

УДК 621.396:681.3:519.6.

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.6.10>

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕДАЧІ ІНФРАЧЕРВОНОГО СИГНАЛУ В СИСТЕМАХ ІМІТАЦІЇ СТРІЛЕЦЬКОГО БОЮ

Сгадов С. О. – старший викладач кафедри комп'ютерних систем та мереж
Національного університету «Запорізька політехніка»
ORCID ID: 0000-0002-7994-6530

Автор досліджує математичні методи моделювання каналів зв'язку, що використовують інфрачервону (ІЧ) технологію, з метою підвищення надійності та ефективності передачі даних у системах *Lasertag*. Інфрачервоні канали зв'язку представляють собою специфічний клас бездротових комунікацій, що знаходять застосування в різних сферах, включаючи системи імітації стрілецького бою. Автор описує основні математичні моделі, такі як модель ідеального каналу, де сигнал повністю збігається з переданим, та модель каналу з адитивним гаусовим білим шумом (AWGN), яка враховує тепловий шум у системах зв'язку. Розглянуті також моделі Релі та Річі для опису умов передачі сигналу з урахуванням наявності прямої видимості (LOS) та без неї. У статті наведені математична модель передачі пакетів у системі *Lasertag* та результати чисельних експериментів, проведених за допомогою гвинтівки з ІЧ-світлодіодом TSAL6100. Експерименти проводилися при різних потужностях модуляції світлодіода для визначення зони впевненого прийому сигналу. Результати показали, що зона впевненого прийому зростає зі збільшенням потужності: при 100 мВт вона становила до 50 метрів, при 200 мВт – до 65 метрів, а при 900 мВт – до 125 метрів. Це свідчить про те, що підвищення потужності модуляції значно покращує якість зв'язку на великих відстанях. Крім того, автор підкреслює важливість врахування зовнішніх перешкод, таких як сонячне світло та флуоресцентні лампи, які можуть погіршити якість зв'язку. У статті також обговорюється вплив кута розходження променів на дальність зв'язку та стійкість до перешкод. Висновки дослідження значно покращують якість зв'язку на великих відстанях. Крім того, автор підкреслює важливість врахування зовнішніх перешкод, таких як сонячне світло та флуоресцентні лампи, які можуть погіршити якість зв'язку. У статті також обговорюється вплив кута розходження променів на дальність зв'язку та стійкість до перешкод. Висновки дослідження значно покращують якість зв'язку на великих відстанях. Крім того, автор підкреслює важливість врахування зовнішніх перешкод, таких як сонячне світло та флуоресцентні лампи, які можуть погіршити якість зв'язку.

Ключові слова: *Lasertag*, математична модель, інфрачервона зв'язь.

Sgadov S. A. Modeling of infrared signal transmission in firearms combat simulation systems

The author investigates mathematical methods for modeling communication channels using infrared (IR) technology to improve the reliability and efficiency of data transmission in military systems. Infrared communication channels are a specific class of wireless communications that find applications in various fields, including small arms fire simulation systems. The author describes the main mathematical models, such as the ideal channel model, where the signal completely coincides with the transmitted one, and the additive Gaussian white noise (AWGN) channel model, which takes into account thermal noise in communication systems. The Rayleigh and Ritchie models are also considered to describe signal transmission conditions with and without line-of-sight (LOS). The article presents a mathematical model of packet transmission in *Lasertag* systems and the results of numerical experiments conducted using a rifle with a TSAL6100 IR LED. The experiments were conducted at different LED modulation powers to determine the zone of reliable signal reception. The results showed that the zone of reliable reception increases with increasing power: at 100 mW it was up to 50 meters, at 200 mW – up to 65 meters, and at 900 mW – up to 125 meters. This indicates that increasing the modulation power significantly improves the quality of communication at long distances. In addition, the author emphasizes the importance of taking into account external interference, such as sunlight and fluorescent lamps, which can degrade the quality of communication. The article also discusses the influence of the angle of divergence of the rays on the communication range and resistance to interference. The conclusions of the study may be useful for further optimization of systems for simulating small-arms combat and improving data transmission technologies in real combat conditions. The use of mathematical models allows not only to improve the efficiency of data transmission, but also to ensure the reliability of communications in hard conditions of simulated combat operations.

Key words: *Lasertag*, mathematical model, infrared communications.

Вступ. Сучасні технології імітації зброї Lasertag відіграють важливу роль у сфері військового та цивільного навчання, забезпечуючи безпеку та ефективність тренувального процесу. Традиційні методи підготовки військовослужбовців та правоохоронних органів часто пов'язані з ризиками, пов'язаними з використанням бойової зброї. Одним із найперспективніших напрямів у цій галузі є використання інфрачервоного випромінювання для розробки систем імітації зброї [1]. Інфрачервоні системи Lasertag дозволяють створювати високоточні симуляції, які відтворюють як механічні, і акустичні характеристики реальної зброї. Математичні методи моделювання каналів зв'язку з використанням інфрачервоної (ІЧ) технології відіграють ключову роль у забезпеченні надійності та ефективності передачі даних. Інфрачервоні канали зв'язку є особливий клас бездротових комунікаційних систем, які використовують інфрачервоне випромінювання передачі інформації. Ці системи знаходять застосування у різних галузях, включаючи локальні мережі, мобільні пристрої та системи автоматизації[2]. Математичне моделювання таких каналів дозволяє досліджувати їх характеристики, передбачати поведінку в різних умовах та оптимізувати параметри для досягнення максимальної продуктивності. Перелічимо основні математичні моделі [3–8].

Модель ідеального каналу. Ідеальний канал являє собою теоретичну модель, в якій сигнал повністю збігається з переданим. У математичному виразі це можна записати як:

$$y(t) = x(t)$$

де $y(t)$ – Прийнятий сигнал, а $x(t)$ – переданий сигнал. Однак у реальних умовах такий ідеальний канал неможливий через різні фактори, такі як шум і згасання сигналу.

Модель каналу з адитивним гаусовим білим шумом (AWGN) є однією з найбільш поширених моделей для оцінки продуктивності систем зв'язку. Вона враховує тепловий шум, що виникає як у передавачі, так і у приймачі. Математично модель AWGN описується так:

$$y(t) = x(t) + n(t)$$

де $n(t)$ – це адитивний білий гауссів шум з нульовим середнім значенням та заданою дисперсією. Ця модель дозволяє аналізувати вплив шуму на якість передачі даних та розраховувати ймовірність помилок.

Моделі багатошляхового згасання (Multipath Fading). У реальних умовах сигнал може досягати приймача через кілька шляхів, що призводить до інтерференції та згасання. Моделі багатошляхового згасання враховують різні затримки та амплітуди сигналів, що надходять з різних напрямків. Тимчасова залежність сигналу може бути описана наступним чином:

$$y(t) = \sum_{i=1}^N a_i x(t - \tau_i) + n(t)$$

де a_i – амплітуда i -го шляху, τ_i – затримка i -го шляху, а N – загальна кількість шляхів.

Модель Рейлі та Річі. Для опису умов передачі з урахуванням наявності прямої видимості (LOS) та без неї використовуються моделі Рейлі та Річі. Модель Рейлі застосовується в умовах відсутності прямої видимості, тоді як модель Річі враховує наявність як LOS, так і NLOS (non-line of sight) шляхів.

Модель Рейлі :

$$y(t) = \sum_{k=1}^K A_k e^{j(\varphi_k + \omega_k t)}$$

де A_k – амплітуда k -го компонента, φ_k – фаза, а ω_k – частота.

Модель Річі включає додатковий компонент LOS:

$$y(t) = A_{LOS}x(t) + \sum_{i=1}^N A_i x(t - \tau_i) + n(t)$$

де A_{LOS} – амплітуда прямого сигналу.

Основні параметри, що впливають на продуктивність інфрачервоного зв'язку, включають як фізичні характеристики обладнання, так і умови навколишнього середовища. Нижче наведено ключові фактори, які визначають ефективність інфрачервоних систем передачі даних.

Спектральний діапазон визначає довжину хвиль, які може виявити інфрачервоний детектор. Різні системи працюють у різних діапазонах, таких як ближній (NIR), середній (MWIR) та довгохвильовий (LWIR) інфрачервоний діапазони. Неправильний вибір діапазону може суттєво знизити дальність та якість зв'язку.

Чутливість детектора визначає його здатність перетворювати інфрачервоне випромінювання в електричний сигнал. Висока чутливість дозволяє краще виявляти слабкі сигнали, що критично для високошвидкісної передачі даних.

Інтенсивність інфрачервоного випромінювання, що генерується передавачем, має бути достатньою для забезпечення надійного зв'язку. Протокол IrDA вимагає певних рівнів інтенсивності випромінювання підтримки якості передачі даних.

Кут розходження променя впливає на дальність зв'язку та стійкість до перешкод. Занадто вузький кут може призвести до втрати сигналу через вібрації або атмосферні умови, в той час як занадто широкий кут може знизити ефективність передачі.

Поле зору (FOV) визначає кут, у якому може ефективно виявляти інфрачервоне випромінювання. Широке поле зору може підвищити можливість успішного виявлення сигналу, особливо в динамічних умовах.

Вплив зовнішніх перешкод. Інфрачервоні системи піддаються впливу зовнішніх джерел світла, таких як сонячне світло та флуоресцентні лампи. Ці перешкоди можуть погіршити якість зв'язку, тому важливо використовувати фільтри та інші методи придушення шумів.

Дальність ефективного зв'язку залежить від багатьох факторів, включаючи потужність передавача, чутливість приймача та умови середовища. При високих швидкостях передачі дальність може скорочуватися. Тому доцільно провести комп'ютерне моделювання залежності кількості прийнятих інформаційних пакетів від відстані при імітації прицільної стрільби в системах імітації бою Lasertag.

Математична модель. У основу математичної моделі покладено те що, що спрацювання ІЧ приймача відбувається, коли яскравість сигналу перевищує $J_{порВт} / \text{м}^2$. Світловий пучок має форму конуса з кутом $2 \cdot \varphi_{св}$ і на відстані L від передавача площа світлової плями буде

$$S_{\Pi} = \pi(L \cdot \text{tg} \varphi_{св})^2.$$

Також слід врахувати, що приймач може бути зміщений від осі світлового пучка на φ_p градусів і повернутий на φ_u . Це станеться в тому випадку, коли, наприклад, прицілювання буде не точним (у тому числі тремтіння стовбура), а ціль трохи повернеться навколо своєї осі. Ці два фактори власними силами можуть призвести до спотворення пакета і навіть переривання передачі. Таким чином, ефективна яскравість передавача на відстані L можна уявити як:

$$J_p = \frac{P_{св}}{\pi(L \cdot g_{св})^2} \cdot \alpha(\varphi_p) \cdot \beta(\varphi_u),$$

де $P_{св}$ – ефективна потужність світлодіода, $\alpha(\varphi_p)$ – коефіцієнт ослаблення випромінювання світлодіода при відхиленні від осі пучка на φ_p (діаграма спрямованості з технічних характеристик світлодіода), $\beta(\varphi_u)$ – коефіцієнт ослаблення чутливості приймача при повороті приймача на φ_u (також береться з технічної документації на приймач).

При моделюванні процесу передачі інформаційного пакета виходитимемо з того, що пакет складається з 4 байт даних і 4 байт коду корекції Ріда-Соломона, що дає змогу виправити до 4 біт даних. Для кожного біта моделюємо умови прийому: вважатимемо, що кути φ_p і φ_u плавно змінюються кожен момент часу зі швидкістю і v_p і v_u відповідно в невеликих межах і тому обчислимо $J_p = J_p(\varphi_p, \varphi_u)$ для кожного моменту передачі біта. Якщо передавалася «1», то необхідно, щоб виконувалася умова $J_p \geq J_{пор}$, інакше біт буде вважатися спотвореним. Наявність більше чотирьох спотворених біт означає, що цей пакет вважатиметься неприйнятним. Таким чином можна порахувати скільки пакетів N було прийнято.

Результати та обговорення. Було проведено низку чисельних експериментів. Умови експерименту такі: гвинтівка оснащена ІЧ світлодіодом TSAL6100 (яскравість 1000мВт при піковому струмі 1А) без фокусувальної лінзи (кут розсіювання 10 градусів) обстрілювала малорухливу мету, забезпечену головними датчиками на основі TSOP572. Здійснювалося по 1000 пострілів на різній відстані та фіксувалася кількість влучень. Потім потужність модуляції світлодіода змінювалася, і серія дослідів повторювалася. Для порівняння проводилися такі ж самі експерименти з фокусувальною лінзою (кут розсіювання 5 градусів). Перша серія експериментів проводилася при потужності 100мВт. Результати наведені на рис. 1. З результатів видно, що зона впевненого прийому становить до 50 метрів, а при вже 75–80 метрах прийом припиняється. Друга серія експериментів проводилася за потужністю 200мВт. Результати наведені на рис. 2. З результатів видно, що зона впевненого прийому становить до 65 метрів, а понад 80 метрів прийом різко погіршується. Третя серія експериментів проводилася за потужністю 900мВт. Результати наведені на рис. 3. З результатів видно, що зона впевненого прийому зросла до 125 метрів, а понад 190 метрів прийом різко погіршується. І на кінець, четверта серія експериментів проводилася за максимальною потужністю 900мВт. Зрозуміло, що це екстремальні умови для світлодіода, і їх не потрібно постійно використовувати, якщо бажано продовжити життя світлодіодові. Результати наведені на рис. 4.

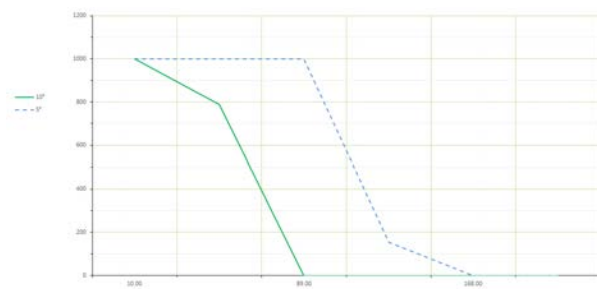


Рис. 1. Графік залежності кількості влучень від відстані при потужності 100 мВт

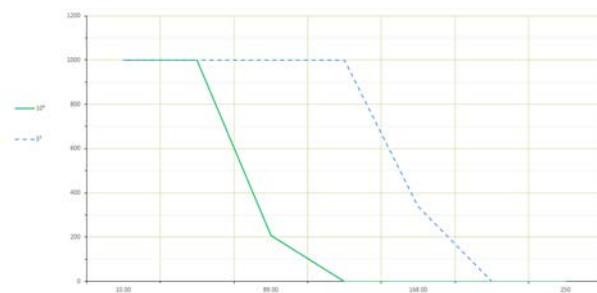


Рис. 2. Графік залежності кількості влучень від відстані при потужності 200 мВт

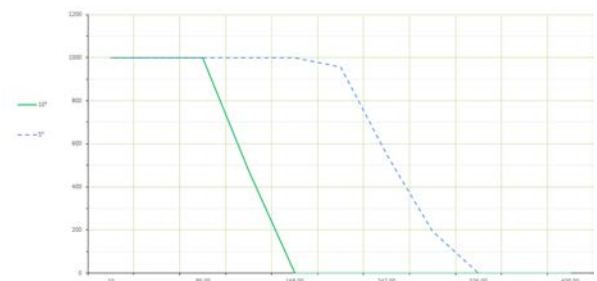


Рис. 3. Графік залежності кількості влучень від відстані при потужності 500 мВт

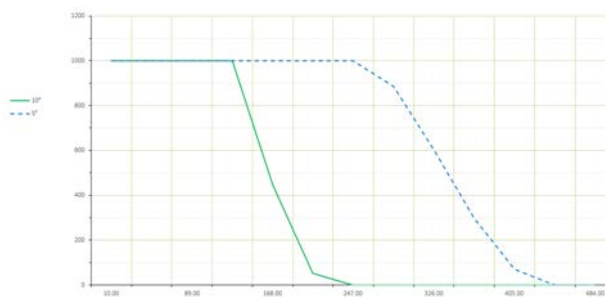


Рис. 4. Графік залежності кількості влучень від відстані при потужності 900 мВт

З результатів видно, що зона впевненого прийому зросла приблизно до 150 метрів, а понад 160 метрів прийом погіршується, але ще можливо влучати у ціль десь на дистанції 200 метрів. Це максимально комфортна дистанція прицілювання – щоб надійно влучати треба ретельно прицілюватися. До речі – більша кількість випадків втрачених пакетів пов'язана як раз з перериванням потоку даних за рахунок тремтіння ствола та рухові цілі. Ще раз наголошуємо, що ці результати були отримані без будь-яких лінз, але це не означає, що ними не варто користуватися – сенс у тому, що світлова пляма від світлодіода може досягати більш 10 метрів на відстані 50 метрів. Лінза з кутом у 2–3 градуси дає пляму дватри метра у діаметрі. Але ж є ще один аспект – це використання лазертага у приміщеннях. Якщо влаштувати дуель у спортзалі, то 10 відсотків може бути забагато за рахунок відбитків променів від стін. Тобто регуляція потужності світлодіода є досить актуальною.

Висновки. Незважаючи на очевидне збільшення дистанції при використанні коліматорних лінз, слід зазначити, що на великій відстані точність прицілювання різко падає. Навпаки, за їх відсутності діаметр пучка неприйнятно зростає до кількох десятків метрів. Виходячи з цього пропонується використовувати фокусуючі лінзи з високою апертурою та помірно підвищення ефективної потужності світлодіода приблизно до 500мВт з обов'язковим використанням широтно-імпульсної модуляції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Multiple Integrated Laser Engagement System (MILES). URL: <https://man.fas.org/dod-101/sys/land/miles.htm>
2. Barker P., Boucouvalas A.C., Vitsas V. Performance modelling of the IrDA infrared wireless communications protocol. *Int. J. Commun. Syst.* 2000. P. 589-604.
3. A physical model of the wireless infrared communication channel [Електронний ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/3234788_A_physical_model_of_the_wireless_infrared_communication_channel
4. A channel model for wireless infrared communication [Електронний ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/3872334_A_channel_model_for_wireless_infrared_communication
5. Mathematical Model and Synthetic Data Generation for Infra-Red Sensors [Електронний ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/23/9458>
6. Optimization and Mathematical Modeling of Communication Networks [Електронний ресурс]. URL: https://www.academia.edu/40804741/OPTIMIZATION_AND_MATHEMATICAL_MODELING_OF_COMMUNICATION_NETWORKS Monograph
7. Communication channel models [Електронний ресурс]. URL: https://eelabs.faculty.unlv.edu/docs/labs/ee460L/ee460L_03_experiment_3.pdf
8. Channel models for wireless systems [Електронний ресурс]. URL: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/channel-model.html>

REFERENCES:

1. Multiple Integrated Laser Engagement System (MILES) [Military Analysis Network] Retrieved from <https://man.fas.org/dod-101/sys/land/miles.htm> [in English].
2. Barker P., Boucouvalas A.C., Vitsas V. Performance modelling of the IrDA infrared wireless communications protocol. *Int. J. Commun. Syst.* 2000. P. 589-604.
3. A physical model of the wireless infrared communication channel. [IEEE Journal on Selected Areas in Communications] *www.researchgate.net*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/3234788_A_physical_model_of_the_wireless_infrared_communication_channel [in English].

4. A channel model for wireless infrared communication. [IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)] *www.researchgate.net*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/3872334_A_channel_model_for_wireless_infrared_communication [in English].

5. Mathematical Model and Synthetic Data Generation for Infra-Red Sensors [MDPI AG]. *www.mdpi.com*. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/23/9458> [in English].

6. Optimization and Mathematical Modeling of Communication Networks [ACADEMIA] *www.academia.edu*. Retrieved from https://www.academia.edu/40804741/OPTIMIZATION_AND_MATHEMATICAL_MODELING_OF_COMMUNICATION_NETWORKS_Monograph [in English].

7. Communication channel models [Electrical and Computer Engineering Labs] *eelabs.faculty.unlv.edu*. Retrieved from eelabs.faculty.unlv.edu/docs/labs/ee460L/ee460L_03_experiment_3.pdf [in English].

8. Channel models for wireless systems [RF Wireless World] Retrieved from <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/channel-model.html> [in English].