УДК 681.518.2

О.В. Шульга

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

ЗАГАЛЬНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ ТРАНСІОНОСФЕРНОГО ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ НА ПЕРЕШКОДОСТІЙКІСТЬ НАЗЕМНИХ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Проведений аналіз впливу факторів трансіоносферного поширення радіохвиль (ТІПР) на перешкодостійкість приймальних пристроїв РТС: поглинання енергії радіохвиль; зміна напрямку їх поширення (рефракція); розсіювання радіохвиль на неоднорідностях іоносфери; відмінність фазової та групової швидкостей поширення через іоносферу різних частотних складових випромінюваної хвилі. Визначені методи дослідження неоднорідної структури іоносфери Землі: радіофізичні, прямі, оптичні. Описана комплексна модель розподілу електронної концентрації в іоносфері.

Ключові слова: *іоносфера, трансіоносферне поширення радіохвиль (ТІПР), неоднорідність іоносфери, космічний апарат (КА), електронна концентрація, монохроматична хвиля.*

Вступ

Оскільки для РТС характерно трансіоносферне поширення радіохвиль (ТІПР), то воно супроводжується такими основними факторами:

– поглинанням енергії радіохвиль;

– зміною напрямку їх поширення (тобто рефракцією);

– розсіюванням радіохвиль на неоднорідностях іоносфери;

– відмінністю фазової та групової швидкостей поширення через іоносферу різних частотних складових випромінюваної хвилі, обумовлених дисперсійними властивостями іоносфери.

Вплив цих факторів проявляється в зміні параметрів ЕМВ у точці прийому, однозначно відповідних зміни параметрів сигналу, що приймається на вході схем обробки приймальних пристроїв радіосистем. Унаслідок чого перешкодостійкість прийому сигналів у РТС буде погіршуватися.

Усі методи дослідження неоднорідної структури можна розділити на три групи: радіофізичні, прямі, оптичні.

Останні володіють істотними обмеженнями, другі – на додачу до того ж, є епізодичними, оскільки використовують зондові вимірювання на борту космічного апарата або ракети. З цих причин основними методами є радіофізичні. Вони засновані на вимірюванні варіацій характеристик радіохвиль (амплітуди, фази, доплерівського зсуву частоти, фарадеєвського кута повороту еліпса поляризації і т.д.), що пройшли, відображених або розсіяних випадково-неоднорідною іоносферою.

Одним із найбільш інформативних методів є метод супутникових радіомаяків. У цьому випадку на землі приймаються радіосигнали, що випромінюються передавачами, встановленими на борту КА. Останній знаходиться на висотах від 1000 км до 36000 км. Використовуються радіохвилі з частотою від 150 МГц до 6000 МГц. Вдається вивчити просторовий спектр **Ф** (до) неоднорідностей, інтенсивність електронної концентрації ΔN^2 їх висоту Z_H і швидкість руху vn.

Мета статті: вивчення загальних закономірностей впливу факторів трансіоносферного поширення радіохвиль на перешкодостійкість наземних радіотехнічних систем з використанням радіофізичних, прямих та оптичних методів дослідження неоднорідної структури іоносфери.

Основна частина

Для того, щоб провести якісний аналіз впливу факторів трансіоносферного РРВ (поглинанням енергії радіохвиль, зміною напрямку їх поширення (тобто рефракцією), розсіюванням радіохвиль на неоднорідностях іоносфери, відмінністю фазової та групової швидкостей поширення через іоносферу різних частотних складових випромінюваної хвилі) на перешкодостійкість приймальних пристроїв РТС скористаємося елементарними уявленнями про структуру іоносфери.

Як відомо [1] розподіл електронної концентрації (ЕК) іоносфери по висоті z можна охарактеризувати сукупністю деякого регулярного середнього значення $N_{ecp}(z)$ і випадкових відхилень ЕК у просторі $\Delta N_e(x, y, z) = \Delta N_e(\rho, z)$ щодо цього середнього

$$N_e = N_{e\,cp}(z) + \Delta N_e(\rho, z)\,. \qquad (1)$$

Приклад, який ілюструє розподіл ЕК в природній (незбуреній) іоносфері показаний на рис. 1.

Детерміновану складову розподілу ЕК можна охарактеризувати за допомогою інтегральної середньої ЕК

$$N_{Tср} = \int_0^{\infty} N_{e\,ср}(z)dz = z_e N_{em}\,, \qquad (2)$$

де z_e – еквівалентна товщина іоносфери; N_{em} – максимальне середнє значення ЕК (в F – шарі іоносфери).

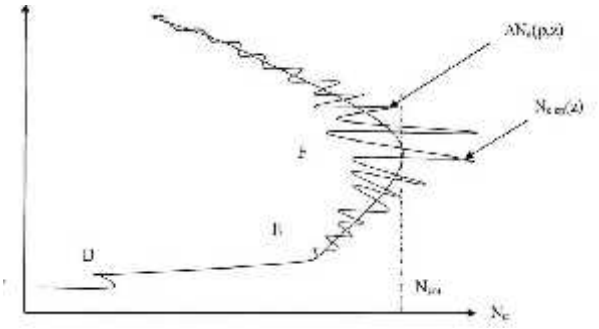

Рис. 1. Розподіл електронної концентрації

Згідно (2) її модель можна представити у вигляді однорідного шару з еквівалентною товщиною і електронної концентрацією $N_{ЭМ}$.

Флуктуаційну складову розподілу ЕК в неоднорідностях іоносфери по всій її товщині $z_э$, можна охарактеризувати флуктуаціями інтегральної ЕК. Її модель можна представити у вигляді тонкого шару неоднорідностей з флуктуаціями ЕК $\Delta N_T(\rho)$, розміщеного на виході іоносферного шару товщиною $z_э$.

Таким чином, комплексну модель розподілу ЕК в іоносфері можна представити у вигляді (рис.2) сукупності однорідного шару товщиною $z_э$ з електронною концентрацією $N_{ем}$ і розташованого над ним тонкого шару неоднорідностей з флуктуаціями ЕК, відповідними $\Delta N_T(\rho)$.

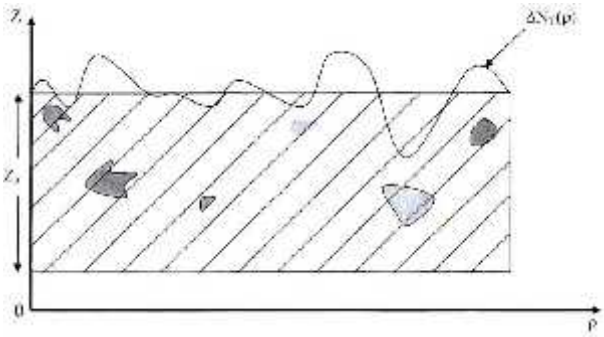

Рис.2. Комплексна модель розподілу електронної концентрації в іоносфері

Вплив на іоносферу збурюючих факторів викликає зростання як середньої інтегральної ЕК $N_{тср}$, так і флуктуацій $\Delta N_T(\rho)$ [1, 2]. Причому в першому наближенні можна вважати, що збільшенням $\Delta N_T(\rho)$ відбувається пропорційно зростанню $N_{тср}$, який обумовлений збільшенням. $N_{ем}$

Проаналізуємо вплив перших двох чинників трансіоносферного РРВ на перешкодостійкість РТС. Нагадаємо, що перешкодостійкість будь-якого оптимального приймача оцінюється за допомогою функціональної залежності $P_{ош} = \psi(h_0^2)$,де h_0^2– вхідна відношення E_r/N_0, яке відповідає відношенню потужностей сигналу і завади на виході даного приймача [3]

$$h_0^2 = \frac{E_r}{N_0} = \left(\frac{P_c}{P_п}\right)_{вих}. \qquad (3)$$

Очевидно, що вплив поглинання в іоносфері і їх рефракція приводять до зростання Рош внаслідок зменшення вхідного відносини $h^2 = E_r'/N_0$ в порівнянні з забезпечуваним $h_0^2 = E_r/N_0$ при ідеальному РРВ

$$h^2 = \eta_{п.р} h_0^2\,, \qquad (4)$$

де $\eta_п<1$ – коефіцієнт енергетичних втрат, обумовлений поглинанням радіохвиль в іоносфері; $\eta_р<1$ – коефіцієнт енергетичних втрат, обумовлений неточністю наведення антен через іоносферної рефракції радіохвиль. Для зазначених коефіцієнтів втрат характерні однотипні залежності виду

$$\eta_{п.р} \sim \frac{N_{тср}}{f_0^2}\,. \qquad (5)$$

Крім того, величина $\eta_р$ істотно залежить від кута місця v радиотрас і дорівнює нулю при v = 90°.

Таким чином, загальні закономірності впливу послаблюючого і рефракційного факторів трансіоносферного РРВ на перешкодостійкість РТС полягають у тому, що збільшення інтегральної середньої ЕК іоносфери $N_{тср}$ і зменшення несучої частоти переданих сигналів f_0 викликають зменшення відношення сигнал-шум на вході приймача РТС і, як наслідок зростання Рош.

Вплив третього і четвертого факторів трансіоносферного РРВ на перешкодостійкість РТС проявляється більш складним чином, оскільки обумовлено тонкими фазовими ефектами, що відбуваються в іоносфері і вільному просторі за нею.

У зв'язку з цим представляється доцільним спочатку розглянути суть прояву цих ефектів для подальшого випадку трансіоносферного поширення монохроматичному хвилі, а потім узагальнити розроблений підхід до визначення характеристик сигналу, що приймається в трансіоносферних каналах зв'язку на випадок передачі модульованих хвиль.

Якщо падаюча на іоносферний шар монохроматична хвиля є плоскою і спрямована по нормалі до нього, то в першому наближенні можна вважати, що амплітудний фронт хвилі на виході даного шару тобто в площині $z = z_э$ практично не змінюється в порівнянні з падаючої, тобто $A(\rho, z_э) \approx A_0$. У той же час фазовий фронт монохроматичному хвилі на виході іоносферного шару може істотно змінюватися, що пояснюється його значною залежністю від величини відносної діелектричної проникності іоносфери $\varepsilon(\rho, z)$ [5,6]

$$\varphi(\rho, z_e) = \frac{2\pi}{\lambda}\int_0^{z_e}\sqrt{\varepsilon(\rho,z)}dz = \frac{2\pi}{\lambda}\int_0^{z_e}\sqrt{\bar{\varepsilon}(z) + \Delta\varepsilon(\rho,z)}dz\,. \qquad (6)$$

У свою чергу середнє значення і флуктуації діелектричної проникності іоносфери визначається відповідними параметрами її ЕК як

$$\bar{\varepsilon}(z) = 1 - \frac{80{,}8}{f_0^2} \cdot N_{ecp}(z), \qquad (7)$$

$$\Delta\varepsilon(\rho, z) = -\frac{80{,}8}{f_0^2} \cdot \Delta N_e(\rho, z). \qquad (8)$$

Враховуючи, що для частот f_0, використовуваних в РТС, справедливо співвідношення

$$f_0^2 >> 80{,}8\lambda[N_{ecp}(z)+) + \Delta N_e(\rho, z)], \qquad (9)$$

функцію ε(ρ, z) можна розкласти в біноміальний ряд, обмежившись при цьому двома першими членами. В результаті перетворень отримуємо

$$\varphi(\rho, z_e) = k_0 z_e + \bar{\varphi}(z_e) + \Delta\varphi(\rho, z_e), \qquad (10)$$

де $k_0 = 2\pi/\lambda = 2\pi f_0/c$.

$$\bar{\varphi}(z_e) = -\frac{80{,}8\pi}{cf_0} N_{Tcp} = -\frac{80{,}8\pi}{cf_0} z_e N_{em},$$

(11)

$$\Delta\varphi(\rho, z_e) = -\frac{80{,}8\pi}{cf_0} \Delta N_T(\rho). \qquad (12)$$

Аналіз цього виразу показує, що фазовий фронт монохроматичному хвилі на виході іоносферного шару визначається як сума набігу фази у вільному просторі на відстані $z_э$, середнього значення фазового запізнювання в іоносфері $\varepsilon(z_э)$, обумовленого однорідним шаром ЕК, і флуктуацией фазового запізнювання $\Delta\varphi(\rho, z_э)$, обумовлених інтегральними неоднорідностями іоносфери. У силу того, що вклад в ці флуктуації вносять безліч неоднорідностей ЕК уздовж лінії візування, то, згідно центральній граничній теоремі, вони повинні підкорятися гауссівському закону розподілу ймовірностей (ЗРЙ).

Подальший процес поширення монохроматичному хвилі за іоносферних шаром в точку прийому опишемо за допомогою традиційного для теорії навігації НМА побудови багатопроменевих моделей. Така можливість існує завдяки тому, що згідно принципу Гюйгенса поле в точці прийому можна розглядати як результат інтерференції безлічі променів, створюваних елементарними площадками (р ;) на поверхні фронту хвилі, що бере участь у процесі поширення [2, 4]. Тоді сигнал на вході приймача РТС можна представити у вигляді суми L променів, що мають приблизно однакові коефіцієнти ослаблення ki ~ Ao і випадкові початкові фази $\Theta_i = \Delta\varphi(\rho_i)$.

Механізм утворення багатопроменевості при трансіоносферному поширенні сигналу показаний на рис. 3. Для побудови багатопроменевих моделей трансіоносферних каналів передачі сигналів необхідно визначити аналітичну залежність прийнятого сигналу $S_r(t)$ від переданого St (t) і передавальних характеристик каналів передачі сигналів, а також встановити статистичні параметри останніх [5].

Передаваний монохроматичний сигнал звичайно записується у вигляді

$$S_t(t) = \sqrt{2}\,\mathrm{Re}\left\{\sqrt{P_t}\, e^{j\bar{\omega}_0 t}\right\}, \qquad (13)$$

де P_t – потужність переданого сигналу.

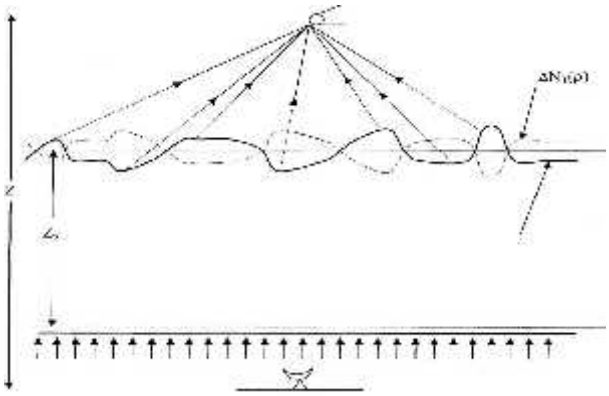

Рис. 3. Механізм утворення багатопроменевості

Перш ніж приступити до визначення $S_r(t)$ на основі виразу (5), слід врахувати, що деякі аналітичні представлення РРВ, прийняті в СТС і СРФ, відрізняються між собою.

Зокрема, для опису переданого сигналу і його перетворення Фур'є беруть позитивний знак при exp(jωt), а не негативний (як в СРФ). Крім того, для опису прийнятого сигналу оперують з просторовим множником exp (-jkr) = exp[-jφ(ρ, z)], а не з exp[(φ(ρ, z)], як при СРФ [3, 4]. Тоді, представивши фазовий фронт монохроматичному хвилі на виході іоносферного шару сукупністю його елементарних ділянок $\varphi(\rho, z_э) = = \sum_{i=1}^{L}\varphi(\rho_i)$ і ототожнюючи сигнал на вході приймача з полем ЕМХ в точці прийому, його комплексну амплітуду можна описати як

$$\dot{S}_r = \sum_{i=1}^{L} A_0 \cdot e^{-j\varphi(\rho_i)} = \sum_{i=1}^{L} A_0 \cdot e^{-j\Delta\varphi(\rho_i)} \cdot e^{-j(k_0 z + \bar{\varphi})}.$$

(14)

Даний вираз можна записати в більш зручному вигляді, якщо врахувати, що амплітуда хвилі у вільному просторі визначається таким співвідношенням

$$A_0^2 = P_t F_0, \qquad (15)$$

де F_0 – множник ослаблення у вільному просторі, а вираз (15) можна представити як

$$\varphi(\omega_0, \rho, z_e) = \omega_0\left[\frac{z_e}{c} + \bar{\tau} + \Delta\tau(\rho)\right],$$

(16)

де $\bar{\tau} = -\frac{40{,}4(2\pi)^2}{\omega_0^2 c} \cdot N_{Tcp}$ – середній час затримки ЕМВ в іоносферному шарі; $\Delta\tau = -\frac{40{,}4(2\pi)^2}{\omega_0^2 c} \cdot \Delta N_T(\rho)$ – флуктуації часу затримки різних ділянок $\Delta\tau(\rho_i)$ фронту волни на виході іоносфери відносно $\bar{\tau}$.

Оскільки $\Delta\tau(\rho_i)$ однозначно визначають відносний час запізнювання Ах; окремих променів в точку прийому, то в результаті маємо

$$\dot{S}_r = \sqrt{P_t}\sum_{i=1}^{L}\sqrt{F_0}\cdot e^{-j\omega_0\Delta\tau_i}\cdot e^{-j\omega_0\left(\frac{z}{c}+\bar{\tau}\right)}. \quad (17)$$

Тоді приймається сигнал описується відомим співвідношенням

$$S_r(t) = \sqrt{2}\,\mathrm{Re}\left\{\dot{S}_r e^{j\omega_0 t}\right\} = \sqrt{2}\,\mathrm{Re}\left\{\sqrt{P_t}\,b e^{j\omega_0(t-\tau_{cp})}\right\}, \quad (18)$$

де $\tau_{cp} = \frac{z}{c} + \bar{\tau} = t_0 + \bar{\tau}$ – середній час запізнення по всім променям, $\dot{b} = \sum_{i=1}^{L} k_i \cdot e^{i\Theta i} = \sum_{i=1}^{L}\sqrt{F_0}\,e^{-j\omega_0\Delta\tau_i}$ – коефіцієнт передачі каналу зв'язку.

Даний коефіцієнт відображає наявність загальних завмирань в прийнятому сигналі (8), які обумовлені розсіюючими властивостями іоносферних неоднорідностей $\Delta N_T(\rho)$. Оскільки флуктуації фазового фронту хвилі на виході іоносфери (5) мають гауссівський ЗРЙ, то традиційне в СТС допущення про гауссівський характер завмирань для трансіоносферних каналів зв'язку є цілком обґрунтованими. Модуль b змінюється в загальному випадку відповідно до райсівським ЗРВ і характеризується дисперсією

$$\left|\dot{b}\right|^2 = \alpha^2 + 2\sigma_b^2, \quad (19)$$

де α^2, $2\sigma_b^2$ – потужності регулярної та флуктуаційної складових коефіцієнта передачі каналу зв'язку, відповідно. Зазначені статистичні параметри передавальної характеристики повністю задають модель каналів зв'язку з загальними завмираннями і дозволяють визначити середню потужність сигналу і його регуляторну та флуктуаційну складові

$$\bar{P}_r = \alpha^2 P_t + 2\sigma_b^2 P_t = P_r + P_{фл}. \quad (20)$$

В принципі, визначення середньої потужності прийнятого сигналу в каналах зв'язку з розсіюванням дає можливість оцінити Рош для заданої схеми обробки сигналів [4, 5]. Проте зазвичай оцінка завадостійкості прийому проводиться для випадку передачі модульованих сигналів, а не монохроматичних. Тому нижче, користуючись аналогічним підходом, проаналізуємо випадок трансіоносферного поширення модульованої хвилі. Остання характеризується наявністю огинаючої і високочастотного заповнення (f_0) і має кінцеву ширину спектра частот (Δf_0).

Якісно процес розповсюдження модульованої хвилі через іоносферу можна описати виразом

$$\Delta\omega_0 = \omega - \omega_0 = 2\pi f_0. \quad (21)$$

Отже, в цьому випадку зміни фазового фронту хвилі на виході іоносферного шару будуть залежати ще і від ω. Враховуючи, що використовувані в РТС сигнали є вузькосмугові в радіотехнічному сенсі ($\omega_0 >> \Delta\omega_0$функцію $\varphi(\omega, \rho, z_э)$ можна розкласти в ряд Тейлора поблизу ω_0 про і обмежитися при цьому трьома першими членами розкладу

$$\varphi(\omega,\rho,z_e) = \varphi(\omega_0,\rho,z_e) + \varphi'(\omega_0,\rho,z_e)(\omega-\omega_0) + = \frac{1}{2}\varphi''(\omega_0,\rho,z_e)(\omega-\omega_0)^2. \quad (22)$$

Тут перший член ряду відповідає виразами (5) та (7) і відображає, як було встановлено вище, розсіюючи властивості іоносферних неоднорідностей, що викликають появу загальних завмирань в прийнятих сигналах. Другий член ряду визначається як

$$\varphi'(\omega_0,\rho,z_e)(\omega-\omega_0) = \left[\frac{z_e}{c} + \bar{\tau} + \Delta\tau(\rho)\right](\omega-\omega_0)$$

(23)

Як бачимо, даний член залежить від різниці частот $\omega - \omega_0 = \Omega$ і складається з двох доданків. Другий доданок $\Omega\Delta\tau(\rho)$ відображає той факт, що хвильовий фронт кожної частотної складової на вході іоносфери випадковим чином змінюється в часі. Внаслідок цього окремі ділянки хвильового фронту $\Delta\tau(\rho_i)$ кожної частотної складової спектру будуть приходити в точку прийому, маючи різні значення відносного часу запізнювання $\Delta\tau_i$. В результаті їх інтерференції спектр сигналу, як відомо [2], буде схильний ЧСЗ. Отже, другий член ряду (11) відображає розсіюючі властивості іоносферних неоднорідностей, що викликають селективні по частоті завмирання прийнятих сигналів.

Третій член ряду складається з двох доданків

$$\frac{1}{2}\varphi''(\omega_0,\rho,z_e)(\omega-\omega_0)^2 = (\omega-\omega_0)^2 N_{тср} \times \times \frac{40{,}4(2\pi)^2}{\omega_0^3 c} - \frac{40{,}4(2\pi)^2}{\omega_0^3 c}(\omega-\omega_0)^2\Delta N_т(\rho). \quad (24)$$

Однак з огляду на те, що другий доданок найчастіше набагато менше першого, а також всіх інших членів ряду (11), їм можна знехтувати. Тому

$$\frac{1}{2}\varphi''(\omega_0,\rho,z_e)(\omega-\omega_0)^2 \approx \frac{40{,}4(2\pi)^2}{\omega_0^3 c}(\omega-\omega_0)^2 N_т. \quad (25)$$

Даний член ряду визначає фазовий зсув частотних складових модульованої хвилі, обумовлений нелінійністю ФЧХ іоносфери, і відображає її дисперсійні властивості.

Таким чином, якісний аналіз фазових ефектів, що виникають при трансіоносферном поширенні модульованої хвилі, вказує на те, що прийняті в РТС сигнали будуть піддані дисперсійним спотворень і завмирань загального або частотно-селективного типу.

Висновки

У рамках даної статті був проведений аналіз факторів, що впливають на трансіоносферне поширення радіохвиль (РРВ). В результаті виконаної роботи можливо зробити наступні висновки:

1. Якісний аналіз впливу факторів трансіоносферного РРВ на перешкодостійкість приймальних пристроїв РТС можливий лише через знання структури іоносфери.

2. Флуктуаційну складову розподілу ЕК в неоднорідностях іоносфери по всій її товщині, можна охарактеризувати флуктуаціями інтегральної ЕК.

3. Загальні закономірності впливу послаблюючого і рефракційного факторів трансіоносферного РРВ на перешкодостійкість РТС полягають у тому, що збільшення інтегральної середньої ЕК іоносфери $N_{тср}$ і зменшення несучої частоти переданих сигналів f_0 викликають зменшення відношення сигнал-шум на вході приймача РТС і, як наслідок, зростання Рош.

.

4. Прийняті в РТС сигнали будуть піддані дисперсійним спотворень і завмирань загального або частотно-селективного типу.

Список літератури

1. *Даржания А.Ю. Пространственно-временные преобразования сигналов в измерительных радиосистемах со сложными диаграммами направленности / А.Ю. Даржания, А.И. Погорелов, С.В. Перехватов // Обработка сигналов в радиотехнических системах. – Харьков: ХАИ, 1989. – С. 18 – 27.*
2. *Черепков С.Т. Анализ модели шумоподобных зондирующих пространственно-временних сигналов / С.Т. Черепков, С.Н. Шевкун и др.// Зб. наук. праць Інституту проблем моделювання в енергетиці. – К.: ІПМЕ НАНУ. – 2010. – Вип. 57. – С. 21 – 26.*
3. *Зверев В.Л. Радиооптика. Преобразование сигналов в радио и оптике / В.Л. Зверев. – М.: Советское радио, 1975. – 304 с.*
4. *Фалькович С.Е. О задаче определения оптимальной пространственно – временной системы обработки сигналов / С.Е. Фалькович // Радиотехника и электроника. – 1966. – Т11, №5. – С. 785 – 792.*

Надійшла до редколегії 18.10.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ ТРАНСИОНОСФЕРНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ НАЗЕМНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

О.В. Шульга

Проведен анализ влияния факторов трансионосферного распространения радиоволн на помехоустойчивость приемных устройств РТС: поглощение энергии радиоволн; изменение направления их распространения (рефракция); рассеяния радиоволн на неоднородностях ионосферы; отличие фазовой и групповой скоростей распространения через ионосферу различных частотных составляющих излучаемой волны. Определены методы исследования неоднородной структуры ионосферы Земли. Описана комплексная модель распределения электронной концентрации в ионосфере.

Ключевые слова: *ионосфера, трансионосферное распространения радиоволн, неоднородность ионосферы, космический аппарат (КА), электронная концентрация, монохроматическая волна.*

GENERAL LAWS OF RADIO WAVES TRANSIONOSPHERE DISTRIBUTION INFLUENCE FACTORS ON TERRESTRIAL RADIO SYSTEMS ANTIJAMMING

O.V. Shulga

Radio waves transionospheric distribution factors influence on RTS receivers antijamming: radio waves energy absorption; their propagation changing (refraction); radio waves scattering by ionosphere inhomogeneities; emitted wave different frequency components phase and group distribution velocities difference thru ionosphere. Earth ionosphere inhomogeneous structure research methods definedl. Electron density distribution in ionosphere comprehensive model described.

Keywords: *ionosphere, radio waves transionosphere distribution, ionosphere heterogeneity, spacecraft (SC), electron density, monochromatic wave.*