

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗЫ ГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА В КНЧ-СНЧ ДИАПАЗОНАХ

О.М. Лебедь, С.В. Пильгаев, Ю.В. Федоренко (*Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН*)

Аннотация. При экспериментальном исследовании искусственных и естественных сигналов КНЧ и СНЧ диапазонов необходимо измерять амплитуды и относительные фазы компонент электромагнитного поля на сети станций. Измерение фазы предусматривает точную синхронизацию данных с мировым временем. В работе представлена система сбора геофизических данных, позволяющая синхронизировать результаты измерений с мировым временем с микросекундной точностью. Предложены методы обработки записей компонент электромагнитного поля источника гармонического сигнала, полученных при помощи этой системы сбора.

Введение

Результаты наблюдений электрических и магнитных компонент сигналов на сети геофизических станций в диапазоне частот от десятых долей до нескольких сотен герц необходимы для изучения динамики магнитосферной и ионосферной плазмы, используются при электромагнитном зондировании земной коры и служат основой теоретических и экспериментальных исследований в задачах коммуникации и навигации. При проведении таких наблюдений исследователи, как правило, ограничиваются анализом поведения амплитуды и спектральной плотности мощности регистрируемых сигналов и изучением особенностей их поляризации в точках измерений. При этом не используется информация об относительных фазах сигналов, которая необходима как для записи и реконструкции волновых полей, так и для оценки скорости распространения сигналов на локальных трассах, определяемых местоположением регистрирующих станций. Поскольку эта скорость определяется состоянием ионосферы и геологическим строением земной коры, оценка ее величины дает возможность диагностики этих сред [2].

Амплитудные характеристики сигналов используются для анализа физических процессов довольно давно, и методы обработки данных с целью получения этих характеристик хорошо исследованы, в то время, как измерения относительных фаз и временных задержек сигналов на локальных трассах ранее в КНЧ-СНЧ диапазоне практически не велись, а методы обработки данных, учитывающие специфику помех в этом частотном диапазоне, не разработаны. Поэтому для успешной интерпретации данных наблюдений необходимо не только обеспечить высокоточную синхронизацию данных с мировым временем, но и разработать алгоритмы и программы для оценки значений относительных фаз сигналов и их доверительных интервалов.

Система сбора данных

После появления дешевых и малопотребляющих приемников GPS создание систем, позволяющих с высокой точностью синхронизировать измерения на станциях, заметно упростилось. Одной из последних разработок является регистратор ОНЧ сигналов, описанный, например, в [1]. Для синхронизации отсчетов данных, получаемых этим регистратором, с мировым временем, применена синхронизация задающего генератора аналого-цифрового преобразователя (АЦП) импульсами PPS, поступающими раз в секунду с приемника GPS [7]. Отметим, что такое техническое решение просто реализуется, но требует размещения приемника GPS вблизи от регистратора.

Измерения электромагнитных полей в диапазоне частот 0.3–300 Гц, как правило, проводятся в условиях сильных помех от линий электропередач и мощных электрических устройств. Для снижения уровня помех индукционные датчики и антенны для измерения электрического поля устанавливаются на удалении как минимум несколько сотен метров от обсерватории. При этом рекомендуется устанавливать АЦП в непосредственной близости к датчикам и передавать в обсерваторию нечувствительный к возможным наводкам цифровой сигнал. Для гальванической развязки датчиков и обсерватории желательно использовать оптоволокно и обеспечить аккумуляторное питание усилителей датчиков и АЦП. Очевидно, что трудно следовать этим рекомендациям при необходимости размещения GPS приемника вблизи датчиков.

В Полярном геофизическом институте КНЦ РАН разработана синхронизируемая с мировым временем система сбора геофизических данных [7, 8], удовлетворяющая приведенным выше рекомендациям помехоустойчивого приема. Главным ее отличием от известных систем является то, что в ней синхронизируется не АЦП, а поток данных, собранных в пакеты. Для этого используется синхронизирующее устройство, записывающее в приходящий после прохождения фронта секундного импульса GPS (PPS) пакет данных промежутки времени между фронтом импульса PPS и первым байтом

этого пакета [7]. Окончательная привязка отсчетов данных к мировому времени производится при помощи программно реализованной системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), при этом вместе с каждым отсчетом данных в файл записывается время этого отсчета. Такая программно-аппаратурная структура позволяет обеспечить малое потребление, возможность установки АЦП с гальванической развязкой в труднодоступных местах и передачу данных по симплексному каналу.

Применение удобной для полевых работ схемы, в которой синхронизируется не тактовая частота АЦП, а поток данных, влечет за собой некоторые трудности при обработке регистрируемых сигналов. Эти трудности, в частности, связаны с тем, что генератор тактовой частоты, входящий в состав АЦП и определяющий частоту дискретизации, не идеален. Изменение температуры и другие эффекты приводят к тому, что сигнал на выходе АЦП имеет медленно меняющуюся частоту дискретизации. Учитывая, что записи станций необходимо привести к стандартной частоте дискретизации, разработка преобразователя частоты дискретизации, который учтет ее медленное изменение и приведет к числу, удобному для дальнейшей обработки, является, несомненно, актуальной. Необходимость приведения частоты дискретизации к некоторой стандартной для всех станций частоте объясняется тем, что совместная обработка данных сети станций с целью нахождения разности фаз может вестись только при условии совпадения времен отсчетов данных. Главным требованием к преобразователю частоты дискретизации, используемому при получении геофизических данных, является сохранение высокой точности привязки отсчетов к мировому времени. Еще одно требование относится к интерполяции, выполняемой преобразователем. Она не должна ухудшить динамический диапазон применяемого АЦП, поэтому относительная ошибка интерполяции должна быть не более -100-120 дБ относительно мощности интерполируемого сигнала. Кроме этого, преобразователь должен работать в реальном времени, или, что то же самое, иметь возможность обработки сколь угодно длинных файлов.

Для решения поставленной задачи был разработан алгоритм и программный модуль, позволяющий переходить к новой произвольной частоте дискретизации даже в том случае, если исходная частота дискретизации медленно меняется. При этом отсчеты полученного сигнала точно привязаны ко времени и разделены заданными временными интервалами. Программный модуль производит передискретизацию входной последовательности отсчетов путем увеличения исходной частоты дискретизации на фактор от 4 до 256 и интерполяции полученной последовательности для получения отсчетов с требуемой частотой дискретизации. Допускается как линейная, так и интерполяция полиномами третьей и пятой степеней. Программный модуль может быть применен для передискретизации последовательностей сколь угодно большой длины, и, следовательно, может обрабатывать данные в реальном масштабе времени.

Проверка работы системы сбора данных

Для проверки работы описываемой системы сбора данных в реальных условиях две функционирующие системы сбора, установленные в обл. Ловозеро, были отсоединены от датчиков. На входы АЦП обеих систем был подан сигнал низкочастотного прецизионного генератора Г3122 с частотой 197 Гц. Рассчитывалась разность фаз между сигналами, зарегистрированными этими системами сбора. При идеальной работе систем синхронизации и достаточно большом отношении сигнал/шум эта разность фаз должна быть равной нулю. Однако, сразу после включения, наблюдаются осцилляции разности фаз с максимальным отклонением от среднего значения, не превышающие 0.1° при частоте сигнала 197 Гц. Эти осцилляции могут быть связаны с процессом установлением стационарного значения температуры задающего генератора АЦП, которые у разных АЦП протекают по-разному. Через 200 секунд осцилляции закончились, и разность фаз стала вести себя подобно стационарному случайному процессу со среднеквадратичным отклонением около 0.012° . Данный эксперимент показывает, что в условиях реального размещения АЦП и синхронизатора выполняется заявленное ранее требование к точности измерения разности фаз системой сбора.

Оценка амплитуды и фазы гармонического сигнала

В задачах электромагнитного зондирования, как правило, применяются источники гармонического сигнала. При анализе таких сигналов наличие времени в каждом отсчете данных, полученных при помощи рассматриваемой системы, позволяет вычислять амплитуду A и фазу j_0 сигнала на каждой станции оптимальным методом [3, 6]. При наличии случайного шума результаты измерений амплитуды и начальной фазы являются случайными величинами. В этом случае невозможно определить истинное значение измеряемой величины, но можно указать интервал, называемый доверительным интервалом, в который истинное значение измеряемой величины попадает с заданной вероятностью, называемой доверительной вероятностью. Для оценки доверительного интервала нужно знать плотность распределения вероятности измеряемой величины. В случае гауссова шума плотность распределения оценок A и j_0 известна и доверительные интервалы могут быть вычислены аналитически. При произвольной плотности распределения шума единственным способом получения доверительных интервалов является их оценка по

имеющимся данным. Такая оценка будет статистически достоверной только при наличии достаточного числа независимых реализаций шума. В нашем случае спектральная плотность шума практически не изменяется с частотой в небольшой окрестности частоты сигнала, поэтому разумно предположить, что в этой окрестности статистические свойства шума неизменны и необходимый для расчета доверительных интервалов ансамбль реализаций шума может быть извлечен из той же записи, что и сам сигнал. Это предположение в нашем случае является вполне обоснованным, так как спектральная плотность шума, обусловленная геомагнитными возмущениями, с частотой изменяется плавно, а импульсная помеха, обусловленная удаленными молниевыми разрядами (атмосфериками), также является широкополосной. Предложенный метод расчета доверительных интервалов был успешно испытан численно на реализациях, полученных при помощи программного генератора шума.

Измерение разности фаз в пространственно разнесенных точках

За последние годы опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры показал, что применение мощных передатчиков СНЧ-диапазона открывает большие перспективы таких исследований. В [9] описан эксперимент по глубинному зондированию земной коры с использованием установки, расположенной на северо-западе Кольского полуострова, представляющей собой две параллельные СНЧ-антенны. В ходе эксперимента регистрировался сигнал на юго-западе Финляндии. По данным регистрации этого сигнала были определены значения кажущихся сопротивлений.

Сигнал данной СНЧ-установки можно часто увидеть на данных патрульных измерений электрического и магнитного полей, проводимых в обл. Ловозеро. 10 и 14 ноября 2008 года были проведены 4 сеанса измерений Н-компоненты магнитного поля в окрестности г. Апатиты. Одна измерительная система устанавливалась на опорной точке и не передвигалась. При помощи другой мобильной системы производились измерения в различных точках в окрестности г. Апатиты и оценивался сдвиг фазы сигнала СНЧ-передатчика относительно опорной точки. Первое измерение проводилось двумя системами в одной точке с целью измерения разности фаз, вносимой датчиками.

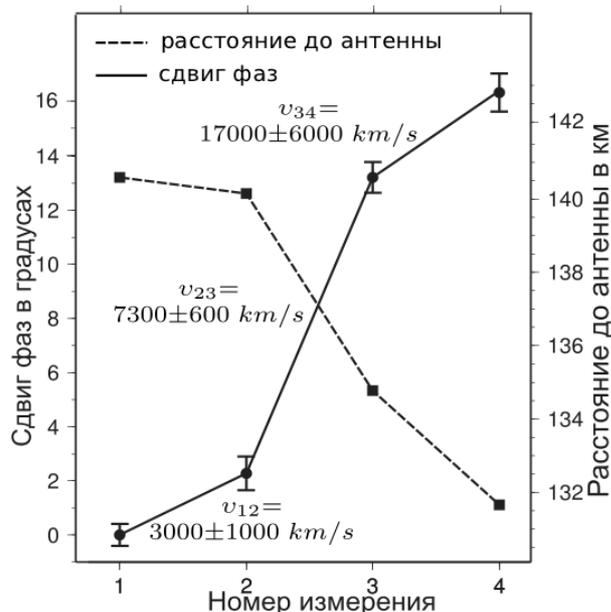


Рис. 1. Кружки – сдвиг фаз с 95%-ми доверительными интервалами, квадраты – расстояния от мобильной системы до центра антенны передатчика.

На рис. 1 приведена разность фаз сигнала СНЧ-передатчика относительно опорной точки с доверительными интервалами и расстояния от точек наблюдений до центра антенны передатчика. Из рисунка следует, что перемещение мобильной системы примерно на 600 м ближе к источнику (измерение 2) вызвало сдвиг фаз около 2°. Отсутствие перекрытия доверительных интервалов свидетельствует о его статистической значимости. Перемещение на 6 км ближе к источнику (измерение 3) привело к сдвигу фаз на 13°. Расчет фазовых скоростей распространения сигнала дает значения от 3000 км/с до 17000 км/с, которые значительно меньше скорости света, что, по-видимому, обусловлено достаточно малым удельным сопротивлением земной коры. Считая верхний слой земной коры однородным с магнитной проницаемостью $\mu = 1$ и удельным сопротивлением Γ , оценим значение Γ по измеренным фазовым скоростям. Вследствие того, что измеренные фазовые скорости распространения сигнала в земной коре меньше скорости света в свободном пространстве более чем на два порядка, можно предположить, что удельное

сопротивление среды мало и можно воспользоваться приближенной формулой для фазовой скорости $n = \sqrt{4\pi f_0 r / m_0}$, справедливой при $1/(2\pi f_0 \epsilon \epsilon_0 r) \gg 1$. Расчет по этой формуле дает $1.1 \cdot 10^4$, $6.5 \cdot 10^4$ и $3.5 \cdot 10^5$ Ом·м – удельные сопротивления для различных участков измерений (между точками 1-2, 2-3 и 3-4, соответственно).

Данный эксперимент продемонстрировал разрешающую способность предложенной здесь системы сбора и методов обработки данных. Показано, что с ее помощью в условиях Кольского полуострова мы можем зарегистрировать значимые различия значений разности фаз даже на расстояниях около 1 км, что дает возможность применения этой системы в задачах электромагнитного зондирования. Оценки проводимости земной коры по результатам измерений разности фаз сигнала СНЧ-передатчика в пространственно разнесенных точках дали величины, согласующиеся со средним значением проводимости $r \approx 10^4$ Ом·м, полученным в [4, 5] прямыми измерениями.

Заключение

Задача определения относительных фаз сигналов на локальной трассе в КНЧ-СНЧ диапазонах, несомненно, является актуальной. Решить эту задачу позволяет система сбора данных, дающая высокую точность привязки отсчетов к мировому времени. Созданная в ПГИ система сбора позволяет синхронизировать данные с точностью до 1 мкс. Она является универсальной системой модульного типа и с успехом эксплуатируется в obs. Ловозеро и obs. Баренцбург с 2005 г. Несмотря на низкую стоимость входящих в ее состав GPS, за счет программного обеспечения удалось обеспечить высокое качество регистрируемых характеристик и добиться столь высокой точности синхронизации. Как было показано в данной работе, полученной точности хватает для статистически достоверной регистрации сдвига фаз станций, разнесенных на расстояние менее 1 км. Приведенный в работе алгоритм оценки фазы гармонических сигналов является оптимальным для решения подобного рода задач. Также предложен алгоритм оценки доверительных интервалов для полученных оценок, использующий единственное предположение о неизменности статистических свойств шума в окрестности частоты сигнала. С помощью описанной здесь системы сбора данных измерена фазовая скорость распространения сигнала СНЧ-передатчика в земной коре и оценена ее проводимость в окрестности точек наблюдений. Полученные нами значения проводимости практически совпадают с результатами работ [4, 5], где показано, что среднее значение удельного сопротивления на Кольском полуострове $r \approx 10^4$ Ом·м. Таким образом, данная работа объединила в себе описание программно-аппаратурного комплекса для проведения измерений с высокой точностью синхронизации данных с мировым временем, интерпретации и обработки этих данных, а также экспериментальные результаты, полученные при помощи этого комплекса.

Список литературы

1. Cohen M.B., Inan U.S., Paschal E.W. Sensitive broadband ELF/VLF radio reception with the AWESOME instrument. IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing, Vol. 48, Issue 1, pp 3-17, 2010.
2. Füllekrug M., Fraser-Smith A. and Schlegel K. Global ionospheric D-layer height monitoring. Europhysics Letters, 59 (4), pp. 626-632 (2002).
3. Rauch L.L. On estimation the phase of a periodic waveform in additive Gaussian noise – part 1. DSN Progress Report 42-45, p. 152-164, 1978.
4. Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Токарев А.Д. и др. Глубинные электромагнитные исследования с применением мощных сверхнизкочастотных радиоустановок. // Известия РАН. Физика Земли. 1998, №8. С 3-32.
5. Жамалетдинов А.А. Нормальный электрический разрез кристаллического фундамента и его геотермическая интерпретация по данным МГД-зондирования на Кольском полуострове // Глубинные электромагнитные зондирования с применением импульсных МГД-генераторов. Апатиты, Кольск. фил. АН СССР, 1982. С. 35-46
6. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники, кн. 1, «Советское радио», 1966.
7. Пильгаев С.В., Ахметов О.И., Филатов М.В., Федоренко Ю.В.. Универсальное устройство синхронизации данных от GPS приемника. ПТЭ, 2008, № 3, с. 175-176.
8. Федоренко Ю.В., Пильгаев С.В., Филатов М.В., Ахметов О.И.. Прецизионный четырехканальный 22-разрядный аналого-цифровой преобразователь на основе AD7716. ПТЭ, 2009, № 4, с. 179-180.
9. Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Собчаков Л.А., Вешев А.В., Сарасев А.К. и др. Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ-диапазона // Доклады академии наук, 1994, том 338, № 1.