

УДК 53.088.6:53.088.228:550.388

Т. А. СКВОРЦОВ, Л. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, А. В. ФИСУН

СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ИОНОСФЕРЕ МЕТОДОМ ФАРАДЕЕВСКОГО ВРАЩЕНИЯ И СПОСОБ ИХ КОМПЕНСАЦИИ

Рассматривается способ измерения концентрации электронов в ионосфере радаром некогерентного рассеяния с использованием эффекта Фарадея. Исследуются систематические ошибки измерения, которые возникают из-за неточной поляризационной настройки приемной антенны. Получена формула для оценки указанных ошибок и предложен способ, который позволяет их скомпенсировать даже при неточной поляризационной настройке. Способ позволяет также контролировать точность поляризационной настройки приемной антенны.

Ключевые слова: радар некогерентного рассеяния, концентрация электронов, эффект Фарадея, поляризационный эллипс, ошибки измерения, способ компенсации ошибок.

Введение. В радаром некогерентного рассеяния (НР) для измерения концентрации электронов (КЭ) в ионосфере в основном применяется «метод профиля мощности» [1]. При этом используется тот факт, что мощность НР сигнала прямо пропорциональна КЭ.

Однако указанная мощность зависит также от отношения температур электронов и ионов, которые изменяются с высотой. Для измерения температур требуется использование зондирующих импульсов большой длительности (600–1000 мс), так что метод не обеспечивает высокую разрешающую способность.

Альтернативным методом измерения КЭ является «метод фарадеевского вращения», в основу которого положено наблюдение эффекта Фарадея.

Однако «простота и изящество этого метода до известной степени омрачаются рядом практических трудностей» [1]. При этом речь идет о статистических и систематических ошибках измерения.

Как показали экспериментальные и теоретические исследования, статистические ошибки, порождаемые шумами и шумовым характером полезного сигнала, оказываются достаточно малыми (единицы процентов) в пределах высот плотной ионосферы (области F) [2].

Основной причиной систематических ошибок является погрешность поляризационной настройки приемной антенны.

До настоящего времени единственным способом уменьшения указанных систематических ошибок представлялось повышение точности поляризационной настройки.

Поскольку фазовые характеристики антенны и электрические длины трактов СВЧ не контролируются, а возможности расположения в дальней зоне излучателей для контроля настройки антенны отсутствуют, единственная возможность поляризационной настройки это настройка по НР сигналу. Погрешности такой настройки весьма заметны, несмотря на всю ее сложность и трудоемкость.

Наконец, отметим отсутствие в известной литературе формул для оценки влияния погрешностей поляризационной настройки приемной антенны на ошибки измерения высотного профиля КЭ методом фарадеевского вращения.

Целью данной статьи является:

1. Разработка способа измерения, который даже при плохом качестве поляризационной настройки позволяет исключить или значительно уменьшить систематическую погрешность оценки КЭ методом фарадеевского вращения.

2. Получение формулы для оценки влияния погрешности поляризационной настройки на ошибки измерения КЭ методом фарадеевского вращения.

3. Разработка новых способов контроля качества поляризационной настройки приемной антенны.

1. Метод фарадеевского вращения. Известно, что при прохождении волн через ионосферу от радара до данной высоты h и обратно поляризационный эллипс (ПЭ) поворачивается на угол

$$\Phi(h) = kH \int_0^h N_e(l) dl, \quad (1)$$

где $k = 0,0594 \cdot f_0^{-2}$, f_0 – рабочая частота, H – вертикальная составляющая напряженности магнитного поля Земли. $N_e(h)$ – высотный профиль КЭ.

Принцип формирования оценки КЭ основывается на формуле

$$N_e(h) = \frac{1}{kH} \frac{d\Phi(h)}{dh}, \quad (2)$$

которая следует из (1).

Для измерения угла Φ излучаются радиопульсы с круговой поляризацией и противоположным направлением вращения [1], либо один импульс с поляризацией, близкой к линейной [3].

При этом приемная антенна имеет два выхода, настроенных на круговую поляризацию с противоположными направлениями вращения. В частности, в радаре НР Института ионосферы для этого в облучателе антенны имеется два ортогональных вибратора, подключенных через фазовращатель к волноводному мосту [4].

Оценка параметра Φ формируется следующим образом. Известно, что поле с любой поляризацией можно представить в круговом поляризационном базисе. При идеальной настройке фазовращателя

© Т. А. Скворцов, Л. Я. Емельянов, А. В. Фисун, 2015

сигналы на выходе вибраторов можно представить в виде

$$I_1 = \dot{U}e^{i\Psi} + \dot{V}e^{-i\Psi},$$

$$I_2 = i\dot{U}e^{i\Psi} - i\dot{V}e^{-i\Psi},$$

где $\dot{U} = Ue^{iu}$, $\dot{V} = Ve^{iv}$ – стохастические НР сигналы, наводимые в первом вибраторе компонентами поля с правым и левым направлениями вращения, соответственно,

$$\Psi(h) = \Phi(h) + \alpha,$$

где α – угол наклона поляризационного эллипса (ПЭ) зондирующего сигнала до входа в ионосферу.

Сигналы от вибраторов суммируют со сдвигом фазы $\pi/2$ в волноводном мосте так, что сигналы на выходах идеально настроенного волноводного моста

$$\dot{s}_+ = I_1 - iI_2 = 2\dot{U}e^{i\Psi},$$

$$\dot{s}_- = I_1 + iI_2 = 2\dot{V}e^{-i\Psi}.$$

Для каждой высоты вычисляют взаимную ковариацию

$$\langle \dot{s}_+ \dot{s}_-^* \rangle = 4 \langle UV^* \rangle e^{i2\Psi}, \quad (3)$$

а затем оценку искомого угла по формуле [5]

$$\hat{\Psi}(h) = \frac{1}{2} \arctg \frac{\text{Im} \{ \langle \dot{s}_+ \dot{s}_-^* \rangle \}}{\text{Re} \{ \langle \dot{s}_+ \dot{s}_-^* \rangle \}}. \quad (4)$$

Как видно из (3), (4) в результате получаем

$$\hat{\Psi}(h) = \Phi(h) + \alpha. \quad (5)$$

Далее в соответствии с (2) определяется производная функции $\hat{\Psi}(h)$, которая, как видно из (5), в точности равна искомой производной угла $\Phi(h)$ (статистические ошибки здесь не рассматриваются).

2. Влияние погрешностей поляризационной настройки на оценку КЭ. Поскольку фазовые характеристики антенны и электрические длины трактов СВЧ не контролируются, а возможности расположения в дальней зоне излучателей для контроля настройки антенны отсутствуют, то поляризационная настройка осуществляется по НР сигналу. При этом сдвиг фазы на $\pi/2$ осуществляется с погрешностью ε и на выходах моста получаем

$$\dot{s}_+ = I_1 e^{i\frac{\varepsilon}{2}} - iI_2 e^{-i\frac{\varepsilon}{2}} = 2\dot{U}e^{i\Psi} \cos \frac{\varepsilon}{2} - i2\dot{V}e^{-i\Psi} \sin \frac{\varepsilon}{2},$$

$$\dot{s}_- = I_1 e^{i\frac{\varepsilon}{2}} + iI_2 e^{-i\frac{\varepsilon}{2}} = i2\dot{U}e^{i\Psi} \sin \frac{\varepsilon}{2} + 2\dot{V}e^{-i\Psi} \cos \frac{\varepsilon}{2}. \quad (6)$$

Вычисляя ковариацию сигналов (6), получим

$$\langle \dot{s}_+ \dot{s}_-^* \rangle = 4 \left\{ \langle UV^* \rangle e^{i2\Psi} \cos^2 \frac{\varepsilon}{2} + \langle VU^* \rangle e^{-i2\Psi} \sin^2 \frac{\varepsilon}{2} - i \sin \frac{\varepsilon}{2} \cos \frac{\varepsilon}{2} \left(\langle U^2 \rangle + \langle V^2 \rangle \right) \right\}. \quad (7)$$

С учетом того, что $\langle UV^* \rangle = \langle VU^* \rangle$ выражение (7) приводится к виду

$$\langle \dot{s}_+ \dot{s}_-^* \rangle = 4 \langle UV^* \rangle \cos \varepsilon \left\{ e^{i2\Psi} - idtg \varepsilon \right\}, \quad (8)$$

где

$$d = \frac{\langle U^2 \rangle + \langle V^2 \rangle}{2 \langle UV^* \rangle}.$$

Отметим, что при $\langle U^2 \rangle = \langle V^2 \rangle$ получаем

$$d = \frac{1}{\rho},$$

где ρ – коэффициент взаимной корреляции компонент НР сигнала с противоположными направлениями вращения.

В соответствии с (4) и (8) при наличии ошибок настройки получаем оценку

$$\hat{\Psi}(h) = \frac{1}{2} \arctg \left\{ tg 2\Psi(h) - tg \varepsilon \frac{d}{\cos 2\Psi(h)} \right\}. \quad (9)$$

При вычислении производной (9) в соответствии с (2) получаем

$$\frac{d\hat{\Psi}}{dh} = B(h) \frac{d\Phi}{dh}, \quad (10)$$

где

$$B(h) = \frac{1 - tg \varepsilon d \sin 2\Psi(h)}{1 - 2d \sin 2\Psi(h) tg \varepsilon + d^2 tg^2 \varepsilon}. \quad (11)$$

При этом оценка КЭ

$$\hat{N}_e(h) = B(h) N_e(h). \quad (12)$$

Практически выполняется условие $\varepsilon \ll \pi/2$ так, что из (11) получаем

$$B(h) \approx 1 + \varepsilon d \sin 2\Psi(h).$$

Для наглядного представления о характере искажений профиля КЭ было проведено вычисление оценки по формулам (1), (11), (12).

При интегрировании использовалась модель формы нормированного профиля КЭ вида

$$F(h) = \frac{N_e(h)}{N_{e\max}} = \frac{1}{1 + b^2(h - h_0)^2}$$

так, что

$$2\Phi(h) = kN_{e\max} \int_0^h F(h) dh = kHN_{eM} \left\{ \frac{1}{b} \arctg[b(h - h_0)] + \frac{1}{b} \arctg(bh_0) \right\}. \quad (13)$$

Примеры результатов расчета для $\varepsilon = 0,1$ и $d = 1$ приведены на рис. 1 и рис. 2. Пунктирной линией показан модельный высотный профиль КЭ, а сплошной линией – оценка данного профиля, вычисленная по формулам (10), (11), (13).

Рис. 1 построен для $N_{e\max} = 10^{12} \text{ м}^{-3}$, а рис. 2 – для $N_{e\max} = 5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

На рисунках видны характерные квазигармонические искажения, частота и амплитуда которых увеличиваются при увеличении КЭ.

3. Способ компенсации влияния погрешностей поляризационной настройки на оценку КЭ. Пусть

при некоторых условиях измерения и при некотором произвольном угле наклона ПЭ на передающей стороне α_1 получена оценка

$$\hat{N}_{e1}(h) \approx N_e(h) [1 + \varepsilon d \sin 2\Psi_1(h)] .$$

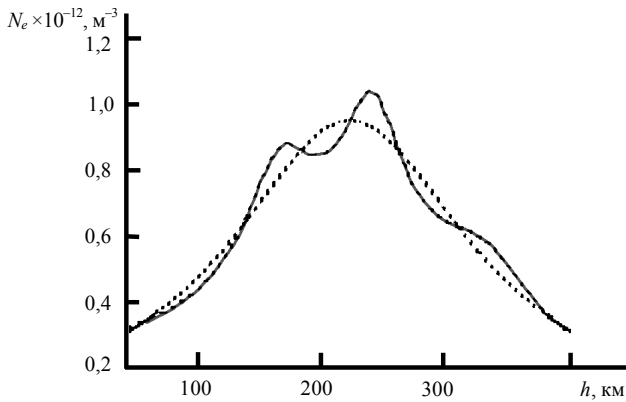


Рис. 1 – Результат расчета высотного профиля КЭ для $\varepsilon = 0,1, d = 1$ и $N_{e\max} = 10^{12} \text{ м}^{-3}$ (сплошная линия) и исходный (модельный) профиль КЭ (пунктир)

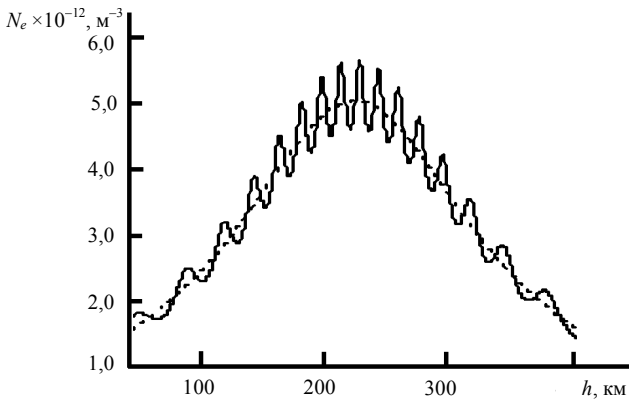


Рис. 2 – Результат расчета КЭ для $\varepsilon = 0,1, d = 1$ и $N_{e\max} = 5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ (сплошная линия) и исходный (модельный) профиль КЭ (пунктир)

Если провести измерения в тех же условиях, но при угле $\alpha_2 = \alpha_1 + \pi/2$, получим

$$\begin{aligned} \hat{N}_{e2}(h) &\approx N_e(h) [1 + \varepsilon d \sin 2\Psi_2(h)] = \\ &= N_e(h) [1 - \varepsilon d \sin 2\Psi_1(h)] . \end{aligned}$$

Таким образом, искажения высотного профиля КЭ в двух экспериментах в приближении малости ошибок настройки одинаковы по величине и противоположны по знаку.

Пример профилей КЭ, вычисленных по точным формулам (10), (11), (13) приведен на рис. 3. Пунктирной линией показан модельный профиль, сплошной линией – оценка профиля, полученная в первом эксперименте, а точками – оценка во втором эксперименте, т.е. с поворотом ПЭ.

Таким образом, можно получить оценку

$$\hat{N}_e(h) = \frac{1}{2} (\hat{N}_{e1}(h) + \hat{N}_{e2}(h)) = N_e(h) , \quad (14)$$

в которой ошибки, вызванные неточной поляризационной настройкой приемной антенны, в

приближении малости ошибок настройки будут полностью скомпенсированы.

В частности, результат суммирования искаженных профилей КЭ, показанных на рис. 3, в соответствии с выражением (14) приведен на рис. 4.

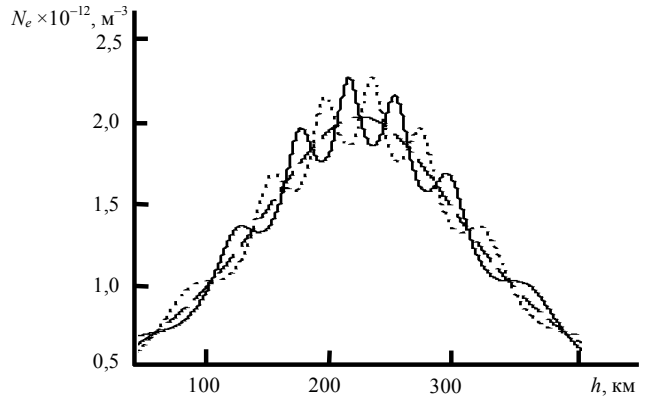


Рис. 3 – Профили КЭ, вычисленные по точным формулам (10), (11), (13). Пунктирной линией показан модельный профиль, сплошной линией и точками – оценки профиля, полученные в первом и втором экспериментах соответственно

Точками показан модельный профиль, а сплошной линией – результат суммирования искаженных профилей. Как видно, при данных ошибках настройки ($\varepsilon = 0,1$) результат суммирования практически совпадает с модельным профилем.

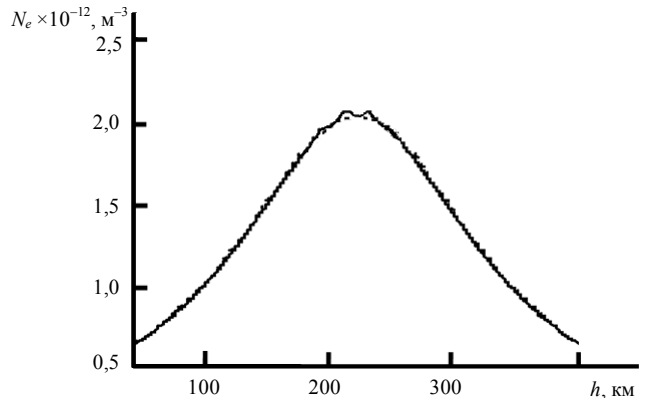


Рис. 4 – Результат суммирования искаженных профилей КЭ, показанных на рис. 3 (сплошная линия) и модельный профиль КЭ (точки)

Отметим, что технические возможности изменения угла α на $\pi/2$ существуют. Наиболее простой способ изменения указанного угла заключается в том, чтобы использовать при излучении разные вибраторы. Другой способ основывается на том, что угол наклона ПЭ определяется формулой [6]

$$\beta = \frac{1}{2} \arctg \frac{\dot{p} + \dot{p}^*}{1 - |p|^2} , \quad (15)$$

где $\dot{p} = \frac{\dot{E}_2}{E_1} = |p| e^{i\theta}$ представляет собой отношение комплексных амплитуд излучаемого поля в линейном

поляризационном базисе. Выражение (15) можно записать в виде

$$\beta = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2 \cos \Phi}{\frac{1}{|p|} - |p|}. \quad (16)$$

Из (15) и (16) видно, что если установить $|p| = 1$, то $\beta = \pm \pi/4$, причем знак зависит от знака косинуса. Таким образом, если при $|E_1| = |E_2|$ на одном из ортогональных вибраторов изменить фазу на π , то ПЭ развернется на $\pi/2$.

4. Возможности контроля качества настройки.

При описанном зондировании с поворотом ПЭ появляются дополнительные возможности контроля качества поляризационной настройки приемной антенны. Первая возможность основана на анализе функции

$$a(h) = \frac{\hat{N}_{e1(h)} - \hat{N}_{e2(h)}}{\hat{N}_{e1(h)} + \hat{N}_{e2(h)}} = \varepsilon d \sin 2\Psi(h). \quad (17)$$

Функция (17) в максимуме равна $a_{max} = \varepsilon d$, откуда при известном d получаем величину ε . Так, например, при линейной поляризации зондирующего сигнала $\langle U^2 \rangle \approx \langle V^2 \rangle$. Если, к тому же, используется короткий зондирующий импульс, то $\langle UV^* \rangle \approx \langle U^2 \rangle \approx \langle V^2 \rangle$, так что $d \approx 1$.

Вторая возможность контроля основана на анализе высотного профиля мощности НР сигнала или КЭ, измеренной методом профиля мощности. Действительно, исходя из (6) получаем, что средние мощности сигналов на выходе моста

$$P_+ = \langle \dot{s}_+ \dot{s}_+^* \rangle = 4 \left\{ \langle U^2 \rangle \cos^2 \frac{\varepsilon}{2} + \langle V^2 \rangle \sin^2 \frac{\varepsilon}{2} - \langle UV^* \rangle \sin \varepsilon \sin 2\Psi \right\}, \quad (18)$$

$$P_- = \langle \dot{s}_- \dot{s}_-^* \rangle = 4 \left\{ \langle V^2 \rangle \cos^2 \frac{\varepsilon}{2} + \langle U^2 \rangle \sin^2 \frac{\varepsilon}{2} - \langle UV^* \rangle \sin \varepsilon \sin 2\Psi \right\}. \quad (19)$$

Таким образом, наблюдая, например, мощность (18) в указанных двух экспериментах с разной поляризацией зондирующего сигнала, получим

$$P_{+1} = 4 \left\{ \langle U^2 \rangle \cos^2 \frac{\varepsilon}{2} + \langle V^2 \rangle \sin^2 \frac{\varepsilon}{2} - \langle UV^* \rangle \sin \varepsilon \sin 2\Psi \right\},$$

$$P_{+2} = 4 \left\{ \langle U^2 \rangle \cos^2 \frac{\varepsilon}{2} + \langle V^2 \rangle \sin^2 \frac{\varepsilon}{2} + \langle UV^* \rangle \sin \varepsilon \sin 2\Psi \right\}.$$

Откуда получаем

$$\gamma = \frac{P_{+2} - P_{+1}}{P_{+2} + P_{+1}} = \frac{\langle UV^* \rangle \sin \varepsilon \sin 2\Psi}{\langle U^2 \rangle \cos^2 \frac{\varepsilon}{2} + \langle V^2 \rangle \sin^2 \frac{\varepsilon}{2}}, \quad (20)$$

В экстремальных точках при линейной поляризации сигнала и малости ошибок настройки (20) имеет вид

$$\gamma \approx \varepsilon \rho \quad (21)$$

или, при высокой корреляции, наблюдаемой при коротком зондирующем импульсе,

$$\varepsilon \approx \gamma = \frac{P_{+2} - P_{+1}}{P_{+2} + P_{+1}}. \quad (22)$$

Если же в соответствии с методом профиля мощности вычислены высотные профили КЭ по формулам

$$N_{e1}(h) = P_{+1}(h)C(h, \beta),$$

$$N_{e2}(h) \approx P_{+2}(h)C(h, \beta),$$

где $C(h, \beta)$ – функция, зависящая от высоты и отношения температур электронов и ионов $\beta = T_e/T_i$, то ошибка ε вычисляется на основании соотношения (17) так же, как и при использовании метода фарадеевского вращения.

Так, например, в проведенном на харьковском радаре эксперименте в двух 10 минутных сеансах измерений с разным наклоном ПЭ в излучаемой волне методом профиля мощности были получены КЭ, которые показаны на рис. 5. Пунктирная кривая отображает высотный профиль, измеренный в первом сеансе, точки – во втором сеансе.

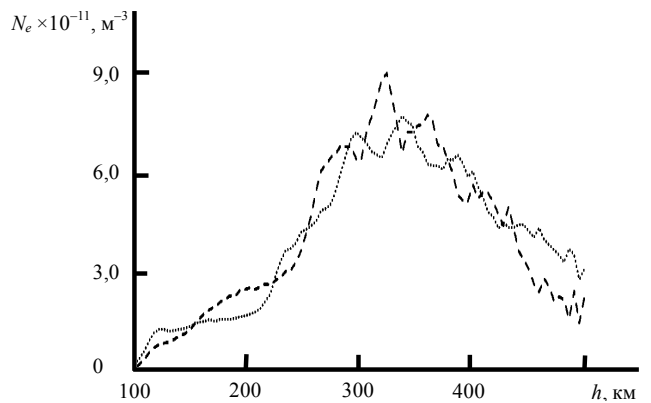


Рис. 5 – Измеренные с помощью радара НР профили КЭ с разным наклоном ПЭ в излучаемой волне. Пунктирная кривая отображает высотный профиль, измеренный в первом сеансе, точки – во втором сеансе

Пользуясь рис. 5 и формулой (21), можно определить, что погрешность поляризационной настройки ε в данном случае составляет около 0,14 рад.

Заключение. При измерении КЭ в плотной ионосфере использование метода фарадеевского вращения является альтернативой использованию метода профиля мощности. При этом метод фарадеевского вращения не требует измерения температур ионов и электронов и обеспечивает лучшую разрешающую способность. Кроме того, совместное использование метода профиля мощности и метода фарадеевского вращения позволяет измерять напряженность магнитного поля Земли в плотной ионосфере [2, 7].

Качество поляризационной настройки приемной антенны является практически единственным фактором, порождающим систематические ошибки измерения КЭ методом фарадеевского вращения. В то же время повышение точности поляризационной

настройки антенны представляет трудную техническую задачу.

Предложенный и рассмотренный в статье способ позволяет исключить указанные ошибки даже при существенных погрешностях поляризационной настройки антенны. Кроме того, предложенная поляризационная манипуляция позволяет контролировать качество поляризационной настройки.

Таким образом, актуальным является экспериментальное исследование, а также использование данного способа при проведении ионосферных измерений на радаре НР.

Список литературы: 1. Эванс Дж. В. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн / Дж. В. Эванс // ТИИЭР. – 1969. – Т. 57, № 4. – С. 139-175. 2. Скворцов Т. А. Радиолокационный метод измерения геомагнитного поля в ионосфере / Т. А. Скворцов, Л. Я. Емельянов, А. В. Фисун // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2014. Вып. 179. – С. 10-17. 3. Пат. № 68436, Украина, МПК⁷ G01S 13/95. Спосіб визначення концентрації електронів в іоносфері / Скворцов Т. О., Ємельянов Л. Я., Фисун А. В., Рогожкін Є. В. – У 2011 10688; заявл. 05.09.2011; опубл. 26.03.2012, Бюл. №6. – 5 с. 4. Domnin, I. F. Kharkiv Incoherent Scatter Facility / I. F. Domnin, Ya. M. Chepurnyu, L. Ya. Emelyanov et al. // Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Politechnic Institute”. Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU “KhPI”. – 2014. – No 47 (1089). – P. 28-42. 5. Ткачев Г. Н. Измерение разности фаз между флуктуирующими сигналами, принятыми на ортогонально поляризованные антенны / Г. Н. Ткачев, Т. А. Скворцов, В. Д. Карлов

// Радиотехника. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. – 1982. – Вып. 60. – С. 57-67. 6. Канарейкин Д. Б. Поляризация радиолокационных сигналов / Д. Б. Канарейкин, Н. Ф. Павлов, В. А. Потехин – М.: Советское радио. – 1966. – 440 с. 7. Пат. № 71162, Україна, МПК⁷ G01S 13/95. Спосіб вимірювання параметрів іоносфери і магнітосфери / Ємельянов Л. Я., Скворцов Т. О., Склярів І. Б., Фисун А. В. – № U201113371; заявл. 14.11.2011; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13. – 4 с.

Bibliography (transliterated): 1. Evans, J. V. *Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar*, Proc. IEEE, 57, 496–530, 1969. 2. Skvortsov, T. A., L. Ya. Emelyanov, and A. V. Fesun. "Radiolokatsionnyj metod izmerenija geomagnitnogo polja v ionosfere" Radiotekhnika. No 179. 2014. 10–17. Print. 3. Patent No 68436, Ukraine, G01S 13/95. *Sposib viznachennya kontsentratsiyi elektroniv v ionosferi* / Skvortsov, T. A., L. Ya. Emelyanov, A. V. Fesun, and E. V. Rogozhkin; patented 05.09.2011; published 26.03.2012, Bulletin No 6. (Print). 4. Domnin, I. F., Ya. M. Chepurnyu, L. Ya. Emelyanov et al. *Kharkiv Incoherent Scatter Facility* // Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Politechnic Institute”. Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU “KhPI”. No 47 (1089). 2014. 28–42. 5. Tkachev, G. N., T. A. Skvortsov, and V. D. Karlov. "Izmerenie raznosti faz mezhdru fluktuiruyuschimi signalami, primyatymi na ortogonalno polyarizovannyye anteny." Radiotekhnika. No 60. 1982. 57–67. Print. 6. Kanareykin, D. B., N. F. Pavlov, and V. A. Potehin. *Polyarizatsiya radiolokatsionnyih signalov*. Moscow: Sovetskoe radio, 1966. Print. 7. Patent No 71162. Ukraine, G01S 13/95. *Sposib vimiryuvannya parametriv ionosferi i magnitosferi* / Emelyanov, L. Ya., T. A. Skvortsov, I. B. Sklyarov, and A. V. Fesun.; patented 14.11.2011; published 10.07.2012, Bulletin No 13 (Print).

Поступила (received) 10.08.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Скворцов Тарас Олександрович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (063) 611-83-50; e-mail: skvortsov_ta@mail.ru.

Скворцов Тарас Александрович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (063) 611-83-50; e-mail: skvortsov_ta@mail.ru.

Skvortsov Taras Aleksandrovich – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, National Technical University “Kharkiv Polytechnical Institute”, Kharkiv; tel.: (063) 611-83-50; e-mail: skvortsov_ta@mail.ru.

Ємельянов Леонід Якович – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Інститут іоносфери, завідувач відділу, м. Харків; тел.: 706-22-87, (096) 036-28-39; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

Емельянов Леонид Яковлевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ионосферы, заведующий отделом, г. Харьков; тел.: 706-22-87, (096) 036-28-39; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

Emelyanov Leonid Yakovlevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Ionosphere, Head of Department, Kharkiv; tel.: 706-22-87, (096) 036-28-39; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

Фисун Андрій Васильович – аспірант кафедри «Радіоелектроніка»; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел.: (068) 954-61-55; e-mail: av_fesun@mail.ru.

Фисун Андрей Васильевич – аспирант кафедры «Радиоэлектроника»; Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», тел.: (068) 954-61-55; e-mail: av_fesun@mail.ru.

Fesun Andrey Vasilyevich – Postgraduated Student at the Department of “Radioelectronics”; National Technical University “Kharkiv Polytechnical Institute”, Kharkiv; tel.: (068) 954-61-55; e-mail: av_fesun@mail.ru.