

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЯ

А.В. Панюков, А.К. Богушов

Рассматривается задача идентификации параметров положения произвольно-ориентированного электрического диполя над плоскостью с бесконечной проводимостью по его электромагнитному полю, индуцируемому в точке наблюдения. Данная задача входит в комплекс математических моделей практически важной проблемы прогнозирования развития грозных очагов. Для решения задачи, из-за ее плохой обусловленности, предлагается строить множество оценок с использованием параметризованного семейства алгоритмов, а окончательное решение принимать по результатам статистического анализа. Среди возможных методов определения параметров положения произвольно ориентированного электрического диполя, в работе рассмотрена параметризация прямого метода и экстремального параметрического метода. Однако, для повышения статистической значимости результирующей оценки параметров следует использовать по возможности большее число алгоритмов. Приведенные в работе результаты вычислительного эксперимента подтверждает эффективность подхода, однако большое разнообразие результатов измерения не позволяет строить достаточно точные гарантированные результирующие оценки параметров положения. Для повышения качества результирующих оценок, предлагается фильтрация построенного множества оценок, основанная на применении фильтрующих функционалов и их комбинации. Для построения фильтрующих функционалов использованы метод антитрасса и метод проектирования.

Ключевые слова: обратная задача, параметризация алгоритмов, параметрическая идентификация, статистический анализ, электрический диполь.

Введение

Своевременное обнаружение грозных очагов и прогнозирование их развития является актуальной задачей. В работе [1] приведено множество примеров применения информации о грозных очагах в решении различных проблем, связанных с безопасностью жизнедеятельности.

Одним из подходов к моделированию молниевых разрядов является представление его в виде точечного источника электромагнитного излучения (т.е. электрического диполя) находящегося над плоскостью с бесконечной проводимостью. Модель электрического диполя достаточно хорошо описывает большое количество разнообразных внутриоблачных разрядов. Поэтому задача идентификации местоположения электрического диполя по его электромагнитному полю индуцируемому в точке наблюдения над плоскостью с бесконечной проводимостью, представляет большой интерес. Данной проблеме посвящено множество работ, опубликованных в ведущих отечественных [2 – 5] и международных изданиях [9 – 13].

Рассматриваемая задача, как и большинство обратных задач математической физики, является плохо обусловленной. Следствием этого является высокая чувствительность алгоритма к погрешностям в исходных данных и погрешностям вычисления. Аналитическое и численное исследование ряда алгоритмов [2, 13, 14] показывает необходимость предобработки наблюдаемых сигналов, причем параметры оптимальных фильтров определяются спектральными характеристиками источника электромагнитного излучения (ЭМИ) и расстоянием до него. Таким образом, для оценки местоположения источника ЭМИ необходимо

иметь оценки его характеристик, получить которые можно зная оценки местоположения. В работе предлагается разорвать указанный выше порочный круг применением параметризованного семейства алгоритмов с последующей статистической обработкой полученных результатов.

Среди возможных методов определения параметров положения произвольно ориентированного электрического диполя, в работе будет рассмотрена параметризация прямого метода [8, 2] и экстремального параметрического метода [3, 10]. Однако заметим, что для повышения статистической значимости оценки параметров следует использовать по возможности большее число алгоритмов.

1. Математическая модель

Задачу определения дальности до произвольно ориентированного дипольного источника излучения в радиусе до 100 км можно решить, используя диапазон СДВ. Вполне адекватной математической моделью земной поверхности для рассматриваемых расстояний и длин волн является бесконечно проводящая плоскость. Как показано в [8], ортогональные проекции компонент поля, индуцируемого в точке наблюдения электрическим диполем, размещенным над бесконечно проводящей плоскостью, равны

$$e_z(t) = q(t) \cdot v + q'(t) \frac{v}{\alpha} + q''(t) \frac{u}{\alpha^2}, \quad (1)$$

$$h_{xoy}(t) = \left(q'(t) \frac{1}{\alpha} + q''(t) \frac{1}{\alpha^2} \right), \quad (2)$$

$$e_x(t) = e_y(t) = h_z(t) = 0. \quad (3)$$

Здесь $\alpha = c/r$ – величина, обратная времени распространения волны от источника до точки наблюдения, переменные u, v – неизвестные параметры положения источника излучения, $q(t)$ – неизвестный дипольный момент источника излучения, r – расстояние до источника излучения.

Компоненты e_z, h_{xoy} могут быть измерены с помощью антенной системы, состоящей из вертикальной электрической антенны и пары взаимно ортогональных рамочных магнитных антенн и, следовательно, использованы в качестве исходных данных для решения задачи оценки размещения диполя.

2. Прямой алгоритм и его параметризация

В работах [8, 2] предложен и исследован алгоритм определения параметров u, v и α , заключающийся в прямом вычислении

$$\alpha = \sqrt{\frac{\tilde{h}_1 \tilde{f}_2 - \tilde{h}_2 \tilde{f}_1}{\tilde{h}_2 \tilde{f}_0 - \tilde{h}_1 \tilde{f}_1}}, \quad u = \frac{\tilde{f}_0 \tilde{f}_2 - \tilde{f}_1^2}{\tilde{h}_2 \tilde{f}_0 - \tilde{h}_1 \tilde{f}_1}, \quad v = \frac{\tilde{g}_0 + \tilde{f}_0 \alpha}{\tilde{h}_0 \alpha}, \quad (4)$$

где

$$\tilde{f}_k = \int_0^{\infty} e_z^{(k)}(t) h_{xoy}^{(k)}(t) dt, \quad \tilde{h}_k = \int_0^{\infty} \left(h_{xoy}^{(k)}(t) \right)^2 dt, \quad \tilde{g}_k = \int_0^{\infty} e_z^{(k+1)}(t) h_{xoy}^{(k)}(t) dt, \quad k = 0, 1, 2. \quad (5)$$

Для повышения степени разнообразия сигналов от источника с заданными параметрами положения можно использовать предобработку измеренных сигналов $e_z(t), h_{xoy}(t)$ линейными фильтрами [16].

Спектр молниевых разрядов лежит в достаточно узком диапазоне частот, поэтому применение полосового фильтра с подходящими нижней $\hat{\Omega}$ и верхней $\check{\Omega}$ частотами среза позволит максимально использовать всю полезную информацию, которую несет сигнал, и ослабить влияние присутствующих в сигнале шумов. Поскольку параметры положения и спектр источника излучения не известны, то будем строить множество оценок

$$\tilde{E}_1 = \{(\alpha_i, u_i, v_i) : i = 1, 2, \dots, N\}$$

для семейства полосовых фильтров

$$F_i(\omega) = \begin{cases} 1, & \text{если } \omega \in [\hat{\Omega}_i, \check{\Omega}_i], \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

Элементы множества \tilde{E} будем рассматривать как реализацию векторной случайной величины, а для оценки истинных параметров положения u , v и α применять методы статистического робастного оценивания.

3. Экстремальный алгоритм и его параметризация

Прямой алгоритм был получен в предположении, что источник излучения является диполем, а подстилающая поверхность – плоскостью с бесконечной проводимостью. В силу неидеальности моделей и наличия шумов в наблюдаемых сигналах, приходится допускать наличие невязок в полученных уравнениях. Поэтому, с интуитивной точки зрения предпочтительней использовать принцип наименьших квадратов, в соответствии с которым параметры модели определяются из условия

$$I(\mathbf{x}) = \int_0^\infty \left[x_1 e_z' + x_2 e_z + x_3 h_{xoy}' + x_4 h_{xoy} + x_5 \int_0^t h_{xoy}(\tau) d\tau \right]^2 dt = (\mathbf{x}, \mathbf{Ax}) \rightarrow \min_{\mathbf{x}}, \quad (6)$$

где

$$\mathbf{A} = \int_0^\infty \mathbf{s} \cdot \mathbf{s}^T dt, \quad \mathbf{s} = \left(k \cdot e'(t) \quad e(t) \quad k \cdot h'(t) \quad h(t) \quad \frac{1}{k} \int_0^t h(\tau) d\tau \right)^T, \quad (7)$$

k – постоянная времени дифференцирующего и интегрирующего звеньев, введенная для согласования масштабов координат вектора \mathbf{x} .

Пусть собственные числа матрицы \mathbf{A} упорядочены: $\lambda_0 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_3 \leq \lambda_4$, и пусть $\mathbf{x}^{(0)}, \mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}, \mathbf{x}^{(3)}, \mathbf{x}^{(4)}$ – соответствующие им собственные векторы.

Экстремальный алгоритм [3, 10] определения параметров u , v и α , устойчивый к ошибкам в исходных данных состоит в выполнении следующих шагов.

Пусть Δ_{mn} – определитель матрицы, полученной из матрицы $(\mathbf{x}^{(2)}, \mathbf{x}^{(3)}, \mathbf{x}^{(4)})$ путем удаления строк с номерами m и n .

Вычислить

$$k\alpha_{1,2} = \begin{cases} \frac{2\Delta_{25}}{-\Delta_{24} - \Delta_{15} \pm \sqrt{(\Delta_{24} + \Delta_{15})^2 - 4\Delta_{14}\Delta_{25}}}, & \text{если } |\Delta_{25}| \geq |\Delta_{14}|, \\ \frac{-\Delta_{24} - \Delta_{15} \mp \sqrt{(\Delta_{24} + \Delta_{15})^2 - 4\Delta_{14}\Delta_{25}}}{2\Delta_{14}}, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (8)$$

$$u_n = \frac{k\alpha_n \Delta_{13} + \Delta_{23}}{\Delta_{12}}, \quad v_n = \frac{-\Delta_{45}}{k\alpha_n \Delta_{24} + \Delta_{25}}, \quad n = 1, 2. \quad (9)$$

Пусть

$$n^* = \arg \min_{n \in \{1, 2, \dots, N\}} \left[(1, k\alpha_n, -u_n, -k\alpha_n v_n, -k^2 \alpha_n^2 v_n) \mathbf{A} (1, k\alpha_n, -u_n, -k\alpha_n v_n, -k^2 \alpha_n^2 v_n)^{\mathbf{T}} \right]. \quad (10)$$

Положить

$$\alpha(\mathbf{A}) = \alpha_{n^*}, \quad u(\mathbf{A}) = u_{n^*}, \quad v(\mathbf{A}) = v_{n^*}. \quad (11)$$

Параметризацию экстремального алгоритма осуществим также как и параметризацию прямого алгоритма, т.е. построим множество оценок

$$\tilde{E}_2 = \{(\alpha(\mathbf{A}_i), u(\mathbf{A}_i), v(\mathbf{A}_i)) : i = 1, 2, \dots, N\}$$

для семейства полосовых фильтров F_i , $i = 1, 2, \dots, N$ используемых для предобработки измеренных сигналов. Элементы множества \tilde{E}_2 также будем рассматривать как реализацию случайной величины, а для оценки истинных параметров положения u , v и α применять методы статистического робастного оценивания.

4. Эффективная реализация алгоритмов с применением преобразования Фурье

При выполнении приведенных выше алгоритмов необходимо вычисление величин

$$\begin{aligned} \tilde{e}_k^i &= \int_0^{\infty} \left(e_i^{(k)}(t) \right)^2 dt, \quad k \in \{0, 1\}; & \tilde{f}_k^i &= \int_0^{\infty} e_i^{(k)}(t) h_i^{(k)}(t) dt, \quad k \in \{0, 1\}; \\ \tilde{h}_k^i &= \int_0^{\infty} \left(h_i^{(k)}(t) \right)^2 dt, \quad k \in \{-1, 0, 1\}; & \tilde{g}_k^i &= \int_0^{\infty} e_i^{(k+1)}(t) h_i^{(k)}(t) dt, \quad k \in \{-1, 0\}; \end{aligned}$$

где $e_i(t)$, $h_i(t)$ – результаты предобработки сигналов $e_z(t)$ и $h_{xoy}(t)$ с помощью фильтра F_i , $i = 1, 2, \dots, N$. С целью повышения эффективности алгоритма, значения переменных \tilde{f}_k^i , \tilde{h}_k^i , \tilde{g}_k^i целесообразно вычислять, применяя преобразование Фурье

$$(E(\omega), H(\omega)) = \mathbf{F}(e_z(t), h_{xoy}(t)).$$

Действительно, представление переменных \tilde{f}_k^i , \tilde{h}_k^i , \tilde{g}_k^i в терминах преобразования Фурье с учетом равенства Парсеваля имеет вид

$$\begin{aligned} \tilde{e}_k^i &= \int_{\tilde{\Omega}_i}^{\tilde{\Omega}_i} (\omega)^{2k} |E(\omega)|^2 d\omega, & \tilde{f}_k^i &= \int_{\tilde{\Omega}_i}^{\tilde{\Omega}_i} (\omega)^{2k} \operatorname{Re} \left(E(\omega) \overline{H(\omega)} \right) d\omega, \\ \tilde{h}_k^i &= \int_{\tilde{\Omega}_i}^{\tilde{\Omega}_i} (\omega)^{2k} |H(\omega)|^2 d\omega, & \tilde{g}_k^i &= \int_{\tilde{\Omega}_i}^{\tilde{\Omega}_i} (\omega)^{2k} \operatorname{Im} \left(\omega E(\omega) \overline{H(\omega)} \right) d\omega, \\ & & k &\in \{-1, 0, 1, 2\}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \end{aligned}$$

Поэтому для вычисления всех интегралов \tilde{f}_k^i , \tilde{h}_k^i , \tilde{g}_k^i , $k \in \{-1, 0, 1, 2\}$, $i = 1, 2, \dots, N$ требуется не более $O(T \log_2 T + NT)$ операций, здесь T – количество отсчетов в наблюдаемых реализациях e_z , h_{xoy} .

Используя алгоритм (4) и значения \tilde{f}_k^i , \tilde{h}_k^i , \tilde{g}_k^i , $k \in \{-1, 0, 1, 2\}$, $i = 1, 2, \dots, N$, построим следующее множество оценок положения источника излучения

$$\tilde{E}_1 = \left\{ \left(\alpha_i = \sqrt{\frac{\tilde{h}_1^i \tilde{f}_2^i - \tilde{h}_2^i \tilde{f}_1^i}{\tilde{h}_2^i \tilde{f}_0^i - \tilde{h}_1^i \tilde{f}_1^i}}, u_i = \frac{\tilde{f}_0^i \tilde{f}_2^i - (\tilde{f}_1^i)^2}{\tilde{h}_2^i \tilde{f}_0^i - \tilde{h}_1^i \tilde{f}_1^i}, v_i = \frac{\tilde{g}_0^i + \tilde{f}_0^i \alpha_i}{\tilde{h}_0^i \alpha_i} \right) : i = 1, 2, \dots, N \right\}. \quad (12)$$

Используя алгоритм (8)–(11) и значения $\tilde{f}_k^i, \tilde{h}_k^i, \tilde{g}_k^i, k \in \{-1, 0, 1, 2\}, i = 1, 2, \dots, N$, построим следующее множество оценок положения источника излучения

$$\tilde{E}_2 = \{(\alpha(\mathbf{A}_i), u(\mathbf{A}_i), v(\mathbf{A}_i)) : i = 1, 2, \dots, N\}, \quad (13)$$

где

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} \tilde{e}_1^i & 0 & \tilde{f}_1^i & \tilde{g}_0^i & -\tilde{f}_0^i \\ 0 & \tilde{e}_0^i & -\tilde{g}_0^i & \tilde{f}_0^i & \tilde{g}_{-1}^i \\ \tilde{f}_1^i & -\tilde{g}_0^i & \tilde{h}_1^i & 0 & -\tilde{h}_0^i \\ \tilde{g}_0^i & \tilde{f}_0^i & 0 & \tilde{h}_0^i & 0 \\ -\tilde{f}_0^i & \tilde{g}_{-1}^i & -\tilde{h}_0^i & 0 & \tilde{h}_{-1}^i \end{bmatrix}.$$

5. Вычислительный эксперимент

Для проведения вычислительного эксперимента с помощью имитационного моделирования [15] были сгенерированы сигналы $e_z(t), h_{xoy}(t)$ от двух источников, расположенных на расстоянии 40 и 120 километров. В качестве функции источника использовалась аппроксимация, предлагаемая в работе [17]. Для оценки возможности использования алгоритмов в реальных условиях в сигналы необходимо добавить шум. Для моделирования шума в сигналах используется известный факт, что ошибку квантования сигнала по уровню можно рассматривать как белый шум: ошибка квантования является случайным процессом, при этом с уменьшением числа используемых для представления сигнала уровней растет мощность шума квантования. Число используемых уровней квантования, в нашем случае это $2^7 = 128$ и $2^8 = 256$ уровней, определяет точность представления данных, а следовательно и уровень шума.

На рис. 1 представлены гистограммы оценок дальности по множеству \tilde{E}_1 (12), полученные прямым алгоритмом (4) в результате обработки смоделированных сигналов. На рис. 2 представлены гистограммы оценок дальности по множеству \tilde{E}_2 (13), полученные экстремальным алгоритмом (8)–(11) в результате обработки смоделированных сигналов.

Из приведенных гистограмм можно сделать следующие выводы: (1) наличие шумов существенно влияют на работу рассматриваемых алгоритмов, (2) повышение уровня шума заметно увеличивает дисперсию значений результатов отдельных измерений алгоритмов, (3) экстремальный алгоритм работает существенно лучше прямого алгоритма для дальних источников излучения, (4) статистики: среднее значение $E[R]$, выборочная медиана $Q_{0.5}[R]$ и выборочная дисперсия $D[R]$, – дают относительно приемлемые оценки дальности.

Повысить качество оценивания можно объединив множества оценок \tilde{E}_1 и \tilde{E}_2 . На рис. 3 представлены гистограммы оценок дальности по множеству $\tilde{E} = \tilde{E}_1 \cup \tilde{E}_2$ всех оценок. Из рис. 3 видно, что для сгенерированных сигналов построенные по множеству \tilde{E} статистики: среднее значение $E[R]$, выборочная медиана $Q_{0.5}[R]$ и выборочная дисперсия $D[R]$, – дают более достоверные результаты, чем статистики по множествам \tilde{E}_1 и \tilde{E}_2 .

Большое разнообразие результатов измерения не позволяет строить достаточно точные гарантированные оценки параметров u, v и α . Все данные, полученные в результате работы параметризованных прямого и экстремального методов требуют дополнительной фильтрации. Для построения фильтрующих функционалов будем использовать метод антитрасс [18] и метод проектирования [9, 10, 13].

Метод антитрасс [18] основан на восстановлении функции источника $q(t)$ по сигналам e_z, h_{xoy} . При безошибочных значениях оцениваемых параметров u, v и α решение $q_e^{uv\alpha}(t)$ дифференциального уравнения (1) должно совпадать с решением $q_h^{uv\alpha}(t)$ уравнения (2). Это

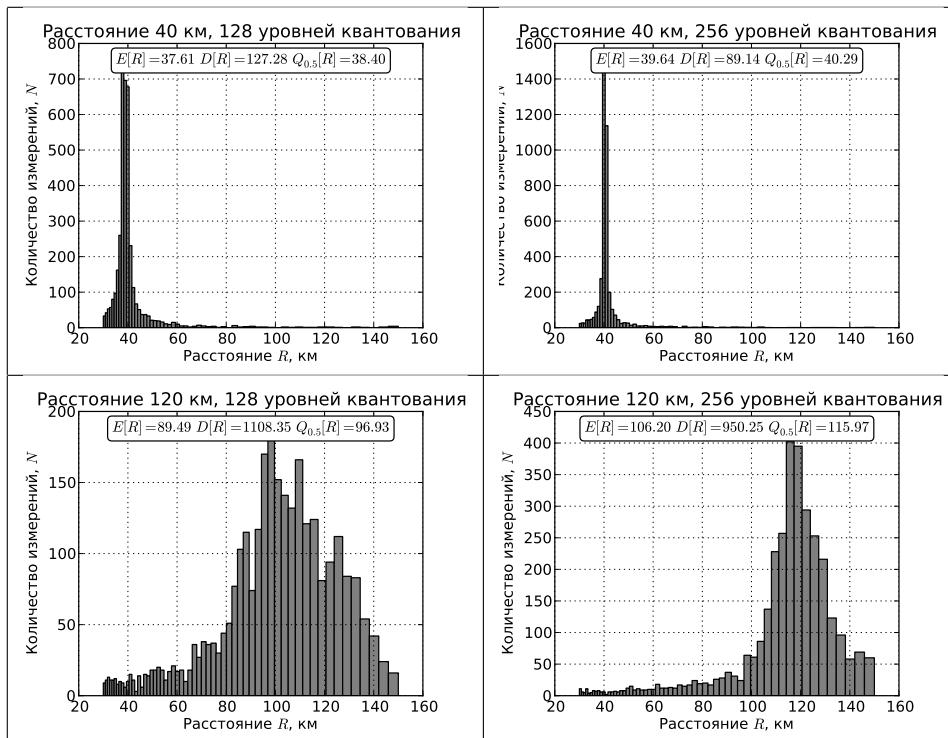


Рис. 1. Гистограммы оценок дальности прямым алгоритмом

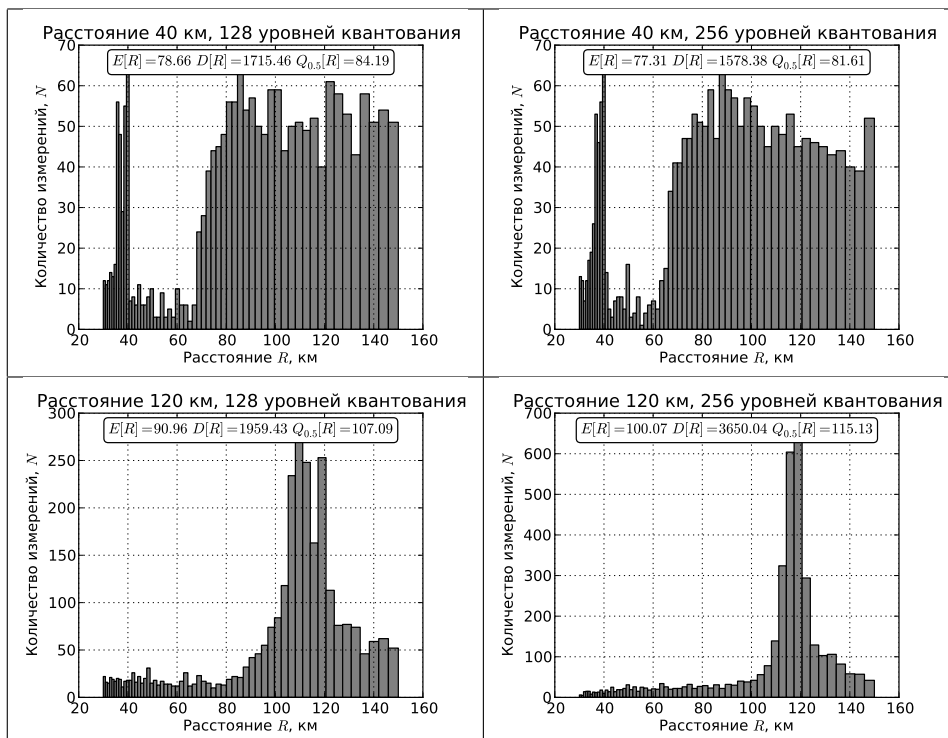


Рис. 2. Гистограммы оценок дальности экстремальным алгоритмом

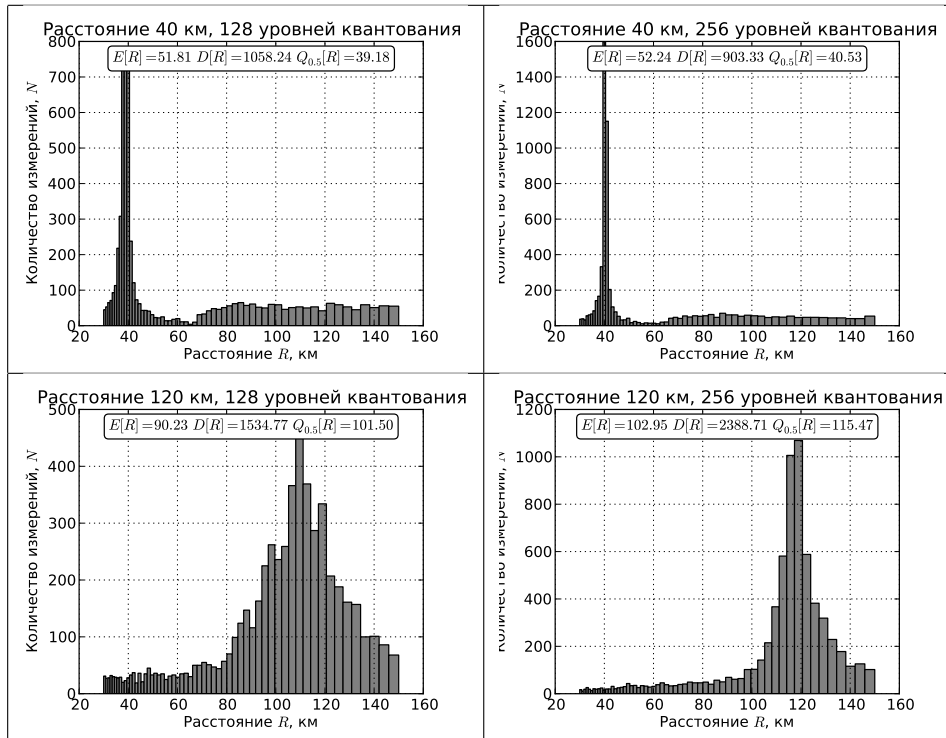


Рис. 3. Гистограммы распределения множества всех оценок дальности

позволяет для фильтрации вариантов предложить функцию потерь

$$L(u, v, \alpha) = \|q_e^{uv\alpha}(t) - q_h^{uv\alpha}(t)\| = \left\| \frac{E(\omega)}{-u\omega^2 + j\omega v\alpha + v\alpha^2} - \frac{H(\omega)}{-\omega^2 + j\omega\alpha} \right\|.$$

Заметим, что при $(u, v, \alpha) \neq 0$ алгоритм вычисления значения $L(u, v, \alpha)$ является вполне устойчивым, а сама функция $L(u, v, \alpha)$ непрерывна. На рис. 4 представлены гистограммы оценок дальности по множеству оценок $\tilde{E}_L = \{(u, v, \alpha) \in \tilde{E} : L(u, v, \alpha) \leq L_0\}$.

Метод проектирования [9, 10, 13] основан на проектировании прообраза вектор-функции (e_z, h_{xoy}) на линейное многообразие \mathcal{L} решений системы дифференциальных уравнений (1)–(2). При безошибочных значениях оцениваемых параметров u, v и α существует решение q , удовлетворяющее системе дифференциальных уравнений (1)–(2), т.е. прообраз пары сигналов (e_z, h_{xoy}) принадлежит \mathcal{L} , и длина проекции максимальна. Это позволяет для фильтрации вариантов использовать длину проекции в качестве функции полезности. В терминах преобразования Фурье функция полезности имеет вид [9, 10, 13]

$$U(u, v, \alpha) = \left\| \frac{E(\omega)(-u\omega^2 - j\omega v\alpha + v\alpha^2) + H(\omega)(-\omega^2 - j\omega\alpha)}{|-u\omega^2 + j\omega v\alpha + v\alpha^2|^2 + |-\omega^2 + j\omega\alpha|^2} \right\|.$$

При $(u, v, \alpha) \neq 0$ алгоритм вычисления значения $U(u, v, \alpha)$ является вполне устойчивым, а сама функция $U(u, v, \alpha)$ непрерывна. На рис. 5 представлены гистограммы оценок дальности по множеству оценок $\tilde{E}_U = \{(u, v, \alpha) \in \tilde{E} : U(u, v, \alpha) \geq U_0\}$. Из рис. 4 и рис. 5 видна эффективность использования фильтрации для рассматриваемых сигналов.

Введем теперь множество оценок

$$E = \{(u, v, \alpha) \in \tilde{E} : U(u, v, \alpha) \geq U_0, L(u, v, \alpha) \leq L_0\}.$$

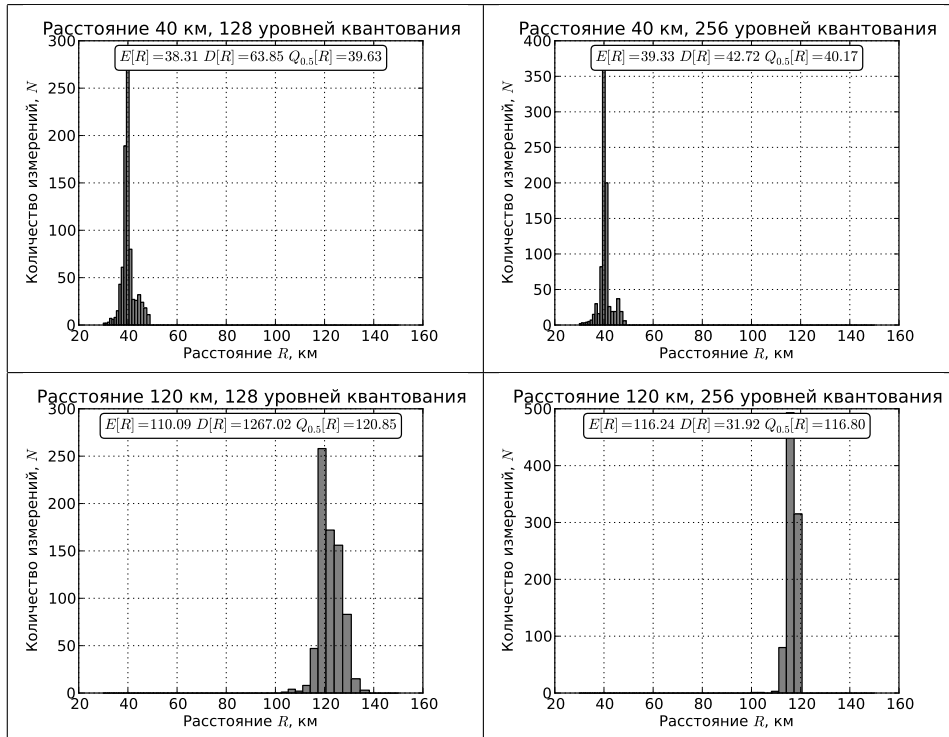


Рис. 4. Результаты фильтрации по функции потерь

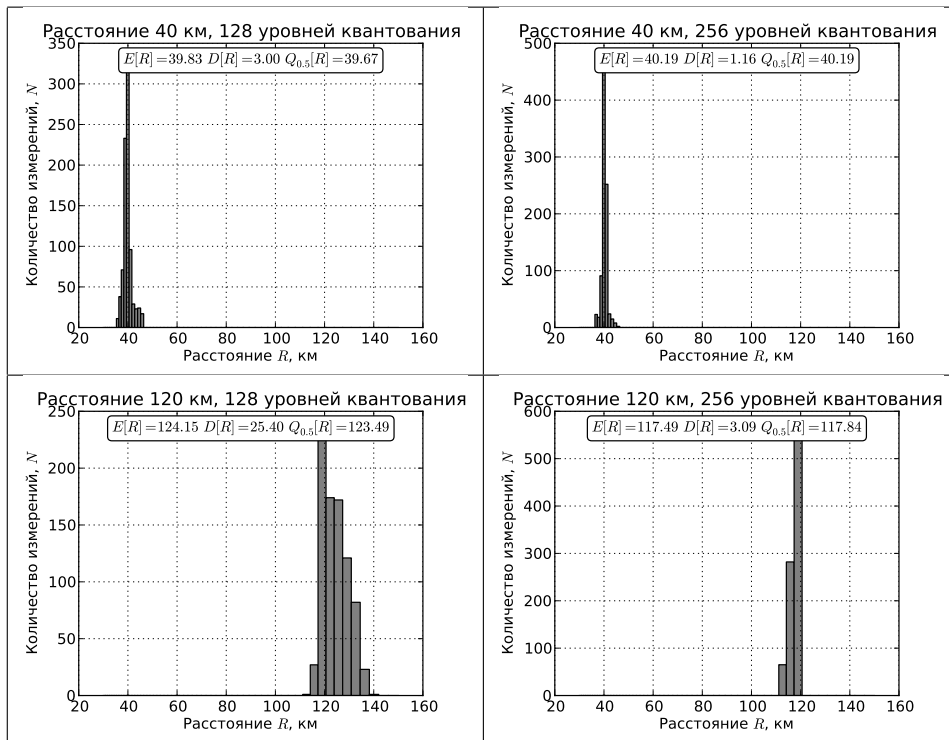


Рис. 5. Результаты фильтрации по функции полезности

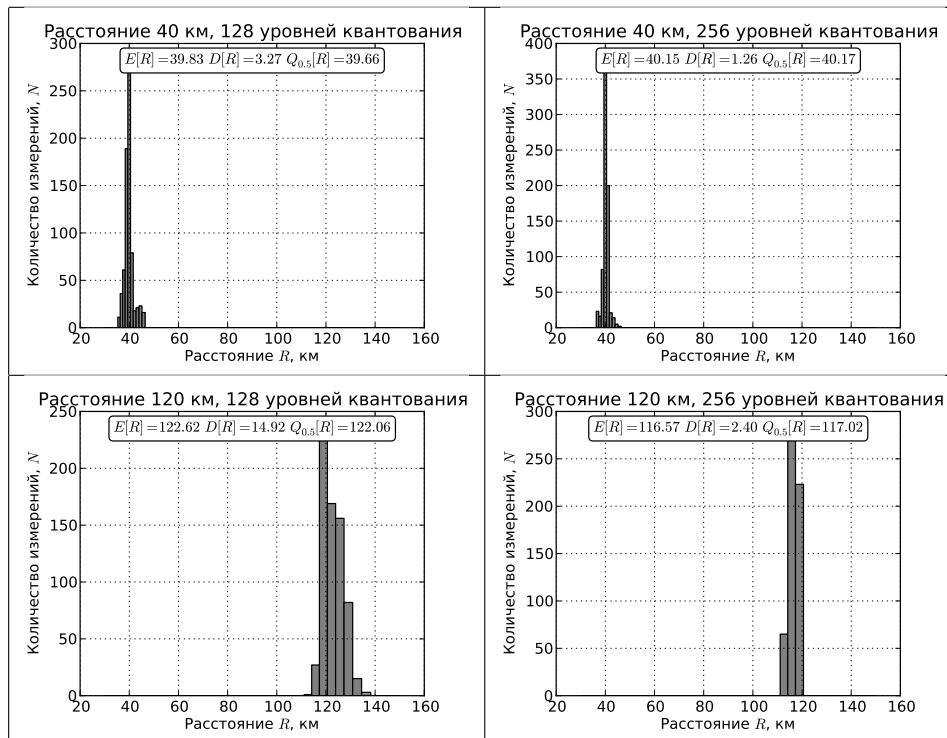


Рис. 6. Гистограмма оценок дальности по множеству E

В множество E включены оценки, удовлетворяющие условиям фильтрации как по потерям, так и по полезности. На рис. 6 представлены гистограммы оценок дальности по множеству оценок E . Рис. 6 показывает эффективность применения совместной фильтрации по функции потерь L и по функции полезности U .

6. Заключение

Предложенный в статье метод решения обратных задач для систем линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, заключающийся в применении к результатам наблюдения параметризованного множества алгоритмов с последующей фильтрацией и статистической обработкой результатов, является вполне конструктивным и работоспособным.

Работа проводилась при финансовой поддержке РФФИ, проект № 10-07-96003-р_урал_a

Литература

1. Панюков, А.В. Применение систем пассивного мониторинга грозовой деятельности / А.В. Панюков, Г.Т. Багин // Комплексная безопасность России – исследования, управление, опыт: междунар. симпозиум (Москва, 26–27 мая 2004 года). – М., 2004. – С. 178 – 180.
2. Панюков А.В. Анализ погрешности прямого алгоритма определения дальности до электрического диполя / А.В. Панюков // Известия ВУЗов РФ. Радиофизика. – 1999. – Т. XLII, №3. – С. 266 – 277.
3. Панюков, А.В. Алгоритм определения расстояния до местоположения молниевых разряда / А.В. Панюков, Д.В. Будуев, Д.Н. Малов // Электричество. – 2001. – Т. 4. – С. 10 – 14.

4. Паниюков, А.В. Современное состояние и перспективы развития систем пассивного мониторинга грозовой деятельности / А.В. Паниюков // Вестн. ЮУрГУ. Серия: Математика, физика, химия. – 2003. – Вып. 4, №8(24). – С. 11 – 20.
5. Panyukov, A.V. Analysis of the error of a direct algorithm for determining the distance to an electric dipole / A.V. Panyukov // Radiophysics and Quantum Electronics. – 1999. – V. 42, №3. – P. 239 – 248.
6. He, S. Explicit Full Identification Of A Transient Dipole Source In The Atmosphere From Measurement Of The Electromagnetic Fields At Several Points At Ground Level / S. He, M. Popov, V. Romanov // Radio Science. – 2000. – V. 35, №1. – P. 107 – 117.
7. Panyukov, A.V. An Extremum Algorithm For A Passive Method Of Determining The Distance To A Lightning Strike / A.V. Panyukov, D.V. Buduyev // Electrical Technology Russia. – 2001. – №2. – С. 13 – 22.
8. Panyukov, A.V. Estimation of the location of an arbitrary oriented dipole under single-point direction finding / A.V. Panyukov // J. of geophysical research. – 1996. – V. 101, №D10. – P. 14,997 – 14,982.
9. Panyukov, A.V. A Method to determine parameters of a linear functional equation set and its application to location systems / A.V. Panyukov, V.A. Strauss // Water Science and Technology Library: Parameter identification and inverse problems in hydrology, geology and ecology. – Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands. – 1997. – V.23 – P. 199 – 209.
10. Panyukov, A.V. Lightning detection and mapping algorithms / A.V. Panyukov // Proceedings 24-th International conference on lightning protection . Vol. 1. (Birmingham, United Kingdom, September 14–18, 1998). – Staffordshire university. – P. 227 – 231.
11. Taibin, B.Z. An Approach To Define Parameters For Localization Of Thunderstorms / B.Z. Taibin // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2006. – V. 48, №2. – P. 48 – 54.
12. Popov, M. Identification Of A Transient Electric Dipole Over A Conducting Half Space Using A Simulated Annealing Algorithm / M. Popov, S. He // J. of Geophysical Research. – 2009. – V. 105, №D16. – P. 20821 – 20831.
13. Паниюков, А.В. Экстремальный метод решения параметрической обратной задачи для системы линейных функциональных уравнений / А.В. Паниюков // Изв. высш. учеб. заведений. Математика. – 2000. – №9. – С. 27 – 33.
14. Паниюков, А.В. Аналитическое и численное исследование устойчивости и точности алгоритмов определения дальности до дипольного источника СДВ-излучения / А.В. Паниюков, Д.В. Будув // Изв. Челяб. науч. центра УрО РАН. – 2004. – №4. – С. 15 – 20.
15. Паниюков, А.В. Библиотека методов определения местоположения дипольного источника излучения / А.В. Паниюков, Д.В. Будув // Программа для ЭВМ, базы данных, топология интегральных микросхем: официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. – 2002. – №2(1). – С. 149 – 150.
16. Богушов, А.К. Параллельная реализация комплекса программ для задачи определения параметров электрического диполя / А.К. Богушов, А.В. Паниюков // Сб. тр. ПАВТ–2011. – 2011. – С. 427 – 432.
17. Taylor, W.L. Radiation field characteristics of lightning discharge in the band 1 Kc/s to 100 Kc/s / W.L. Taylor // J. of Research of the NBS. – 1963. – V. 67D, №5. – P. 539 – 550.
18. Кононов, И.И. Радиотехнические методы местоопределения грозowych очагов / И.И. Кононов, И.А. Петренко, В.С. Снегуров. – Л.: Гидрометеиздат, 1986.

Анатолий Васильевич Панюков, доктор физико-математических наук, профессор, кафедры «Экономико-математические методы и статистика», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск, Российская Федерация), a_panyukov@mail.ru.

Александр Константинович Богушов, аспирант, кафедры «Экономико-математические методы и статистика», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск, Российская Федерация), abogushov@gmail.com.

MSC 74J25; 78A25

Parametrization of the Electric Dipole Characterization Algorithms

A. V. Panyukov, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation),
A. K. Bogushov, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation)

The problem to identify the location parameters of an arbitrarily oriented electric dipole over an infinitely conducted plane by its electromagnetic field induced in the observation point is considered. This task is a one of mathematical models practically important problem of thunderstorms forecasting. To solve the problem because of its poor condition is proposed to use a parameterized set of algorithms, and the final decision to accept the results of statistical analysis. Parameterizations of the primal and extremal parametric methods in the middle of possible methods of identifying location parameters of an arbitrarily oriented electric dipole are considered. However it would be well to exploit more methods for increasing of statistical significance of result estimation. Put computational experiments results confirms efficiency the approach, but a wide variety of the measurement results do not lets to form up the well-provided measuring estimation of the dipole location parameters adequately. It is suggested the filtration of the measurement results based on the cleaner functionals and combination of them for improving of the measuring estimation of the dipole location parameters. For constructing of the cleaner functionals are applied the anti-trace and projection methods.

Keywords: inverse problem, algorithm parametrization, parametrical identification, statistical analysis, electric dipole.

References

1. Panyukov A.V., Bagin G.T. Application of Thunderstorm Passive Monitoring Systems [Primenenie sistem passivnogo monitoringa grozovoi deyatel'nosti]. *Kompleksnaya bezopasnost' Rossii – issledovaniya, upravlenie, opyt: mezhdunar. simpozium* [Integrated Security in Russia – Research, Management and Experience: Intern. Symposium], Moscow, 2004, pp. 178 – 180.
2. Panyukov A.V. Analysis of Error Direct Algorithm for Determining the Distance to the Electric Dipole [Analiz pogreshnosti pryamogo algoritma opredeleniya dal'nosti do elektricheskogo dipolya]. *Proceedings of Russian Universities. Radiophysics*, 1999, vol. XLII, pp. 266 – 277.
3. Panyukov A.V., Buduev D.V., Malov D.N. The Algorithm for Determining the Distance to the Location of the Lightning [Algoritm opredeleniya rasstoyaniya do mestopolozheniya molnievogo razryada]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2001, vol. 4, pp. 10 – 14.
4. Panyukov A.V. Current Status and Prospects of Passive Monitoring System Works Thunderstorm [Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya sitem passivnogo monitoringa grozovoi dyeyatel'nosti]. *Vestnik YUUrGU. Seriya: Matematika, fizika, khimiya* [J. of South Ural State University. Series: Mathematics, Physics, Chemistry], 2003, vol. 4, no. 8(24), pp. 11 – 20.

5. Panyukov A.V. Analysis of the Error of a Direct Algorithm for Determining the Distance to an Electric Dipole. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 1999, vol. 42, no. 3, pp. 239 – 248.
6. He S., Popov M., Romanov V. Explicit Full Identification of a Transient Dipole Source in the Atmosphere From Measurement of the Electromagnetic Fields at Several Points at Ground Level. *Radio Science*, 2000, vol. 35, no. 1, pp. 107 – 117.
7. Panyukov A.V., Buduyev D.V. An Extremum Algorithm for a Passive Method of Determining the Distance to a Lightning Strike. *Electrical Technology Russia*, 2001, no. 2, pp. 13 – 22.
8. Panyukov A.V. Estimation of the Location of an Arbitrary Oriented Dipole Under Single-point Direction Finding. *J. of Geophysical Research*, 1996, vol. 101, no. D10, pp. 14,997 – 14,982.
9. Panyukov A.V., Strauss V.A. A Method to Determine Parameters of a Linear Functional Equation Set and Its Application to Location Systems. *Water Science and Technology Library: Parameter Identification and Inverse Problems in Hydrology, Geology and Ecology*. Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands, 1997, vol. 23, pp. 199 – 209.
10. Panyukov A.V. Lightning Detection and Mapping Algorithms. *Proceedings 24-th International Conference on Lightning Protection . Vol. 1. (Birmingham, United Kingdom, September 14–18, 1998)*. Staffordshire university, 1998, pp. 227 – 231.
11. Taibin B.Z. An Approach to Define Parameters for Localization of Thunderstorms. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2006, vol. 48, no. 2, pp. 48 – 54.
12. Popov M., He S. Identification of a Transient Electric Dipole over a Conducting Half Space Using a Simulated Annealing Algorithm. *J. of Geophysical Research*, 2009, vol. 105, no. D16, pp. 20821 – 20831.
13. Panyukov A.V. Extremal Method for Solving a Parametric Inverse Problem for Systems of Linear Functional Equations [Ekstremal'nyi metod resheniya parametricheskoi obratnoi zadachi dlya sistemy lineinykh funktsional'nykh uravnenii]. *Russian Mathematics*, 2000, no. 9, pp. 27 – 33.
14. Panyukov A.V., Buduev D.V. Analytical and Numerical Study of the Stability and Accuracy of the Algorithms Determine the Distance to the Dipole Source VLF Radiation [Analiticheskoe i chislennoe issledovanie ustoychivosti i tochnosti algoritmov opredeleniya dal'nosti do dipol'nogo istochnika SDV-izlucheniya]. *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra UrO RAN* [Proceedings of Chelyabinsk Scientific Center of UrR RAS], 2004, no. 4, pp. 15 – 20.
15. Panyukov A.V., Buduev D.V. Library of Methods for Determining the Location of the Dipole Radiation Source [Biblioteka metodov opredeleniya mestopolozheniya dipol'nogo istochnika izlucheniya]. *Programma dlya EVM, bazy dannykh, topologiya integral'nykh mikroskhem. Ofitsial'nyi byulleten' Rossiyskogo agentstva po patentam i tovarnym znakam* [The Computer Program, Database, Topology of Integrated Circuits. Official J. of the Russian Agency for Patents and Trademarks], 2002, no. 2(1), pp. 149 – 150.
16. Bogushov A.K. Parallel Implementation of Complex Programs for the Problem of Determining the Parameters of the Electric Dipole [Parallel'naya realizatsiya kompleksa programm dlya zadachi opredeleniya parametrov elektricheskogo dipolya]. *Sbornik trudov. PAVT-2011* [Proceedings. PaVT – 2011], 2011, pp. 427 – 432.
17. Taylor W.L. Radiation Field Characteristics of Lightning Discharge in the Band 1 Kc/s to 100 Kc/s. *J. of Research of the NBS*, 1963, vol. 67D, no. 5, pp. 539 – 550.
18. Kononov I.I., Petrenko I.A., Snegurov V.S. *Radiotekhnicheskie metody mestoopredeleniya grozovykh ochagov* [Radio Engineering Methods for Locating Storm Centers]. Gidrometeoizdat, 1986.

Поступила в редакцию 27 ноября 2011 г.