

**Л.Я. ЕМЕЛЬЯНОВ**, зав. сектором,

**И.Б. СКЛЯРОВ**, гл. инженер, Институт ионосферы (г. Харьков)

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ДРЕЙФА ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ МЕТОДОМ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ**

Розглянуто деякі аспекти забезпечення достовірних вимірів швидкості дрейфу іоносферної плазми методом некогерентного розсіювання. Наведено обґрунтування використання контрольних сигналів для цієї мети. Розглянуто принцип побудови імітатора доплерівського зсуву спектру шумоподібного сигналу.

The some aspects of ensuring of reliable ionospheric plasma drift velocity measurements by incoherent scatter method are considered. The substantiation of use of control signals for this purpose is presented. The principle of construction of the simulator of a Doppler shift of noise-like signal is considered.

Актуальность определения скорости дрейфа ионосферной плазмы для исследования динамических процессов в верхней атмосфере Земли подтверждается большим количеством публикаций по измерениям на зарубежных радарх некогерентного рассеяния (НР), например, [1, 2, 3, 4].

Сложность измерения скорости плазмы  $V_d$  методом НР связана с шумовым характером полезного сигнала, значительным превышением ширины его спектра по отношению к доплеровскому сдвигу, по которому оценивается скорость, и низким отношением сигнал/шум. Поэтому важным является обеспечение достоверности получаемых данных.

Целью данной работы является показать некоторые пути обеспечения надежности определения скорости дрейфа плазмы.

Достоверность определения  $V_d$  может в какой-то степени обеспечиваться сравнением данных о скорости плазмы, полученных на конкретном радаре НР, с данными, полученными на других измерительных установках или другими радиофизическими методами [5, 6]. Однако это сравнение может носить только качественный характер, поскольку условия измерений могут отличаться из-за различия географических координат измерительных установок, времени измерений, гелиогеофизических условий и других факторов.

При невозмущенной ионосфере косвенно достоверность может подтверждаться анализом высотно-суточных зависимостей набора измеряемых ионосферных параметров, включающих, помимо скорости дрейфа, электронную концентрацию  $N_e$ , электронную  $T_e$  и ионную  $T_i$  температуры, ионный состав. В частности, возможна проверка получаемых результатов путем решения уравнения непрерывности согласно методике [7]. Такие вычисления прово-

дятся периодически и дают неплохие результаты для невозмущенной околополюденной ионосферы [8].

На протяжении суток даже при отсутствии магнитных возмущений возможны значительные изменения скорости, особенно в ночное время. В этом случае о достоверности можно судить по соответствию временных вариаций измеряемых параметров существующим представлениям о динамике ионосферы.

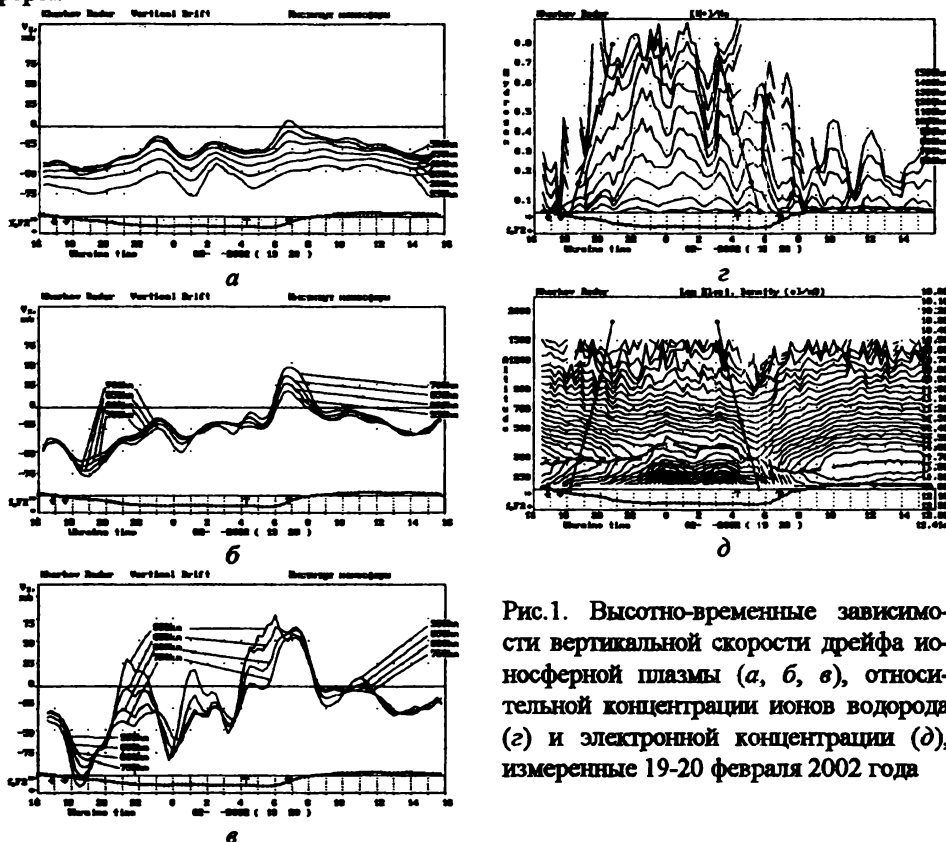


Рис.1. Высотно-временные зависимости вертикальной скорости дрейфа ионосферной плазмы (а, б, в), относительной концентрации ионов водорода (г) и электронной концентрации (д), измеренные 19-20 февраля 2002 года

В качестве примера на рис. 1, а, б, в приведены суточные вариации вертикальной скорости дрейфа  $V_z$  ионосферной плазмы, полученные на харьковском радаре НР 19-20 февраля 2002 года. Здесь же приведены временные зависимости критической частоты  $f_oF2$ . Стрелками показаны моменты восхода и захода Солнца на поверхности Земли в Харькове (двойная стрелка) и магнитно-сопряженной точке (одинарная стрелка), расположенной вблизи острова Мадагаскар. В эти дни индекс магнитной активности  $A_p=4$  (19 февраля) и  $A_p=8$  (20 февраля) соответственно.

На графиках отчетливо видны обычно наблюдаемые утренний (с максимумом около 6:30) и вечерний (около 18:45) экстремумы  $V_z$ , возрастающие с увеличением высоты. Помимо выше упомянутых экстремумов суточные вариации  $V_z$  имеют изменения в ночное время, с 20 до 3 часов. Видно, что эти изменения суточного хода скорости в значительной степени характерны для высот больше 700 км. Они объясняются процессами ионосферно-протоносферного обмена плазмы.

Действительно, измеренные вариации относительной концентрации легких ионов  $H^+$  в течение рассматриваемых суток (рис. 1, з) коррелируют с суточными вариациями вертикальной скорости дрейфа плазмы. Так, на высоте 900 км максимальному потоку плазмы в ~23:45 соответствует уменьшение относительной концентрации ионов водорода. Оно наблюдается около 00:00. Имеется также корреляция (хотя и в меньшей степени) вариаций  $V_z$  с временными изменениями электронной концентрации  $N_e$  (рис. 1, д).

Ночной максимум электронной концентрации ( $N_m$ ) в области  $F$  ионосферы в зимнее время определяется соотношением скоростей поступления плазмы из протоносферы и потерь ионов  $O^+$  за счет рекомбинации. Например, ночью максимальное значение  $N_m$  при  $f_oF2=5,5$  МГц наблюдается в 01:15. Ему соответствует локальный максимум нисходящего потока плазмы, который распространяется вниз в интервале высот 900-400 км в течение ~1 часа 15 минут. Это запаздывание свидетельствует о том, что скорость распространения возмущения потока плазмы из протоносферы составляет ~135 мс<sup>-1</sup>.

Некоторые приведенные выше вариации  $V_z$  не являются регулярными, что, собственно, и представляет интерес для исследования динамики ионосферы, но достоверность определения  $V_z$  по этим данным может быть проверена только после тщательного анализа всех полученных на протяжении измерений данных. Поэтому для обеспечения достоверности определения  $V_z$  необходимо соблюдение требований, предъявляемых к аппаратуре радара НР, и независимый контроль ее параметров, в первую очередь стабильность частот сигналов гетеродинов радиоприемной системы и несущей частоты радара.

Расчеты показывают, что при использовании радара НР с длиной волны около 2 м для определения скорости плазмы с систематической погрешностью, не превышающей 0,1 м/с, что приемлемо для геофизических приложений, кратковременная относительная нестабильность частот гетеродинов на протяжении периода радиолокационной развертки и несущей частоты зондирующего сигнала не должна превышать  $10^{-9}$ . Для мониторинга должна быть обеспечена такая же долговременная стабильность или обеспечена когерентная структура построения приемно-задающей системы. Эти условия выполнены на харьковском радаре НР, где сигналы для гетеродинов радиоприемной и передающей систем формируются из сигналов задающей системы [9],

которые, в свою очередь, синтезируются из опорного сигнала генератора частоты 5 МГц с нестабильностью частоты  $10^{-10}$

Систематическая погрешность определения скорости, вызванная неточностью выделения квадратурных сигналов при синхронном детектировании, пропорциональна отличию разности фаз  $\Delta\varphi_{sd}$  опорных сигналов синхронного гетеродина от величины  $\pi/2$ . Для поддержания высокой точности установки  $\Delta\varphi_{sd}$  и ее стабильности разработан и введен фазовращатель синхронного гетеродина, выходные сигналы которого сдвигаются на  $\pm \pi/4$  относительно входного сигнала синхронного гетеродина, благодаря использованию дифференцирующей и интегрирующей цепей с одинаковыми высокостабильными RC-элементами. Предусмотрены элементы точной установки  $\Delta\varphi_{sd} = \pi/2$  и равенства напряжений на двух выходах фазовращателя. А точность выделения квадратурных составляющих на протяжении измерений ионосферных параметров контролируется по близости к нулю взаимной корреляционной функции шума выходных квадратурных каналов приемника при нулевом сдвиге  $r_{\text{ин}}(0)$ .

Важнейшая часть радара, а именно весь приемно-обрабатывающий тракт, может контролироваться по измерениям параметров шума тракта и контрольного гармонического или шумоподобного узкополосного сигнала со смещенным относительно рабочей частоты радара спектром.

Радар НР оснащен системой формирования контрольных сигналов, в которой для генерации случайного процесса с необходимым спектром (корреляционной функцией), характерным для определенного набора параметров ионосферы, применяются низкочастотные формирующие фильтры с соответствующей амплитудно-частотной характеристикой и возможностью сдвига несущей частоты сигнала в пределах, соответствующих возможному доплеровскому сдвигам спектра НР сигнала. Контрольный сигнал подается на вход радиоприемного устройства радара НР непосредственно или через контрольную антенну и антенно-фидерный тракт радара.

Структурная схема системы формирования контрольных сигналов представлена на рис. 1.

Группа кварцевых генераторов совместно с блоком усилителей частоты  $f_d$  вырабатывает сигнал, из которого в дальнейшем формируется несущая частота контрольного сигнала  $f_n$ . Набор кварцев позволяет изменять частоту  $f_d$  и, тем самым, изменять величину имитируемой скорости дрейфа. При необходимости обеспечения сигнала с “нулевым” дрейфом вместо частоты  $f_d$  используется частота  $f_1$ , вырабатываемая задающей системой радара и жестко привязанная к несущей частоте радара  $f_0$ .

Частота  $f_d$  и частота  $f_1/16$  в смеситель См1 преобразовывается в частоту  $f_{\text{пр}1}$ .  $f_1/16$  является частотой, из которой формируется частота первого гетеродина приемника радара, и используется в системе для привязки к несущей

The diagram illustrates a frequency synthesizer architecture. It consists of three main signal paths:

- Top Path (PLL-based):** Starts with a "Блок кварцевых генерат. 1" (Quartz oscillator block 1), which feeds into a "Усилит.  $f_d$ " (Amplifier  $f_d$ ). The output goes to a phase detector (represented by a circle with a dot and a switch) where a reference frequency  $f_1$  is injected. The phase detector's output is fed into a divider block labeled "См1" (Dividing by 16), which also receives  $f_1/16$  as a reference. The output of this path is connected to the "Вых. усилитель" (Output amplifier).
- Middle Path (PLL-less):** Starts with "Кварцевый генератор 2" (Quartz oscillator 2), which goes through a "Усилит.  $f_s$ " (Amplifier  $f_s$ ) and then a "Умножитель частоты" (Frequency multiplier). The output of this multiplier is fed into a "Балансный модулятор" (Balancing modulator). The modulator's output is fed back to the "Умножитель частоты" and also branches off to feed into the "Объемный резонатор" (Acoustic resonator).
- Control and Filtering:** A "Блок стробирования" (Strobbing block) receives input from the PLL-less path and provides a control signal to the "См2" (Frequency divider) block. The "Объемный резонатор" provides a feedback signal to the "Умножитель частоты" in the PLL-less path. A "Генератор шума" (Noise generator) feeds into a "Фильтр НЧ" (Low-frequency filter), which then provides a control signal to the "Умножитель частоты" in the PLL-less path.

The final output of the system is labeled "Вых.  $f_H$ " (Output  $f_H$ ).

**В балансном модуляторе, узкополосный шумовой сигнал, подаваемый на второй вход модулятора, переносится на частоту 35 МГц..**

**Стробирование контрольного сигнала производится в блоке умножителя путем коммутации питающего напряжения.**

39

дующими параметрами: длительность импульса выбирается из интервала  $20 \text{ мкс} \div 10 \text{ мс}$ ; задержка импульса относительно начала радиолокационной развертки  $20 \text{ мкс} \div 20 \text{ мс}$ ; дискретность изменения задержки и длительности  $10 \text{ мкс}$ ; возможные величины имитируемой скорости дрейфа составляют  $-34$ ,  $-25$  или  $+100 \text{ м/с}$ . Имеется возможность работы с непрерывным сигналом.

С помощью вырабатываемого сигнала имеется возможность контролировать стабильность основных характеристик аппаратуры, как долговременную, так и кратковременную на протяжении радиолокационной развертки.

Так, проверка стабильности измеряемой скорости по контрольному сигналу со сдвигом частоты, соответствующим скорости дрейфа  $-34 \text{ м/с}$ , показала, что при 15-минутных сеансах измерений на протяжении 11 часов и отношении сигнал/шум, усредненном по 36 высотным отсчетам, которое находилось в пределах  $15,2-15,8$ , усредненный по таким же высотным отсчетам параметр-аналог скорости плазмы находился в пределах значений  $-(33-35) \text{ м/с}$ . Для каждого сеанса среднеквадратическое отклонение значений этого параметра на протяжении развертки дальности составляет около  $3 \text{ м/с}$ . При использовании фильтров НЧ приемника с эффективной шириной полосы пропускания  $5,5$  и  $9,5 \text{ кГц}$  параметры скорости идентичны, в то время как отношение сигнал шум отличается в  $1,6$  раза, что соответствует норме.

Таким образом, достоверность определения скорости дрейфа ионосферной плазмы может быть обеспечена применением контрольного гармонического или шумоподобного узкополосного сигнала со смещенным относительно рабочей частоты радара НР спектром.

Список литературы: 1. Scherliess L., Fejer B.G. и др. Radar studies of midlatitude ionospheric plasma drifts // Journ. Geophys. Res. 2001. V. 106. № A2. P. 1771-11783. 2. Zhang S.-R., Fukao S. и др. The height of the maximum ionospheric electron density over the MU radar // J. Atm. and Solar-Terr. Phys. 1999. № 61. P. 1367-1383. 3. Kudeki E., Bhattacharyya S., Woodman R.F. A new approach in incoherent scatter F region E×B drift measurements at Jicamarca. // Journ. Geophys. Res. 1999. V. 104. № A12. P. 28145-28169. 4. Holt J.M., van Eyken A.P. Plasma convection at high latitudes using the EISCAT VHF and ESR incoherent scatter radars // Ann. Geophysicae. 2000. № 18. P. 1088-1096. 5. Salah J.E., Goncharenko L.P. и др. Common-volume measurements of mesospheric winds using radar and optical instruments: 1. Comparison of observations // J. Atm. and Solar-Terr. Phys. 1999. № 61. P. 1259-1271. 6. Schunk R.W., Sojka J.J. Ionosphere-thermosphere space weather issues // J. Atm. and Terr. Phys. 1996. V. 58. № 14. P. 1527-1574. 7. Иванов-Холодный Г.С., Михайлов А.В. Прогнозирование состояния ионосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 190 с. 8. Емелянов Л.Я. Измерение высотных профилей электронной концентрации методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэронавтика. Т. 42, №1, 2002. - М., - С. 116 – 120. 9. Емелянов Л.Я. Радиоприемное устройство радара некогерентного рассеяния // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. Сборник научных трудов. Выпуск 31. - Харьков, 1999. - С. 108-112.

Поступила в редколлегию 08.04.03