

Триснюк Василь Миколайович

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ
ORCID: 0000-0001-9920-4879

Єгоров Володимир Олександрович

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ
ORCID 0000-0003-1738-1375

ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ВАЖЛИВОСТІ КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ СИСТЕМ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

Анотація. Завдання визначення пріоритетності супутникових каналів передачі даних є актуальним і має значний науково-прикладний інтерес. В роботі встановлено критерії оцінювання важливості, які дозволять визначити найінформативніші канали для пріоритетного моніторингу.

Метою цієї роботи є вдосконалення інформаційні технології для оцінювання показників важливості каналів передачі даних систем супутникового зв'язку.

Оцінка енергетичної доступності систем супутникового зв'язку є ключовим аспектом для забезпечення надійного та ефективного зв'язку. Цей процес включає аналіз енергетичного балансу між передавачем і приймачем, враховуючи втрати сигналу під час його поширення через атмосферу та космічний простір.

Розроблена система показників важливості каналів передачі даних систем супутникового зв'язку дозволяє враховувати всі ключові аспекти доступності та інформативності каналів. Для практичного використання пропонується створити експертну систему, яка використовуватиме методи нечіткої логіки для врахування невизначеностей. Створення методики визначення важливості каналів передачі, базуючись на теорії нечіткої логіки, методах експертного аналізу та оцінки корисності.

В роботі пропонується інтегрувати всі запропоновані показники в один узагальнений критерій важливості, який можна використовувати для оптимального розподілу ресурсів при здійсненні пошуку та моніторингу супутникових систем зв'язку.

Запропоновану систему показників необхідно враховувати для оцінки важливості каналів передачі даних супутникових систем зв'язку під час радіомоніторингу, враховувати динамічні зміни в умовах реального часу

Ключові слова: інформаційні технології, канали передачі даних, радіомоніторинг, дистанційні методи, системи супутникового зв'язку, методи експертного аналізу, методи нечіткої логіки.

Trysnyuk Vasyl

Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

ORCID: 0000-0001-9920-4879

Ehorov Volodymyr

Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

ORCID 0000-0003-1738-1375

ASSESSMENT OF IMPORTANCE INDICATORS OF DATA TRANSMISSION CHANNELS OF SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS

Abstract. The task of determining the priority of satellite data transmission channels is relevant and has significant scientific and applied interest. The work establishes criteria for assessing the importance, which will allow determining the most informative channels for priority monitoring.

The purpose of this work is to improve information technologies for assessing the importance of data transmission channels of satellite communication systems.

Assessment of the energy availability of satellite communication systems is a key aspect for ensuring reliable and efficient communication. This process includes an analysis of the energy balance between the transmitter and the receiver, taking into account signal losses during its propagation through the atmosphere and outer space.

The developed system of indicators of the importance of data transmission channels of satellite communication systems allows taking into account all key aspects of the availability and informativeness of channels. For practical use, it is proposed to create an expert system that will use fuzzy logic methods to take into account uncertainties. Creation of a methodology for determining the importance of transmission channels, based on the theory of fuzzy logic, methods of expert analysis and utility assessment.

The work proposes to integrate all the proposed indicators into one generalized criterion of importance, which can be used for optimal allocation of resources when searching and monitoring satellite communication systems.

The proposed system of indicators must be taken into account to assess the importance of data transmission channels of satellite communication systems during radio monitoring, to take into account dynamic changes in real-time conditions.

Keywords: *information technologies, data transmission channels, radio monitoring, remote methods, satellite communication systems, expert analysis methods, fuzzy logic methods.*

1. Вступ. Ефективність систем супутникового зв'язку залежить від здатності забезпечувати надійність і своєчасність передачі інформації через численні канали зв'язку. З огляду на великий обсяг даних і високу динаміку змін у середовищі, ключовим завданням є визначення важливості каналів для оптимального використання ресурсів радіомоніторингу. Це дослідження спрямоване на об'єднання сучасних показників, які впливають на оцінку важливості супутникових каналів передачі даних.

2. Аналіз досліджень і публікацій. Супутникові системи зв'язку (ССЗ) включають численні джерела радіомоніторингу (ДРМ), які характеризуються різною інформативністю, доступністю та надійністю. Через велику кількість каналів їх одночасне спостереження є технічно і економічно недоцільним. Необхідно встановити критерії оцінювання важливості, які дозволять визначити найінформативніші канали для пріоритетного моніторингу.

Огляд літератури та попередніх досліджень показав, що існуючі методики оцінювання важливості каналів передачі даних мають наступні недоліки:

1. Неврахування структурної доступності та впливу атмосферних умов на втрати енергії сигналу.
2. Відсутність інтегрованої системи показників енергетичної, інформаційної доступності та інформативності.
3. Залежність від суб'єктивного досвіду експертів.

Використанню програмних технологій для аналізу, обробки та передачі даних у сфері систем супутникового зв'язку присвятили праці Лялько В.І., Трофимчук О.М., Красовський Г.Я., Греков Л.Д., Попов М.О. та інші.

3. Метою цієї роботи є вдосконалення інформаційні технології для оцінювання показників важливості каналів передачі даних систем супутникового зв'язку.

. Для досягнення цієї мети необхідно таке завдання:

- проаналізувати сучасні канали передачі даних систем супутникового зв'язку.
- дослідити моделі для оцінювання показників важливості каналів передачі даних систем супутникового зв'язку..

Об'єктом дослідження є процес інформаційних технологій для оцінювання показників важливості каналів передачі даних систем супутникового зв'язку.

Виклад основного матеріалу. Основними показниками оцінювання ДРМ є доступність, інформативність та надійність. Доступність джерела, у свою чергу, визначається через енергетичну, структурну та інформаційну складові.

1. Енергетична доступність (D):

Оцінка енергетичної доступності систем супутникового зв'язку є ключовим аспектом для забезпечення надійного та ефективного зв'язку. Цей процес включає аналіз енергетичного балансу між передавачем і приймачем, враховуючи втрати сигналу під час його поширення через атмосферу та космічний простір.

Енергетичну доступність ДРМ можна оцінити за допомогою рівняння:

$$D = P_r + P_t + G_r + G_t - L_p - L_a - L_s \quad (1)$$

де P_r - потужність сигналу на вході приймача (дБм); P_t - потужність передавача (дБм); G_t - коефіцієнт підсилення передавальної антени (дБі); G_r - коефіцієнт підсилення приймальної антени (дБі); L_p - втрати на вільному просторі (дБ); L_a - атмосферні втрати (дБ); L_s - інші системні втрати (дБ).

Втрати на вільному просторі розраховуються за формулою:

$$L_p = 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} f + 92,45 \quad (2)$$

де d - відстань між передавачем і приймачем (км); f - частота сигналу (ГГц).

Кут місця антени станції (ϵ) є важливим параметром при оцінюванні *просторової доступності* супутникового зв'язку. Він визначає кут між напрямком на космічний апарат (КА) та площиною місцевого горизонту. Зменшення кута місця призводить до збільшення довжини шляху сигналу через атмосферу, що, в свою чергу, підвищує втрати сигналу.

Для розрахунку відстані, який проходить сигнал в атмосфері використаємо:

$$l = \frac{h}{\sin(\epsilon)} \quad (3)$$

де l - довжина шляху сигналу в атмосфері; h - ефективна висота поглинаючого шару атмосфери; ϵ - кут місця антени.

З цієї формули видно, що при зменшенні кута місця ϵ довжина шляху l зростає, що призводить до збільшення втрат сигналу в атмосфері. Тому на практиці мінімально допустиме значення кута місця антен земних станцій обмежується величиною близько 10° , щоб уникнути надмірних втрат сигналу.

Поглинання радіохвиль в атмосфері визначається наявністю газами тропосфери: киснем та водяними парами. Для кількісної оцінки затухання радіохвиль при їхньому проходженні через атмосферу використовують моделі та формули, які враховують частоту сигналу, відстань поширення та властивості середовища. Однією з базових моделей є розрахунок загасання у вільному просторі, який визначає втрати сигналу без урахування атмосферних впливів.

Загасання у вільному просторі визначається:

$$\theta = \left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2 \quad (4)$$

де d - відстань між передавачем і приймачем (м); f - частота сигналу (Гц); c - швидкість світла у вакуумі.

Однак у реальних умовах необхідно враховувати додаткові втрати, спричинені поглинанням сигналу атмосферними газами, такими як кисень і водяна пара. Ці втрати залежать від частоти сигналу, температури, тиску та вологості повітря.

Для розрахунку загасання в атмосфері використаємо:

$$A = \gamma d \quad (5)$$

де A - загальне загасання (дБ); γ - коефіцієнт специфічного загасання (дБ/км), який залежить від частоти сигналу та атмосферних умов; d - довжина шляху сигналу через атмосферу (км).

Коефіцієнт специфічного загасання γ визначається за допомогою врахування поглинання радіохвиль атмосферними газами зображеному на графіку (Рис.1).

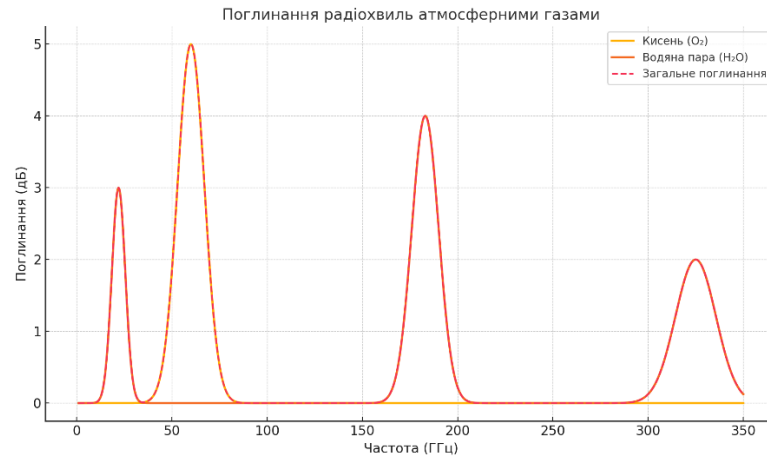


Рис. 1. Залежність коефіцієнта поглинання енергії радіосигналу для кисню та водяної пари від частоти

Залежність коефіцієнта поглинання енергії радіосигналу для кисню та водяної пари від частоти є важливим фактором у сфері бездротового зв'язку, супутникових комунікацій та радіомоніторингу. Поглинання сигналу відбувається через взаємодію електромагнітних хвиль із молекулами газів, що входять до складу атмосфери. Основними компонентами, які впливають на це явище, є кисень та водяна пара.

Кисень має виражені піки поглинання в діапазоні частот від 50 до 70 ГГц, що суттєво впливає на ефективність передачі сигналу в цьому діапазоні. Водночас водяна пара поглинає енергію сигналу на частотах, таких як 22, 183 і 325 ГГц. Величина цього ефекту залежить не тільки від частоти, але й від вологості, температури та тиску повітря.

Сучасні інформаційні технології дозволяють ефективно аналізувати та прогнозувати втрати сигналу, що виникають унаслідок поглинання атмосферою. Геоінформаційні системи використовують дані супутникового моніторингу для визначення рівня вологості та складу атмосфери в різних регіонах. Це дає змогу розраховувати втрати сигналу та коригувати параметри зв'язку для забезпечення його стабільності.

Крім того, застосування машинного навчання та нейронних мереж дозволяє будувати прогностичні моделі, що враховують великі обсяги кліматичних даних та характеристик сигналу. Спеціалізовані програмні комплекси, такі як MATLAB, Ansys HFSS та моделі ITU-R, використовуються для детального моделювання поширення радіохвиль в атмосфері.

Практичне застосування цих технологій дозволяє підвищити ефективність роботи мобільних мереж 5G, супутникового зв'язку, військових комунікацій та інших сфер, де важливе точне прогнозування радіохвильового затухання. Оптимізація частот для бездротових мереж допомагає мінімізувати вплив атмосферних чинників, що значно покращує якість зв'язку. Перспективи подальших досліджень включають використання квантових алгоритмів для ще точнішого моделювання поширення сигналів у складних умовах атмосфери.

2. Структурна доступність:

Оцінка структурної доступності характеризує можливість неспотвореного прийому, демодуляції (декодування) сигналу ДРМ і проведення його аналізу, достатнього для виконання завдань радіомоніторингу.

Загальну доступність системи можна оцінити як:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n U_i R_i}{\sum_{i=1}^n U_i} \quad (6)$$

де K - структурна доступність системи; U_i - важливість (критичність) i -го елемента системи; R_i - надійність i -го елемента (ймовірність безвідмовної роботи); n - загальна кількість елементів в системі.

Структурна доступність відіграє важливу роль у забезпеченні надійного та точного прийому сигналів, особливо в контексті радіомоніторингу та супутникового зв'язку. Вона визначає можливість безперебійного функціонування системи, враховуючи вплив зовнішніх факторів, таких як атмосферні завади, технічний стан приймального обладнання та особливості розповсюдження електромагнітних хвиль у навколишньому середовищі.

Оцінка структурної доступності залежить від надійності окремих компонентів системи та їхньої критичності для виконання основних функцій. Використання інформаційних технологій дозволяє ефективно аналізувати ці аспекти завдяки моделюванню роботи систем у різних умовах. Наприклад, методи комп'ютерного моделювання (Finite Element Analysis, Monte Carlo Simulation) дають змогу оцінити ймовірність відмови та наслідки несправностей окремих вузлів системи.

У сучасних інформаційних системах для розрахунку структурної доступності активно застосовуються алгоритми штучного інтелекту та нейронні мережі. Вони дозволяють виявляти потенційні слабкі місця у структурі системи та прогнозувати можливі відмови на основі історичних даних. Крім того, розвиток супутникових та безпілотних технологій відкриває нові можливості для підвищення структурної доступності. Безпілотні літальні апарати можуть виконувати функції мобільних ретрансляторів сигналу, що підвищує стійкість системи до несприятливих умов середовища.

Супутниковий моніторинг дозволяє в реальному часі аналізувати зміни у спектральному середовищі та адаптивно коригувати роботу приймальних систем. Важливим аспектом у дослідженні структурної доступності є врахування параметрів багатопробеневого розповсюдження сигналу та його загасання через вплив атмосферних явищ. Наприклад, у діапазонах частот вище 10 ГГц значний вплив мають опади, водяна пара та турбулентні процеси в атмосфері. Використання адаптивних алгоритмів корекції сигналу допомагає зменшити ці негативні впливи та забезпечити більш стабільний прийом. Подальші дослідження у сфері структурної доступності можуть бути зосереджені на розробці гібридних систем зв'язку, що поєднують наземні, повітряні та космічні платформи. Це дозволить значно підвищити ефективність роботи радіомоніторингових систем, зменшити ймовірність втрат даних та покращити якість демодуляції сигналів у складних умовах середовища.

3. Інформаційна доступність (I):

Визначається здатністю системи забезпечувати користувачів необхідними даними з належною швидкістю, точністю та надійністю. Це включає можливості передачі, збереження та обробки інформації за різних умов експлуатації.

Інформаційна доступність включатиме ступінь доступу до смислової інформації та пропускну здатність каналу зв'язку, яка визначається за формулою Шеннона-Хартлі:

$$W = F \log_2(1 + q) \quad (7)$$

де W - пропускна здатність (біт/с); F - ширина смуги пропускання (Гц); q - відношення сигнал/шум.

Що стосується ступеня доступу до смислової інформації, то її доцільно розглядати наступним чином:

$$D_i = D_s D_d D_{sem} \quad (8)$$

де D_i - ступінь доступу до смислової інформації; D_s - ймовірність прийому сигналу; D_d - ймовірність правильного декодування; D_{sem} - ймовірність коректної семантичної обробки.

Що стосується *надійності*, то ця характеристика складається з ймовірності безвідмовної роботи $R(t)$, середнього часу безвідмовної роботи L та ймовірності відмови $Q(t)$:

$$R(t) = e^{-\lambda t}; \quad (9)$$

$$L = \frac{1}{\lambda}; \quad (10)$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (11)$$

де λ - інтенсивність відмов (кількість відмов за одиницю часу); t - час роботи.

Розроблена система показників важливості каналів передачі даних систем супутникового зв'язку дозволяє враховувати всі ключові аспекти доступності та інформативності каналів. Зокрема, інтеграція енергетичної доступності з інформаційною складовою забезпечує комплексний підхід до визначення важливості каналів. Для практичного використання пропонується створити експертну систему, яка використовуватиме методи нечіткої логіки для врахування невизначеностей.

Однак, враховуючи динаміку змін кліматичних умов, зокрема збільшення частоти екстремальних погодних явищ, подальший моніторинг температурних режимів та їхніх можливих впливів на самозаймання відходів залишається актуальним завданням. Для цього доцільним є використання сучасних технологій дистанційного зондування та розширення мережі наземних датчиків для більш детального аналізу термічних аномалій у різні пори року.

Враховуючи виявлені температурні залежності на основі даних теплового каналу Landsat-8, можна застосувати математичні моделі для прогнозування ризику самозаймання відходів. Однією з ключових характеристик є оцінка зміни температурного режиму на полігоні у порівнянні з контрольними зонами (наприклад, лісовими масивами та сільськогосподарськими угіддями).

Актуальність цього питання також пов'язана зі збільшенням обсягів твердих побутових відходів, що накопичуються на звалищах та полігонах. За даними екологічних досліджень, процеси біохімічного розкладу органічних складових сміття можуть супроводжуватися виділенням горючих газів, таких як метан, що в поєднанні з високими температурами навколишнього середовища потенційно збільшує ризик займання.

Для запобігання подібним явищам доцільним є розробка інтегрованих систем контролю, які поєднуюватимуть космічний моніторинг, наземні сенсори та штучний інтелект для аналізу отриманих даних. Особливу увагу слід приділити створенню алгоритмів раннього попередження, що базуватимуться на комплексному аналізі температурних даних, рівня вологості, концентрації метану та інших супутніх параметрів.

Крім того, перспективним напрямком є впровадження автоматизованих систем пожежогасіння на основі прогнозованих моделей температурних змін на полігонах ТПВ. Використання таких технологій дозволить значно знизити ризики неконтрольованих загорянь та мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище.

Отримані результати дослідження свідчать про необхідність подальшого вдосконалення методів моніторингу та аналізу температурного режиму на сміттєзвалищах, а також підкреслюють важливість впровадження превентивних заходів для забезпечення екологічної безпеки територій, що прилягають до полігонів ТПВ. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на порівняльний аналіз температурних змін на різних типах сміттєзвалищ та оцінку ефективності впроваджених заходів з управління ризиками займання."

Висновки. Завдання визначення пріоритетності супутникових каналів передачі даних є актуальним і має значний науково-прикладний інтерес. Запропоновану систему показників необхідно враховувати для оцінки важливості каналів передачі даних супутникових систем зв'язку під час радіомоніторингу, враховувати динамічні зміни в умовах реального часу. Інтегруючи всі запропоновані показники в один узагальнений критерій важливості, який можна використовувати для оптимального розподілу ресурсів при здійсненні пошуку та моніторингу супутникових систем зв'язку та створення методики визначення важливості

каналів передачі, базуючись на теорії нечіткої логіки, методах експертного аналізу та оцінки корисності.

Список використаної літератури

1. Pelton, J. *Satellite Communications Systems*. Springer, 4th ed., 2004. – 403 с.
2. Handley, M. "Satellite Integration into the Global Internet." *Journal of Satellite Networking*, vol. 2, no. 3, 2018, pp. 45–65.
3. Машков О.А.; Триснюк В.М.; Мамчур Ю.В.; Жукаускас С.В.; Нігородова С.А.; Курило А.В. Новий підхід до синтезу відновлюючого керування для дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу. Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування: наук.- техн. журн. - Івано-Франківськ : Симфонія форте. - 2019. № 1. (19) 2019. с. – 69-77.
4. Zaitsev S. V. Method of estimating reliability of information transmission in wireless networks channels increase in noise and interference / S. V. Zaitsev // *International Journal «Information Models and Analyses»*. – Sofia : ITHEA, 2015. – Vol. 4 (1). – P. 87 – 99.
5. Zhebka V., Anakhov, P., Tushych, A., Skladannyi, P., Sokolov, V. Evaluation method of the physical compatibility of equipment in a hybrid information transmission network / *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2022, 100(22), p. 6635–6644
6. Zhebka V., Anakhov P., Bondarchuk A., Storchak K., Sablina M. Increasing the Reliability of a Heterogeneous Network using Redundant Means and Determining the Statistical Channel Availability Factor / *CEUR Workshop Proceedings*. 2023, 3421, p. 231–236.
7. V. Trysnyuk, T. Trysnyuk, V. Okhariev, V. Shumeiko, A. Nikitin. Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding *Centrul Universitar Nord Din Bala Mare - UTPRESS ISSN 1582-0548, №1, 2018 C.61-67*.
8. Ліпатов А. О. Основи супутникових телекомунікаційних систем : навч. посіб. / А. О. Ліпатов, М. О. Могильченко, М. О. Коломицев ; під ред. А. О. Ліпатова. – К. : ВІТІ НТУУ «КПІ», 2004. – 220 с.
9. Жебка В.В., Бондарчук А. П. Захист гетерогенної телекомунікаційної мережі від впливу дестабілізуючих факторів / *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2023. – № 1. – С. 4-16.
10. Shevchenko O, Bondarchuk A, Polonevych O, Zhurakovskiy B, Korshun N Methods of the objects identification and recognition research in the networks with the IoT concept support / *CEUR Workshop Proceedings*. 2021, 46-65