



УДК 550.388.1

## ОЦЕНКА ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ РАДИОЗОНДИРОВАНИИ ИОНОСФЕРЫ

В. Ю. Ким

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН),  
Москва, Троицк, Россия*

Представлена новая методика быстрого измерения доплеровского сдвига частоты радиоволн при вертикальном радиозондировании ионосферы. Методика основана на измерении мгновенного сдвига фазы отраженных радиосигналов на основе метода пересечения нуля на интервале времени, равном периоду повторения зондирующих импульсов. Показано, что предлагаемая методика позволяет измерять доплеровское смещение частоты зондирующих сигналов с точностью 0.1 Гц за интервал времени 40 мс. Использование новой методики в ионозондах позволит регистрировать доплеровские ионограммы за время одного сканирования по частоте.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ИОНОСФЕРА, ВЕРТИКАЛЬНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ, ДОПЛЕРОВСКОЕ СМЕЩЕНИЕ ЧАСТОТЫ

EDN: NRGPHS

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Доплеровский метод радиозондирования широко применяется для исследования ионосферных возмущений различной природы при их мониторинге методами наклонного (НЗ) и вертикального (ВЗ) зондирования [Афраймович, 1982; Намазов и др., 1975]. Для доплеровских наблюдений нестационарных явлений естественной ионосферы на трассах НЗ часто используют методику регистрации в пункте приема КВ излучения от вещательных станций или станций точного времени. При этом методика измерений непрерывных во времени сигналов позволяет оценивать доплеровское смещение с разрешением по частоте  $\Delta f_d \sim 0.01$  Гц при интервале времени измерения  $T \sim 100$  с.

При наблюдениях на трассах ВЗ в известном сетевом ионозонде DPS-4, [Панченко, 2019], доплеровские измерения проводятся на ограниченном числе фиксированных частот и при этом доплеровское разрешение  $\Delta f_d = 0.024$  Гц получается при времени измерения  $T = 40.96$  с. В принципе, если считать для ВЗ достаточным значение  $\Delta f_d = 0.1$  Гц, то время измерения на каждой частоте может быть  $T \sim 8$  с, однако в режиме последовательного измерения, например, на 4-х различных частотах общий интервал времени измерения составит 32 с. Такой интервал времени измерения позволяет наблюдать нестационарные ионосферные возмущения с характерными временами от нескольких минут и более. В работах [Wright and Pitteway 1982 a,b; 1999] для ионозонда Dinasonde были развиты методики для получения ионограмм с доплеровскими и угловыми измерениями, которые показали

Электронная почта авторов для переписки:

Ким Валерий Юрьевич, e-mail: [kimov-valery@mail.ru](mailto:kimov-valery@mail.ru)



<https://elibrary.ru/nrgphs>

Адрес редакции журнала  
«Гелиогеофизические исследования»:

ФГБУ «ИПГ»  
129128; Россия, Москва  
ул. Ростокинская, 9.  
e-mail: [vestnik@ipg.geospace.ru](mailto:vestnik@ipg.geospace.ru)

высокую информативность при исследовании ионосферных возмущений, вызываемых атмосферными гравитационными волнами с периодами в сотни и более секунд.

Однако существуют ионосферные возмущения с высокой временной динамикой развития процессов порядка нескольких секунд, например, связанные искусственным воздействием на ионосферу мощных радиоволн. Для ВЗ диагностики искусственных ионосферных возмущений был разработан метод многочастотного доплеровского зондирования (МДЗ), который позволяет путем решения обратной задачи диагностики определить интенсивность и пространственно-временные характеристики искусственных возмущений, возникающих при воздействии мощных радиоволн на ионосферу [Ким, 1991]. С помощью МДЗ были исследованы искусственные возмущения с характерными временами развития от нескольких секунд до минут и более, включая рост электронной концентрации  $N_e$  в максимуме  $E$ -слоя и на высотах  $F1$ -слоя, а также эффекты вытеснения плазмы в областях резонансного взаимодействия мощной волны с ионосферой [Ким, 2009].

Метод многочастотного доплеровского зондирования состоит в том, что в режиме вертикального зондирования передатчик непрерывно работает на фиксированной сетке частот (4, 8 или 16) с тактовой частотой следования зондирующих импульсов  $F_T = 50, 100, 200$  Гц. Для приема отраженных от ионосферы сигналов используется многоканальная радиоприемная система, с выхода которой импульсные сигналы проходят через систему узкополосной ( $\Delta f \sim 10$  Гц) фильтрации и когерентной обработки и получаемые таким образом непрерывные сигналы смещенной квадратурной компоненты регистрируются с помощью системы цифровой регистрации. Полученные таким образом цифровые сигнальные массивы обрабатываются с помощью известного алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) и в результате получается доплеровский спектр сигналов  $S(f_d)$  на всех зондирующих частотах. При таком способе получения  $S(f_d)$  доплеровское разрешение  $\Delta f_d$  определяется длиной выборки отсчетов сигнала  $N$  для БПФ и соответствующего интервала времени  $T$

$$\Delta f_d = 1/T \quad (1)$$

Описанная методика получения  $S(f_d)$  с использованием алгоритма БПФ, которая приемлема для анализа непрерывных сигналов, накладывает в случае МДЗ сильное ограничение на число зондирующих частот при импульсном зондировании в режиме ВЗ. Например, при зондировании на 16 частотах и при  $F_T = 200$  Гц имеем частоту следования импульсных сигналов на входе узкополосных фильтров 12,5 Гц, так что такой сигнал даже при прохождении через узкополосный кварцевый фильтр имел амплитудную модуляцию 12,5 Гц, т.е. сигнал был с помехой. И хотя алгоритм БПФ позволяет подавить комбинационные помехи и получать вполне достоверные  $S(f_d)$ , общая частота зондирующих импульсов при ВЗ с  $F_T = 200$  Гц не позволяла дальше увеличивать число зондирующих частот. Ограничение до 16 рабочих частот зондирования не позволяет проводить наблюдение быстрой динамики искусственных возмущений одновременно по всей толще ионосферы от  $E$ -слоя до вершины  $F2$ -слоя. Такая же проблема наблюдения нестационарных процессов одновременно в различных по высоте областях ионосферы возникает при исследовании перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) или при наблюдении влияния солнечных вспышек на различные по высоте ионосферные слои.

Поэтому возникает задача увеличения числа частот при многочастотном доплеровском зондировании в режиме ВЗ с помощью ионозондов вертикального зондирования ионосферы.

**Цель работы** — разработка методики быстрой оценки доплеровского смещения частоты радиоволн при вертикальном зондировании ионосферы.

## 2. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ ЧАСТОТЫ РАДИОВОЛН

Рассматриваемая здесь методика быстрой оценки доплеровского смещения частоты радиосигналов основана на оценке сдвига фазы между двумя последующими зондирующими импульсами при вертикальном зондировании ионосферы. На рисунке 1 схематически показана нормированная амплитуда  $U(t)$  импульсных сигналов на выходе приемного устройства ионозонда для двух последовательных тактов зондирования на одной несущей частоте  $f$ .

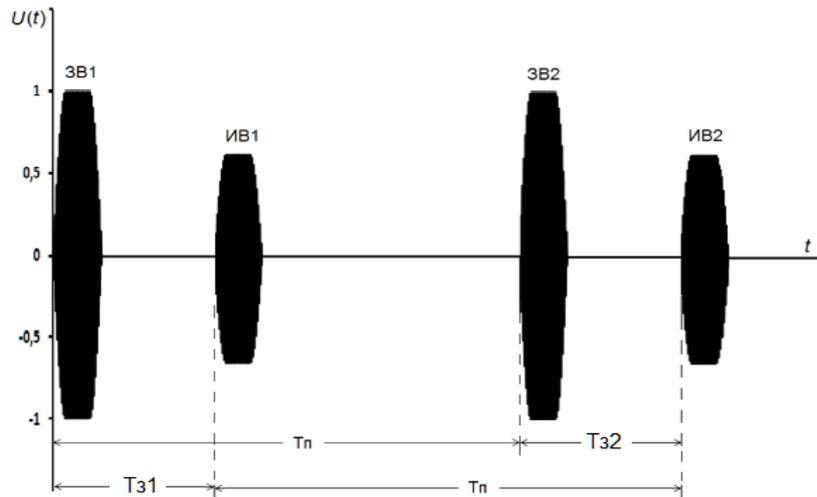


Рис. 1. Схема расположения на оси времени сигналов земной волны (ЗВ1 и ЗВ2) и отраженных ионосферных сигналов (ИВ1) и (ИВ2) для двух тактов зондирования с периодом  $T_{п}$

Если излучение зондирующих радиосигналов происходит с периодом повторения  $T_{п}$  (т.е. интервалом времени между сигналами «земной» волны ЗВ1 1-го такта и ЗВ2 2-го такта), то можно считать, что интервал времени между сигналами ИВ1 и ИВ2 будет также равен  $T_{п}$ . Поэтому возникает задача оценки разности несущей частоты между сигналами ИВ1 и ИВ2, обусловленной доплеровским смещением частоты сигнала ИВ2 за интервал времени равный  $T_{п}$ .

Как известно, доплеровский сдвиг частоты сигнала  $f_{д}$  определяется формулой:

$$f_{д} = -\frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \varphi(t), \quad (2)$$

где функция  $\varphi(t)$  — фаза гармонического сигнала. Для импульсного сигнала функция  $\varphi(t)$  описывает фазу несущей частоты зондирующего радиоимпульса.

Для оценки  $f_{д}$  по формуле (2) в случае анализа экспериментальных данных при ВЗ можно использовать её конечно-разностный вариант

$$f_{д} = -\Delta\varphi/(2\pi T_{п}), \quad (3)$$

где  $\Delta\varphi = \varphi_2(t_2) - \varphi_1(t_1)$  — разность значений фаз между сигналами ИВ1 и ИВ2 в моменты времени  $t_1$  и  $t_2 = t_1 + T_{п}$ .

При доплеровских наблюдениях естественных вариаций параметров ионосферы вариации величины доплеровского смещения частоты  $\Delta f_{д}$  обычно находится в диапазоне значений от  $\Delta f_{д} = \pm 0.1$  Гц до  $\Delta f_{д} = \pm 1$  Гц. Поэтому величина погрешности измерения доплеровского смещения частоты  $\delta f_{д}$  должна удовлетворять условию  $\delta f_{д} < 0.1$  Гц. Так, например, если оценивать  $f_{д}$  на интервале времени между соседними импульсами зондирования  $T_{п} = 20$  мс (при  $F_T = 50$  Гц), то при  $f_{д} = 0.1$  Гц в формуле (3) для величины  $\Delta\varphi$  получим значение  $\Delta\varphi = 0.72$  град. Если ионозонд будет работать с тактовой частотой зондирования  $F_T = 100$  Гц, то  $T_{п} = 10$  мс и тогда получим значение  $\Delta\varphi = 0.36$  град. Эти оценки показывают, что величина погрешности измерения разности фаз между сигналами ИВ1 и ИВ2 не должна превышать значения  $\sim 0.36$  град. Такая точность измерения величины  $\Delta\varphi$  при использовании типичных для ВЗ импульсных радиосигналов длительностью  $\sim 100$  мкс потребует, как обсуждалось выше, накопления сигналов ВЗ в течение десятков секунд.

Для оценки величины  $\Delta\varphi$  по двум тактам ВЗ можно применить известный метод пересечения нуля амплитудой сигнала, который применяется в частотомерах и аппаратуре измерения величины мгновенного сдвига фазы между двумя гармоническими сигналами [Кедем, 1976; Галахова и др. 1976;

Атамаян, 1982]. Такой принцип анализа с использованием современных цифровых технологий может быть использован для быстрой оценки величин  $\Delta\varphi$  и  $f_d$  при вертикальном зондировании ионосферы.

Допустим, что на выходе приемника ионозонда сигнал на промежуточной частоте (ПЧ)  $f_{ПЧ}$  с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) преобразован в сигнальный массив данных, в котором содержатся результат оцифровки амплитуды сигнала ПЧ  $U(n)$  для всех номеров  $n$  отсчетов АЦП в двух тактах зондирования. Далее вместо шкалы времени задержки  $t$  будем использоваться номер отсчета  $n = 1, 2, 3$  и т.д. до  $n = N_M$  — полное количество отсчетов АЦП в двух тактах зондирования. Если АЦП работает с тактовой частотой  $F_K$ , то на одном периоде сигнала ПЧ с несущей частотой  $f_{ПЧ}$  будет получено  $K$  отсчетов сигнала  $U(t)$

$$K = F_K / f_{ПЧ}, \quad (4)$$

и при этом шаг по фазе  $\delta\varphi$  будет равен

$$\delta\varphi = 2\pi / K. \quad (5)$$

На рисунке 2 показана схема оценки разности фаз  $\Delta\varphi$  между сигналами ИВ1 и ИВ2, соответствующие отражениям радиоволн от ионосферы для двух последовательных тактов зондирования. Сигналы на рисунке 2 представлены в нормированном к максимальным значениям амплитуды этих сигналов, а разность фаз  $\Delta\varphi$  между ними определяется фазовой задержкой  $\Delta t$ . Величина фазовой задержки  $\Delta t$ , в свою очередь, может быть измерена как интервал времени между нулевыми значениями сигналов ИВ1 и ИВ2, приведенными к единой шкале времени задержки сигналов  $t$ . Величине  $\Delta t$  будет соответствовать некоторое целое число  $\Delta n$  отсчетов величины  $\delta\varphi$  фазы сигнала и тогда для получим:

$$\Delta\varphi = \Delta n \cdot \delta\varphi, \quad (6)$$

при этом оценка величины разности  $\Delta\varphi$  будет иметь погрешность  $\sigma\varphi \approx 2\delta\varphi$ .

Для примера, оценим величину  $f_d$  в случае, если  $\Delta\varphi = 180^\circ$ ,  $F_T = 50$  Гц и  $T_{П} = 20$  мс, тогда по формуле (3) получим  $f_d = 25$  Гц. Для измерения величины  $f_d \approx 0,1$  Гц необходимо измерять  $\Delta\varphi$  с погрешностью не хуже  $\sigma\varphi \approx 0,7^\circ$  и тогда для величины  $\delta\varphi$  получим оценку  $\delta\varphi \approx 0,35^\circ$ . Отсюда следуют требования к быстродействию АЦП и в рассмотренном примере число отсчетов  $N_{П}$  на один период колебания сигнала ПЧ должно быть  $N_{П} \approx 1000$ . Если, например, положить  $f_{ПЧ} = 500$  кГц, то получим необходимое быстродействие АЦП порядка  $F_K \approx 500$  МГц. Эта оценка  $F_K$  может быть уменьшена путем увеличения  $T_{П}$ , тогда увеличится величина  $N_{П}$  и, соответственно,  $\delta\varphi$ . Например, если снизить промежуточную частоту до  $f_{ПЧ} = 250$  кГц и одновременно вдвое увеличить период  $T_{П}$ , то получим  $F_K \approx 125$  МГц при том, что сохранится оценка  $\delta\varphi \approx 0,35^\circ$ .

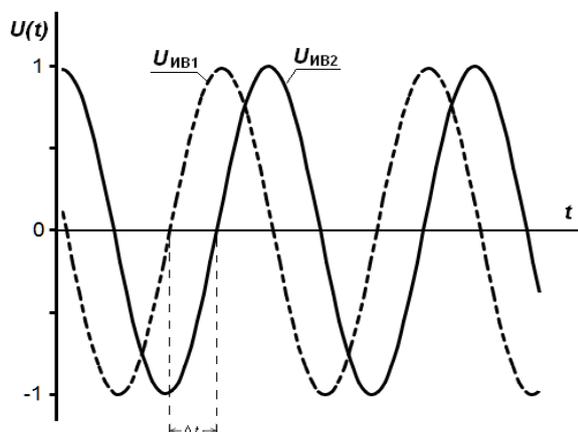


Рис. 2. Схема оценки величины фазовой задержки  $\Delta t$  между сигналами  $U_{ИВ1}$  и  $U_{ИВ2}$

На рисунке 3 представлена схема процедуры приведения сигналов ИВ1 и ИВ2 ( $U_{ИВ1}$  и  $U_{ИВ2}$ ) к единой шкале задержки  $t$ , которая проводится с использованием сигналов ЗВ1 и ЗВ2 ( $U_{ЗВ1}$  и  $U_{ЗВ2}$ ). На оси времени между этими парами сигналов существует интервал времени  $T_{П}$ , который здесь не показан. Время задержки ионосферного сигнала  $T_3$  на первом и втором тактах зондирования будем считать равными, а для оценки фазовой задержки  $\Delta t$  будем использовать целочисленную ось  $n$ , которая показывает номера отсчетов АЦП в течение двух тактов зондирования. На рисунке 3 ось  $n$ , идущая параллельно оси времени  $t$ , представляет собой номера отсчетов АЦП.

На рисунке 3а представлена схема расположения на оси времени цугов колебаний

сигналов на первом такте зондирования: земной волны  $U_{ЗВ1}$  и отраженной от ионосферы с задержкой  $T_3$  ионосферной волны  $U_{ИВ1}$ . На рис. 3а) показаны характерные номера отсчетов АЦП для 1-го такта зондирования:  $n1a$  — отсчет, соответствующий первому переходу через ноль сигнала  $U_{ЗВ1}$ ;  $n1б$  — отсчет, соответствующий начальному переходу через ноль сигнала  $U_{ИВ1}$ ; номера  $nx1$  и  $nx1 + 1$  указывают на следующие после  $n1б$  два перехода через ноль сигнала  $U_{ИВ1}$ . На рисунке 3б представлены аналогичные характерные номера отсчетов сигналов  $U_{ЗВ2}$  и  $U_{ИВ2}$  ( $n2a$ ,  $n2б$ ,  $nx2$  и  $nx2 + 1$ ) для второго такта зондирования. Для оценки фазовой задержки  $\Delta t$  по отсчетам  $n$  необходимо определить значения  $nx1$  и  $nx2$  и тогда величина  $\Delta n$  будет получена как разность  $(nx2 - nx1)$  и получим  $\Delta t = (nx2 - nx1)/F_K$ .

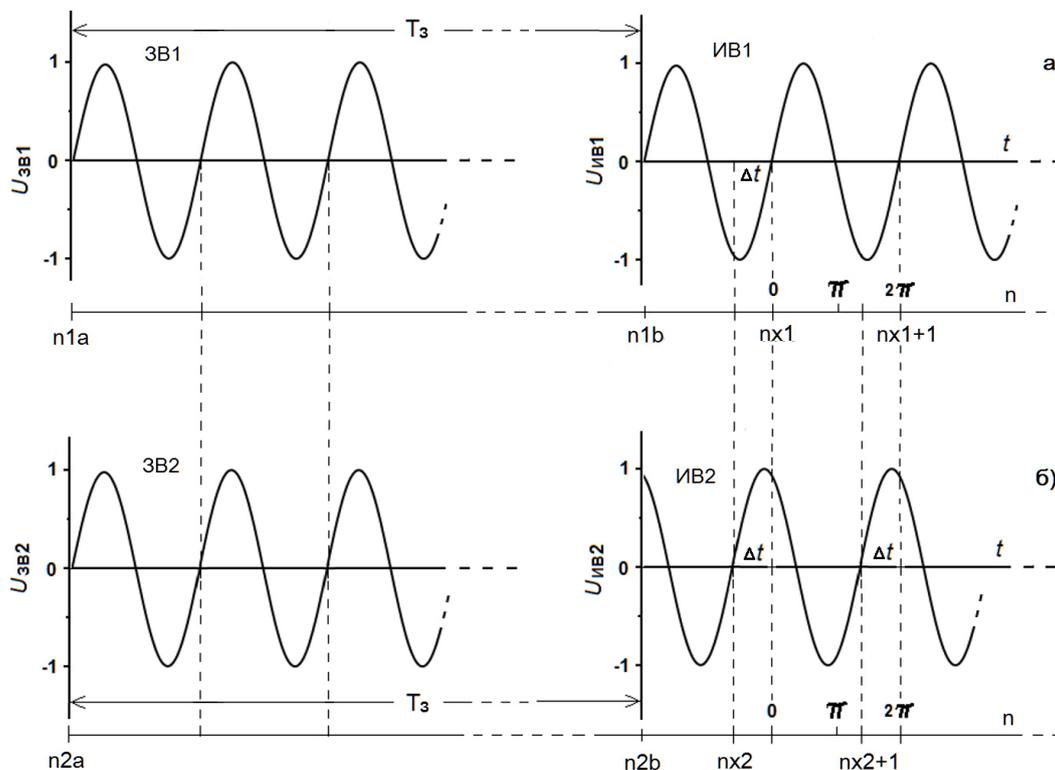


Рис. 3. Схема оценки разности фаз  $\Delta\varphi$  по дискретным отсчетам сигналов при двух тактах зондирования: на верхней панели а) представлены сигналы прямой волны ЗВ1 и ионосферной волны ИВ1 для первого такта зондирования; на нижней панели б) — сигналы прямой волны ЗВ2 и ионосферной волны ИВ2 для второго такта зондирования

Рассмотрим методику поиска  $nx1$  и  $nx2$  для получения величины  $\Delta t$ , которая определяет искомую разность фаз  $\Delta\varphi$ . Все характерные номера на рисунке 3 определяются по пересечениям нулей в точках роста амплитуды сигнала в такой последовательности:

1. Находим номер  $n1a$  по сигналу  $U_{ЗВ1}$ , а также номер  $n1б$  по сигналу  $U_{ИВ1}$  на такте 1, рисунок 3а.
2. Вычисляем величину  $\Delta n1 = n1б - n1a$ , которая соответствует фазовой задержке между сигналами  $U_{ИВ1}$  и  $U_{ЗВ1}$  на такте 1.
3. Находим дополнительные точки  $nx1 = n1б + K$  и  $nx2 = nx1 + K$  на сигнале  $U_{ИВ1}$ , между которыми разность фаз равна  $2\pi$ , рисунок 3а. Эти точки могут использоваться для уточнения вычисления  $\Delta n1$ .
4. Находим номер  $n2a$  для сигнала  $U_{ЗВ2}$  на 2-ом такте зондирования, (рис. 3б), при этом важно, чтобы колебания сигнала  $U_{ЗВ2}$  были синфазны колебаниям сигнала  $U_{ЗВ1}$  на рис. 3а (что показано штриховыми линиями).
5. Определяем номер  $n2б = n2a + \Delta n1$ , который попадает на отсчеты сигнала ИВ2 такта 2, и если сигнал  $U_{ИВ2}$  с номером  $n2б$  не проходит через ноль в фазе роста амплитуды, то значит сигнал  $U_{ИВ2}$  сдвинут по фазе относительно сигнала  $U_{ИВ1}$ .

6. Находим номер  $nx2$  — первое пересечение нуля сигналом  $U_{ив2}$  после  $n2б$ , а также следующее пересечение нуля — номер  $nx2 + N_{\lambda}$ , между этими номерами разность фаз равна  $2\pi$ , рис.3б.
7. Вычисляем величину  $\Delta n2 = nx2 - n2а$ , которая соответствует фазовой задержке между сигналами  $U_{ив2}$  и  $U_{зв2}$  на такте 2-ом такте.
8. Находим разность фаз между сигналами  $U_{ив2}$  и  $U_{ив1}$  —  $\Delta\varphi = \delta\varphi(\Delta n2 - \Delta n1)$ , что и требовалось определить.

Тогда формула (3) для величины  $f_d$  примет вид:

$$f_d = \delta\varphi(\Delta n2 - \Delta n1)/(360^\circ N_{\Pi}), [\text{Гц}]. \quad (7)$$

Для примера, оценим максимальную величину  $f_d$  в случае, если  $\Delta\varphi = 180^\circ$ ,  $F_T = 50$  Гц и  $T_{\Pi} = 20$  мс, тогда по формуле (3) получим  $f_d = 25$  Гц. Для измерения величины  $f_d \approx 0,1$  Гц необходимо измерять  $\Delta\varphi$  с погрешностью не хуже  $\sigma\varphi \approx 0,7^\circ$  и тогда для величины  $\delta\varphi$  получим оценку  $\delta\varphi \approx 0,35^\circ$ . Отсюда следуют требования к быстродействию АЦП и в рассмотренном примере число отсчетов  $K$  на один период колебания сигнала ПЧ должно быть  $K \approx 1000$ . Тогда, если положить  $f_{ПЧ} = 500$  кГц, получим необходимое быстродействие АЦП порядка  $F_K \approx 500$  МГц. Эта оценка  $F_K$  может быть уменьшена путем увеличения величины  $T_{\Pi}$ , тогда увеличится величина  $N_{\Pi}$  и, соответственно,  $\delta\varphi$ . С другой стороны, например, если снизить промежуточную частоту до  $f_{ПЧ} = 250$  кГц и одновременно вдвое увеличить период  $T_{\Pi}$ , то получим  $F_K \approx 125$  МГц и при этом сохранится оценка  $\delta\varphi \approx 0,35^\circ$ .

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДИКИ

Для экспериментальной проверки предлагаемой методики оценки  $f_d$  при ВЗ ионосферы были проведены тестовые измерения с помощью аппаратуры ионосферного комплекса «Базис-М» ИЗМИРАН. Были проведены два вида тестов: 1) аппаратурный тест радиоприемной системы комплекса «Базис-М»; 2) измерение  $f_d$  при вертикальном зондировании ионосферы на фиксированной частоте.

**Аппаратурный тест** проводился путем подачи тестового сигнала на антенный коммутатор радиоприемной системы комплекса «Базис-М» и при этом отсоединялась рабочая приемная антенна. Для тестового эксперимента использовалась аппаратура, предназначенная для быстрой регистрации ионограмм с помощью когерентных дискретно-частотных сигналов (ДЧС) и которая применялась в [Браницкий и др., 2020] для исследования быстрых вариаций высотных профилей ионосферы. Тестовый радиосигнал представлял собой серию парных импульсов ДЧС длительностью 320 мкс с несущими частотами вокруг основной частоты  $f = 2.12$  МГц. Две пары таких ДЧС импульсов моделировали собой два такта зондирования и при этом второй импульс ДЧС в каждой паре имел фиксированную задержку относительно первого импульса на величину 0.9 мс. В данных измерениях использовался первый из 4-х элементов импульса ДЧС, который имел несущую частоту  $f = 2.119$  МГц. Из этих пар импульсов формировалась серия сигналов с интервалом  $T_{\Pi} = 40$  мс между ними, и таким образом моделировалось ВЗ, при котором первый импульс пары представлял земную волну, а второй импульс — ионосферную волну. Сформированные таким образом радиосигналы подавались на антенный вход РПУ «Катран», с выхода усилителя 2-й ПЧ, (полоса пропускания которого была около 15 кГц) сигналы на несущей частоте 214 кГц поступали на вход модуля АЦП.

Модуль АЦП был встроен в ПЭВМ, где происходила регистрация сигнальных данных. Синхронизация цифрового синтезатора радиосигналов, опорной частота РПУ «Катран» и формирователя всех рабочих синхроимпульсов производилась от стандарта времени и частоты СЧВ-74. АЦП работал с тактовой частотой  $F_K = 100$  МГц и имел разрядность 16 бит, что обеспечивало амплитудный динамический диапазон регистрируемых сигналов не менее 80 дБ. При этом число отсчетов на один период сигнала ПЧ составляло  $K = 467$ , а величина дискрета по фазе имела значение  $\delta\varphi \approx 0.77$  град. Тогда, в соответствии с формулой (3), получим доплеровское разрешение  $\delta f_d \approx 0.05$  Гц, а погрешность измерения доплеровского смещения  $\Delta f_d$  оценить как  $\sigma f_d \approx 0.1$  Гц.

Для анализа получаемых сигнальных данных был разработан пакет специальных программ и экранный графический интерфейс, позволяющий с необходимой точностью определять точки пересечения нулевых значений уровня сигналов и находить с помощью манипулятора мышь характерные номера отсчетов в сигнальных данных.

На рисунках 4 и 5 представлены результаты аппаратного теста. Вид зарегистрированных сигналов аппаратного теста на экране ПЭВМ представлен на рисунке 4. На рисунке 4 уровень сигнала вблизи нуля имеет вид шумовой дорожки, который характеризует электрические помехи в РПУ и системе регистрации. При этом полезные сигналы значительно превышают уровень помех, оценка отношения сигнал/шум дает величину  $\mu \approx 30$  дБ.

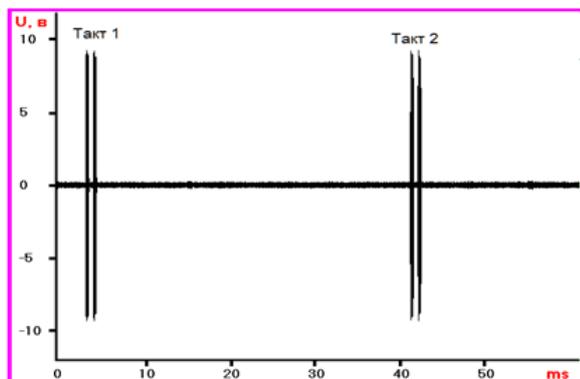


Рис. 4. Сигналы двух тактов аппаратного теста РПУ при моделировании ВЗ на частоте 2.12 МГц и  $F_T = 25$  Гц. Сеанс измерений в 12:34 МДВ 13.09.2018 г.

выбираем несколько точек пересечения нуля (в данном случае 5 точек для набора статистики), в которых амплитуда сигнала переходит через ноль от отрицательных значений к положительным.

На рисунке 5 представлен поэтапный процесс поиска характерных номеров для сигнала ЗВ для первого такта зондирования по данным, полученным в ходе проведения аппаратного тестирования приемно-регистрирующей системы ионозонда в сеансе измерений в 12:34 МДВ 13.09.2018 г. Здесь на рисунке 5а представлен этап начального просмотра цифрового массива данных о форме импульсного сигнала ЗВ для определения некоторого номера отсчета АЦП  $n$ , который соответствует переднему фронту импульса в момент достижения максимального уровня сигнала.

На следующем этапе, (рис. 5б), путем увеличения масштаба графического представления передней части сигнала, где сигнал имеет практически синусоидальный характер,

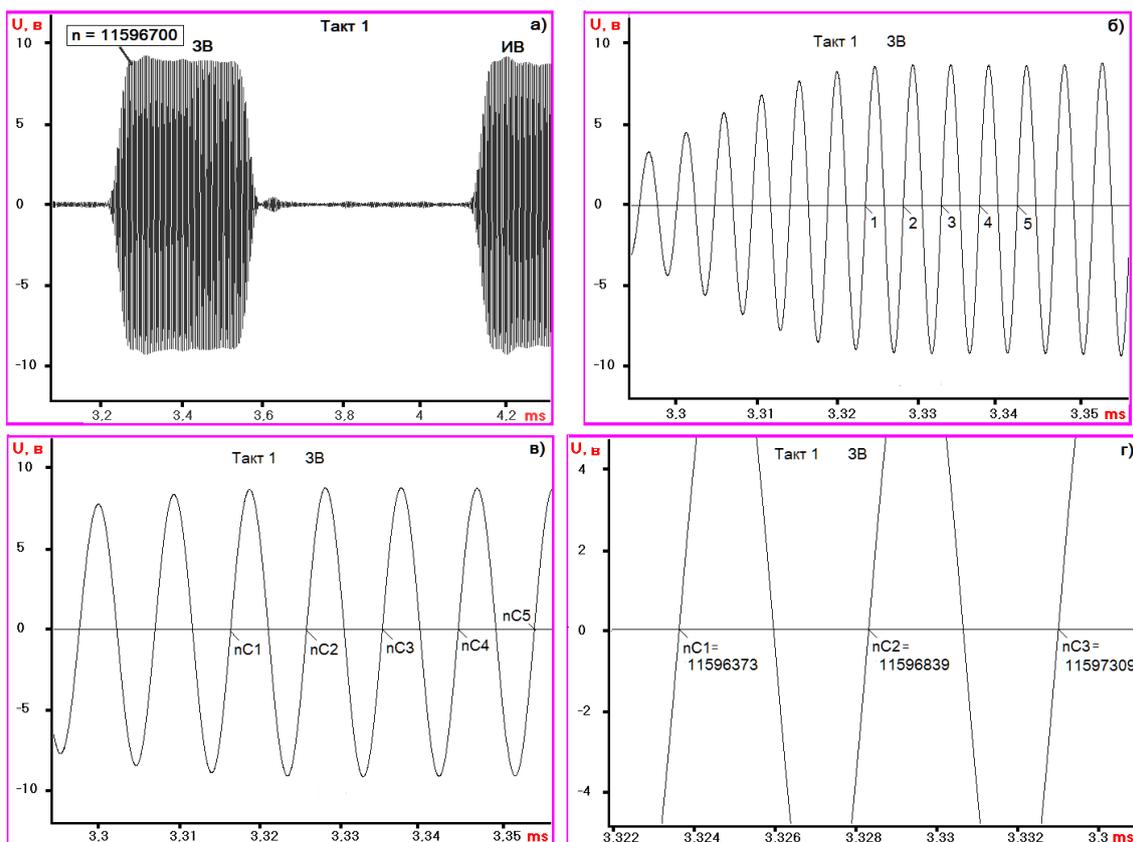


Рис. 5. Анализ данных аппаратного теста РПУ по моделированию вертикального зондирования ионосферы для 1-го такта сигнала ЗВ: а) вид сигнала ЗВ и предварительная оценка номера отсчета АЦП для начальной точки импульса ЗВ; б) начальный выбор 5-ти точек пересечения нуля для ЗВ; в) – уточнение начального выбора точек пересечения нуля  $nC1, nC2, \dots, nC5$  для ЗВ; г) определение характерных номеров  $n1$  и  $n16$  для 5-ти выбранных точек ЗВ. Сеанс измерений в 12:34 МДВ 13.09.2018 г.

На рисунке 5в при следующем увеличении масштаба графика сигнала ЗВ находим номера отсчетов  $nC1, nC2, \dots nC5$ , в которых происходит пересечение нулей и, наконец, при следующем увеличении масштаба графика, рис. 5г, окончательно находим численные значения номеров  $nC1, nC2, \dots nC5$  и для ряда характерных номеров  $n1a$ . Описанная процедура анализа данных была применена также для сигнала ИВ 1-го такта и получены значения характерных номеров  $n1б$ . Аналогичная процедура анализа была использована для данных 2-го такта сигналов ЗВ и ИВ аппаратного теста и получены значения характерных номеров  $n2a$  и  $nх2$ .

Используя полученные характерные номера находим разности номеров  $\Delta n1 = n1б - n1a$  для 1-го такта и  $\Delta n2 = nх2 - n2a$  для 2-го такта. Далее находим разность  $n\Delta\varphi = \Delta n2 - \Delta n1$  и, наконец, искомая величина  $\Delta\varphi$  вычисляется по формуле

$$\Delta\varphi = 0.77n\Delta\varphi. \quad (8)$$

Из таблицы 1 видно, что значения величины  $\Delta\varphi$  близки к нулевым значениям при среднем значении  $\langle\Delta\varphi\rangle \sim 0.2^\circ$  и это следует считать хорошим калибровочным показателем для использованной в измерениях аппаратуры.

Таблица 1. Результаты тестирования приемно-регистрирующей аппаратуры.

№ nC	Такт 1			Такт 2			nΔφ	Δφ, град
	n1a	n1б	Δn1	n2a	nх2	Δn2		
nC1	11596373	11686309	89936	15420793	15510733	89940	4	3.1
nC2	11596839	11686777	89938	15421261	15511199	89938	0	0
nC3	11597309	11687247	89938	15421731	15511669	89938	0	0
nC4	11597777	11687717	89940	15422199	15512139	89940	0	0
nC5	11598245	11688187	89942	15422669	15512607	89938	-2	-1.5

При этом отметим, что оценки величины погрешность  $\sigma\varphi$  зависит от аппаратного параметра  $\delta\varphi \approx 0.77^\circ$  и данном случае имеет значение  $\sigma\varphi \approx 1.5^\circ$ . Отсюда для величины погрешности доплеровского смещения  $\delta f_d$  по формуле (3) можно сделать оценку  $\delta f_d \approx 0.05$  Гц, что вполне достаточно для оценки величины доплеровского смещения  $f_d = \pm 0.1$  Гц.

**Эксперимент по ВЗ ионосферы** был проведен вслед за аппаратным тестом 13.09.2018 г., при этом описанный выше сигнал ДЧС поступал на передатчик комплекса «Базис-М» и излучался передающей антенной типа «дельта». Зондирование ионосферы проводилось на фиксированной частоте  $f = 2,119$  МГц с частотой повторения  $F_T = 25$  Гц и, соответственно,  $T_{\Pi} = 40$  мс. Прием отраженного от ионосферы сигнала осуществлялся на отдельную антенну также типа «дельта». На рисунках 6, 7, 8, 9 и 10 представлены результаты измерений, полученные в ходе сеанса зондирования в 13:34 МДВ 13.09.2018 г.

На рисунке 6 представлена цифровая осциллограмма зондирующих сигналов ПЧ на выходе РПУ, здесь наряду с сигналами ЗВ и ИВ для двух тактов зондирования присутствуют значительные сигналы помех, обусловленные реальной электромагнитной обстановкой в радиозфире. Видно, что амплитуда сигналов ЗВ имеют меньшую амплитуду, чем сигналы ИВ и это обусловлено тем, что антенны передатчика и РПУ разнесены в пространстве, а также тем, что плоскости их полотен ориентированы почти ортогонально. В данном случае оценка отношения сигнал/шум дает величину  $\mu \approx 15$  дБ, что значительно хуже по сравнению с условиями аппаратного теста.

На рисунке 7 представлены цифровые осциллограммы сигналов ЗВ и ИВ для 1-го такта зондирования, здесь величина задержка  $T_3$  между импульсами составляет  $\sim 0.9$  мс. Видно, что амплитуда сигналов вдоль импульсов испытывает значительные интерференционные вариации, что затрудняет выбор фрагментов сигнала для обработки и поэтому анализировались участки вблизи первых максимумов сигналов ЗВ и ИВ.

На рисунке 8 представлен поэтапный процесс анализа сигналов ЗВ и ИВ для 1-го такта зондирования и определение характерных номеров типа. На рисунке 8а показан этап просмотра цифрового массива данных импульсного сигнала ЗВ для выбора номеров отсчета АЦП в той части сигнала, где сигнал имеет установившийся вид и отмечаются точки пересечения нуля. Для

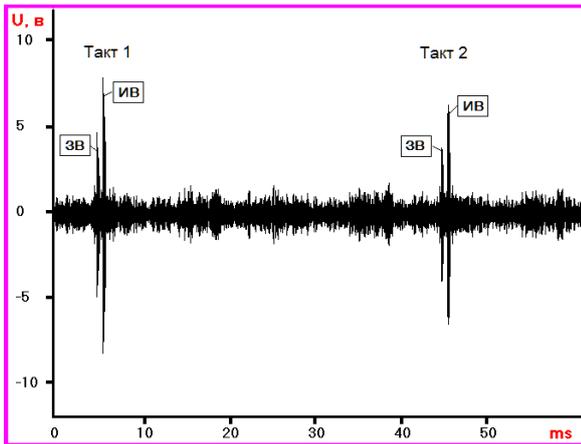


Рис. 6. Сигналы ПЧ на выходе РПУ в эксперименте по вертикальному зондированию ионосферы на частоте 2,119 МГц. Показаны сигналы ЗВ и ИВ для двух тактов зондирования при  $F_T = 25$  Гц. Сеанс зондирования в 13:34 МДВ 13.09.2018 г.

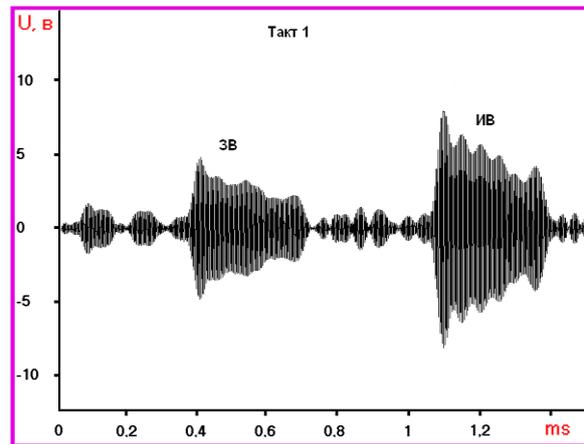


Рис. 7. Сигналы ПЧ на выходе РПУ в эксперименте по вертикальному зондированию ионосферы для 1-го такта – сигналы ЗВ и ИВ. Сеанс зондирования в 13:34 МДВ 13.09.2018 г.

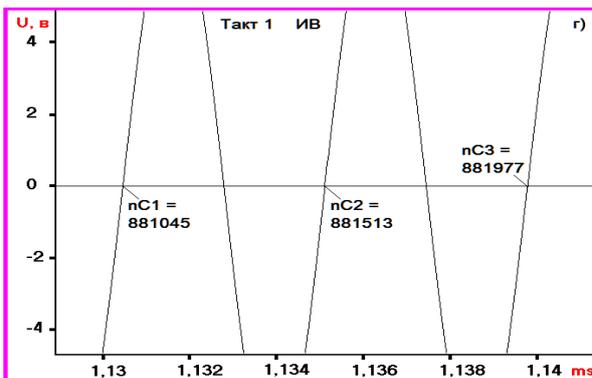
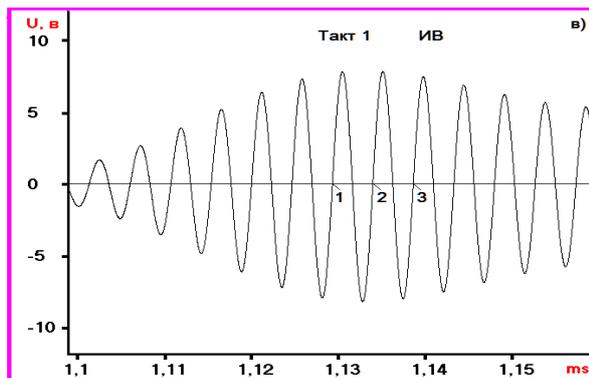
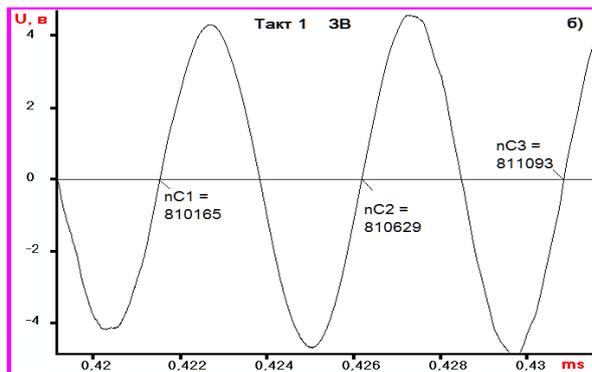
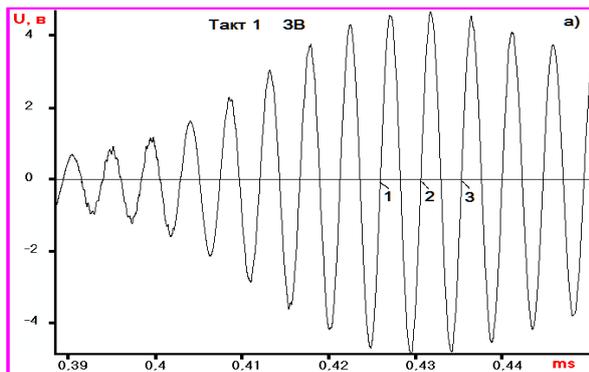


Рис. 8. Анализ экспериментальных данных по вертикальному зондированию ионосферы для 1-го такта сигнала ЗВ и ИВ: а) начальный выбор 3-х точек пересечения нуля для ЗВ; б) определение характерных номеров  $n1a$  и  $n1b$  для точек  $nC1$ ,  $nC2$  и  $nC3$  сигнала ЗВ; в) начальный выбор 3-х точек пересечения нуля для ИВ; г) определение характерных номеров  $n2a$  и  $n2b$  для точек  $nC1$ ,  $nC2$  и  $nC3$  сигнала ИВ. Сеанс зондирования в 13:34 МДВ 13.09.2018 г.

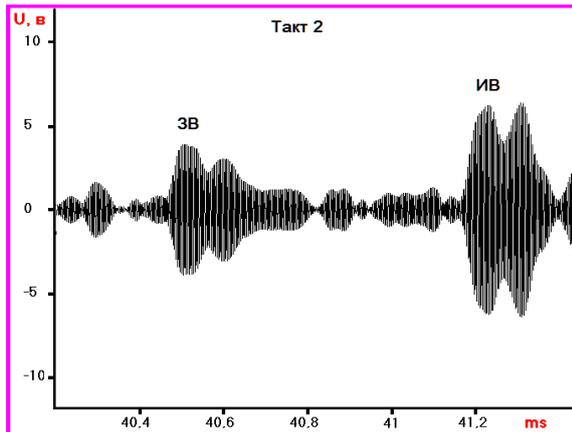


Рис. 9. Сигналы ПЧ на выходе РПУ в эксперименте по вертикальному зондированию ионосферы для 2-го такта – сигналы ЗВ и ИВ. Сеанс зондирования в 13:34 МДВ 13.09.2018 г.

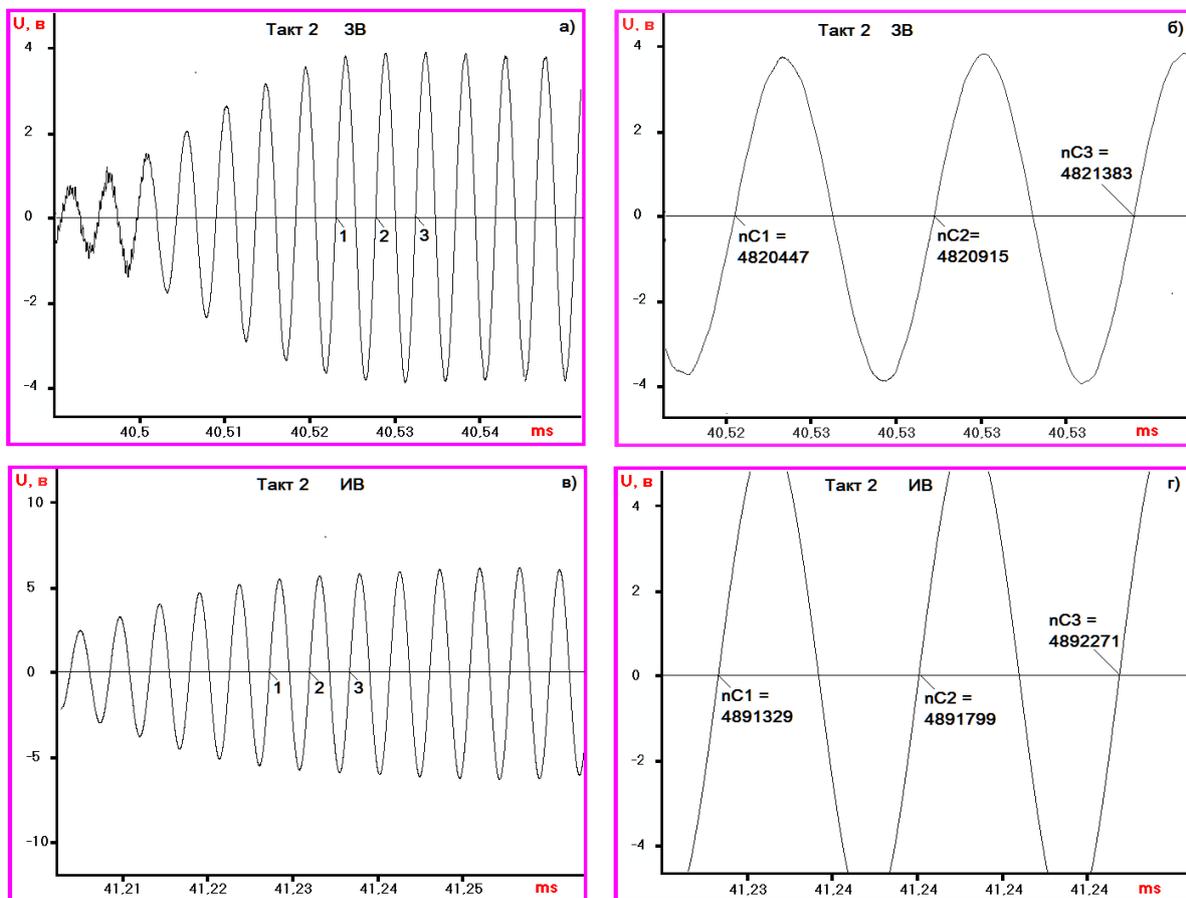


Рис. 10. Анализ экспериментальных данных по вертикальному зондированию ионосферы для 2-го такта сигнала ЗВ и ИВ: а) – начальный выбор 3-х точек пересечения нуля для сигнала ЗВ; б) – определение характерных номеров  $n1a$  и  $n1b$  для точек  $nC1$ ,  $nC2$  и  $nC3$  сигнала ЗВ; в) начальный выбор 3-х точек пересечения нуля для сигнала ИВ; г) определение характерных номеров  $n2a$   $n2b$  для точек  $nC1$ ,  $nC2$  и  $nC3$  сигнала ИВ. Сеанс зондирования в 13:34 МДВ 13.09.2018 г.

получения значений характерных номеров масштаб графика увеличивается и находятся значения номеров пересечений нуля  $nC1$ ,  $nC2$  и  $nC3$  для ЗВ, как показано на рисунке 8б. На рисунках 8в и 8г представлена такая же процедура анализа сигнала ИВ 1-го такта для определения номеров  $nC1$ ,  $nC2$  и  $nC3$ .

На рисунке 9 показан вид сигналов ЗВ и ИВ для 2-го такта зондирования, здесь величина задержка  $T_3$  между импульсами также составляет  $\sim 0.9$  мс и амплитуда сигналов вдоль импульсов имеет значительные вариации. На рисунке 10 представлен поэтапный процесс поиска характерных номеров: на рис. 10а и 10б — поиск номеров  $nC1$ ,  $nC2$  и  $nC3$  для сигнала ЗВ 2-го такта зондирования; на рис. 10в и 10г – поиск номеров  $nC1$ ,  $nC2$  и  $nC3$  для сигнала ИВ 2-го такта.

Результаты анализа сигналов, полученных в эксперименте по ВЗ, представлены в таблице 2, которая по показателям аналогична таблице 1. В таблице 2 показаны найденные характерные номера для сигналов ЗВ и ИВ: для 1-го такта — номера  $n1a$ ,  $n1б$  и их разность  $\Delta n1$ ; для 2-го такта — номера  $n2a$ ,  $nх2$  и их разность  $\Delta n2$ ; искомая разность фаз  $\Delta\varphi$ , вычисляемая по формуле (8).

Из таблицы 2 следует, что среднее значение  $\langle\Delta\varphi\rangle \approx 1.5^\circ$ , и оно близко к значению методической погрешности измерений  $\sigma\varphi = 2 \delta\varphi$ , т.е. при  $\delta\varphi = 0.77^\circ$  имеем  $\sigma\varphi = 1.54^\circ$ . Тогда для величины погрешности измерения доплеровской частоты  $\delta f_d$  по формуле (3) получим оценку  $\delta f_d \approx 0.1$  Гц. Полученное в эксперименте положительное значение  $\langle\Delta\varphi\rangle$  означает, что доплеровская частота  $f_d$  имеет отрицательный знак, что свидетельствует, в свою очередь, о снижении высоты точки отражения зондирующих радиоволн.

Таблица 2. Результат экспериментальных тестов.

№ nC	Такт 1			Такт 2			nΔφ	Δφ, град
	n1a	n1б	Δn1	n2a	nх2	Δn2		
nC1	810165	881045	70880	4820447	4891329	70882	2	1.5
nC2	810629	881513	70884	4820915	4891799	70884	0	0
nC3	811093	881977	70884	4821383	4892271	70888	4	3.1

Отметим, что выбор частоты зондирующего сигнала для эксперимента по ВЗ обусловлен тем, что радиоволны на частоте  $f \sim 2$  МГц в дневной ионосфере отражаются от E-слоя, для которого характерны слабые вариации во времени. Поэтому полученное доплеровское смещение  $f_d$  радиоволн, отражающихся от E-слоя ионосферы, будет незначительным и это позволяет провести оценку точности предлагаемой методики оценки  $f_d$ .

Таким образом можно считать, что аппаратура приемно-регистрирующей системы комплекса «Базис-М» позволяет с необходимой точностью реализовать предлагаемую здесь методику оценки величины  $f_d$  с использованием двух тактов зондирования с помощью ионозонда.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Погрешность предлагаемой методики зависит от ряда факторов, среди которых следует учитывать аппаратные, методические и сигнальные составляющие.

Аппаратные амплитудно-фазовые характеристики приемного и передающего трактов мало меняются на интервале времени между соседними зондирующими импульсами, что и было получено в ходе тестовых измерений приемно-регистрирующей системы ионозонда «Базис-М». Использование в системе синхронизации рубидиевого стандарта частоты обеспечило высокую точность цифрового синтеза зондирующих сигналов, а также стабильность фазовых характеристик, использованных РПУ типа «Катран». Кроме того, была обеспечена высокая точность работы АЦП, которая позволила проводить полностью цифровую обработку фазы сигналов с точностью в сотые доли градуса.

Методика оценки разности фаз между двумя отраженными от ионосферы радиосигналов с учетом разности фаз прямых сигналов ЗВ позволила практически исключить влияние аппаратного фактора на точность оценки разности фаз и, соответственно, на точность оценки доплеровского сдвига частоты.

Существенное влияние на фазовые измерения могут оказывать различного рода шумы в аппаратуре, а также электромагнитные помехи от промышленных источников и излучения радиостанций. Проведенные измерения показали, что при отношении сигнал/шум  $\mu \approx 15$  дБ приводит к погрешности в оценке разности фаз  $\approx 1.5^\circ$  и, соответственно, дает погрешность измерения

доплеровской частоты  $\approx 0.1$  Гц. Обычно в ионозондах ВЗ отношение сигнал/шум при отражении зондирующих сигналов от  $F$ -слоя ионосферы больше (порядка  $\mu \approx 40$  дБ), чем при отражении от  $E$ -слоя ионосферы, поэтому применение данной методики может использоваться при регистрации ионограмм ВЗ с помощью сетевых ионозондов, например, типа ПАРУС-А.

Важно отметить, что для использования данной методики необходимо, чтобы система цифровой регистрации позволяла хранить достаточно большие массивы данных. Это связано с тем, что размер сигнального массива данных для двух тактов зондирования на одной частоте составляет  $\sim 50$  МБ и тогда размер файла ионограммы, например, на 400 частот будет иметь объем данных  $\sim 20000$  МБ. С другой стороны, для доплеровского мониторинга динамики возмущений на высотах от 110 км на частотах  $\sim 2$  МГц до высот 250 км на частотах  $\sim 10$  МГц можно использовать меньшее число рабочих частот, например, 128 частот.

При использовании ионозондов для наблюдения быстрых процессов во всей толще ионосферы с масштабами по времени развития в несколько секунд можно использовать методику быстрой регистрации ионограмм (за время  $\sim 2$  с), предложенной в [Браницкий и др., 2020]. Это позволит методом ВЗ исследовать динамику искусственных ионосферных возмущений, вызываемых нагревом ионосферы мощным радиоизлучением или инъекцией различных плазмообразующих веществ с борта ИСЗ, а также проводить мониторинг быстрой реакции ионосферы в начальной фазе развития вспышки на Солнце.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана новая методика измерения доплеровского смещения частоты при вертикальном зондировании ионосферы. Методика основана на оценке разности фаз отраженных от ионосферы сигналов при двух тактах зондирования. Проведена экспериментальная проверка методики, в ходе которой проверены аппаратные решения с использованием ионозонда «Базис-М», а также проведены измерения доплеровского смещения частоты сигналов, отраженных от  $E$ -слоя ионосферы.

Показано, что предлагаемая методика позволяет измерять доплеровское смещение частоты зондирующих сигналов с точностью 0.1 Гц за интервал времени 40 мс.

Развитие экспериментальной методики быстрого измерения доплеровских характеристик зондирующих сигналов может проводиться на базе существующих аппаратных решений путем модернизации цифровой регистрирующей аппаратуры. Для этого необходима разработки специализированных программных решений, связанных с обработкой больших массивов данных, а также совершенствование методов анализа ионограмм.

Разработанная методика позволяет, в принципе, создавать специализированные ионосферные станции для мониторинга динамики ионосферных возмущений различной природы на высотах от  $E$ -слоя до высоты максимума слоя  $F2$  с высоким разрешением по времени,

## ЛИТЕРАТУРА

- Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин / Атамалян Э.Г. Высшая школа, М. 1982, 223 с.
- Афраймович Э. Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы / Наука. М. 1982. 197 с.
- Браницкий А.В., Ким В.Ю., Полиматиди В.П. Исследование быстрых вариаций электронной концентрации в ионосфере // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 60. № 1. С. 1–18. 2020.
- Галахова О.П., Колтин Е.Д., Кравченко С.А. Основы фазометрии / Энергия, Ленинград. 1976. 256 с.
- Кедем Б. Спектральный анализ и различение сигналов по пересечениям нуля // ТИИЭР. Т. 74. № 11. 1976. С. 6–25.
- Ким В.Ю. Обратная задача многочастотной доплеровской диагностики искусственных ионосферных возмущений // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 31. № 2, С. 329–333. 1991.
- Ким В.Ю. Доплеровская диагностика искусственных возмущений электронной концентрации в ионосфере / Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Т. 1–3 «Ионосферная плазма». Ч. 2. М.: Янус-К. 2009. С. 399–407.

- *Намазов С. А., Новиков В. Д., Хмельницкий И. А.* Доплеровское смещение частоты при ионосферном распространении радиоволн (обзор) // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 4. С. 473–500.
- *Панченко В. А.* Ионозонд DPS-4. Десять лет в ИЗМИРАН // Системный мониторинг ионосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ. 416 с. ISBN 978-5-9221-1878-1, 2019.
- *Wright J. W. and Pitteway M. L. V.* Data processing for Dinasonde: The Dopplionogram // J. Geophys. Res. Vol. 87. №. A3. P. 1589–1598. 1982a.
- *Wright J. W. and Pitteway M. L. V.* Application of dopplionograms and gonionograms to atmospheric gravity wave disturbances in the ionosphere // Geophys. Res. Vol. 87. №A3. P. 1719–1721. 1982b.
- *Wright J. W. and Pitteway M. L. V.* A new data acquisition concept for digital ionosondes: Phase-based echo recognition and real-time parameter estimation // Radio Sci. Vol. 34. № 4. P. 871–882. 1999.

## THE DOPPLER FREQUENCY SHIFT ESTIMATION AT VERTICAL RADIO SOUNDING OF THE IONOSPHERE

Kim V. Yu.

A new technique for fast measurement of the Doppler frequency shift of radio waves during vertical radio sounding of the ionosphere is presented. The technique is based on measuring the instantaneous phase shift of reflected radio signals using the zero-crossing method over a time interval equal to the repetition period of the probing pulses. It is shown that the proposed technique allows measuring the Doppler frequency shift of probing signals with an accuracy of 0.1 Hz over a time interval of 40 ms. The technique will allow recording Doppler ionograms during one frequency scan.

**KEYWORDS:** IONOSPHERE, VERTICAL RADIO SOUNDING, DOPPLER FREQUENCY SHIFT