

УДК: 087.2 + 537.87

DOI: 10.26907/rwp29.2025.118-121

МЕТОДИКА БЫСТРОЙ ОЦЕНКИ ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ ЗОНДИРОВАНИИ ИОНОСФЕРЫ

В.Ю. Ким

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Земного
Магнетизма, Ионосферы и Распространения Радиоволн им Н.В. Пушкова Российской
академии наук (ИЗМИРАН)*

108840, Россия, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4, ИЗМИРАН

E-mail: vkim@izmiran.ru

Аннотация. Представлена новая методика измерения доплеровского сдвига частоты радиоволн при вертикальном зондировании ионосферы, основанная на оценке мгновенной разности фаз отраженных радиосигналами методом пересечения нуля. Показано, что предлагаемая методика позволяет измерять доплеровское смещение частоты зондирующих сигналов с точностью 0.1 Гц за интервал времени 40 мс.

Ключевые слова: ионосфера, вертикальное зондирование, доплеровское смещение частоты

TECHNIQUE OF FAST DOPPLER FREQUENCY SHIFT ESTIMATION AT VERTICAL RADIO SOUNDING OF THE IONOSPHERE

Abstract. 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.

Keywords: ionosphere, vertical radio sounding, Doppler frequency shift

Введение

Доплеровский метод радиозондирования широко применяется для исследования ионосферных возмущений различной природы при их мониторинге методами наклонного (НЗ) и вертикального (ВЗ) зондирования [1]. 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.

Целью данной работы является разработка методики быстрой оценки доплеровского смещения частоты радиоволн при вертикальном зондировании ионосферы.

Методика и алгоритм определения доплеровского смещения частоты

Как известно, доплеровский сдвиг частоты сигнала f_D определяется формулой

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

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

При импульсном ВЗ в режиме излучения двух импульсов на одной частоте зондирования f с периодом следования импульсов T_{Π} в качестве интервала времени измерения T можно использовать величину T_{Π} . На рисунке 1 схематически показана нормированная амплитуда $U(t)$ импульсных сигналов на выходе приемного устройства ионозонда для двух последовательных тактов зондирования.

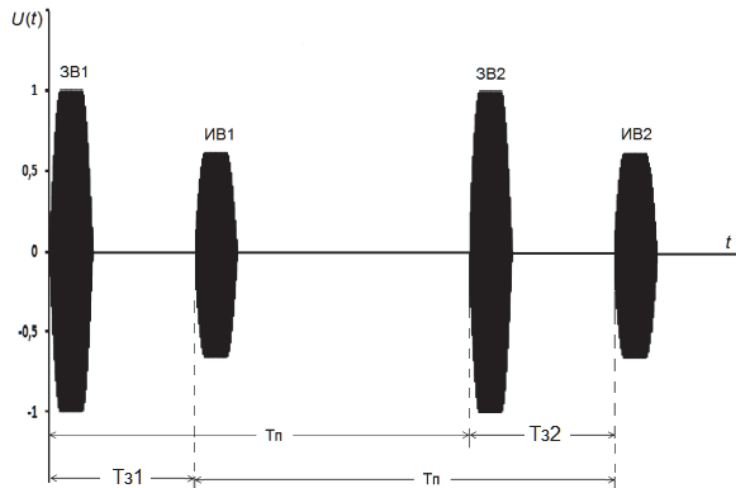


Рис. 1. Схема расположения на оси времени задержки t сигналов земной волны (ЗВ1 и ЗВ2) и отраженных ионосферных сигналов (ИВ1) и (ИВ2) для двух тактов зондирования с периодом следования импульсов T_n . Групповая задержка сигнала для первого такта обозначена $T_{з1}$, для второго такта зондирования обозначена $T_{з2}$

Тогда для оценки f_d по формуле (1) можно использовать её конечно-разностный вариант

$$f_d = -\Delta\varphi / (2\pi T_n), \quad (2)$$

где $\Delta\varphi = \varphi_2(t_2) - \varphi_1(t_1)$ - разность значений фаз между сигналами ИВ1 и ИВ2 в моменты времени $t_1 = T_{з1}$ и $t_2 = t_1 + T_n$. 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 [2], [3], [4]. Такой принцип измерения разности фаз с использованием современных цифровых технологий может быть использован для оценки величин $\Delta\varphi$ и f_d при вертикальном зондировании ионосферы.

Если сигнал $U(t)$ с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) преобразовать в сигнальный массив данных с тактовой частотой F_k , в котором содержатся результаты оцифровки амплитуды для всех номеров n отсчетов АЦП в двух тактах зондирования, то на одном периоде сигнала $U(t)$ с несущей частотой $f_{пч}$ будет получено K отсчетов сигнала $U(t)$

$$K = F_k / f_{пч}, \quad (3)$$

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

$$\delta\varphi = 2\pi / K. \quad (4)$$

На рис. 2 показана схема оценки разности фаз $\Delta\varphi$ между сигналами ИВ1 и ИВ2, соответствующие отражения радиоволн от ионосферы для двух последовательных тактов зондирования, а разность фаз $\Delta\varphi$ между ними определяется фазовой задержкой Δt . Для оценки фазовой задержки Δt по отсчетам n необходимо определить значения характерных номеров, определяются по пересечениям нулей в точках роста амплитуды сигнала. Тогда величина Δn будет получена как разность $(n_{x2} - n_{x1})$ и получим $\Delta t = (n_{x2} - n_{x1}) / F_k$. и вместо формулы (2) для величины f_d получим формулу

$$f_d = \delta\varphi(n_{x2} - n_{x1}) / (360^\circ N_{п}), [\text{Гц}]. \quad (5)$$

где величина $N_{п}$ – число отсчетов АЦП на интервале T_n .

Поэтапный алгоритм поиска номеров n_{x1} и n_{x2} следующий:

- 1). Находим номер n_{1a} по сигналу $U_{ЗВ1}$, а также номер $n_{1б}$ по сигналу $U_{ИВ1}$ на такте 1, рис. 3а.
- 2). Вычисляем величину $\Delta n_1 = n_{1б} - n_{1a}$, которая соответствует фазовой задержке между сигналами $U_{ИВ1}$ и $U_{ЗВ1}$ на такте 1.
- 3). Находим дополнительные точки $n_{x1} = n_{1б} + K$ и $n_{x2} = n_{x1} + K$ на сигнале $U_{ИВ1}$, между которыми разность фаз равна 2π , рис. 3а. Эти точки могут использоваться для уточнения вычисления Δn_1 .

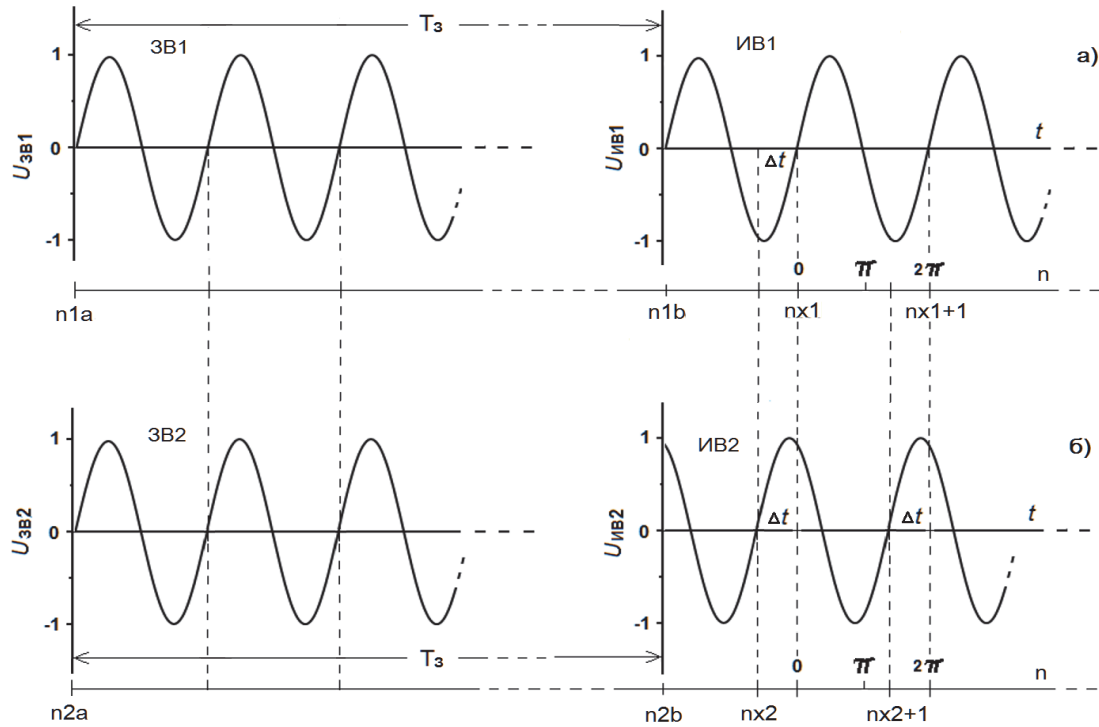


Рис. 2. Схема оценки разности фаз $\Delta\varphi$ по дискретным отсчетам сигналов при двух тактах зондирования: на верхней панели а) представлены сигналы прямой волны ЗВ1 и ионосферной волны ИВ1 для первого такта зондирования; на нижней панели б) - сигналы прямой волны ЗВ2 и ионосферной волны ИВ2 для второго такта зондирования.

4). Находим номер n_{2a} 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 $n_{2б} = n_{2a} + \Delta n_1$, который попадает на отсчеты сигнала ИВ2 такта 2, и если сигнал $U_{ИВ2}$ с номером $n_{2б}$ не проходит через ноль в фазе роста амплитуды, то значит сигнал $U_{ИВ2}$ сдвинут по фазе относительно сигнала $U_{ИВ1}$.

6). Находим номер n_{x2} – первое пересечение нуля сигналом $U_{ИВ2}$ после $n_{2б}$, а также следующее пересечение нуля – номер $n_{x2} + N_\lambda$, между этими номерами разность фаз равна 2π , рис. 3б.

7). Вычисляем величину $\Delta n_2 = n_{x2} - n_{2a}$, которая соответствует фазовой задержке между сигналами $U_{ИВ2}$ и $U_{ЗВ2}$ на такте 2-ом такте.

8). Находим разность $n\Delta\varphi = \Delta n_2 - \Delta n_1$ и, наконец, искомая величина $\Delta\varphi$ вычисляется по формуле

$$\Delta\varphi = \delta\varphi + n\Delta\varphi. \quad (6)$$

Предлагаемая методика была опробована в ходе эксперимента по ВЗ ионосферы с помощью ионозонда «Базис-М», при котором зондирование ионосферы проводилось на фиксированной частоте $f = 2,119$ МГц с частотой повторения $F_T = 25$ Гц и, соответственно, $T_{\Pi} = 40$ мс. В приемном тракте использовалось РПУ «Катран», из которого с выхода усилителя 2-й ПЧ сигналы на несущей частоте 214 кГц поступали на вход модуля АЦП. Модуль 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 количество отсчетов K на один период несущей частоты сигнала ПЧ составляло $K = 467$, а величина дискрета по фазе имела значение $\delta\varphi \approx 0.77$ град.

Результаты анализа сигналов, полученных в эксперименте по ВЗ, представлены в Таблице 2, в которой приведены характерные номера для трех подряд пересечений нуля ($nC1$, $nC2$, $nC3$) сигналов ЗВ и ИВ: для 1-го такта – номера $n1a$, $n1б$ и их разность $\Delta n1$; для 2-го такта – номера $n2a$, n_{x2} и их разность $\Delta n2$; искомая разность фаз $\Delta\varphi$, вычисляемая по формуле (6).

Таблица 2. Результат экспериментальной проверки методики

-	Такт 1	Такт 1	Такт 1	Такт 2	Такт 2	Такт 2	-	-
№ nC1	n1a	n1б	$\Delta n1$	n2a	nх2	$\Delta n2$	n $\Delta\varphi$	$\Delta\varphi$, град
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

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 δf_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 может свидетельствовать, в свою очередь, о повышении высоты точки отражения зондирующих радиоволн. 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 .

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,

Список литературы

1. Афраймович Э. Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы. – М.: Наука, 1982. – 197 с.
2. Галахова О.П., Колтин Е.Д., Кравченко С.А. Основы фазометрии. – Ленинград: Энергия, 1976. – 256 с.
3. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин. – М.: Высшая школа, 1982. – 223 с.
4. Кедем Б. Спектральный анализ и различение сигналов по пересечениям нуля // ТИИЭР. – 1976. – Т. 74. – № 11. – С. 6–25.