

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 53.087.92+523.31

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В КРАЙНЕ НИЗКИХ–СВЕРХНИЗКИХ ДИАПАЗОНАХ ЧАСТОТ

© 2012 г. О. М. Лебедь, С. В. Пильгаев, Ю. В. Федоренко

Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН

Россия, 184209, Мурманская обл., Апатиты, ул. Академгородок, 26а

E-mail: olgamihs@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.07.2011 г.

После доработки 29.09.2011 г.

При экспериментальном исследовании искусственных и естественных сигналов крайне низкочастотных (к.н.ч.) и сверхнизкочастотных (с.н.ч.) диапазонов необходимо измерять амплитуды и относительные фазы компонент электромагнитного поля на сети станций. Измерение фазы предусматривает точную синхронизацию данных с мировым временем. В работе описана 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

Наблюдения 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. Результаты наблюдений 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 обычно не используется информация об относительных фазах сигналов, которая необходима как для 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 [1]. Отсюда следует, что для повышения информативности геофизических наблюдений компонент электромагнитного поля в крайне низкочастотном (к.н.ч.)–сверхнизкочастотном (с.н.ч.) диапазонах необходимо синхронизировать с микросекундной точностью данные, получаемые на станциях.

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 в к.н.ч.–с.н.ч.-диапазонах ранее практически не проводились, а методы обработки данных, учитывающие специфику помех в этом частотном диапазоне, не разработаны. Поэтому для успешной интерпретации данных необходимо не только обеспечить их высокоточную синхронизацию 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 экономичных приемников GPS создание систем, позволяющих с высокой точностью синхронизировать измерения на станциях, заметно упростилось. Одной из последних разработок является регистратор особонизкочастотных (о.н.ч.) сигналов, описанный, например, в [2]. Он первоначально был использован для восстановления пространственной структуры модуляционных токов в экспериментах по нагреву ионосферы мощным коротковолновым (к.в.) сигналом, проводимых на стенде НААРП [3], а позднее – как интерферометрический о.н.ч.-регистратор широкого назначения. Для синхронизации отсчетов данных, получаемых этим регистратором, с мировым временем применена синхронизация задающего генератора

аналого-цифрового преобразователя (а.ц.п.) импульсами PPS, поступающими раз в секунду с приемника GPS [4]. Отметим, что такое техническое решение реализуется просто, но требует размещения приемника GPS вблизи 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 нескольких сотен метров от обсерватории. На таких расстояниях использование аналоговых линий для передачи выходных напряжений датчиков к установленному в обсерватории синхронизируемому а.ц.п. может привести к повышению уровня помех вследствие наводок на аналоговые линии. Для устранения таких наводок рекомендуется устанавливать а.ц.п. в непосредственной близости к датчикам [5] и передавать в обсерваторию нечувствительный к наводкам цифровой сигнал. Для гальванической развязки датчиков и обсерватории желательно использовать оптоволокно и обеспечить аккумуляторное питание усилителей датчиков и а.ц.п. Очевидно, что трудно следовать этим рекомендациям при необходимости размещения GPS-приемника вблизи датчиков. Иногда просто невозможно установить GPS рядом с а.ц.п., например, при размещении датчиков вместе с а.ц.п. в подвалах зданий, шахтах или в густом лесу.

В Полярном геофизическом институте КНЦ РАН разработана синхронизируемая с мировым временем система сбора геофизических данных [4, 6], удовлетворяющая приведенным выше рекомендациям по обеспечению помехоустойчивого приема. Главным ее отличием от других систем является то, что в ней синхронизируется не а.ц.п., 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 [4]. Окончательная привязка отсчетов данных к мировому времени осуществляется при помощи программно реализованной системы фазовой автоподстройки частоты (ф.а.п.ч.), при этом вместе с каждым отсчетом данных в файл записывается время этого отсчета.

Такая программно-аппаратурная структура позволяет обеспечить малое энергопотребление, возможность установки а.ц.п. с гальванической развязкой в труднодоступных местах и передачу данных по симплексному каналу. Описываемая система сбора содержит четырехканальный а.ц.п. [6] как наиболее востребованный при геофизических из-

мерениях. Как правило, три канала используются для оцифровки трехкомпонентных данных, а один канал — резервный или используется при калибровке датчиков. Следует подчеркнуть, что преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму происходит одновременно во всех измерительных каналах [6], чтобы избежать сдвига фаз между каналами, который может появиться, если использовать а.ц.п. с коммутатором каналов.

Производителями GPS заявлена точность привязки фронта PPS к началу секунды мирового времени 100 нс. Измерение времени формирования отсчета данных по фронту импульса GPS при заявленной точности производится с ошибкой, величина которой приемлема для большинства приложений. Однако, как показал наш опыт, фронт секундного импульса недорогого GPS в силу тех или иных причин иногда отклоняется от начала секунды мирового времени на несколько единиц или даже десятков микросекунд.

Такие отклонения носят временный характер и возникают редко, но при их появлении ошибка при прямой привязке отсчетов данных к импульсу PPS будет неприемлемой и может повлечь непредсказуемые эффекты при анализе данных. Для решения проблемы можно было бы, например, воспользоваться термостатированными GPS, но это привело бы к значительному удорожанию системы, а также повышению энергопотребления, что в нашем случае неприемлемо. Поэтому необходимо привлечь сглаживающие алгоритмы, дающие возможность сохранять истинное время формирования отсчета данных при случайных отклонениях фронта импульса PPS от начала секунды мирового времени.

ПРОГРАММА СИНХРОНИЗАЦИИ С UTC

Оптимальным методом, позволяющим при случайных отклонениях фронта импульса PPS от начала секунды мирового времени сохранить истинное время, является программная коррекция данных, получаемых системой сбора. Для этой цели наиболее часто применяется автоподстройка частоты. В описываемой системе сбора синхронизация отсчетов данных с всемирным координированным временем UTC (Coordinated Universal Time) производится при помощи программно реализованной системы ф.а.п.ч. [7]. Полоса пропускания ф.а.п.ч. выбирается равной 20 мГц при запуске системы и постепенно доводится до 1 мГц, обеспечивая тем самым малое время входа в синхронизм и надежное сглаживание ошибок времени PPS в стандартном режиме.

Для оценки ошибки синхронизации в течение шести суток проводилась оценка плотности распределения ошибки предсказания времени нача-

ла кадра, непосредственно следующего за импульсом PPS. Было получено, что более 99% секундных отсчетов, обеспечиваемых системой автоподстройки, лежит в пределах 1 мкс относительно импульса PPS. Это говорит о том, что использование описываемой системы сбора надежно обеспечивает привязку данных к мировому времени с микросекундной точностью.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ДИСКРЕТИЗАЦИИ

Применение удобной для полевых работ схемы, в которой синхронизируется не тактовая частота а.ц.п., 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 а.ц.п. и определяющий частоту дискретизации, не идеален. Изменение температуры и другие эффекты приводят к тому, что сигнал на выходе а.ц.п. имеет медленно меняющуюся частоту дискретизации.

Учитывая, что записи станций необходимо привести к стандартной частоте дискретизации, разработка преобразователя частоты дискретизации, который учтет медленное изменение частоты и приведет к значению, удобному для дальнейшей обработки, является, несомненно, актуальной. Основным 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 а.ц.п., поэтому относительная ошибка интерполяции должна быть не более $-(100-120)$ дБ относительно мощности интерполируемого сигнала. Кроме того, преобразователь должен работать в реальном времени или, что то же самое, иметь возможность обработки сколь угодно длинных файлов.

В литературе [8] описано несколько видов преобразователей частоты дискретизации. Самые простые из них позволяют повышать или понижать частоту дискретизации в целое число раз или изменять ее в дробное число раз, если отношение выходной частоты дискретизации к входной можно представить в виде рациональной дроби. Более сложным преобразователем частоты дискретизации является ASRC (асинхронный преобразователь частоты дискретизации) [9]. Алгоритм ASRC позволяет приводить произвольную по значению частоту дискретизации, даже если она медленно меняется, к требуемой постоянной частоте. К со-

жалению, стандартный алгоритм ASRC не сохраняет имеющуюся высокую точность привязки отсчетов к времени и, следовательно, в нашем случае не может быть использован. Ниже описывается алгоритм и программный модуль, осуществляющий преобразование частоты дискретизации и отвечающий вышеприведенным требованиям.

Входной сигнал преобразователя частоты дискретизации представляет собой запись последовательности отсчетов данных s_i с частотой дискретизации F и соответствующей ей последовательности времен t_i , где $i = 1, 2, \dots$. Отсчеты сигнала с требуемой частотой дискретизации F_{out} получаются из отсчетов входного сигнала при помощи интерполяции. Точность интерполяции зависит от частоты дискретизации: чем больше частота дискретизации, тем меньше интервал времени между отсчетами и выше точность интерполяции. Поэтому в первую очередь следует повысить частоту дискретизации в целое число раз N , исходя из компромисса между временем обработки и ошибкой последующей интерполяции. Для этого между отсчетами сигнала добавляют по $N - 1$ нулевых отсчетов и фильтруют полученный сигнал фильтром низких частот (ф.н.ч.) с частотой среза, равной $0.8F_{out}/2$. В результате фильтрации получатся отсчеты сигнала s_k , у которого частота дискретизации равна NF , а спектр не содержит частот выше новой частоты Найквиста $NF/2$. Выходной сигнал преобразователя частоты дискретизации также должен содержать отсчеты данных и времени. Отсчеты времени можно найти аналитически: $\tau_m = \tau_0 + m/F_{out}$, где $m = 1, 2, \dots$; τ_0 — начальное время. Отсчеты данных искомого сигнала S_m в моменты времени τ_m при линейной интерполяции определяются как

$$S_m = s_k + \frac{s_{k+1} - s_k}{t_{k+1} - t_k} (\tau_m - t_k),$$

где $t_k = t_i + k(t_{i+1} - t_i)/N$ — последовательность времен, образуемая после повышения частоты дискретизации до NF ; $k = 1, 2, \dots, (N - 1)$.

Описанный алгоритм позволяет 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.

На основе данного алгоритма был разработан программный модуль. Он осуществляет 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.

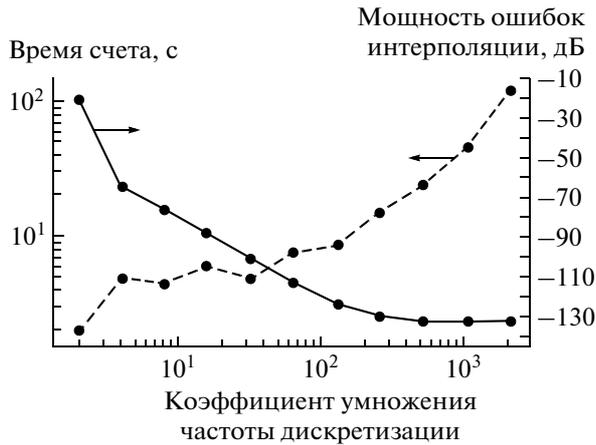


Рис. 1. Результаты испытаний программы преобразования частоты дискретизации. Оценка времени счета производилась на компьютере с процессором Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU E8500, 3.16 GHz.

Допускается как линейная интерполяция, 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 времени.

Работа программного модуля была испытана на программно заданных модельных реализациях. Гармонический сигнал $s(t_i) = \cos(2\pi f_s t_i)$ длительностью 1 ч с частотой $f_s = 40$ Гц, оцифрованный с частотой дискретизации 514.3 Гц, интерполировался для получения сигнала $s_{\text{int } p}(\tau_m)$ с частотой дискретизации 500 Гц. Значения отсчетов вычисля-

лись при помощи линейной интерполяции. Относительная ошибка интерполяции вычислялась как

$$E = 10 \log_{10} (P_{\text{err}} / P_{\text{sig}}),$$

$$\text{где } P_{\text{err}} = \sum_m (s_{\text{out}}(\tau_m) - \cos(2\pi f_s \tau_m))^2, \text{ а } P_{\text{sig}} = \sum_m \cos^2(2\pi f_s \tau_m).$$

Результаты испытаний программного модуля преобразования частоты дискретизации приведены на рис. 1. Согласно рисунку, ошибка интерполяции уменьшается до -120 дБ с увеличением коэффициента умножения частоты дискретизации K до значений 128–256, при этом время счета увеличивается примерно в 4 раза по сравнению с $K = 2$. Дальнейшее повышение частоты дискретизации перед интерполяцией не приводит к значимому уменьшению ошибки, а лишь увеличивает время счета. Отметим, что относительный уровень ошибок -120 дБ удовлетворяет самым строгим требованиям, предъявляемым к точности геофизических наблюдений.

ПРОВЕРКА РАБОТЫ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ

Для проверки работы описываемой системы сбора данных в реальных условиях две функционирующие системы сбора, установленные в обсерватории Ловозеро, были отсоединены от датчиков. На входы а.ц.п. обеих систем был подан сигнал низкочастотного прецизионного генератора Г3122 с частотой 197 Гц. Рассчитывалась разность фаз между сигналами, зарегистрированными этими системами сбора (рис. 2). При идеальной работе систем синхронизации и достаточно

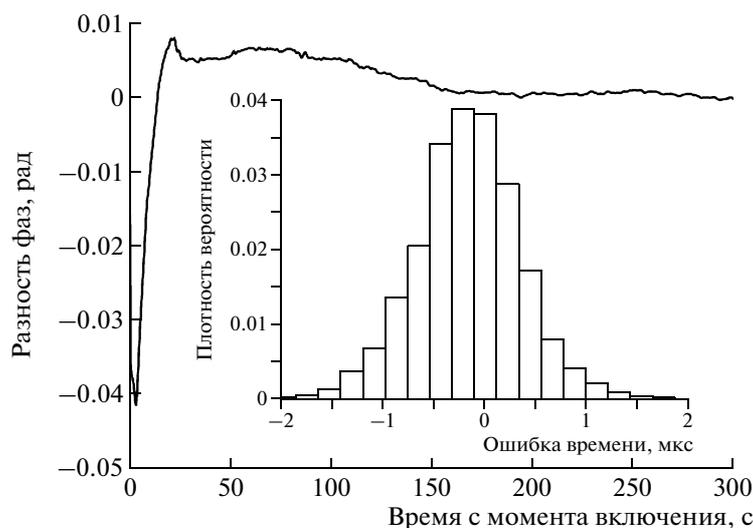


Рис. 2. Разность фаз сигналов двух систем сбора в течение 300 с после включения и гистограмма плотности вероятности ошибок определения времени за время проведения эксперимента (48 ч).

большом отношении сигнал/шум разность фаз должна быть равной нулю. Однако сразу после включения наблюдались осцилляции разности фаз с максимальным отклонением от среднего значения, не превышающим 0.05 рад при частоте сигнала 197 Гц. Эти осцилляции могут быть связаны с процессом установления стационарного значения температуры задающего генератора а.ц.п., протекающим у разных а.ц.п. по-разному. Через 200 с осцилляции прекратились, и сигнал разности фаз стал вести себя подобно стационарному случайному процессу со среднеквадратичным отклонением ~ 0.0002 рад. Данный эксперимент показал, что в реальных условиях размещения а.ц.п. 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 [10]. При анализе таких сигналов наличие времени в каждом отсчете данных, полученных при помощи рассматриваемой системы, позволяет вычислять амплитуду и фазу сигнала на каждой станции оптимальным методом [11, 12], который заключается в следующем. Регистрируемый сигнал на удалении от источника может быть представлен как аддитивная смесь сигнала передатчика $s(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ и шума. Амплитуда A и начальная фаза φ_0 неизвестны. Если шум отсутствует, а значение частоты $\omega_0 = 2\pi f_0$ известно точно, отсчеты принятого сигнала можно записать в виде $s_m = a \cos \omega_0 t_m - b \sin \omega_0 t_m$, где m – номер отсчета, t_m – время отсчета s_m . Очевидно, что

$$a = 2 \langle s_m \cos \omega_0 t_m \rangle_T, \quad b = 2 \langle s_m \sin \omega_0 t_m \rangle_T. \quad (1)$$

Угловые скобки означают усреднение по всему набору отсчетов за время наблюдения T . Отсюда следует, что амплитуда и фаза гармонического сигнала могут быть вычислены как

$$A = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad \varphi_0 = \arctan(b/a). \quad (2)$$

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 доверительный интервал, в который истинное значение измеряемой величины попадает с заданной доверительной вероятностью.

Для оценки доверительного интервала нужно знать плотность распределения вероятности изме-

ряемой величины. В случае гауссова шума плотность распределения оценок \hat{A} и $\hat{\varphi}$ 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.

Мы предлагаем для оценки доверительных интервалов для амплитуды и фазы гармонического сигнала в произвольном шуме сначала оценить амплитуду и начальную фазу сигнала с частотой f_0 с использованием формул (1) и (2) и выбрать набор ω_n из N частот с шагом $2\pi/T$ слева и справа от частоты сигнала. Используя эти частоты и вычисленные ранее оценки амплитуды и фазы, создать набор сигналов $s_m(t_m) = A \cos(\omega_n t_m + \varphi_0)$ и сложить его с исходной записью. Расчет A_n и φ_{0n} дает требуемые ансамбли реализаций, по которым вычисляются доверительные интервалы для заданной доверительной вероятности. Предложенный метод расчета доверительных интервалов был успешно испытан численно на реализациях, полученных при помощи программного генератора шума.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМЫ: ИЗМЕРЕНИЕ РАЗНОСТИ ФАЗ В ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗНЕСЕННЫХ ТОЧКАХ

10 и 14 ноября 2008 г. были проведены 4 сеанса измерений H -компоненты магнитного поля, генерируемого гармоническим источником, расположенным на севере Кольского полуострова [13]. Одна измерительная система устанавливалась на опорной точке и не передвигалась. При помощи другой, мобильной, системы проводились измерения в различных точках в окрестности г. Апати-

ты и оценивался сдвиг фазы сигнала относительно опорной точки. Первое измерение проводилось двумя системами в одной точке с целью измерения разности фаз, вносимой датчиками.

На рис. 3 приведены разности фаз сигнала относительно опорной точки с доверительными интервалами и расстояния от точек наблюдений до центра антенны передатчика, полученные в нескольких измерениях. Из рисунка следует, что перемещение мобильной системы примерно на 600 м ближе к северу (измерение № 2) вызвало сдвиг фаз на $\sim 2^\circ$. Отсутствие перекрытия доверительных интервалов свидетельствует о его статистической значимости. Перемещение системы на 6 км в том же направлении (измерение № 3) привело к сдвигу фаз на 13° . Расчет фазовых скоростей распространения сигнала дает значения от 3000 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 ρ , оценим значение ρ 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 [14] для фазовой скорости $v = \sqrt{4\pi f_0 \rho / \mu_0}$, $f_0 = 82$ Гц, справедливой при $1 / (2\pi f_0 \epsilon \epsilon_0 \rho) \gg 1$. Расчет по этой формуле дает следующие значения удельных сопротивлений для различных участков измерений: $1.1 \cdot 10^4$ (между точками 1–2), $6.5 \cdot 10^4$ (между точками 2–3) и $3.5 \cdot 10^5$ Ом · м (между точками 3–4).

Данный эксперимент продемонстрировал решающую способность предложенных здесь системы сбора и методов обработки данных. Показано, что с помощью этой системы в условиях Кольского полуострова мы можем зарегистрировать значимые различия значений разности фаз, даже на расстояниях ~ 1 км, что дает возможность применения этой системы в задачах электромагнитного зондирования. Согласно оценке, проводимости земной коры по результатам измерений разности фаз сигнала в пространственно разнесенных точках согласуется со средним значением проводимости $\rho \approx 10^4$ Ом · м, полученным в [15, 16] прямыми измерениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задача определения относительных фаз сигналов на локальной трассе в к.н.ч.–с.н.ч.-диапазо-

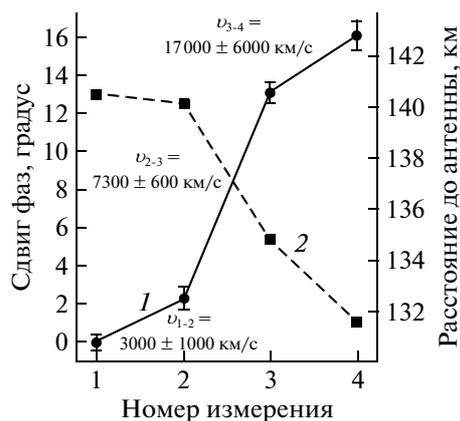


Рис. 3. Сдвиг фаз с 95%-ными доверительными интервалами (1) и расстояния от мобильной системы до центра антенны передатчика (2).

нах, несомненно, является актуальной. Решить эту задачу позволяет система сбора данных, обеспечивающая 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 обсерваториях Ловозеро и Баренцбург с 2005 г.

С входящими в ее состав недорогими GPS благодаря программному обеспечению удалось обеспечить высокое качество регистрируемых характеристик и добиться высокой точности синхронизации. Как было показано в данной работе, полученная точность достаточна для статистически достоверной регистрации сдвига фаз станций, разнесенных на расстояние ≤ 1 км. Приведенный в работе алгоритм оценки фазы гармонических сигналов является оптимальным для решения подобного рода задач. Также предложен алгоритм вычисления доверительных интервалов для полученных оценок амплитуд и фаз гармонических сигналов, использующий единственное предположение о неизменности статистических свойств шума в окрестности частоты сигнала.

С помощью описанной здесь системы сбора данных измерена фазовая скорость распространения гармонического сигнала в земной коре и оценена ее проводимость в окрестности точек наблюдений. Полученные нами значения проводимости практически совпадают с результатами работ [15, 16], где показано, что среднее значение удельного сопротивления на Кольском полуострове $\rho \approx 10^4$ Ом · м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Füllekrug M., Fraser-Smith A., Schlegel K.* // *Europhysics Letters*. 2002. V. 59 (4). P. 626.
2. *Cohen M.B., Inan U.S., Paschal E.W.* // *IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing*. 2010. V. 48. Issue 1. P. 3.
3. *Rayne J.A., Inan U.S., Foust F.R. et al.* // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. L23101.
4. *Пильгаев С.В., Ахметов О.И., Филатов М.В., Федоренко Ю.В.* // *ПТЭ*. 2008. № 3. С. 175.
5. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники / Пер. с англ. Изд. шестое. М.: Мир, 2001.
6. *Федоренко Ю.В., Пильгаев С.В., Филатов М.В., Ахметов О.И.* // *ПТЭ*. 2009. № 4. С. 179.
7. *Roland E. Best.* Phase-locked loops: design, simulation, and application. Third Edition. NY: McGraw-Hill, 1997.
8. *Сергиенко А.Б.* Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2003.
9. *Evangelista G.* // *Signal Processing*. 2003. V. 83. № 2. P. 377.
10. *Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Короткова Т.Г. и др.* // *Докл. РАН*. 2009. Т. 427. № 3. С. 388.
11. *Rauch L.L.* // *DSN Progress Report*. 1978. V. 42–45. P. 152.
12. *Левин Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 1. М.: Советское радио, 1969.
13. *Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Собчаков Л.А. и др.* // *Докл. РАН*. 1994. Т. 338. № 1. С. 106.
14. *Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.В.* Теория волн. М.: Наука, 1979.
15. *Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н. и др.* // *Известия РАН. Физика Земли*. 1998. № 8. С. 3.
16. *Жамалетдинов А.А.* // *Глубинные электромагнитные зондирования с применением импульсных МГД-генераторов*. Апатиты: Кольск. фил. АН СССР, 1982. С. 35.