

УДК 550.837.9

МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДА ПОИСКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ ПО ФАЗОВОМУ ПАРАМЕТРУ

© 2016 А.И. Сарвартинов, О.Л. Сокол-Кутыловский, Д.С. Тягунов

*Федеральное государственное учреждение науки
Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН,
Екатеринбург, 620016; e-mail: authur82@mail.ru*

В статье рассмотрена возможность повышения точности определения фазового угла в методах поиска электромагнитных аномалий геологических объектов по фазовому параметру. Показано, что при синхронизации с помощью GPS-приемников, при накоплении измеряемого сигнала, а также при выделении сигналов основной частоты и ряда ее нечетных гармоник с помощью дискретного преобразования Фурье, можно получить относительную точность определения фазового угла в пределах $\pm 0.003^\circ$ в диапазоне частот от 1 Гц до 360 Гц. При этом был применен широкополосный приемник магнитной индукции с предельно низким уровнем шума.

Ключевые слова: фазовые измерения, синхронизация сигналов, поиск электромагнитных аномалий.

ВВЕДЕНИЕ

Под фазовым параметром понимается фазовый угол, определяемый, как арктангенс отношения амплитуды вторичного магнитного поля, создаваемого геологическим объектом в данной точке измерения, к амплитуде первичного магнитного поля возбуждения. Методы поиска электромагнитных аномалий по фазовому параметру используются в разведочной геофизике со второй половины прошлого века, однако прямое измерение фазового сдвига до сих пор применяют преимущественно в дополнение к другим методам электроразведки. Причинами тому является относительно малый динамический диапазон изменения фазового угла на реальных геологических объектах и низкая точность его определения. По данным (Куликов, 1974) в редких случаях фазовые аномалии достигают $3-4^\circ$ в методе индукционной фазовой электроразведки (ИНФАЗ) на оптимальной частоте 5 Гц, а по данным (Гуревич и др., 1974; Жильников, Куликов, 1974) и в фазовых измерениях методом вызванной поляризации (ВП) на переменном токе, но на большинстве известных месторождений фазовые аномалии не превышают 1° . Из-за малой величины измеряемого фазового угла разрешающую способность фазовых методов электроразведки можно увеличить лишь путем снижения погреш-

ности определения разности фаз. Аппаратурная точность измерения разности фаз оценивается величиной от $\pm 0.05^\circ$ до $\pm 0.02^\circ$ в зависимости от применяемой аппаратуры, но долговременная точность в полевых условиях вряд ли может быть лучше $\pm 0.1^\circ$. Как сообщает В.Д. Жильников (1983) для эффективного применения фазового метода в электроразведке необходимо обеспечить точность определения фазового угла не хуже $\pm 0.01^\circ$.

Для получения точности фазовых измерений на уровне $\pm 0.01^\circ$ необходимо решить ряд технических проблем, связанных с дистанционной синхронизацией сигналов, с порогом чувствительности и стабильностью фазовой характеристики приемника электромагнитного сигнала, с устойчивостью метода измерений к внешним техногенным электромагнитным помехам, а также со снижением температурного и временного дрейфа элементов измерительной аппаратуры и генератора тока возбуждения.

РАСЧЕТ ФАЗОВОГО СДВИГА

Для измерения фазового сдвига сигналов низких частот используют различные методы, например, измерение временной задержки между фронтами измерительного и опорного сигналов прямоугольной формы. Импульсные электромагнитные помехи, воздействующие на сигнал в

измерительном канале, приводят к значительной ошибке в определении разности фаз сигналов, определяемой по задержке фронтов импульсов.

Для повышения точности определения фазового сдвига между прямоугольными сигналами низкой частоты нами был использован способ расчета фазового сдвига с накоплением заданного количества периодов сигнала и применением быстрого преобразования Фурье с целью восстановления сигналов основной частоты и ряда ее нечетных гармоник. Фазовый сдвиг определялся следующим образом. Сигнал электромагнитного поля заданной частоты и опорный сигнал от генератора возбуждения оцифровывался с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в течение нескольких десятков периодов частоты возбуждения, записывался на компьютер и раскладывался по частотам при помощи дискретного преобразования Фурье. Затем амплитуды опорного сигнала и сигнала основной частоты возбуждения комплексно делились друг на друга. Из отношения действительной и мнимой частей комплексного числа получался тангенс фазового угла между сигналом измеряемого магнитного поля и опорным сигналом основной частоты возбуждения, после чего вычислялась величина угла фазового сдвига. Таким же образом определялся сдвиг фаз на нечетных гармониках частоты возбуждения.

Анализ частотной зависимости фазового сдвига позволяет получить дополнительную информацию о расположении электромагнитной аномалии, что способствует более точному определению глубины и характеристик геологического объекта.

При накоплении большого числа периодов сигнала достигается увеличение отношения сигнала к шуму, что повышает точность определения фазового сдвига. Определение фазового сдвига на основной частоте возбуждения (и/или ее нечетных гармониках) увеличивает помехозащищенность метода определения фазового сдвига, особенно при слабом сигнале и при высоком уровне внешних электромагнитных помех.

Предварительная программная обработка результатов измерений, направленная на исключение воздействия случайных импульсных помех, повышает достоверность фазовых измерений в сложной внешней электромагнитной обстановке.

СИНХРОНИЗАЦИЯ СИГНАЛОВ

Практически идеальная синхронизация в фазовых методах измерения получается при связи генератора с приемником сигнала по проводам, но на практике полевых работ с большими токовыми петлями, когда расстояние между

генератором и приемником сигнала исчисляется сотнями метров и более, такой метод не применим. В таком случае для синхронизации обычно используют радиоканал, по которому передаются синхронизирующие сигналы в виде амплитуды тока возбуждения, модулирующей несущую частоту радиоволн, или в виде коротких импульсов, соответствующих переднему и заднему фронтам амплитуды тока в петле возбуждения. Метод синхронизации сигналов по радиоканалу достаточно хорошо работает в пределах прямой видимости излучателя и приемника в отсутствие вблизи трассы прохождения радиоволн отражающих объектов и поверхностей. Однако на пересеченной холмистой местности, в лесном массиве, вблизи зданий, сооружений и линий электропередач, а также при наличии значительных электромагнитных помех синхронизация сигналов по радиоканалу нередко дает сбой.

С появлением GPS-приемников с программируемой частотой выходного сигнала появилась возможность достаточно просто организовать дистанционную высокоточную синхронизацию сигналов любой заданной частоты. Один из методов GPS синхронизации может быть осуществлен следующим образом: первый GPS-приемник с предварительно запрограммированной частотой управляет амплитудой тока в петле возбуждения, а сигнал второго GPS-приемника с такой же запрограммированной частотой подается на опорный вход 24-х разрядного АЦП, на измерительный вход которого поступает сигнал от датчика магнитной индукции.

При сравнении разности фаз, вносимой GPS-приемниками Ublox LEA-6T, выяснилось, что их погрешность измерения разности фаз находится в пределах $0.001-0.002^\circ$, в зависимости от условий приема сигнала этими GPS-приемниками. Разброс разности фаз двух сигналов в 24-х разрядном АЦП AD7734 в диапазоне частот от 1 Гц до 360 Гц находится в пределах $0.001-0.002^\circ$. То есть суммарная погрешность GPS-приемников и АЦП может достигать 0.004° и зависит от условий приема GPS-сигнала. Антенны GPS-приемников, по мере возможности, должны располагаться на открытом пространстве для осуществления прямого прохождения сигнала от ближайших спутников, следует также избегать расположения GPS-приемников вблизи от металлических поверхностей, так как в этом случае кроме прямого сигнала на GPS-приемники попадает отраженный сигнал.

Внешние электромагнитные шумы вносят существенный дополнительный вклад в погрешность определения фазы, особенно при относительно малом отношении сигнала к шуму. Поэтому, для сохранения приемлемой точности

измерений, при интенсивных электромагнитных помехах приходится увеличивать силу электрического тока в петле и время накопления сигналов.

ДАТЧИК МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

До настоящего времени в индукционных фазовых методах в качестве приемника сигнала применялись различные индукционные датчики (индукционные катушки с ферромагнитным сердечником или индукционные рамочные антенны). Однако индукционные датчики имеют нелинейную амплитудно-частотную характеристику и чувствительны к импульсным электромагнитным помехам, что для фазовых измерений нежелательно. Кроме того, на низких частотах, которые применяются в электроразведке, индукционные петли и датчики имеют большие размеры, что затрудняет их эффективное применение. По порогу чувствительности на низких частотах к индукционным датчикам приближаются сверхпроводящие квантовые интерференционные датчики — СКВИД, однако они дороги в эксплуатации и в геофизике широко не используются, так как работают только при температуре жидкого гелия. Появившиеся недавно СКВИД на высокотемпературной сверхпроводящей керамике, работающие при температуре жидкого азота, по своим параметрам приближаются к низкотемпературным СКВИД, однако измерительные устройства на их базе еще находятся в стадии исследований.

В качестве магнитного приемника нами был применен магнитомодуляционный датчик магнитной индукции с сердечником из аморфного ферромагнитного сплава с компенсированной продольной магнитострикцией, работающий в режиме автопараметрического усиления (Сокол-Кутыловский, 2009). Длина собственно датчика составляет около 60 мм при диаметре 15 мм.

На рис. 1 показано, что амплитуда широкополосного шума геомагнитного поля, если исключить отдельные импульсы, возникшие по причине внешних электромагнитных помех, находилась в пределах 0.3–0.4 нТл.

Так как спектр геомагнитного шума приведенной на рис. 1 записи в диапазоне частот до 30 Гц содержит сумму геомагнитного и собственного шумов (рис. 2), то собственный магнитный шум магнитомодуляционного датчика должен быть еще меньше.

Магнитомодуляционный датчик, примененный в фазовом методе электроразведки, работает в широком диапазоне температур (от -20°C до $+60^{\circ}\text{C}$), имеет плоскую амплитудно-частотную характеристику в диапазоне частот (от 1 Гц до 1 кГц) и достаточно низкий порог чувствитель-

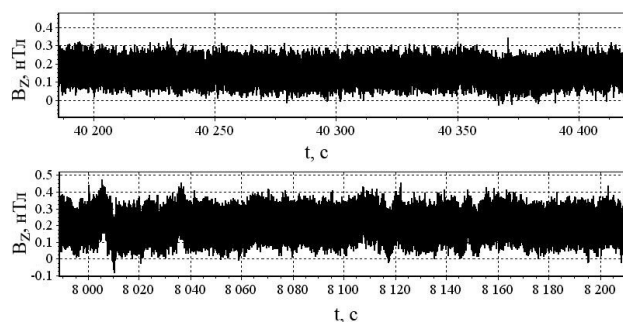


Рис. 1. Фрагменты ночной и дневной 16-ти часовой записи вертикальной составляющей магнитной индукции, зарегистрированные магнитомодуляционным датчиком в относительно спокойном геомагнитном поле (длина записи соответствует ~ 7250000 отсчетов АЦП).

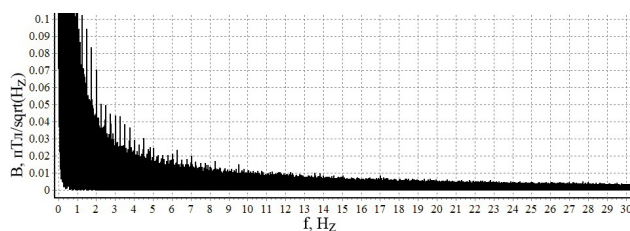


Рис. 2. Зависимость средней амплитуды геомагнитного шума от частоты, полученная при помощи магнитомодуляционного датчика. Средняя амплитуда вертикальной составляющей геомагнитного шума в полосе пропускания 1 Гц на частоте 1 Гц соответствует $\sim 10^{-13}$ Тл·Гц $^{-1/2}$, на частоте 10 Гц — $4 \cdot 10^{-14}$ Тл·Гц $^{-1/2}$, а на частоте 30 Гц снижается до $2 \cdot 10^{-14}$ Тл·Гц $^{-1/2}$.

ности, не хуже 10^{-12} Тл на частотах выше 1 Гц. Динамический диапазон измерения магнитной индукции ± 5000 нТл. Так как амплитудно-частотная характеристика магнитомодуляционного датчика в диапазоне измеряемых частот плоская, он практически не вносит дополнительной погрешности в измеряемый фазовый сдвиг.

При использовании магнитомодуляционного преобразователя в фазовых измерениях на его выходе был включен фильтр высоких частот с частотой среза ~ 0.2 Гц. Это было сделано для исключения возможного температурного и временного дрейфа постоянной составляющей выходного сигнала магнитомодуляционного преобразователя.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФАЗОВОГО МЕТОДА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ИЗМЕРЕНИЯ

Для надежного долговременного определения фазового сдвига с заданной точностью ($\pm 0.01^{\circ}$) необходимо обеспечить отношение сигнала к шуму более 10. Так как типичная амплитуда геомагнитного шума в широкой полосе частот 0.3–0.5 нТл, то магнитное поле внутри токовой петли должно быть не менее 5 нТл при накоплении 100 или чуть более периодов изме-

ряемого сигнала. Такое магнитное поле может быть легко создано в квадратной токовой петле из геофизического медного провода ГППП с длиной стороны до 400 м при амплитуде электрического тока около 20 А при питании генератора напряжением 24 В.

По данным (Сокол-Кутыловский, Сарвартинов, 2014) при работе на месторождениях, расположенных вдали от источников интенсивного электромагнитного шума, например, на Светлореченском рудопроявлении (рис. 3), находящемся около г. Полевской Свердловской области, увеличивать силу электрического тока в петле или время накопления сигналов не потребовалось.

При работе в условиях интенсивных электромагнитных помех возникает необходимость в увеличении силы электрического тока в петле и времени накопления сигнала в каждой точке измерения, чтобы по возможности приблизиться к необходимому отношению сигнала к шуму.

Петля располагалась над Чусовским месторождением медного колчедана (рис. 3). Так как над этим месторождением проходит высоковольтная линия электропередач (ЛЭП), основным шумом в записи является помеха с частотой 50 Гц, амплитуда которой достигает 110 нТл при задаваемом магнитном поле в данной точке петли около 560 нТл (рис. 4).

Для надежного получения необходимой точности измерения фазы в данном случае необходимо увеличить в два или более раз амплитуду тока возбуждения или увеличить время накопления сигнала в четыре или более раз. В некоторых точках измерения над Чусовским месторождением, где провода ЛЭП проходят наиболее близко, амплитуда сигнала превышает амплитуду всего в 1.5–2 раза.

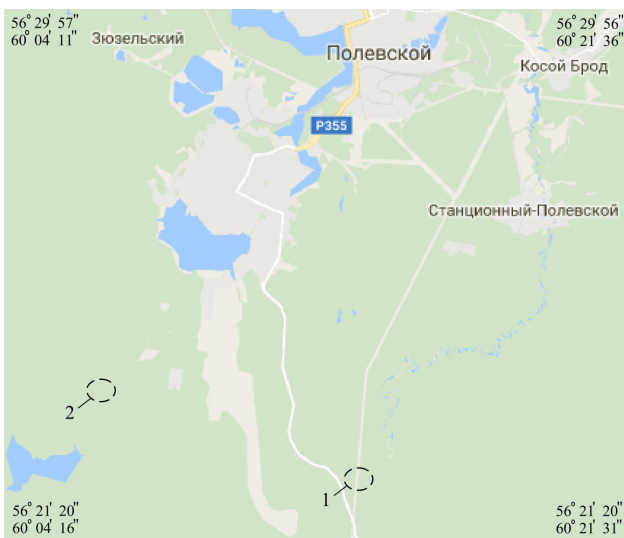


Рис. 3. Карта с указанием места проведения полевых работ: 1 — Чусовское месторождение медного колчедана; 2 — Светлореченское рудопроявление медного колчедана.

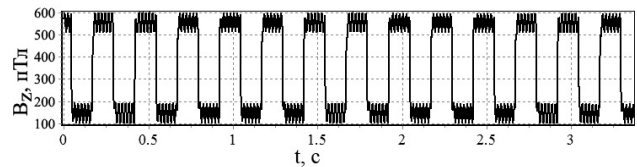


Рис. 4. Фрагмент записи амплитуды сигнала частотой 4 Гц в токовой петле площадью 100000 м² с шумом от ЛЭП на одной из точек Чусовского месторождения медного колчедана.

В подобных случаях иногда удается снизить погрешность измерения фазового сдвига до необходимого уровня с помощью применения робастной программной обработки массива накопленных сигналов.

ВЫВОДЫ

Использование GPS-синхронизации сигналов, 24-х разрядного АЦП и широкополосного приемника магнитной индукции, а также программная обработка накопленного массива измеренных сигналов, позволяют снизить погрешность определения фазового сдвига сигналов низких частот в комплексе аппаратуры, применяемой в электроразведке для поиска электромагнитных аномалий по фазовому параметру. Проведены полевые испытания рабочей макета аппаратуры для электроразведки по фазовому параметру на нескольких геологических объектах. Полученные предварительные результаты измерений, при обеспечении достаточно высокого отношения измеряемого сигнала к шуму, позволяют получить на низких частотах (от 1 Гц до 360 Гц) в широком диапазоне температур долговременную фазовую погрешность в пределах $\pm 0.005^\circ$ при аппаратурной погрешности не более $\pm 0.003^\circ$.

Список литературы

- Куликов А.В.* Состояние и пути применения индуктивного инфразвукового фазового метода. Сер. 9, Разведочная и промышленная геофизика. М.: ВИЭМС, 1974. 36 с.
- Гуревич Ю.М., Кононенко И.И., Родионов П.Ф., Человечков А.И.* Результаты фазовых измерений методом вызванной поляризации на переменном токе в условиях Урала // Методы изучения поляризации горных пород переменным током. Свердловск: изд-во УНЦ АН СССР, 1974. С. 92–97.
- Жильников В.Д., Куликов А.В.* Аппаратура для высокоточных фазовых измерений в диапазоне инфразвуковых частот // Методы изучения поляризации горных пород переменным током. Свердловск: изд-во УНЦ АН СССР, 1974. С. 71–74.

Жильников В.Д. Разработка методики и аппаратуры для измерения фазовых и амплитудных параметров электромагнитного поля при комплексных электроразведочных работах. Автореф. дисс. канд. тех. наук. Алма-Ата, 1983. 197 с.

Сокол-Кутыловский О.Л. Автопараметрический датчик магнитной индукции // Датчики и системы. 2009. № 1. С. 54–56.

Сокол-Кутыловский О.Л., Сарвартинов А.И. Инструментальная погрешность определения фазового угла между сигналами низкой частоты с накоплением и GPS-синхронизацией // Измерительная техника. 2014. № 1. С. 54–56.

EVOLUTION OF METHOD FOR SEARCHING OF ELECTROMAGNETIC ANOMALIES BY PHASE PARAMETER

A.I. Sarvartinov, O.L. Sokol-Kutylovsky, D.S. Tyagunov

Institute of Geophysics Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, 620016.

The article considers possibility of increase in accuracy of the phase angle determination in methods of search of electromagnetic anomalies in geological objects by phase parameter. It is shown that GPS synchronization and the accumulation of the measured signal accompanied by determination of the fundamental frequency and its odd harmonics using a fast Fourier transform allows relatively accurate determination of the phase angle within the range $\pm 0,003^\circ$ on the frequencies from 1 Hz to 360 Hz. The authors used the broadband sensor of magnetic induction with low level of noise.

Keywords: phase measurement, synchronization of signals, electromagnetic anomalies.