

Об измерении действующей высоты ионосферы фазовым методом

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, 108840, г. Москва, г. Троицк/ e-mail: vkim@izmiran.ru, vppolima@izmiran.ru, puchkovint@mail.ru

Представлена новая методика быстрого измерения действующей высоты ионосферы фазовым методом. С помощью созданной экспериментальной установки проведены наблюдения по зондированию различных слоев ионосферы. Показано, что время измерения действующей высоты может составить менее 0.1 секунды, а точность измерения ~300 м.

A new technique of quick measurement of the virtual height of the ionosphere by the phase method is presented. With the help of the experimental setup created, observations were made on sounding various layers of the ionosphere. It is shown that the measurement time of the virtual height can be less than 0.1 seconds and with an accuracy of about 300 m.

Введение

Измерение фазы радиоволн позволяет значительно повысить точность измерения действующих высот при вертикальном зондировании ионосферы [1-3]. Суть метода заключается в том, что в ионосферу посылаются пробные волны с близкими частотами. Набег фазы отраженных от ионосферы радиоволн в точке приема зависит от частоты волны и от пройденного группового пути. Если приведенная разность фаз для двух зондирующих радиоволн с частотами f_1 и f_2 составляет $\Delta\varphi$, то это соответствует действующей высоте отражения

$$h' = \frac{c\Delta\varphi}{4\pi\Delta f} \quad (1)$$

где $\Delta f = f_2 - f_1$ – разность частот,
 c – скорость света.

Несмотря на возможность обеспечить более высокую точность измерений по сравнению с амплитудным методом, основанным на определении групповой задержки путем анализа огибающей отраженного импульса, фазовый метод до настоящего времени не нашел широкого применения. Причина заключается в методических и технических сложностях реализации фазового метода, когда требуется минимизировать ошибки при обработке сложных и нестационарных ионосферных сигналов.

Погрешность фазовых методов

В идеальных условиях, при которых ионосферу можно представить как плоскостойкую стационарную среду, оценка ошибки измерения действующей высоты может быть получена из формулы (1)

$$\delta h' = \frac{\delta\varphi}{4\pi\Delta f} \quad (2)$$

где $\delta\varphi$ – погрешность измерения разности фаз $\Delta\varphi$, а величину Δf можно считать заданной точно.

Погрешность $\Delta\varphi$ складывается из методической погрешности, связанной с искажениями фазы при распространении волны в ионосфере, и аппаратной

погрешности. В работе [1] при погрешности $\delta\varphi \sim 1$ радиан было предложено использовать большую частотную базу и в работах [2, 3] использовалась величина $\Delta f \sim 300$ кГц при шаге сканирования по частоте 15 кГц/сек. Затем временные ряды параметров отраженного сигнала анализируются с помощью алгоритма БПФ. При этом погрешность измерения h' составляла величину $\delta h' \sim 200$ м, а время измерения могло составлять до 20 сек.

Аппаратная погрешность может быть обусловлена целым рядом факторов, таких, как нестабильность амплитуды и фазы в излучаемом сигнале, искажение сигнала в приемном и передающем трактах, шумы аппаратуры, конечная частота дискретизации и конечная разрядность АЦП, и др.

Также дополнительная погрешность возникает вследствие зависимости действующей высоты от частоты зондирования, а также из-за нестационарности ионосферы и ее сложной неоднородной структуры. В работе [2] показано, что зависимость групповой задержки от несущей частоты импульса приводит к ошибкам в определении действующей высоты порядка 100 м при разности частот $\Delta f = 15$ КГц. Еще один источник погрешности – не стационарность электронной концентрации в ионосфере, которая приводит к доплеровскому сдвигу частоты в отраженном сигнале. Так, в работе [3] получена оценка погрешности $\delta h' \sim 250$ м для $\Delta f = 1$ КГц при доплеровском сдвиге частоты 1 Гц и интервале между соседними зондирующими импульсами 10 мс. Отметим, что в случае более быстрых процессов, когда доплеровский сдвиг частоты может составлять несколько Гц, указанная погрешность может возрасти до одного километра и более.

В работе [4] показано, что если уменьшить погрешность измерения разности фаз до величины $\delta\varphi \sim 1$ град (0.02 радиан) и использовать $\Delta f \sim 1$ кГц, то можно уменьшить погрешность измерения h' до величины $\delta h' \sim 300$ м. Было предложено использовать зондирующие импульсы на одной несущей частоте с постоянной длительностью и частотой повторения. Для фазового анализа используются несколько отфильтрованных узкополосными фильтрами сигналы ПЧ, настроенные на требуемые частоты из спектра повторяющихся радиоимпульсов. После когерентной обработки трех реализаций отфильтрованных сигналов с помощью алгоритма БПФ определяются приведенные разности фаз этих сигналов и по формуле (1) вычисляется величина h' . При этом длительность обрабатываемых БПФ реализаций могла составлять по времени 10 – 100 сек.

Целью данной работы является уменьшение времени измерения действующей высоты фазовым методом при вертикальном зондировании ионосферы.

Новая методика измерения

Предлагается использовать для зондирования радиоимпульсы на трёх несущих частотах длительностью $50 \div 100$ мкс, следующих непосредственно друг за другом с тактовой частотой $F_{\text{п}}$. При этом несущие частоты f_1 , f_2 и f_3 выбираются на основе разработанных критериев оптимизации, связанных с однозначностью и точностью измерения. Тогда, например, время измерения на трёх зондирующих частотах при частоте повторения импульсов $F_{\text{п}} = 50$ Гц составит 60 мсек. Такой подход обеспечивает значительное сокращение времени измерений действующей высоты по сравнению с [1-4]. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению более чем на порядок ошибки, связанной с доплеровским сдвигом частоты.

Важной методической особенностью предлагаемого метода является регистрация сигналов земной и отраженной от ионосферы радиоволн. При этом набег фазы каждой волны с фиксированной частотой отсчитывается от фазы земной волны, а затем

вычисляются разности фаз $\Delta\varphi$ для разных пар частот. Погрешность $\delta\varphi$ уменьшается за счет того, что вычитаются содержащиеся в каждой измеренной разности фаз ошибки из-за возможной нестабильности задающих генераторов, включая АЦП, на временном интервале между излучением земной волны и приходом отраженной волны.

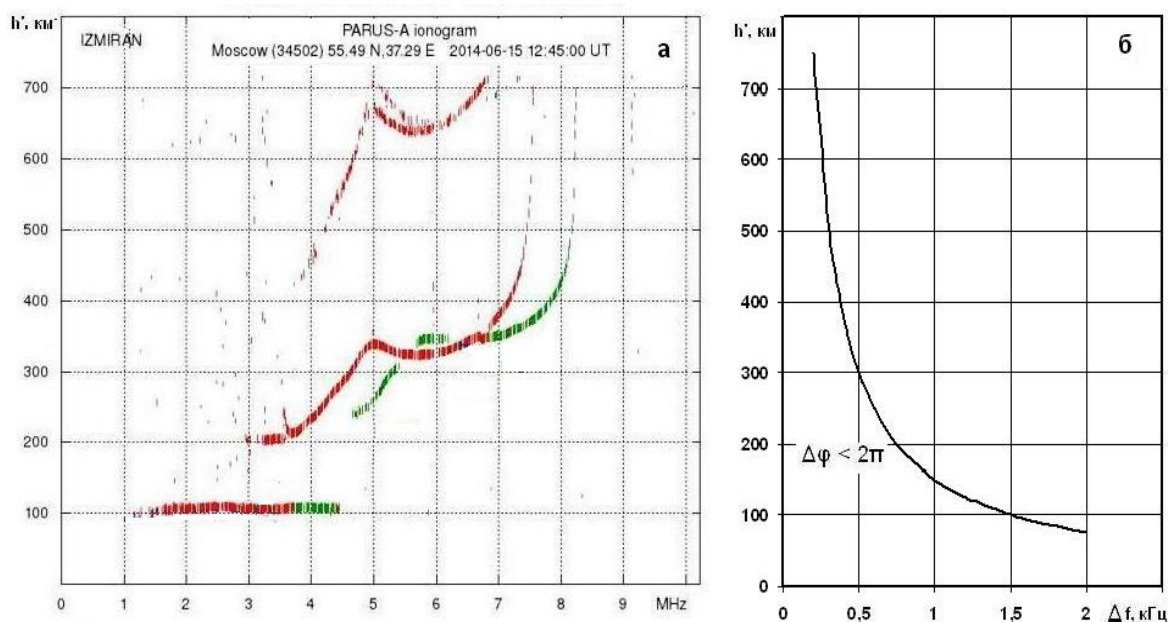


Рис. 1. Выбор частот при зондировании различных слоев ионосферы: а – типичный вид дневной ионограммы; б – график для выбора оптимального значения Δf в зависимости от h' .

Минимально для применения способа в полном объеме необходим пакет из 3-х зондирующих частот. Рассмотрим, как осуществляется выбор частот при зондировании ионосферы. На рис. 1а показана стандартная ионограмма, видно, что на частотах 1 – 4 МГц при $h' \sim 100$ км присутствует отражение от E -слоя, на частотах от 3 до 8 МГц на высотах h' от 200 км до 700 км есть отражения обыкновенной и необыкновенной компонент сигнала от слоев $F1$ и $F2$ ионосферы. Чтобы обеспечить однозначность определения действующей высоты ионосферы h' до 700 км нужно выбрать частоты f_1 и f_2 в соответствии с рис. 1б так, чтобы величина $\Delta\varphi$ была меньше 2π . На этом рисунке показаны значения $\Delta f = f_1 - f_2$, обеспечивающее однозначность определения высоты h' , когда измеряемые разности фаз на частотах $(f+\Delta f)$ и f будут удовлетворять условию $\Delta\Phi_f = \Phi_f - \Phi_{(f+\Delta f)} < 2\pi$, ($\Delta\Phi_f = 0 - 2\pi$).

Полученный критерий, однако, не может удовлетворить по точности измерения для всех значений высоты h' . Например, при частотной базе $\Delta f_1 = 200$ Гц и точности измерения разности фаз $\Delta\Phi_f$ порядка 1 градуса точность измерения в интервале высот $h' \sim 100 \div 300$ км составит 300 м, в то же время в интервале высот $h' \sim 300 \div 700$ км точность будет не лучше 2 км. Для повышения точности измерения h' необходимо использовать другую частотную базу $\Delta f_2 = f_1 - f_3$, например, $\Delta f = 2$ кГц, тогда точность измерения h' возрастает примерно в 10 раз и на высотах от 100 до 700 км получим оценку $30 \div 300$ м. (Для сравнения упомянем, что точность измерения h' стандартного сетевого ионозонда составляет $\sim 1,5$ км). Таким образом, использование 3-х зондирующих частот для получения двух оптимальных значений Δf достаточно для высокоточных измерений h' . На практике частотную базу $\Delta f_2 = f_1 - f_3$ можно выбрать до ~ 10 КГц для случаев спокойной ионосферы и тогда точность измерения h' возрастет на порядок и будет ограничиваться другими факторами, о которых говорилось выше.

Экспериментальная установка фазового зондирования

На рис.2 показана созданная в работе блок-схема экспериментальной установки для измерения фазовым методом действующей высоты ионосферы по формуле (1).

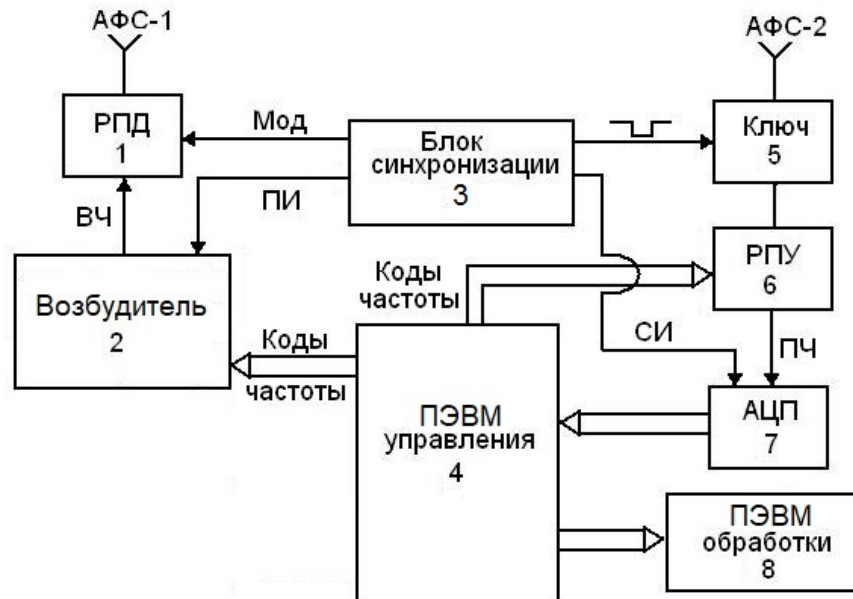


Рис. 2. Функциональная блок-схема экспериментальной установки.

Установка содержит широкополосный усилитель – РПД (1); возбудитель (2) для прямого цифрового синтеза радиосигналов, к которому по сигналу ПИ из Блока синхронизации (3) и кодам частоты из ПЭВМ управления (4) формируются зондирующие сигналы в виде радиоимпульсов длительностью $\tau = 80$ мкс с последовательно изменяемыми радиочастотами f_1, f_2, f_3 при общей частоте повторения F_n . Ключ (5) по сигналу запирающего из Блока синхронизации (3) управляемо запирает радиоприемное устройство РПУ (5) от влияния мощного излучения РПД. В качестве РПУ использован связной приемник типа Р-399, у которого расширена полоса пропускания по промежуточной частоте (ПЧ = 215 кГц) до ~ 40 кГц. Сигнал ПЧ с выхода РПУ поступает на вход АЦП (7) типа Е20-10, который имеет 14 разрядов и работает с частотой дискретизации $F = 10$ МГц. Запуск АЦП осуществляется с тактовой частотой F_n , сигнал которой поступает из блока (3), с выхода АЦП данные поступают в долговременную память ПЭВМ и запоминаются в виде сигнального файла данных. Объем данных в сигнальном файле для одной частоты можно оценить величиной $N \sim 20$ Мб, при этом число отсчетов на один период сигнала ПЧ было ~ 50 .

Особенностью управления возбудителем и РПУ является то, что РПУ не меняет частоту настройки в течение 3-х тактов зондирования, в течение которых возбудитель перестраивается на рабочие частоты f_1, f_2, f_3 . Это необходимо ввиду того, что точная настройка на рабочую частоту в РПУ Р-399 происходит с помощью системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и при перестройке РПУ с частотой $F_n = 50$ Гц система ФАПЧ не успевает установить фазу сигнала, что может увеличить погрешность фазовых измерений.

Полученные цифровые сигнальные данные для каждой частоты зондирования обрабатываются с помощью квадратурного алгоритма. При этом длина выборки для квадратуры бралась размером $k = 200$, так что на длительности импульса 80 мкс вычислялось по 4 значения амплитуды и фазы. При компьютерном моделировании и при указанных параметрах оцифровки сигнала и цифровой квадратурной обработки

погрешность измерения фазы оказалась величиной $\delta\varphi \approx 5 \cdot 10^{-4}$ градуса, что на 2 порядка меньше ошибок, которые обсуждались выше.

Результаты экспериментальной проверки методики

На экспериментальной установке, блок схема которой показана на рисунке 2, были проведены испытательные измерения, подтвердившие ожидаемые параметры точности измерения фаз сигналов. Для оценки аппаратной погрешности приемно-регистрирующей системы было проведено тестирование описанной выше фазовой методики измерения h' путем подачи тестовых сигналов на вход приемной системы. Получено, что величина ошибки измерения разности фаз составляет $\delta\varphi \sim 0.5$ градуса (при этом речь идет о среднеквадратичном отклонении фазы), которая фактически полностью учитывает аппаратную погрешность измерений. Согласно формуле (2), такая погрешность измерения разности фаз позволяет говорить об определении действующей высоты с точностью ~ 200 м при разности зондирующих частот $\Delta f_2 = f_1 - f_3 = 1$ кГц. Соответственно, для частотной базы $\Delta f_2 = 10$ кГц получим оценку точности измерения ~ 20 м, что говорит о высоко точности разработанной методики и достаточно низком уровне помех в аппаратуре экспериментальной установки.

В реальном эксперименте по зондированию ионосферы флуктуации амплитуды и фазы в отраженном сигнале приводят к тому, что погрешность измерения разности фаз оказывается значительно большей приведенной выше величины $\delta\varphi$.

В марте 2019 г. была проведена серия экспериментов по зондированию ионосферы, при этом были получены данные по измерению действующей высоты для всех основных ионосферных слоев. Некоторые результаты представлены в Таблице 1, где приведены сведения о режимах измерений и результатах экспериментальных наблюдений.

Таблица 1. Результаты экспериментов.

Дата	Время, МДВ	f , МГц	Δf , Гц	$\delta\varphi$, град	$t_{зрпн}$, мс Ампл. метод	$t_{зрпн}$, мс Фазов. метод	h' , км	Тип след а	α ,
5.03.2019	12:26:25	1.450	1750	2	0.7	0.72	108	E	4
5.03.2019	12:52:52	1.450	800	2	0.7	0.68	102	E	4
5.03.2019	12:39:44	4.840	2000	4	2.1	2.11	316.5	F2X	4
5.03.2019	12:42:37	3.920	2000	2	2.1	2.053	307.95	F2O	4
5.03.2019	13:10:17	4.260	1750	0,4	1.7	1.750	262.48	F2X	20
10.03.2019	13:28:02	1.640	1750	0,5	0.7	0.699	104.83	E	10
10.03.2019	13:38:41	2.140	1750	2	0.7	0,725	108.72	E	10
10.03.2019	13:53:15	4.360	1750	1	1.7	1.747	262.05	F2O	10
10.03.2019	13:55:38	5.460	1750	0.6	1.9	1.953	292.95	F2X	10

В колонках слева направо показаны: дата наблюдения; время МДВ, частота зондирования f в МГц; частотная база зондирования Δf в Гц; погрешность измерения

фазы отраженного сигнала $\delta\varphi$ в град; групповая задержка отраженного сигнала $t_{групп}$ в мс, измеренная амплитудным способом; групповая задержка отраженного сигнала $t_{групп}$ в мс, измеренная фазовым методом по набегу фазы на частотной базе зондирующего сигнала Δf ; действующая высота ионосферы h' в км, измеренная фазовым методом по набегу фазы на частотной базе зондирующего сигнала Δf ; тип следа реального отражения от различных слоев ионосферы; величина α - отношение “сигнал/шум” для условий реального зондирования ионосферы.

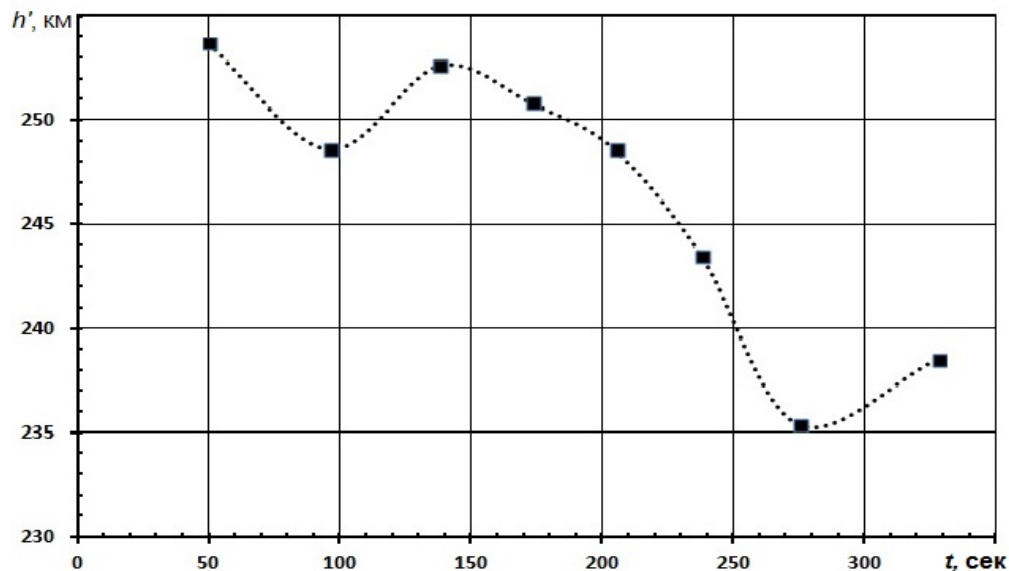


Рис. 3. Результат измерения $h'(t)$ на фиксированной частоте 4.26, сеанс 05.03.2019.

Из приведенных данных видно хорошее соответствие измерений $t_{групп}$ амплитудным методом и точных измерений фазовым методом. Хорошее соответствие видно во всех случаях для наблюдаемых типов отражений от E , $F2X$, $F2O$ для различных слоев ионосферы.

На рисунке 3. показан результат наблюдения динамики виртуальной высоты ионосферы h' , полученные 5.03.2019 г. Зондирование проводилось начиная с 12:47:00 МДВ, отражение радиоволны на частоте 4.26 МГц происходило от ионосферного слоя $F2$. Залитыми квадратами показаны значения h' , которые были получены с интервалом по времени ~ 40 сек, точками показана сглаживающая интерполяция. Видно, что в течение примерно 4,5 минут наблюдается спад h' от ~ 280 км до ~ 237 км, при этом погрешность измерения показана размером знаков, которая была здесь в среднем ~ 600 м.

Заключение

В работе представлена новая методика фазового измерения действующей высоты при вертикальном зондировании ионосферы, которая позволяет проводить высокоточные измерения за время не более 0.1 секунды. Создана экспериментальная установка, с помощью которой были проведены измерения на реальных сигналах, отраженных от различных слоев ионосферы. Показано, что достигнутая точность измерения фазовых характеристик позволяет определять действующую высоту с точностью ~ 300 м.

Разработанная методика высокоточного измерения действующей высоты при вертикальном зондировании ионосферы может использоваться для исследования неоднородностей различных масштабов. Также представляет интерес исследование

фазовым методом искусственных неоднородностей, возникающих при воздействии на ионосферу мощных радиоволн.

Литература

1. Whitehead J. D., Malek A. A suggested method of accurately measuring the virtual height of reflection of radio waves from the ionosphere / JATP. V. 25. P. 599 – 601. 1963.
2. Whitehead J. D., Kantarizis E. Errors in the measurement of virtual height using a phase ionosonde / JATP. V. 29. P. 1483-1488. 1967.
3. Hammer P.R., Bourne I.A. A high resolution ionosonde – 1. Technique and analysis methods / JATP. V. 38. P. 935-943. 1976.
4. Ким В.Ю., Панченко В.А., Полиматиди В.П. Способ измерения группового запаздывания сигналов в ионосфере и устройство для его осуществления, Авт. Свид. СССР 4089560/24-09,1986.