты математического моделирования при радиусе корреляции флуктуаций коэффициента обратного рассеяния атмосферы 6 м**

| Метод моделирования | Показатель | | $\Delta\bar{\sigma}$ | $(\Delta\bar{\sigma})^2$ | $\Delta\bar{b}$ | $(\Delta\bar{b})^2$ | $t$, с |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Спектральный | Количество членов ряда | 2000 | 0,003 | 0,002 | 0,010 | 0,008 | 5553,4 |
| | | 1000 | 0,004 | 0,003 | 0,014 | 0,009 | 920,2 |
| | | 500 | 0,035 | 0,005 | 0,024 | 0,012 | 257,2 |
| | | 350 | 0,138 | 0,005 | 0,202 | 0,011 | 131,0 |
| | | 250 | 0,290 | 0,006 | 0,461 | 0,009 | 77,4 |
| Формирующего фильтра | Порядок фильтра | 40 | 0,005 | 0,0034 | 0,013 | 0,009 | 32,9 |
| | | 12 | 0,004 | 0,0034 | 0,012 | 0,009 | 9,0 |
| | | 6 | 0,009 | 0,0045 | 0,120 | 0,011 | 5,6 |
| | | 4 | 0,096 | 0,0038 | 0,364 | 0,010 | 4,2 |

*Таблица 2*

**Результаты математического моделирования при радиусе корреляции флуктуаций коэффициента обратного рассеяния атмосферы 30 м**

| Метод моделирования | Показатель | | $\Delta\bar{\sigma}$ | $(\Delta\bar{\sigma})^2$ | $\Delta\bar{b}$ | $(\Delta\bar{b})^2$ | $t$, с |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Спектральный | Количество членов ряда | 1000 | 0,020 | 0,015 | 0,057 | 0,040 | 1423,1 |
| | | 500 | 0,021 | 0,017 | 0,048 | 0,036 | 338,5 |
| | | 250 | 0,020 | 0,011 | 0,054 | 0,035 | 78,2 |
| | | 150 | 0,025 | 0,019 | 0,049 | 0,036 | 28,7 |
| | | 75 | 0,119 | 0,027 | 0,149 | 0,057 | 6,5 |
| | | 45 | 0,341 | 0,034 | 0,595 | 0,062 | 2,3 |
| Формирующего фильтра | Порядок фильтра | 60 | 0,022 | 0,0162 | 0,043 | 0,044 | 69,9 |
| | | 30 | 0,018 | 0,0159 | 0,099 | 0,059 | 35,5 |
| | | 20 | 0,064 | 0,0168 | 0,298 | 0,053 | 23,4 |
| | | 10 | 0,369 | 0,056 | 0,646 | 0,0435 | 11,8 |

*Таблица 3*

**Результаты математического моделирования при радиусе корреляции флуктуаций коэффициента обратного рассеяния атмосферы 60 м**

| Метод моделирования | Показатель | | $\Delta\bar{\sigma}$ | $(\Delta\bar{\sigma})^2$ | $\Delta\bar{b}$ | $(\Delta\bar{b})^2$ | $t$, с |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Спектральный | Количество членов ряда | 500 | 0,046 | 0,031 | 0,130 | 0,105 | 340,6 |
| | | 250 | 0,050 | 0,038 | 0,108 | 0,078 | 79,3 |
| | | 125 | 0,048 | 0,035 | 0,119 | 0,089 | 22,1 |
| | | 50 | 0,064 | 0,045 | 0,120 | 0,093 | 3,2 |
| Формиующего фильтра | Порядок фильтра | 120 | 0,046 | 0,0387 | 0,124 | 0,082 | 160,8 |
| | | 60 | 0,039 | 0,0265 | 0,138 | 0,091 | 64,2 |
| | | 40 | 0,058 | 0,0386 | 0,316 | 0,120 | 46,7 |
| | | 20 | 0,358 | 0,140 | 0,638 | 0,062 | 23,0 |

В табл. 1–3 в первых двух колонках приведены статистические характеристики (среднее значение $\Delta\bar{\sigma}$ и СКО $(\Delta\bar{\sigma})^2$) отличия значения $\tilde{\sigma}$ смоделированного поля от заданного значения $\sigma$ (относительные величины отличий — модуль разности $\tilde{\sigma}$ смоделированного поля и заданного значения $\sigma$, деленный на заданное значение $\sigma$); в третьей и четвертой колонках — статистические характеристики (среднее значение $\Delta\bar{b}$ и СКО $(\Delta\bar{b})^2$) отличия значения радиуса корреляции $\tilde{b}$ флуктуаций (размера неоднородностей) смоделированного поля от заданного значения $b$ (показаны относительные величины отличий); в пятой колонке — время $t$, моделирования поля (моделирование проводилось на компьютере с процессором Semptron 2800+).

Строки соответствуют спектральному методу (методу канонического разложения в ряд Фурье) и методу формирующего фильтра при разных значениях параметров, определяющих «качество» смоделированного поля — количество членов ряда $M$ для спектрального метода и порядок фильтра $N$ для метода формирующего фильтра.

Результаты математического моделирования в пределах каждой из таблиц показывают, что при увеличении порядка формирующего фильтра и количества членов ряда различия статистических характеристик смоделированного и заданного полей уменьшаются. Сравнение таблиц показывает влияние ограниченности моделируемых реализаций — при постоянном размере формируемого поля увеличение радиуса корреляции приводит к росту различий статистических характеристик смоделированного и заданного полей.

Результаты, приведенные в таблицах, позволяют выбрать оптимальные параметры моделирования полей для конкретной рассматриваемой задачи с точки зрения времени моделирования и точности соответствия статистических характеристик полей заданным статистическим характеристикам.

Например, для задачи моделирования работы корреляционного лидара, предназначенного для измерения скорости атмосферного ветра, высокой точности соответствия статистических характеристик смоделированного поля заданным не требуется, поскольку статистические характеристики поля коэффициента обратного рассеяния в земной атмосфере различны и необходимо рассматривать весь диапазон характеристик. Для этой задачи точность воспроизведения статистических характеристик полей на уровне 10…15 % представляется вполне достаточной.

При задании такого уровня точности необходимый порядок $N$ формирующего фильтра

$$N = \left[\frac{b}{\Delta}\right], \tag{17}$$

где [.] — целая часть числа; $b$ — значение радиуса флуктуаций (размера неоднородностей) поля коэффициента обратного рассеяния; $\Delta$ — шаг пространственной дискретизации поля.

Для спектрального метода количество членов ряда

$$M = \left[ \frac{4T}{b} \right], \tag{18}$$

где $T$ — размер формируемого поля. Время, затрачиваемое на моделирование поля двумя рассмотренными методами при выполнении соотношений (17) и (18), зависит от размера неоднородностей (для заданного размера поля). С точки зрения времени моделирования (при одинаковом шаге пространственной дискретизации $\Delta$) при малых размерах неоднородностей (6 м) более эффективно использовать метод формирующего фильтра, а при больших размерах неоднородностей (60 м) — метод канонического разложения в ряд Фурье (спектральный метод).

В качестве примера моделирования полей атмосферных параметров на рис. 1 и 2 приведены смоделированные поля аэрозольного коэффициента обратного рассеяния в земной атмосфере (рис. 1 — с двумя вариантами размера аэрозольных неоднородностей) и атмосферного ветра (рис. 2 — с двумя вариантами размера атмосферных вихрей).

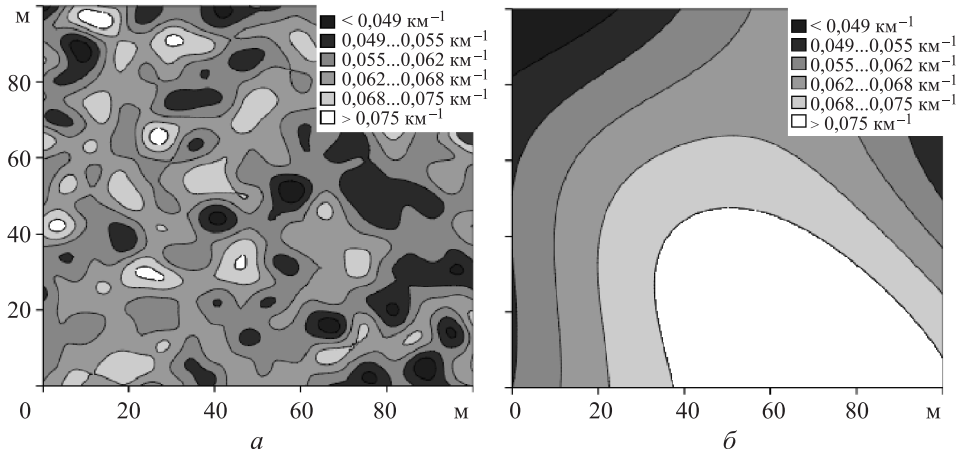



**Рис. 1.** Результат моделирования поля аэрозольного коэффициента обратного рассеяния:

*а* — $b$ = 6 м; *б* — $b$ = 60 м

При малых размерах аэрозольных неоднородностей (6 м) и атмосферных вихрей (3 м) для моделирования полей использован метод формирующего фильтра. В случае больших размеров аэрозольных неоднородностей (60 м) и атмосферных вихрей (100 м) применен спектральный метод. Во всех случаях порядок $N$ формирующего фильтра и количество $M$ членов ряда выбирали в соответствии с соотношениями (17), (18).

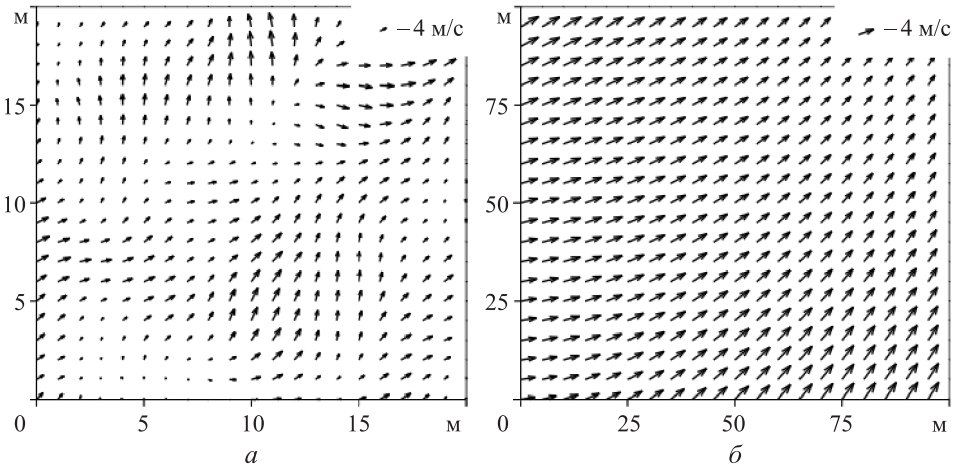



**Рис. 2.** Результаты моделирования поля атмосферного ветра:
*а* — размер вихрей 3 м; *б* — размер вихрей 100 м

**Заключение.** Рассмотрена задача моделирования двумерных полей атмосферных параметров для задачи лазерного зондирования атмосферы. Для ветрового корреляционного лидара выбраны оптимальные параметры моделирования с точки зрения времени моделирования и соответствия статистических характеристик полей атмосферных параметров заданным статистическим характеристикам.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Козинцев В.И., Орлов В.М., Белов М.Л., Городничев В.А., Стрелков Б.В. *Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, 528 с.

[2] Козинцев В.И., Орлов В.М., Белов М.Л., Городничев В.А., Стрелков Б.В. *Основы импульсной лазерной локации*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010, 573 с.

[3] Матвиенко Г.Г., Заде Г.О., Фердинандов Э.С., Колев И.Н., Аврамова Р.П. *Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра*. Новосибирск, Наука, 1985, 223 с.

[4] Васильев К.К., Служивый М.Н. *Математическое моделирование систем связи*. Ульяновск, УлГТУ, 2008, 170 с.

[5] Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н. Особенности математического моделирования технических устройств. *Математическое моделирование и численные методы*, 2014, № 1, с. 5–17.

[6] Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике (для научных работников и инженеров)*. Санкт-Петербург, Лань, 2003, 832 с.

[7] Бакалов В.П. *Цифровое моделирование случайных процессов*. Москва, Сайнс-пресс, 2002, 88 с.

Статья поступила в редакцию 09.12.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:
Иванов С.Е., Городничев В.А., Белов М.Л., Михайловская М.Б. Моделирование двумерных полей атмосферных параметров в задачах лазерного дистанционного зондирования. *Математическое моделирование и численные методы*, 2015, № 4 (8), с. 110–121.

**Иванов Сергей Евгеньевич** родился в 1983 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2007 г. Канд. техн. наук, начальник сектора НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н. Э. Баумана. Автор 30 научных публикаций.
e-mail: ivanov_sergey2@mail.ru.

**Городничев Виктор Александрович** родился в 1952 г., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 1976 г. Д-р. техн. наук, начальник отдела НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных публикаций. e-mail: gorod@bmstu.ru.

**Белов Михаил Леонидович** родился в 1950 г., окончил МЭИ в 1973 г. Д-р. техн. наук, ведущий научный сотрудник НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н. Э. Баумана. Автор более 200 научных публикаций. e-mail: belov@bmstu.ru.

**Михайловская Маргарита Борисовна** родилась в 1985 г., окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2008 г. Инженер НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор двух научных публикаций. e-mail: ekomonit@bmstu.ru.

# Simulation of atmospheric parameters of two-dimensional fields in problems of laser remote sensing

© S.E. Ivanov, V.A. Gorodnichev, M.L. Belov, M.B. Mikhaylovskaya

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The objective of this research is to examine the problem of simulating two-dimensional fields of atmospheric backscattering aerosol coefficient and speed of atmospheric wind. The problem is essential for mathematical simulation of laser remote sensing systems and laser location systems. For wind correlation lidar we selected optimal simulation parameters with regard to simulation time and conformity of atmospheric field parameters and their statistical characteristics with set-up statistical characteristics. The findings of the research illustrate that for small sized atmospheric irregularities it is more effective to use the forming filter method, but for large sized atmospheric irregularities the spectral method is the most effective simulation method.*

***Keywords:*** *laser remote sensing, simulation, fields of atmospheric parameters.*

## REFERENCES

[1] Kozintsev V.I., Orlov V.M., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Optiko-elektronnye sistemy ekologicheskogo monitoringa prirodnoy sredy* [Optoelectronic systems of ecological environmental monitoring]. Moscow, BMSTU Publ., 2002, 528 p.

[2] Kozintsev V.I., Orlov V.M., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Osnovy impulsnoy lazernoy lokatsii* [Basics of pulse laser location]. Moscow, BMSTU Publ., 2010, 573 p.

[3] Matvienko G.G., Zade G.O., Ferdinandov E.S., Kolev I.N., Avramova R.P. *Korreliatsionnye metody lazerno-lokatsionnykh izmereniy skorosti vetra* [Correlation methods of wind speed laser radar measurements]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985, 223 p.

[4] Vasilyev K.K., Sluzhivyi M.N. *Matematicheskoe modelirovanie sistem svyazi* [Mathematical simulation of communications systems]. Ulyanovsk, USTU Publ., 2008, 170 p.

[5] Zarubin V.S., Kuvyrkin G.N. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody — Mathematical Modeling and Computational Methods*, 2014, no. 1, pp. 5–17.
[6] Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov)* [Handbook on mathematics (for scientists and engineers)]. St. Petersburg, Lan Publ., 2003, 832 p.
[7] Bakalov V.P. *Tsifrovoe modelirovanie sluchainykh protsessov* [Digital simulation of stochastic processes]. Moscow, Science-press Publ., 2002, 88 p.

**Ivanov S.E.** (b. 1983) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2007. Cand. Sci. (Eng.), head of a sector at the Research Institute of Radio Electronics and Laser Technology of BMSTU. Author of 30 scientific publications.
e-mail: ivanov_sergey2@mail.ru.

**Gorodnichev V.A**. (b. 1952) graduated from Lomonosov Moscow State University in 1976. Dr. Sci. (Eng.), head of a department at the Research Institute of Radio Electronics and Laser Technology of BMSTU. Author of 200 scientific publications.
e-mail: gorod@bmstu.ru

**Belov M.L.** (b. 1950) graduated from Moscow Power Engineering Institute in 1973. Dr. Sci. (Eng.), leading researcher at the Research Institute of Radio Electronics and Laser Technology of BMSTU. Author of 200 scientific publications. e-mail: belov@bmstu.ru.

**Mikhaylovskaya M.B.** (b. 1985) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2008. Engineer at the Research Institute of Radio Electronics and Laser Technology BMSTU. Author of two scientific publications. ekomonit@bmstu.ru.