

DOI

УДК 621.396.946

ІННОВАЦІЙНЕ РІШЕННЯ ДЛЯ LEO-СИСТЕМИ З АРХІТЕКТУРОЮ «РОЗПОДІЛЕНОГО СУПУТНИКА»

Сайко Володимир¹
orcid.org/0000-0002-3059-6787

Наритник Теодор²
orcid.org/0000-0002-4118-0226

Гладких Валерій³
orcid.org/0000-0002-5868-9504

Сивкова Наталія⁴
orcid.org/0000-0002-4934-4109

¹ 02224, м. Київ, Україна, вул. Бальзака, 4, кв. 283, E-mail: vgsaiko@gmail.com

² 03170, м. Київ, Україна, вул. Зодчих, 62-Б, кв.93, E-mail: director@mitris.com

³ 65029, м. Одеса, Україна, вул. Кузнечна, 1, E-mail: informatics.onas@gmail.com

⁴02166, м. Київ, Україна, вул. Міллотенка 23, кв. 192, E-mail: onazkafedratk@gmail.com

Історія статті:

Надійшла до редакції 19.02.2020

Прийнято 01.03.2020

Ключові слова:

лінії терагерцового діапазону;
розподілений супутник;
низькоорбітальні супутникові
системи;

Інтернет речей;
хмарні технології;
тумані обчислення;
граничні обчислення

Анотація: Запропоновано інноваційне рішення для практичної реалізації у LEO- системі з архітектурою «розподіленого супутника», яке може бути використано для забезпечення зв'язку низькоорбітальних космічних апаратів з наземними станціями та користувачами супутникових послуг 5G/ІoT. Суть запропонованої розробки в системі низькоорбітального супутникового зв'язку із FC-архітектурою, полягає в тому, що для зменшення затримки при передачі сигналів споживачам та ймовірності перевантаження мережі в перспективну систему низькоорбітального супутникового зв'язку, яка містить штучні супутники Землі, кожен з яких функціонує на навколосемній орбіті і оснащений бортовими ретрансляторами, міжсупутниковий зв'язок, мережу наземних станцій зв'язку і управління штучними супутниками Землі, угруповання низькоорбітальних космічних апаратів (LEO-система), яке включає угруповання кореневих (ведучих) супутників та супутників-ретрансляторів (ведених), навколо кожного кореневого супутника формується мікро-угруповання супутників-ретрансляторів, а функції кореневого супутника в обраній фазовій точці орбітальної площини робочої орбіти виконують міні-або мікро-супутники, які пов'язані в кільцеву мережу лініями зв'язку між супутниками, а - функції супутників-ретрансляторів – кубсати, новим є введення багаторівневої системи граничних хмар, яка представляє собою гетерогенну розподілену обчислювальну хмарну структуру. При цьому граничні хмари багаторівневої системи з'єднані за допомогою надвисокошвидкісних бездротових ліній радіозв'язку терагерцового діапазону та бездротових оптичних систем зв'язку. Наведена методика оцінки часу доступу в запропонованій структурі «туманних обчисленнях» на основі моделі доступу в «туманних обчисленнях» з дозволом колізій джерел даних, що реалізують режим опитування.

Abstract: An innovative solution for practical implementation in a LEO system with a "distributed satellite" architecture that can be used to provide low-orbital spacecraft communications with ground stations and users of 5G / IoT satellite services is proposed. The essence of the proposed development in the system of low-orbital satellite communication with FC-architecture is that to reduce the delay in signaling to consumers and the probability of overloading the network into a prospective system of low-orbital satellite communication, which contains artificial Earth satellites, each of which functions in Earth orbit and equipped with onboard repeaters, inter-satellite communications, a network of ground-based communication and control systems for artificial satellites of the Earth, a grouping of low-orbiting space their devices (LEO-system), which includes the grouping of root (leading) satellites and satellites-repeaters (slave), around each root satellite is formed micro-grouping of satellites-repeaters, and functions of the root satellite in the selected orbital phase of the orbital -or micro-satellites that are connected to the annular network by communication lines between satellites, and - functions of satellites-repeaters - kubsat, new is the introduction of a multilevel boundary cloud system, which is a heterogeneity

well distributed computing cloud structure. At the same time, the boundary clouds of the multilevel system are connected by ultra-high-speed wireless terahertz radio lines and wireless optical communication systems. The technique of estimation of access time in the proposed structure of "fog computing" on the basis of the model of access in "fog computing" with the resolution of collisions of data sources implementing the survey mode is presented.

1. ВСТУП

Бурхливий розвиток і стандартизація наземної частини мереж 5G/IMT-2020, а також обмеження для глобального покриття бездротовими стільниковими мережами при використанні міліметрового та субтерагерцового діапазонів хвиль змушують розробників мереж супутникових телекомунікацій звертати увагу і на цей сегмент ринку мобільного супутникового зв'язку [1-2]. Концепція застосування супутникового сегмента 5G, що розглядається сьогодні, заснована на таких передумовах [3]:

- супутниковий сегмент буде інтегруватися з іншими мережами мобільного та фіксованого зв'язку, а не будуть автономною мережею і інтеграція супутникового і наземного сегмента 5G є ядром цього;

- системи космічного зв'язку є фундаментальними компонентами для надійного надання послуг 5G не тільки на території всієї Європи, а й у всіх регіонах світу, весь час і за доступною ціною;

- супутниковий сегмент буде сприяти характеристикам глобальності, збільшення можливостей послуг 5G і вирішення проблем, пов'язаних з підтримкою зростання мультимедійного трафіку, повсюдного покриття, між машинного зв'язку і критично важливих телекомунікаційних місій при оптимізації вартості послуг для кінцевих користувачів;

- космічний сегмент може стати частиною гібридної конфігурації мережі, що складається з поєднання ширококомовної і ширококугової інфраструктур, керованих таким чином, щоб вони забезпечували безперебійну і негайну конвергенцію послуг 5G для всіх кінцевих користувачів.

Вимоги до супутникового сегменту мережі п'ятого покоління будуть визначатися насамперед сукупністю послуг, що надаються мережами 5G, які об'єднані трьома основними бізнес-моделями: розширений мобільний ширококуговий доступ (Enhanced mobile broadband - eMBB), масове з'єднання пристроїв машинного типу (Massive Machine - Type Communications - mMTC) і вкрай надійний зв'язок з низьким рівнем затримки (uRLLC - ultra-Reliable Low Latency Communications) [4-5]. Супутникові системи зв'язку відомі своєю надійністю і можливістю забезпечувати вимоги щодо затримок сигналів в мережі. Затримка сигналів при використанні геостационарних космічних апаратів (КА) буде прийнятною для

багатьох додатків мереж 5G. Більш чутливі до затримок програми можуть підтримуватися за допомогою нових низькоорбітальних супутникових мереж, які будуть розгорнуті в майбутньому.

Аналіз пропозицій і технологічних проектів провідних виробників по використанню супутникових мереж для розширення можливостей мереж 5G показує [5-6], що багато телекомунікаційних компаній вже зробили спроби презентації своїх проектів, придатних для розгортання супутникового сегмента. Але недоліком відомих технічних рішень є:

- складність реалізації ресурсу різних супутникових систем;
- суттєве підвищення вартості за рахунок використання значної кількості супутників;
- постійної потреби у визначенні взаємної дислокації супутників низькоорбітальних космічних апаратів.

При цьому розширення території обслуговування із прийнятною імовірністю необхідної якості передачі суттєво зменшується оскільки в каналі передачі використовують супутники, які постійно рухаються відносно геостационарного супутника із значною швидкістю і на значних відрізках території. Таким чином, на даний час існує багато проектів, ідей, планів по реалізації і впровадженню нових систем, але зараз вони «малоефективні» тому не існує точної впевненості в практичній реалізації і довговічності роботи систем. Наприклад, у LEO-HTS вже зараз існують серйозні побоювання щодо спільного використання спектра з існуючими мережами і внаслідок виникнення частотних завад.

2. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

З даної точки зору для реалізації нових послуг становить інтерес розроблене авторами технічне рішення [7], в якому система низькоорбітального супутникового зв'язку, представляє угруповання низькоорбітальних космічних апаратів (LEO-система) з архітектурою "розподіленого супутника", та яка включає угруповання кореневих (ведучих) супутників та супутників-ретрансляторів (ведених). Навколо кожного кореневого супутника формується мікро-угруповання супутників-ретрансляторів, яке називається «розподілений супутник». Функції кореневого супутника в обраній фазовій точці

орбітальної площині робочої орбіти виконують міні-або мікро-спутники, а функції супутників-ретрансляторів – кубсати. Кореневі супутники пов'язані між собою в кільцеву мережу високошвидкісними лініями зв'язку між супутниками. Геометричний розмір «розподіленого супутника» - область навколо кореневого супутника радіусом приблизно 1 км. Це означає, що кубсати здійснюють груповий політ на відстані не більше 1 км від кореневого супутника. Космічний сегмент LEO-системи складається з декількох орбітальних площин, що мають однакову кількість розподілених супутників, однакою спосіб, і відрізняються довготою висхідного вузла. У кожній орбітальній площині розподілені супутники рівномірно розміщені з однаковою відносною істинною аномалією при цьому кожен розподілений супутник пов'язаний з двома сусідніми розподіленими супутниками в своїй орбітальній площині і з двома найближчими розподіленими супутниками в двох сусідніх орбітальних площинах - по одному в кожній.

Архітектура «розподіленого супутника» дозволяє проводити вимірювання параметрів орбітального руху кубсата на базі вимірювань їх взаємного розташування. В результаті можливо підвищити ефективність використання кубсатів, відключивши частину обладнання, необхідного для вимірювання параметрів. До складу корисного навантаження супутників-ретрансляторів включені SDR-модулі (програмно-конфігуровані модулі), призначені для функціонування і обробки транспортних потоків для передачі і прийому інформації. Для забезпечення зв'язку всередині «розподіленого супутника» використовується бездротова мережа.

Недоліком відомого рішення є те, що у ньому не визначена архітектура міжсупутникового каналу зв'язку, що не дозволяє оцінити його технічні характеристики та відповідно технічні можливості системи низькоорбітального супутникового радіозв'язку для надання якісних послуг в інтегрованих мережах зв'язку 5G та IoT. Крім того, для реалізації в космічному сегменті LEO- системи FC-архітектури в склад «розподіленого супутника» включений окремий супутник-обчислювач, завданням якого є виконання необхідних обчислень для забезпечення функціонування обслуговування пристроїв IoT в межах зони обслуговування "розподіленого супутника". Таке рішення не забезпечує гнучкість та високу надійність системи при перевантаженнях мережі та при виході з ладу окремого супутника-обчислювача. Задачею запропонованого нового рішення є удосконалення системи низькоорбітального супутникового зв'язку шляхом:

1. Реалізації міжсупутникового зв'язку на основі радіоканалу, створеного в терагерцовому 140 ГГц діапазоні.

2. Зменшення затримки при передачі сигналів споживачам.

3. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

3.1 ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ІННОВАЦІЙНОГО РІШЕННЯ

Поставлена задача вирішується тим, що в систему низькоорбітального супутникового зв'язку додатково введено багаторівневу систему граничних хмар, що представляє собою гетерогенну розподілену обчислювальну хмарну структуру. При цьому, автори виходили з того, що таку запропоновану систему можна розглядати як тришарову систему, засновану на структурі мережі 5G/IMT2020, запропонованої NGMN [8]. У цій структурі розділені апаратне і програмне забезпечення, а для сумісності послуг на рівні додатків використовуються інтерфейси прикладного програмування (API).

Ідея нового підходу до побудови багаторівневої хмарної системи для низькоорбітальних супутникових мереж зв'язку полягає в тому, що зони обслуговування окремих супутників-ретрансляторів з'єднуються з піко хмарами з досить невеликими обчислювальними можливостями для виконання граничних обчислень. Ці піко хмари з'єднуються з макро хмарами, які в свою чергу, поєднуються з окремими супутниками-ретрансляторів і мають великі обчислювальні можливості. Крім того, кожен супутник-ретранслятор з'єднується за допомогою радіоліній терагерцового діапазону з мікро хмарию з можливості яких обмежені. Ядро «розподіленого супутника» (кореневий супутник) забезпечує взаємодію мікро хмар в системі в цілому. Запропонована система зменшує затримку при передачі сигналів споживачам і ймовірність перевантаження мережі, одночасно збільшуючи гнучкість її побудови і доступність.

Сутність запропонованого рішення пояснюється блок схемою, де зображена схема реалізації запропонованої системи низькоорбітальної системи супутникового зв'язку мережі 5G/IoT (рис.1).

На ньому позначені:

1 – Кореневий супутник.

2,3,4,5 – Супутники-ретранслятори.

6 – Фідерні лінії.

7 – Зона обслуговування системи супутникового зв'язку.

8 – Піко хмара хмарної структури.

9 – Мікро хмара хмарної структури.

10 – Макро хмара хмарної структури.

11 – Головна хмара хмарної структури.

12 – Міжсупутникова лінія передачі.

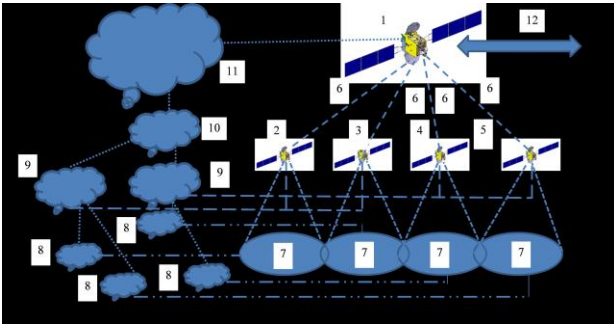


Рис. 1 - Блок-схема реалізації запропонованої системи низькоорбітальної системи супутникового зв'язку мережі 5G/IoT

Схема функціонування «розподіленого супутника» в складі низькоорбітальної системи супутникового зв'язку мережі 5G/IoT працює наступним чином.

Інформаційним та інтелектуальним ядром розподіленого супутника є кореневий супутник 1 (див. блок-схему). Супутники-ретранслятори 2,3,4,5 розподіленого супутника формують промінь / промені користувачів з обмеженою зоною обслуговування. Сукупність променів, які формуються супутниками-ретрансляторами, складають зону обслуговування 7 LEO-системи. Вимоги щодо інтегральної зони обслуговування LEO-системи (географічна зона обслуговування) визначають вимоги до кількості розподілених супутників в системі в цілому.

Фідерні лінії 6 забезпечують з'єднання кореневого супутника з супутниками-ретрансляторами та призначені для передачі транспортного цифрового потоку відповідного формату до кінцевих користувачів. Фідерна лінія 6 між кореневим супутником і супутником - ретранслятором є внутрішньою лінією зв'язку між супутниками в складі розподіленого супутника. Ця лінія - комбінована радіолінія, яка забезпечує дуплексну передачу інформації, вимір похилої дальності і взаємного кутового положення між кореневим супутником 1 і супутниками-ретрансляторами 2,3,4,5.

Розподілені супутники в LEO-системі пов'язані між собою міжсупутниковими лініями 12 терагерцового зв'язку, які формують магістральну мережу LEO - системи. Кожен розподілений супутник пов'язаний з двома сусідніми розподіленими супутниками в своїй орбітальній площині і з двома найближчими розподіленими супутниками в двох сусідніх орбітальних площинах - по одному в кожній з них. У складі розподіленого супутника функції підтримки лінії зв'язку між супутниками покладені на кореневий супутник 1 який оснащений модулями фідерних ліній 6 та

відповідними високочастотними приймально-передавальними супутниками-ретрансляторами.

Запропонована багаторівнева система для низькоорбітальної супутникової системи радіозв'язку мережі 5G/IoT являє собою розвиток систем хмарних обчислень для мереж зв'язку від централізованої системи до гетерогенної розподіленої системи.

Особливістю запропонованої системи, яка містить чотири рівні хмар 8-11, є те, що хмари з'єднані за допомогою надвисокошвидкісних бездротових ліній радіозв'язку терагерцового діапазону. Така побудова передбачає і використання бездротових оптичних систем зв'язку, які є однією з найважливіших особливостей майбутніх мереж 5G. При цьому відстань між призначеним для користувача обладнанням і найближчою хмарою в мережі становить всього один бездротовий перехід. Це дозволяє забезпечити зменшення затримки передачі даних та ймовірність перевантаження в мережі, збільшити доступність мережі та поліпшити безпеку, оскільки додатки надаються користувачам всередині мережі.

3.2 Методика оцінки часу доступу у запропонованій структурі в «туманних обчисленнях».

Вивантаження даних від користувача на рівень хмари у запропонованому рішенні включає в себе три складових затримки: затримку по висхідним і спадним лініях, затримку поширення і затримку обробки інформації.

Для оцінки часу доступу в «туманних обчисленнях» пропонується модель доступу в них з дозволом колізій джерел даних, що реалізують режим опитування. В системі з режимом опитування є центральний вузол (маршрутизатор, шлюз або сервер) і деяка кількість джерел даних, яка в силу динамічних змін заздалегідь «невідомо» вузлу. Джерела даних починають передачу даних тільки за запитом центрального вузла. Якщо у джерел даних немає підготовленого для передачі пакета даних, то спеціальний логічний механізм джерел даних формує ідентифікаційний пакет, що містить унікальний ідентифікаційний номер джерел даних. Завдання центрального вузла ідентифікувати всі джерела даних, які знаходяться в зоні його обслуговування і якщо у джерел даних є інформація для передачі, то прийняти їх.

Процес опитування - часовий інтервал, який розділений на блоки - вікна. Вікна - нефіксовані відрізки часу, розмір яких визначається кількістю слотів, на які він ділиться. Розмір слота - фіксована величина для кожного джерела даних. Так як слот - це теж часовий інтервал, його розмір визначається швидкістю передачі

даних від джерел даних до вузла, тобто його визначає обладнання, що використовується в системі.

Тоді загальна затримка на передачу по висхідним і низхідним лініях (T_v, T_n) може бути обчислена на основі наступних рівнянь [9,10]:

$$T_v = (1 + V_{bo})(D_b / V_b),$$

$$T_n = (1 + V_{no})(D_n / V_n),$$

де V_{bo}, V_{no} - швидкості передачі для висхідної і низхідної ліній відповідно, при яких настає відмова в обслуговуванні, D_b, D_n - загальне число переданих біт по висхідній і низхідній лініях відповідно і, нарешті, V_b, V_n - швидкості передачі даних для висхідної і низхідної ліній відповідно.

Затримка поширення Tr є функцією відстані і може бути обчислена в такий спосіб:

$$Tr = Rob / Vr,$$

де Rob - відстань між мобільним користувачем і хмарою, а Vr - швидкість поширення. Затримка через обробку даних ґрунтується на числі необхідних операцій і швидкості обробки інформації процесором в хмарі. Затримка через обробку даних $Tobr$ обчислюється таким чином:

$$Tobr = N / Vproc,$$

де N - загальне число необхідних операцій і $Vproc$ - швидкість процесора хмари. Резюмуючи все вищесказане, загальна затримка може бути обчислена як сума зазначених трьох затримок. Тоді загальна затримка вивантаження даних в хмару $Tzag$ обчислюється таким чином:

$$Tzag = T_v + T_n + Tr + Tobc,$$

Відповідно повний цикл взаємодії M джерел даних і центрального вузла становить $T = MTzag$.

Якщо кожне джерело даних в середньому λ пакетів в секунду, то при наявності в системі M джерел даних, загальна інтенсивність потоку даних складатиме λM пакетів в секунду, а середній інтервал між їх надходження $1 / \lambda M$. Отже, щоб уникнути необмеженого зростання черг, час обслуговування $Tzag$ повинно відповідати умові:

$$Tzag \leq 1 / \lambda M,$$

Вирішуючи (6) при умові $V_b = V_n$ щодо необхідної швидкості передачі даних для

висхідної і низхідної радіоліній $V = V_b + V_n$, отримаємо умову гарантування відсутності черги для кожного джерела даних і відповідно можна сформулювати вимоги до пропускнув спроможності радіоканалу.

Ґрунтуючись на останньому виразі, можна сказати, що загальна затримка, в основному, залежить від відстані. Таким чином, в разі введення макро хмар затримка менша, ніж затримка при використанні ресурсів ядра мережі.

Введення рівня макро хмари на супутниках-ретрансляторах і забезпечення взаємозв'язку макро хмари за допомогою бездротових високошвидкісних радіосистем передачі терагерцового діапазону дозволяє також використовувати новий спосіб вивантаження трафіку, що при спільному застосуванні з технологією взаємодії пристрій-пристрій D2D (Developer-to-Developer) значно покращує характеристики якості обслуговування мережі 5G/LoT.

Результати попереднього моделювання показали, що в порівнянні з традиційним рішенням з побудови ядра мережі Evolved Packet Core, заснованим на версії 15 3GPP, запропоноване рішення забезпечує зменшення кругової затримки в середньому на 30-40%.

Дійсним технічним рішенням для зменшення взаємних завад між угрупованням кореневих (ведучих) супутників та супутників-ретрансляторів (ведених), які знаходяться в радіусі приблизно 1 км, та відповідно мінімізації спотворень інформаційного сигналу при реалізації міжсупутникового зв'язку дану лінію створено в терагерцовому 128-134 ГГц діапазоні [11-13].

Подальша перспектива використання даного рішення вбачається в наступному. Для створення інноваційної архітектури низькоорбітальної інфокомунікаційної системи зв'язку сьогодні активно проводяться науково-технічні розробки. Результати таких досліджень знайдуть застосування в реалізації концепції Інтернет-речей, в системах дослідження Землі з космосу для наукових і економічних завдань зондування поверхні Землі, для інформаційного забезпечення силових структур і т.д. У вітчизняних науково-дослідних роботах, на відміну від світових, розробляється і досліджується комплекс моделей і методів для низькоорбітальних супутникових мереж, побудованих на основі архітектури «розподіленого супутника». Запропонована авторська розробка дозволяє вирішити ряд науково-технічних задач для створення нового виду мереж - низькоорбітальних супутникових мереж, які, як правило, є частиною комплексу взаємодіючих мереж електрозв'язку систем зв'язку загального користування (СЗЗК) і призначені для надання нових послуг як

користувачам СЗЗК, так і пристроям цих мереж при міжмашинній взаємодії М2М (Machine-to-Machine) при реалізації концепції Інтернету речей.

Серед науково-практичних завдань, які необхідно вирішувати для цього, основними є наступні:

- аналіз концепції Інтернету речей й сучасних технологій телекомунікацій та обґрунтування необхідності створення нового виду мереж зв'язку загального користування - низькоорбітальних супутникових мереж, побудованих на основі архітектури «розподіленого супутника»;

- визначення теоретичних і практичних напрямків досліджень в області низькоорбітальних супутникових мереж, побудованих на основі архітектури «розподіленого супутника»;

- розробка моделей і способів підвищення завадостійкості каналів радіозв'язку низькоорбітальних супутникових мереж, побудованих на основі архітектури «розподіленого супутника»;

- розробка методів використання низькоорбітальної системи супутникового зв'язку з архітектурою «розподіленого супутника» для бездротових сенсорних мереж з метою збільшення їх зв'язності.

4. ВИСНОВКИ

Запропоновано багаторівневу систему туманних обчислень для підвищення ефективності функціонування низькоорбітальних супутникових систем зв'язку при забезпеченні вимог мереж і систем п'ятого покоління 5G, що представляє собою розвиток систем хмарних обчислень для мереж радіозв'язку від централізованої системи до гетерогенної розподіленої системи. Наведена методика оцінки часу доступу в запропонованій структурі на основі моделі доступу в «туманних обчисленнях» з дозволом колізій джерел даних.

5. СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. Тихвинский, “Спутниковая связь в будущей инфраструктуре 5G”, Connect, № 7-8, с. 104-107, 2018.
- [2] “Рынок спутникового Интернет вещей в перспективе до 2024-2030 года”, Технологии и средства связи. Специальный выпуск “Спутниковая связь и вещание -2019”, № 4, с. 25-30, 2019.
- [3] Jonas Eneberg - Inmarsat - Satellite Role in 5G. 2017. [Online]. Available: <https://www.slideshare.net/TechUK/jonas-eneberg-inmarsat-satellite-role-in-5g>. Accessed on: May 18, 2017.
- [4] А.Минов, А.Бабин, “Спутниковая связь для Интернета вещей”, Connect, № 5-6, с. 112-116, 2017.
- [5] В. Тихвинский, М. Стрелец, “Перспективы создания спутникового сегмента 5G”, Первая мила, № 1, с. 104-107, 2018.
- [6] “Подготовка к внедрению 5G: возможности и проблемы,” Отчет МСЭ, 2018. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/pref/D-PREF-BB.5G_01-2018-PDF-R.pdf. Дата обращения: Янв.19, 2020.
- [7] Т.М. Наритник, В.Г. Сайко, Г.Л. Авдєєнко, В.Я. Казіміренко, С.В. Сарапулов, “ Система низькоорбітального супутникового зв'язку”, Н 04 В 7/185. патент 134409 Україна, травень 10, 2019.
- [8] 5G white paper | NGMN. Next generation mobile networks, Alliance 2017.[Online]. Available: <https://www.ngmn.org/work-programmer/5g-white-paper.html>. Accessed on: May 19, 2017.
- [9] [A. Mukherjee, and D. G. Roy “A Power and Latency Aware Cloudlet Selection Strategy for Multi-Cloudlet Environment,” IEEE Transactions on Cloud Computing Mag., vol. 3, pp.44-48, July 2016.
- [10] D. Szabo, A.Gulyas, F. Fitzek, and D. Lucani, “Towards the tactile internet: Decreasing communication lateen-cy with network coding and software defined networking,” In European Wireless 2015. 21th European Wireless Conference, May 2015. pp. 1-6.
- [11] V. Saiko, S. Toliupa, V. Nakonechnyi, and Dakov Serhii, “The method for reducing probability of incorrect data reception in radio channels of terahertz frequency range,” 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Feb. 2018.
- [12] В.Г.Сайко, та Т.М. Наритник, Безпроводові системи зв'язку терагерцо-вого діапазону: монографія. Deutsch: Видавництво "LAP LAMBERT Academic Publishing ", 2019.
- [13] G. Avdeetiko, “Simulation of a terahertz band wireless telecommunication system based on the use of IR-UWB signals,” Telecommunications and Radio Engineering, vol.78 (10), pp. 891 – 909, 2019.



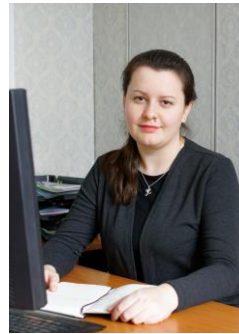
Сайко Володимир Григорович
 Доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладних інформаційних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка.
 Інтереси: радіоінженерія, інформаційні технології.
 Наука: автор більше 270 наукових праць, 4 монографій, 30 патентів на винахід.



Наритник Теодор Миколайович
 Кандидат технічних наук, професор, директор Інституту електроніки та зв'язку Української академії наук.
 Інтереси: телекомунікаційні системи терагерцового діапазону.
 Наука: автор більше 330 наукових праць, 40 патентів на винаходи.



Гладких Валерій Миколайович
 Кандидат технічних наук, завідувач кафедри телекомунікацій Одеської національної академії імені О.С. Попова.
 Інтереси: інформаційні технології, інженерія програмного забезпечення.
 Наука: автор більше 105 наукових праць, 15 патентів на винахід.



Сивкова Наталія Максимівна
 Аспірант кафедри телекомунікацій Одеської національної академії імені О.С. Попова.
 Інтереси: інформаційні технології, інженерія програмного забезпечення.
 Наука: автор більше 10 наукових праць.