

Батракова А.Г.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет
(вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, 61000, Україна; e-mail: rp@khadi.kharkov.ua)

МОДЕЛІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ХВИЛЬ В СИСТЕМАХ АЕРОКОСМІЧНОЇ ГЕОДЕЗІЇ

В роботі проведено аналіз хвильових явищ, які супроводжують процеси дистанційного зондування та отримання первинних геодезичних даних, в тому числі під час вишукувань автомобільних доріг та об'єктів цивільного будівництва. На підставі даних, що наведені в літературі, доведено необхідність врахування всього комплексу таких хвильових явищ, а саме: дифракції, відбиття та рефракції. Запропоновано використання хвильового рівняння в найбільш загальній формі, що враховує в тому числі неоднорідність середовища, в якому розповсюджуються електромагнітні хвилі (імпульси).

Ключові слова: хвильові явища, дистанційне зондування, GPS, рефракція, надширококутний імпульсний сигнал

Вступ. Моделі поширення сигналів є важливою складовою частиною методів отримання первинної інформації щодо форми та внутрішніх характеристик об'єктів, що зондуються, а також алгоритмів обробки отриманих даних. Зокрема, для проведення моніторингу земної поверхні активно розвивається так звана технологія огляду поверхні Землі за допомогою системи глобального позиціонування (Global Positioning System - GPS) із залученням технологій «кінематики в реальному часі» (Real Time Kinematic - RTK) [1, 2], що дозволило отримати роздільну здатність даних, близьку до одного сантиметру. Найбільш актуальними областями застосування технології RTK - GPS є огляд земної поверхні (дані щодо геометричної форми), обстеження будівельних майданчиків, а також проведення вишукувань та моніторинг поточного стану автомобільних доріг, фотограмметричний контроль, оновлення даних геоінформаційних систем (geographic information system - GIS). Однією з ключових особливостей отримання даних в рамках такої технології є модель поширення сигналів (електромагнітних хвиль) на трасі (від наземних станцій до супутників). Крім того, при аналізі та інтерпретації даних необхідно враховувати такі явища як дифракція (огинання перешкоди хвилями), розсіювання (перетворення кутового розподілу світлового потоку) і рефракція (зміна напрямку хвильового вектора, що виникає на межі двох середовищ, через які проходить хвиля). Зрозуміло, що розглянути детально

в рамках однієї статті всі питання, які пов'язані з такими складними і фізично змістовними явищами, не представляється можливим. Тому в даній роботі основну увагу приділено проблемам поширення електромагнітних хвиль в атмосфері, які пов'язані в першу чергу з явищем рефракції. Для досягнення поставленої мети, перш за все, проведемо аналіз наявних результатів, а потім – розглянемо рішення поставленого завдання, яке спирається на залучення хвильового рівняння в найбільш загальному вигляді.

Аналіз проблем, що виникають при дистанційному зондуванні. Вивчення теоретичних аспектів проблем, що пов'язані із спотвореннями полів при дистанційному зондуванні почалося ще до появи і інтенсивного розвитку супутникових навігаційних систем [3]. Ці дослідження були спрямовані на вивчення змін напруженості високочастотних (ВЧ) і надвисокочастотних (НВЧ) полів при використанні систем мобільного контролю. Пізніше були зроблені спроби залучення емпіричних моделей для обчислення втрат (загасання) в системах наземного базування [4]. Для опису поведінки електромагнітних хвиль при поширенні від передавальної антени до приймальної необхідна відповідна математична модель. У багатьох роботах в якості такої моделі автори залучають так зване параболічне рівняння [2, 5-7]:

$$\Delta \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

$$\Delta \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2},$$

де \mathbf{E}, c - вектор напруженості електричного поля і швидкість світла у вільному просторі відповідно.

Термін «параболічне рівняння» був використаний в [2, 8] для класифікації диференціальних рівнянь в частинних похідних по аналогії з рівняннями, що містять квадратичні форми в аналітичній геометрії. Інакше кажучи, квадратне рівняння, що має вигляд:

$$A \cdot x^2 + B \cdot xy + C \cdot y^2 + D \cdot x + E \cdot y + F = 0 \quad (2)$$

прийнято відносити до еліптичного, параболічного або гіперболічного типу в залежності від значення виразу $(B^2 - 4AC)$ - негативного, рівного нулю або позитивного.

Надалі були зроблені спроби модернізації методів і засобів отримання та обробки даних для систем GPS [9,10]. Пропонувалися нові види сигналів [11] і теоретичні моделі (наприклад, залучення теорії Френеля-Кірхгофа) до аналізу дифракції електромагнітних хвиль на неоднорідностях земної поверхні [12, 13], а також різні методи підвищення обчислювальної ефективності алгоритмів, що застосовуються [14], і поєднання систем GPS з надширококустовими (НШС) сигналами [15]. Також інтенсивно розвивається і елементна база систем GPS [16,17]. Таким чином, проблема удосконалення фізико-математичних моделей розповсюдження електромагнітних імпульсних полів в системах RTK - GPS є актуальною.

Результати дослідження. Перш за все, відзначимо, що з системи рівнянь Максвелла в диференціальній формі, що описують в найзагальнішому вигляді закони електродинаміки, можна за допомогою відповідних перетворень отримати хвильове рівняння, що описує закон поширення електромагнітних хвиль в неоднорідних середовищах [18-20]:

$$\Delta \mathbf{E} + \text{grad} \left(\mathbf{E} \frac{\text{grad}(\varepsilon)}{\varepsilon} \right) - \frac{\varepsilon \mu}{c^2} \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{E} - \frac{4\pi}{c^2} \sigma \frac{d}{dt} \mathbf{E} = 0; \quad (\mu \equiv 1). \quad (3)$$

Величини, що фігурують в цьому співвідношенні, мають наступне значення: $\mathbf{E}(x, y, z | t)$ - напруженість електричного поля; ε, μ - відносні діелектрична і магнітна проникності; σ - провідність См / м; c - швидкість поширення світла у вакуумі, см/нс. Для більшості середовищ магнітна проникність $\mu \equiv 1$.

Це основне рівняння для задач моделювання і інтерпретації результатів дистанційного зондування в найбільш загальній формі. Його значення полягає в переході від системи векторних диференціальних рівнянь першого порядку до одного диференціального рівняння, але другого порядку. У такій формі другий доданок в рівнянні відповідає за можливу просторову неоднорідність розподілу діелектричної проникності, що може бути викликано безперервною зміною щільності (вологості) середовища, в якому відбувається поширення електромагнітної хвилі. Останній доданок враховує можливу безперервну зміну електричної провідності, яка пов'язана, наприклад, зі зміною вмісту вологи в повітрі вздовж траси розповсюдження сигналу.

Ще одна особливість аерокосмічних систем отримання геодезичних даних пов'язана з наявністю різних схем взаємодії передавальних і приймальних антен. Розглянемо ключові особливості двох основних схем. Перша схема є, по суті, варіантом класичної схеми радіолокації (рис.1). В рамках цієї схеми інформативним є сигнал, який відбито від земної поверхні (ground-reflected wave). Очевидно, що в такому випадку необхідно використання антен (як передавальної, так і приймальної) з дуже малою шириною головної пелюстки діаграми спрямованості і точної просторової орієнтації (взаємного розташування) антен, бо інакше не зможемо досягнути високої точності визначення параметрів. Одним з варіантів першої схеми також є однопози-

ційна схема зондування, коли використовується одна приймально-передавальна антена (або антенний блок). Але при цьому необхідно точно знати координати і просторову орієнтацію цієї антени. Друга схема - умовно RTK – GPS (Рис.2) заснована на розміщенні передавальної антени безпосередньо на земній поверхні і на реєстрації сигналу відразу декількома приймальними антенами, які розташовані на космічних носіях – штучних супутниках.

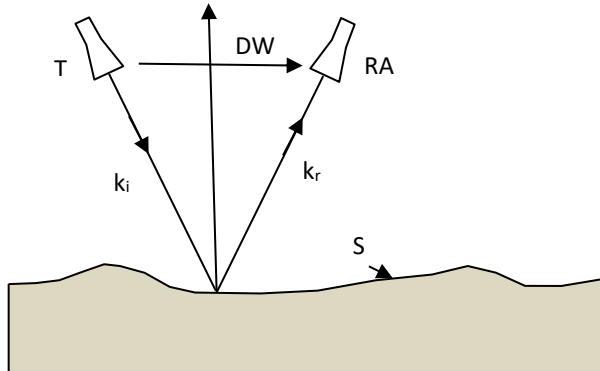


Рис. 1. Класична схема радіолокації. S - земна поверхня; ТА - передавальна антена; РА - приймальна антена; DW - сигнал прямого проходження; k_i - хвильовий вектор зондуючого сигналу; k_r - хвильовий вектор відбитого поверхнею сигналу

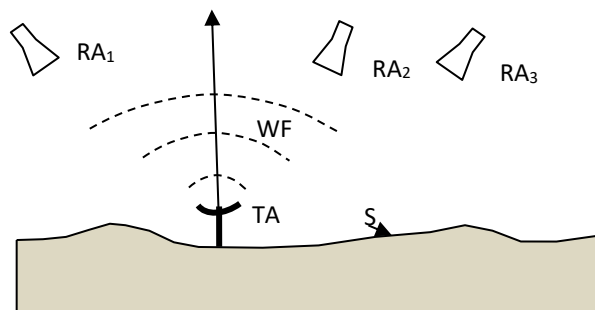


Рис. 2. Друга схема (RTK – GPS) отримання первинних даних. S - земна поверхня; ТА - передавальна антена; RA₁, RA₂, RA₃ - приймальні антени; WF - фазовий фронт інформативного сигналу

В рамках зондування за однопозиційною схемою (одна приймально-передавальна антена або розміщення передавальної і приймальні антен в одному блоці) напрямком зондуючого сигналу (хвильового вектора) є ортогональним до деякої середньої лінії поверхні досліджуваного середовища. Якщо поверхня середовища також ортогональна напрямку зондування, а напрямком стратифікації середовища збігається з напрямком зондування, то другий доданок в (3) звертається в нуль через ортогональ-

ність векторів E і $grad(\varepsilon)$, а рівняння набуває вигляду (для випадку гармонійної залежності від часу):

$$\Delta E + \frac{\omega^2}{c^2} \cdot \varepsilon \cdot \mu \cdot E + i \cdot \frac{4\pi\omega}{c^2} \cdot \sigma \cdot E = 0; \quad (4)$$

$$(\mu \equiv 1)$$

або

$$\Delta E + k^2 E = 0; \quad (5)$$

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon + i \frac{4\pi\omega}{c^2} \sigma$$

де k – так зване хвильове число; $i = \sqrt{-1}$; ω – кругова частота, яка пов'язана з циклічною частотою співвідношенням, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ рад/с.

У такому випадку зручно ввести поняття комплексної діелектричної проникності, визначивши:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \cdot \varepsilon_c, \quad (6)$$

$$\text{де } \varepsilon_c = \varepsilon' + i \varepsilon''; \varepsilon' = \varepsilon; \varepsilon'' = \frac{4\pi}{\omega} \cdot \sigma. \quad (7)$$

Якщо поверхня не ортогональна напрямку зондування, то можна використовувати факт наявності шорсткості (дрібних нерівностей) поверхні і залучити метод розв'язання оберненої задачі за допомогою аналізу розсіювання у флуктуаційну компоненту [21].

Нарешті, необхідно докладніше зупинитися на визначеннях та особливостях застосування НШС імпульсних сигналів. Як відомо, в даний час немає єдиного визначення НШС імпульсного сигналу. Часто в радіолокації надширокосмуговими називають сигнали з відносною шириною смуги частот [22]:

$$\mu = \frac{\Delta F}{\left(\frac{f_{low} + f_{up}}{2} \right)} \geq 0.5. \quad (8)$$

Можливо визначення у вигляді вимоги виконання співвідношення: $c \cdot \tau \ll L$, (9) яке означає, що просторова довжина імпульсу (c - швидкість світла, τ – тривалість імпульсу) набагато менше характерного розміру об'єкта, який відбиває сигнал, і розмірів приймальної і передавальної апер-

тур. У додатках, що відносяться до радіозв'язку користуються визначенням Федеральної комісії зв'язку (FCC USA) від 2002 року, яке пропонує називати надшироко-смуговими сигнали з відносною шириною смуги не менше ніж 20-25 % або інакше

$$\mu = \frac{\Delta F}{\left(\frac{f_{low} + f_{up}}{2}\right)} \geq 0,2 \div 0,25, \quad (10)$$

або сигнали з абсолютною шириною смуги $\Delta F \geq 500$ МГц. Це узгоджується з (10) для діапазону частот від 3,1 ГГц до 10,6 ГГц. Надшироко-смугові сигнали забезпечують стійкість, захист даних і високу інформативність не тільки геодезичних систем моніторингу земної поверхні, але й систем мобільного радіозв'язку, а також каналів з важливою науковою та технологічною інформацією.

Висновки. В результаті проведеного теоретичного аналізу запропонована модель поширення електромагнітних хвиль, що спирається на хвильове рівняння, яке записане в найбільш загальній формі, що дозволяє врахувати як наявність втрат (загасання сигналу), так і неоднорідність середовища уздовж траси поширення електромагнітної хвилі, в тому числі й надшироко-смугового імпульсного сигналу.

Тому одним з напрямків подальших досліджень є залучення найбільш досконалих з існуючих моделей врахування явищ дифракції та розсіювання електромагнітних хвиль на межах розділу середовищ з урахуванням неоднорідності й кривизни границь.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Langely, R. B. RTK GPS [Text] / R. B. Langely // GPS World. – 1988. – Vol. 9, № 9. – P. 70-75.
2. Advanced Mission Planning Tool for Real-Time Kinematic (RTK) GPS Surveying [Text]: Technical report / Department of Geodesy and Geomatics Engineering University of New Brunswick. – 2001. – 114 p.
3. Okumura, T. Field Strength and Its Variability in VHF and UHF Land Mobile Service [Text] / T. Okumura, E. Ohmori, K. Fukuda // Review Electrical Communication Laboratory. – 1968. – Vol. 16, №. 9-10. – P. 825-873.
4. Hata, M. Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services [Text] / M. Hata //

- IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 1980. – Vol. VT-29, №.3. – P. 317-325.
5. Dockery, G. D. Modelling Electromagnetic Wave Propagation in the Troposphere Using the Parabolic Equation [Text] / G. D. Dockery // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1988. – Vol. 36, № 10. – P. 1464-1470.
6. Levy, M. F. Parabolic Equation Modelling of Propagation Over Irregular Terrain [Text] / M. F. Levy // Electronic Letters. – 1990. – Vol.26, № 15. – P. 1153-1154.
7. Kuttler, J. R. Theoretical description of the parabolic approximation Fourier split-step method of representing electromagnetic propagation in the troposphere [Text] / J. R. Kuttler, G. D. Dockery // Radio Science. – 1991. – Vol. 26, № 2. – P. 381-393.
8. Myint-U, T. Partial Differential Equations of Mathematical Physics [Text] / T. Myint-U. – Second Edition. – New York: North Holland, 1980. – 378 p.
9. Talbot, N. C. Compact Data Transmission Standard for High-Precision GPS [Text] / N. C. Talbot // Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the Satellite Division ION GPS 1996. — Kansas City Convention Center, Kansas City, Missouri, September 17-20, 1996. — P. 86-87.
10. Sandhoo, K. Modernizing of the Global Positioning System [Text] / K. Sandhoo, D. Turner, M. Shaw // Proceedings of ION GPS 2000. – Salt Lake City, UT, 19-22 September, 2000. – P. 2175-2183.
11. Van Dierendonck, A.J. The New L5 Civil GPS Signal. [Text] / A.J. Van Dierendonck, C. Hegarty // GPS World. – 2000. – Vol. 11, № 9. – P. 64-71.
12. Whittaker, J. H. Fresnel-Kirchoff theory applied to terrain diffraction problems [Text] / J. H. Whittaker // Radio Science. – 1990. – Vol. 25, № 5. – P. 837-851.
13. Whittaker, J.H. Physical Optics and Terrain Diffraction [Text] / J. H. Whittaker // Radioscientist. – 1994. – Vol. 5, № 3. – pp 111-116.
14. Kim, D., Langley R. B. An optimized least-squares technique for improving ambiguity resolution performance and computational efficiency [Text] / D. Kim, R. B. Langley // Proceedings of ION GPS'99. – Nashville, Tennessee, September 14-17, 1999. – P. 1579-1588.
15. Tan, K. GPS and UWB Integration for indoor positioning [Text] / K. Tan, C. Law // Proceedings of the IEEE 6th International Conference on «Information Communications and Signal Processing». – Singapore, 2007. – P. 1-5.
16. Langely, R.B. Communication Links for DGPS [Text] / R.B. Langely // GPS World. – 1999. – Vol. 10, № 5. – P. 52-59.
17. Jian Wang. A Tightly-Coupled GPS-INS-UWB Cooperative Positioning Sensors System Supported by V2I Communication [Електронний ресурс] / Jian Wang, Yang Gao, Zengke Li, Xiaolin Meng, Craig M. Hancock // Sensors (Basel). 2016 – 16(7), 944. doi: 10.3390/s16070944 – Режим доступу: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/7/944>

18. Борн, М. Основы оптики [Текст] / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука. – 1973. – 720 с.
19. Batrakov, D.O. Solution of a General Inverse Scattering Problem Using the Distorted Born Approximation and Iterative Technique [Text] / D. O. Batrakov, N. P. Zhuck // Inverse Problems. – 1994. – Vol.10, № 1. – P. 39-54.
20. Батракова, А.Г. Методология мониторинга дорожных одежд нежесткого типа с применением георадарных технологий [Текст]: дис... докт. техн. наук. / А.Г. Батракова. – Харьков, 2014. – 397с.
21. Zhuck, N.P. Determination of electrophysical properties of a layered structure with a statistically rough surface via an inversion method. [Text] / N.P. Zhuck, D.O. Batrakov // Physical Review B. – 1995. – Vol.51, №23. – P. 17073-17080.
22. Вагранов, М. Е., Радиолокационный отклик летательных аппаратов [Text] / Вагранов М. Е., Зиновьев Ю. С., Астанин Л. Ю., Костылев А. А., Сарычев В. А., Снежинский С. К., Дмитриев Б. Д. – М.: Радио и связь, 1985. – 320 с.
23. Решение Федеральной комиссии по связи (FCC) США № FCC 02-48 от 14/02/2002 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-02-48A1.pdf](http://hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-02-48A1.pdf)

Батракова А.Г. МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В СИСТЕМАХ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ.

В работе проведен анализ волновых явлений, сопровождающих процессы дистанционного зондирования и получения первичных геодезических данных,

в том числе во время изысканий автомобильных дорог и объектов гражданского строительства. На основании данных, приведенных в литературе, показана необходимость учета всего комплекса таких волновых явлений, а именно: дифракции, отражения и рефракции. Предложено использование волнового уравнения в наиболее общей форме, учитывающей, в том числе неоднородность среды, в которой распространяются электромагнитные волны (импульсы).

Ключевые слова: волновые явления, дистанционное зондирование, GPS, рефракция, сверхширокополосный импульсный сигнал

Batrakova A.G. MODELS OF WAVE PROPAGATION IN AEROSPACE GEODESIS SYSTEMS.

Paper is devoted to analysis of the wave phenomena that accompany processes of remote sensing and of obtain primary geodetic data, including activity during developing of highways and objects of civil engineering. Based on the analysis of the data presented in the literature, the need to take into account the whole complex of such wave phenomena, namely: diffraction, reflection and refraction, is shown. It is proposed to use the wave equation in the most general form, taking into account the heterogeneity of the medium in which the electromagnetic waves (impulses) propagates.

Keywords: wave phenomena, remote sensing, GPS, refraction, ultra-wideband pulse signal.

УДК 519.6

Беляев Н. Н., Клименко И. В.

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, (ул. Лазаряна, 2, Днепр, 49000, Украина; e-mail: berlovalexandrr@gmail.com)

Кириченко П. С.

Криворожский национальный университет (ул. Виталия Матусевича, 11, Кривой Рог, 50000, Украина)

РАСЧЕТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ВОЗЛЕ ОТВАЛА НА БАЗЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

Предложена 2D численная модель для оценки уровня загрязнения воздушной среды возле отвалов горнорудной промышленности. Разработанная численная модель представляет собой аппроксимацию уравнения массопереноса пылевого загрязнения в атмосферном воздухе. Модель позволяет очень быстро рассчитать поле пылевого загрязнения. Приведено описание алгоритма решения задачи по оценке уровня загрязнения воздушной среды возле отвала. Представлены результаты вычислительного эксперимента.

Ключевые слова: отвал; загрязнение воздушной среды; распространение пылевых загрязнений; численное моделирование.

Вступление. Многочисленные отвалы породы в Криворожском районе представляют собой долгосрочные и интенсив-

ные источники пылевого загрязнения атмосферного воздуха. Эти отвалы являются побочным продуктом добычи железной