

УДК 628.396

Д. В. ШАПОВАЛОВА, В. А. ПУЛЯЕВ

ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ ПО ДАННЫМ РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Рассмотрен вариант реализации процедуры расчета суточного распределения критических частот слоя F2 ионосферы по константе радара некогерентного рассеяния. Из-за флуктуаций значений константы производится ее предварительное уточнение путем анализа уровня фонового шума на антенном входе радара. Достоверность расчета критических частот подтверждается нахождением реперных точек, для расчета которых используется поиск критической частоты по углу поворота плоскости поляризации излучаемой радиоволны.

Ключевые слова: сигнал рассеяния, константа радара, критическая частота, фоновые шумы радара, поляризация радиоволны.

Введение. В процессе исследования ионосферы, когда необходимо проводить расчет ее параметров [1], важное место занимают сведения о состоянии среды в максимуме ионизированного слоя. Одной из характеристик в этом случае является величина критической частоты f_oF2 , процедуре расчета которой посвящен материал данной статьи.

Анализ состояния вопроса. Сведения о критической частоте нужны, в частности, для получения информации о высотном распределении электронной концентрации $N_e(h)$. Это распределение в виде профиля можно получить, привязывая изменение мощности сигнала рассеяния $P_C(h)$ с высотой, полученное радаром некогерентного рассеяния (НР), к абсолютному значению электронной концентрации в точке максимума слоя F2, которое напрямую связано с критической частотой f_oF2 этого слоя [2]. Критическую же частоту выдает ионосферная станция – ионозонд, функционирующий поблизости от радара НР.

Анализ проблемы. Практика ионосферных измерений показывает, что, излучая собственные сигналы в довольно широком диапазоне частот, ионозонд во время своей работы нередко создает дополнительные помехи, мешающие работе высокочувствительных (доли микровольт) радиоприемных систем радара НР. Кроме того, при появлении ионосферных возмущений и магнитных бурь, при возникновении спорадических слоев (экранировке слоя F2 слоями E_S или F1) весьма сложно получить точное значение критической частоты. В этом случае используется подход, когда задействуются сведения о константе C , или величине [2]

$$C = \frac{P_C(h_{F2}) \cdot h_{F2}^2 \cdot [1 + T_e(h_{F2})/T_i(h_{F2})]}{N_{eF2}}, \quad (1)$$

зависящей от параметров конкретного радара НР и отражающей состояние его основных технических систем. Здесь N_{eF2} – электронная концентрация в максимуме слоя F2 (на высоте h_{F2}), полученная ионозондом; $P_C(h_{F2})$, $T_e(h_{F2})$ и $T_i(h_{F2})$ – мощность сигнала рассеяния, электронная и ионная температуры плазмы, полученные радаром НР.

Казалось бы, используя эти данные, без особых проблем можно применять выражение вида [2]

$$f_oF2 = \sqrt{\frac{P_C(h_{F2}) \cdot (h_{F2})^2 \cdot [1 + T_e(h_{F2})/T_i(h_{F2})]}{1,24 \cdot 10^{10} \cdot C}} \quad (2)$$

для нахождения критической частоты для конкретного момента проведения эксперимента.

Но как показывает практика проведения экспериментов, трудно поддерживать условия, способствующие неизменности величины константы, т.к. имеет место [3] нестабильность параметров технических систем радара НР. К примеру, в этом повинны колебания питающего напряжения, изменения температуры окружающей среды, нагрев и охлаждение систем антенно-фидерного тракта и др., в результате чего константа меняет свое значение и приходится периодически ее уточнять, включая ионозонд.

Существующие методы решения задачи. Известен один из вариантов [4] алгоритмического подхода к уточнению константы, когда не используется ионозонд, а анализируется информация об уровне шумов $P_{\text{ТЕК}}(t)$ на входе приёмника, в частности тех его составляющих [3], которые связаны с космическим фоновым излучением и отражениями от поверхности Земли, принятые боковыми лепестками диаграммы направленности антенны.

Цель работы. Цель этой статьи заключается в проверке работоспособности алгоритмов уточнения значений константы $C_{\text{ЭТ}}$ радара НР за счет использования информации об изменении мощности шума на входе радара и последующем расчете уже по новой константе $C_{\text{ТЕК}}$ значений критической частоты.

Результаты численного моделирования. В работах [5, 6] описана алгоритмическая процедура, реализованная операторами языка FreeBASIC, в которой для уточнения константы до ее новых значений $C_{\text{ТЕК}}$ предложено проводить сравнение суточного распределения уровня шума $P_{\text{ТЕК}}(t)$, полученного в текущее время работы радара НР, с эталонными значениями шума $P_{\text{ЭТ}}(t)$, использованными при расчете константы $C_{\text{ЭТ}}$ в предыдущие периоды работы, по формуле

$$C_{\text{ТЕК}} = \frac{C_{\text{ЭТ}}}{k_0} \left[1 - \frac{k_0 \cdot d_0}{P_-} \right], \quad (3)$$

где P_- – составляющая уровня шума, зафиксированная во время определения константы $C_{\text{ЭТ}}$ при выключенном передатчике радара НР; k_0 и d_0 – значения масштабирующих переменных, полученных в процедурах сопоставления суточного распределения значений текущего и эталонного шумов.

© Д. В. Шаповалова, В. А. Пуляев, 2015

Согласно этой процедуре, для одного из дней работы радара ИР Института ионосферы по исследованию параметров ионосферы, который состоялся 16.10.2014 г., было проведено уточнение текущего значения константы $C_{\text{ТЕК}}$.

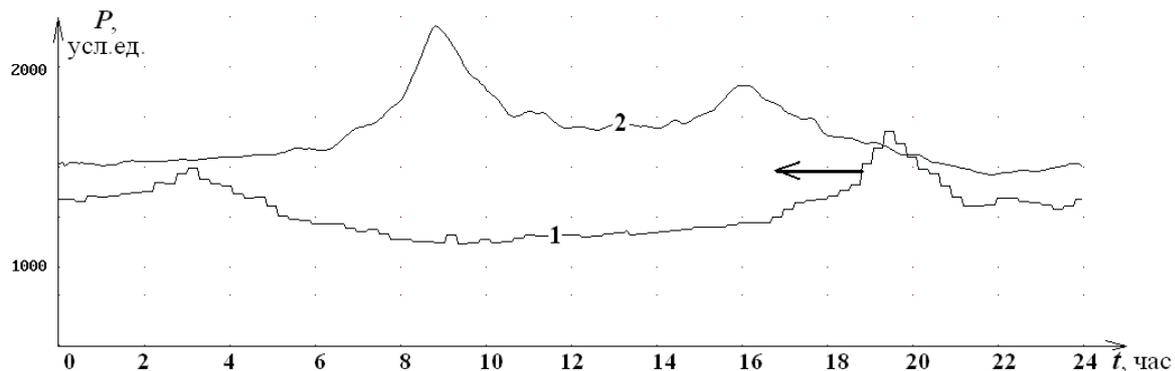


Рис. 1 – Положение профилей суточного распределения уровней фонового шума в текущий (линия 1) и эталонный (линия 2) дни перед началом сопоставления. Стрелкой показано направление циклического сдвига профиля шума текущего дня до совпадения положений максимумов и минимумов по горизонтали

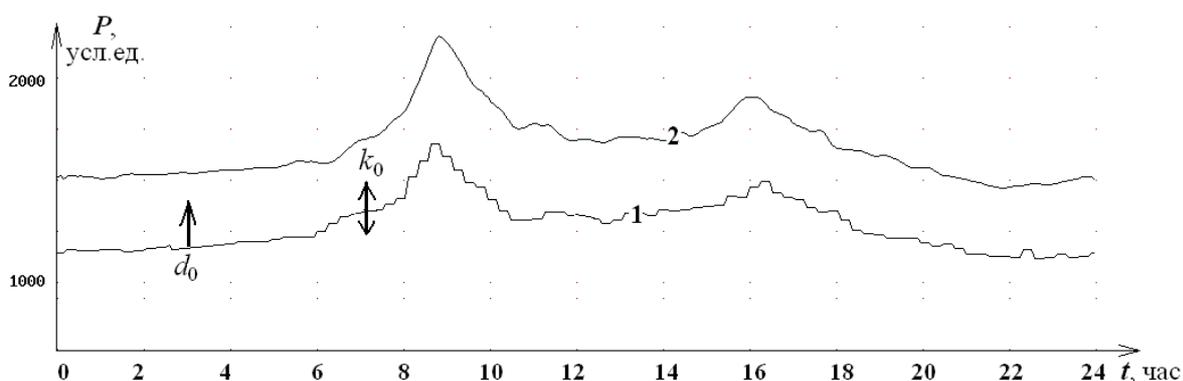


Рис. 2 – Положение профилей суточного распределения уровней фонового шума в текущий и эталонный дни перед началом их сопоставления по вертикали. Показано направление процедуры подъема (добавлением слагаемого d_0) первого графика и изменения его масштаба (вводом множителя k_0) до совпадения линий по вертикали

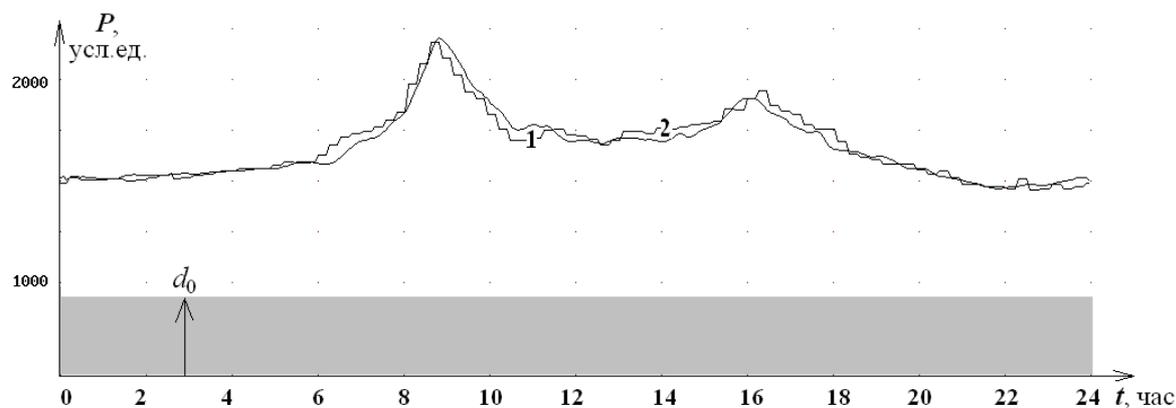


Рис. 3 – Результаты совпадения уровней шумов в текущий и эталонный дни. Результаты сопоставления следующие: составляющая $d_0 = 420$, а множитель $k_0 = 1.4$.

Для уточнения было использовано эталонное значение уровня шума $P_{ЭТ}(t)$, полученное радаром НР в течение нескольких суток в мае 2006 г. [4], которое на рис. 1–3 представлено усредненной линией 2. Текущее значение уровня шума $P_{ТЕК}(t)$ для дня проведения эксперимента 16.10.2014 г. в это время представляет линия 1.

Согласно предложенному алгоритму, первоначально была смоделирована процедура сдвига линии 1 до момента совпадения положений наиболее характерных участков двух профилей – их минимумов и

максимумов – вдоль горизонтали (рис. 1), а затем уже – процедура совмещения линий по вертикали (рис. 2).

Как можно видеть, для получения требуемого совмещения (рис. 3) были использованы масштабные коэффициенты k_0 и d_0 , которые и дают возможность по формуле (3) уточнить значение $C_{ТЕК}$. Поставив же его в выражение (2), находятся (рис. 4) критические частоты $f_oF2(t)$ (в данном случае – для каждого 15-минутного сеанса).

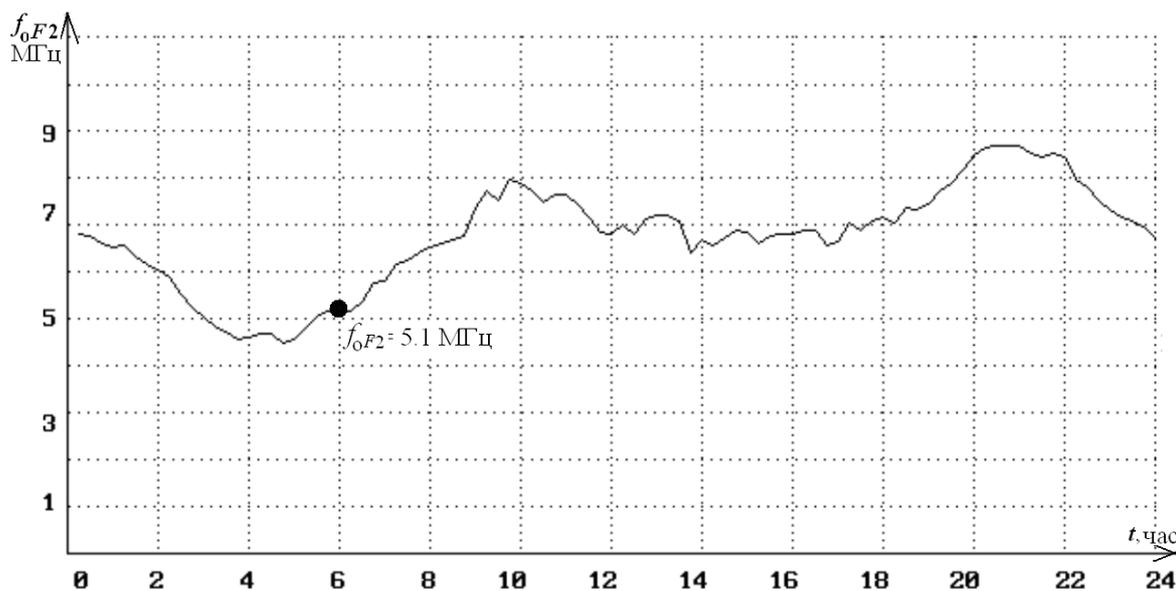


Рис. 4 – Суточное распределение значений критических частот, полученное с помощью радара НР. Точкой отмечено значение критической, полученной по углу поворота плоскости поляризации зондирующей радиоволны

Для того чтобы проверить достоверность работы данного алгоритма, в работе было осуществлен поиск критической в виде реперной точки, что подтвердило бы точность найденных выше значений. Суть поиска такова.

Как известно, одним из источников информации о критической частоте, является величина поворота плоскости поляризации распространяющейся в ионосфере радиоволны, когда поворот определяется при наличии фарадеевского вращения [4]. Для реализации этого метода требуется линейная поляризация зондирующего сигнала и контроль степени поляризации при приеме сигнала рассеяния.

Один из вариантов определения f_oF2 заключается в следующем. Угол поворота плоскости на 90° берется

из анализа уровня мощности $P_C(h)$ сигнала, полученного, например, после излучения импульса и с круговой поляризацией, но принятого на линейно-поляризованную антенну (рис. 5). Для этого случая существует упрощенная формула [6]

$$f_oF2(\text{МГц}) \approx \sqrt{\frac{3380}{2\Delta h(\text{км})}}, \quad (4)$$

которая в нашем случае ($2\Delta h = 130$ км) для утреннего времени 6^{00} даст значение $f_oF2 = 5.1$ МГц, вполне совпадающее с рассчитанным по константе значением для данного момента времени (рис. 4).

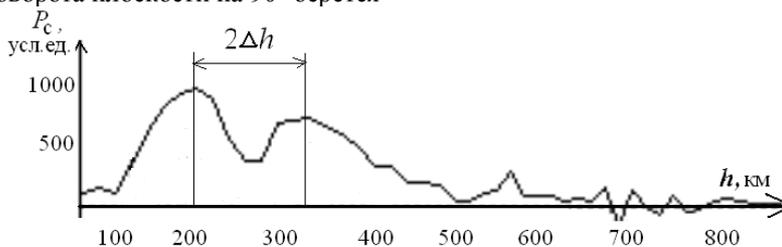


Рис. 5 – Метод получения значения критической частоты в максимуме слоя F2 по углу поворота плоскости поляризации зондирующей радиоволны

Выводы. В статье приведено описание вычислительных подходов, которые включают в себя процедуры получения суточного распределения критических частот $f_oF2(h)$ слоя F2 ионосферы в случае отсутствия сведений, получаемых через заданные промежутки времени (обычно через 15 мин) со станции вертикального зондирования – ионозонда. Согласно этим процедурам, в работе используются сведения о константе радара некогерентного рассеяния.

В то же время отмечается, что указанная константа может менять свои значения из-за “ухода” технических характеристик аппаратуры радара. В случае наличия таких флуктуаций рекомендуется проводить предварительное уточнение константы путем анализа уровня фоновых шумового потока, фиксируемого его приемной антенной. При этом алгоритм предусматривает сравнение графических линий $P_{Эт}(t)$ и $P_{ТЕК}(t)$, представляющих собой распределения шумов вдоль времени суток в эталонный и текущий дни проведения ионосферных измерений. Так как шумы включают в себя несколько составляющих, изменением масштабных коэффициентов при них можно варьировать форму и положение линий.

В статье показано, что достоверность расчета критических частот с использованием таких процедур подтверждается путем нахождения реперных (опорных) точек, которые можно рассчитать с помощью профиля мощности. Для их получения используется анализ угла поворота плоскости поляризации излучаемой радиоволны, если имеется возможность фиксировать мощность сигнала рассеяния независимо в каждом из приемных квадратурных каналов.

Еще одним из достоинств такой обработки является быстрое заполнение пробелов (разрывов) на суточном распределении $f_oF2(h)$, если количество этих пробелов значительное и нет возможности для проведения их аналитической интерполяции.

Список литературы. 1. Эванс Дж. В. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом НР радиоволн / Дж. В. Эванс // ТИИЭР. – 1969. – Т.57, №4. – С. 139–175. 2. Пуляев В. А. Определение параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн: монография / В. А. Пуляев, Д. А. Дзюбанов, И. Ф. Домнин. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2011. – 240 с. 3. Головин В. И. Наблюдения ионосферы с помощью метода НР. Сообщение 2. Аппаратурные и методические особенности / В. И. Головин, В. Рогожкин, В. И. Таран // Вестн. ХПИ : Исследования ионосферы методом НР. – Харьков : ХПИ, 1979. – №155, вып. 1. – С. 12–22. 4. Пуляев В. О. Обчислювальні процедури при аналізі некогерентного розсіяння в іоносферній плазмі : монографія / В. О. Пуляев, С. В. Рогожкін, О. В. Богомаз / – X. : НТУ “ХПІ”, 2014. – 272 с. 5. Shapovalova D. V. Refinement of the incoherent scatter radar constant / D. V. Shapovalova, V. A. Pulyayev // Bulletin of the NTU “KhPI”. Scientific Papers. Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2014, №47 (1089) – P. 5–9. 6. Шаповалова Д. В. Уточнение константы радара некогерентного рассеяния / Д. В. Шаповалова, В. А. Пуляев // XXII Міжн. наук.-практ. конф.: Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я. (MicroCAD-2014) (Харків, Україна, 15–17 жовтня 2014 р.). Збірн. тез доповідей. Секція 17. Навколоземний космічний простір. Радіофізика та іоносфера. Харків: НТУ “ХПІ”. – 2014. – Ч. III. – С. 247.

Bibliography (transliterated): 1. Evans Dzh. V. *Teoreticheskie i prakticheskie voprosy issledovaniya ionosfery metodom NR radiovoln* / Dzh. V. Evans // TIIEER. 1969. Vol. 57, No. 4. P. 139-175. 2. Pulyayev V.A., Dzyubanov D.A., Domnin I.F. *Opredelenie parametrov ionosfery metodom nekoherentnoho rasseyaniya radiovoln: monografiya* // Kharkov: NTU “KhPI”, 2011. 240 p. 3. Holovin V.I., Rohozhkin E.V., Taran V.I. *Nablyudeniya ionosfery s pomoshch'yu metoda NR. Soobshchenie 2. Apparaturnye i metodicheskie osobennosti* // Vestn. KhPI : Issledovaniya ionosfery metodom NR. Kharkov : KhPI, 1979. – No. 155, iss. 1. P. 12-22. 4. Pulyayev V.O., Rohozhkin Ye.V., Bohomaz O.V. *Obchyslyval'ni protsedury pry analizi nekoherentnoho rozsiyannya v ionosferniy plazmi: monografiya* // Kharkov: NTU “KhPI”, 2014. 272 s. 5. Shapovalova D.V., Pulyayev V.A. *Refinement of the incoherent scatter radar constant* // Bulletin of the NTU “KhPI”. Scientific Papers. Series: Radiophysics and ionosphere. Kharkiv: NTU “KhPI”, 2014, No. 47 (1089). P. 5-9. 6. Shapovalova D.V., Pulyayev V.A. *Utochnenie konstanty radara nekoherentnoho rasseyaniya* // XXII Mizhn. nauk.-prakt. konf.: Informatsiyeni tekhnolohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya. (MicroCAD-2014) (Kharkiv, Ukrayina, 15–17 zhovtnya 2014 r.). Zbirn. tez dopovidey. Sektsiya 17. Navkolozemnyy kosmichnyy prostir. Radiofizyka ta ionosfera. Kharkiv: NTU “KhPI”. 2014. Ch. III. P. 247.

Поступила (received) 05.07.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шаповалова Дар'я Валеріївна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студентка; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua

Шаповалова Дарья Валерьевна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студентка; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua

Shapovalova Daria Valeriivna – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», student; tel.: (057) 706-22-87; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua

Пуляев Валерій Олександрович – доктор технічних наук, професор, заступник директора Інституту іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 707-62-21; e-mail: pulyayev@kpi.kharkov.ua

Пуляев Валерий Александрович – доктор технических наук, профессор, заместитель директора Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 707-62-21; e-mail: pulyayev@kpi.kharkov.ua

Pulyayev Valeriy Olexandrovich – doctor of technical sciences, professor, deputy director of the Institute of ionosphere NAS and MES of Ukraine, Kharkiv; tel.: (057) 707-62-21; e-mail: pulyayev@kpi.kharkov.ua