

## Методика измерения доплеровского смещения частоты многолучевого сигнала

А. В. Браницкий, В. Ю. Ким, В. П. Полиматиди, В. А. Пучков

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им Н.В. Пушкова Российской академии наук, 142190, г. Москва, г. Троицк/ e-mail: puchkovint@mail.ru*

*Представлена новая методика быстрого измерения доплеровского сдвига частоты радиоволн при КВ диагностике ионосферных неоднородностей. Методика основана на измерении мгновенного сдвига фазы отраженных радиосигналов на основе метода пересечения нуля на интервале времени, равном периоду повторения зондирующих импульсов. Показано, что при исследовании сигналов обратного ракурсного рассеяния от искусственных неоднородностей можно получить оценку общего дрейфа области возмущения, а также оценку относительного дрейфа различных областей формирования рассеянных сигналов.*

*A new technique is presented of a fast Doppler frequency shift measurements during HF diagnostics of ionospheric irregularities. The technique is based on measurements of the instant phase shift of reflected radio signals with the help of the zero-crossing method at a time interval equal to the sounding pulse repetition period. It is shown that when investigating the aspect sensitive signals backscattered from artificial irregularities we can estimate total drift of the modified region, as well as relative drifts of different subregions where scattered signals are generated.*

### Введение

Доплеровский метод диагностики широко применяется при исследовании ионосферных возмущений различной природы [1, 2]. Одним из информативных методов диагностики искусственных возмущений в ионосфере является многочастотный доплеровский метод радиозондирования, который позволяет путем решения обратной задачи диагностики определить интенсивность и пространственно-временные характеристики искусственных возмущений [3, 4]. При этом были исследованы возмущения с характерными временами развития в несколько секунд. Вместе с тем искусственные мелкомасштабные возмущения, возникающие, например, при нагреве ионосферы мощными КВ радиоволнами, могут развиваться в доли секунды. Поэтому возникает задача повышения временного разрешения доплеровских измерений при радиозондировании ионосферных неоднородностей. Эта задача актуальна при радиолокационных наблюдениях процессов развития мелкомасштабных ионосферных неоднородностей, сильно вытянутых вдоль геомагнитного поля. Эти неоднородности исследуются путём наблюдения ракурсного рассеяния радиоволн, что позволяет определить ряд параметров рассеивающей области, такие как ее размер, форма, масштаб и распределение неоднородностей.

**Целью работы** - разработка методики быстрого измерения доплеровского смещения частоты радиосигналов, отраженных от ионосферных неоднородностей.

### Измерение доплеровского сдвига частоты

Рассматриваемая здесь методика быстрой оценки доплеровского смещения частоты основана на оценке мгновенного сдвига фазы между двумя последующими зондирующими импульсами.

Рассмотрим импульсный сигнал длительностью  $\tau$  с несущей частотой  $\omega$

$$U(t) = U_0(t) \cos(\omega t - \varphi(t)), \quad (1)$$

где  $U_0(t)$  – медленно меняющаяся огибающая импульса,

$\varphi(t)$  – медленно меняющаяся фаза,

$t$  – время распространения сигнала по трассе распространения.

Здесь медленность означает, что длительность импульса  $\tau$  много больше периода несущей частоты  $\omega$ . Доплеровский сдвиг частоты определяется формулой

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

В ионосферных исследованиях для измерения доплеровского смещения частоты обычно используют спектральные методы, при которых анализируется серия зондирующих импульсов [2,3]. При этом для получения оценки доплеровского смещения с точностью  $\sim 0,1$  Гц время измерения должно составлять  $\sim 10$  секунд. Для уменьшения времени анализа при доплеровском зондировании искусственного возмущения в работе [4] использовался метод максимальной энтропии для оценки периода колебаний низкочастотного сигнала смещённой квадратурной компоненты и было получено временное разрешение  $\sim 1$  сек.

Для уменьшения времени оценки  $f_D$  по формуле (2) можно использовать её конечно-разностный вариант

$$f_D = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta\tau}, \quad (3)$$

где  $\Delta\varphi = \varphi_2(t_2) - \varphi_1(t_1)$  - разность мгновенных значений фазы сигнала в моменты  $t_1$  и  $t_2$ .

Величины мгновенных значений фаз  $\varphi_1(t_1)$  и  $\varphi_2(t_2)$  могут определяться путём анализа волновой формы квазигармонического сигнала типа (1) методом пересечения нуля, который применяется в аппаратуре измерения величины сдвига фазы гармонических сигналов [5], а также для оценки спектров сложных сигналов [6]. Такой анализ с использованием современных цифровых технологий может быть весьма эффективным для быстрой оценки величин  $\Delta\varphi$  и  $f_D$ .

При импульсном КВ зондировании ионосферы обычно используют импульсы длительностью  $\tau \sim 100$  мсек и частотой повторения от 10 Гц до 100 Гц, т.е. интервал времени между соседними импульсами  $\Delta t = t_2 - t_1$  может составлять величину от 10 мс до 100 мс. Поэтому приёмный канал можно считать идентичным для двух последующих зондирующих импульсов. Если для каждого излученного передатчиком импульса в пункте приёма с выхода приёмника регистрировать прямой сигнал (от земной волны) и отраженный от ионосферы сигнал, то прямой сигнал может использоваться для калибровки измерения  $\Delta\varphi$  сигнала.

Допустим, что с помощью высокоскоростного АЦП зарегистрированы два последующих сигнала А и В – суть волновые формы сигналов промежуточной частоты на выходе радиоприёмника в моменты  $t_1$  и  $t_2$ , Рис.1. При этом полагаем, что на один период колебаний сигнала приходится порядка 100 отсчетов АЦП. Начало кривых А и В отстоит на одну и ту же величину и отсчитывается от специального синхроимпульса. Видно, что моменты пересечения нуля обеими кривыми (например, в точках х и у) не совпадают. Тогда разность фаз сигнала в соседних импульсах  $\Delta\varphi_{\text{сигн}}$ , соответствующая временному интервалу  $\Delta t$  между моментами пересечения нуля х и у, определяется по известной формуле

$$\Delta\varphi_{\text{сигн}} = 2\pi \times \Delta t / T, \quad (4)$$

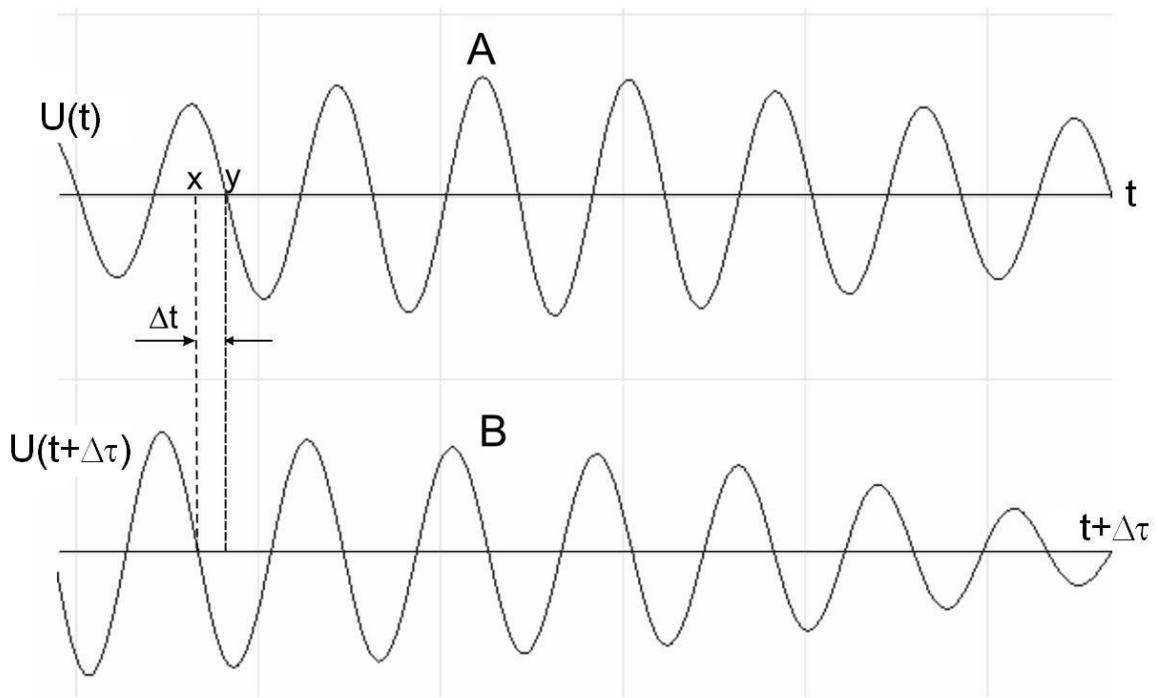
где  $T$  – период (т.е. период сигнала на промежуточной частоте).

В (4) необходимо учесть начальный сдвиг фазы между излучаемыми передатчиком сигналами прямой (земной) волны, к которым можно применить ту же процедуру (4) и получить начальный сдвиг фазы прямой волны  $\Delta\varphi_{ПВ}$ .

Тогда для оценки доплеровского сдвига частоты в соответствии с (3) получим формулу

$$f_D = (\Delta\varphi_{СИГН} - \Delta\varphi_{ПВ}) / \Delta\tau / 2\pi, \quad (5)$$

где  $\Delta\tau$  - интервал времени между двумя зондирующими импульсами.



**Рис.1. Волновые формы двух последующих сигналов А и В, x и y – две ближайшие точки пересечения нуля соответственно кривыми В и А.**

Тогда для оценки доплеровского сдвига частоты в соответствии с (3) получим формулу

$$f_D = (\Delta\varphi_{СИГН} - \Delta\varphi_{ПВ}) / \Delta\tau / 2\pi, \quad (5)$$

где  $\Delta\tau$  - интервал времени между двумя зондирующими импульсами.

Описанная методика применима лишь в том случае, если сдвиг фаз между сигналами в соседних зондирующих импульсах не превышает  $\pi$ . Отметим, что выполнения данного условия всегда можно добиться, уменьшая интервал времени между зондирующими импульсами  $\Delta\tau$ . Однако при этом, если не изменяется скорость АЦП, будет возрастать и ошибка определения доплеровского сдвига частоты.

Точность определения сдвига фазы  $\delta\varphi$  и доплеровского сдвига  $\delta F$  зависит от соотношения между промежуточной частотой  $f_{ПЧ}$  и частотой дискретизации АЦП  $f_{АЦП}$

$$\delta\varphi = 2\pi f_{ПЧ} / f_{АЦП} \quad (6,a)$$

$$\delta F = (\delta\varphi) / \Delta\tau / 2\pi \quad (6,b)$$

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

Фазовые сдвиги в приемном и передающем трактах, зависящие от аппаратных характеристик, мало меняются на интервале между соседними зондирующими импульсами. Это можно показать путем калибровки системы регистрации. Поскольку при расчете доплеровского сдвига частоты мы берем разности фаз прямой и рассеянной волн, упомянутые фазовые сдвиги вычитаются и не дают существенного вклада в погрешность измерений

Непосредственные измерения с помощью АЦП показывают, что уход фазы прямой волны за время измерения доплеровского сдвига частоты как минимум на порядок меньше, чем сдвиг фазы, вызванный нестационарными процессами в ионосфере. Поэтому в наших экспериментах фазу прямой волны на всей длине зондирующего импульса можно считать постоянной. Амплитуда принимаемого сигнала в наших экспериментах на порядок превышает амплитуду шумов. Поэтому шумы также не оказывают существенного влияния на погрешность измерений.

Так как при нахождении доплеровского сдвига вычисляется разность фаз, максимальная ошибка определения доплеровского сдвига частоты удваивается и может составить  $2\delta F$ . В условиях нашего эксперимента при  $\Delta\tau = 40$  мс,  $f_{ПЧ} = 128$  КГц и  $f_{АЦП} = 10$  МГц получим точность определения доплеровского сдвига частоты  $2\delta F \cong 0.5$  Гц.

Подчеркнем, что для достижения такой точности методами обычного спектрального анализа требуется интервал наблюдения порядка  $1/\delta F \cong 2$  с, что значительно превышает интервал  $\Delta\tau = 40$  мс. Как следует из формул (6), точность  $\delta F$  может быть существенно повышена путем увеличения частоты дискретизации АЦП.

Еще одна возможность уменьшения погрешности оценки доплеровского сдвига частоты заключается в более точном нахождении точки пересечения нуля путём линейной интерполяции значений дискретных отсчетов амплитуды сигнала в окрестности перехода нуля.

### **Экспериментальные исследования**

Эксперимент по наблюдению сигналов обратного ракурсного рассеяния радиоволн от области искусственного возмущения ионосферы над стендом «Сура» проводился в июне 2009 г. Нагрев ионосферы осуществлялся на частоте 4,55 МГц. Передатчик «Базис-М» излучал когерентные импульсы на частоте 9,15 МГц с частотой повторения 25 Гц. Передающая и приемная антенны для зондирующего сигнала находились на территории ИЗМИРАН, г. Москва (см. рис. 2). Как видно из рисунка, взаимное расположение нагревного стенда и диагностического комплекса обеспечивает оптимальный режим рассеяния, когда зондирующая волна распространяется в возмущенной области ортогонально вытянутым мелкомасштабным неоднородностям. На Рис. 3 приведена упрощенная блок-схема экспериментальной установки, в которой используется в основном промышленная аппаратура. Рубидиевый стандарт СЧВ-74 обеспечивает когерентность всех используемых в установке сигналов. В качестве задающего генератора для передатчика используется синтезатор прямого синтеза ЧБ-31. Блок стробов обеспечивает синхронизацию импульсов радиосигнала, строба защиты РПУ и синхроимпульса запуска АЦП. Принимаемый радиосигнал из антенно-фидерного устройства (АФУ) поступает в блок защиты РПУ, а затем поступает во входной тракт РПУ типа Р-155 («Брусника»), в котором происходит основная аналоговая обработка сигналов.

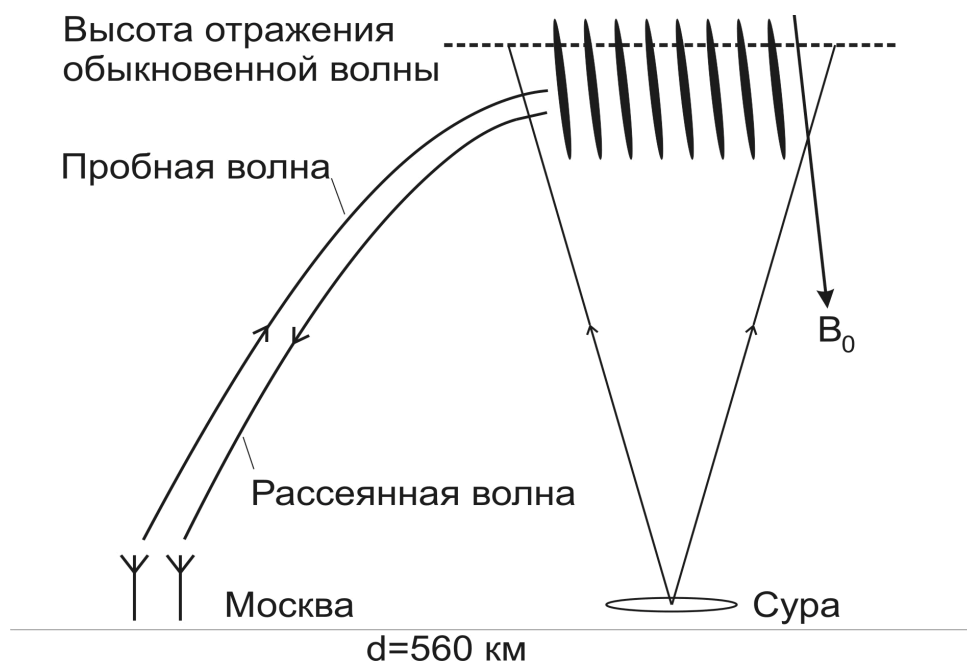


Рис. 2. Схема эксперимента. Вытянутые заштрихованные эллипсы условно обозначают искусственные мелкомасштабные неоднородности.  $B_0$  – направление геомагнитного поля в области нагрева

Сигнал "строб" управления блоком защиты имеет длительность  $\sim 400$  мксек и подается с некоторым упреждением, которое устанавливается в блоке стробов и синхроимпульса (СИ). Сигнал с выхода УПЧ на частоте 128 КГц поступает на АЦП и далее записывается в память ПЭВМ

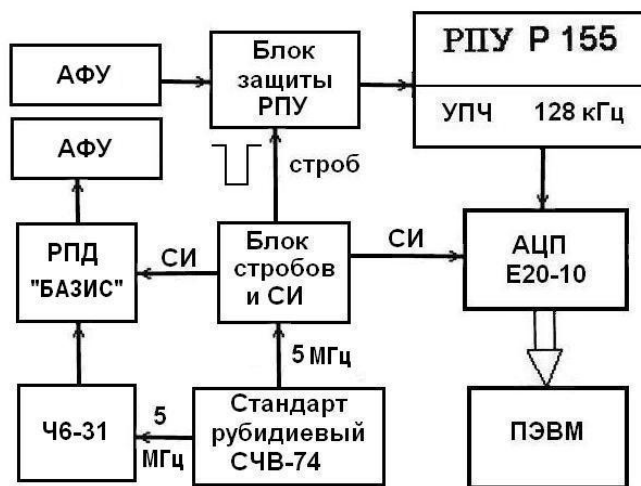


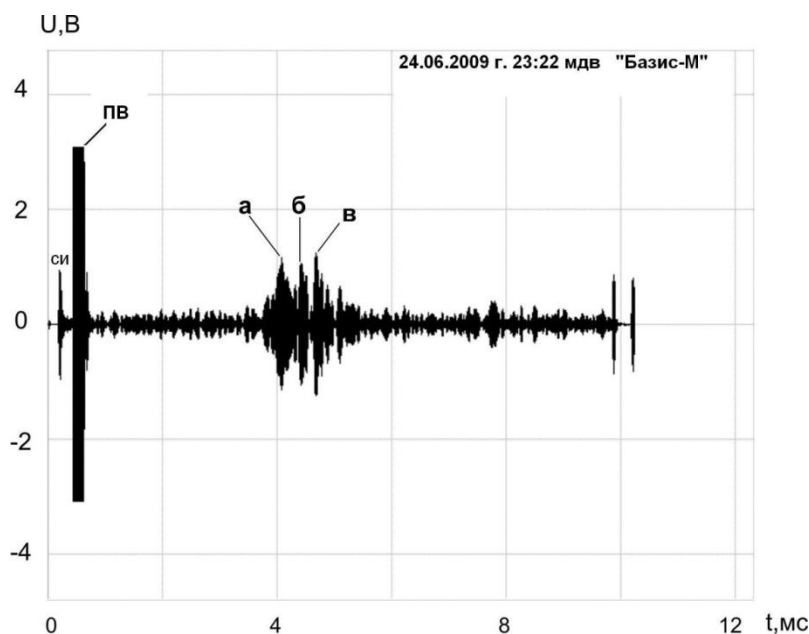
Рис. 3. Функциональная блок-схема экспериментального комплекса «Базис-М»

Для цифровой регистрации сигнала ПЧ используется 12 разрядный АЦП типа "Е20-10" с максимальной частотой дискретизации 10 МГц, что позволяет получать  $\sim 80$  отсчетов на один период сигнала промежуточной частоты. Старт отсчетов АЦП осуществляется при подаче на вход АЦП синхроимпульса (СИ). В качестве сигнала СИ используется строб, с помощью которого производится временная селекция интервала дальности, на котором находятся регистрируемые импульсные сигналы. Синхроимпульс СИ привязан к переднему фронту строба, поэтому оцифровка сигнала включает регистрацию сигнала прямой (земной) волны. После старта АЦП выполняет заданное количество отсчетов, которое соответствует интервалу времени 10 мс

(примерно  $10^5$  отсчетов), а затем переходит в режим ожидания прихода следующего СИ. Таким образом, на каждом такте зондирования регистрируются волновые формы прямой и отраженной радиоволн, что позволяет по описанной выше методике определить разность фаз между этими сигналами на выходе УПЧ и затем оценить доплеровский сдвиг частоты.

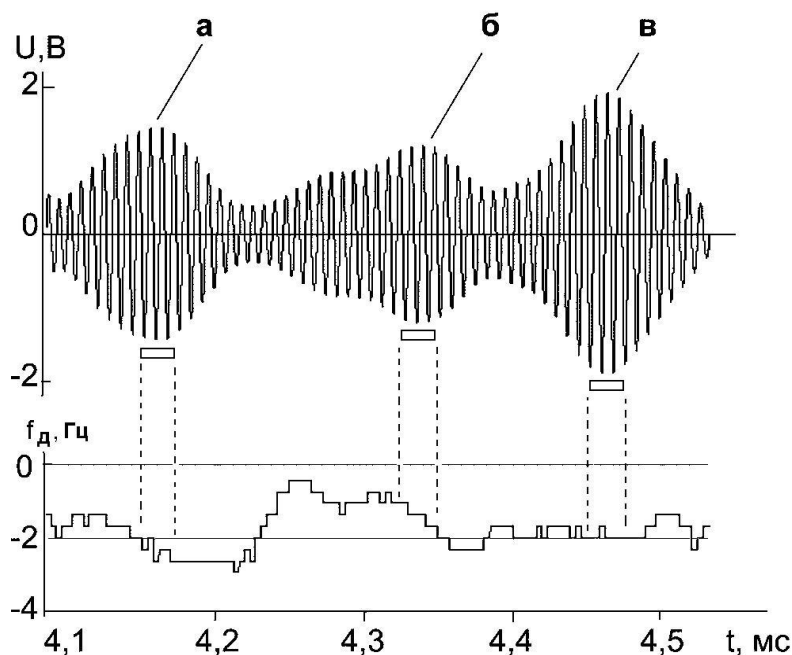
На рис. 4 приведен пример графика цифровой осциллограммы сигнала промежуточной частоты, полученный в ходе экспериментов в вечернем сеансе 24 июня 2009 г. в 23:22 мдв. Рабочая частота зондирования была равна 9,15 МГц. На графике видны сигналы ракурсного рассеяния а), б) и в), а также сигналы СИ и прямой волны (ПВ).

На Рис. 5 представлен график доплеровского сдвига частоты  $f_D$  сигнала рассеянной волны, полученный по экспериментальным данным с помощью формул (4) и (5). Как видим, здесь доплеровский сдвиг  $f_D$  представляет собой быстро меняющуюся вдоль сигнала функцию, которая колеблется вблизи значения  $f_D = -2$  Гц. Такой знак среднего значения  $f_D$  означает, что область возмущения в целом движется вверх от наблюдателя и это соответствует вечернему подъему ионосферы.



**Рис. 4. Цифровая осциллограмма регистрации полной волновой формы сигналов ракурсного рассеяния и прямой волны на частоте  $f = 9,15$  МГц. Отдельные максимумы ракурсных сигналов помечены знаками а, б и в**

Компонента скорости движения рассеивающего слоя в направлении на приемную антенну  $V_X$  выражается через доплеровский сдвиг  $f_D$  по формуле  $V_X = \lambda f_D / 2 = 27$  м/с, где  $\lambda$  - длина пробной волны в возмущенной области. Наиболее точный результат определения  $f_D$  получается вблизи максимумов рассеянного сигнала. Соответствующие интервалы обозначены на рисунке прямоугольниками. Из рисунка видно, что величина  $f_D$  может значительно меняться при переходе между максимумами рассеянного сигнала а и б, которые можно рассматривать как соответствующие различным рассеивающим центрам внутри области возмущения.



**Рис. 5. Волновая форма рассеянного сигнала (верхний график) и временные вариации доплеровского смещения частоты (нижний график) для сигналов ракурсного рассеяния. Прямоугольниками показаны интервалы времени для импульсов а, б и в, на которых точность оценки доплеровского сдвига частоты максимальна**

### **Заключение**

Разработана новая методика быстрого измерения доплеровского смещения частоты при многолучевом распространении радиоволн в ионосфере. Показано, что при исследовании сигналов обратного ракурсного рассеяния от искусственных неоднородностей можно получить оценку общего дрейфа области возмущения, а также оценку относительного дрейфа различных областей формирования рассеянных сигналов. Как следует из формул (6), точность определения доплеровского сдвига частоты может быть существенно повышена путем увеличения частоты дискретизации АЦП. При этом ошибка определения сдвига фаз и соответственно доплеровского сдвига частоты уменьшается обратно пропорционально частоте дискретизации.

### **Литература**

1. Намазов С.А., Новиков В.Д., Хмельницкий И.А. / Доплеровское смещение частоты при ионосферном распространении радиоволн (обзор) // Изв. ВУЗов. Радиофизика. Т. 18, № 4. 1975. С. 473 – 500.
2. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы / Афраймович Э.Л. Наука. М. 1982, 197 с.
3. 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.
4. Lobachevsky L.A., Vaskov V.V., Kim V.Yu., et. al. / Observations of ionosphere modification by the Tromsø heating facility with the mobile diagnostic equipment of IZMIRAN. // J. Atm. Terr. Phys. V. 54. N1. 1992. P.
5. Измерения в электронике. Справочник / Под ред. В. А. Кузнецова. М. Энергоатомиздат, 1987.
6. Кедем Б. / Спектральный анализ и различение сигналов по пересечениям нуля // ТИИЭР. Т. 74. № 11. 1976. С. 6 - 25.