

Т.А. СКВОРЦОВ, д-р техн. наук, с.н.с., Институт ионосферы НАН и МОН Украины

А.В. ФИСУН, м.н.с., Институт ионосферы НАН и МОН Украины

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ АБСОЛЮТНОГО ЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ИОНОСФЕРЕ РАДАРНОМ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Розглянуті можливості вимірювання абсолютного значення електронної концентрації в іоносфері радаром некогерентного розсіяння без використання станції вертикального зондування. Показано, що для калібрування можна використовувати сигнали радару, відбиті від штучних супутників Землі. Запропоновано новий спосіб калібрування та отримано формули для оцінки його потенційних можливостей.

Possibilities of measuring of absolute value of electronic concentration are considered in an ionosphere by radar of incoherent scattering without the use of the station of the vertical sounding. It is shown that for calibration of radar it is possible to use signal of radar, reflected from artificial satellites. The new method of calibration is offered and formulas are got for the estimation of his potential possibilities.

Постановка задачі. При проведенні измерень параметрів іоносфери с помощью радаров некогерентного рассеяния (НР), работающих по методу «профиля мощности», для получения информации об абсолютных значениях электронной концентрации используются станции вертикального зондирования (ионозонды). При возникновении неисправности в ионозонде появляется опасность потери ценной информации о процессах, протекающих в ионосфере во время сеанса измерений. Поэтому необходимо разрабатывать способы, которые позволяют измерять профиль электронной концентрации в абсолютных величинах без привлечения данных вертикального зондирования.

Цель статьи – рассмотрение нового способа измерения абсолютного значения электронной концентрации с помощью радара НР без использования станции вертикального зондирования.

Это позволяет:

- проводить сеансы измерения без использования ионозонда;
- повысить точность измерения абсолютного значения электронной концентрации при совместном использовании нового способа работы ионозонда.

Методы получения абсолютного значения электронной концентрации. Известно, что для определения параметров ионосферы: ионной T_i и электронной T_e температур, скорости переноса плазмы V_z , концентрации электронов N в ионосфере используют метод НР. Известны три варианта реализации метода НР: с измерением эффекта Фарадея, с измерением плазменной линии и с измерением мощности рассеянного сигнала [1].

Способы, основанные на применении эффекта Фарадея и плазменной линии не нашли широкого применения, так как характеризуются недостаточной точностью измерения параметров ионосферы.

Метод НР с использованием измерения мощности рассеянного сигнала [1] получил наибольшее распространение. Он заключается в том, что излучают импульсный зондирующий сигнал. Затем принимают некогерентно рассеянный ионосферой сигнал, определяют корреляционные функции или спектры и мощность сигнала, по форме спектра или корреляционной функции определяют электронную $T_e(h)$ и ионную $T_i(h)$ температуры, далее вычисляют электронную концентрацию N согласно выражению

$$N(h) = CP_c(h)h^2 \left(1 + \frac{T_e(h)}{T_i(h)} \right), \quad (1)$$

где h – действующая высота, $P_c(h)$ – нормированный высотный профиль мощности сигнала, C – коэффициент пропорциональности.

Коэффициент C зависит от параметров радара, которые изменяются со временем, а потому известны недостаточно точно. Поэтому для нормирования зависимости электронной концентрации $N(h)$ в единицах электронной концентрации используют ионозонд (станцию вертикального зондирования), который измеряет абсолютное значение концентрации N_M на высоте максимума ионизации [1]. Эта процедура нормирования называется калибровкой радара.

Новый способ калибровки радара НР. Рассматриваемый способ основан на зависимости фазовой задержки волны в ионосферной плазме от частоты. Известно, что скорость распространения волны зависит от коэффициента преломления ионосферы вида

$$n(h) = \sqrt{1 - \frac{\omega_0^2(h)}{\omega^2}}, \quad (2)$$

где ω – рабочая частота, ω_0 – критическая частота плазмы, которая зависит от концентрации электронов.

В соответствии с [2–3], ионосферу зондируют радиоимпульсами, которые состоят из двух элементов. Первый имеет длину T_1 и несущую частоту ω_1 , а второй – T_2 , причем его несущая частота ω_2 сдвинута относительно частоты первого элемента. Некогерентно рассеянный ионосферой сигнал принимают радиоприемником, который имеет два частотных канала, настроенных на ω_1 и ω_2 . Определяют корреляционные функции или спектры сигнала, принятого каналом радиоприемника, настроенным на ω_1 , и нормируемый высотный профиль мощности сигнала

$P_C(h)$, принятого каналом радиоприемника, настроенным на частоту ω_2 . Далее определяют температуры электронов и ионов $T_e(h)$ и $T_i(h)$.

Во внедренном способе [2–3] далее требуется провести калибровку радара с использованием ионозонда.

Для калибровки также можно использовать сигналы, отраженные от искусственных спутников Земли (ИСЗ).

Требования к периодичности проведения калибровки удовлетворяются за счет присутствия большого количества объектов с известными орбитами. В [4] показано, что при эксплуатации харьковского радара НР статистика средней частоты появления объектов, которые находятся на орбитах ИСЗ, в зоне видимости радара соответствует 25 объектам за один час. Это полностью удовлетворяет требованиям к интервалу времени между проведением дежурных калибровок.

Для измерения абсолютного значения электронной концентрации предлагается измерять разницу фаз между отраженными от ИСЗ импульсами на разных частотах (ω_1 и ω_2). Начальные фазы отраженных сигналов определяются следующим образом:

$$\Psi_1 = \omega_1 t + \varphi_1 + \Theta_1 - \omega_1 \tau_1,$$

$$\Psi_2 = \omega_2 t + \varphi_2 + \Theta_2 - \omega_2 \tau_2.$$

Поскольку размеры ИСЗ малы, то изменения фазы при отражении на двух частотах близки так, что $\Theta_1 \approx \Theta_2$. Частоты ω_1 , ω_2 и начальные фазы φ_1 , φ_2 сигналов известны. С учетом этого можно определить разницу фаз

$$\alpha = \omega \tau_1 - \omega \tau_2. \quad (3)$$

Учитывая выражение (2), получаем фазовую задержку сигнала

$$\omega \tau \approx \frac{2\omega}{c} \int_0^r n(h) dh, \quad (4)$$

где r – дальность до ИСЗ, c – скорость света.

Поскольку радары НР работают на частотах, значительно превышающих плазменную, то формула (2) приобретает вид

$$n(h) \approx 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{\omega_0^2}{\omega^2},$$

а потому из (4) получаем $\omega \tau \approx \frac{2\omega r}{c} \left(1 - \frac{80.6}{2\omega^2} kN_M \right)$,

где

$$k = \frac{1}{r} \int_0^r F(h) dh. \quad (5)$$

Отметим, что нормированный профиль электронной концентрации $F(h) = \frac{N(h)}{N_M}$ в выражении (5) известен из измерений радара НР.

Обозначив разность между частотами $\Omega = \omega_2 - \omega_1$ и среднее между ними $\omega_{cp} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$, а также учитывая неравенство $\frac{\Omega}{\omega_{cp}} \ll 1$, и используя выражение (5), получаем (3) в виде

$$\alpha \approx \frac{2\Omega r}{c} \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{80.6 N_M k}{\omega_{cp}^2} \right). \quad (6)$$

Расстояние до ИСЗ может быть получено из внешних специализированных баз данных (которые открыто публикуются во всемирной сети "Internet").

Зная из выражения (5) разницу фаз α и интеграл профиля k , с помощью формулы (6) вычислим значение электронной концентрации в максимуме ионизации ионосферы как

$$N_M = \frac{2\omega_{cp}^2}{80.6k} \left(1 - \frac{c\alpha}{2r\Omega} \right). \quad (7)$$

Результат расчета по формуле (7) используется для расчета абсолютных значений высотного распределения электронной концентрации ионосферной плазмы $N(h) = N_M \cdot F(h)$, где $F(h) = P_e(h) h^2 (1 + T_e(h)/T_i(h))$ – нормируемая зависимость электронной концентрации от высоты.

Отметим что, при измерении разницы фаз отражённых волн возникает неопределённость вследствие набега по фазе ($m \times 2\pi$), где $m = 0, 1, 2, \dots$. Для устранения этого фактора следует выполнить требование

$$\alpha - \frac{2\Omega r}{c} < 2\pi, \text{ то есть } \Delta f = \frac{\Omega}{2\pi} < \left(\frac{\omega_{cp}}{\omega_0} \right)^2 \frac{c}{kr}.$$

Например, при условии, что $\omega_{cp}/\omega_0 = 10$, $k = 0.2$ и $r = 500$ км, получим $\Delta f < 300$ кГц. Это требование является приемлемым, поскольку разнос частот, например, для харьковского радара НР составляет 100 кГц.

Пользуясь приведенными выше выражениями, можно получить формулу для определения относительной среднеквадратической ошибки

(СКО) измерения максимальной концентрации электронов предложенным способом в виде

$$\frac{\sigma_N}{N_M} = \sqrt{\frac{\langle (N_M - \widehat{N}_M)^2 \rangle}{N_M^2}} \approx \sqrt{\frac{\sigma_k^2}{k^2} + \left(\frac{c\alpha}{2\Omega r}\right)^2 \frac{\sigma_r^2}{r^2} + \left(\frac{\alpha}{2\Omega r}\right)^2 \sigma_\alpha^2}, \quad (8)$$

где \widehat{N}_M – полученная оценка максимальной концентрации, σ_k , σ_r , σ_α – СКО ошибки оценки соответствующих величин.

СКО оценки дальности σ_r зависит от характеристик внешнего источника координатной информации. Остальные дисперсии можно оценить по формулам

$$\sigma_\alpha^2 = \frac{1}{q_1} + \frac{1}{q_2} = \frac{N_0}{2PT_1} + \frac{N_0}{2PT_2}, \quad (9)$$

$$\frac{\sigma_k^2}{k^2} = \frac{\sum_{i=1}^M \sigma_{Fi}^2}{\left(\sum_{i=1}^M F_i\right)^2}. \quad (10)$$

В (9) подразумевается, что P – мощность отраженного сигнала, $T_{1,2}$ – длительности импульсов радара на соответствующих частотах, спектральная плотность шумов $N_0 = N_1 + N_2$, где N_1 – шум приемника, N_2 – средняя спектральная плотность НР сигнала для той высоты, где находится ИСЗ.

В (10) принято, что $F_i = F(h_i)$, $\sigma_{Fi}^2 = \langle (F_i - \widehat{F}_i)^2 \rangle$ – дисперсия измерения нормированного профиля концентрации электронов для данной высоты радаром НР.

В соответствии с теоремой о среднем значении, выражение (10) можно представить в виде

$$\frac{\sigma_k^2}{k^2} = \frac{1}{M} \frac{\sigma_{F_{cp}}^2}{F_{cp}^2}, \quad (11)$$

где M – количество отсчетов профиля вдоль высоты, которые можно считать взаимно некоррелированными.

Как показывают предварительные оценки, предложенный способ обеспечивает измерение электронной концентрации с точностью не хуже, чем ионозонд. Если же радар работает одновременно с ионозондом, то используя данный способ можно уменьшить дисперсию измерений максимальной концентрации в соответствии с формулой

$$\frac{1}{\sigma_N^2} = \frac{1}{\sigma_{NI}^2} + \frac{1}{\sigma_{NR}^2} \quad (12)$$

где σ_N^2 – результирующая дисперсия измерения концентрации электронов, σ_{NI}^2 – дисперсия ошибки измерений ионозонда, σ_{NR}^2 – дисперсия ошибки измерений рассмотренным выше методом, определяемая выражением (8).

Выводы.

1. Предложенный способ позволяет проводить измерения концентрации электронов радаром НР без использования ионозонда.

2. При совместной работе радара и ионозонда способ может быть использован для уменьшения ошибок калибровки радара.

Список литературы: 1. Брюнелли Б.Б., Кочкин М.И., Пресняков И.Н. и др. Метод некогерентного рассеяния радиоволн. – Л.: Наука, 1979. – 188 с. 2. Черняк Ю. В, Таран В.Л., Лысенко В.М. Пат. 63076 Украина, МПК G01N27/00. Способ определения параметров ионосферы; опубл. 15.01.2004, – Бюл. № 1, – 2004. 3. Лысенко В.Н., Черняк Ю.В. Двухчастотный измерительный канал для определения параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния // Радиофизика и электроника: Сб. науч. тр. / НАН Украины, Харьков, – 2005. – 10, № 2. – С. 217 – 223. 4. Черняк Ю.В. Высотно-временное распределение радиолокационных отражений по данным харьковского радара НР // I Всеукраинская конференция по перспективным космическим исследованиям.– Киев. – 2002. – С. 113.

Поступила в редколлегию 31.05.2010