

**Цяпа С.М.**Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки  
та судових експертиз Служби безпеки України

## МОДЕЛЬ ТРАСИ ПРЯМОЇ ВИДИМОСТІ НАЗЕМНИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

У статті досліджується вплив характеристик траси розповсюдження радіохвиль вздовж межі розповсюдження повітря-земна поверхня, зокрема величини згасання корисного сигналу в просторі між передавачем та приймачем системи зв'язку при проектуванні наземних систем зв'язку та напруцювання рекомендацій щодо їх експлуатації. Близькість земної поверхні істотно впливає на структуру електромагнітного поля радіохвилі, що призводить до втрат рівня сигналу радіохвилі на приземній трасі та суттєво залежить від електрофізичних параметрів поверхні землі, довжини хвилі тощо. Тому траса розповсюдження радіохвилі потребує конкретного опису. Одними з основних чинників, які призводять до втрат рівня сигналу радіохвилі є різноманітність поверхні Землі по профілю (рівнини, гори, річки, озера), по складу (пісок, глина, чорнозем, різноманітне каміння), по рослинному покриву (пустині, степи, ліси). Також необхідно враховувати і сезонну варіацію діелектричних характеристик підстилаючої поверхні, що виникає в результаті зміни вологості рослинного покриву, сезонної зміни агрегатних станів опадів (сніг, дощ, лід). До того ж значний вплив на розповсюдження радіохвиль вносить ступінь шорсткості поверхні.

В даній статті проведено аналіз втрат рівня сигналу радіохвилі та розроблено модель розповсюдження радіохвиль вздовж земної поверхні на трасі прямої видимості, на основі таких моделей розповсюдження радіохвиль, як моделі Введенського та Шулейкіна-Ван-дер-Поля. Представлена модель розповсюдження радіохвиль вздовж земної поверхні на трасі прямої видимості враховує залежність втрат розповсюдження від довжини хвилі, висоти підняття антен та електрофізичних параметрів землі в явному виді. Розглянута модель описує залежність втрат розповсюдження радіохвиль у разі, коли висота розташування антени порівнянна з довжиною радіохвилі, та може бути використана при проектуванні та експлуатації наземних систем зв'язку. Представлена модель поширення радіохвиль максимально наближена до реального радіоканалу та дозволяє проводити комп'ютерні експерименти для розробки алгоритмів передавання даних на великі відстані, а також проводити натурні експерименти для відпрацювання технічних рішень у процесі створення радіоапаратури.

**Ключові слова:** радіохвилі, втрати розповсюдження сигналу, приземне поширення радіохвиль, висота підняття антени, модель Введенського, квадратична формула Введенського, модель Шулейкіна-Ван-дер-Поля.

**Постановка проблеми.** Характеристики траси розповсюдження радіохвиль вздовж межі розділу повітря — земна поверхня, зокрема, величини загасання корисного сигналу в просторі між передавачем та приймачем системи зв'язку, мають суттєвий вплив на роботу всієї радіолінії в цілому та представляють особливий інтерес, як при проектуванні і розробленні наземних систем зв'язку, так і для організації заходів при їх експлуатації.

Вивчення особливостей розповсюдження радіохвиль вздовж земної поверхні зустрічає ряд ускладнень, обумовлених тим, що близькість земної поверхні істотно змінює структуру електромагнітного поля в порівнянні із структурою електромагнітного поля у вільному просторі.

Втрати рівня сигналу радіохвилі на приземній трасі залежать від наявності на поверхні землі різ-

ного роду предметів, їх розмірів, щільності розташування тощо, і, особливо, від характеру та стану підстилаючої поверхні, як наприклад, суха чи волога земля, пісок, трав'яне покриття, наявність водойм, снігу, льоду тощо, що опосередковано впливає на електрофізичні параметри середовища.

Не дивлячись на індивідуальні особливості кожної місцевості, все різноманіття трас розповсюдження радіохвиль вдається звести до типових форм з урахуванням характерних особливостей, що впливають на їх проходження.

Однією з таких типових трас — є траса прямої видимості, де існує прямий промінь між передавачем і приймачем. Така траса охоплює численні типові фрагменти сільської і міської топографії.

З фізичної точки зору, вплив поверхні землі проявляється двома шляхами. Струми, наведені

електромагнітним полем радіохвиль в ґрунті, призводять до втрат енергії на нагрівання і тому послаблюють рівень електромагнітного поля в атмосфері. З іншого боку, ці струми екранують більш глибокі області ґрунту і перешкоджають відтоку енергії в нижню півсферу структури повітря – земля. Це підсилює електромагнітне поле в атмосфері. Повний облік сукупного впливу обох чинників ускладнює аналіз розповсюдження сигналу радіохвилі в безпосередній близькості від поверхні землі, навіть коли атмосферу можна вважати однорідною.

Сукупна дія вищевказаних фізичних процесів розповсюдження радіохвилі уздовж межі розділу повітря – земна поверхня в загальному випадку врахована при розгляді електромагнітних полів в атмосфері і землі на основі рівнянь Максвелла та при забезпеченні певних граничних умов на межі розділу середовищ. Рішення такої дифракційної задачі отримано у вигляді нескінченного ряду комплексних функцій [1, 2], тому через свою складність практично не застосовується в інженерних розрахунках.

На практиці, зазвичай, застосовують спрощені моделі загального рішення, отримані для різних висот розташування антен передавача і приймача.

**Аналіз останніх досліджень.** Теорія розповсюдження радіохвиль в системах з високо піднятими антенами розроблена досить детально, що обумовлено бурхливим розвитком таких систем зв'язку, як радіорелейні лінії, стільникові системи зв'язку та ін., і доведена до рівня інженерних розрахунків, наприклад, на основі моделі Введенського. Що стосується моделювання систем з низько розташованими антенами, то, враховуючи більш складні умови проходження радіохвиль поблизу неоднорідної земної поверхні, розробка моделей носить обмежений характер і застосовується тільки для випадків розташування антен безпосередньо на поверхні землі (модель Шулейкіна-Ван-дер-Поля).

Для розрахунку значень напруженості електричного поля в роботі [3] пропонується використовувати квадратичну формулу Введенського, в якій для розрахунку діючого значення напруженості електричного поля у точці прийому використовується вираз (1)

$$E_d = \frac{\sqrt{30P_n G_n}}{r} W_T = \frac{\sqrt{30P_n G_n}}{r} \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r} \quad (1)$$

де  $W_T$  – множник ослаблення напруженості поля хвилі на реальній трасі;

$P_n$  – потужність передавача, яка підводиться до антени у Вт;

$G_n$  – коефіцієнт підсилення антени передавача у напрямку приймача в разях;

$h_1$  та  $h_2$  – приведена висота підняття антени передавача та приймача, м;

$\lambda$  – довжина хвилі, виражена через частоту  $\lambda = c/f$ ,  $c$  – швидкість світла ( $300 \cdot 10^6$  м/с),  $f$  – частота сигналу в Гц.

Слід відзначити, що область використання формули Введенського обмежується виразом (2), що дещо зменшує її практичну цінність:

$$r \geq \frac{18h_1 h_2}{\lambda} \quad (2)$$

$r$  – максимальна дальність прямої видимості, виражена у км.

У виразі (1) використовується приведені висоти антен, які пов'язані з еквівалентним радіусом Землі наступним чином [4]:

$$h'_1 = h_1 - \frac{r^2}{2a_{e3}} \left( \frac{h_1}{h_1 + h_2} \right)^2 \quad (3)$$

$$h'_2 = h_2 - \frac{r^2}{2a_{e3}} \left( \frac{h_2}{h_1 + h_2} \right)^2 \quad (4)$$

де

$$a_{e3} = \frac{a_3}{\left( 1 + \frac{a_3 g_t}{2} \right)} \quad (5)$$

$a_3 = 6\,356\,863$  м – середній радіус Землі;

$g_t$  – діелектрична проникність атмосфери, яка приймає значення  $-7,85 \cdot 10^{-8}$  1/м.

Виходячи з формули (2) отримуємо, що дана модель застосовна на відстанях, які визначаються межами

$$\frac{18h'_1 h'_2}{\lambda} \leq r \leq 4,12 \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (6)$$

Втрати у разі застосування моделі Введенського не залежать від електрофізичних параметрів поверхні.

Для моделі Шулейкіна-Ван-дер-Поля відсутня залежність втрат від висоти підняття антен, в той час, як електродинамічне рішення включає такі параметри. Це, в певній мірі, обмежує можливості використання цих моделей.

**Постановка завдання.** Метою статті є розробка моделі розповсюдження радіохвиль вздовж земної поверхні на трасі прямої видимості, яка враховує залежність втрат розповсюдження від довжини хвилі, висоти підняття антен та електрофізичних параметрів поверхні землі в явному виді.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Розглянемо особливості моделювання траси розповсюдження радіохвиль вздовж межі розділу повітря-земля на основі зон Френеля, існування

яких встановлюється аналізом загального рішення електродинамічної задачі.

Рішення електродинамічної задачі розповсюдження радіохвиль показує, що передачу електромагнітного поля від точки випромінювання (А) в точку прийому (В) можна описати за допомогою вказаних зон Френеля – просторових областей, які мають форму еліпсоїдів з фокусами в точках А і В (рисунок 1). При цьому, для практичних розрахунків досить врахувати дію електромагнітного поля, обмеженого першою зоною Френеля, яка формує так звану суттєву область розповсюдження радіохвиль з максимальним радіусом ( $\rho$ ).

У випадку достатньо низького розташування антен над рівнем землі в суттєву область розповсюдження прямої хвилі може входити частина місцевості з поглинаючою поверхнею. Це призводить до зменшення напруженості поля прямої хвилі і зростання втрат.

З рисунку 1 видно, що в цьому випадку радіохвиля, що випромінюється передавачем в точці А, спочатку розповсюджується у вільному просторі до місця зіткнення із поверхнею землі ( $d_n$ ). На цій ділянці траси рівень сигналу радіохвилі зменшується за законом втрат у вільному просторі. Коли в суттєву область розповсюдження потрапляють перешкоди, зокрема поверхня землі, втрати починають зростати за рахунок поглинання електромагнітного поля земною поверхнею тощо.

На відстані  $d_m$  радіус еліпсоїда стає меншим ніж висота підняття антени приймача, що дозволяє знехтувати взаємодією електромагнітної хвилі з поверхнею землі, і на кінцевій ділянці траси втрати знову визначаються втратами вільного простору.

Таким чином, в моделі, коли середнє значення втрат збільшується відповідно до степеневої функції із зростанням відстані між передавачем і приймачем, на початковій та кінцевій ділянках втрати зростають з показником ступеня 2, а на середній ділянці з показником  $n$ . Враховуючи

вищевикладене, загальні втрати розповсюдження сигналу можна визначити таким чином [6–10]:

$$L = \left( \frac{4\pi d_n d}{\lambda d_m} \right) \left( \frac{d_m}{d_n} \right)^n \quad (7)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі;

$d$  – відстань між передавачем та приймачем.

У разі однакової висоти підняття антен передавача і приймача ( $h_1 = h_2 = h$ ) значення  $d_m$  та  $d_n$  можна оцінити формулами [4];

$$d_n = \left( \frac{4h^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{4} \right) \quad (8)$$

$$d_m = \left( d - \frac{4h^2}{\lambda} + \frac{\lambda}{4} \right) \quad (9)$$

Наприклад, на дистанції 1000 м та  $h = 1,5$  м,  $d_n$  складає величину 60 м,  $d_m = 940$  м у разі  $\lambda = 0,15$  м;  $d_n = 8,7$  м,  $d_m = 991,3$  м у разі  $\lambda = 1$  м.

З урахуванням (8) і (9) загальні втрати визначаються формулою:

$$L = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \left( \frac{4h^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{4} \right)^{2-n} \left( d - \frac{4h^2}{\lambda} + \frac{\lambda}{4} \right)^{n-2} \quad (10)$$

На рисунках 2 та 3 показані залежності втрат розповсюдження радіохвиль від відстані між передавачем і приймачем, розраховані за формулою (10) у разі  $n = 4; 3$ ; та  $\lambda = 1$  м;  $\lambda = 0,15$  м. Як параметр використана висота підняття антен за умови  $h_1 = h_2 = h$ .

**Висновки.** Аналіз виразу (10) і даних, приведених на рисунках 2 та 3 показує наступне.

1. При розташуванні антен безпосередньо на поверхні землі ( $h = 0, d \gg \frac{\lambda}{4}$ ) формула (10) приймає вигляд втрат, одержаних в моделі Шулєйкіна-Вандер-Поля, в якій втрати пропорційні четвертому ступеню відношення відстані до довжини хвилі.

$$L = \left\{ \frac{8\pi^2 d^2}{\lambda^2} [\varepsilon^2 + (60\lambda\sigma)^2]^{-\frac{1}{2}} \right\}^2 \quad (11)$$

де  $\varepsilon$  та  $\sigma$  – відносна діелектрична проникність і питома проникність ґрунту на трасі.

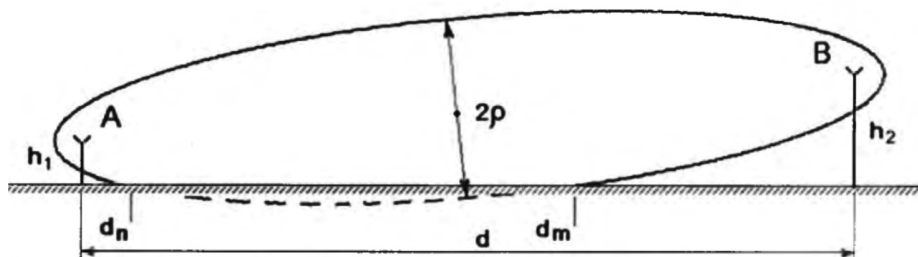


Рис. 1. Еліпсоїд Френеля розповсюдження радіохвиль

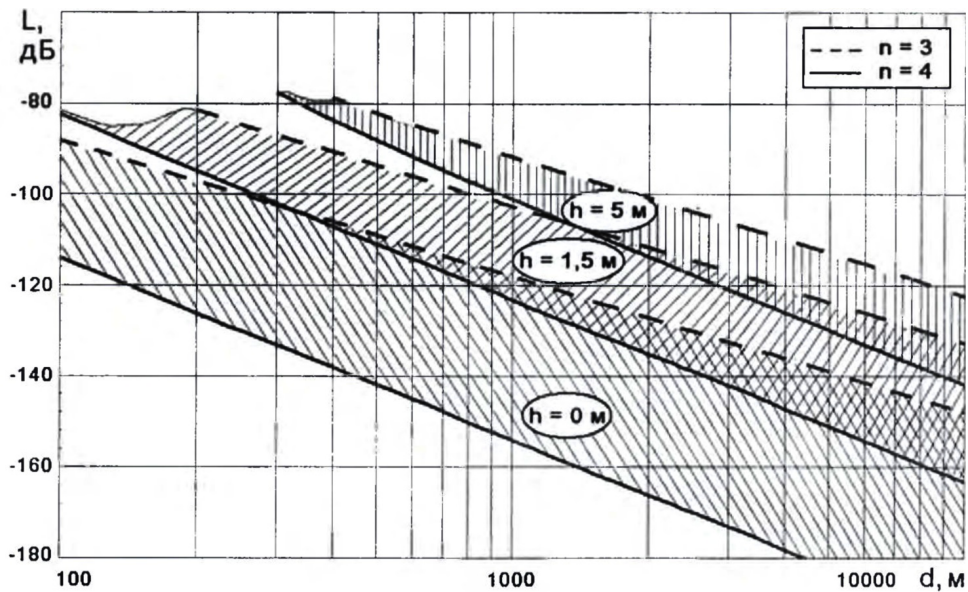


Рис. 2. Залежність втрат розповсюдження радіохвиль у разі  $\lambda = 1$  м

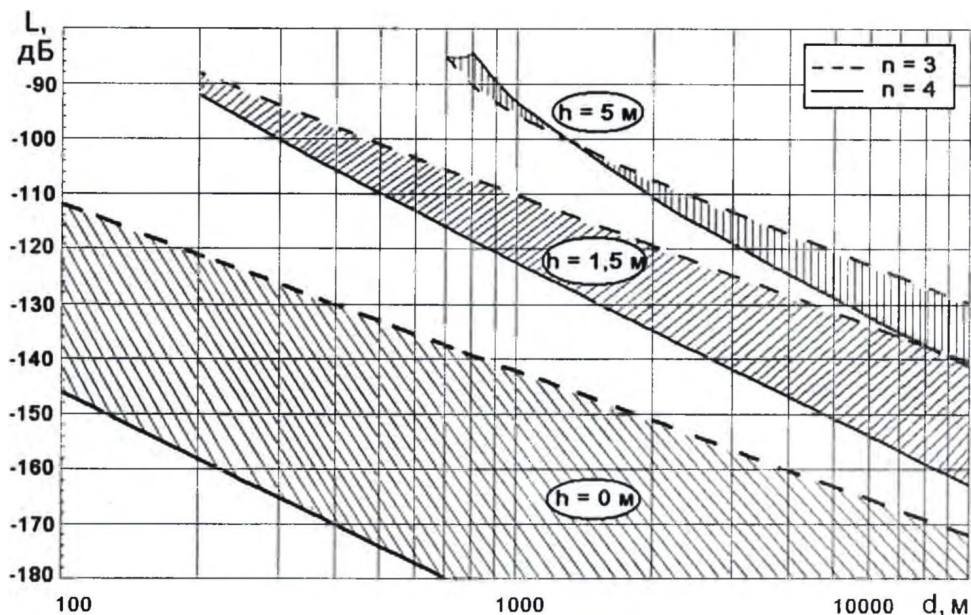


Рис. 3. Залежність втрат розповсюдження радіохвиль у разі  $\lambda = 0,15$  м

2. У разі високо піднятих антен ( $h \gg \frac{\lambda}{4}$  та  $d \gg \frac{4h^2}{\lambda}$ ) втрати визначаються виразом

$$L = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \left(\frac{4h^2}{\lambda}\right)^{2-n} d^n \quad (12)$$

який у разі  $n = 4$  співпадає з точністю до постійного множника ( $\pi$ ) з формулою втрат для моделі Введенського, де

$$L = \left(\frac{d}{h}\right)^4 \quad (13)$$

3. Залежність втрат від електрофізичних параметрів поверхні закладена у величині показника  $n$ .

Прирівнюючи втрати, отримані по формулі (10) у разі  $h = 0$ , втрагам, що відповідають моделі

Шулейкіна-Ван-дер-Поля (11), отримаємо зв'язок з електрофізичними параметрами поверхні:

$$n = \frac{2,8 + 4 \lg d - 4 \lg \lambda - \lg[\varepsilon^2 + (60\lambda\sigma)^2]}{0,6 + \lg d - \lg \lambda} \quad (14)$$

Знаючи електрофізичні характеристики поверхні в районі траси розповсюдження радіохвиль, які відомі для багатьох типів ґрунтів, як це наприклад, показано у таблиці 1, можна визначити  $n$  для конкретної місцевості та розрахувати втрати для інших висот підняття антен.

Таким чином, розглянута модель розповсюдження радіохвиль вздовж межі розділу повітря-земна поверхня, відповідає поставленим вимогам,

Електрофізичні характеристики для різних типів поверхні

Характеристики земної поверхні	$\epsilon$	$\sigma$ , см/м
Суша земля	2...6	$10^{-4}...10^{-3}$
Земля середньої вологості	10	$2 \cdot 10^{-4}$
Волога земля	30	$9 \cdot 10^{-4}$
Глина суха	2	$3 \cdot 10^{-2}$
Глина волога	24	$6 \cdot 10^{-1}$
Сухий пісок	4	$9 \cdot 10^{-5}$
Вологе трав'яне покриття на торфі	6	$10^{-1}$
Мерзлий ґрунт	3...6	$10^{-6}...10^{-2}$
Сніг (при $t = -10$ °С)	1	$10^{-6}$
Крига (при $t = -10$ °С)	4...5	$10^{-2}...10^{-1}$
Прісна вода	80	$10^{-3}...10^{-2}$
Морська вода	80	0,66...6,6
Сільська місцевість	14	$10^{-2}$
Міський ландшафт	3	$10^{-4}$

і що важливо, описує залежність втрат від електрофізичних параметрів поверхні землі та втрат розповсюдження радіохвиль у разі, коли висота

розташування антени порівнянна з довжиною радіохвилі, та може бути використана при проектуванні та експлуатації наземних систем зв'язку.

#### Список літератури:

1. Измайлов С.В. Курс электродинамики. Учебник для физико-математических факультетов педагогических институтов. Москва, 1962. 439 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики : учеб. пособие. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. 3-е изд., испр. М., 1988 Т. 2. 496 с.
3. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М., Связь, 1972. 336 с.
4. Калинин А.И., Черенкова О.В. Распространение радиоволн и работа радиолиний. М.: Связь, 1971. 440 с.
5. Barclay L.W. Propagation of Radio Waves. London, Institution of Engineering and Technology, 2008. 460 p.
6. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. М., Мир, 1981. Т. 2. 322 с.
7. Чернов Л.А. Волны в случайно-неоднородных средах. М., Наука, 1977. 172 с.
8. Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile services//IEEE Trans. Vehicular Technology. 1980. V. 29, № 3. pp. 317–326.
9. V. Erceg, L. J. Greenstein, S. Y. Tjandra, S. R. Parkoff, A. Gupta, B. Kulic, A. A. Julius, and R. Bianchi, «An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments» IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 17, July 1999. pp. 1205–1211.

#### Ciapa S.M. THE LINE-OF-SIGHT ROUTE MODEL FOR GROUND COMMUNICATION SYSTEMS

*The article explores the impact of the characteristics of the radio wave propagation path along the air-ground surface propagation boundary. In particular, the amount of fading of the useful signal in the space between the transmitter and the receiver of the communication system is of interest. The proximity of the earth's surface significantly affects the structure of the electromagnetic field of the radio wave, which leads to the loss of the level of the radio wave signal on the ground path and significantly depends on the electrophysical parameters of the earth's surface, wavelength, etc. Therefore, the path of radio wave propagation needs a specific description. One of the main factors that lead to loss of the radio signal level is the diversity of the Earth's surface in terms of profile (plains, mountains, rivers, lakes), composition (sand, clay, chernozem, various stones), vegetation cover (deserts, steppes, forests). It is also necessary to take into account the seasonal variation of the dielectric characteristics of the underlying surface, which occurs as a result of changes in the humidity of the vegetation cover, seasonal changes in the aggregate state of precipitation (snow, rain, ice). In addition, the degree of surface roughness has a significant effect on the propagation of radio waves.*

*This article analyzes radio wave signal level losses and develops a model of radio wave propagation along the Earth's surface on a line-of-sight path, based on radio wave propagation models such as the Vvedensky and Shuleikin-Van der Pol models. The presented model of propagation of radio waves along the earth's surface on a line-of-sight route takes into account the dependence of propagation losses on the wavelength, the height of the antennas, and the electro-physical parameters of the earth in a clear form. The considered model describes the dependence of radio wave propagation losses in the case when the height of the antenna location is comparable to the length of the radio wave, and can be used in the design and operation of terrestrial communication systems. The presented model of radio wave propagation is as close as possible to a real radio channel and allows conducting computer experiments for the development of data transmission algorithms over long distances, as well as conducting field experiments to work out technical solutions in the process of creating radio equipment.*

**Key words:** *radio waves, signal propagation losses, surface propagation of radio waves, antenna elevation height, Vvedenskyi model, Vvedenskyi quadratic formula, Shuleykin-Van der Pol model.*