

РАДИОФИЗИКА ГЕОКОСМОСА

УДК 621.396.7

В. Г. ГАЛУШКО, А. С. КАЩЕЕВ, С. Б. КАЩЕЕВ,
И. И. ПИКУЛИК, Ю. М. ЯМПОЛЬСКИЙ

Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: kascheev@rian.kharkov.ua

МОБИЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЧАСТОТНО-УГЛОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Представлена функциональная схема и описан принцип действия мобильного приемно-измерительного комплекса ВЧ диапазона, разработанного для измерения углов прихода, доплеровского сдвига частоты и времени группового запаздывания при радиодиагностике волновых процессов в ионосфере. Комплекс собран на базе одноканального цифрового приемника, мультиплексора, персонального компьютера и трех пространственно разнесенных антенн, что дает возможность измерять углы прихода пробных сигналов методом фазовой пеленгации с доплеровской фильтрацией. Кратко рассмотрены принцип действия этого метода и алгоритм вычисления траекторных параметров при использовании цифрового приемника с мультиплексором. Приведены результаты лабораторных и полевых испытаний мобильного комплекса. Проведено сравнение результатов параллельных измерений углов прихода с использованием разработанного комплекса и двух других систем: радиотелескопа декаметрового диапазона УТР-2 и аналогового трехканального комплекса, который применяется для исследований ионосферы методом частотно-углового зондирования.

Ключевые слова: приемный комплекс, мультиплексор, разность фаз, углы прихода

1. Введение

Исследования ионосферы радиофизическими методами дистанционного зондирования в ВЧ диапазоне насчитывают более чем полувековую историю. Однако их усовершенствование и развитие по-прежнему актуально, что связано с интенсификацией эксплуатации геокосмического пространства. В последнее время значительное внимание уделяется разработке пассивных методов диагностики ионосферы (см., например, [1]). При этом в качестве пробных сигналов используется излучение широковещательных станций или передатчиков служб точного времени, поэтому не требуется создание специальных дорогостоящих передающих систем. Для успешного функционирования таких методов диагностики необходимо обеспечить разделение пространственных компонент принимаемого сигнала, возникающих за счет многолучевого механизма распространения радиоволны в ионосфере. С этой целью используются

временная селекция (для импульсных сигналов), угловое разрешение с помощью остронаправленных антенн, а также доплеровская фильтрация [2]. Каждый из вышеперечисленных способов имеет свои достоинства и недостатки. Так, временная селекция имеет ограничения за счет дисперсионных искажений импульсных сигналов в среде распространения. Пространственно-угловое разделение лучей требует применения больших фазированных антенных решеток (ФАР) и значительных капиталовложений для их создания [3]. Доплеровская фильтрация требует сложной аппаратуры при обработке сигналов. В последнее время в самых различных областях науки и техники широкое распространение получили компьютерные технологии. Их применение при разработке специализированных приемно-измерительных систем позволяет эффективно использовать ранее недоступные цифровые методы доплеровской фильтрации в задачах радиодиагностики ионосферы.

В конце прошлого века в Радиоастрономическом институте НАН Украины был разработан метод частотно-углового зондирования ионосферы

ры (ЧУЗИ) [4]. С помощью этого метода по флуктуациям траекторных параметров ВЧ сигналов в рамках нескольких физических моделей решается задача радиодиагностики пространственно-неоднородной ионосферы, а именно, восстанавливаются регулярные профили электронной концентрации, а также динамические и статистические характеристики перемещающихся ионосферных возмущений [4, 5]. Флуктуации траекторных параметров (углов прихода различных компонент зондирующих сигналов) определяются с использованием метода фазовой пеленгации с доплеровской фильтрацией (ФПДФ) [2].

Для практической реализации метода ЧУЗИ в РИ НАНУ были созданы три поколения приемно-измерительных комплексов (ПИК) [6, 7]. Эти комплексы были успешно апробированы и применены в натуральных экспериментах в Украине, США и Антарктике [1, 3, 8]. Необходимо отметить, что все эти комплексы были собраны на базе аналоговых связанных приемников, поэтому были достаточно громоздкими и требовали дополнительного оборудования для калибровки. Все это затрудняло их установку и применение на выносных приемных пунктах.

На современном этапе экспериментальных исследований в РИ НАНУ в качестве приемного устройства ВЧ диапазона используется одноканальный цифровой приемник WR G-313i фирмы WinRadio [9]. Сопряжение этого приемника с компьютером и разработка ряда специализированных прикладных программ позволили реализовать дистанционное управление измерительным комплексом, предварительную обработку и считывание данных в режиме реального времени с помощью удаленного доступа по сети Интернет. Компактность созданной системы, простота ее установки, надежность и экономичность дали возможность развернуть сеть таких ПИК в Украине, Антарктике, в Нигерии, на о. Свалбард (Шпицберген), в Северной Скандинавии (г. Тромсё, Норвегия) и в Сибири (г. Иркутск) [7]. При участии РИ НАНУ аналогичные приемные пункты созданы в Перу (г. Хикамарка), на Кольском полуострове (г. Мурманск) и вблизи г. Москвы (ИЗМИРАН). Все перечисленные установки предназначены для регистрации вариаций доплеровского смещения частоты (ДСЧ) и группового времени запаздывания ВЧ сигналов в одноканальном режиме.

В настоящей работе представлена схема нового ПИК, предназначенного для решения задач радиодиагностики волновых процессов в ионосфере методом ЧУЗИ. Его основное отличие от предыдущих устройств заключается в том, что он собран на основе одноканального цифрового приемника и мультиплексора, которые устанавливаются непосредственно в корпус персонального компьютера, обеспечивающего обработку сигналов, что позволило резко уменьшить габариты комплекса. При использовании трех пространственно-разнесенных антенн комплекс позволяет измерять углы прихода пробных сигналов. В работе кратко рассмотрена суть метода ФПДФ и алгоритмы обработки сигналов при использовании приемника с мультиплексором. Представлены результаты полевых испытаний мобильного комплекса ЧУЗИ, проведено сопоставление данных одновременных измерений углов прихода с помощью разработанного ПИК и ФАР декаметрового радиотелескопа УТР-2.

2. Метод регистрации траекторных параметров

К числу основных информационных параметров для реализации метода ЧУЗИ относятся ДСЧ, углы прихода (азимут и угол места) и групповое время запаздывания пробных ВЧ сигналов [1]. Как известно [2], традиционные разностно-фазовые методы пеленгации позволяют измерять углы прихода сигнала с достаточной точностью в случае однодогового сигнала и при достаточно большом соотношении сигнал/шум. Для этого необходима регистрация сигнала как минимум в трех пространственно-разнесенных приемных пунктах (см. рис. 1, расположение приемных пунктов показано точками 1, 2, 3). Можно показать, что для плоской волны с волновым вектором \vec{k} , азимут α и угол места ϵ находятся по формулам

$$\operatorname{tg} \epsilon = \frac{x_2 \Delta \varphi_{3-1} - x_3 \Delta \varphi_{2-1}}{y_3 \Delta \varphi_{2-1}}, \quad (1)$$

$$\cos \alpha = \frac{\Delta \varphi_{2-1}}{k x_2 \cos \epsilon} \quad \text{или} \quad \cos \alpha = \frac{\Delta \varphi_{3-1}}{k (x_3 \cos \epsilon + y_3 \sin \epsilon)}, \quad (2)$$

где x_i , y_i – координаты приемных антенн; φ_{j-i} – разность фаз сигналов в антеннах j и i ; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

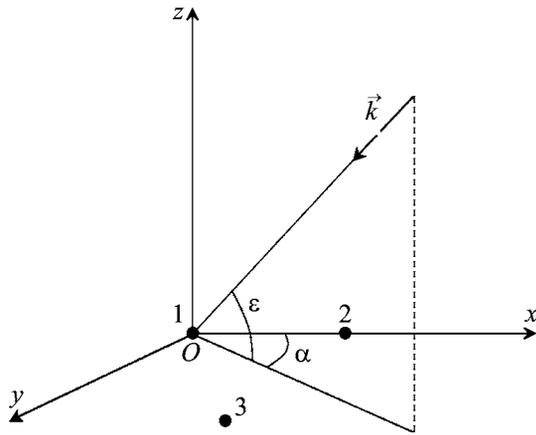


Рис. 1. Геометрия задачи

Однако в реальных условиях ионосферного распространения радиоволн ВЧ диапазона сигнал в точке приема формируется в результате интерференции нескольких пространственных мод, что приводит к значительным ошибкам при измерении углов прихода. Одним из методов борьбы с этим эффектом является доплеровская фильтрация [4]. Пусть суммарное поле $u_{\Sigma}(\vec{r}, t)$ состоит из N парциальных волн $u_j = A_j(\vec{r}, t)e^{i[\omega t - kL_j(\vec{r}, t)]}$,

$$u_{\Sigma}(\vec{r}, t) = \sum_{j=1}^N A_j(\vec{r}, t)e^{i[\omega t - kL_j(\vec{r}, t)]},$$

где ω – частота излучаемого сигнала, L_j и A_j – эйконал и амплитуда парциальной волны u_j .

При малых разносах приемных антенн по сравнению с радиусом кривизны волнового фронта можно записать

$$kL_j(\vec{r}, t) = kL_j(0, 0, 0, t) + \vec{k}_j(0, 0, 0, t)\vec{r},$$

где $\vec{k}_j(0, 0, 0, t) = \nabla L_j(0, 0, 0, t)$, и тогда

$$u_{\Sigma}(\vec{r}, t) = \sum_{j=1}^N A_j(\vec{r}, t)e^{i[\omega t - kL_j(0, 0, 0, t) - \vec{k}_j(0, 0, 0, t)\vec{r}]} \quad (3)$$

Для какого-либо момента времени t_0 суммарное поле (3) с учетом эффекта Доплера имеет вид:

$$u_{\Sigma}(\vec{r}, t_0) = \sum_{j=1}^N A_j(\vec{r}, t_0)e^{i[(\omega + \omega_{Dj})t_0 - kL_j(0, 0, 0, t_0) - \vec{k}_j(0, 0, 0, t_0)\vec{r}]} \quad (4)$$

где $\omega_{Dj} = -\frac{d}{dt}(kL_j(0, 0, 0, t) + \vec{k}_j(0, 0, 0, t)\vec{r})\Big|_{t=t_0}$.

Для достаточно малых интервалов времени $\frac{d}{dt}(kL_j(0, 0, 0, t)\vec{r}) = 0$ (т. е. предполагается, что за время одиночного измерения углы прихода не изменяются), тогда

$$\omega_{Dj} = -k \frac{d}{dt} L_j(0, 0, 0, t)\Big|_{t=t_0}.$$

Как правило, ионосферные сигналы, которые распространяются вдоль различных траекторий, имеют разные доплеровские частоты. Разность частот между отдельными модами сигнала зависит от скоростей движения в ионосфере на разных высотах отражений и скорости изменения коэффициента преломления вдоль траектории распространения. Применение преобразования Фурье к сигналу (4) позволяет разделить парциальные компоненты в частотной области. Затем с помощью уравнений (1) и (2) вычисляются углы прихода каждой пространственной волны в отдельности. Проведенные авторами оценки и долговременные натурные испытания показывали, что для разделения ионосферных компонентов в спектральной области необходима разрешающая способность по частоте не хуже 0.05 Гц.

Точность измерения углов зависит от пространственного разнosa приемных антенн и точности регистрации разности фаз. Из (1) и (2) следует, что чем больше пространственная база, тем меньше ошибка. Однако при использовании базы больше, чем λ , появляются неоднозначности при измерении углов. Оценки показывают, что оптимальной конфигурацией антенной системы при работе на односкачковых радиоприемниках протяженностью $D \leq 1000$ км в диапазоне частот $5 \div 15$ МГц является равносторонний треугольник со сторонами ~ 60 м. Из анализа уравнений (1) и (2) следует, что для достижения необходимой точности измерений углов ($\sim 0.5^\circ$) ошибка измерений разности фаз не должна превышать $3^\circ \div 5^\circ$.

3. Состав и принцип действия ПИК

Рассмотрим реализацию пеленгационной системы для решения задач ЧУЗИ с использованием ПИК с мультиплексором на входе (ПИКМ). Упрощенная функциональная схема такого комплекса при-

ведена на рис. 2. Он состоит из аналоговых блоков (мультиплексор МП, опорный генератор ОГ), цифровых блоков (система управления СУ, система обработки и визуализации СОВ) и цифрового приемника WR G-313i. Все блоки ПИКМ, как аналоговые, так и цифровые, размещены в корпусе персонального компьютера.

Антенная система состоит из трех пространственно-разнесенных диполей со встроенными антенными усилителями (в зависимости от дальности до передающей станции могут использоваться диполи вертикальной или горизонтальной поляризации). Аналоговые сигналы с выхода каждого из трех широкополосных антенных усилителей поступают на входы 0–2 мультиплексора. По команде системы управления они поочередно подаются непосредственно на вход приемника. В нем сигналы фильтруются и оцифровываются, далее в цифровом виде поступают в систему обработки и визуализации. В системе обработки производятся вычисления мгновенных спектров сигналов в пространственно разнесенных точках и разности фаз между спектральными максимумами на одинаковых частотах, по которым вычисляются углы прихода отдельных пространственных компонент. Результаты вычислений в виде графиков отображаются на мониторе в текущем времени.

Внешний опорный генератор синхронизирует работу гетеродинов приемника. Нестабильность его выходной частоты не хуже 10^{-9} , что позволяет измерять ДСЧ принятых сигналов с точностью до 0.01 Гц.

При измерении группового времени запаздывания зондирующих сигналов требуется синхронизация работы ПИКМ с абсолютной временной шкалой. Для этого обычно используется запуск аналого-цифрового преобразователя (АЦП) приемного комплекса секундными импульсами сигнала PPS системы GPS. Однако

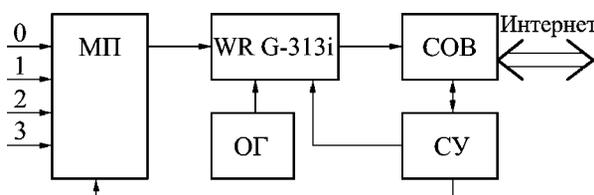


Рис. 2. Функциональная схема ПИКМ

АЦП приемника WR G-313i не имеет внешнего запуска, поэтому в мультиплексоре используется дополнительный вход 3 для записи временных меток GPS непосредственно в файлы данных. Принцип действия схемы записи состоит в следующем. Укороченный импульс PPS* длительностью $10 \div 15$ мкс (рис. 3, а) формируется по переднему фронту PPS-импульса, поступающего с выхода приемника GPS в момент t_0 . По команде системы управления он подается через мультиплексор на вход приемного устройства. Канал синхронизации открывается на интервал T длительностью 1 с. На рис. 3, б схематически показана эпюра выходного сигнала аналогового тракта на входе АЦП. Регистрация импульса PPS* в файле данных осуществляется в момент времени t_1 , который отличается от t_0 на величину задержки сигнала в цепях приемника. Ее значение определено экспериментально и учитывается при последующей обработке. Затем канал синхронизации отключается, и ПИКМ возвращается в трехканальный режим измерения фазовых сдвигов. Промежуток времени T гарантирует запись импульса PPS в файл данных при небольшом отклонении компьютерного времени (менее ± 0.5 с за период между моментами синхронизации). Точность синхронизации обусловлена частотой работы АЦП и составляет ± 20.83 мкс.

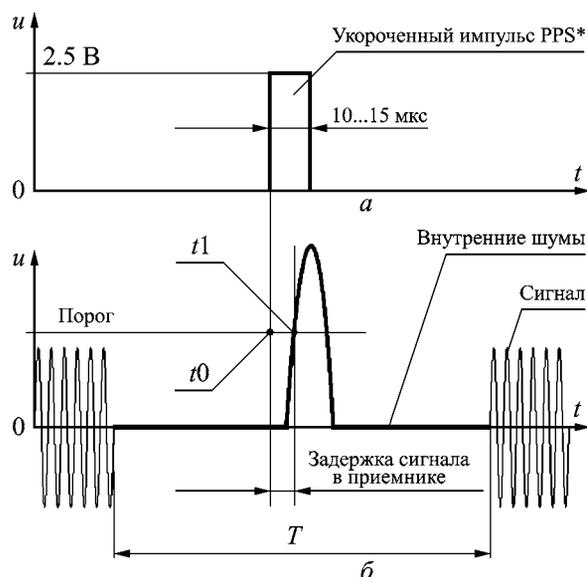


Рис. 3. Принцип работы системы временной синхронизации: а – модифицированный сигнал GPS; б – сигнал на входе АЦП

Особенностью приемного комплекса с мультиплексором является одновременная регистрация отсчетов сигнала в разных каналах, что приводит к межканальной задержке в анализе сигналов. Для того чтобы уменьшить задержку и в то же время обеспечить высокое разрешение по частоте, применяется двухступенчатая фильтрация. На первом этапе осуществляется выделение несущей частоты передатчика в сравнительно широкой полосе. Например, при работе с вещательной станцией целесообразно первоначально обеспечить подавление модуляционных составляющих. При этом используется полоса анализа 60 Гц, что соответствует времени накопления порядка 16 мс. Сначала вычисляется мгновенный спектр в первом канале, через 16 мс – во втором, еще через 16 мс – в третьем. Таким образом, задержка между каналами 1 и 2, а также между каналами 2 и 3 составляет 16 мс, а между каналами 1 и 3 – 32 мс. Вычисленные в трех каналах комплексные мгновенные спектры накапливаются в течение 20 ÷ 60 с, что позволяет провести основной спектральный анализ с разрешением 0.015 ÷ 0.05 Гц практически одновременно во всех каналах. Межканальная задержка приводит к аппаратному сдвигу фаз между каналами, значение которого зависит от рабочей частоты входного сигнала и учитывается при расчете углов прихода.

На втором этапе фильтрации в качестве отсчетов используются комплексные амплитуды спектра, рассчитанные на первом этапе для частотного канала, в котором находится несущая частота пробного передатчика. Таким образом, эффективный период оцифровки на втором этапе в рассматриваемом варианте составляет 48 мс (частота 20.8 Гц). Такая частота оцифровки не удовлетворяет требованиям теоремы Котельникова для сигналов с полосой 60 Гц. За счет этого наблюдается “свертка” спектров и увеличение уровня шумов. Этот эффект является принципиальным недостатком построения комплекса на основе одноканального приемника с мультиплексором.

4. Лабораторные испытания

Во время лабораторных испытаний на входы приемного комплекса 0, 1, 2 (рис. 2) параллельно через разветвитель подавался калибровочный сиг-

нал стабильной частоты и амплитуды. Разветвитель и соединительные кабели одинаковой электрической длины обеспечивали нулевой фазовый сдвиг между сигналами на разных входах. Тем не менее межканальная задержка приводила к фазовому сдвигу $\Delta\varphi$ между выходными сигналами разных каналов на выходе комплекса. Зависимость $\Delta\varphi$ от несущей частоты калибровочного сигнала f_n может быть представлена в следующем виде:

$$\Delta\varphi = 2\pi \left(\frac{\tau_{мз}}{T_n} - n \right),$$

где $\tau_{мз}$ – период межканальной задержки, $T_n = 1/f_n$ – период сигнала на несущей частоте, n – целая часть частного от деления $\tau_{мз}$ на T_n .

Длительность задержки $\tau_{мз} \approx 16$ мс формируется во время записи сигнала в системе обработки и визуализации и кратна периоду частоты оцифровки $T_{оц} = 1/f_{оц}$, с которой работает АЦП. В случае применения цифрового приемника WR G-313i эта частота задана конструктивно внутренним генератором приемника. Значение частоты $f_{оц}$ порядка 48 кГц, ее стабильность во времени обеспечивается кварцем, но может изменяться в небольших пределах от экземпляра к экземпляру. Поэтому точное время задержки и, соответственно, фазовый сдвиг на разных частотах определяются для каждого приемника индивидуально. Оценка фазового сдвига на произвольной частоте позволила рассчитать время межканальной задержки для любой частоты настройки приемника и ввести соответствующий поправочный коэффициент во всем рабочем диапазоне.

Разброс разности фаз относительно нулевого значения при лабораторных испытаниях определяется соотношением сигнал/шум на выходе комплекса. Экспериментально снятая зависимость среднеквадратичного отклонения (СКО) $\Delta\varphi$ в зависимости от этого соотношения приведена на рис. 4.

Для исследования влияния изменения частоты входного сигнала на точность измерений разностей фаз на вход ПИК подавался сигнал с линейной частотой модуляций (ЛЧМ). Характеристики ЛЧМ генератора были рассчитаны таким образом, чтобы промоделировать реально наблюдаемые при ионосферном распространении ВЧ сигналов ДСЧ (± 1 Гц) и скорости их изменения

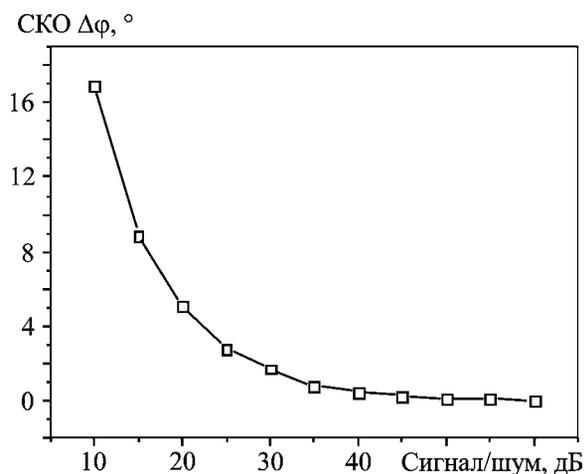


Рис. 4. СКО межканальной разности фаз в зависимости от отношения сигнал/шум на входе приемного устройства

(0.2 Гц/мин). В табл. 1 приведены результаты измерений разности фаз между каналами 1 и 3 при различных сигналах на входе и при отношении сигнал/шум равном 40дБ на выходе. Наблюдаются два следующих эффекта:

- 1) большой разброс разности фаз между сигналами в разных каналах (до нескольких десятков градусов) при отдельных измерениях,
- 2) увеличение СКО разности фаз между каналами в случае ЛЧМ сигнала по сравнению со случаем калибровочного сигнала той же амплитуды, но со стабильной частотой.

Анализ спектров сигналов при большом разбросе разности фаз показал, что в соответствующие моменты времени спектральные максимумы в разных каналах не совпадали по частоте. Случаи несовпадения максимумов названы авторами “выпавшими точками”. Количество выпавших точек зависит от соотношения сигнал/шум. Экспериментально установлено, что при соотношении сигнал/шум ≤ 30 дБ их количество составляло ≥ 20 % от общего числа измерений. По мере увеличения соотношения сигнал/шум количество выпавших точек

уменьшалось и при сигнал/шум ≥ 40 дБ становилось менее 10 % от общего числа измерений. Авторы предлагают считать измерения достоверными при отношении сигнал/шум не менее 40 дБ, а выпавшие точки программным способом исключать из рассмотрения.

Увеличение СКО разности фаз в случае ЛЧМ сигнала имеет следующее объяснение. Уровень калибровочного сигнала со стабильной частотой возрастает в спектральном окне в течение всего времени анализа. В случае изменяющейся частоты калибровочный сигнал за время анализа (в эксперименте 50 с) проходит через несколько частотных окон поочередно, увеличиваясь и уменьшаясь по амплитуде в каждом из них. При этом ни в одном из окон не достигалась амплитуда, которая соответствует сигналу со стабильной частотой. Уровень шума при измерениях был постоянным. Таким образом, эффективное отношение сигнал/шум при изменяющейся частоте сигнала меньше, чем в случае сигнала со стабильной частотой, что и приводит к большим ошибкам измерений.

5. Результаты полевых испытаний

Дальнейшие испытания комплекса проводились в полевых условиях в Радиоастрономической обсерватории им. С. Я. Брауде РИ НАНУ (пос. Граково Харьковской обл.). При этом применялась антенная система из трех вертикальных штыревых антенн, расположенных в вершинах треугольника на расстоянии порядка 30 м друг от друга. В качестве контрольного излучения были использованы сигналы станции точного времени и частоты РВМ (г. Москва). Длина радиотрассы по поверхности Земли составляла 790 км. Для калибровки ПИКМ и проверки правильности пеленгации ионосферных сигналов углы прихода параллельно измерялись с использованием ФАР УТР-2 [3]. Измерения проводились на частоте 9.996 МГц в условиях

Таблица 1. Результаты лабораторных испытаний приемного комплекса при разных видах сигнала

Вид сигнала на входе	Количество выпавших точек	Разности фаз между каналами 1–3			Продолжительность записи, мин (количество точек)
		СКО, градусы	Среднее значение, градусы	Максимальное отклонение от нуля, градусы	
ЛЧМ (0.2 Гц/мин)	3	0.558	-0.229	+1.02/-1.434	50 (60)
Стабильная частота	0	0.406	-0.221	+0.966/-1.21	50 (60)

зеркального отражения пробного сигнала от ионосферы. ПИКМ оценивал значения текущих углов прихода каждые 50 с в течение 8 мин излучения станцией монохроматического сигнала, затем вычислялось среднее значение и СКО. Линейные ФАР “Север–Юг” и “Запад–Восток” радиотелескопа УТР в то же время сканировали в секторе вероятных углов прихода (диапазон азимутальных значений составлял 7° , угломестный сектор составлял 25°). Оценки интенсивности принятых сигналов в каждом положении диаграммы направленности антенн производились на временном интервале 30 с. Ширина диаграммы направленности антенны УТР-2 по азимуту на частоте зондирования составляла примерно 1° . Ширина угломестной диаграммы направленности менялась от 1.7° до 4.3° при изменении угла места от 40° до 15° .

В результате были получены следующие оценки углов прихода: угол места равнялся 37° (ФАР) и 35.4° при $\text{СКО} = 2.2^\circ$ (ПИКМ). Азимут составлял 3° (ФАР) и 2.3° при $\text{СКО} = 0.7^\circ$ (ПИКМ). Как видно из приведенных результатов, разница определения углов прихода не превосходила СКО при измерениях, которое, в свою очередь, не превосходило ширину диаграммы направленности ФАР.

Дополнительные испытания и проверка работоспособности ПИКМ проводились путем сопоставления результатов пеленгационных и спектральных измерений, полученных с его помощью и с применением трехканального аналогового комплекса ЧУЗИ, успешно эксплуатируемого в РИ НАНУ на протяжении последних 15 лет [7]. Измерения были выполнены по сигналам вещательной станции ВЧ диапазона, расположенной в г. Минск. Длина радиотрассы составляла 780 км, рабочая частота равнялась 7.225 МГц. Оба комплекса были подключены параллельно к одной и той же антенной системе. В качестве примера на рис. 5 приведены двухчасовые регистрации ДСЧ и углов прихода, полученные с помощью двух комплексов ЧУЗИ: трехканального (кривые 1) и ПИКМ (кривые 2). Отметим, что во время этого эксперимента сигнал носил ярко выраженный многомодовый характер. Вероятно, на данной радиолинии одновременно распространялись две магнитоионные компоненты, отраженные от F-слоя.

Анализ вариаций ДСЧ, полученных на двух установках, показал, что оценки ДСЧ хорошо совпадают, их отличие не превышает 0.1 Гц. Разница при сопоставлении результатов пеленга-

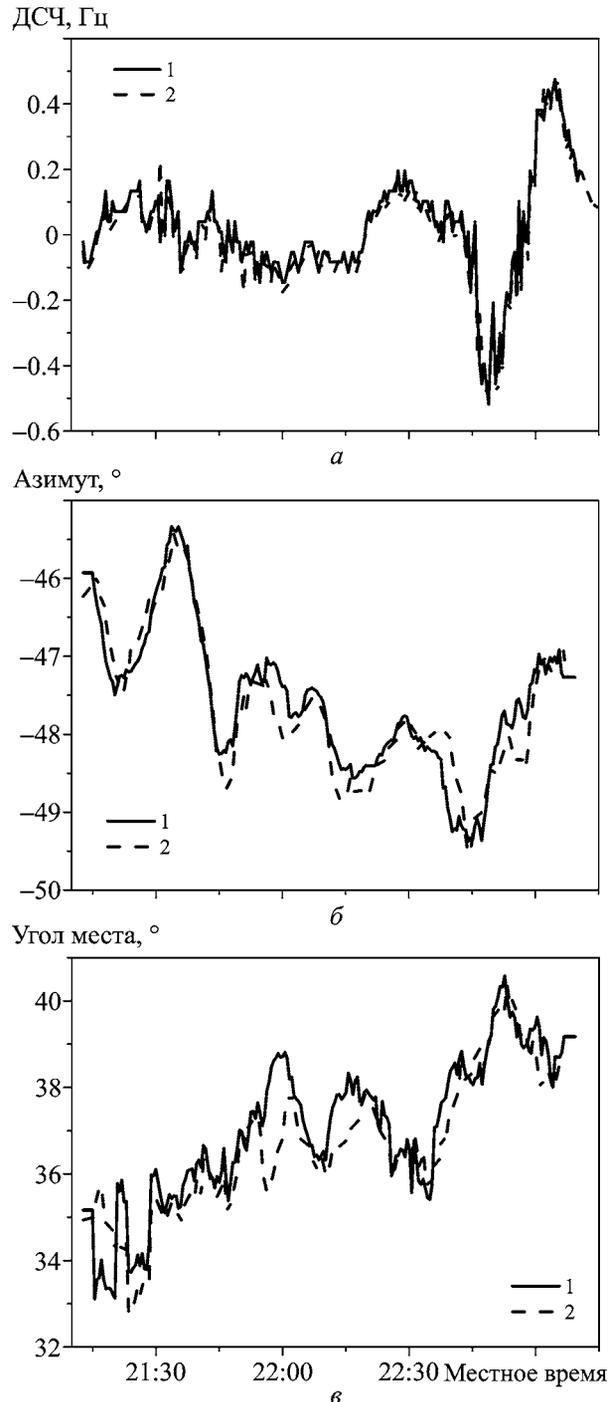


Рис. 5. Сравнение результатов измерений параметров ВЧ сигналов: ДСЧ (а), азимута (б) и угла места (г), – проведенных двумя различными приемными комплексами 18.05.2013 г. на частоте 7.255 МГц: кривые 1 – трехканальный приемный комплекс, кривые 2 – приемный комплекс с мультиплексором на входе

ционных измерений (азимута и угла места) не превышает расхождения углов прихода, оцененных с помощью антенны радиотелескопа УТР-2.

6. Выводы

Разработан мобильный приемный комплекс для частотно-углового зондирования ионосферы на базе одноканального цифрового приемника и мультиплексора. Устройство имеет значительно меньшие габариты, позволяет работать в режиме дистанционного управления и характеризуется высокой надежностью по сравнению с ранее разработанными аналоговыми приемниками. Лабораторные и полевые испытания комплекса показали его работоспособность и эффективность при решении задач радиодиагностики ионосферы. В РИ НАНУ разработан специализированный пакет прикладных программ для управления комплексом и передачи данных в режиме реального времени по сети Интернет. Учитывая компактность, надежность, малую энергоемкость и простоту развертывания системы, планируется ее дальнейшее использование в экспедиционных условиях Антарктиды и Арктики. Действующий образец установки в настоящее время развернут в Низкочастотной обсерватории РИ НАНУ в с. Мартовая Харьковской обл. Аналогичные комплексы готовятся к установке в Северной Скандинавии вблизи г. Тромсё (Норвегия) и совместно с коллегами из Бостонского колледжа (США) на Американской антарктической станции “Наганизель Палмер”.

Следует отметить, что ПИКМ был разработан и создан в РИ НАНУ в ходе выполнения плановых ведомственных НИР ОФА Президиума НАН Украины “Зонд-2” (№ госрегистрации 0111U000089) и “Ятаган” (№ госрегистрации 0111U000063), также при частичной финансовой поддержке в рамках конкурсных НИР “Шпицберген-2013” (№ госрегистрации 0113U002656) и “Лира” (№ госрегистрации 0113U000701).

Авторы статьи благодарны А. В. Колоскову за полезные обсуждения и участие в разработке программного обеспечения для управления комплексом по сети Интернет, а также признательны сотрудникам НЧО РИ НАНУ за помощь в развертывании действующей установки ЧУЗИ в обсерватории в с. Мартовая.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Beley V. S., Galushko V. G., Paznukhov D., Reinisch B. W., and Yampolski Y. M. HF Radar Sounding of TIDs with the Use of the DPS System and Signals from Broadcasting

Stations // Proc. of PIRS-2000. – Cambridge, MA (USA). – P. 602.

2. Афраймович Э. Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы. – М.: Наука, 1982. – 198 с.
3. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп декаметрового диапазона УТР-2 // Антенны. – М.: Связь. – 1978. – № 26. – С. 3–14.
4. Галушко В. Г., Кащеев А. С. Частотно-угловое зондирование перемещающихся ионосферных возмущений в модели трехмерных волн плотности, распространяющихся в ионосферном слое // Радиофизика и радиоастрономия. – 2006. – Т. 11, № 3. – С. 242–253.
5. Галушко В. Г., Литвиненко Г. В. Восстановление трехмерно-неоднородной структуры электронной концентрации ионосферы методом частотно-углового зондирования // Радиофизика и радиоастрономия. – 2001. – Т. 6, № 3. – С. 222–229.
6. Пикулик И. И., Кащеев С. Б., Галушко В. Г., Ямпольский Ю. М. Приемный КВ комплекс для частотно-углового зондирования ионосферных возмущений в Антарктиде // Український антарктичний журнал. – 2003. – № 1. – С. 61–69.
7. Кащеев С. Б., Галушко В. Г., Колосков А. В., Пикулик И. И., Ямпольский Ю. М. Многофункциональные приемные комплексы ВЧ диапазона для исследований динамических процессов в ионосфере. Электромагнитные методы исследования окружающего пространства // Сб. тез. докл. Первой украинской конференции ЭМЕС. – Харьков (Украина). – 2012. – 308 с.
8. Galushko V. G., Kashcheyev A. S., Kashcheyev S. B., Koloskov A. V., Pikulik I. I., Yampolski Y. M., Litvinov V. A., Milinevsky G. P., and Rakusa-Suszczewski S. Bistatic HF diagnostics of TIDs over the Antarctic Peninsula // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2007. – Vol. 69, Iss. 4–5. – P. 403–410.
9. WINRADIO. G313 HF Receiver. User's Guide. – Melbourne: WINRADIO Communications, 2005. – 84 p.

В. Г. Галушко, А. С. Кащеев, С. Б. Кащеев,
И. И. Пикулик, Ю. М. Ямпольский

Радиоастрономічний інститут НАН України,
вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

МОБІЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЧАСТОТНО-КУТОВОГО ЗОНДУВАННЯ ІОНОСФЕРИ

Надається функціональна схема та описано принцип дії мобільного приймально-вимірювального комплексу ВЧ діапазону, розробленого для вимірювання кутів приходу, доплерівського зсуву частоти і часу групового затримання під час радіодіагностики хвильових процесів в іоносфері. Комплекс зібрано з цифрового одноканального приймача, мультиплексора, персонального комп'ютера та трьох просторово рознесених антен, що дає можливість вимірювати кути приходу пробних сигналів методом фазової пеленгації з доплерівською фільтрацією. Коротко розглянуто суть цього методу та алгоритм обчислювання траєкторних параметрів при використанні цифрового приймача з мультиплексором. Надано результати лабораторних і польових випробувань мобільного комплексу. Порівнюються дані

паралельного вимірювання кутів приходу за допомогою розробленого комплексу та двох інших систем: декаметрового телескопу УТР-2 та аналогового трьохканального комплексу, який використовується для іоносферних досліджень методом частотно-кутового зондування.

*V. G. Galushko, A. S. Kashcheyev,
S. B. Kashcheyev, I. I. Pikulik, and Y. M. Yampolski*

Institute of Radio Astronomy,
National Academy of Sciences of Ukraine,
4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

**A PORTABLE HF RECEIVING COMPLEX
FOR FREQUENCY-AND-ANGULAR SOUNDING
OF THE IONOSPHERE**

The paper presents the functional diagram and principle of operation of a portable HF receiving complex intended for measu-

ring angles of arrival, Doppler frequency shifts and group time delays of probe signals used for remote radio sensing of the ionosphere. The complex has been developed on the basis of a single-channel digital receiver, and includes a multiplexor, personal computer and three spaced antennas to allow estimating angles of arrival by the phase-difference direction finding technique with Doppler frequency filtering. The principle of the technique and algorithm of estimating the signal trajectory parameters used in the receiver complex with a multiplexor are briefly described. Results of laboratory and field tests of the portable complex are presented. Data of synchronous measurements of HF signal angles of arrival using the developed complex and two other instruments, specifically, the UTR-2 decameter wavelength radio telescope and analogous three-channel complex of frequency-and-angular sounding of the ionosphere (FASI), are compared.

Статья поступила в редакцию 06.03.2014