

ПРИЛАДИ. РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 629.783

О.В. Андреев, к.т.н., доц.

Житомирський державний технологічний університет

О.Р. Рихальський, викл.

П.В. Фриз, к.т.н., доц.

Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова
Національного авіаційного університетуПІДВИЩЕННЯ ВІРОГІДНОСТІ ТЕЛЕМЕТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ ШЛЯХОМ
ВИКОРИСТАННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ БЛОЧНОГО КОДУ

Проводиться аналіз можливості підвищення вірогідності передачі телеметричної інформації на етапі первинної обробки телеметричних вимірів через використання особливостей структури бінарного рівномірного блочного коду. Наводяться показники підвищення вірогідності телеметричних вимірів існуючої системи автоматизованого контролю технічного стану космічних апаратів дистанційного зондування Землі.

Постановка проблеми у загальному вигляді. При обробці даних космічних систем (КС) спостереження під час виконання цільової задачі важливе місце займають питання контролю роботи бортового комплексу. На сьогоднішній день в умовах застосування автоматизованих систем обробки телеметричних вимірів для аналізу технічного стану бортової апаратури в інтересах управління космічних апаратів (КА) повинна бути забезпечена висока вірогідність контролю [1]. При телевимірюванні повідомленнями є величини параметрів, які, як правило, представляються у вигляді дискретних за рівнем і часом даних. У процесі передачі телеметричної інформації (ТМІ) здійснюються різні перетворення як сигналів, так і даних, що отримані у результаті вимірів. Дискретність вимірів, як за часом, так і за значенням параметра (за рівнем), що обов'язково супроводжує телевимірювання, а також і наявність випадкових факторів, що обумовлені внутрішніми і зовнішніми перешкодами в складному тракті одержання і передачі результатів вимірювань, призводять до того, що майже кожне значення вимірюваного параметра містить похибку вимірів [2].

Нехай контроль технічного стану бортової апаратури проводиться з періодичністю T_K , вірогідність контролю визначається ймовірністю P_B , відновлення характеристик апаратури суміщено із сеансом контролю, а середнє напрацювання на одну відмову бортової апаратури КА T_0 . Якщо усунення відмови проводиться через S сеансів контролю з моменту її виявлення, то коефіцієнт готовності КА до застосування може бути визначений згідно з виразом [1]:

$$K_r = T_0 \left[T_0 + T_K \left(\frac{1}{2} + S + \frac{1 - P_B}{P_B} \right) \right]^{-1}. \quad (1)$$

З виразу (1) видно, що при постійних значеннях T_0 та T_K коефіцієнт готовності КА може бути підвищений за рахунок зменшення S та підвищення вірогідності контролю P_B . Особливістю проведення контролю технічного стану бортових підсистем КА є те, що при цьому використовуються значення телеметричних параметрів (ТМП), що були отримані в результаті обробки телеметричних вимірів, тому він отримав назву телеметричного контролю [3]. При параметричному методі контролю працездатність об'єкта контролю оцінюється вимірюванням параметрів та порівнянням їх з допусками, що визначені на їх значення для забезпечення нормального функціонування системи (підсистеми). При цьому одним з напрямків підвищення вірогідності контролю технічного стану бортових підсистем P_B є зменшення похибок обробки телеметричних вимірів [2, 4].

Аналіз основних досліджень, у яких започатковане розв'язання проблеми. Найбільш ефективними методами зменшення похибок вимірів є використання адаптивних та програмних систем вимірювань, а також підвищення завадостійкості радіоліній передачі телеметричної інформації [5, 6]. Модернізація існуючих радіотелеметричних комплексів шляхом застосування цих методів, пов'язана із доробками на апаратному рівні як бортових, так і наземних

телеметричних засобів і вимагає досить великих матеріальних витрат. Отже ці методи доцільно використовувати на етапі розробки та створення нових радіотелеметричних комплексів. На етапі обробки телеметричної інформації зменшення похибок обробки вимірів можливо шляхом використання методів виявлення аномальних вимірів та їх фільтрації у відповідних програмних комплексах обробки телеметричних вимірів [2]. Цей варіант не вимагає доробки апаратної частини існуючих радіотелеметричних комплексів, а зводиться лише до удосконалення алгоритмів та програм обробки телеметричних вимірів. Автоматизація процесу обробки вимірів вимагає виявлення та виключення з подальшої обробки аномальних вимірів, бо попадання навіть незначної їх кількості у вихідні матеріали обробки може призвести до неправильних висновків [7]. Для систем автоматизованої обробки телеметричної інформації найбільшого поширення набула теорія статистичних рішень, яка дозволяє формалізувати алгоритми перевірок та вибрати критерії відбракування аномальних вимірів [2, 8]. Дослідження, проведені у [9], довели, що найменш чутливим до кількості аномальних вимірів у вибірці є метод допусків. Проте при застосуванні методу допусків достатньо складно визначити припустимі значення можливої зміни ТМП між вимірами, що потребує як знання величини похибок вимірів ТМП, так і апріорних даних відносно швидкості зміни параметрів.

При цьому у літературі не приділено достатньо уваги питанню підвищення вірогідності передачі телеметричної інформації на етапі первинної обробки телеметричних вимірів через аналіз особливостей структури бінарного рівномірного блочного коду (кадру телеметричної інформації), який притаманний системам з часовим розподілом каналів. Загальний підхід до використання блочного кодування для підвищення вірогідності передачі цифрової інформації у системах з часовим розподілом каналів наведений у літературі [10–12].

Отже **метою статті** є розробка алгоритму виявлення аномальних телеметричних вимірів, який базується на використанні особливостей структури бінарного рівномірного блочного коду на етапі обробки телеметричних вимірів.

Викладення основного матеріалу. В цифровій радіотелеметричній системі телеметричні параметри перетворюються в датчиках у первинні електричні сигнали, які надходять у бортову телеметричну систему, де формуються телеметричні повідомлення, що несуть вимірювальну інформацію та інформацію про події, а також службову інформацію. Для передачі по каналу зв'язку ТМП об'єднуються в груповий телеметричний сигнал, при цьому формується кодове повідомлення, яке має блочну структуру.

Кодове повідомлення, що сформоване на борту КА, через телеметричний канал зв'язку надходить на наземні засоби декодування, при цьому передача та прийом цього повідомлення здійснюється в умовах і при наявності завад різного походження, які спотворюють кодове повідомлення, що призводить до похибок при оцінці телеметричного параметра та зменшує вірогідність телевимірювань. Для декодування кодового повідомлення використовується інформація службових ТМП.

У гауссівських каналах зв'язку помилки при прийомі елементарних символів у кодовій комбінації з простим кодуванням можна вважати незалежними, тобто ймовірність перекручування кожного з розрядів кодової комбінації однакова і постійна. Для цього випадку ймовірність того, що серед кодової комбінації довжиною в n символів зустрінеться q помилкових символів, може бути визначена на підставі формули Бернуллі [7]:

$$P_{\text{ош}}(q) = C_n^q P_{\text{ош}}^q (1 - P_{\text{ош}})^{n-q}, \quad (2)$$

де $C_n^q = \frac{n!}{(n-q)! q!}$ – кількість можливих положень q помилкових символів у межах n – розрядної комбінації.

Відповідно до (2) для випадку $q = 1$, маємо:

$$P_{\text{ош}}(1) = C_n^1 P_{\text{ош}} (1 - P_{\text{ош}})^{n-1} = n P_{\text{ош}} - n(n-1) P_{\text{ош}}^2 + \dots + n P_{\text{ош}}^n.$$

При відносно низькому рівні шумів у каналі зв'язку можна вважати, що $P_{\text{ош}}(1) \approx n P_{\text{ош}}$, а при $q = n$, $P_{\text{ош}}(n) = P_{\text{ош}}^n$. Отже ймовірність $P_{\text{ош}}(q)$ досить швидко зменшується зі зростанням q і переважну частину помилок, при передачі телеметричних повідомлень, будуть складати одиничні збої. Одиничні помилки, що викликані цими збоями, можуть приймати одне з значень [4]:

$$\Delta_{uc} = \pm 2^0 d_{kc}; \pm 2^1 d_{kc}; \dots; \pm 2^{n-1} d_{kc}, \quad (3)$$

де d_{kc} – крок квантування.

З виразу (3) видно, що найбільша похибка виникає при перекручуванні старшого розряду коду і за абсолютною величиною вона відповідає половині шкали телеметричного повідомлення. Як показали дослідження, що були проведені у [8, 9], методи виявлення аномальних вимірів впевнено працюють лише при збоях у трьох старших розрядах повідомлення. Отже для захисту від викривлень інформації у молодших розрядах доцільно використовувати інші методи пошуку хибних вимірів, наприклад через урахування особливостей структури бінарного рівномірного блочного коду.

Цифрові коди можуть бути з повторною передачею, блочні і безперервні. Коди з повторною передачею утворюються шляхом багатократного (непарне число разів) повторення кожного повідомлення з наступним прийняттям рішення за більшістю однойменних результатів перевірки. Блочні коди характеризуються тим, що алгоритмічні зв'язки між інформаційними і перевірочними символами зосереджені в межах послідовності символів кінцевої довжини (блока). Блочні коди можуть бути систематичними і несистематичними. Систематичні коди утворюють найбільш широку групу. Особливість їх полягає в тому, що перевірочні символи формуються кожен раз із одних і тих же інформаційних символів, причому ця операція описується лінійною функцією – підсумовуванням за модулем два. Тому такі коди часто називають лінійними. В несистематичних кодах при формуванні перевірочних символів використовується нелінійна залежність різноманітних інформаційних символів.

Ефективність цифрових кодів у телеметричних системах визначається умовами їх застосування. В неадаптивних системах ефективність застосування кодових комбінацій, що містять k інформаційних символів із значністю коду n , так званих (n, k) кодів, значною мірою залежить від закону розподілу помилок у каналі. В адаптивних системах ця залежність послабляється, оскільки є можливість узгодити корегувальну здатність коду з характером потоку помилок. У каналах з незалежними помилками при ймовірності помилки елементарного символу коду менше ніж 10^{-2} можуть використовуватись коди типу Лемінга, циклічні коди та ін. При цьому енергетична перевага відносно простого коду з посимвольним прийомом не перевищує 20–40 %. Для боротьби з груповими помилками застосовуються спеціальні методи: надлишкові коди в поєднанні з автоматичним запитом по каналу зворотного зв'язку і повторною передачею спотворених комбінацій, або спеціальні цифрові коди. Коди Лемінга в цих випадках малоефективні, оскільки для виправлення порівняно “легких” пакетів помилок з вагою не більше 20–50 % довжини кодової комбінації потрібна велика значність коду. Все це дозволяє говорити про певні умови доцільного застосування (n, k) – кодів. Внесення надлишковості при заданій основі коду викликає або збільшення часу передачі, або скорочення тривалості елементарних кодових посилок [10].

Наприклад при передачі телеметричних повідомлень в КС “Січ” використовувався систематичний циклічний блочний код, що забезпечував формування групового телеметричного сигналу (телеметричного коду) у вигляді послідовностей (кодових слів), тобто блоків (кадрів) із скінченною кількістю символів, однакових для всіх блоків цього коду. Кадр містить інформацію, яка отримана в результаті опитування всіх датчиків радіотелеметричного комплексу. В телеметричний кадр КА “Січ-1” та “Січ-1М” входить 512 десятирозрядних слів. Кожне слово вимірювальної інформації несе дані про опитування одного функціонального датчика. Кожне слово про події несе інформацію про опитування восьми сигнальних датчиків.

Інформацію функціонального датчика несуть дев'ять розрядів (з 1-го по 9-й), а для передачі інформації сигнальних датчиків використовується тільки 8 розрядів “слова” (з 2-го по 9-й). З метою підвищення вірогідності передачі телеметричних повідомлень використовується 10-й розряд “слова”, що завжди доповнює кількість одиниць у “слові” до парного значення. Останнє слово в кадрі є службовим і несе інформацію про закінчення одного кадру і початок наступного – “кадрове слово”.

При прийомі телеметричного коду доцільно здійснювати перевірку не тільки “кадрового слова” та ознаки “парності”, а використовувати всі особливості його структури, що призведе до збільшення вірогідності телеметричних повідомлень, які передаються.

Загальний алгоритм виявлення хибних телеметричних повідомлень на основі аналізу блочної структури коду представлено на рис. 1.

Вхідною інформацією алгоритму є файл телеметричної інформації, яка являє собою послідовність кадрів структури КІМ-Ц. Тобто кожен кадр має фіксовану структуру і вміщує 512 двобайтних слів. Початок кадру позначається “кадровим словом” (10 одиниць підряд).

Перевірка вірності передачі кадру здійснюється за наступними ознаками.

“Командно-службове слово” та слова функціональних параметрів перевіряються за ознакою “парності”. Слова сигнальних параметрів перевіряються правильністю формування 1-го і 10-го розряду. 1-й розряд завжди передається нулем, а десятий розряд, як і в словах функціональних параметрів, являє суму за модулем два всіх попередніх 9-ти розрядів.

Значення кожного телеметричного параметра відповідає певному моменту часу. Якщо бортовий час в кадрі переданий невірно, або пройшов збій у прийомі часу, то даний телеметричний кадр вважається хибним, у тому числі і телеметричні параметри, які передавались у ньому.

Особливістю проведення телеметричних вимірів є те, що вони істотно залежать від правильності функціонування апаратури формування групового сигналу (АФГС) та поточного значення напруги джерела бортового живлення, стан яких також контролюється і передається у складі телеметричного кадру. Отже наступною операцією є перевірка працездатності АФГС через порівняння оцінок вимірів контрольованих параметрів з визначеними допусками, що забезпечують нормальне функціонування апаратури.

Довжина кадру перевіряється наявністю двох субкадрів по 256 слів. Якщо “кадрове слово” відсутнє, то кадр неповний і працювати з ним недоцільно.

Обробка реальної телеметричної інформації, яка була отримана з КА-«Січ-1М», показала, що запропонований алгоритм здійснює правильний пошук та виявлення хибних телеметричних кадрів за вказаними ознаками.

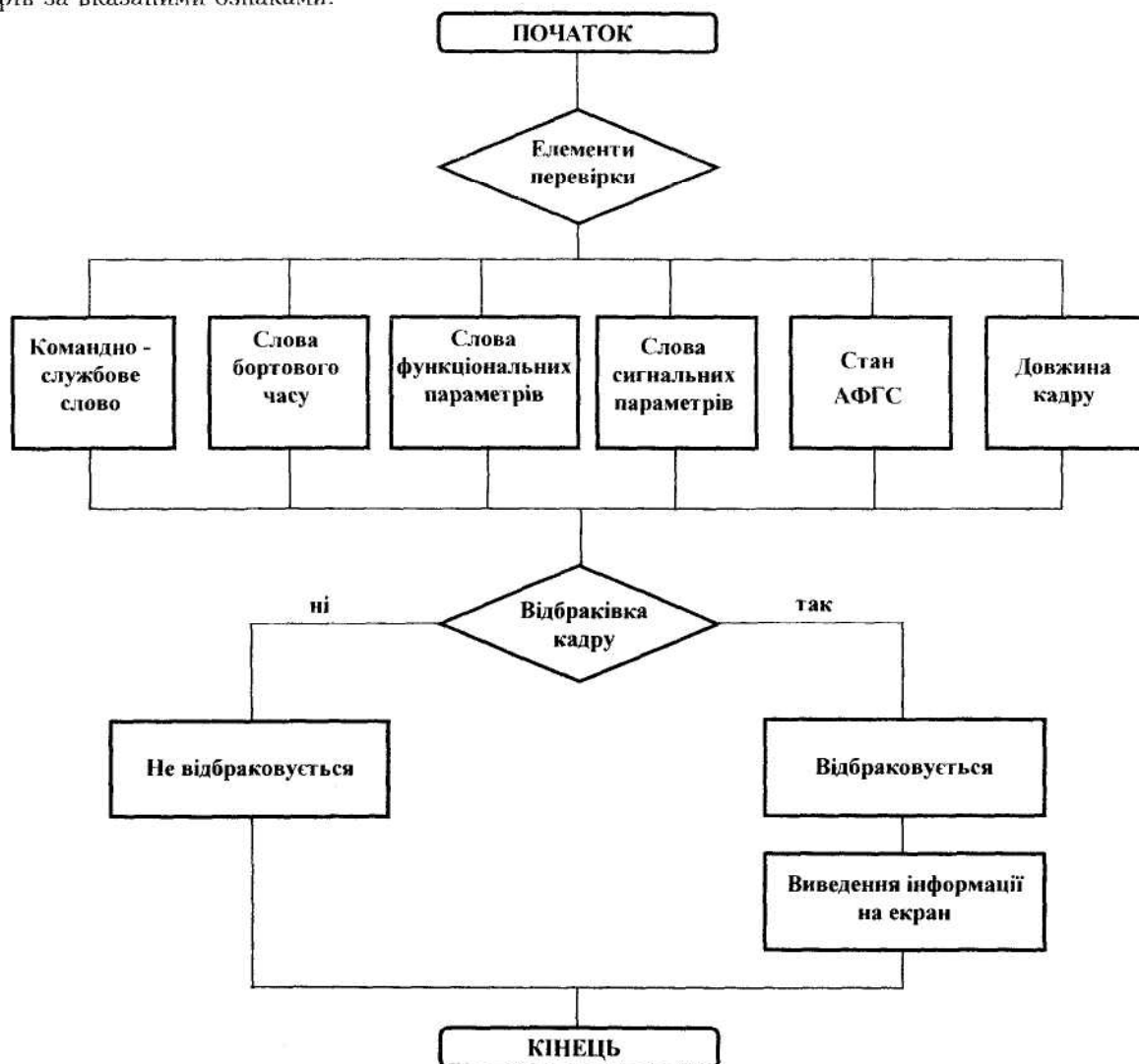


Рис. 1. Загальний алгоритм виявлення хибних телеметричних повідомлень

Взагалі ймовірність правильного декодування кодової комбінації для випадку використання блочного коду теоретично може бути визначена згідно з виразом [10]:

$$Q_k = (1 - P_n)^k, \quad (4)$$

де P_n – ймовірність помилкового прийому комбінації, що містить n символів блочного коду;

Q_k – ймовірність правильного прийому блочного коду, що містить k символів.

Результати розрахунку ймовірності правильного декодування кодової комбінації згідно з виразом (4) наведені в табл. 1.

Розрахунок ймовірності правильного декодування кодової комбінації сигнальних та функціональних параметрів був проведений для різних значень кількості інформаційних символів k і значності коду n при відповідних значеннях ймовірності помилкового прийому комбінації P_n для випадку неврахування та врахування структури кадру ТМІ.

Аналіз наведених даних показав, що ймовірність правильного декодування кодової комбінації для сигнальних та функціональних параметрів збільшується при урахуванні структури кадру ТМІ на 4...8 %. При погіршенні якості каналу зв'язку (ймовірність помилкового прийому комбінації $P_n > 0,4$) ефективність застосування запропонованого алгоритму збільшується. При невеликій кількості спотворень блочного коду ($P_n < 0,1$) ймовірність правильного декодування кодової комбінації $Q_k > 0,95$. Збільшення кількості перевірочних елементів призводить до збільшення ймовірності виявлення хибних телеметричних повідомлень у складі кадру телеметричної інформації, вилучення яких з подальшої обробки дасть змогу зменшити похибки обробки вимірів.

Запропонований алгоритм виявлення аномальних телеметричних вимірів, який базується на використанні особливостей структури бінарного рівномірного блочного коду, доцільно застосовувати на початку первинної обробки ТМІ, перед застосуванням статистичних методів виявлення аномальних вимірів та їх фільтрації.

Таблиця 1

Ймовірність правильного декодування кодової комбінації

№ з/п	Ймовірність помилкового прийому (P_n)	Ймовірність правильного декодування кодової комбінації (Q_k)			
		для сигнального параметра $n = 50, k = 23$		для функціонального параметра $n = 70, k = 24$	
		Без врахування структури	З врахуванням структури	Без врахування структури	З врахуванням структури
1	0,5	0,7269	0,8122	0,79	0,8645
2	0,4	0,7905	0,8579	0,8393	0,8967
3	0,3	0,8486	0,8985	0,8848	0,9267
4	0,2	0,9024	0,9352	0,9263	0,9535
5	0,1	0,95	0,9688	0,9645	0,9777
6	0,01	0,9953	0,9969	0,9965	0,9978

Застосування розробленої методики виявлення аномальних телеметричних вимірів дозволить підвищити вірогідність контролю технічного стану бортової апаратури КА завдяки зменшенню похибок обробки телеметричних вимірів у автоматизованій системі контролю.

Висновки. Рішення космічною системою спостереження поставлених цільових задач досягається завдяки керуванню космічними апаратами, однією із складових якого є проведення контролю технічного стану бортових підсистем. Вірогідність телеметричного контролю безпосередньо впливає на рішення цільових задач космічною системою. Удосконалення методів відбракування аномальних вимірів через використання блочного кодування на етапі обробки телеметричної інформації в автоматизованій системі контролю технічного стану КА дозволить виключити хибні телеметричні повідомлення з подальшої обробки. Зменшення похибок обробки телеметричних вимірів поліпшує таку важливу характеристику автоматизованої системи контролю технічного стану КА, як вірогідність контролю, яка безпосередньо впливає на значення коефіцієнта готовності КА до застосування.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1982. – 231 с.
2. Степкин В.С., Шмыголь С.С. Автоматизированная обработка и анализ телеметрической информации. – М.: МО СССР, 1980. – 516 с.
3. Евланов Л.Г. Контроль динамических систем. – М.: Наука, 1972. – 424 с.
4. Белицкий В.И., Зверев Р.И. и др. Телеметрия: Учебник для ВУЗов. – М.: МО СССР, 1984. – 465 с.
5. Гридин Ю.В., Харченко В.С. Обработка измерительной информации в бортовых отказоустойчивых системах с категорированием заявок // Космічна наука і технологія. – 1999. – № 1. – С. 69–73.
6. Стасев Ю.В., Горбенко Ю.Д., Макаренко Б.И., Ивашкин А.В., Воронов Д.Н. Применение сложных сигналов в командно-телеметрических радиолиниях // Космічна наука і технологія. – 1997. – № 5, 6. – С. 104–108.
7. Фомин А.Ф., Новоселов О.Н., Плющев А.В. Отбраковка аномальных результатов измерений. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 200 с.
8. Топольницький П.П., Андреев О.В., Рихальський О.Р. Аналіз можливостей застосування статистичних методів відбракування аномальних вимірів для підвищення вірогідності телеметричних даних // Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. – Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2002. – Вип. 2(18). – С. 114–119.
9. Оленович И.Ф., Топольницький П.П., Андреев А.В., Рыхальський А.Р. Повышение достоверности обнаружения аномальных телеметрических измерений методом допусков. Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. – Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2002. – Вип. 5 (21). – С. 23–30.
10. Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Назаров М.В., Финк Л.М. Теория передачи сигналов: Учебник для ВУЗов. – М.: Радио и связь. 1986. – 304 с.
11. Жураковский Ю.П., Полторак В.П. Теория информации та кодування: Підручник. – К.: Вища школа, 2001. – 255 с.
12. Витерби А.Д., Омура Дж. К. Принципы цифровой связи и кодирования: Пер. с англ. / Под ред. К.Ш. Зигангирова. – М.: Радио и связь, 1982. – 536 с.

АНДРЕЄВ Олександр Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехніки Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– обробка інформації в інформаційно-вимірювальних системах.

РИХАЛЬСЬКИЙ Олександр Ростиславович – викладач кафедри геоінформаційних і космічних систем Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

– моделювання вимірів у радіотехнічних системах.

ФРИЗ Петро Васильович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри геоінформаційних і космічних систем Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

– математичне моделювання в інформаційно-вимірювальних системах.