

DOI: 10.18372/2310-5461.51.15688

УДК 004.591(045)

О. В. Пономаренко, канд. техн. наук, доц.
Коледж інженерії та управління
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-7846-7896
e-mail: ponomarenkoS_200@ukr.net;

А. О. Мошенський, канд. техн. наук, доц.
Національний університет харчових технологій
orcid.org/0000-0001-6348-7540
e-mail: UT5UUV@gmail.com;

А. С. Савченко, канд. техн. наук, доц.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0001-8205-8852
e-mail: alina@inet.ua;

В. І. Дрововозов, канд. техн. наук, доц.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-6303-9741
e-mail: drovvlad47@gmail.com;

О. В. Толстікова, канд. техн. наук, доц.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-7616-2757
e-mail: ovtolst21@gmail.com;

І. П. Швец
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0001-4539-8964
e-mail: ipsw@ukr.net

ІНФОРМАЦІЙНА ЦІННІСТЬ СИГНАЛЬНОГО ТРАФІКУ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Вступ

Безпроводові інформаційно-комунікаційні мережі (БПМ) є одними з найважливіших об'єктів глобальної інформаційної інфраструктури. У процесі бурхливого розвитку всіх систем безпроводового зв'язку, передавання та опрацювання інформації виникають і нові проблеми загального характеру та притаманні саме для БПМ. У першу чергу це проблеми стійкості та живучості за умов впливу шумів та завад, обмежень на часові, енергетичні та інформаційні параметри мереж.

У статті розглядається сигнальний трафік безпроводової мережі критичного застосування. Ключовою характеристикою такого трафіку є інформаційна цінність [3; 4].

Мережі критичного застосування є невід'ємними елементами критично важливої інфраструктури [9]. Системи критичної інфраструктури є основою сучасної взаємопов'язаної економіки. Порушення роботи ключових систем

та основних послуг, що ними надаються — таких систем, як телекомунікації, енерго- чи водопостачання, транспорт, фінанси може спричинити значну економічну шкоду. Стихійні лиха і зловмисні атаки на критично важливу інфраструктуру являють собою серйозну небезпеку для суспільства і економіки. Недавні шоківі події, такі як великий східно-японський землетрус, ураган Харві в США, кібератаки на українську електромережу або обвалення Генуезького мосту в Італії, показують, як збої в роботі критично важливої інфраструктури та основних послуг можуть привести до значних економічних наслідків, збитків, а також загибелі людей. Взаємопов'язаність ланцюжків поставок і технологічних і фінансових систем в світовій економіці збільшує вразливість і вразливість критично важливої інфраструктури. Коли відбуваються потрясіння і збої, їх негативні наслідки можуть перетинати сектора і кордони і навіть знаходити відгук у всьому світі.

Проблема підвищення стійкості критичної інфраструктури в умовах динамічної еволюції ризиків базується на підґрунті політик та моделей управління для підвищення гарантування інвестицій.

Сьогодні повсюдно здійснюється перехід від захисту активів критичної інфраструктури до забезпечення гарантованої стійкості системи. У праці [9] запропоновано набір інструментів політики щодо управління стійкістю критичної інфраструктури, що забезпечить застосування більш послідовного, превентивного підходу до захисту та підтримки основних послуг.

Управління стійкістю критично важливої інформаційної інфраструктури неможливе без вибору та обґрунтування кількісних інформаційних характеристик. На жаль, стосовно інформації, що циркулює у безпроводових мережах критичного застосування, кількісні характеристики цінності інформації у доступних нам джерелах не зустрічаються.

Терміни та визначення

Дамо найбільш важливі для систем критично важливої інформаційної інфраструктури терміни та визначення. Прозорість та однозначність ключових понять дає можливість ефективного управління підсистемами різного масштабу та призначення при їх об'єднанні у єдину велику систему.

Специфіка інформаційних систем критичного застосування полягає в тому, що вони, по суті, є системами реального часу.

Розрізняють системи реального часу двох типів — системи жорсткого реального часу і системи м'якого реального часу.

Системи жорсткого реального часу не допускають затримок реакції ні за яких умов. Якщо інформація до таких систем не поступає взагалі або поступає несвоєчасно, це призводить до катастрофічних наслідків. Інформація стає непотрібною і втрачає будь-яку цінність. Приклади систем жорсткого реального часу — бортові системи управління, системи аварійного захисту, реєстратори аварійних подій.

Системи м'якого реального часу характеризуються тим, що затримка реакції не критична, хоча і може привести до додаткових витрат ресурсу і зниження продуктивності системи в цілому. Приклад — робота мережі. Якщо система не встигла обробити черговий прийнятий пакет, це призведе до таймауту на передавальній стороні і повторної посилки. Дані при цьому не губляться, але їх цінність зменшується. Відповідно, знижується продуктивність мережі.

Треба відмітити, що деякі БПМ спеціального призначення відносять саме до систем жорсткого реального часу.

Для забезпечення штатного функціонування систем як м'якого, так і жорсткого реального часу (в тому числі БПМ спеціального призначення) необхідно ретельно планувати та розподіляти мережні енергетичні та інформаційні ресурси. Для цього використовують спеціальні модулі управління радіоресурсами — планувальники (*schedulers*). Завдання управління радіоресурсами повинне бути реалізоване на всіх рівнях стека протоколів. Дилема, яка має бути розв'язана, полягає в тому, чи можуть бути реалізовані методи адаптації на кожному рівні незалежно, відповідно до класичного підходу проектування вузлів в моделі взаємодії відкритих систем (*Open System Interconnection Reference Model, OSI*), або оптимізація повинна здійснюватися спільно на декількох рівнях стека протоколів (міжрівнева оптимізація).

Незалежна (локальна) адаптація на кожному з рівнів моделі *OSI* здійснюється послідовно. Відповідно, термін досягнення оптимального або хоча би близького до нього рішення у результаті являє собою суму усіх термінів локальної адаптації. Крім того, відомо, що час опрацювання мережної інформації на кожному з локальних рівнів моделі *OSI* є різним: чим вище рівень, тим більший час потрібний на опрацювання мережевої інформації.

До планувальників пред'являються високі вимоги стосовно швидкості розв'язання завдань оптимального розподілу ресурсів (аж до вимоги роботи у реальному часі) з прийнятною якістю. Задовольнити цим вимогам можна завдяки застосуванню методів розподіленого опрацювання службової інформації, зокрема, міжрівневої (*cross-layer*) оптимізації. Основним принципом міжрівневої оптимізації є комплексне рішення задачі ефективного використання обмеженого числа радіоресурсів, що враховує ряд першорядних чинників: підвищення пропускної спроможності; забезпечення рівнодоступності — справедливого (*fair*) поділу ресурсів між користувачами; досягнення необхідної або, принаймні, найкращої можливої якості обслуговування (*quality of service, QoS*). У свою чергу, якість сервісу може бути локальною — від i -го до $(i+1)$ -го мережевого вузла, або наскрізною (*end-to-end QoS*) — від джерела до отримувача.

Переваги міжрівневого підходу безпосередньо пов'язані з принципами функціонування безпроводової мережі.

Характеристики безпроводових каналів зв'язку впливають на всі рівні стеку мережевих протоколів, і тому всі рівні реагують на зміну стану каналу. Крім того, існує тісний зв'язок між протоколами різних рівнів. Наприклад, на фізичному рівні параметри приймача (ширина смуги пропускання, амплітудно-частотна та фазочастотна характеристики тощо) можуть бути налаштовані так, щоб динамічно реагувати на зміни завад; на рівні організації даних потужність, швидкість і спосіб кодування також можуть адаптуватися, щоб мінімізувати рівень завад; на рівні MAC адаптивне планування може бути реалізовано на основі поточного рівня завад і поточної якості лінії зв'язку; адаптивна ієрархічна маршрутизація (для спеціальних мереж) або м'яка естафетна передача обслуговування (у стільникових системах) можуть бути реалізовані у відповідь на поточний рівень завад і розподіл навантаження в мережі; на рівні застосунків можна визначити м'яку *QoS*, де вимоги до *QoS*-додатків динамічно коригуються залежно від поточних рівнів завад.

Усі перераховані вище протоколи адаптації реагують і впливають на рівень завад і розподіл ресурсів у мережі. Як наслідок, для ефективного використання мережі протоколи адаптації кожного рівня повинні бути інтегрованими, щоб була можливість використання взаємних залежностей між рівнями.

Міжрівнева оптимізація алгоритмів управління ресурсами для різних мережевих сценаріїв здійснюється з урахуванням різних показників продуктивності. Для мереж *Ad Hoc* та сенсорних мереж маршрутизація з енергозбереженням базується на взаємозв'язку і взаємозалежності між усіма рівнями стека протоколів, рівно як і між усіма мережевими вузлами.

Зміни в мережі відбуваються в різних часових масштабах: наприклад, зміни в досягнутому відношенні сигнал/завада в лінії (*Signal-to-Interference-and-Noise Ratio, SINR*) повинні робитися дуже швидко, (в умовах високошвидкісної мобільності — за періоди порядку одиниць мікросекунд); зміни параметрів трафіку користувачів можуть робитися набагато повільніше, від десятків до сотень мілісекунд. Швидкість адаптації для конкретного протоколу визначається його місцем розташування в стеку протоколів, однак обмін інформацією між рівнями і спільна оптимізація значно поліпшують продуктивність системи в цілому.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Фундаментальне підґрунтя. Завадостійкість радіоелектронних систем та стійкість до

дешифрування повідомлень, що передаються по каналах зв'язку, ґрунтується на основах загальної теорії інформації. Ці основи уперше закладені у фундаментальних працях [1; 2]. Надалі у працях [3; 4] показано статистичний взаємозв'язок завадостійкості та цінності інформації, якою обмінюються абоненти, намічені шляхи отримання кількісних вимірів цінності інформації.

У працях [5–7] наведені результати теоретичних досліджень різних інформаційних мір, їх застосування для отримання статистичних висновків та прийняття рішень. У працях [7; 8] виведені співвідношення між функціями цінності інформації, суб'єктивними ймовірностями та відповідними функціями корисності. Поняття функції корисності, по суті, формально ототожнюється з поняттям інформаційної цінності.

Згадані фундаментальні результати стосовно цінності інформації та функцій корисності широко застосовуються в техніці, природних науках, медицині та ін. — усюди, де проводиться статистична обробка результатів експериментальних досліджень за наявності завад та шумів. Розглянемо специфічні особливості застосування понять цінності інформації та функцій корисності у телекомунікаціях, зокрема, у безпроводових комунікаційних мережах критичного застосування.

Сучасний стан проблеми. Однією з ключових проблем у наданні мультимедійних послуг через безпроводову мережу зі стаціонарними та мобільними абонентами є підтримка якості обслуговування (*Quality of service, QoS*) [12; 15]. За наявності безпроводового середовища обміну інформацією, різномірності трафіку та мобільних абонентів ця проблема дедалі ускладнюється. Комунікаційні канали можуть потерпати від непередбачуваних розривів з'єднань; вони є зашумленими, нестабільними, мають обмежені інформаційні та енергетичні ресурси. Якщо у мережах зі стаціонарними абонентами циркулює мультимедійний трафік класу *Triple Play* (мова, відео, дані) з доволі складними статистичними характеристиками, то за наявності мобільних абонентів мультимедійну інформацію вже треба відносити до класу *Quadruple Play* (мова, відео, дані плюс інформація мобільних абонентів). Статистичні характеристики мультимедійного трафіку мобільних абонентів значно ускладнюються навіть порівняно з відповідними характеристиками трафіку *Triple Play*.

У численних науково-дослідних роботах та практичних розробках запропоновано різні методи підтримки *QoS* для мультимедійних

застосунків на різних рівнях безпроводових мереж. На рівні застосунків моделі *OSI* нові мультимедійні системи перетворення даних адаптуються до змін мережеских умов, таких як пропускна спроможність та якість зв'язку. На мережевому рівні розробляються протоколи обміну, які є мало чутливими до мобільності абонентів та раптовими розривами з'єднань. На рівні каналу передачі даних протоколи контролю доступу до середовища модифікуються таким чином, щоб можна було підтримувати резервування та забезпечити гарантії якості. Аналогічно, механізми корекції помилок можуть захищати від нестационарних помилок передачі по безпроводових каналах (найчастіше, по радіоканалу). На фізичному рівні схеми модуляції, контролю потужності передачі та чутливості приймачів також розробляються з орієнтацією на *QoS*.

У більшості монографій, статей, матеріалів конференцій, технічних доповідей [14; 16; 18; 20] обговорюються механізми мережевого рівня, тобто оцінки резервування ресурсів та контроль прийому викликів в рамках єдиної системи управління радіоресурсами для підтримки мультимедійних програм у безпроводових мережах критичного застосування, з різними вимогами до компонентів *QoS*, такими як пропускна здатність, затримка та степінь бітових помилок *BER*. У праці [12], мабуть, уперше відмічено, що енергетична складова інформаційної цінності розглядається як така, що безпосередньо пов'язана з відповідною енергетичною складовою функції корисності. Схеми резервування ресурсів [18] використовуються для надання необхідних ресурсів певним викликам високого пріоритету. Мережні технології забезпечують переваги обміну ресурсами між потоками трафіку, щоб досягти найкращого використання каналів. Однак досягнення правильного балансу між цими двома суперечливими критеріями є проблемою [21].

Іншою проблемою є надання мультимедійних послуг через мобільну безпроводову мережу з підтримкою наскрізної якості сервісу (*End-to-End QoS*) при передаванні інформації через безпроводову мережу з її особливою специфікою, про яку вже коротко згадувалося вище: зашумленість каналів, затримки та джитер, раптові розриви та відновлення з'єднань тощо. Тут можна додати також проблему прихованих вузлів та множинного доступу з виключенням колізій, що об'єктивно приводить до додаткових затримок доставки даних.

Хоча проблема забезпечення наскрізної якості сервісу безумовно визнається авторами прак-

тично всіх монографій та статей, конкретні розв'язки задач оптимізації наскрізної якості сервісу в мережах з багатьма транзитними ділянками у доступних нам джерелах майже не зустрічаються. Винятками можуть служити праці [21; 23], але й там вирази у замкненій формі для використання при розробці практичних алгоритмів та програм не наводяться.

Стаття [10] присвячена вибору кількісної міри інформації, яка отримується при статистичній обробці дослідницьких даних. Використовується ентропійна міра, запропонована Р. Л. Стратоновичем у праці [4], однак функцію втрат у статті [10] не конкретизовано.

У праці [11] уведено поняття так званої мережевої функції корисності, яка начебто характеризує наскрізну якість сервісу. Однак ніяких конструктивних підходів до аналізу та застосування мережевої функції корисності для оптимізації наскрізної якості сервісу не наводиться. Єдиним виправданням для застосування мережевої функції корисності вважається те, що остання є інтуїтивно прозорою завдяки можливості її нормування (на відміну від *QoS* з такими незрозумілими для авторів параметрами, як затримка та втрати при доставці). Водночас в літературі [24–26] наводиться дуже довершені та наочні методи чисельного аналізу та вибору метрик для розрахунків та нормування *QoS*, у тому числі наскрізної *QoS*.

Постановка завдання дослідження

Ураховуючи викладене вище, проблему управління якістю сервісу треба розглядати більш широко. Справа в тому, що для будь-якої інформаційно-обчислювальної або інформаційно-комунікаційної мережі як складної інформаційної системи якість сервісу є комплексною характеристикою, яка містить декілька ключових параметрів. Головною вимогою до мережі є виконання її основної функції — забезпечення користувачам потенційної можливості доступу до ресурсів усіх термінальних вузлів, об'єднаних в мережу, причому доступ має бути забезпечений без затримки (або з прийнятною для користувача затримкою). Усі інші вимоги — продуктивність, надійність, сумісність, керованість, захищеність, розширюваність і масштабованість — пов'язані з якістю виконання цього основного завдання.

Математичні моделі якості сервісу в сучасних мережах необхідно будувати з урахуванням взаємного зв'язку та взаємної залежності ключових параметрів як компонентів цієї багатовимірної комплексної характеристики.

Згадані проблеми у доступних нам джерелах розглянуті недостатньо повно, тому дана стаття є спробою закрити (хоча б частково) цю прогалину.

Параметри мережевого трафіку в системах критичного застосування

На кожному рівні еталонної моделі *OSI* мережевий трафік являє собою набір атомарних (логічно нероздільних) даних, якими оперують у рамках використовуваних протоколів даного рівня. Наприклад, на фізичному рівні атомарною одиницею є біт, на рівні передавання даних — кадр, на мережевому — пакет (дейтаграма), на транспортному — фрагмент тощо. Будь-який фрагмент даних, логічно об'єднаних для передачі — кадр, дейтаграма, пакет — можна вважати самостійним повідомленням.

Функції кожного рівню та, відповідно, інформаційні параметри трафіку на цьому рівні можна віднести до однієї з двох альтернативних груп:

- функції, що залежать від конкретної технічної реалізації мережі;
- функції, орієнтовані на роботу із застосунками.

Протоколи рівнів першої групи безпосередньо пов'язані з технічною реалізацією мережі та її комунікаційним обладнанням. Ці рівні називають *мережезалежними*. До них відносять три нижніх рівні: фізичний, передавання даних (канальний) та мережевий.

Три верхніх рівні — сеансовий, рівень представлення даних та рівень застосунків — орієнтовані саме на застосунки, тому практично не залежать від технічної специфіки побудови мережі. Будь-які зміни топології мережі, заміна обладнання або перехід на нову мережну технологію практично не впливають на протоколи цих рівнів. Згадані рівні називають *мереженезалежними*.

Транспортний рівень є проміжним. Він відокремлює деталі функціонування нижніх рівнів від верхніх. Це дозволяє розробляти застосунки, що не залежать від технічних засобів безпосереднього транспорту повідомлень. Саме повідомлення (у найбільш загальному сенсі) є операндами сеансового рівню, представлення даних та рівню застосунків.

Розглянемо основні функції та інформаційні параметри мережезалежних та мереженезалежних рівнів.

Мережезалежні рівні

Мережезалежні рівні (фізичний, передавання даних, мережевий) діють за принципом ланцюгів мережі або підмережі.

Принциповою особливістю якості інформації на мережезалежних рівнях є тісний зв'язок інформаційних та енергетичних характеристик. По суті, якість інформації монотонно зростає під час зростання співвідношення сигнал/(шум плюс завади). Тому на фізичному рівні принциповим питанням є рівень потужності сигналів, якими відображаються одиниця чи нуль. На фізичному рівні оперують з бітами, які характеризуються напругами, а на рівні передавання даних — з групами бітів (кадрами). На цих двох рівнях, по суті, існують «сирі», не оброблені дані. Остаточні похибки виявляються засобами мережевого рівня.

На мережевому рівні основною одиницею трафіку є пакет, який являє собою довільним чином обрану частину повідомлення. Засоби фізичного рівня реалізуються, як правило, апаратними пристроями, засоби рівня передавання даних — з використанням апаратних пристроїв та програмних застосунків. Для реалізації засобів мережевого рівня використовуються, як правило, програмні застосунки.

Мереженезалежні рівні

Сеансовий рівень дозволяє користувачам різних комп'ютерів встановлювати сеанси зв'язку один з одним. При цьому надаються різні типи сервісів, серед яких управління діалогом (відстеження черговості передачі даних), управління маркерами (запобігання одночасного виконання критичною операції декількома системами) і синхронізація (установка службових міток всередині довгих повідомлень, що дозволяють тільки після усунення несправності продовжити передачу з того місця, на якому вона обірвалася).

На відміну від більш низьких рівнів, завдання яких — достовірна передача бітів і байтів, рівень представлення даних займається здебільшого синтаксисом і семантикою переданої інформації. Щоб було можливо спілкування комп'ютерів з різними уявленнями даних, необхідно перетворювати формати даних один в одного, передав їх по мережі в якомусь стандартизований вигляді. Рівень представлення займається цими перетвореннями, надаючи можливість визначення і зміни структур даних більш високого рівня (наприклад, записів баз даних).

Рівень застосунків містить набір популярних протоколів, необхідних користувачам. Одним з найбільш поширених є протокол передачі гіпертексту. Інші прикладні протоколи використовуються для передачі файлів, електронної пошти, мережевих розсилок тощо.

Порядок організації правил взаємодії між компонентами інформаційно-комунікаційної системи здійснюється за допомогою стеків протоколів, розподілених по рівням мережевої моделі.

Не вдаючись до детального обговорення достоїнств та недоліків різних моделей взаємодії відкритих систем (вичерпний порівняльний аналіз проведений у праці [29]), зосередимося на інформаційних параметрах мережевого трафіку.

У цій статті основну увагу приділено фізичному рівню, який для безпроводових мереж є найбільш відповідальним мережезалежним рівнем. При цьому процедури вищих рівнів (*PHY/MAC* та повторні пересилання протоколу управління передачею — *TCP*) також не виключаються.

Основна проблема, що стосується використання безпроводових мереж, пов'язана з її здатністю відповідати строгим обмеженням надійності та затримки без погіршення параметрів доставки традиційних програмних застосунків.

У праці [12] досліджуються три основні показники ефективності безпроводових мереж загального призначення для *End-to-End* комунікацій (так званий триплет ключових показників ефективності (*Key Performance Indicators, KPIs triplet*)):

- затримка доставки τ_d ;
- надійність доставки (доставка без втрат та переключень бітів) r_d ;
- пропускна спроможність T_{hr} .

Стосовно ж дослідження безпроводових мереж критичного застосування як об'єктів критичної інфраструктури треба додати четвертий компонент *KPIs* — ефективну інформаційну ємність каналу $C_{inf\,eff}$, безпосередньо пов'язану зі співвідношенням сигнал-шум *SNR*, ступенем переключення бітів *BER* та ймовірністю виконання поточної задачі впродовж назначеного періоду дедлайну T_{dl} :

$$C_{inf\,eff} = \Psi(SNR, BER, T_{dl}). \quad (1)$$

Оскільки змінна *BER* є монотонною (квадратичною) функцією *SNR* [12], функціонал (1) приймає таку форму:

$$\begin{aligned} C_{inf\,eff} &= \Psi(SNR, BER, T_{dl}) = \\ &= \Psi[SNR, \phi_{BER}(SNR), T_{dl}]; \\ \phi_{BER}(SNR) &= k_{SNR} \times (SNR)^2, \end{aligned}$$

де k_{SNR} — ваговий коефіцієнт, що обирається з урахуванням параметрів мережі.

У свою чергу, інформаційно-енергетичний функціонал безпроводової мережі критичного застосування залежить уже не від трьох, а від чотирьох показників:

$$\Phi_{wncr} = \Phi[\tau_d, r_d, T_{hr}, C_{inf\,eff}],$$

а триплет ключових показників ефективності переходить у квадруплет (*KPIs quadruplet*).

На мережезалежних рівнях розглядаються детерміновані та статистичні показники повідомлень. До детермінованих показників відносять службову інформацію:

- поле «адреса відправника»;
- поле «адреса отримувача»;
- поле «тип»;
- поле «пріоритет»;
- поле «CRC» (контрольна сума для циклічного надлишкового коду);
- час відправлення пакетів;
- час отримання пакетів;
- загальна тривалість сеансу зв'язку в мережі.

Частина об'єму пакету, що лишається, складає користувальницьку інформацію.

До статистичних показників мережевого трафіку відносять:

- середня кількість \hat{N}_{pinp} вхідних пакетів в одиницю часу;
- середня кількість \hat{N}_{pout} вихідних пакетів в одиницю часу;
- середній час $\hat{\tau}_{prec}$ отримання пакетів;
- середній час $\hat{\tau}_{psend}$ відправлення пакетів;
- середня тривалість \hat{T}_{scomm} сеансу зв'язку в мережі.

У сучасних програмних продуктах ці дані використовуються для поєданого поточного аналізу сигнатур та протоколів. Інформаційна цінність результатів аналізу залежить від дисперсії помилок оцінювання параметрів трафіку [4]. Розглянемо задачу максимізації інформаційної цінності докладніше.

Максимізація узагальненого функціоналу інформаційної цінності

Задача зводиться до максимізації функціоналу інформаційної цінності

$$\Phi_{wncr} \rightarrow \max_{\tau_d, r_d, T_{hr}, C_{inf\,eff}}$$

у разі обміну даними між довільними термінальними вузлами — джерелом та отримувачем.

Маршрут доставки даних *R* містить *M* транзитних ділянок та обраний оптимальним чином за квадруплетом

$$\{\tau_{dm}, r_{dm}, T_{hrm}, C_{inf\ eff\ m}\}, 1 \leq m \leq M.$$

На m -й транзитній ділянці:

– T_{hrm} — пропускна спроможність, від якої

залежить швидкість передачі;

– τ_{dm} — затримка передачі.

На M транзитних ділянках маршруту результуючий функціонал інформаційної цінності має комплексну цільову функцію

$$\Phi_{cr} = \Phi_{wncr} = \Phi[\tau_d, r_d, T_{hr}, C_{inf\ eff}] \xrightarrow[\substack{\tau_d \rightarrow \min \\ r_d \rightarrow \max \\ C_{inf\ eff} \rightarrow \max}]{} \Phi_{cr\ opt}.$$

Інакше кажучи, під час вибору оптимального маршруту треба мінімізувати сумарну затримку та максимізувати надійність доставки на кожній транзитній ділянці.

Відповідно, інформаційна цінність $C_{inf\ eff}$ прагне до максимуму. Стосовно загальної пропускної спроможності T_{hr} на маршруті відмітимо, що вона визначається пропускною спроможністю ділянки або комутаційного вузла з мінімальними можливостями (так званий принцип «пляшечного горлечка»).

На рис. 1 зображені графіки нормованих функцій якості сервісу та корисності, взяті з праці [12].

У технічних застосунках функція корисності зазвичай вважається ступінчастою.

Функція інформаційної цінності, як і функція QoS , має плавний характер як для простішого, так і для самоподібного потоків трафіку.

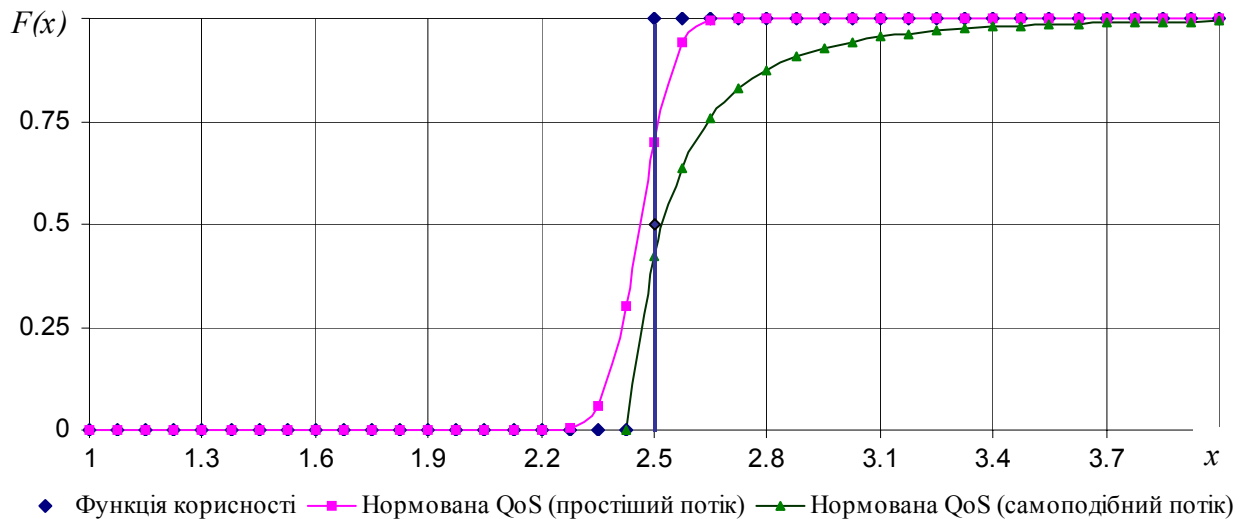


Рис. 1. Якість сервісу та функція корисності, нормовані відносно величини співвідношення сигнал/(завади плюс шум) $SINR$

Для мультимедійного трафіку *Quadruple Play*, який є самоподібним за визначенням, спостерігаються ймовірнісні розподіли інтенсивності з так званими «важкими хвостами». У математичному сенсі це відповідає більшим ймовірностям наявності малих значень щільності розподілів. Тому при збільшенні середньої інтенсивності функція інформаційної цінності мультимедійного трафіку наростає повільніше, ніж у випадку простішого (пуассонівського) трафіку.

Загальна мета процесу оптимізації полягає у визначенні маршруту з транзитними ділянками, що мають приблизно однакову пропускну спроможність із забезпеченням заявленої інформаційної цінності. Враховуючи співвідношення між функціями цінності інформації,

суб'єктивними ймовірностями та відповідними функціями корисності, введемо універсальну цільову функцію, вид якої визначається кількістю апріорної інформації про стан та параметри безпроводової мережі критичного застосування.

Відповідно до [4; 6; 7] за наявності параметричної апріорної невизначеності оптимальне оцінювання здійснюється за критерієм максимуму апостеріорної щільності ймовірності, а цільова функція [у нашому випадку — абстрактна функція корисності $\Psi(\mathbf{x})$ з вектором аргументів \mathbf{x}] є лінійною за модулем у межах $-\infty < \mathbf{x} < \infty$. При зменшенні апріорних відомостей та зростанні апріорної невизначеності аж до непараметричної оптимальне

оцінювання здійснюється за критерієм мінімуму середньоквадратичної помилки, а функція $\Psi(x)$ еволюціонує до квадратичної у тих же межах $-\infty < x < \infty$.

Інакше кажучи, цільова функція $\Psi(x)$ має адаптуватися до кількості апріорної інформації про стан та характеристики мережі.

Основним параметром адаптації є показник степеню цільової функції, який змінюється від

лінійного до квадратичного. З урахуванням наведених міркувань уведемо ультралінійну цільову функцію зі змінним показником степеню $\varepsilon = f(Route_i, SINR)$.

Для спрощення аналізу обмежимося лише одним довільним аргументом x_1 . На рис. 2 зображено графік ультралінійної цільової функції $\Psi(x_1)$.

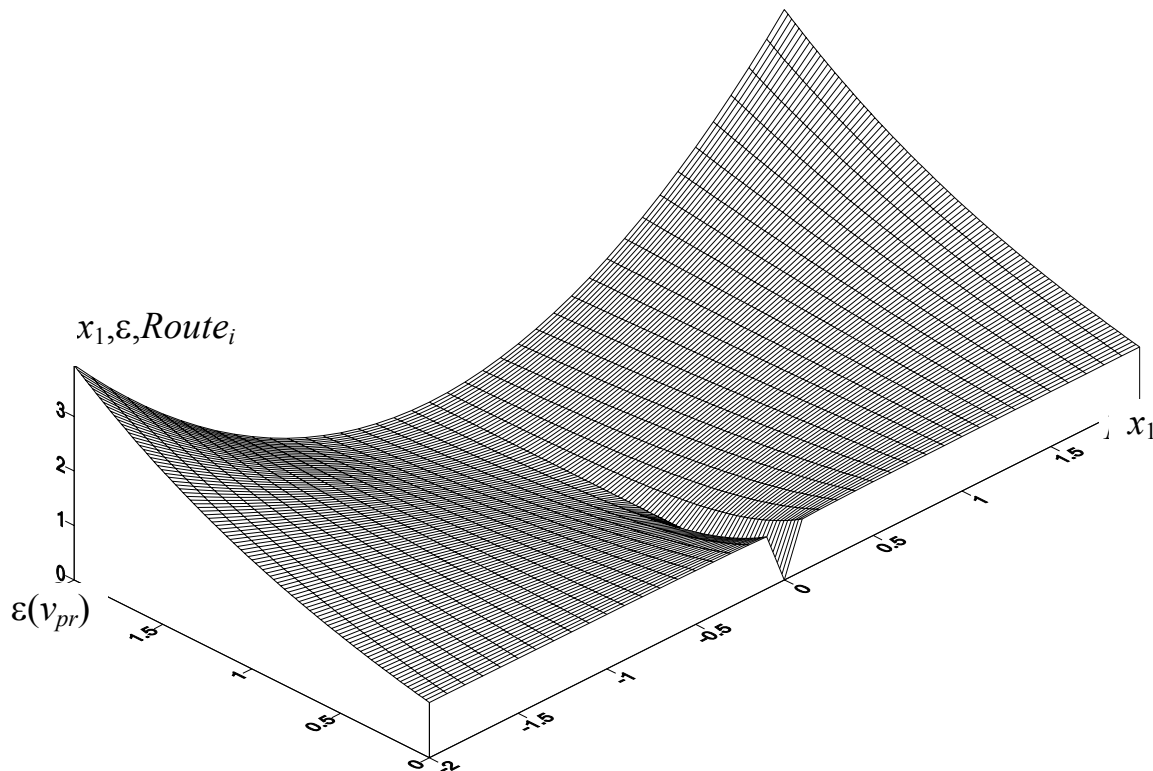


Рис. 2. Ультралінійна цільова функція $\Psi(x_1)$ довільного аргументу x_1

Розглянемо у якості одного з аргументів цільової функції надійність доставки даних r_d . Тоді компонент ультралінійної цільової функції $\Psi(r_d)$ матиме такий вигляд:

$$\Psi(r_d) = \Psi[N_p, N_{lost}, \varepsilon, Route_i] = \Psi \left\{ a \left[1 - \left(\frac{N_p - N_{lost}}{N_p} \right) \right]^\varepsilon \middle| (v_{pr}, Route_i) \right\};$$

$$0 \leq \frac{N_p - N_{lost}}{N_p} \leq 1, \quad 1 \leq \varepsilon \leq 2,$$

де $Route_i$ — i -й маршрут доставки з M транзитними ділянками; v_{pr} — кількість апріорної інформації про стан та параметри i -го маршруту.

Без будь-якої втрати узагальненості можна вважати, що пропускна спроможність усіх ділянок мають один порядок, а в ідеалі є однаковими [12].

Суворо кажучи, реальні аргументи цільової функції: затримка, надійність доставки та інші — приймають лише позитивні значення. Відповідно

і цільова функція $\Psi(x_i)$ існуватиме лише у правому верхньому квадранті площини аргументів (x_i, ε) , однак для розв'язку задачі оптимізації це не має принципового значення, оскільки за будь-яких величин ε розглядається ультралінійна функція за модулем.

Негативні значення аргументу на рис. 2 уведені лише для наочності представлення та спрощення алгоритмів стандартної задачі оптимізації стосовно конкретної проблеми, що розглядається у даному випадку.

Задача пошуку оптимального маршруту в мережі з N вузлами та M транзитними ділянками всебічно розглянута у праці [12] стосовно оптимізації наскрізної якості сервісу для безпроводової мережі. У строгому математичному сенсі задача максимізації функції корисності для безпроводової мережі критичного застосування є класичною задачею про потоки в мережі як різновид квадратичних задач розміщення. Тому не будемо її докладно розглядати, пославшись на вичерпні результати згаданої праці [12].

Тут зупинимось саме на результатах моделювання процесу максимізації функції корисності.

Моделі пошуку асимптотично оптимальних рішень для системи критичного застосування

Як показано в праці [12], найбільш перспективним підходом до розв'язання проблеми максимізації функції корисності у системі критичного застосування є використання методів теоретичного аналізу та оптимізації на підґрунті результатів моделювання потоків мультимедійного мережевого трафіку. Якщо брати на увагу ймовірнісний характер параметрів потоків у мережах, неминуче доводиться застосовувати наближені методи.

Наприклад, замість класичного методу гілок та границь використовують його стохастичний аналог — метод стохастичних гілок та границь.

Відмітимо, що квадратична задача розміщення у її стохастичному варіанті, по-перше, є однією з найбільш трудомістких задач у цій області, а по-друге, точні методи її розв'язання принципово мають надполіноміальну складність [12]. Тому наближені методи на даний час є фактично єдиним способом розв'язання проблеми.

З використанням методу табу-пошуку — простого та наочного методу метаевристичного локального пошуку [24–26], розглянуто умовну схему розташування вузлів мережі з множинним доступом та часові асимптотичні характеристики зростання нормованої функції корисності $F_{Unorm}(t_i)$ у системах м'якого (МРЧ) та жорсткого (ЖРЧ) реального часу.

Ці завдання вирішуються за допомогою спеціальних модулів управління радіоресурсами — планувальників (*schedulers*). Ключове питання, яке виникає, полягає в тому, чи можна встигнути адаптуватися до прийнятного рівня функції корисності за період виконання поточного завдання.

На рис. 3 наведені результати моделювання для систем МРЧ та ЖРЧ. Система МРЧ — безпроводова мережа обміну даними, які представляють потоки самоподібного *quadruplet*-трафіку.

Трафік є еластичним (електронна пошта) помірно еластичним (числові дані), або нееластичним (потокове відео).

Система ЖРЧ — безпроводова мережа управління виробничим підприємством середнього масштабу: три конвеєрні лінії, які видають комплектуючі вузли на робототехнічний комплекс.

Трафік є строго нееластичним: невчасний прийом інформаційних даних та/або формування управляючих сигналів на будь-якій лінії веде до зупинки виробництва в цілому.

У системі МРЧ нормована функція корисності досягає асимптотичного (одичинного) значення на початковому інтервалі $\{0, \dots, t_1\}$. При появі нового завдання у момент t_1 виконується переналаштування системи та нові умови функціонування.

Інтервали

$$\{t_1, \dots, t_2\}, \{t_2, \dots, t_3\}, \dots, \{t_{i-1}, \dots, t_i\} \dots$$

за необхідності можуть збільшуватися до таких величин, при яких будуть досягатися мінімальні прийнятні значення $F_{Unorm}(t_i)$, наприклад, $F_{Unorm}(t_i) \geq 0,5$.

У системі ЖРЧ на початковому інтервалі $\{0, \dots, t_1\}$ нормована функція корисності досягає мінімально прийнятного значення $F_{Unorm}(t_i)$, наприклад, $F_{Unorm}(t_i) > 0,8$.

Інтервали $\{t_1, \dots, t_2\}, \{t_2, \dots, t_3\}, \dots, \{t_{i-1}, \dots, t_i\} \dots$

збільшуватися не можуть.

Виходом з ситуації, що склалася, є, наприклад, стрибкоподібний перехід до нульового значення параметрів системи ЖРЧ на початку кожного чергового інтервалу t_i .

Платня за це — ускладнення системи шляхом зміни початкових параметрів або структури в цілому.

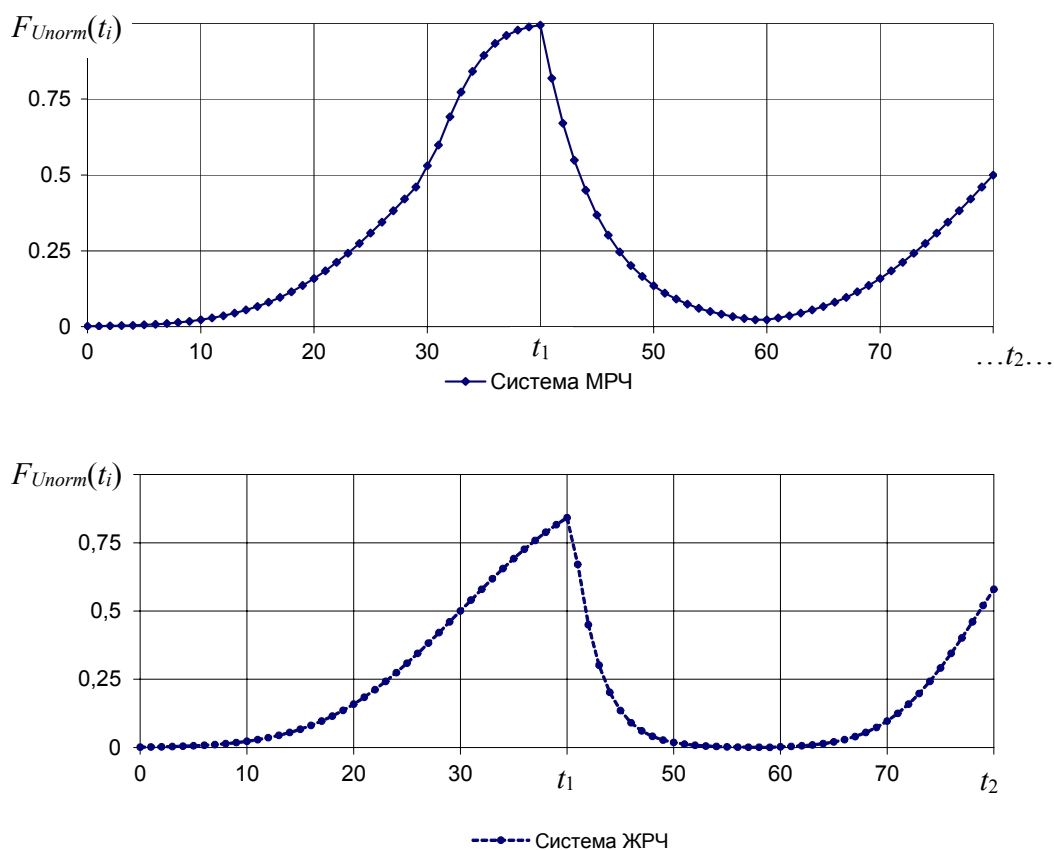


Рис. 3. Нормовані функції корисності $F_{Unorm}(t_i)$ систем критичного застосування м'якого та жорсткого реального часу; $t_1, t_2, \dots, t_i \dots$ — періоди виконання поточних завдань

Висновки

Потоки сигнального трафіку безпроводових мереж критичного застосування характеризуються інформаційною цінністю та її монотонною функцією корисності. На підґрунті загальної теорії корисності інформаційну ємність сигнального трафіку представлено у вигляді деякого функціоналу корисності. функціями-аргументами якого служать ключові інформаційно-ентропійні функції процесу, на які накладаються обмеження у формі нерівностей.

У системах критичного застосування з жорстким реальним часом забезпечення прийнятних асимптотичних значень функції корисності досягається шляхом певного ускладнення, зокрема, застосування мультипараметричних та мультиструктурних систем.

Застосування функціоналів корисності дає можливість введення явних кількісних оцінок інформаційної цінності та отримання виразів у замкненій формі для максимізації функцій корисності. Надалі планується розробити методи синтезу мультиструктурних систем критичного застосування, здатних працювати у режимі жорсткого реального часу з плануванням та розподілом поточних ресурсів.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Котельников В. А. Теория потенциальной помехоустойчивости. М. Л.: Госэнергоиздат, 1956. 152 с.
- [2] Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Издательство иностранной литературы, 1963. 830 с.
- [3] Харкевич А. А. Избранные труды в трёх томах, Т. 3. Теория информации, опознавание образов. М.: Наука, 1973. 524 с.
- [4] Стратонович Р. Л. Теория информации. М.: Сов. радио, 1975. 424 с.
- [5] Borel E. Probabilite et Certitude / Presses Universitaires de France, Paris, 1956. 127 pp.
- [6] Zacks S. The Theory of Statistical Inference / John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., 1971. 609 pp.
- [7] De Groot M. Optimal Statistical Decisions / McGraw Hill, 2004. 512 pp.
- [8] Fishburn P.C. Utility Theory for Decision Making / R. E. Krieger Pub. Co., 1979. 234 pp.
- [9] OECD, Good Governance for Critical Infrastructure Resilience, OECD Reviews of Risk Management Policies, OECD Publishing, Paris. 2019. 118 pp. <https://doi.org/10.1787/02f0e5a0-en>
- [10] Бондаренко О. М. Кількісна міра інформації у статистичній обробці дослідницьких даних.

- Вісник Саратов. держ. техн. ун-та.* 2014. № 2(55). С. 158–166.
- [11] Козлов А. Л., Селіванов Є. П. Співвідношення для альтернативного визначення кількості інформації при різних законах розподілу. *Вісн. Астрахан. держ. техн. ун-та.* Сер. управління обч. техн. інформ. 2014, № 4, С. 67–72.
- [12] Дрововозов В. І., Аль-Шаммарі Ахмед Аршед, Толстікова О. В., Водоп'янов С. В., Коцюр А. Б. Наскрізна якість сервісу безпроводових мереж з міжрівневою взаємодією. *Проблеми інформатизації та управління.* 2020. Вип. 63. С. 11–17.
- [13] Горбенко А. В. Методи та інструментальні засоби розробки комп'ютерних мереж інформаційно-управляючих систем критичного застосування. Автореферат ... канд. техн. наук. Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2004. 20 с.
- [14] Lozovanu D. Optimization of Stochastic Discrete Systems and Control on Complex Networks: Computational Networks / Dmitrii Lozovanu, Stefan Pickl - Springer International Publishing, Switzerland, 2015. 400 pp.
- [15] Vegesna S. R. IP Quality of Service. Pearson Education, Cisco Press, 2019, 221 River Street, Hoboken, NJ 07030. 368 pp.
- [16] Hossain E. Radio Resource Management in Wireless Networks: An Engineering Approach, 1st Edition / Ekram Hossain, Mehdi Rasti, Long Bao Le. Cambridge University Press, 2017. 431 pp.
- [17] Khan S. Exponential utility function based criteria for network selection in heterogeneous wireless networks//Shoaib Khan, Mian Ilyas Ahmad, Farhan Hussain. *Electronic Letters*, 2018. Vol. 54, No. 8, pp. 529–531.
- [18] Radio Resource Management White Paper Cisco, 2018. URL: https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/controller/technotes/8-1/mobility_express/b_RRM_White_Paper/ (date access 25/08/2021).
- [19] Liu Q. Stochastic Control and Filtering over Constrained Communication Networks / Qinyuan Liu, Zidong Wang, Xiao He — Springer Nature Switzerland AG, 2019. 222 pp.
- [20] Szigeti T. End-to-End QoS Network Design, 2nd ed. / Tim Szigeti, Robert Barton, Christina Hattingh, Kenneth Briley, Jr. - Cisco Press, 800 East 96th Street, Indianapolis, IN 46240, 2013. 1090 pp.
- [21] Pateromichelakis E. End-to-End QoS Optimization for V2X Service Localization. Emmanouil Pateromichelakis, Chan Zhou, Prajwal Keshavamurthy, Konstantinos Samdanis. 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Waikoloa, HI, USA, 2019. 6 pp.
- [22] Khan S. Exponential utility function based criteria for network selection in heterogeneous wireless networks//Shoaib Khan, Mian Ilyas Ahmad, Farhan Hussain. *Electronic Letters*, 2018. Vol. 54, No. 8. pp.529-531.
- [23] Eskandarpour M. Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review // Majid Eskandarpour, Pierre Dejax, Joe Miemczyk, Olivier Péton. *Omega*, Elsevier, 2015, vol. 54(C), pages 11–32. DOI: 10.1016/j.omega.2015.01.006.
- [24] Gendreau M., Potvin J.-I. Handbook of Metaheuristic, 3rd ed. — Springer International Publishing AG, 2019. 604 pp.
- [25] Pardalos P. Handbook of Combinatorial Optimization, 2nd Ed. / Panos M. Pardalos, Ding-Zhu Du, Ronald L. Graham (Eds.) Springer Science+Business Media New York, 2013. 3409 pp.
- [26] Resende M. G. C. Handbook of Optimization in Telecommunications / Mauricio G.C. Resende, Panos M. Pardalos. (Eds.) Springer Science+Business Media, Inc., 233 Spring Street, New York, NY 10013, USA, 2006. 1134 pp.
- [27] Булыгина О. В. Системный анализ в управлении: учеб. пособие / О. В. Булыгина, А. А. Емельянов, Н. З. Емельянова, А. А. Кукушкин; под ред. д-ра экон. наук, проф. А. А. Емельянова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ФОРУМ : ИНФРА-М, 2017. 450 с.
- [28] Kojić, V. Solving the consumer's utility-maximization problem with CES and Cobb-Douglas utility function via mathematical inequalities. *Optim Lett* 11, 875–884 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11590-016-1052-2>
- [29] Tanenbaum, A. S. Computer Networks, 5th Ed. / Andrew S. Tanenbaum, David J. Wetherall. Prentice Hall, Cloth, 2011. 960 pp.

Пономаренко О. В., Мошенський А. О., Савченко А. С., Дрововозов В. І., Толстікова О. В., Швець І. П.

ІНФОРМАЦІЙНА ЦІННІСТЬ СИГНАЛЬНОГО ТРАФІКУ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Проблема підвищення стійкості критичної інфраструктури в умовах динамічної еволюції ризиків базується на підґрунті політик та моделей управління для підвищення гарантування інвестицій. Управління стійкістю критично важливої інформаційної інфраструктури неможливе без вибору та обґрунтування кількісних інформаційних характеристик. У статті розглянуто інформаційні потоки сигнального трафіку, що циркулює у безпроводових мережах критичного застосування. Надано найважливіші терміни та визначення

стосовно мереж критичного застосування як систем (м'якого та жорсткого) реального часу та статистичних складових інформаційної ємності. На підґрунті загальної теорії корисності інформаційну ємність сигнального трафіку представлено у вигляді деякого функціоналу корисності — комплексної характеристики випадкового процесу. Аргументами функціоналу служать ключові інформаційно-ентропійні функції процесу, на які накладаються обмеження у формі нерівностей. Показано, що функції-аргументи функціоналу, що розглядається, можуть бути представлені у вигляді абстрактної множини частинних складових, пов'язаних між собою статистично або функціонально. Досліджено методи багатокритеріальної оптимізації функціоналу корисності та сформульовано умови отримання асимптотично оптимальних рішень. Застосування функціоналів корисності дає можливість уведення явних кількісних оцінок інформаційної цінності та отримання виразів у замкненій формі для максимізації функцій корисності. Надалі планується розробити методи синтезу мультиструктурних систем критичного застосування, здатних працювати у режимі жорсткого реального часу з плануванням та розподілом поточних ресурсів.

Ключові слова: інформаційна ємність, мережа критичного застосування, безпроводова мережа, система реального часу, теорія корисності.

Ponomarenko O., Moshenskyi A., Savchenko A., Drovovozov V., Tolstikova O., Shvets I.
INFORMATIONAL VALUE OF SIGNAL TRAFFIC OF WIRELESS NETWORKS OF CRITICAL APPLICATION

The problem of increasing the resilience of critical infrastructure in a dynamic evolution of risks is based on policies and management models to increase investment guarantees. Managing the resilience of a critical information infrastructure is impossible without selecting and justifying quantitative information characteristics. The article considers the information flows of signal traffic circulating in wireless networks of critical application. The most important terms and definitions for networks of critical application as real time (soft and hard) systems and statistical components of information capacity are given. Based on the general theory of utility, the information capacity of signal traffic is presented in the form of some utility functional — a complex characteristic of a random process. The arguments of the functional are the key information-entropy functions of the process, which are subject to constraints in the form of inequalities. It is shown that the argument functions of the functional under consideration can be represented as an abstract set of partial components connected statistically or functionally. Methods of multicriteria optimization of utility functional are investigated and conditions for obtaining asymptotically optimal solutions are formulated. The use of utility functionalities makes it possible to introduce explicit quantitative estimates of information value and obtain expressions in a closed form to maximize utility functions. In the future, it is planned to develop methods for the synthesis of multistructural systems of critical application, capable of working in a rigid real-time mode with the planning and allocation of current resources.

Keywords: information capacity, critical application network, wireless network, real-time system, utility theory.

Стаття надійшла до редакції 01.09.2021 р.
Прийнято до друку 18.10.2021 р.