

ВОЛНОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЯ

Шлыков А.А., Сараев А.К.

Санкт-Петербургский государственный университет

Рассмотрены особенности нормального электромагнитного поля высокочастотного горизонтального электрического диполя с учетом токов смещения в земле и воздухе. Расчеты составляющих поля выполнены с использованием метода частичного интегрирования для негладкого поведения подынтегральной функции. По результатам расчетов выделена граница квазистационарной и волновой зоны источника. Рассмотрены эффекты, возникающие в волновой зоне под воздействием токов смещения в воздухе. Результаты расчетов подтверждены данными полевых экспериментальных работ.

Ключевые слова: высокочастотный горизонтальный электрический диполь, ток смещения, волновая зона.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение получили методы магнитотеллурических и аудиоманнитотеллурических зондирований, частотных зондирований, аудиоманнитотеллурические зондирования с контролируемым источником. В этих методах используются относительно низкие частоты (до 10 кГц) и квазистационарная модель электромагнитного (ЭМ). В последние годы начали активно развиваться методы электромагнитных зондирований, основанные на измерениях высокочастотных ЭМ полей: сотни килогерц - десятки мегагерц, и нацеленные на изучении небольших глубин, от 1-2 м до десятков метров [Bastani, 2001; Song et al., 2002; Tezkan and Saraev, 2008; Kalscheuer et al., 2008; Simakov et al., 2010; Хмелевской и др., 2010]. При использовании высоких частот необходим учет токов смещения в земле и воздухе.

Ранее влияние токов смещения в земле и в воздухе на составляющие ЭМ поля рассматривались в основном в плане оценки границ применимости квазистационарного приближения для полей контролируемых источников и возможности определения диэлектрической проницаемости пород [Вешев и др., 1983; Егорова, Сапожников, 1983; Siemon, 2012]. В работе [Сараев и др., 1998] было показано, что токи смещения в воздухе оказывают существенное влияние на электромагнитное поле источников на низких частотах (десятки герц) при расстояниях до точки наблюдения сотни - тысячи километров, и исследованы особенности возникающих эффектов.

Настоящая работа посвящена результатам изучения структуры нормального (над полупространством) ЭМ поля высокочастотного горизонтального электрического диполя (ГЭД), используемого в качестве источника в ряде высокочастотных методов, в частности в методе радиоманнитотеллурических (РМТ) зондирований с контролируемым источником [Simakov et al., 2010; Saraev et al., 2011].

ОСОБЕННОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Рассмотрим особенности поля горизонтального электрического диполя (ГЭД) на примере составляющих электрического поля, так как составляющие магнитного поля ведут себя аналогичным образом. Выражения для горизонтальных составляющих поля E_x и E_y диполя, расположенного на границе раздела земля - воздух при зависимости от времени $e^{+i\omega t}$ имеют следующий вид:

$$E_x = \frac{Idl}{2\pi} \cdot i\omega\mu_0 \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} \int_0^\infty \frac{1}{k_0^2 n_1 + k_1^2 n_0} \cdot e^{n_1 z} J_0(mr) m dm - \int_0^\infty \frac{1}{n_0 + n_1} \cdot e^{n_1 z} J_0(mr) m dm \right]$$
$$E_y = \frac{Idl}{2\pi} \cdot i\omega\mu_0 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \int_0^\infty \frac{1}{k_0^2 n_1 + k_1^2 n_0} \cdot e^{n_1 z} J_0(mr) m dm \quad (1)$$

В приведенных выражениях $k_j^2 = i\omega\mu_0(\sigma_j + i\omega\varepsilon_j)$ - квадрат волнового числа в среде j ; $n_j = \sqrt{k_j^2 + m^2}$; $\sigma_j = 1/\rho_j$ - удельная электропроводность (См/м); ρ_j - удельное сопротивление (Ом·м), $\varepsilon_j = \varepsilon_j^{rel} 10^{-9} / 36\pi$ - абсолютная диэлектрическая проницаемость, ε_j^{rel} - относительная диэлектрическая проницаемость, $\omega = 2\pi f$ - круговая частота, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ - расстояние от источника (м), J_0 - функция Бесселя первого рода нулевого порядка, i - мнимая единица. Рассматриваются слабомагнитные среды, и магнитная проницаемость земли и воздуха принята равной магнитной постоянной $\mu_1 = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

В случае квазистационарного приближения ($k_0 = 0$, $k_1 = \sqrt{i\omega\mu_0\sigma_1}$) ядро преобразования Ханкеля является гладкой функцией m и для вычисления таких выражений типа (1) применим популярный метод быстрого преобразования Ханкеля - БПХ [Anderson, 1979; Рыжов, 1989 и др.].

При $k_0 \neq 0$ ядро интегралов (1) имеет полюс в точке $m_c = \omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}$ [Siemon, 2012]. В данном случае это наиболее наглядно видно из анализа поведения функции $R_E = (k_0^2 n_1 + k_1^2 n_0)^{-1}$ (рис. 1а).

На рис. 1б приведен результат применения обычного метода БПХ при вычислении составляющей $|E_x|$ поля ГЭД при $k_0 \neq 0$. На графике видно, что неадекватная дискретизация множества

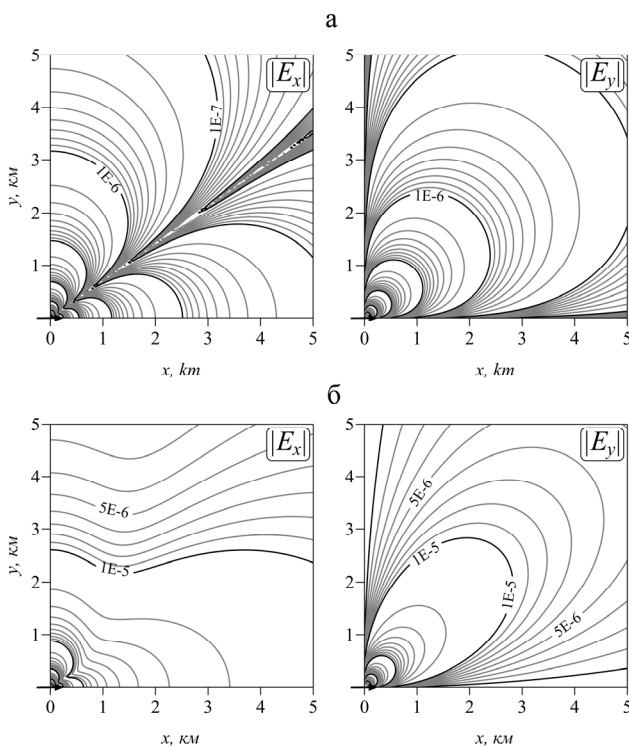


Рис. 2. Планы изолиний горизонтальных составляющих электрического поля ГЭД в квазистационарной (а) и волновой (б) зонах.

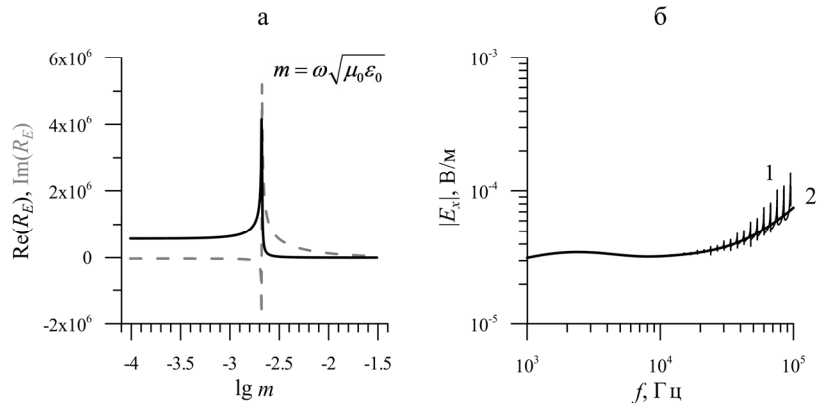


Рис. 1. а – особенности поведения вещественной и мнимой частей функции $R_E(m)$ в зависимости от переменной интегрирования m при $k_0 \neq 0$; б – график $|E_x|$ ГЭД при $k_0 \neq 0$ (1 - результат использования метода БПХ, 2 - результат частичного интегрирования с экстраполяцией).

пространственных частот m (равномерный шаг в логарифмическом масштабе) приводит к появлению ложных пиков. В настоящей работе для решения этой проблемы применяется следующая схема. Интегрирование ведется методом Гаусса между нулями функции Бесселя. После вычисления интеграла на каждом последующем промежутке полученная частичная сумма экстраполируется методом Шанкса [Shanks, 1955]. Если критическая пространственная частота m_c (полюс ядра интеграла) попадает в промежуток $[p_j, p_{j+1}]$, где p_j - один из нулей функции Бесселя, то этот промежуток делится на два соответствующих промежутка $[p_j, m_c]$ и $[m_c, p_{j+1}]$ на каждом из которых интегрирование проводится адаптивным методом Гаусса.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Для относительно высоких частот при $r \sim \lambda_0$, где r - удаление от источника, λ_0 - длина электромагнитной волны в воздухе целесообразно дополнительно к используемым в электроразведочной практике при рассмотрении квазистационарных полей ближней, промежуточной и дальней зонам рассматривать также **волновую зону** источника, структура поля

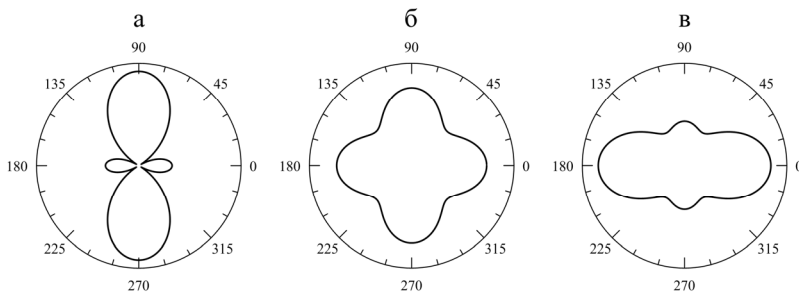


Рис. 3. Диаграммы направленности ГЭД для $|E_x|$ на расстояниях 300 м (а), 1100 м (б) и 2000 м (в) от источника при $f = 100$ кГц и $\rho_1 = 1000$ Ом·м.

длиной $dl = 100$ м. При этом для воздуха $\rho_0 = 10^{14}$ Ом·м, $\varepsilon_0^{rel} = 1$, для земли $\rho_1 = 1000$ Ом·м, $\varepsilon_1^{rel} = 10$.

На рис. 2 показаны планы изолиний (в В/м) составляющих $|E_x|$ и $|E_y|$ в квазистационарном приближении и в волновой зоне. Как видно из рисунка, структура поля в волновой зоне существенно отличается от структуры квазистационарного поля. Минимум поля $|E_x|$ в области, ориентированной под углом 35° к направлению диполя, сглаживается и смещается к экваториальной области диполя. Изолинии $|E_y|$ в волновой зоне вытягиваются в направлении, ориентированном под углом 45° к направлению диполя.

Меняется также диаграмма направленности ГЭД (рис. 3). Для квазистационарного поля амплитуда составляющей E_x в экваториальной зоне в два раза превышает соответствующее значение на оси диполя, в то время как в волновой зоне наблюдается значительное превышение его амплитуды на оси диполя. Эта особенность диаграммы направленности ГЭД на поверхности земли, хорошо известна в радиофизике [Конторович, 1956], но не учитывалась ранее при проведении электроразведочных работ.

Как следует из рис. 2 и 3, в волновой зоне участок, благоприятный для измерений импеданса Z_{xy} , сужается в экваториальной области диполя и расширяется по направлению вдоль диполя. Поэтому, выбор положения рабочего планшета при проведении работ методом РМТ-К должен производиться с учетом данного обстоятельства.

Для выделения границы между квазистационарной и волновой зонами рассмотрим параметр $\Delta|E| = 100\% \left(\left| E^{k_0 \neq 0} \right| - \left| E^{k_0 = 0} \right| \right) / \left| E^{k_0 \neq 0} \right|$, и за граничное значение примем $\Delta|E| = 5\%$. Для составляющей E_x в экваториальной области диполя эта граница соответствует значению $|k_0|y = 0.33$ (соответствует расстоянию $y = 160$ м для выбранных параметров среды и источника), и в осевой области $|k_0|x = 1.0$ ($x = 460$ м). Для составляющей E_y , граница соответствует значению $|k_0|r = 0.45$ ($r = 200$ м). Положение границы квазистационарной зоны не зависит от удельного сопротивления земли ρ_1 .

В квазистационарном приближении электрическое и магнитное поле ГЭД имеет линейную поляризацию. При влиянии токов смещения в воздухе на определенном расстоянии от источника появляется эллиптичность поляризации [Сараев и др., 1998]. Для $f = 300$ кГц и $\rho_1 = 1000$ Ом·м были выполнены расчеты параметров эллипсов поляризации электрического поля – большой a и малой b полуосей и угла поворота большой полуоси в горизонтальной плоскости (рис. 4а). Для наглядности

в которой зависит от токов смещения в воздухе.

Для вычисления составляющих нормального поля в волновой зоне с учетом токов смещения в земле и воздухе разработана программа и выполнены соответствующие расчеты. Рассмотрим результаты расчетов для ГЭД, ориентированного вдоль горизонтальной оси x , с силой тока $I = 1$ А, частотой тока $f = 100$ кГц и

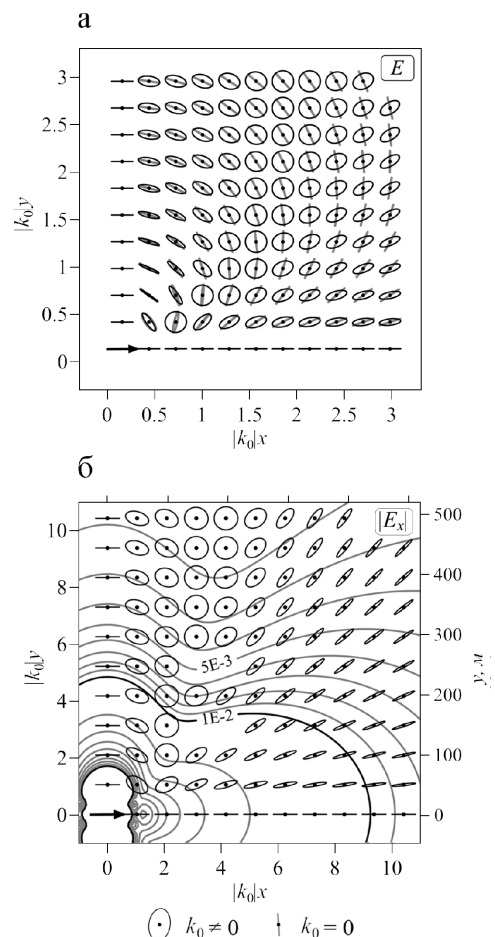


Рис. 4. а - эллипсы поляризации электрического поля ГЭД для $f = 300$ кГц; б - эллипсы поляризации электрического поля ГЭД для $f = 1$ МГц, совмещенные с изолиниями $|E_x|$.

значения полуосей a и b в каждой точке нормированы на большую полуось ($a = 1, b = b/a$). В данном случае для выбранной частоты сектор эллиптически поляризованного поля достаточно широкий. Кроме эллиптичности поляризации отмечается некоторое запаздывание разворота эллипсов относительно направления линейной поляризации для квазистационарного приближения. Область выраженной эллиптической поляризации поля ориентирована по азимуту минимальных значений $|E_x|$ на диаграмме направленности (рис. 4б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При анализе особенностей поля высокочастотного ГЭД выделена волновая зона, структура поля существенно отличается от квазистационарной зоны. В волновой зоне наблюдается более медленное убывание амплитуд электромагнитного поля с расстоянием, меняется диаграмма направленности источника, появляется эллиптичность поляризации горизонтальных составляющих поля E и H и разворот эллипсов относительно направления линейной поляризации для квазистационарного приближения. В волновой зоне амплитуда и фаза поверхностного импеданса совпадает с импедансом плоской волны. Положение волновой зоны не зависит от электрических свойств проводящего полупространства и для составляющих E_x и H_y ее граница с квазистационарной зоной на оси диполя соответствует значению $|k_0|r = 1.0$, а в экваториальной области - $|k_0|r = 0.33$. Для составляющих E_y и H_x граничное значение $|k_0|r = 0.45$. Появление эллиптичности поляризации для ГЭД дает возможность выполнения тензорных измерений с использованием только одного источника ЭМ поля. Рассмотренные особенности поля в волновой зоне подтверждены экспериментальными работами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вешев А.В., Ладатко О.Н., Морозова О.М. Нормальное поле вертикального магнитного диполя // Вопросы геофизики. 1983. Вып. 30. С. 159-204.
- Егорова Л.В., Сапожников Б.Г. Оценка границ квазистационарного приближения для низкочастотного нормального электрического поля // Методы разведочной геофизики. НПО «Рудгеофизика», сборник научных трудов. 1983. С. 85-97.
- Конторович М.И. Антенные устройства. Л.: Военная академия связи. 1956. 263 с.
- Рыжов А.А. Алгоритм расчета электромагнитных полей в поляризующихся горизонтально-слоистых средах // Физика Земли. 1989. №2.
- Сараев А.К., Косткин П.М., Ивочкин В.Г. Особенности поляризации электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки // Физика Земли, 1998, №7. С. 50-55.
- Хмелевской В. К., Петрухин Б. П., Пушкарев П. Ю. Магнитотеллурика и радиоволновые интерференционные зондирования // Физика Земли, 2010, № 9, с. 11–14.
- Anderson W.L. Numerical integration of related Hankel transforms of orders 0 and 1 by adaptive digital filtering // Geophysics. 1979. 44. P. 1287–1305.
- Bastani M. EnviroMT – A New Controlled Source/Radio Magnetotelluric System // Acta Universitatis Upsaliensis. 2001. P. 179.
- Kalscheuer T., Pedersen L. B., Siripunvaraporn W. Radiomagnetotelluric two-dimension forward and inverse modeling accounting for displacement currents // Geophys. J. Int. 2008. 175. P. 486-514.
- Saraev A. K., Simakov A. E., Tezkan B. Foot, Mobile and Controlled Source Modifications of the Radiomagnetotelluric Method // Near Surface 2011 – 17th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Leicester, UK, 12-14 September 2011.
- Shanks D. Nonlinear transformations of divergent and slowly convergent sequences // Journal of Mathematical Physics. 1955. 34. P. 1–42.
- Siemon B. Accurate 1D forward and inverse modeling of high-frequency helicopter-borne electromagnetic data // Geophysics. 2012. 77. WB71-WB87.
- Simakov A., Saraev A., Antonov N., Shlykov A., Tezkan B. Mobile and controlled source modifications of the radiomagnetotelluric method and prospects of their application in the near-surface geophysics. 20th Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, Giza, Egypt, 2010, September 18-24, S5-P9.
- Song, Y., Kim, H.J., and Lee, K.H. High-frequency electromagnetic method for subsurface imaging // Geophysics. 2002. 67. P. 501-510.
- Tezkan B., Saraev A. A new broadband radiomagnetotelluric instrument: application to near surface investigations // Near Surface Geophysics. 2008. P. 245-252.