

Поляризация высокочастотного электромагнитного поля в тензорном варианте метода РМТ-К

А.А. Шлыков¹, А.К. Сараев²

¹СПбГУ, Институт наук о Земле, a.shlykov@spbu.ru

²СПбГУ, Институт наук о Земле, a.saraev@spbu.ru

АННОТАЦИЯ

В настоящей работе рассматриваются различные варианты создания «вращающегося» поля для реализации тензорного варианта метода РМТ-К. Рассмотрены особенности изменения направления поляризации высокочастотного электромагнитного поля заземленного провода, используемого в качестве источника в методе РМТ-К, в зависимости от частоты и параметров провода. Результаты моделирования и полевого эксперимента показывают, что даже для случая одной генераторной линии направление горизонтальной поляризации электромагнитного поля существенно меняется на частотах выше 100 кГц. Система из двух взаимно ортогональных генераторных линий, подключенных к разным генераторам с идентичной частотой выходного тока, создает «вращающееся» поле на частотах десятки-сотни килогерц. Для создания «вращающегося» поля на частотах ниже 10 кГц более целесообразно использовать два одновременно работающих генератора с несколько различной частотой выходного тока.

Ключевые слова: радиоманнитотеллурические зондирования с контролируемым источником, высокочастотное электромагнитное поле

Введение

Метод радиоманнитотеллурических зондирований с контролируемым источником (РМТ-К) является относительно новым методом электроразведки (Bastani, 2001; Сараев и др., 2014). Частотный диапазон метода 1-1000 кГц позволяет изучать геоэлектрический разрез на глубину от первых метров до 100-150 м. В методе РМТ-К используются источники двух типов: магнитного типа - горизонтальный магнитный диполь (вертикальная петля) (Bastani, 2001) или электрического типа - горизонтальный электрический диполь (заземленный на концах провод – генераторная линия) (Сараев и др., 2014).

Работы методом РМТ-К чаще проводятся в скалярном варианте. Однако, для достоверной интерпретации данных метода РМТ-К в горизонтально неоднородных средах и получения полной информации о геоэлектрическом разрезе необходимо проведение тензорных измерений.

Расчет тензорной передаточной функции, например импеданса, возможен с использованием данных измерений электромагнитного поля с переменным направлением поляризации (Семенов, 1980). Единичный источник электромагнитного поля, такой как петля или заземленный провод, имеют

стационарную поляризацию первичного электромагнитного поля. Для создания поля с переменной во времени поляризацией («вращающегося» поля) обычно применяют два разнонаправленных источника (Wannamaker, 1997, Bastani 2001). В этом случае каждый из генераторов, подключенных к соответствующей нагрузке, включается последовательно при выключенном другом генераторе и таким образом поле, регистрируемое на приемнике, имеет различную ориентацию в различные моменты времени. На этапе обработки данные измерений, выполненных на одной и той же частоте, но с разнонаправленными генераторными линиями, обрабатываются как единое измерение.

В случае использовании высоких частот, как в методе РМТ-К, и генераторной линии длиной в сотни метров - километры длины волн тока и напряжения в проводе становятся сопоставимы или меньше длины самого провода. В этом случае на амплитуду и фазу регистрируемого поля будут существенно влиять распределенные параметры провода, такие как погонное сопротивление, емкость и индуктивность. Применение двух разнонаправленных генераторных линий возможно в рассмотренном выше варианте с последовательным включением двух источников, а также при одновременном включении двух источников на одинаковой или незначительно различающейся частоте. Рассмотрению

особенностей поляризации различных вариантов высокочастотных источников электрического типа посвящена данная работа.

Теория

Основываясь на теории длинных линий (Егорова, Сапожников, 1981), можно записать выражения для какой-либо компоненты электромагнитного поля, создаваемого заземленным проводом:

$$M = \int_a^b I(x)m(x)dx. \quad (1)$$

Здесь M – компонента электрического или магнитного поля генераторной линии в точке измерения, $I(x)$ – комплексная сила тока в точке провода с координатой x , $m(x)$ – значение той же компоненты электрического или магнитного поля, рассчитанное для точечного горизонтального электрического диполя, помещенного в точку x на проводе. Комплексное значение силы тока в любой точке провода может быть рассчитано по следующей формуле:

$$I(x) = I_{out} \left(\cosh(\gamma x) - \sinh(\gamma x) \frac{Z_{in}}{Z_w} \right). \quad (2)$$

Здесь I_{out} – выходная сила тока генератора (А), Z_w – волновой импеданс провода (Ом), Z_{in} – входной импеданс провода (Ом), γ – постоянная распространения в проводе (1/км), И

$$Z_{in} = Z_w \frac{R_g + Z_w \tanh(\gamma l)}{Z_w + R_g \tanh(\gamma l)}; \\ Z_w = \sqrt{Z/Y}; \quad \gamma = \sqrt{ZY} \quad (3)$$

где $Z = R + i\omega L$ – полное погонное сопротивление провода (Ом), $Y = G + i\omega C$ – полная погонная проводимость провода (См), l (км) – длина соответствующего плеча генераторной линии между генератором и

заземлением с сопротивлением R_g (Ом). Погонные емкость C , проводимость изоляции G и индуктивность L рассчитываются по следующим формулам (Вешев, 1980):

$$C = \frac{\varepsilon \cdot 24.13 \cdot 10^{-9}}{\log_{10}(hr + \sqrt{hr^2 - 1})} \\ G = \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg}(\delta) + G_0 \quad (4) \\ L = \left[1 - i1.57 + 2 \operatorname{lg} \left(\frac{1.12}{|k_1|r} \right) - i2.67|k_1|h \right] \cdot 10^{-4}$$

где R – погонное сопротивление металлической части провода (Ом/км), G – погонная проводимость изоляции провода (См/км), G_0 – погонная проводимость изоляции провода на постоянном токе (См/км), C – погонная емкость провода, лежащего на земле (Ф/км), L – погонная индуктивность (Гн/км), ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала изоляции, $\operatorname{tg}(\delta)$ – тангенс угла диэлектрических потерь, h – высота провода над землей (мм), r – радиус металлической части провода (мм), k_1 – волновое число земли, ω – круговая частота.

Рассмотрим простой пример провода длиной 600 м, лежащего на поверхности однородного полупространства с удельным сопротивлением 50 Ом*м и относительной диэлектрической проницаемостью 4. Генератор подключен асимметрично и сопротивление каждого из заземлений равно 50 Ом. Выходной ток примем за 1 А. Рисунок 1 иллюстрирует распределение реальной части комплексной силы тока вдоль провода на различных частотах.

Моделирование поля провода выполнено для 1D случая с учетом токов смещения в земле и воздухе по алгоритму, описанному в (Шлыков, Сараев, 2014).

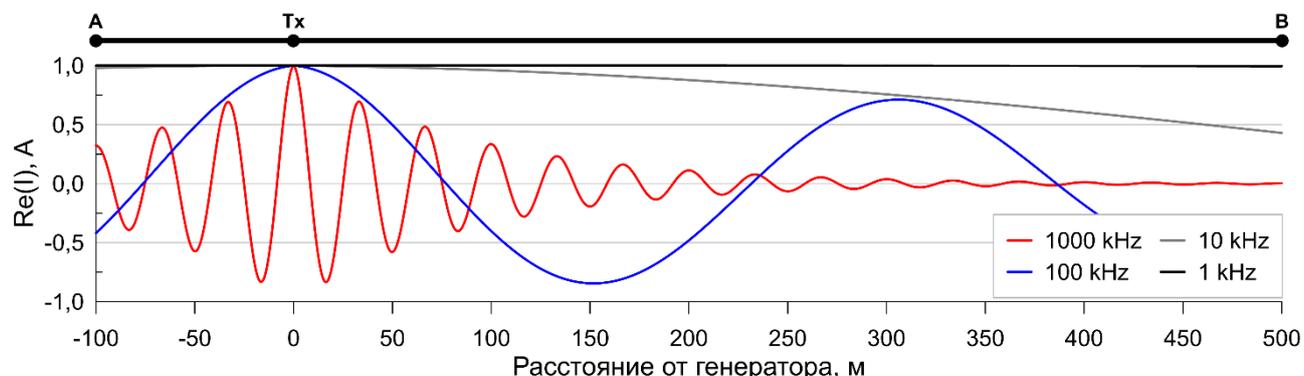


Рисунок 1. Распределение реальной части комплексной силы тока вдоль провода длиной 600 м с асимметричным включением генератора на различных частотах.

Как видно на Рисунке 1, амплитуда тока на частоте 1 кГц идентична для каждой точки на проводе. На частоте 10 кГц реальная часть силы тока уменьшается до половины выходной силы тока генератора. На частоте 100 кГц отчетливо видны осцилляции длиной волны порядка 300 м, а на частоте 1 МГц мы видим сильно затухающие от по направлению к заземлениям осцилляции с длиной волны около 33 м. Изменение мнимой части силы тока имеет схожий характер. Для тензорных измерений наиболее важным параметром является угол поворота горизонтального эллипса поляризации электромагнитного поля θ . В дальнейшем мы будем анализировать только этот параметр.

Полевой эксперимент

Для анализа изменения поляризации поля высокочастотного поля, создаваемого заземленным проводом, мы использовали аппаратуру, описанную в (Сараев и др., 2014), два генератора и две пары взаимно ортогональных заземленных генераторных линий. В первой паре каждая линия имела длину 200 м, во второй – 600 м. Для минимизации влияния помех измерения проводились вблизи источников.

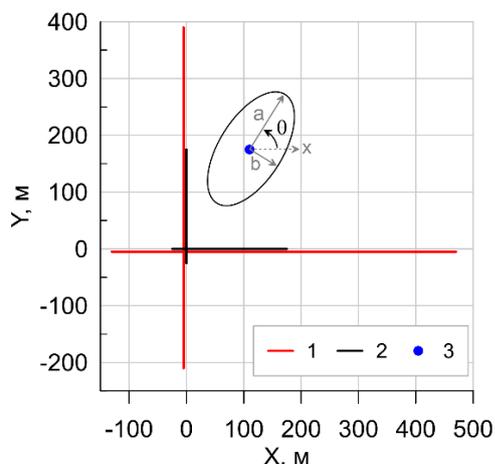


Рисунок 2. Схема полевого эксперимента: 1 – генераторные линии длиной 600 м, 2 – генераторные линии длиной 200 м, 3 – точка измерения. Вокруг точки измерения схематически показаны элементы эллипса поляризации: a – большая полуось, b – малая полуось, θ – угол поворота большой полуоси.

Схема измерения показана на Рисунке 2. Ввиду того, что генератор создает ток в форме прямоугольного меандра, мы использовали только три основные частоты генератора: 0,5, 5 и 50 кГц. Результирующий спектр имеет 9 нечетных гармоник на декаду. Мы сравнивали три различных подхода к генерации тока.

Первый – последовательное включение каждого из двух генераторов. Второй – одновременное включение обоих генераторов на идентичной частоте. Третий – одновременное включение обоих генераторов с небольшим сдвигом основной частоты на втором генераторе относительно первого. Для последнего варианта мы использовали частоты 0,5 и 0,5001 кГц или 0,02% разницу в частоте. Мы не использовали этот вариант на более высоких частотах из-за аппаратных ограничений применяемого генератора и невозможности задания настолько близких значений на более высоких частотах.

Прежде всего оценим измерения и синтетические данные для единичной генераторной линии. Рисунок 3 иллюстрирует сопоставление измеренного угла поворота горизонтального эллипса поляризации электрического поля и синтетического аналога, рассчитанного с учетом распределенных параметров генераторной линии и токов смещения в земле и воздухе для генераторной линии длиной 600 м.

Как видно из Рисунка 3, измеренные и синтетические результаты согласуются довольно хорошо. Начиная с частоты около 70 кГц эллипс поляризации горизонтального электрического поля начинает существенно отклоняться от направления, параллельного проводу генераторной линии. При этом в диапазоне частот 100-300 кГц направление его главной полуоси меняется на 180 градусов и более. В данном случае точное моделирование вряд ли возможно, например, из-за сильного влияния высоты укладки провода над землей на емкость и индуктивность провода, что практически невозможно точно учесть при длине провода в сотни метров.

При использовании двух генераторных линий первоначально полевым эксперимент был выполнен для последовательного включения двух источников и обработки данных как единого измерения.

Затем были выполнены эксперименты по одновременному включению двух генераторных линий. Для анализа измерения ориентации горизонтального электрического поля во времени при использовании двух генераторных линий рассмотрим параметр $\Delta\theta_E$ показывающий, отклонение направления поляризации электрического поля в конкретный момент времени от среднего направления поляризации за все время измерений. Рисунок 4 иллюстрирует вариации этого параметра в зависимости от частоты и времени измерения для случая одновременно включенных

генераторов с идентичной частотой. На частотах 1-10 кГц осцилляции направления поляризации горизонтального электрического поля лежат в пределах $\pm 15-20^\circ$, однако период этих осцилляций довольно большой: около 50 с для частоты 9.5 кГц и более 100 с для 1.5 кГц, что вряд ли пригодно на практике.

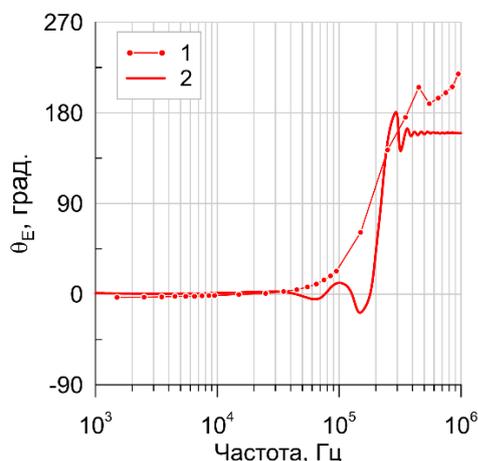


Рисунок 3. Частотные зависимости угла поворота горизонтального эллипса поляризации электрического поля для единичной генераторной линии: 1 – наблюдаемые данные, 2 – синтетические данные.

На частотах 10-100 кГц осцилляции лежат в пределах $\pm 10-20^\circ$ с периодом 6 с и менее. На частотах 100-1000 кГц амплитуда осцилляций около $\pm 90^\circ$ и скорость вращения очень велика. Для каждой частоты более длинный источник дает большую амплитуду осцилляций и меньший период вращения поля.

Незначительный сдвиг частоты двух генераторов на 0.02% на частоте 0.5 кГц (0.5 и 0.5001 кГц) приводит к осцилляциям ориентации горизонтального электрического поля в диапазоне частот 1-10 кГц с амплитудой $\pm 15-20^\circ$ и периодом около 10 с для генераторных линий длиной 200 м и 2-3 с для генераторных линий длиной 600 м (Рисунок 5). Этого вполне достаточно для практического применения указанного феномена для проведения тензорных измерений.

В обоих случаях из-за наличия разницы в частотах или при одинаковых частотах из-за неидентичности генераторных линий и заземлений суммарное поле меняет направление своей поляризации.

При сравнении результатов экспериментов для разных вариантов генерации тока (последовательное включение генератора к двум линиям, одновременная работа двух

генераторов на одинаковой частоте, одновременная работа двух генераторов на различающихся частотах) были выполнены расчеты компонент тензора импеданса. Установлено, что результаты расчетов практически не зависят от способа генерации тока.

Выводы

Мы рассмотрели вращение высокочастотного электромагнитного поля заземленного провода применительно к тензорному варианту метода РМТ-К. На основе численного анализа и натурного эксперимента показано, что направление поляризации высокочастотного поля заземленного провода существенно зависит от частоты и длины провода. Для единичного провода на частотах более 100 кГц поле вращается на десятки-сотни градусов. Полевые эксперимент показывают, что одновременная работа двух генераторов с перпендикулярными антеннами и идентичными частотами создает самовращающееся поле. На частотах ниже 10 кГц более практично использовать небольшой сдвиг по частоте между генераторами порядка 0.02%, что приводит к значительному ускорению вращения поля. Такой подход снижает время измерения в тензорном варианте метода РМТ-К как минимум вдвое. Рассмотренные варианты создания «вращающегося» поля (использование одной генераторной линии и двух генераторных линий, работающих на одинаковой частоте или с небольшим сдвигом по частоте) позволяют получать результаты, аналогичные результатам, получаемым в подходе к измерениям в тензорном варианте на основе последовательного включения двух источников и обработки данных как единого измерения.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (номер проекта 21-47-04401).

ЛИТЕРАТУРА

- Вешев АВ, 1980 Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. 2е изд., Л: Недра.
- Егорова ЛВ, Сапожников БГ, 1981 Алгоритм расчета поля заземленного и незаземленного кабеля, расположенного на поверхности двуслойной среды. Методы разведочной геофизика. Теория и практика интерпретации в рудной геофизике. с 18-28.

Сараев АК, Симаков АЕ, Шлыков АА, 2014 Метод

радиоманнитотеллурических зондирований с контролируемым источником. Геофизика, № 1, с 18-25.

Семенов ВЮ, 1985 Обработки данных магнитотеллурического зондирования. М: Недра.

Шлыков АА, Сараев АК. 2014, Волновые эффекты в поле высокочастотного горизонтального электрического диполя. Физика Земли, №2, с 100-113.

Bastani V, 2001 EnvoriMT – a new controlled-source / radiomagnetotelluric system. PhD thesis, University of Uppsala, Uppsala

Wannamaker PhE, 1997. Tensor CSAMT survey over the Sulphur Sprins thermal area, Valles Caldera, New Mexico, U.S.A., Part I: Implcations for structure of the western caldera. Geophysics, №2, p 451-465.

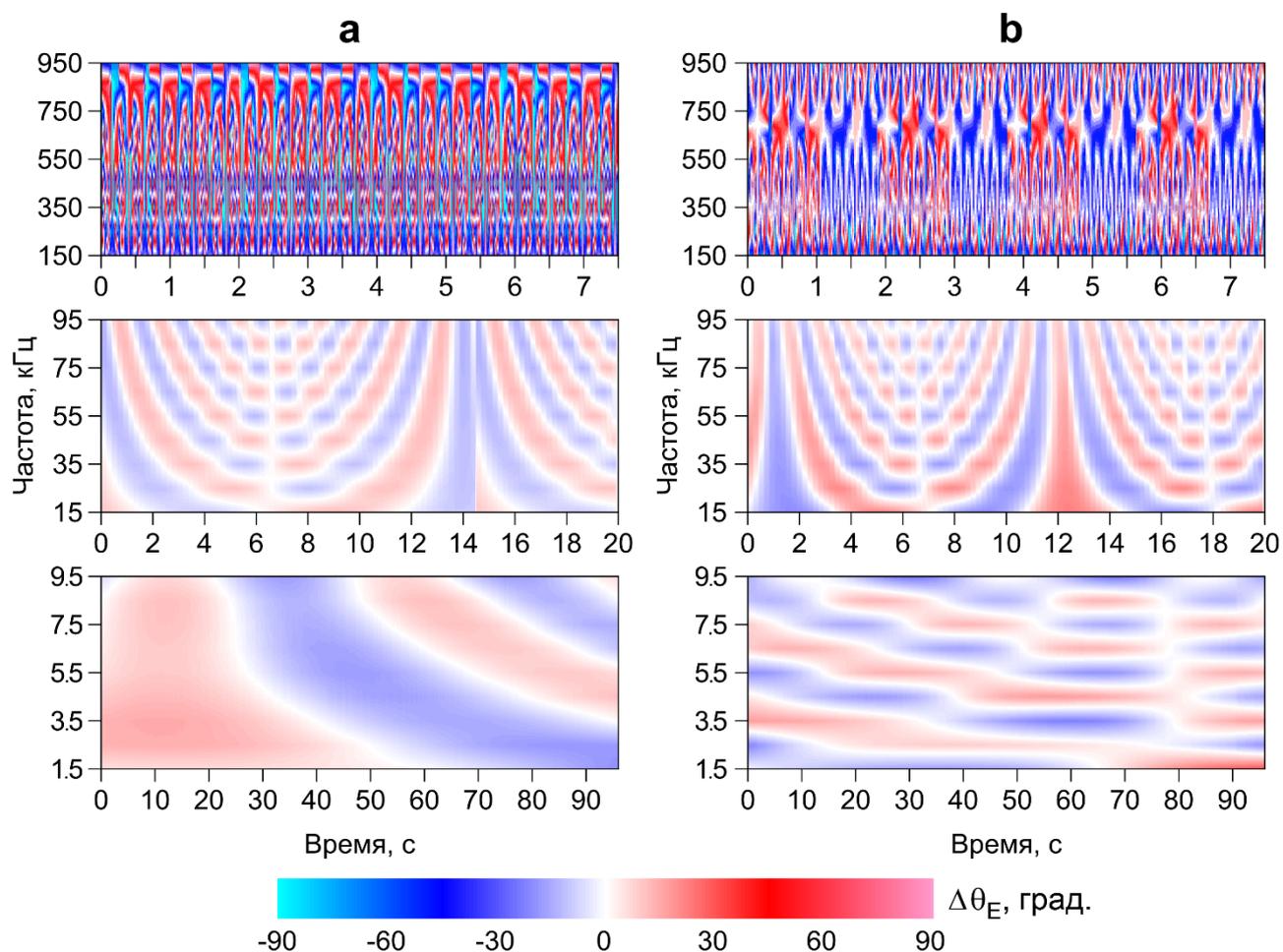


Рисунок 4. Измеренный динамический спектр угла ориентации эллипса поляризации горизонтального электрического поля относительно среднего его направления на конкретной частоте для одинаковых частот в генераторных линиях. **a** – генераторные линии длиной 200 м, **b** – генераторные линии длиной 600 м. На каждом из двух генераторов заданы идентичные частоты.

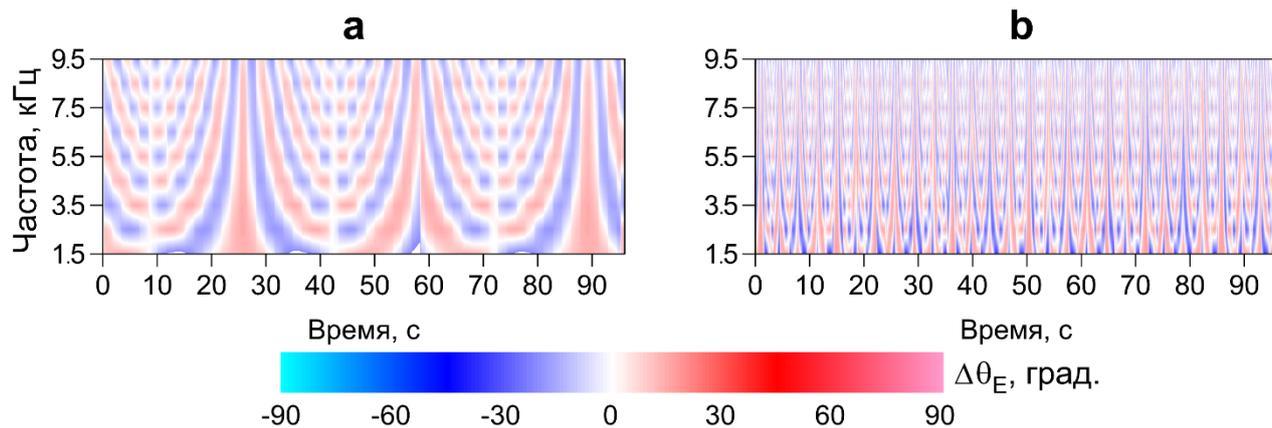


Рисунок 5. Измеренный динамический спектр угла ориентации эллипса поляризации горизонтального электрического поля относительно среднего его направления на конкретной частоте для частот с незначительным сдвигом частот в разных генераторных линиях. **a** – генераторные линии длиной 200 м, **b** – генераторные линии длиной 600 м. На первом генераторе задана частота 0.5 кГц, на втором 0.5001 кГц.