

Параллельная реализация комплекса программ для задачи определения параметров электрического диполя *

А.К. Богушов, А.В. Панюков

Южно-Уральский государственный университет

Рассматривается задача идентификации параметров 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 использовать параметризованное семейство алгоритмов, а окончательное решение принимать по результатам статистического анализа. В докладе представлена параллельная реализация комплекса программ для портативных компьютеров с использованием технологии OpenCL.

1. Введение

Электрический диполь над плоскостью с бесконечной проводимостью является математической моделью, адекватно представляющей внутриоблачные молниевые разряды. Поэтому задача идентификации местоположения электрического диполя по его электромагнитному полю индуцируемому в точке наблюдения над плоскостью с бесконечной проводимостью актуальна. Работы посвященные данной проблеме публикуются в ведущих международных журналах [1], [2], [3], [4], [5].

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.

Во всех эмпирических измерениях, существует определенная вероятность погрешности между измеренным и истинным значением. На результаты измерения могут оказать влияние как случайные факторы, так и неточность моделирования. Одним из способов устранения подобных погрешностей является многократное измерение или расчеты с использованием множества алгоритмов. Затем полученные результаты можно представить в виде гистограммы, получив таким образом эмпирическое распределение вероятности для величин измеряемых параметров. Исходя из центральной предельной теоремы, разумным представляется принятие гипотезы о нормальном законе распределения. В этом случае по моде распределения можно отсеять заведомо неподходящие алгоритмы, а по оставшимся результатам проверить гипотезу нормальности, и получить оценки параметров и их доверительные интервалы.

При наблюдениях электромагнитного поля из одного пункта множественное измерение параметров источника излучения можно получить применением различных алгоритмов. Среди возможных методов определения параметров положения произвольно ориентированного электрического диполя, в работе будет рассмотрена параметризация прямого метода [1], [3], [7], как наиболее простого в реализации. Однако заметим, что для повышения статистической значимости оценки параметров следует использовать по возможности большее число алгоритмов.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 10-07-96003-р_урал_a

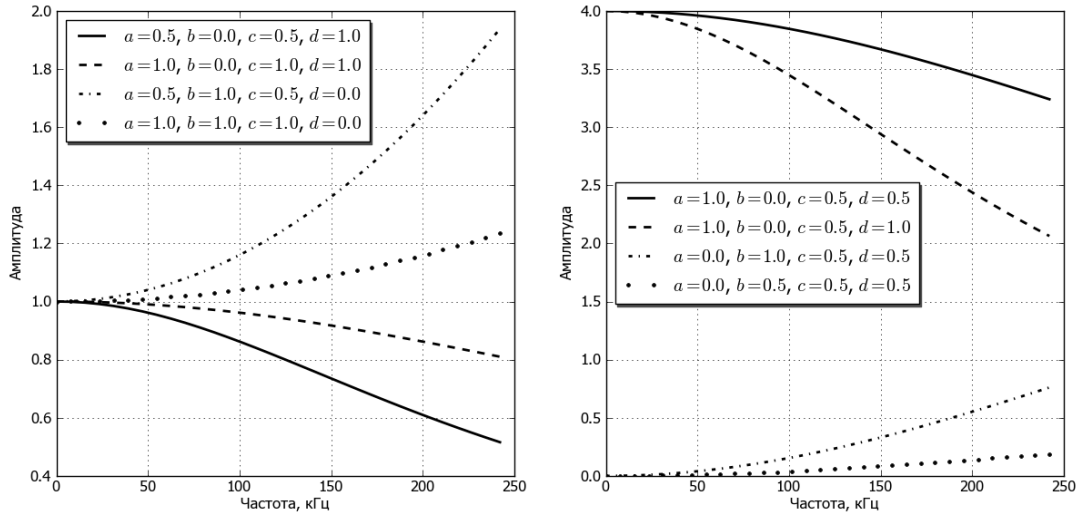


Рис. 1. Примеры АЧХ используемых передаточных функций

2. Прямой алгоритм и его параметризация

Известно [1], что задача идентификации параметров диполя сводится к задаче определения параметров u , v и α системы (1) по наблюдаемым сигналам $e(t)$ и $h(t)$.

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

где $\alpha = c/r$, c – скорость света, r – расстояние от наблюдателя до диполя, $q(t)$ – неизвестный дипольный момент.

Прямой алгоритм, рассмотренный в работах [1], [3], имеет вид:

$$\alpha = \sqrt{\frac{h_1 e_2 - h_2 e_1}{h_2 e_0 - h_1 e_1}}; \quad u = \frac{e_0 e_2 - e_1^2}{h_2 e_0 - h_1 e_1}; \quad v = \frac{3h_0 u \alpha - e_0 \alpha - g_0}{2h_0 \alpha}, \quad (2)$$

где

$$e_k = \int_0^{+\infty} e^{(k)}(t)h^{(k)}(t)dt; \quad h_k = \int_0^{+\infty} (h^{(k)}(t))^2 dt; \quad g_k = \int_0^{+\infty} e^{(k+1)}(t)h^{(k)}(t)dt; \quad k = 0, 1, 2.$$

С прямым алгоритмом было проведено большое количество численных экспериментов [6]. В качестве входных данных в этих экспериментах выступали сигналы полученные с помощью системы имитации сигналов $e(t)$, $h_x(t)$ и $h_y(t)$ [8].

Для повышения степени разнообразия сигналов от источника с заданными параметрами положения можно использовать предобработку измеренных сигналов $e(t)$, $h(t)$ линейными фильтрами. В работе для предобработки входных сигналов $e(t)$ и $h(t)$ использовано параметризованное семейство фильтров (см. рис. 1) с передаточными функциями

$$F(\omega) = \frac{a + j\omega b}{c + j\omega d}, \quad a, b, c, d \in [0; 1], a + b \neq 0, c + d \neq 0.$$

Данное семейство фильтров достаточно представительное: оно содержит фильтры в разной степени усиливающие и(или) ослабляющие как верхние, так и нижние частоты.

На модельных примерах было замечено, что идентификацию удаленных диполей лучше осуществлять на нижних частотах, а ближних диполей – на верхних частотах. Поскольку

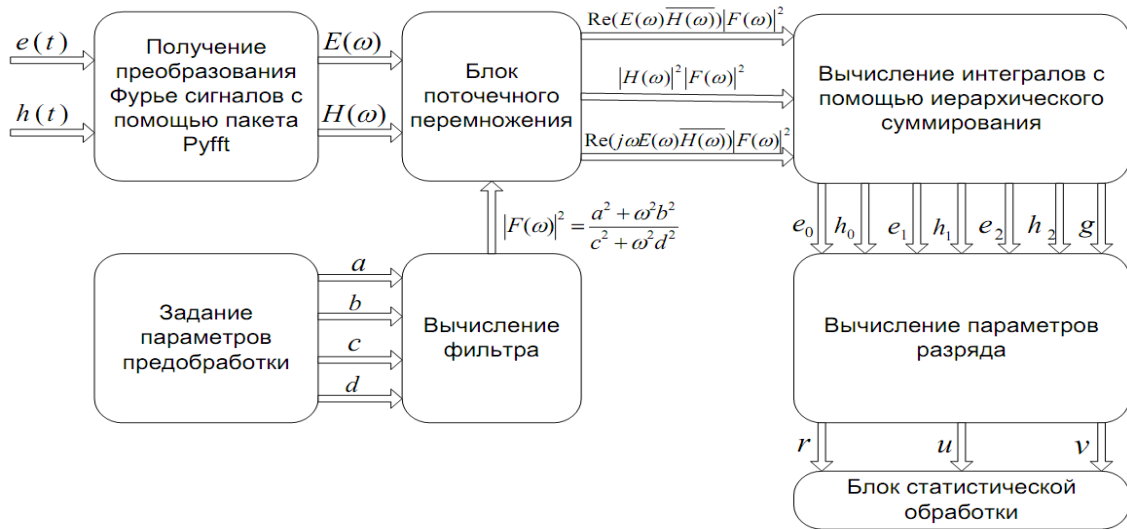


Рис. 2. Схема обработки

при обработке реальных сигналов не представляется возможным определить какой из фильтров необходимо использовать для получения наилучшей оценки, то оценка параметров u, v, α осуществляется по результатам статистической обработки всех результатов.

С целью повышения эффективности алгоритма, значения переменных e_k, h_k, g_k целесообразно вычислять в терминах преобразования Фурье. Из равенства Парсеваля имеем:

$$e_k = \int_{\omega_0}^{\omega_{N/2}} (\omega)^{2k} \text{Re} \left(E(\omega) \overline{H(\omega)} \right) |F(\omega)|^2 d\omega, \quad h_k = \int_{\omega_0}^{\omega_{N/2}} (\omega)^{2k} |H(\omega)|^2 |F(\omega)|^2 d\omega, \\ g_k = \int_{\omega_0}^{\omega_{N/2}} (\omega)^{2k} \text{Im} \left(\omega E(\omega) \overline{H(\omega)} \right) |F(\omega)|^2 d\omega, \quad k = 0, 1, 2, \quad (3)$$

где $\omega \in [\omega_0; \omega_{N/2}]$, ω_0 – нижняя частота среза полосового фильтра, $\omega_{N/2}$ – верхняя частота среза полосового фильтра.

3. Реализация параметризованного семейства алгоритмов с использованием технологии OpenCL

Чаще всего алгоритмы определения местоположения грозового разряда используются в автономных грозопеленгаторах. Специфика подобных устройств накладывает существенные ограничения на их аппаратную часть. Данные устройства должны быть энергоэффективными, компактными и в тоже время обеспечивать обработку данных в реальном времени. В связи с этим использование суперкомпьютеров или мощных настольных вычислительных машин не представляется целесообразным. Следует отметить, что в последнее время большую популярность приобрели компактные и энергоэффективные портативные платформы, например Intel Atom. Кроме того, производители оснащают данные устройства довольно мощными блоками графических процессоров, которые поддерживают технологии массивно-параллельных вычислений, таких как Nvidia CUDA и OpenCL. Поэтому, даже если центральный процессор портативной платформы и не обладает большой производительностью, возможность его использования в связке с портативными блоками графических процессоров, поддерживающими технологии Nvidia CUDA и OpenCL, позволяет с успехом решать поставленные задачи.

Схема обработки сигнала и вычисления параметров положения диполя представлена на рис. 2. На вход системы подаются два сигнала $e(t), h(t)$. Далее для этих сигналов вычисляются преобразования Фурье, по которым можно определить $\text{Re}(E(\omega)\overline{H(\omega)}), |H(\omega)|^2,$

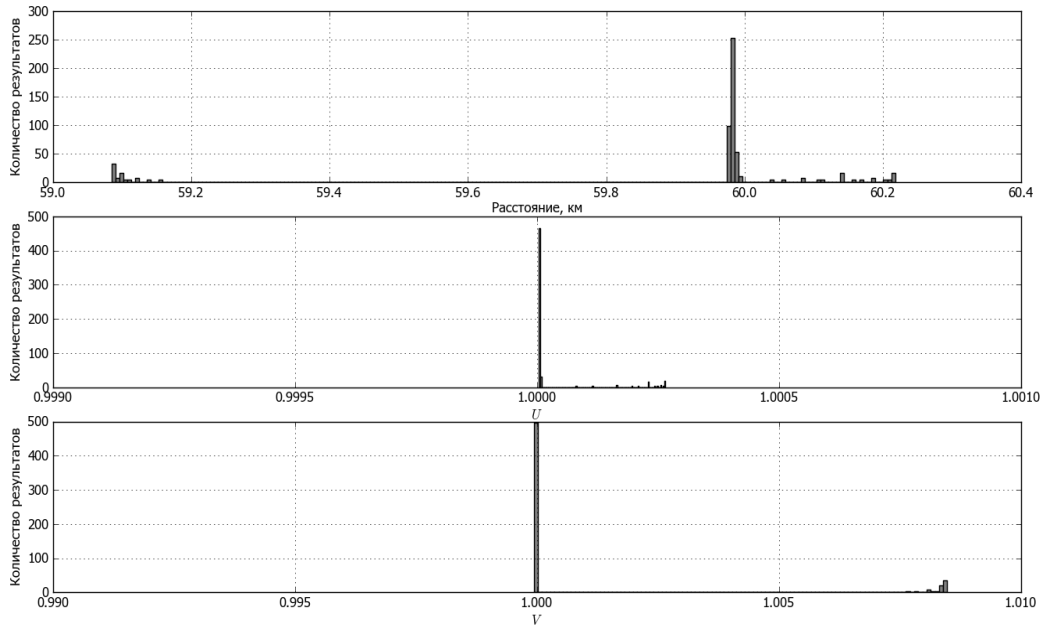


Рис. 3. Результаты статистической обработки

$\text{Im}(E(\omega)\overline{H(\omega)})$. Затем для заданных параметров алгоритма a, b, c, d , в соответствии с (3), определяются значения параметров e_k, h_k, g_k , затем в соответствии с (2) находятся параметры r, u, v разряда, которые отправляются в блок статистической обработки. Блок статистической обработки по всей совокупности параметров a, b, c, d определяет оценки параметров r, u, v и их доверительные интервалы.

4. Вычислительный эксперимент

В качестве языка программирования используется Python. Pyopencl выступает в качестве API для проведения массивно-параллельных вычислений на графическом процессоре. Преобразование Фурье сигналов $e(t), h(t)$ выполняется с помощью пакета Pyfft, который в свою очередь также использует пакет Pyopencl. Тестирование алгоритмов проводилось на портативном компьютере: центральный процессор Intel Core 2 Duo T5750 2ГГц, 2 Гб оперативной памяти, графический адаптер – Nvidia GeForce 9200M GS (содержит 8 вычислительных ядер).

Для иллюстрации работы алгоритма взяты сигналы от имитатора, входящего в библиотеку [8]. Была использована аппроксимация эквивалентного дипольного момента для атмосфериков нормального типа [9]

$$P(t) = P_0 \left[(a_1 t)^3 \exp^{-a_1 t} + a_2 (a_3 t)^3 \exp^{-a_3 t} \right], \quad (4)$$

со средними значениями параметров $a_1 = 0.023 \text{ мкс}^{-1}$, $a_2 = 3$, $a_3 = 0.0035 \text{ мкс}^{-1}$. Эквивалентный дипольный источник был размещен на расстоянии 60 км, $u = 1$ и $v = 1$. Результаты работы представлены на рис. 3.

Параметры a, b, c, d выбирались из множества $\{0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0\}$. В рассматриваемом случае высокая точность измерения: $\sigma_r = 0.3 \text{ км}$, $\sigma_u = 7.7 \cdot 10^{-5}$, $\sigma_v = 0.003$, – объясняется идеальностью (отсутствием шумов) имитируемых функций $e(t), h(t)$. Для реальных сигналов величина дисперсии оказывается выше.

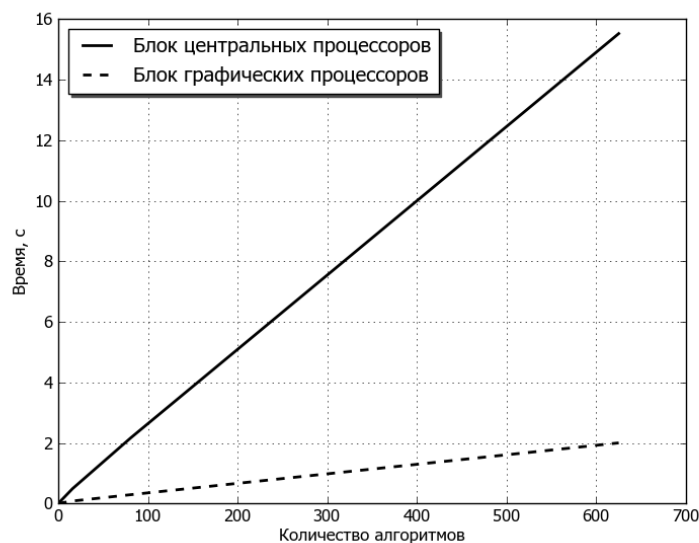


Рис. 4. Время обработки разряда

На рис. 4 представлены результаты измерения времени работы алгоритма реализованного на блоке центрального процессора и блоке графических процессоров. Как видно, реализация алгоритма с помощью технологии OpenCL позволяет уменьшить время обработки разряда в 7 раз (в нашем случае пропорционально числу процессоров в графическом блоке). Это в свою очередь позволяет увеличить количество разрядов обрабатываемых за единицу времени.

5. Заключение

Таким образом предложенный подход к решению проблемы определения параметров электрического диполя показал свою состоятельность. Использование в данной методике других базовых алгоритмов, например [2, 6], увеличит статистическую значимость результатов, получаемых таким образом.

Литература

1. Panyukov A.V. Estimation of the location of an arbitrary oriented dipole under single-point direction finding // Journal of geophysical researche. 1996, June 27. Vol. 101. № D10.
2. Panyukov A.V., Strauss V.A. A Method to determine parameters of a linear functional equation set and its application to location systems // Parameter identification and inverse problems in hydrology, geology and ecology. / J. Gottlieb and P. DuChateau (eds.). – Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands. –1996. – P. 199 – 209.
3. Panyukov A.V. Analysis of the error of a direct algorithm for determining the distance to an electric dipole. // Radio physics and Quantum Electronics. - Vol. 42. - No 3. - 1999. - P. 239 - 248.
4. M. Popov, S.He. Identification of a transient electric dipole over a conducting half space using a simulated annealing algorithm // Journal of Geophysical Research. 2000. Vol. 105. № D16. P. 20821–20831.

5. B.Z. Taibin. An approach to define parameters for localization of thunderstorm // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2006. Vol. 48. P.48–54.
6. Панюков А.В., Будуев Д.В. Алгоритм определения расстояния до местоположения молниевых разряда // Электричество 2001, апрель. Т. 4. С. 10–14.
7. Панюков А.В., Будуев Д.В., Малов Д.Н. Системы пассивного мониторинга грозовой деятельности // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика, Физика, Химия. 2003. № – 8(24). С. 11–20.
8. Панюков А.В., Будуев Д.В. Библиотека методов определения местоположения дипольного источника излучения // Программа для ЭВМ, базы данных, топология интегральных микросхем. Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам №2(1). – 2002. – С.149 – 150.
9. Кононов И.И., Петренко И.А., Снегуров В.С. Радиотехнические методы местоопределения грозовых очагов. – Л.:Гидромеоиздат, 1986.