

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-39-05>

УДК 550:399

**Л. Ф. Черногор**, д. ф.-м. наук, проф.

e-mail: [Leonid.F.Chernogor@gmail.com](mailto:Leonid.F.Chernogor@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>

**Є. Г. Жданко**, аспірант, молодший науковий співробітник

e-mail: [eugenezhd@gmail.com](mailto:eugenezhd@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4612-4194>

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Україна, 61022, м. Харків, пл. Свободи, 4

## ДОПЛЕРІВСЬКЕ ЗМІЩЕННЯ ЧАСТОТИ ВЧ РАДІОХВИЛЬ У ІОНОСФЕРІ НА ПОХИЛИХ РАДІОТРАСАХ

**Актуальність.** Іоносфера широко використовується в якості каналу в радіозв'язку, радіонавігації, радіолокації, дистанційному зондуванні Землі з космосу, а також в радіоастрономії. Для виявлення змін параметрів радіоканалу та динамічних процесів у іоносфері доцільно використовувати вимірювання доплерівського зміщення частоти та амплітуди радіосигналів ВЧ діапазону на похилих радіотрасах різної орієнтації. Доплерівське радіозондування має високу чутливість до динамічних процесів у іоносфері. Актуальною задачею є подальший розвиток теоретичних основ похилого ВЧ радіозондування іоносфери як основного простого та дешевого методу моніторингу іоносферного радіоканалу.

**Метою** цієї роботи є розвиток теоретичних основ доплерівського радіозондування іоносфери на похилих радіотрасах і отримання простих аналітичних співвідношень для доплерівського зміщення частоти.

**Методи і методологія.** Для розвитку теоретичних основ похилого ВЧ зондування використано сферично-шарувату модель незбуреної іоносфери, періодичну та аперіодичну моделі збурень у іоносфері. В якості вихідних залучені показник заломлення ізотропної іоносфери без втрат, закон Снелліуса, загальна формула для доплерівського зміщення частоти. Основний метод – аналітичні обчислення.

**Результати.** Для сферично-шаруватої іоносфери отримано скоригований закон секанса, який описує умову відбиття ВЧ радіохвилі від ізотропної іоносфери без втрат. Встановлено просте аналітичне співвідношення для оцінки максимальної застосовної частоти на похилих ВЧ радіотрасах за відомим значенням максимальної плазмової частоти. Для умов похилого ВЧ зондування іоносфери отримано прості аналітичні співвідношення для оцінки відносної амплітуди квазіперіодичних збурень та величини аперіодичних збурень концентрації електронів

у іоносфері. Продемонстрована застосовність отриманих співвідношень при використанні на практиці.

**Висновки.** Розроблена методична база для практичного її використання під час похилого ВЧ зондування іоносфери.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** іоносфера, похиле ВЧ радіозондування, закон відбиття, максимальна застосовна частота, рухоме іоносферне збурення, доплерівське зміщення частоти, відносне збурення, концентрація електронів.

**Як цитувати:** Черногор ЛФ, Жданко ЄГ. Доплерівське зміщення частоти ВЧ радіохвиль у іоносфері на похилих радіотрасах. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2023;39:60-68. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-39-05>

**In cites:** Chernogor LF, Zhdanko YH. Doppler shifts of HF radio waves along oblique propagation paths in the ionosphere. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". (In Ukrainian). 2023;39:60-68. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-39-05>

### ВСТУП

Іоносфера широко використовується в якості каналу в радіозв'язку, радіонавігації, радіолокації, дистанційному зондуванні Землі з космосу, а також в радіоастрономії. Іоносфера рідко буває спокійною. Вона збурюється низкою природних і техногенних потужних джерел енерговиділення. Відомо, що збурення, будучи випадковими та нестаціонарними, принципово обмежують тактико-технічні характеристики радіосистем різного призначення. Для послаблення впливу збурень бажана адаптація до змін параметрів радіоканалу. Для моніторингу цих параметрів доцільно використовувати похиле радіозондування іоносфери [1–20]. На практиці часто в якості зондувальних радіосигналів використовують світову мережу радіомовних і службових станцій і приймання сигналів в одному пункті, в пункті спостереження.

Для виявлення змін параметрів радіоканалу та динамічних процесів у іоносфері доцільно використовувати вимірювання доплерівського зміщення частоти (ДЗЧ) та амплітуди радіосигналів ВЧ

діапазону на похилих радіотрасах різної орієнтації. Так здійснюється моніторинг стану іоносфери та іоносферного радіоканалу практично в глобальних масштабах.

Доплерівське радіозондування має високу чутливість до динамічних процесів у іоносфері [6, 8, 12]. Роздільна здатність за доплерівською частотою сягає 0.01–0.1 Гц за роздільної здатності за часом 10 с. Точність оцінки ДЗЧ не гірше 0.01 Гц. Такі параметри дають можливість досліджувати відносні збурення концентрації електронів  $N$  не менше  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  та досліджувати рух плазми в іоносфері зі швидкістю не менше 0.1–1 м/с.

Для похилого зондування іоносфери створено низку комплексів [6–8, 10, 14].

У роботах [6, 12] описано програмно-апаратний комплекс для похилого зондування іоносфери Харківського національного університету (ХНУ) імені В. Н. Каразіна, розміщений в Радіофізичній обсерваторії (географічні координати: 49.65°пн. ш., 36.9°сх. д.). Впродовж багатьох років комплекс здійснює моніторинг динамічних процесів у іоносфері.

Автори [7] описали результати спостережень за нестационарними варіаціями параметрів іоносфери, отримані за допомогою комплексу похилого зондування іоносфери.

У низці робіт автори з ХНУ імені В. Н. Каразіна та Харбінського інженерного університету (КНР) дослідили динамічні процеси в іоносфері, які супроводжували помірні землетруси [10, 11], геокосмічні бурі [13–16], сонячні затемнення [14], рух тайфунів [18–20], падіння Камчатського метеороїду [21] тощо. Ними використано спільно виготовлений когерентний багаточастотний багатотрасовий радіотехнічний комплекс, розміщений на території Харбінського інженерного університету (географічні координати: 45.78°пн. ш., 126.68°сх. д.).

Похиłe зондування також використовували й інші автори [1–5, 7, 17].

В роботах [21, 22] виконано оцінки параметрів збурень  $N$ , отриманих за допомогою доплерівського радару вертикального зондування ХНУ імені В. Н. Каразіна. Для цього використано прості аналітичні співвідношення, які пов'язують виміряні числові ряди ДЗЧ на вертикальних трасах з параметрами іоносфери (збуреннями  $\Delta N$  концентрації електронів  $N$ , їхньою тривалістю  $\Delta T$ , відносною амплітудою збурень концентрації електронів  $\delta_{Na}$ , періодами рухомих іоносферних збурень (РІЗ)  $T$  тощо). Подібні співвідношення для похилого зондування частково використовуються у роботах авторів [10, 13–20]. Актуальною задачею є подальший розвиток теоретичних основ похилого ВЧ радіозондування іоносфери як основного простого та дешевого методу моніторингу іоносферного радіоканалу.

Мета цієї роботи – розвиток теоретичних основ доплерівського радіозондування іоносфери на похилих радіотрасах і отримання простих аналітичних співвідношень для ДЗЧ.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ. ВИХІДНІ СПІВВІДНОШЕННЯ

Середовище (іоносферу) будемо вважати іонізованим ізотропним без втрат. Тоді показник заломлення  $n$  для ВЧ радіохвиль дається наступним співвідношенням [23]:

$$n^2 = 1 - \frac{f_p^2}{f^2}, \quad (1)$$

$$f_p^2 = \frac{e^2 N}{4\pi^2 \epsilon_0 m}, \quad (2)$$

де  $f_p$  – плазмова частота електронів,  $f$  – частота радіохвилі,  $e$  та  $m$  – заряд і маса електрона,  $\epsilon_0$  – електрична стала.

Для сферично-шаруватої іоносфери є справедливим закон заломлення Снелліуса:

$$n(r)r \sin \vartheta(r) = n_0 r_i \sin \theta, \quad (3)$$

$r = r_0 + z$ ,  $r_0$  – радіус Землі,  $z$  – поточна висота,  $r_i = r_0 + z_0$ ,  $z_0$  – висота початку іоносфери,  $n_0$  – показник заломлення на границі іоносфери,  $\theta$  – кут падіння радіохвилі на іоносферу, який відраховується від вертикалі,

$\vartheta$  – кут між траєкторією радіохвилі в іоносфері та вертикаллю.

На висоті відбиття радіохвилі  $z_r$  кут  $\vartheta = 90^\circ$ , а  $\sin \vartheta(z_r) = 1$ . Крім того, при  $z = z_0$  показник  $n_0 = 1$ . Тоді з (3) маємо

$$n(z_r) = \frac{r_i}{r} \sin \theta = \frac{r_0 + z_0}{r_0 + z_r} \sin \theta = \frac{1 + \zeta_i}{1 + \zeta_r} \sin \theta, \quad (4)$$

Оскільки  $\zeta_i = z_0/r_0 \ll 1$ ,  $\zeta_r = z_r/r_0 \ll 1$ , співвідношення (4) набуває такого вигляду:

$$n(z_r) \approx (1 + \zeta_i - \zeta_r) \sin \theta. \quad (5)$$

На довільній висоті  $z$  маємо:

$$n(z) \approx (1 - \zeta) \frac{\sin \theta}{\sin \vartheta}, \quad \zeta = \frac{z - z_0}{r_0}. \quad (6)$$

За визначенням, ДЗЧ при поширенні радіохвилі вздовж траєкторії  $s$  дається наступним співвідношенням:

$$f_D = -\frac{f}{c} \frac{d}{dt} \int_s n ds, \quad (7)$$

де  $c$  – швидкість світла в вакуумі,  $t$  – час. Врахуємо, що радіохвиля поширюється від початку іоносфери до висоти відбиття, а потім від цієї висоти до висоти початку іоносфери. Крім того, перейдемо від  $ds$  до  $dz/\cos\theta$ . Тоді замість (7) маємо

$$f_D = -2 \frac{f}{c} \frac{d}{dt} \int_{z_0}^{z_r} n \frac{dz}{\cos\theta} = -2 \frac{f}{c} \int_{z_0}^{z_r} \frac{dn}{dt} \frac{dz}{\cos\theta}. \quad (8)$$

Із співвідношення (1) випливає, що

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{1}{2n} \frac{f_{p0}^2}{f^2} \frac{d}{dt} \delta_N. \quad (9)$$

де  $\delta_N = \Delta N/N_0$ ,  $N_0$  – незбурене значення  $N$ ,  $f_{p0}$  – незбурене значення  $f_p$ . При цьому  $N_0$  і  $f_{p0}$  від часу не залежать.

### ВІДБИТТЯ РАДІОХВИЛЬ ПРИ ПОХИЛОМУ ЗОНДУВАННІ

Із (1) та (5) маємо наступне співвідношення:

$$1 - \frac{f_p^2(z_r)}{f^2} = (1 + \zeta_i - \zeta_r)^2 \sin^2 \theta \approx (1 + 2\zeta_i - 2\zeta_r) \sin^2 \theta. \quad (10)$$

Звідси

$$\frac{f_p^2(z_r)}{f^2} = (1 + 2\zeta_{ir} \operatorname{tg}^2 \theta) \cos^2 \theta, \quad \zeta_{ir} = \zeta_r - \zeta_i. \quad (11)$$

Тоді умова відбиття радіохвилі набуває вигляду:

$$f = k f_p(z_r) \sec \theta, \quad (12)$$

де

$$k = \frac{1}{(1 + 2\zeta_{ir} \operatorname{tg}^2 \theta)^{1/2}}. \quad (13)$$

Для плоскошаруватого середовища  $r_0 \rightarrow \infty$ ,  $\zeta_{ir} \rightarrow 0$ , а  $k \approx 1$ . При цьому співвідношення (11) переходить

у відомий закон секансу (див., наприклад, [23]):

$$f = f_p(z_r) \sec \theta.$$

Закон (12) будемо іменувати скоригованим на сферичність законом секанса.

Із (10) оцінимо максимальну застосовну частоту при похилому зондуванні іоносфери:

$$f = \frac{f_p}{(1 - (1 - 2\zeta_{ir}) \sin^2 \theta)^{1/2}}.$$

За  $\theta = \theta_{\max} = 90^\circ$  та  $f_p = f_{p\max}$  маємо

$$f_{\max} = \frac{f_{p\max}}{(2\zeta_{ir})^{1/2}}.$$

Вдень  $N_{\max} = 1.2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ ,  $f_{p\max} \approx 10 \text{ МГц}$ ,  $z_{r\max} \approx 300 \text{ км}$ ,  $z_0 \approx 100 \text{ км}$ . Тоді для  $r_0 \approx 6400 \text{ км}$  маємо  $f_{\max} \approx 4f_{p\max} \approx 40 \text{ МГц}$ . Вночі  $N_{\max} = 0.2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ ,  $f_{p\max} \approx 4 \text{ МГц}$ ,  $z_{r\max} \approx 400 \text{ км}$ . За цих умов  $f_{\max} \approx 3.3f_{p\max} \approx 13.2 \text{ МГц}$ .

### МОДЕЛІ ЗБУРЕНЬ

Розглянемо дві моделі збурень концентрації електронів: періодичну та аперіодичну.

При поширенні в іоносфері РІЗ відносна амплітуда збурень  $N$  описується наступною моделлю:

$$\delta_N(t, z) = \delta_{Na}(z_r) e^{(z-z_r)/2H} \sin \frac{2\pi}{T} t, \quad (14)$$

де  $\delta_{Na}$  – амплітуда,  $H$  – висота однорідної атмосфери поблизу  $z_r$ . В (14) враховано, що до  $z_{cr} \approx 200\text{--}250 \text{ км}$  відносна амплітуда  $\delta_N$  зростає через експоненційне зменшення атмосферного тиску. Вище  $z_r$  значення  $\delta_N$ , навпаки, поступово зменшуються.

За аперіодичного збурення концентрація електронів збільшується або зменшується на  $\Delta N$  впродовж часу  $\Delta T$ .

### ПЕРІОДИЧНІ ВАРІАЦІЇ ДЗЧ

Із (14) маємо

$$\frac{d\delta_N}{dt} = \frac{2\pi}{T} \delta_{Na}(z_r) e^{(z-z_r)/2H} \cos \frac{2\pi t}{T}. \quad (15)$$

З урахуванням (9) і (15) із (8) для ДЗЧ отримуємо:

$$f_D = \frac{2\pi f}{cT} \frac{f_{p0}^2(z_r)}{f^2} \delta_{Na}(z_r) \cos \frac{2\pi t}{T} \int_{z_0}^{z_r} e^{(z-z_r)/2H} \frac{dz}{n \cos \vartheta}. \quad (16)$$

Оскільки  $n \cos \vartheta$  з висотою змінюється значно менше, ніж експоненційна функція, амплітуда ДЗЧ приймає вигляд:

$$f_{Da} \approx \frac{2\pi f}{cT} \frac{f_{p0}^2(z_r)}{f^2} \frac{\delta_{Na}(z_r)}{n \cos \vartheta} \int_{z_0}^{z_r} e^{(z-z_r)/2H} dz = \frac{4\pi H f}{cT} \frac{f_{p0}^2(z_r)}{f^2} \frac{\delta_{Na}(z_r)}{n \cos \vartheta} (1 - e^{(z_0-z_r)/2H}). \quad (17)$$

Тут риска над  $n \cos \vartheta$  означає середнє за висотою значення виразу. Підставивши в (17) вираз (11), отримуємо

$$f_{Da} = \frac{4\pi H}{cT} \frac{f \cos^2 \theta}{k^2} \frac{\delta_{Na}(z_r)}{n \cos \vartheta} (1 - e^{(z_0-z_r)/2H}). \quad (18)$$

Далі врахуємо, що

$$e^{(z_0-z_r)/2H} \ll 1, \quad (19)$$

та оцінимо  $\overline{n \cos \vartheta}$ . Із (6) отримуємо  $n \approx \sin \theta / \sin \vartheta$ . Тоді середнє за висотою значення

$$B = \overline{n \cos \vartheta} \approx \left( \frac{\sin \theta \cdot \cos \vartheta}{\sin \vartheta} \right).$$

За  $z = z_0$  маємо  $\vartheta = \theta$ ,  $B(z_0) = \cos \theta$ . Якщо  $z = z_r$ , то  $\vartheta = 90^\circ$ ,  $B(z_r) = 0$ . Тоді

$$\overline{n \cos \vartheta} = \frac{1 + \cos \theta}{2}. \quad (20)$$

Із (18) та (20) з врахуванням (19) випливає, що

$$f_D = \frac{4\pi H}{K c T} f \delta_{Na}(z_r), \quad (21)$$

де

$$K = k^2 \frac{1 + \cos \theta}{2 \cos^2 \theta} = \frac{1 + \cos \theta}{2(1 + 2\zeta_{ir} \operatorname{tg}^2 \theta) \cos^2 \theta}. \quad (22)$$

При вертикальному зондуванні  $\theta = 0^\circ$ ,  $K = 1$  і формула (21) набуває вигляду

$$f_D = \frac{4\pi H}{cT} f \delta_{Na}(z_r). \quad (23)$$

Із співвідношення (21) отримуємо таке:

$$\delta_{Na} = \frac{K c T}{4\pi H} \frac{f_D}{f}. \quad (24)$$

Формула (24) співпадає з формулою для вертикального зондування, якщо вважати, що основний внесок у ДЗЧ дає діапазон висот  $L \approx H$  [22].

Результати розрахунків залежності  $K(\theta, \zeta_{ir})$  для низки значень  $\zeta_{ir}$  наведено на рисунку. Із рисунку можна бачити, що  $K$  змінюється від 1 до 5–32 в залежності від значення параметра  $\zeta_{ir}$ .

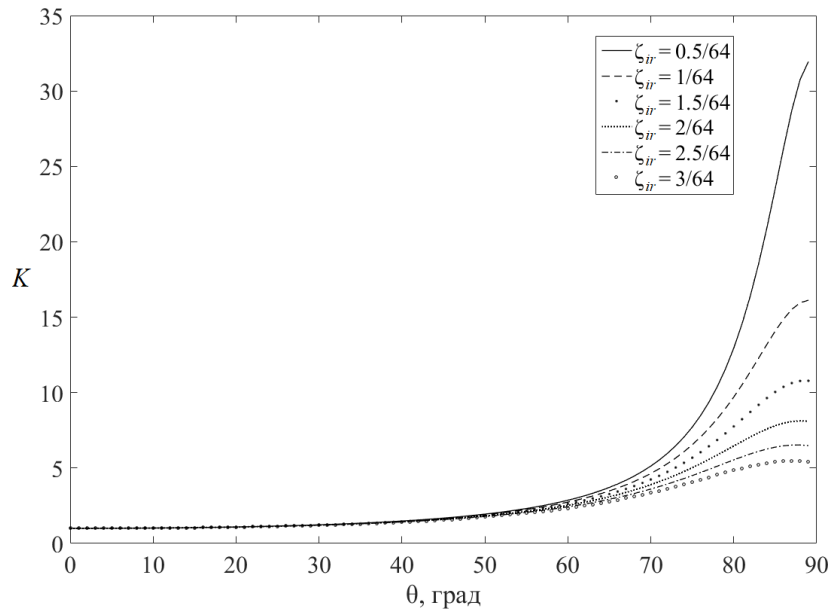


Рисунок. Залежність коефіцієнту  $K$  від кута падіння та висоти відбиття радіохвилі  
Figure. Dependence of the coefficient  $K$  on the angle of incidence and height of reflection of a radio wave

### АПЕРІОДИЧНІ ВАРІАЦІЇ ДЗЧ

Нехай

$$N(t) = N_0 + \Delta N(t), \quad n(t) = n_0 + \Delta n(t).$$

причому  $\Delta N$  і  $\Delta n$  не залежать від висоти у шарі іоносфери товщиною  $L$ . Тоді

$$f_D = -2 \frac{f}{c} \frac{d}{dt} \int_{z_0}^{z_r} n \frac{dz}{\cos \vartheta} = -2 \frac{f}{c} \frac{d}{dt} \int_{z_0}^{z_r} \Delta n(t) \frac{dz}{\cos \vartheta}, \quad (25)$$

де  $\Delta n \approx -\frac{1}{2n_0} \frac{f_{p0}^2}{f^2} \delta_N$ ,  $\delta_N = \frac{\Delta N}{N_0}$ .

Оскільки з (6) і (11) випливає, що

$$n \approx \frac{\sin \theta}{\sin \vartheta}, \quad \frac{f_{p0}^2}{f^2} = \frac{\cos^2 \theta}{k^2},$$

із (25) отримаємо

$$f_D \approx \frac{f \cos^2 \theta}{c k^2} \delta_N \frac{d}{dt} \int_{z_0}^{z_r} \frac{dz}{n \cos \vartheta}.$$

Звідси

$$\int_0^{\Delta T} f_D dt \approx \frac{f \cos^2 \theta}{c k^2} \delta_N \frac{L}{n \cos \vartheta} \approx 2 \frac{f}{c} \frac{L}{k^2} \delta_N \frac{\cos^2 \theta}{1 + \cos \theta} = \frac{f \delta_N}{c K} L. \quad (26)$$

За оцінкою

$$\int_0^{\Delta T} f_D dt \approx \frac{1}{2} f_{Dm} \Delta T,$$

де  $f_{Dm}$  – екстремальне значення  $f_D$  на інтервалі часу  $\Delta T$ . Тоді

$$\frac{1}{2} f_{Dm} \Delta T \approx \frac{f}{c} \frac{L}{K} \delta_N,$$

а

$$\delta_N = \frac{K c \Delta T}{2L} \frac{f_{Dm}}{f}. \quad (27)$$

### ОБГОВОРЕННЯ

Співвідношення (24) та (27) справедливі для однострибкового поширення радіохвилі. Для радіотрас із

$R \geq 1000$  км частіше спостерігається дво- та тристрибкове поширення. Для  $m$ -го стрибка замість (24) та (27) необхідно використовувати наступні співвідношення:

$$\delta_{Na} = \frac{K_m c T}{4\pi m H} \frac{f_{Da}}{f},$$

$$\delta_N = \frac{K_m c \Delta T}{2mL} \frac{f_{Da}}{f},$$

де  $K_m = K(\theta_m)$ ,  $\operatorname{tg} \theta_m = \frac{R}{2mz_r}$ .

Проілюструємо застосовність формул (24) і (27) на практиці.

Нехай на трасі довжиною  $R = 1600$  км амплітуда квазіперіодичного збурення з  $T = 15$  хв складає 0.3 Гц. Частота радіохвилі  $f = 10$  МГц. Кут  $\theta$  знаходиться зі співвідношення

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{R}{2z_r}.$$

За  $z_r = 200$  км маємо  $\theta \approx 76^\circ$ ,  $K \approx 7$ . Тоді з (24) для  $H(z_r) \approx 40$  км отримуємо  $\delta_{Na} \approx 11.3\%$ .

Якщо  $m = 2$ ,  $z_r = 240$  км,  $H(z_r) \approx 50$  км, то  $K_2 \approx 2.59$ , а  $\delta_{Na} \approx 1.7\%$ .

Під час сонячного затемнення  $f_D$  за  $\Delta T \approx 60$  хв спочатку зменшилося на 0.05 Гц, а потім збільшилося на 0.05 Гц. Довжина радіотраси  $R = 1600$  км,  $f = 10$  МГц,  $L \approx 100$  км. Тоді  $\delta_N \approx 19\%$ . Отримане значення  $\delta_N$  видається зовсім великим. Зробимо оцінки для  $m = 2$ . При цьому  $z_r = 240$  км,  $L \approx 100$  км,  $\theta_2 \approx 59^\circ$ ,  $K_2 \approx 2.59$ , а  $\delta_N \approx 3.5\%$ .

Отримані оцінки  $\delta_{Na}$  та  $\delta_N$  цілком узгоджуються з відомими результатами (див., наприклад, [10, 13–16, 18–20, 22]).

Додамо, що параметр  $H$  суттєво залежить від висоти. Для оцінки  $H(z)$  на висоті  $z$  можна використовувати наступну формулу:

$$H = 7 \left( 1 + 9 \frac{z - 100}{200} \right),$$

де  $H$  і  $z$  вимірюються в кілометрах.

### ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Для сферично-шаруватої іоносфери отримано скоригований закон секанса, який описує умову відбиття ВЧ радіохвилі від ізотропної іоносфери без втраг.
  2. Встановлено просте аналітичне співвідношення для оцінки максимальної застосовної частоти на похилих радіотрасах ВЧ діапазону за відомим значенням максимальної плазмової частоти.
  3. Для умов похилого ВЧ зондування іоносфери отримано прості аналітичні співвідношення для оцінки відносної амплітуди квазіперіодичних збурень та величини аперіодичних збурень концентрації електронів у іоносфері.
  4. Продемонстрована застосовність отриманих співвідношень при використанні на практиці.
- Таким чином, розроблена методична база для практичного її використання під час похилого ВЧ зондування іоносфери.

### ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

Дослідження Черногора Л. Ф. виконано в рамках проекту Національного фонду досліджень України (номер 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля–атмосфера–іоносфера»). Також робота Черногора Л. Ф. і Жданка Є. Г. частково підтримана в рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0122U001476, 0121U109881 і 0121U109882).

### КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Pietrella M, Perrone L, Fontana G, Romano V, Malagnini A, Tutone G, Zolesi B, Cander LjR, Belehaki A, Tzagouri I, Kouris SS, Vallianatos F, Makris J, Angling M. Oblique-incidence ionospheric soundings over Central Europe and their application for testing now casting and long term prediction models. *Advances in Space Research*. 2009;43(11):1611-1620. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.01.022>
2. Vilella C, Miralles D, Pijoan JL. An Antarctica-to-Spain HF ionospheric radio link: Sounding results. *Radio Sci*. 2008;43:RS4008. <https://doi.org/10.1029/2007RS003812>

3. Chen G, Zhao Z, Yang G, Zhou C, Yao M, Li T, Huang S, Li N. Enhancement and HF Doppler observations of sporadic-E during the solar eclipse of 22 July 2009. *J. Geophys. Res.* 2010;115:A09325. <https://doi.org/10.1029/2010JA015530>
4. Zhou C, Zhao Z, Deng F, Ni B, Chen G. Midlatitude ionospheric HF channel reciprocity: Evidence from the ionospheric oblique incidence sounding experiments. *Radio Sci.* 2010;45:RS6017, <https://doi.org/10.1029/2010RS004477>
5. Ads AG, Bergadà P, Vilella C, Regué JR, Pijoan JL, Bardají R, Mauricio J. A comprehensive sounding of the ionospheric HF radio link from Antarctica to Spain. *Radio Sci.* 2012;48:1-12. <https://doi.org/10.1029/2012RS005074>
6. Chernogor LF, Garmash KP, Podnos VA, Rozumenko VT, Tsymbal AM, Tyrnov OF. The Upgraded Kharkiv V. N. Karazin National University Radiophysical Observatory. *Sun and Geosphere.* 2012;7(2):133-139. <http://www.sungeosphere.org/>
7. Laštovička J, Chum J. A review of results of the international ionospheric Doppler sounder network. *Advances in Space Research.* 2017;60(8):1629-1643. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.032>
8. Чорногор ЛФ, Гармаш КП, Guo Q, Zheng Yu, Поднос ВА, Розуменко ВТ, Тирнов ОФ, Цимбал АМ. Когерентний багаточастотний багатотрасовий комплекс для радіофізичного моніторингу динамічних процесів у іоносфері. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2018;28:88-93.
9. Guo Q, Zheng Y, Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT. Ionospheric processes observed with the passive oblique-incidence HF Doppler radar. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2019;30:3-15. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-01>
10. Guo Q, Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT, Zheng Y. Dynamical processes in the ionosphere following the moderate earthquake in Japan on 7 July 2018. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2019 May;186:88-103. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.003>
11. Luo Y, Guo Q, Zheng Y, Гармаш КП, Черногор ЛФ, Шульга СМ. Варіації характеристик радіохвиль ВЧ діапазону над Китаєм, які супроводжували помірний землетрус в Японії 5 вересня 2018 р. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2019;30:16-26. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-02>
12. Чорногор ЛФ, Гармаш КП, Жданко ЄГ, Леус СГ, Поднос ВА. Програмно-апаратний комплекс багаточастотного похилого зондування іоносфери. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2020;33:42-59. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-33-04>
13. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Luo Y, Rozumenko VT, Zheng Y. Ionospheric storm effects over the People's Republic of China on 14 May 2019: Results from multipath multi-frequency oblique radio sounding. *Advances in Space Research.* 2020;66(2):226-242. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.037>
14. Guo Q, Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT, Zheng Y. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere Over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018. *Radio Science.* 2020;55(2):e2019RS006866. <https://doi.org/10.1029/2019RS006866>
15. Luo Y, Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, Zheng Yu. Dynamic processes in the magnetic field and in the ionosphere during the 30 August – 2 September, 2019 geospace storm. *Annales Geophysicae.* 2021;39(4). <https://doi.org/10.5194/angeo-39-657-2021>
16. Luo Y, Guo Q, Zheng Y, Гармаш КП, Черногор ЛФ, Шульга СМ. Ефекти геокоsmічної бурі 5—6 серпня 2019 р. *Космічна наука і технологія.* 2021;27(2(129)):45-69. <https://doi.org/10.15407/knit2021.02.045>
17. Nakata H, Nozaki K, Oki Y. et al. Software-defined radio-based HF doppler receiving system. *Earth Planets Space.* 2021;73(209). <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01547-5>
18. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, Zheng Yu, Luo Y. Supertyphoon Hagibis action in the ionosphere on 6–13 October 2019: Results from multi-frequency multiple path sounding at oblique incidence. *Advances in Space Research.* 2021;67(8):2439-2469. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.038>
19. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, Zheng Y, Luo Y. Disturbances in the ionosphere that accompanied typhoon activity in the vicinity of China in September 2019. *Radio Science.* 2022;57:e2022RS007431. <https://doi.org/10.1029/2022RS007431>
20. Zheng Y, Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, Luo Y. Disturbances in the Ionosphere and Distortion of Radio Wave Characteristics That Accompanied the Super Typhoon Lekima Event of 4 – 12 August 2019. *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* 2022;127:e2022JA030553. <https://doi.org/10.1029/2022JA030553>
21. Chernogor LF. Kamchatka Meteoroid Effects in the Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere–Magnetosphere System. In: Kosterov A, Bobrov N, Gordeev E, Kulakov E, Lyskova E, Mironova I. (eds) *Problems of*

- Geocosmos–2020. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. 2022:365-377. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-91467-7\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-030-91467-7_27)
22. Chernogor L. F., Blaunstein N. Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment. Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2013. 542 p.
23. Davies K. Ionospheric radio. Peter Peregrinus Ltd., London, 1990. 580 p.

#### REFERENCES

- Pietrella M, Perrone L, Fontana G, Romano V, Malagnini A, Tutone G, Zolesi B, Cander LjR, Belehaki A, Tsagouri I, Kouris SS, Vallianatos F, Makris J, Angling M. Oblique-incidence ionospheric soundings over Central Europe and their application for testing now casting and long term prediction models. *Advances in Space Research*. 2009;43(11):1611-1620. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.01.022>
- Vilella C, Miralles D, Pijoan JL. An Antarctica-to-Spain HF ionospheric radio link: Sounding results. *Radio Sci*. 2008;43:RS4008. <https://doi.org/10.1029/2007RS003812>
- Chen G, Zhao Z, Yang G, Zhou C, Yao M, Li T, Huang S, Li N. Enhancement and HF Doppler observations of sporadic-E during the solar eclipse of 22 July 2009. *J. Geophys. Res.* 2010;115:A09325. <https://doi.org/10.1029/2010JA015530>
- Zhou C, Zhao Z, Deng F, Ni B, Chen G. Midlatitude ionospheric HF channel reciprocity: Evidence from the ionospheric oblique incidence sounding experiments. *Radio Sci*. 2010;45:RS6017, <https://doi.org/10.1029/2010RS004477>
- Ads AG, Bergada P, Vilella C, Regué JR, Pijoan JL, Bardají R, Mauricio J. A comprehensive sounding of the ionospheric HF radio link from Antarctica to Spain. *Radio Sci*. 2012;48:1-12. <https://doi.org/10.1029/2012RS005074>
- Chernogor LF, Garmash KP, Podnos VA, Rozumenko VT, Tsymbal AM, Tyrnov OF. The Upgraded Kharkiv V. N. Karazin National University Radiophysical Observatory. *Sun and Geosphere*. 2012;7(2):133-139. <http://www.sungeosphere.org/>
- Laštovička J, Chum J. A review of results of the international ionospheric Doppler sounder network. *Advances in Space Research*. 2017;60(8):1629-1643. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.032>
- Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Zheng Yu, Podnos VA, Rozumenko VT, Tyrnov OF, Tsymbal AM. A coherent multi-frequency multiple path radio system for monitoring dynamical processes in the ionosphere. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series «Radio Physics and Electronics»*. 2018;28:88-93.
- Guo Q, Zheng Y, Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT. Ionospheric processes observed with the passive oblique-incidence HF Doppler radar. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series «Radio Physics and Electronics»*. 2019;30:3-15. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-01>
- Guo Q, Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT, Zheng Y. Dynamical processes in the ionosphere following the moderate earthquake in Japan on 7 July 2018. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2019 May;186:88-103. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.003>
- Luo Y, Guo Q, Zheng Y, Garmash KP, Chernogor LF, Shulga SM. HF radio-wave characteristic variations over China during moderate earthquake in Japan on September 5, 2018. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series «Radio Physics and Electronics»*. 2019;30:16-26. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-02>
- Chernogor LF, Garmash KP, Zhdanko YH, Leus SG, Podnos VA. Software and hardware system of multi-frequency oblique sounding the ionosphere. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series «Radio Physics and Electronics»*. 2020;33:42-59. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-33-04>
- Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Luo Y, Rozumenko VT, Zheng Y. Ionospheric storm effects over the People's Republic of China on 14 May 2019: Results from multipath multi-frequency oblique radio sounding. *Advances in Space Research*. 2020;66(2):226-242. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.037>
- Guo Q, Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT, Zheng Y. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere Over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018. *Radio Science*. 2020;55(2):e2019RS006866. <https://doi.org/10.1029/2019RS006866>
- Luo Y, Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, Zheng Yu. Dynamic processes in the magnetic field and in the ionosphere during the 30 August – 2 September, 2019 geospace storm. *Annales Geophysicae*. 2021;39(4). <https://doi.org/10.5194/angeo-39-657-2021>
- Luo Y, Guo Q, Zheng Y, Garmash KP, Chernogor LF, Shulga SM. Geospace storm effects on August 5—6, 2019. *Space Science and Technology*. 2021;27(2(129)):45-69. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/knit2021.02.045>



17. Nakata H, Nozaki K, Oki Y. et al. Software-defined radio-based HF doppler receiving system. *Earth Planets Space*. 2021;73(209). <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01547-5>
18. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, Zheng Yu, Luo Y. Supertyphoon Hagibis action in the ionosphere on 6–13 October 2019: Results from multi-frequency multiple path sounding at oblique incidence. *Advances in Space Research*. 2021;67(8):2439-2469. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.038>
19. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, Zheng Y, Luo Y. Disturbances in the ionosphere that accompanied typhoon activity in the vicinity of China in September 2019. *Radio Science*. 2022;57:e2022RS007431. <https://doi.org/10.1029/2022RS007431>
20. Zheng Y, Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, Luo Y. Disturbances in the Ionosphere and Distortion of Radio Wave Characteristics That Accompanied the Super Typhoon Lekima Event of 4 – 12 August 2019. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2022;127:e2022JA030553. <https://doi.org/10.1029/2022JA030553>
21. Chernogor LF. Kamchatka Meteoroid Effects in the Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere–Magnetosphere System. In: Kosterov A, Bobrov N, Gordeev E, Kulakov E, Lyskova E, Mironova I. (eds) *Problems of Geocosmos–2020*. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. 2022:365-377. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-91467-7\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-030-91467-7_27)
22. Chernogor L. F., Blaunstein N. *Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment*. Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2013. 542 p.
23. Davies K. *Ionospheric radio*. Peter Peregrinus Ltd., London, 1990. 580 p.

Стаття надійшла до редакції: 11 вересня 2023 р.

Рекомендовано до друку: 24 жовтня 2023 р.

## DOPPLER SHIFTS OF HF RADIO WAVES ALONG OBLIQUE PROPAGATION PATHS IN THE IONOSPHERE

L. F. Chernogor, Y. H. Zhdanko

*V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svoboda Square, Kharkiv, 61022, Ukraine*

**Urgency.** The ionosphere is widely used as a channel for radar, radioastronomy, radio navigation, communication links, and space-based sounding the Earth. To reveal changes in the radio channel parameters and variations in dynamic ionospheric processes, measurements of the Doppler shift and signal amplitude of HF radio waves should be taken along oblique propagation paths of various orientation. The Doppler radio sounding exhibits a great sensitivity to the dynamic processes in the ionosphere, therefore, the need for further development of the theoretical basis for oblique HF radio sounding the ionosphere, as a main simple and cheap technique for monitoring the ionospheric radio channel, is urgent.

**The aim** of this work is to develop the theoretical basis for the Doppler sounding the ionosphere along oblique propagation paths and to derive simple analytical relations for the Doppler shift.

**Methods and Methodology.** In developing the theoretical basis for oblique HF sounding, the undisturbed ionosphere

is assumed to be plane stratified, and the ionospheric disturbances to follow periodic and aperiodic models. The Snell law, the general formula for the Doppler shift, and the index of refraction taken to be that for the isotropic ionosphere are involved in the analytical derivations. The main technique is calculations using an analytical approach.

**Results.** The corrected secant law describing the condition for HF radio waves to reflect from a loss-free smooth spherically concentric isotropic ionosphere has been obtained. A simple analytical expression for estimating the maximum usable frequency along oblique HF propagation paths, making use of the known maximum plasma frequency, has been determined. For the conditions of oblique HF sounding the ionosphere, simple analytical relations are obtained for estimating the relative amplitude of quasi-sinusoidal disturbances and the magnitude of aperiodic disturbances of the electron density in the ionosphere. The applicability of the obtained relations has been demonstrated in practice.

**Conclusions.** The scientific base has been developed for making use of it in oblique HF sounding the ionosphere.

**KEY WORDS:** ionosphere, oblique HF radio sounding, reflection law, maximum usable frequency, traveling ionospheric disturbance, Doppler shift, relative disturbance, electron density

The article was received by the editors: September 11 2023.

The article is recommended for printing: October 24 2023