

КАРПОВА Л. В.

Хмельницький національний університет

ORCID ID: 0000-0001-5015-2107

e-mail: rtleasya@gmail.com

БОЙКО А. О.

Хмельницький національний університет

e-mail: boykoal222@gmail.com

## ВПЛИВ РОЗМІЩЕННЯ ОДНІЄЇ ТА КІЛЬКОХ АНТЕН НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ C2C

У зв'язку з різноманітністю існуючих і майбутніх бездротових служб кількість антен, встановлених на транспортному засобі, постійно збільшується. Разом з тим, у зв'язку з конструктивними обмеженнями або додаванням більшої кількості компонентів електрообладнання скорочується кількість зручних для використання антенних положень. Для забезпечення стабільних з'єднань з даними або навіть більш високими швидкостями передачі даних з установочними просторами, що залишилися, можливим рішенням є використання декількох антенних систем. У статті розглядаються та оцінюються 16 можливих положень антен для зв'язку між автомобілями (C2C). Структура випромінювання всіх антен визначається методом максимізації потужності синтезу антен, який враховує обмеження реального світу, такі як наявність простору, потужність передачі, кількість та розташування антен. Для порівняння різних налаштувань використовується пропускна спроможність каналу. Ця пропускна здатність розраховується з допомогою віртуальних дисків з урахуванням типових сценаріїв застосування. Результати цього дослідження показують, які положення антен і які комбінації положень антен найбільше підходять для зв'язку між C2C.

**Ключові слова:** антена, SISO, MIMO, автомобіль-автомобіль (C2C), антени для зв'язку між автомобілями (C2C), оптимізація, SVD, SNR, синтез, ефект каньйону, функція кумулятивного розподілу.

LESIA KARPOVA, ANITA BOIKO

Khmelnitskyi National University

## INFLUENCE OF LOCATION OF ONE AND MULTIPLE ANTENNAS ON CAPACITY OF C2C COMMUNICATION SYSTEMS

Due to the variety of existing and future wireless services, the number of antennas installed on a vehicle is constantly increasing. However, due to design limitations or the addition of more components of electrical equipment, the number of user-friendly antenna positions is reduced. To ensure stable data connections or even higher data rates with the remaining installation space, a possible solution is to use multiple antenna systems. This document discusses and evaluates 16 possible positions of antennas for communication between cars (C2C). The radiation pattern of all antennas is determined by the antenna synthesis maximization method, which takes into account real-world limitations such as space availability, transmission power, number and location of antennas. Channel bandwidth is used to compare different settings. This bandwidth is calculated using virtual disks based on typical application scenarios. The results of this study show which antenna positions and which combinations of antenna positions are most suitable for communication between C2C. Additional time and cost constraints, as well as an increase in the range of products for the automotive industry and a large number of degrees of freedom for the multi-purpose antenna necessitate the use of advanced modeling models and design strategies. Thus, this is the starting point for this work. Here is presented and used a technique that allows you to optimize single and multiple antenna systems. The main purpose of the proposed synthesis is to optimize the radiation profiles of antennas based on constraints specific to vehicles. For antenna design, this document identifies different scenarios based on typical C2C security scenarios. The simulation is carried out in a typical worst case in urban and rural areas or on highways.

**Keywords:** antenna, SISO, MIMO, car-to-car antennas (C2C), optimization, SVD, SNR, synthesis, canyon effect, cumulative distribution function.

### Виклад основного матеріалу

Додаткові обмеження щодо часу та витрат, а також збільшення асортименту продукції для автомобільної промисловості та велика кількість ступенів свободи для багатоцільової антени обумовлюють необхідність використання розширених моделей моделювання та стратегій проектування. Таким чином, це є відправною точкою для даної роботи. Тут представлена і використовується методика, яка дозволяє оптимізувати єдину та множинну антенні системи. Основною метою запропонованого синтезу є оптимізація профілів випромінювання антен на основі обмежень, специфічних для транспортних засобів.

Метою роботи є дослідження розташування можливих положень антен для зв'язку між автомобілями (C2C) та вибір найоптимальнішого варіанту, який буде передавати сигнали на різній відстані.

Стаття побудована так: спочатку представлений синтез антен, який заснований на пробовідборі каналів та теорії внутрішньої ємності. Проектування та оцінка антени проводяться шляхом широкого моделювання з використанням удосконаленої та оптимізованої мережі моделювання. Далі поговоримо про підхід, який використовується для оцінки різних систем: вхідний сигнал – вихідний сигнал (SISO) та 2·2 кілька входів – кілька виходів (MIMO) для автомобіль-автомобіль (C2C). Остаточний висновок зроблено в кінці статті.

Основна ідея синтезу полягає в оптимізації антенних систем з інформацією про канали, пов'язані з обсягом. Виходячи з теорії внутрішньої ємності [1], використовуються алгоритми, які дозволяють визначити

оптимізовану характеристику напрямку для каналів часу та середовища [2]. Одна з переваг узагальнюючого підходу полягає в тому, що дозволяє враховувати різні принципи множинної антени [3].

Використання розкладання сингулярних значень (SVD) в розкопці матриці каналу  $H$  і вибірка радіоканалу з використанням антен вибірки. Кількість пробовідбірних антен визначається наявним фізичним простором для остаточної реалізації антени. Матриця каналу  $H$  складається з елементів  $h_{m,n}$ , які є комплексними коефіцієнтами передачі зв'язків між антеною відбору проб  $m$  вибіркова антена  $T_x$  і  $n$  вибіркова антена  $R_x$ . Ці коефіцієнти передачі можуть бути отримані шляхом вимірювання або моделювання.

З так званих матриць SVD  $U$  і  $V$  результат, що визначає розподіл сигналів (кожного підканалу) на передаючих та приймаючих антенах відбору проб. У типових сценаріях розповсюдження потужність підканалу  $\lambda_i$  зменшується зі збільшенням  $i$ . Тому, використовуючи лише перші кілька потужних субканалів, ці імпульси формування променя можуть бути використані для синтезу випромінювання, яке фокусується лише у відповідних напрямках. Таким чином, зусилля антени може бути використане для збільшення відношення сигналу до шуму (SNR) на приймачі та/або зменшення перешкод шляхом усунення певних напрямів передачі або прийому.

Що стосується зразків ідеальних джерел поля, то отримані схеми формування показують, яка спрямованість і форма випромінювання може бути фізично реалізована обсягом, який може бути використаний для конструкції антени. Оскільки канал змінюється з часом, для кожного каналу реалізації в часі, різні структури променевого випромінювання. Таким чином, ідея, що лежить в основі конструкції антен максимізації потужності, полягає в тому, щоб досліджувати, чи є усереднена модель синтезованого випромінювання всіх каналів більш ефективною, ніж, наприклад, всепрямовані антени (без синтезу). Засідання, що застосовується, засноване на усередненні векторів стовпців всіх використовуваних знімків. Докладніша інформація з цього питання міститься в [3]. В якості входу в алгоритм синтезу, крім сценарію, використовується інформація про антену, що розробляється. Це, наприклад, розмір апертури, поляризація, кількість входів та виходів антени та можливе розташування антени. З імітатором каналу визначають (обмежену за обсягом) каналну матрицю  $H$  і за допомогою SVD задають вектори збудження окремих підканалів реалізації кожного каналу. На заключному етапі використовується усереднення для розгляду варіантів поведінки у часі та навколишньому середовищі.

Для проектування антен у цьому документі визначено різні сценарії, що базуються на типових сценаріях використання C2C з точки зору безпеки [5]. Моделювання проводиться у типовому найгіршому випадку у міських та сільських районах або на автомагістралях. У районі, де знаходиться об'єкт дорожнього руху, щодо якого ведеться розслідування, поблизу зустрічаються різні об'єкти, включаючи автомобілі, що рухаються, припарковані автомобілі, будівлі, дорожні знаки і рослинність. На рис. 1 показаний один зі сценаріїв, а в таблиці 1 перераховані сценарії, прийняті до уваги для цілей узагальнення. Цим дає час моделювання, а NCR – кількість змодельованих знімків.

Оскільки для синтезу потрібен точний тривимірний опис багатоканального каналу, для обчислення поширення хвиль у сценаріях, що детерміновано генеруються, використовується алгоритм променевого відстеження [5]. Результати застосування алгоритмів були перевірені за допомогою вимірювань у різних сценаріях та показали, що вони забезпечують дуже високу точність [6].

Таблиця 1

Сценарії, що прийняті до уваги для розгляду цілей

№	Сценарій	Середовище	$T_{sim}$	$N_{cr}$
1-4	перехрестя	місто	5	125
5	швидка допомога	місто	10	250
6	т-перехрестя	місто	5	125
7	обгін	село	5	125
8	перехрестя	село	5	125
9	затор	автомагістраль	10	250
10	під'їзд	автомагістраль	5	125
11	висока швидкість	автомагістраль	2	200



Рис. 1. Приклад сценарію міського перехрестя

На рис. 2 показано всі 16 точок, які враховуються при синтезі антен у цьому документі, а також деякі обмеження, такі як зона видимості (визначається кузовом автомобіля) та конфігурації вибірки, евристично обрані для кожної позиції.

Ці положення антен вибираються з урахуванням можливості використання простору та положення поточної антени, які зазвичай використовуються. Виходячи з конкретних місць розташування, існують обмеження на фізичні розміри кінцевих результатів антени, які повинні відбиратися для синтезу антени. Для місць розташування (A1, A2, A3, A6, A7, A8, A11, A12, A13, A14, A15 і A16) може використовуватися планарна структура, розмір евристично визначається як  $\lambda \cdot \lambda$ . Для позицій (A4, A5 і A9, A10) передбачається тривимірна структура з апертурою  $\lambda \cdot \lambda/2 \cdot \lambda$ , або  $\lambda \cdot \lambda \cdot \lambda/2$ . Береться роздільна здатність  $\lambda/2 = 2$ , 54 см. Щоб забезпечити якомога більше ступенів свободи, вибірка виконується з повною поляриметриєю та з ідеальними джерелами поля (ідеальні ізотропні антени).

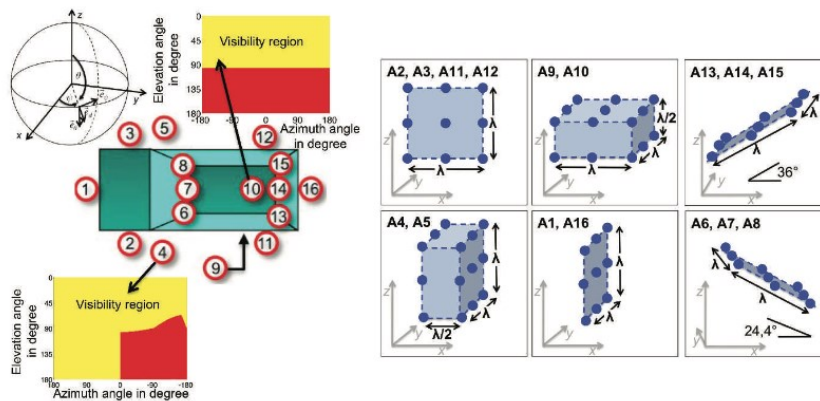


Рис. 2. Позначені положення та обмеження антен, такі, як область обсягу вибірки та видимості, визначена для окремих місць, x – напрямок руху

У наведеному реєстрі перераховані всі параметри, що використовуються для синтезу. Загальним рішенням для передавача і приймача є детермінування, щоб передавач і приймач могли використовувати ту саму антену(и).

Рівень шуму дорівнює  $-104$  дБм, розрахований за допомогою  $kT B$ , де  $k$  є константою Больцмана, температура  $T = 293$  К та смуга пропускання  $B$  10 МГц.

Для розрахунку пропускної спроможності використовується EIRP 33 дБм [5].

Якщо за передавача є кілька антен, то енергія рівномірно розподіляється між усіма антенами.

Для оцінки всіх положень антени аналізується функція кумулятивного розподілу (СГО) пропускної спроможності  $C$ . Пропускна спроможність розраховується за формулою:

$$C = \log_2 \det \left( I + \frac{P_{Tx} - G_{\max}}{M\sigma^2} HH \right) \tag{1}$$

де  $P_{Tx} - G_{\max}$  – потужність передачі 33 дБм, скоригована за максимальним збільшенням антени  $G_{\max}$  (напрямок) для виконання обмежень EIRP.  $M$  – кількість передавальних антен і  $\sigma^2$  – дисперсія шуму. Для зв'язку С2С важлива не найвища досяжна потужність. Швидше, інтерес представляє потенціал, який може бути реалізований у більшості випадків у нижній частині CDF.

**А. Розміщення однієї антени.** На рис. 4 узагальнено результати синтезу системи SISO. CDF для всіх положень антен показані з номенклатурою, що йде за номенклатурою на рис. 3.

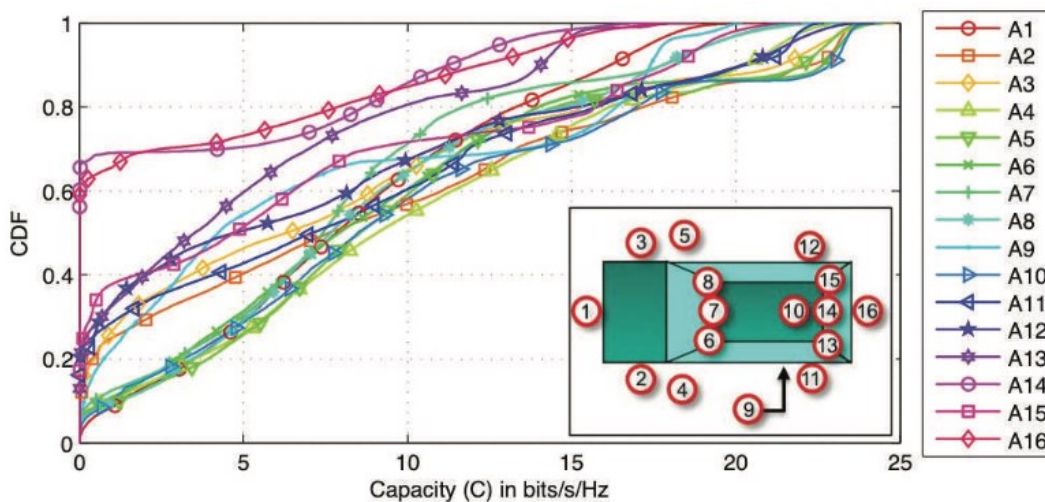


Рис. 3. CDF всіх розглянутих місць розташування антен для синтезу системи SISO

Як зазначалося, нижня частина CDF представляє особливий інтерес для справжньої оцінки. Таким чином, всі розташування антен можна розділити на три групи. У місцях із найгіршими результатами (у 15-му) зона видимості обмежена (автомобілем) задньою стороною транспортного засобу (A14 та A16). Наступна найкраща група включає всі позиції антен, які розташовані на бічній позиції (A2, A3, A11 та A12), під автомобілем (A9) або на D-стовпі (A13 та A15). Крайні робочі антенні позиції мають зону видимості, що перекриває напрямок руху бічних дзеркал (A4, A5), розташування антени даху (A10) і опори А (A6, A8) і лобового скла (A7).

На рис. 4 показані схеми синтезованого випромінювання положення антени (A1, A4, A5, A8 і A10). Моделі обмежені областю видимості, яка залежить від кузова автомобіля та розташування антени.

Наприклад, зона видимості антени даху обмежена лише верхньою півкулею ( $\theta < 95^\circ$ ). Система координат, що використовується, показана на рис. 3.

Спрямованість розраховується шляхом інтегрування у всій сфері. Дивно, що всі напрямки далекого світла фокусуються на напрямі руху.

Основною площиною взаємодії є азимут. Дослідження кутових статечних спектрів (APS) показує, що існує лише невелика область навколо ( $\theta = 90^\circ$ ), яка має відношення до висоти. Тому в азимутну площину доцільно помістити максимально можливе збільшення антени. Вивчення у площині азимуту показує, що у зв'язку із C2C часто спостерігається так званий ефект каньйону. Це означає, що вулиця оточена, наприклад, будинками, які діють як хвилеводи. У тому випадку, якщо відстань між транспортним засобом Rx і Tx велика, більшість багатоступінчастих компонентів прибувають (або йдуть) у напрямку руху або проти нього. Таким чином, особливо у випадках, коли антенні системи не мають прямої видимості, вони виграють, якщо напрямок променя далекого світла охоплює ці напрямки.

**В. Розміщення кількох антен.** У нижче наведених 2 системах вивчаються дві системи, що складаються з різних комбінацій 16 розглянутих місць розташування антен на транспортному засобі. З метою обмеження кількості кортежів враховуються часові характеристики конкретного розташування. Для кожної комбінації (кожної пари) визначається, яким чином із десяти пропускна здатність опускається нижче за певний поріг. На рис. 5 показано, що для евристично визначеного порогового значення 3 біта/с/Гц.

Таким чином, можна визначити положення антени, яке не фіксується у слабких каналах передачі. У міру зміни радіації беруться зразки із синтезованих систем SISO.

На рис. 6 представлені 8 комбінацій (A1×A2, A1×A4, A1×A5, A1×A8, A1×A10, A4×A5, A4×A7 та A4×A10), які будуть розглянуті докладніше. На рис. 6 показані результати восьми розглянутих комбінацій.

З високих просторів антенних елементів виходять незв'язані канали. Саме з цієї причини порівняно із системами SISO використання двох різних точок свідчить про значне збільшення пропускної спроможності. Серед розглянутих пар антен найбільш ефективними є комбінації A1×A4, A1×A5 та A4×A10.

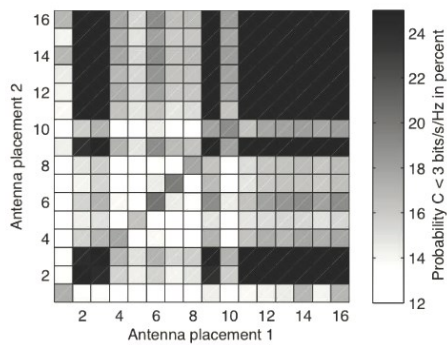


Рис. 5. Встановлений відсоток для випадку, коли обидва антенних положення опускаються нижче порогового значення 3 біта/с/Гц одночасно

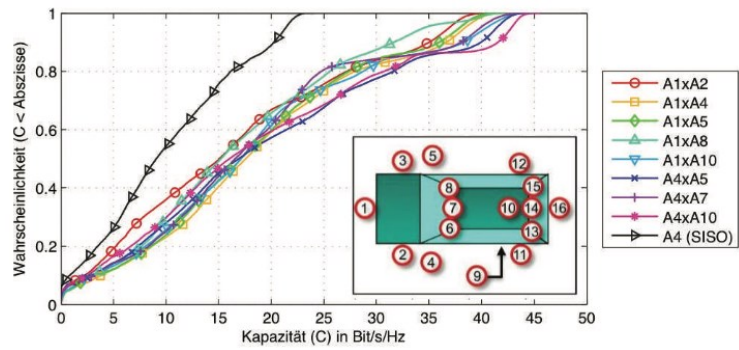


Рис. 6. Зіставлення пропускної спроможності 2-2 комбінацій 16 обмежених антенних ділянок

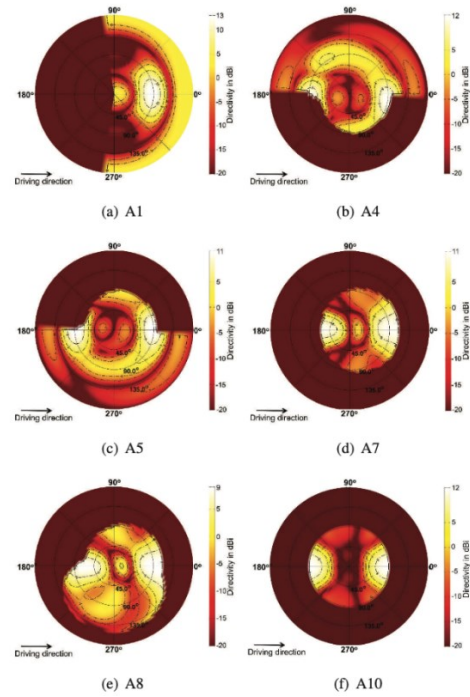


Рис. 4. Синтезований характер випромінювання для шести різних точок розташування антен

**Висновки**

Методика проектування антени, звана синтезом антен, використовується для проектування одиничних та множинних антенних систем зв'язку C2C. Основна увага приділялася відповідним сценаріям безпеки дорожнього руху, в яких C2C може використовуватися для виявлення та запобігання потенційним небезпекам. Зокрема, у таких сценаріях застосування виникає питання про те, які антенні положення та які види випромінювання слід використовувати. Було вивчено 16 антенних позицій, що мають особливе значення для автомобільної промисловості, з урахуванням конкретних конструктивних обмежень, пов'язаних з розташуванням. На основі цієї оцінки було зроблено наступний висновок: аналіз показує, що особливо слабких каналів виникає так званий ефект каньйону. Таким чином, найрізноманітніші складові-континенти прибувають або йдуть у напрямку руху. Таким чином, синтез визначає ці напрямки як найважливіші. Таким чином, посилення антени може бути використане (з боку приймача) для збільшення відношення сигналу шуму в системі SISO. При оцінці розташування антени, які можуть охоплювати цей напрямок, мають найбільшу пропускну здатність. Ці позиції – дах, бічні дзеркала, передній екран та А-стовп.

Використання двох різних антенних точок з великим просторовим поділом призводить до значного збільшення пропускної спроможності. Якщо мета конструкції системи полягає у підвищенні надійності, то рекомендується поєднувати розташування антен з додатковими хорошими та поганими каналами передачі. У цьому дослідженні комбінація антени всередині переднього бампера з антеною в лівому або правому бічному дзеркалі досягла найвищої ємності в більшості каналів, що розглядаються.

### Література

1. Wallace J. W., Jensen M. A. Intrinsic capacity of the MIMO wireless channel. Proc. IEEE Veh. Techn. Conf., VTC 2002-Fall, 2002, pp. 701–705.
2. Pontes J., Reichardt L. and Zwick T. IEEE 802.11p Based Physical Layer Simulator for Car-to-Car Communication. EuCAP 2011, 11-15 April 2011, pp. 2876–2880.
3. Lee T., Wang Y. Maximized Capacity of Coupled Antennas Based on Multipolar Radiations. IEEE Radio and Wireless Symposium, 2007, pp. 99–101.
4. Reichardt L., Pontes J., Jereczek G. and Zwick T. Capacity Maximizing MIMO Antenna Design for Car-to-Car Communication. accepted for publication in Proc. IEEE Inter. Workshop on Antenna Technology IWAT March 2011, pp. 243–246.
5. Suvikunnas P., Salo J., Vuokko L., Kivinen J., Sulonen K., and Vainikainen P. Comparison of MIMO Antenna Configurations: Methods and Experimental Results. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 57:1021-1031, 2008
6. Boiko J., Pyatin I., Karpova L., Eromenko O. Study of the Influence of Changing Signal Propagation Conditions in the Communication Channel on Bit Error Rate. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies this link is disabled, 2021, 69, p. 79–103.
7. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=36104263900> Boiko J., Karpova L., Eromenko O., Havrylko Y. Evaluation of phase-frequency instability when processing complex radar signals. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2020, 10(4), p. 4226–4236.
8. Банков С.Е. Электродинамическое моделирование антенных и СВЧ структур с помощью FEKO / Банков С.Е., Грибанов А.Н., Курушин А.А. – М. : OneBook, 2013. – 412 с.

### References

1. Wallace J. W., Jensen M. A. Intrinsic capacity of the MIMO wireless channel. Proc. IEEE Veh. Techn. Conf., VTC 2002-Fall, 2002, pp. 701–705.
2. Pontes J., Reichardt L. and Zwick T. IEEE 802.11p Based Physical Layer Simulator for Car-to-Car Communication. EuCAP 2011, 11-15 April 2011, pp. 2876–2880.
3. Lee T., Wang Y. Maximized Capacity of Coupled Antennas Based on Multipolar Radiations. IEEE Radio and Wireless Symposium, 2007, pp. 99–101.
4. Reichardt L., Pontes J., Jereczek G. and Zwick T. Capacity Maximizing MIMO Antenna Design for Car-to-Car Communication. accepted for publication in Proc. IEEE Inter. Workshop on Antenna Technology IWAT March 2011, pp. 243–246.
5. Suvikunnas P., Salo J., Vuokko L., Kivinen J., Sulonen K., and Vainikainen P. Comparison of MIMO Antenna Configurations: Methods and Experimental Results. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 57:1021-1031, 2008
6. Boiko J., Pyatin I., Karpova L., Eromenko O. Study of the Influence of Changing Signal Propagation Conditions in the Communication Channel on Bit Error Rate. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies this link is disabled, 2021, 69, p. 79–103.
7. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=36104263900> Boiko J., Karpova L., Eromenko O., Havrylko Y. Evaluation of phase-frequency instability when processing complex radar signals. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2020, 10(4), p. 4226–4236.
8. Bankov S.E. Elektrodinamicheskoe modelirovanie antenyh i SVCh struktur s pomoshyu FEKO / Bankov S.E., Gribanov A.N., Kurushin A.A. – M. : OneBook, 2013. – 412 s.

Рецензія/Peer review : 14.11.2021

Надрукована/Printed : 30.12.2021