



Рис. 3. Фотографії наслідків провалля у м. Кривий Ріг

Мета - дослідження технологій моніторингу геодинамічних процесів з використанням радарних даних космічного апарату з синтезованою апертурою Sentinel-1A.

Завдання - дослідження можливостей застосування методів інтерферометрії даних радіолокаційної космічної зйомки для моніторингу вертикальних зміщень будівель (кар'єрів) на території України площею у сотні квадратних кілометрів.

Основна частина. Застосування інтерферометрії постійних розсіювачів радарного сигналу для визначення вертикальних зміщень. Перевагами дистанційних методів дослідження земної поверхні, в порівнянні з традиційними, є масштабність огляду, можливість отримання глобальної і локальної інформації про об'єкти, а також контролю динаміки процесів в реальному масштабі часу. З появою радарних космічних систем з такою самою, як у систем видимого діапазону, розподільчою здатністю можливості дистанційного зондування Землі з космосу значно виросли.

Основною перевагою радарних зйомок є можливість отримання актуальної інформації за

будь-яких погодних умов та освітленості земної поверхні.

Крім того, користувач може отримувати дані в стислий період часу, або за конкретну дату, і з високою періодичністю.

Європейське космічне агентство створює глобальну космічну систему дистанційного зондування Землі - «Copernicus», яка буде сформована на базі супутників «Sentinel», що будуть здійснювати зйомку Землі в оптичному та радіодіапазонах [7].

Станом на липень 2017 року на орбіту вже виведені радіолокаційні КА Sentinel-1A та Sentinel-1B. Дати запуску: Sentinel-1A - 03 квітня 2014 року, Sentinel-1B - 25 квітня 2016 року

Характеристики КА наведені у таблиці 1 [8]. Може виникнути запитання - чому саме КА Sentinel 1A саме тому, що це безоплатний варіант - зареєстрованим користувачам системою «Copernicus» дані надаються безоплатно, тому, що забезпечується велика частота зйомки однієї території під однаковим кутом двома КА - 6 діб, широка смуга огляду - 250 км., наявність напрацьованих методів та спеціалізованого програмного забезпечення.

Таблиця 1

Характеристики КА Sentinel-1A

Характеристика	Значення		
Маса, кг	2280		
Тип орбіти	Сонячно-синхронна, ближня полярна, кругова		
Висота орбіти, км	693		
Нахил, град.	98.18		
Повторний цикл	175 орбіт за 12 днів		
Термін використання, років	7		
Спектральний діапазон	С-діапазон		
Режим зйомки	Номинальна розподільча здатність, м	Ширина смуги зйомки, км	Поляризація
Interferometric Wide Swath	5x20	250	Подвійна, на вибір - HH/HV або VV/VH
Extra Wide Swath	20x40	400	
Stripmap	5x5	80	
Wave	20x5	20x20	Одинарна, на вибір - VV або HH

У статті розглянуте питання прикладного застосування радарних даних КА Sentinel-1A для моніторингу геодинамічних процесів (вертикальних зміщень) земної поверхні (будівель, споруд, доріг, мостів, дамб, естакад та ін.) на прикладі міста Кривий Ріг.

Опис інтерферометричного методу визначення вертикальних зміщень. Для аналізу використаний інтерферометричний метод оцінки малих зсувів земної поверхні та споруд, що базується на застосуванні радарних даних з синтезованою апертурою з космічного апарату Sentinel-1A. Кожен піксель кадру радіолокаційного сигналу являє собою когерентну суму відображень зонduючого сигналу від точкових цілей, розташованих на поверхні в межах елемента розподільчої здатності.

Радіолокатор реєструє сигнал, що приймається, зберігаючи фазу і амплітуду, у комплексному вигляді сигнал (S) розраховується за формулою:

$$S = Ae^{j\varphi} e^{\frac{-j4\pi r}{\lambda}}, \quad (1)$$

де A - амплітуда сигналу, φ - зміна фази радіосигналу при відображенні від цілі (фаза перевідбиття), r - відстань між антеною радіолокатора і метою, λ - довжина хвилі зонduючого випромінювання [9].

Інтерферометричне оброблення засноване на маніпуляції з різницею фаз відбитих сигналів, в результаті якої можна отримати перевищення одного відбитого елементу поверхні щодо іншого.

Методика визначення осідань (підняття) земної поверхні та споруд, яка використана у роботі, заснована на загальному виявленні постійних об'єктів (відбивачів) на великій серії знімків (методи - Persistent Scatterers (PS) та Small baselines interferometry (SBAS)) і активно застосовуються відносно недавно.

Вхідними даними для оброблення повинні бути не менше 30 знімків однієї і тієї ж території за різні дати, відзнятих в одній і тій же геометрії зйомки супутникового радіолокатора за рік [10].

Для оброблення даних застосовувався програмний модуль SarScape, програмне забезпечення ENVI.

Продукт ENVI - ефективне і доступне програмне рішення для повного циклу обробки даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), а також їх інтеграції з даними геоінформаційних систем.

Програмою автоматично вибирається основне зображення, на яке автоматично, з точністю до 1/100 пікселя, корегуються решта знімків інтерферометричного ланцюжка. Далі програма будує, так звані, інтерферограми (комплексно поелементно перемножені фазові шари радарних знімків) по кожній парі знімків. Потім для кожної пари оцінюються величини когерентності (кореляції фаз радарних знімків). Також для

кожної пари будуються карти величин стандартних відхилень амплітуд знімків.

Величина когерентності C_{oh} (від 0 до 100) відображає ступінь розпаду інтерферограми, вираховується як кореляція двох сигналів в комплексному вигляді і є мірою придатності пари знімків для подальшого оброблення за формулою 2:

$$C_{oh} = \frac{S_1 S_2^*}{(S_1 S_1^* S_2 S_2^*)^{\frac{1}{2}}}, \quad (2)$$

де S_1 и S_2 - комплексні значення відбитого сигналу для першого (master) і другого (slave) знімків у парі.

Потім програмою визначаються точки - постійні (або стійкі) розсіювачі радарного сигналу. Для вибору точок використовується кілька порогів (порог кореляції амплітуд, порог когерентності, порог просторового і тимчасового відхилень величин зсувів першої ітерації і т. д.).

Після того, як постійні розсіювачі визначені, для них виконується процедура оцінки фазових різниць і мультичасової розгортки фази для точкових цілей. Саме в різниці фаз кожного знімку «зашита» величина зсувів за період між зйомками цих знімків.

Таким чином, для кожної з обраних точок відновлюється хронологія зміни фази в часі, яка потім математично перераховується в зміщення в міліметрах. Додатково в процесі оброблення застосовується спеціальний фільтр, що видаляє можливий вплив атмосфери на інтерферометричну фазу.

Інтерферометрія малих базових ліній - SBAS, на відміну від інтерферометрії постійних розсіювачів, є менш автоматизованим методом і вимагає більшої кваліфікації виконавця. В цьому випадку посилюється внесок статистики в фінальний результат за рахунок перехресного оброблення дуже великої кількості інтерферометричних пар при тій же самій кількості знімків. Для оброблення за цим методом не обов'язкова наявність 30 знімків, оброблення можливе і при меншій їх кількості [11]. Наприклад, в випадку 15-прохідного ланцюга загальна можлива кількість пар знімків досягає 105. З них за величиною найменшої просторової бази вибираються, наприклад, 30-40 пар. Пари можуть бути перехресними (перший прохід з другим, другий з третім, перший з третім, другий з четвертим і т. п.).

Метод SBAS за рахунок вкладу статистики дозволяє вимірювати зміщення на незабудованих та не вкритих рослинністю територіях.

Метод PS дозволяє вимірювати детальні зміщення на об'єктах інфраструктури, застосовується при розробці та експлуатації нафтових і газових родовищ, просадки над шахтами, тунелями, моніторинг стабільності

мостів, естакад, гідроелектростанцій, будинків та споруд і багато іншого, характеризується максимально можливою чутливістю визначення вертикальних зміщень, яка складає одиниці міліметрів, за умови використання на вході не менше 30 радарних знімків за період не менше 1 року.

Характеристика вхідних даних. Для проведення інтерферометричного оброблення даних методами PS та SBAS території міста Кривий Ріг визначена зона інтересу площею 410 км² (рис. 4).



Рис. 4. Вибрана територія для проведення аналізу зміщень (зона світлого кольору)

У якості вхідних даних ДЗЗ, згідно з методикою, підібрано 30 радарних знімків з КА Sentinel-1A за період з 14.05.2015 по 23.10.2016, виконаних за умов однакової геометрії зйомки супутникового радара. Список радарних знімків приведений в таблиці 2.

Вихідною інформацією, що отримана в результаті оброблення, є векторний файл точок, в атрибутах якого відображаються:

географічні координати точок, де спостерігаються зміщення;

значення у міліметрах вертикальних зміщень окремо на кожну дату зйомки (згідно таблиці 2)

відносно дати першого знімка (14.05.2015);

середньорічна швидкість зміщень в мм/рік;

абсолютна похибка середньорічної швидкості зміщень в мм/рік.

Результат оброблення визначеної зони інтересу м. Кривий Ріг методом PS є векторний файл, який містить 625 тисяч точок. Якщо такі точки визначати наземними методами зі швидкістю одна точка за хвилину, необхідно затратити місяць робочого часу. За отриманими даними проведений ГІС-аналіз, результатом якого є тематична карта, що відображає вертикальні зміщення будівель та споруд міста Кривий Ріг, (рис. 5). Враховуючи значення похибки самого методу PS (5-10 мм/рік), точки, швидкість зміщення яких становлять від -10 до 10 мм, визначені як стійкі зони до осідання чи підняття. Точки, швидкість зміщення яких становлять менше -10 мм, визначені як просідання, більше 10 мм – як підняття. На рис. 6 показані критичні зони, де виявлено просідання більше 10 см, на рис. 7 - критичні зони, де просідання більше 6 см.

Результат оброблення визначеної зони інтересу м. Кривий Ріг методом SBAS є векторний файл, який містить 447 тисяч точок. За отриманими даними проведений ГІС аналіз, результатом якого є тематична карта, що відображає вертикальні зміщення в зоні Першотравневого кар'єру (рис. 8).

Верифікація застосованого методу. З метою перевірки правильності застосування методу інтерферометричних досліджень вертикальних зміщень, проведені співставлення отриманих результатів з результатами, що отримані Європейським космічним агентством [12].

У якості порівняння вибрані знімки КА Sentinel-1A для аналізу об'єктів:

- затоки біля м. Сан-Франциско з 22.02.2015р. по 20.09.2016 р. (рис.10);

- «Вежі Тисячоліття» в м. Сан-Франциско за період з 22.02.2015 р. по 20.09.2016р. (рис.11);

- залізничної станції в м. Осло за період з 26.12.2014р. по 28.10.2016 р. (рис.12).

Таблиця 2

Список радарних знімків

№	Дата зйомки	Виток	№	Дата зйомки	Виток	№	Дата зйомки	Виток
1	14.05.2015	5912	11	11.09.2015	7662	21	07.07.2016	12037
2	26.05.2015	6087	12	05.10.2015	8012	22	19.07.2016	12212
3	07.06.2015	6262	13	10.11.2015	8537	23	31.07.2016	12387
4	19.06.2015	6437	14	21.03.2016	10462	24	12.08.2016	12562
5	01.07.2015	6612	15	02.04.2016	10637	25	24.08.2016	12737
6	13.07.2015	6787	16	14.04.2016	10812	26	05.09.2016	12912
7	25.07.2015	6962	17	26.04.2016	10987	27	17.09.2016	13087
8	06.08.2015	7137	18	08.05.2016	11162	28	29.09.2016	13262
9	18.08.2015	7312	19	01.06.2016	11512	29	11.10.2016	13437
10	30.08.2015	7487	20	13.06.2016	11687	30	23.10.2016	13612

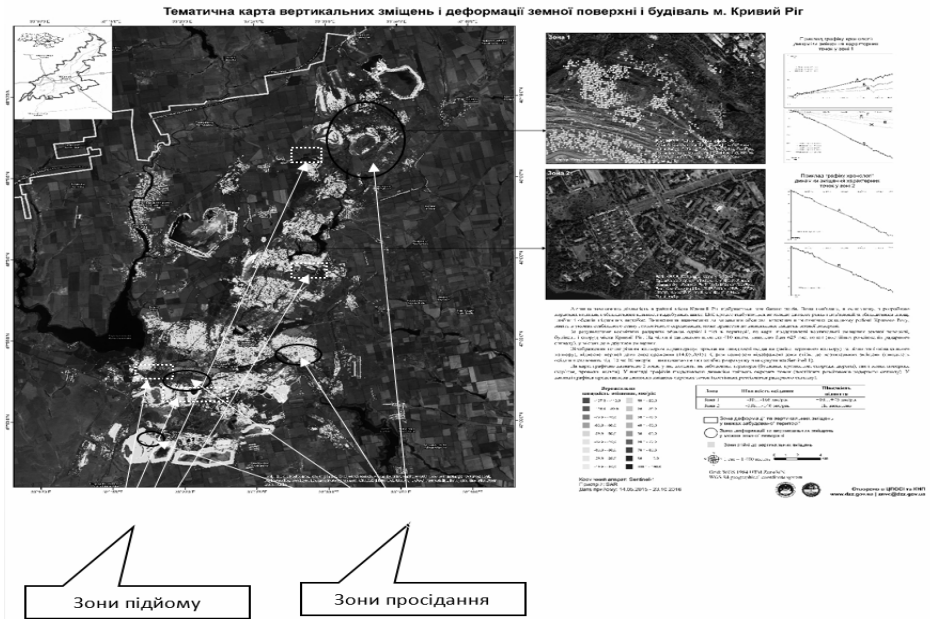


Рис. 5. Тематична карта інтерферометричних досліджень вертикальних зміщень і деформації земної поверхні і будівель у м. Кривий Ріг методом PS

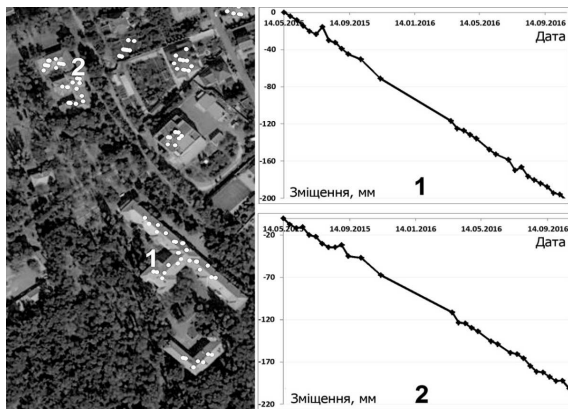


Рис. 6. Розраховані точки відбиття у м. Кривий Ріг по вул. Виноградова

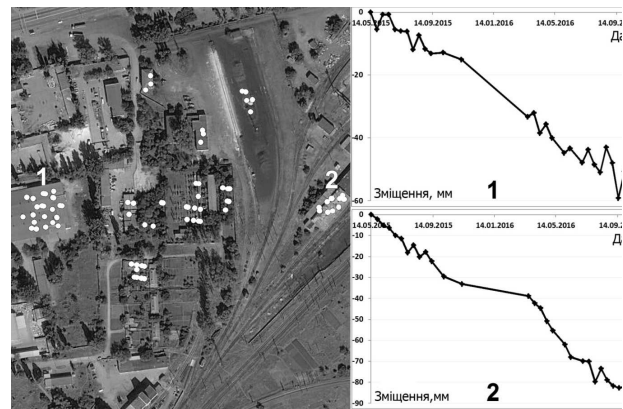


Рис. 7. Розраховані точки відбиття у м. Кривий Ріг по вул. Дніпровське шосе



Рис. 8. Тематична карта інтерферометричних досліджень вертикальних зміщень і деформації земної поверхні у м. Кривий Ріг методом SBAS

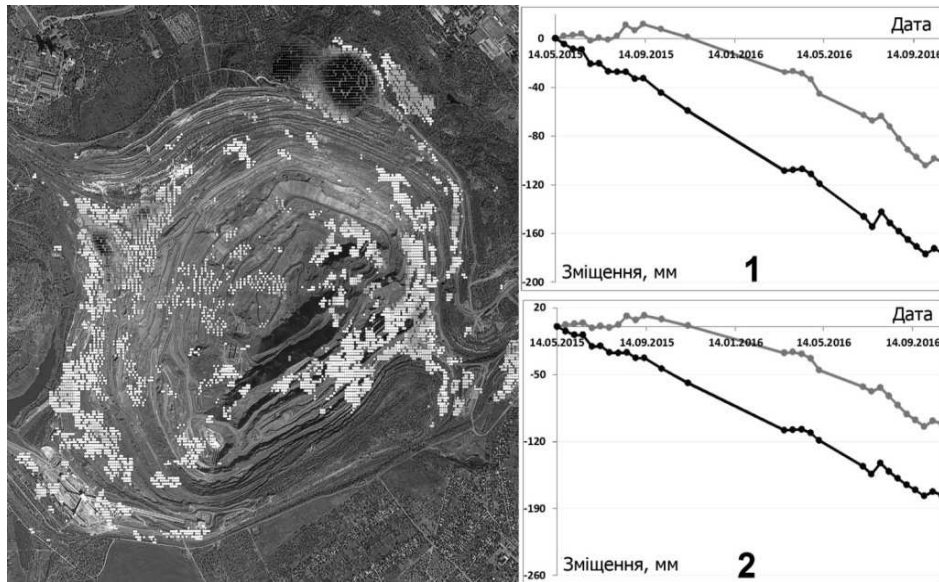


Рис. 9. Розраховані точки відбиття в зоні Першотравневого кар'єру

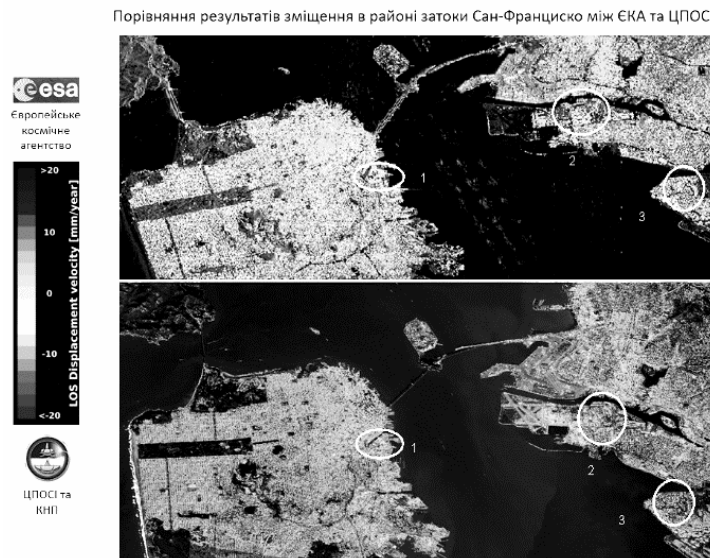


Рис. 10. Вибрані зони порівняльних інтерферометричних досліджень вертикальних зміщень і деформації земної поверхні затоки біля м. Сан-Франциско, США

Порівняння результатів зміщення навколо Вежі Тисячоліття в Сан-Франциско між ЄКА та ЦПОСІ



Рис. 11. Порівняльні інтерферометричні дослідження вертикальних зміщень і будівлі «Вежа Тисячоліття» у м. Сан-Франциско, США. Виявлена швидкість просідання близько 40 мм. за рік

Порівняння результатів зміщення залізничної станції в Осло між ЄКА та ЦПОСІ



Рис. 12. Порівняльні інтерферометричні дослідження вертикальних зміщень залізничної станції у м. Осло.
Виявлена швидкість просідання близько 15 мм. за рік

Критичні зони вертикальних зміщень, що виявлені фахівцями ЦПОСІ та КНП і фахівцями Європейського космічного агентства на вибраних знімках співпадають за місцем розташування та площею поширення.

Можна зробити висновок, що інтерферометричні дослідження вертикальних зміщень, що проведені в ЦПОСІ та КНП, відповідають результатам, що отримуються Європейським космічним агентством.

Висновки. Моніторинг земної поверхні за допомогою радарних даних космічного апарату з синтезованою Sentinel-1A апертурою з застосуванням інтерферометричних методів оцінки малих зсувів земної поверхні та споруд Persistent Scatterers та Small baselines interferometry дозволяє визначати критичні місця розвитку несприятливих геологічних процесів і може стати оперативним засобом напрацювання рекомендацій для прийняття управлінських рішень.

Отримані кількісні і якісні показники моніторингу не дають відповіді щодо процесів, що мають місце і призводять до вертикальних зміщень, але надають можливість оцінити масштаби та тенденції їхнього розвитку. Конкретизація в кожному окремому випадку може бути виконана наземними методами, що значно спрощує пошук місць з критичними параметрами вертикальних зміщень, які можуть мати негативні наслідки та призвести до надзвичайної ситуації.

Можливість всепогодного космічного моніторингу великих за обсягом територій з використанням безплатної космічної інформації значно зекономить державні кошти та дозволить створити ефективну систему попередження розвитку надзвичайних ситуацій.

ДКА у особі НЦУВКЗ (ЦПОСІ та КНП) проводить дослідження щодо створення такої системи моніторингу.

Список літератури:

1. О.Ю. Митропольський, М.Г. Демчишин, Є.О. Яковлев Техногенез і геодинаміка як фактори впливу на геологічне середовище території України // *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*, № 4, 2008 С. 5-14.
2. Інформаційне видання PROZAK (<http://prozak.info/>).
3. Інформаційне видання myvin (<http://www.myvin.com.ua/ua/news/region/26184.html>).
4. <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/107-2013-%D1%80>.
5. Інформаційне видання censor: (<https://censor.net.ua/p129640>).
6. Закон України «Про Загальнодержавну цільову програму захисту населення і території від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру на 2013-2017 роки» (Відомості Верховної Ради (ВВР), 2013, № 19-20, ст.173).
7. Б.А. Дворкин (Компания «Совзонд») Европейская программа GMES и перспективная группировка спутников ДЗЗ Sentinel // *Геоматика*, № 3, 2011. - С. 14 - 26.
8. Sentinel -1 User Handbook ESA Standard Document.
9. Rosen, P.A. Synthetic aperture radar interferometry / P.A. Rosen, S. Hensley, I.R. Joughin et al. // *Proceeding of IEEE*. 2000. - Vol. 88. No. 3. P. 333-380.
10. Hooper, H. Zebker, P. Segall, and B. Kampes: «A new method for measuring deformation on volcanoes and other non-urban areas using InSAR persistent scatterers». *Geophysical Research Letters*, vol. 31, December 2004.
11. P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, E. Sansosti: «A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline differential SAR Interferometry». *IEEE Aerospace and Electronic*, Vol. 40, No. 11, November 2002.
12. http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Satellites_confirm_sinking_of_San_Francisco_tower.

References:

1. O.Yu. Mytropol's'kyi, M.H. Demchyshyn, Ye.O. Yakovlyev *Tekhnohenez i heodynamika yak faktory vplyvu na heolohichne seredovyshe terytoriyi Ukrayiny* // *Ekolohiya dovyillya ta bezpeka zhyttyediyal'nosti*, № 4, 2008 S. 5-14.
2. *Informatsiyne vidannya PROZAK* (<http://prozak.info/>).
3. *Informatsiyne vidannya myvin* (<http://www.myvin.com.ua/ua/news/region/26184.html>).
4. <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/107-2013-%D1%80>.
5. *Informatsiyne vidannya censor*: (<https://censor.net.ua/p129640>).
6. *Zakon Ukraini «Pro Zagalnodержavnu tsilovu programu zahistu naseleння i teritoriy vid nadzvichaynih situatsiy tehnogenogo ta prirodnogo harakteru na 2013-2017 roki»* (Vidomosti Verhovnoyi Radi (VVR), 2013, № 19-20, st.173).
7. B.A. Dvorkin (Kompaniya «Sovzond») *Evropeyskaya programma GMES i perspektivnaya gruppirovka sputnikov DZZ Sentinel*. // *Geomatika*, № 3, 2011. - S. 14-26.
8. *Sentinel -1 User Handbook ESA Standard Document*.
9. Rosen, P.A. *Synthetic aperture radar interferometry* / P.A. Rosen, S. Hensley, I.R. Joughin et al. // *Proceeding of IEEE*. 2000. Vol. 88. No. 3. P. 333-380.
10. Hooper, H. Zebker, P. Segall, and B. Kampes: «A new method for measuring deformation on volcanoes and other non-urban areas using InSAR persistent scatterers». *Geophysical Research Letters*, vol. 31, December 2004.
11. P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, E. Sansosti: «A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline differential SAR Interferometry». *IEEE Aerospace and Electronic*, Vol. 40, No. 11, November 2002.
12. http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Satellites_confirm_sinking_of_San_Francisco_tower.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УКРАИНЕ МЕТОДАМИ И СРЕДСТВАМИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ

Ляска И.И., Пакшин М.Ю., Стасюк В.М.

Рассмотрены вопросы космического мониторинга зданий, сооружений, карьеров с целью выявления вертикальных смещений и своевременного принятия мер по предотвращению возникновения чрезвычайных ситуаций. Проведен обзор применения данных радиолокационной съемки космических аппаратов Sentinel-1 европейской системы дистанционного зондирования Земли Copernicus.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, мониторинг, экзогенные геологические процессы, чрезвычайные ситуации, интерферометрическая обработки данных.

INVESTIGATION OF THE STATE OF GEODYNAMIC PROCESSES IN UKRAINE BY METHODS AND MEANS OF RADAR SURVEY

I.I. Lyaska, M.Yu. Pakshin, V.M. Stasiuk.

The issues of space monitoring of the buildings, structures, quarries with the purpose of revealing vertical displacements and timely adoption of measures to prevent emergencies are considered. An overview of the use of data from the radar survey of the Sentinel-1 spacecraft of the European Copernicus remote sensing system.

Keywords: remote sensing of the Earth, monitoring, exogenous geological processes, emergency situations, interferometric data processing.

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 521.182+521.184]:629.783+519.622

Баранов Г.Л., Прохоренко О.М.,
Національний транспортний університет, м. Київ, Україна

КОНСТРУКТИВНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТІВ АВІАЦІЙНО-КОСМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЗА ПАРАДИГМОЮ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЇ ГРИ

Розроблена методика комплексного структурного моделювання складної динамічної системи гарантовано адаптивного управління об'єктів авіаційно-космічних технологій в умовах ризику та невизначеності факторів впливу природного зовнішнього середовища. Наведене структурно-функціональне забезпечення комп'ютерних засобів для розв'язку диференціально – ігрових задач N-гравців. Визначено умови безпечно-гарантованих траєкторій руху мобільних об'єктів з урахуванням одночасно спільної нелінійної дії N-гравців.

Ключові слова: безпечна траєкторія руху МТЗ, диференціально-ігрова апроксимація, без коаліційні рішення, зміни ситуацій, почергове управління, ресурси АКТ.

Вступ. Підсистеми моделювання динаміки функціонування об'єктів авіаційно-космічних технологій (АКТ) застосовують різні полієратичні виробничі організації ПЕВО у якості спеціалізованих систем підтримки прийняття рішень (СППР) [1-3]. Значна складність об'єктів АКТ та ракетно-космічної техніки (РКТ) вимагає від засобів їх моделювання завчасного (швидкого), повного (гарантовано-точного), ефективного (за мінімальних витрат ресурсів) отримання безпечних траєкторій руху конкретного маневреного транспортного засобу (МТЗ) в природних (звичайних, типових, надзвичайних) умовах впливу факторів зовнішнього навколишнього оточуючого середовища (ЗНОС) [1,2].

Звичайна обмеженість наявних TESIMFO ресурсів [2] додатково ускладнює методичне, математичне, програмне, інформаційне та техніко-технологічне забезпечення, що гарантує якість системного аналізу завдань, проектування необхідних зразків, випробування життєздатності компонент та синтезу нових структур відповідно унікальних конструктивних рішень стосовно актів дії у динамічних умовах, близьких до невизначених природних.

Унікальність кожної з космічних програм міжнародної кооперації полягає у нових наукових й практичних засобах функціонування вузлів, компонент, агрегатів, комплексів й систем інноваційної складної динамічної системи (СДС) [3-5].

Постановка проблеми. Удосконалення існуючих і створення нових об'єктів майбутньої АКТ й РКТ пов'язано з реалізацією важливих стратегічних завдань, наприклад національної космічної програми України [6]. Пошук конструктивних комплексних методів (ККМ) моделювання СДС для майбутніх інноваційних АКТ й РКТ безумовно є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сутність, особливості та специфіку процесу руху твердого тіла в просторово-часовому континуумі

(ПЧК) з активним впливом факторів впливу ЗНОС досліджувала дуже велика когорта закордонних і вітчизняних вчених [5-15]. Найбільш вагомий недолік відомих бортових програмно-апаратних комплексів (ПАК з використанням наявних сучасних багато ядерних процесів) пов'язаний з необхідністю витрат значних обчислювальних ресурсів [14] у режимах реального часу маневрування у зонах підвищеного ризику подій (ЗППП). Реальні запізнення на формування раціонального (безпечного корисного, ефективного) закону гарантовано-адаптивного управління (ГАУ) рухом МТЗ впливають на почергові акти дії з запобігання зіткнень, ухвалення від небезпек, попередження аварій та катастроф [1-5] кожної конкретної ЗППП на траєкторних маршрутах здійснення місії у ПЧК. Конструктивне подолання визначеного протиріччя між теоретичними можливостями тривалих наукових пошуків оптимального синтезу засобів ГАУ МТЗ [11,13,15] та реальними TESIMFO обмеженнями наявних ресурсів [14] бортових ПАК в режимах позаштатного екстреного маневрування [15] можливе лише за новою парадигмою прискорених символічних обчислень для СППР в АКТ.

Мета роботи полягає у розробці методики конструктивного моделювання об'єктів АКТ і РКТ з ефективним відображенням складної динамічної системи гарантованого адаптивного управління для активного формування програмно-безпечних траєкторій руху МТЗ в умовах ризику загрозливого впливу природних факторів ЗНОС. Умови багатозначних форм безпеки життя й функціональної стійкості ієрархічного управління гарантуємо за процедурами розв'язку диференціально-ігрових задач для N-гравців [12,13].

Постановка завдання. У процесі тривалого подолання ПЧК завжди природно існують ЗППП, коли фактори форс мажорних обставин набувають небажаних рівнів загроз для життя у формах катастрофічного руйнування МТЗ. Безпечно

гарантована траєкторія така, яка з'єднує початкові та термінальні цільові позиції неперервним чином. Вона на протязі усього маршруту під час ситуативної динаміки змін координат, буде задовольняти всім багатозначним критеріям функціональної стійкості. Якщо відповідна трубка з ε околom внутрішнього маневрування знаходиться на значних δ відстанях до максимальних градієнтів загроз, завад, збурень факторів ЗНОС, тоді які на деяких локальних напрямках програмний рух лише наближається до життєдіяльності області застосування АКТ.

Таким чином задача забезпечення неперервної у заданому ПЧК траєкторії рухом МТЗ майбутньої АКТ за всіма багатозначними N критеріями безпеки, якості та ефективності формується як пошук одночасно стратегічного, тактичного й локально оперативного розв'язку в умовах актів дії N -гравців незалежного, необмеженого, невизначеного ЗНОС.

Основний матеріал дослідження. Конструктивне моделювання СДС починається з базових визначень стосовно відношень між реальним природним об'єктом АКТ й РКТ та спрощеними цільовими частковими моделями. Адекватні робочі моделі забезпечують отримання корисного результату шляхом розв'язку відповідної конкретної задачі у межах комплексної складної задачної системи за потреб й вимог практики ПЕВО [3].

Пошук спрощених але результативних моделей СДС залежить від ефективності декомпозиції завдання на складові під задачі єдиної задачної системи. Відповідно ієрархічним рівням паралельних актів [14] дії автономного виконання визначаємо складові (вершини) на горизонтальних рівнях угруповання. Парні з'єднання вершин сусідів (ребра, гілки, шляхи) обов'язкові для ієрархічних форм обміну інформаційними сигналами за взаємозалежними мережними каналами інтеграції або спілкування [3, 12, 13] у ПЧК.

Формалізація цілей під задач. В залежності від конкретних задач ПЕВО, які застосовують АКТ й РКТ, можливі різні конкретизації кожної концептуально-семантичної цільової моделі (КСЦМ) СДС, як об'єкта моделювання. У нашому дослідженні (рис.1) доцільно формалізувати КСЦМ диференціальної гри згідно мінімаксними цілям типових тривіальних задач (ТТЗ) [4, 5], наприклад:

- мінімум витрат часу $\min_{i \in t} = \sum \Delta \tau_i$ на тривалий ситуативний вздовж максимально привабливої $\max_{j \in t} P = \sum \Delta P_j$ безпечної траєкторії перехід з одного S_0 в інший S_n стан;

- мінімум витрат (речовин, енергії, інформації, фінансів, кадрів) наявних ресурсів на реалізацію перетворень для змін попереднього $(i-1, i)$ стану по максимально якісній, ефективній,

безпечній траєкторії для досягнення наступного $(next\ i+1)$ термінального стану;

- мінімум похибок (без помилок при заданій достовірності) відхилення від обґрунтованої за правилами безпечної траєкторії з означеним околom цільового $(next)$ стану, який дозволяє максимально швидко повернутися на точну програмну (заздалегідь обґрунтовану) траєкторію подальшого руху МТЗ;

- мінімум ризику (risk) опинитись в іншому небажаному стані (пастка, лихо, форс-мажор) відносно безпечних бажаних еталонних якостей станів динамічної взаємодії за умов максимізації часових й просторових відстаней між загрозами, завадами, збуреннями факторів ЗНОС та корпусом й околom безпеки даного МТЗ;

- мінімум змін конструктивних параметрів засобів ГАУ МТЗ на процедурах переформування, переналадження, трансформації попереднього стану у наступний, більш кращий згідно максимальної прибутковості у термінальному стані за сукупністю відношень (якості результату – обсяги TESIMFO витрат) першочергових ефектів.

Наведений приклад часткових цілей не вичерпує можливі подальші форми КСЦМ. На даний час відсутня повна класифікація задачних систем та ТТЗ для АКТ й РКТ за парадигмою диференціальних ігор. КСЦМ дозволяють стверджувати, що оптимальна інтегрована траєкторія диференціальної гри відображається найкоротшим шляхом у відповідному фазовому просторі багато критеріальних оцінок обсягів витрат TESIMFO ресурсів [2, 4, 5, 13].

По кожному можливому критерію вибір серед інших оцінок відбувається за принципом отримання максимально можливого при мінімальних витратах, частки вирішального ресурсу. Тому інтегрована (сукупна з локальних ділянок ПЧК) траєкторія відповідає всім заданим ПЕВО критеріям (завданням, задачам, потребам, вимогам, обмеженням) з урахуванням реальних ЗПРП вздовж зовнішньої трубки вкладених динамічних змін для досягнення мети з позиції кожного учасника гри [12].

Загальна математична задача. У диференціальних іграх [12,13] гравці обирають різні види стратегій: «прогноз і контрпрогноз», рівноважні по Нешу, гарантуючі. Останні для гарантування стратегій N гравцями (Рис.1) формуються згідно принципу мінімакса:

$$\min_{U_i} \max_{U_{N/i}} I_i \quad (1)$$

де I_i – плата (оцінка якості дії) i -го гравця $\forall i = 1, N$ у вигляді функціоналів

$$I_i = \int_{t_0}^{t_k} F_i(x, y, u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_N) dt + H_i[x(t_k), y(t_k)] \quad (2)$$

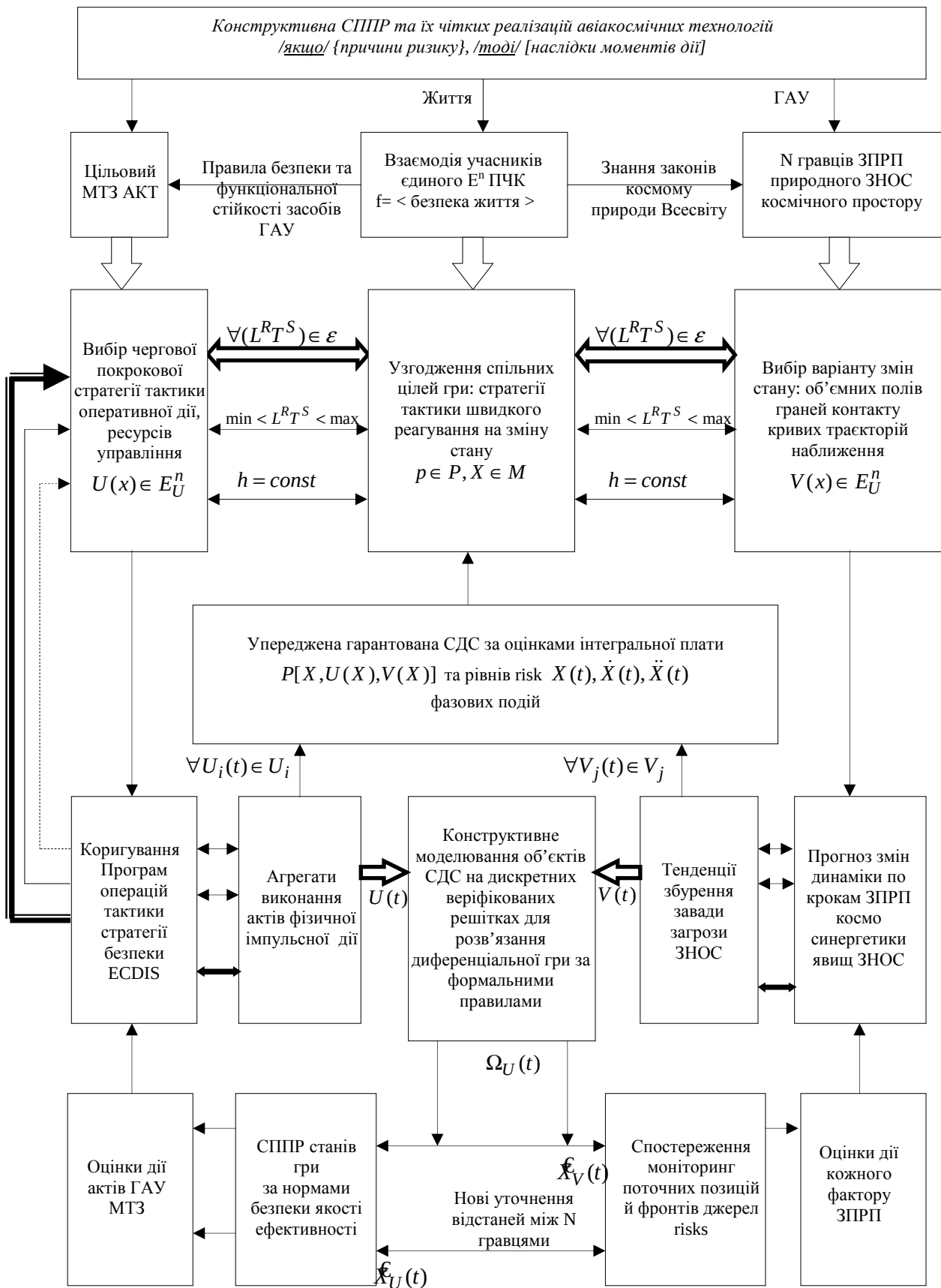


Рис. 1. Розподіл функцій диференціально-ігрової задачної системи між складовими типовими тривіальними задачами з формалізованими й верифікованими моделями адекватними головним об'єктам СДС під час руху об'єктів АКТ.

F_i задана функція оцінки якості перехідного процесу при змінах гри; H_i функція кінцевого стану, яка характеризує оцінку якості досягнення термінальної множини стану i -го гравця;

$u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_N$ відповідно управління (акти дії чи реалізації обраної конкретної стратегії) першого, другого та всіх інших включаючи N -го останнього гравця;

U_N / i - сукупність керуючих дій одночасно усіх $(N-1)$ крім i -го гравців.

При будь-якому реальному поведженні інших гравців i -й гравець може собі гарантувати лише результат обґрунтований у формі (1), (2). Крім того практично на акти дії гравців, тобто на їх можливі керуючі дії звичайно, існують фактичні техніко-технологічні обмеження

$$\begin{aligned} |u_1| &\leq u_{1m}, |u_2| \leq u_{2m}, \dots \\ &\dots, |u_N| \leq u_{Nm}, \end{aligned} \quad (3)$$

де $u_{1m}, u_{2m}, \dots, u_{Nm}$ - максимальні значення поточних керувань кожного з гравців відповідно до запасів власних TESIMFO ресурсів. Зміні стану об'єкта АКТ чи РКТ описується системою диференціальних рівнянь [11,15]. Для прикладу моделювання СДС у площині активної взаємодії двох гравців нелінійні диференціальні рівняння мають вигляд [4,5,13]:

$$dx/dt = f_1(x, y, u, v) \quad (4)$$

$$dy/dt = f_2(x, y, u, v) \quad (5)$$

де x, y - координати стану фізичного процесу СДС у обраній площині ОХУ з орієнтованими вісями; u, v відповідні керування (множина набрів) для ГАУ МТЗ та окрема множина впливів $(N-1)$ факторів ЗНОС; t - поточний час реальної взаємодії СДС на $t_0 \leq t \leq T$ інтервали моделювання від старту t_0 до досягнення у момент T термінального цільового стану.

Дана символізація наборів u, v підкреслює фізичну природну відмінність цільових актів управління u засобами ГАУ МТЗ, які адекватно реагують на всі v впливи багатьох (2) гетерогенних факторів ЗНОС. Природні фактори навпаки знижують ефективність роботи ГАУ завдяки додаткового витрачання ресурсів, що на борту МТЗ завжди обмежені. Тому вибір законів управління $u(z)$ відповідно впливів $v(z)$ за принципом мінімакса реалізується у класі нелінійних антагоністичних [13] ігор «людини» з «природою».

Таким чином застосування задачної диференціально-ігрової форми, принципу

мінімакса й розподілу ролей (функцій протидії) $u(z)$ і $v(z)$, дозволяє (рис.1) знайти керування. Безпека життя тоді гарантована динамічним процесом ухилення від загроз, завад лише засобами ГАУ МТЗ АКТ у випадках нештатного найгіршого збігу обставин сполучення дії декількох гетерогенних збурень ЗНОС. Такі маневри протидіють на час прийняття рішення з невідомим законом $v(z)$ зміни у ситуативно локальній ЗППП. Базова основна задача диференціальної гри полягає у визначенні трьох взаємопов'язаних складових: умовно оптимальних згідно заданих критеріїв стратегій (кроків керування чи актів дії) гравців; фазових траєкторій покрової взаємодії; ціни (плати, виграшів чи втрат) гри для кожного ключового (першого) гравця.

Базова структуризація компонент задачної системи. Відомі методи моделювання в диференціально-ігровій постановці вимагають значних витрат обчислювальних ресурсів СППР застосованих ПАК [13,14]. Це обумовлено наслідком необхідності одночасно здійснити синтез оптимальної багатозначної СДС. Повна система організації балістико-навігаційного забезпечення управління [11,15] та реалізації взаємозалежностей охоплює складні компоненти: поле можливих траєкторних рухів у ПЧК; варіації й ситуативно-випадкові композиції прояву впливів незалежних гетерогенних факторів ЗНОС; залежність оцінок для прийняття рішення кожним з гравців у залежності від інтегрованої плати-ціни за дискретний вибір конкретного шляху; системи управління базами структурованих даних та бібліотекою підпрограм розв'язку ТТЗ; спеціальною диспетчерською системою організації функціонування цілісного ПАК.

Запобігання відомих труднощів у рішенні даної задачі запропоновано реалізувати шляхом чіткої структуризації застосування компонент ПАК [3] по етапам:

- підготовчий з активною участю інтелектуального агента ПЕВО або особи, що приймає суттєві рішення для формування формалізованих структурних моделей й відповідних підпрограм розв'язку означених ТТЗ;
- налагодження й верифікація базових й оперативних моделей для кожної ТТЗ;
- оцінювання ефективності, якості розрахунків всіх необхідних критеріїв, ціни, ваги, плати по кожній компоненті задачної системи, що моделюємо [11,15];
- виконавчий, що реалізує отримані рішення для здійснення плану і алгоритми розв'язання ТТЗ по вказаним моделям;
- інтегруючий комплекс синтезу умов досягнення розв'язків по крокам всіх гравців;
- діагностуючий та контрольний для оперативного виявлення колізій, протиріччя, неузгодженості результатів й перетворень;
- заключний для візуалізації, збереження й

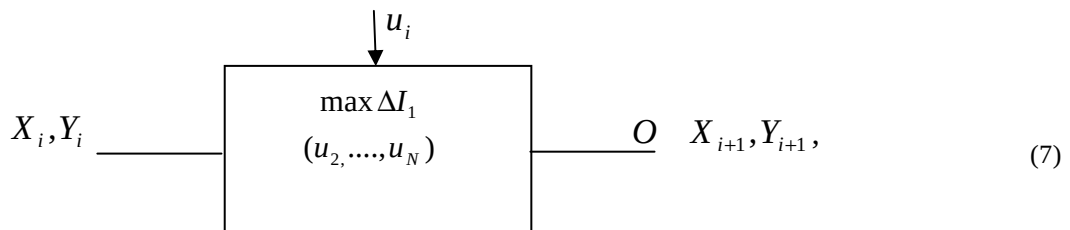
накопичення результатів рішення аналогічних диференціально-ігрових задач [7-18].

Базовий автомат обчислювач потрібен для знаходження найкоротшого шляху між початковим (start begin) і термінальним (finale end) цільовими станами задачного ПЧК.

Фазовий простір, який моделює стани реальних процесів СДС, відображаємо у вигляді покриття решіткою [4, 5, 13] заданої конфігурації: трикутного, прямокутного (квадратного), n -кутного.

Задачний простір в площині (XOY) з заданою орієнтацією осей $\vec{OX}$ та $\vec{OY}$ для прикладу (рис.2) накріємо (розмітимо) прямокутною решіткою з діагоналями. Це дозволяє застосувати методи теорії графів $G(B, Q)$, B - вершини вузли решітки, Q - множина ребер, гілок, що з'єднують сусідні вершини по горизонталі, вертикалі, діагоналі.

Стандартні рівняння горизонтальних, вертикальних, діагональних ребер графа з прямокутною решіткою [4, 5, 13] у вершині (x_i, y_i) стану позиції наступні:



де за умови максимізації збільшення плати першого гравця ΔI_1 та за набором керувань (актів дії) всіх інших $(N-1)$ гравців, два сусідніх стана (X_i, Y_i) та (X_{i+1}, Y_{i+1}) з'єднуються вказаним ребром, який має означену вагу (ціну, довжину). На кожному кроці дискретизації гри набір локальних керувань усіх гравців (крім першого ГАУ МТЗ АКТ), конкретизує відповідні чинники впливу факторів ЗНОС. Процес (крок у ПЧК) переходу стану гри з вершини (X_i, Y_i) до (X_{i+1}, Y_{i+1}) вздовж даного ребра, лише визначає вагу відповідно умові:

$$\max_{u_2, \dots, u_N} \Delta I_1(u_2, \dots, u_N) \quad (8)$$

де обов'язково враховані реальні обмеження (3) та особливості й специфіка розрахунків ваги горизонтальних, вертикальних, діагональних ребер графа-решітки. Розрахункові (6) формули отримуємо з виразів (2) після підстановки відповідної геометричної орієнтації параметрів (6), які A_i, B_i, a, β_k – константи заздалегідь відомі. За цих перетворень збільшення плати в процесі крокового переходу мають наступні рівняння:

$$x = V_{ar}, Y = A_i; x = B_i, y = V_{ar}; y = ax + \beta_k \quad (6)$$

де A_i, B_i, a, β_k – константи для відповідної поточної позиції визначення найближчого сусіда відносно центра околу подій локальної ЗПРП.

У реальному процесі функціонування СДС, модель у вигляді (4) і (5) визначає зміни станів за координатами (X, Y) .

Можливі на кроці переходу стану гри з однієї вершини графа у сусідню (іншу) або навпаки. Тому сусідні вершини графа уявно закріплюють два ребра відповідних спрямувань та можливо й з різними вагами.

Розрахунок кожної ваги (довжини, міри) ребер графа здійснюємо за умов максимізації збільшення плати першого гравця (ГАУМТЗ) за набором впливів всіх факторів ЗНОС (інших незалежних гравців природи у процесі переходу стану гри з означеної вершини графа в іншу, що з'єднується даним ребром. Стандартний крок моделювання переходу стану гри у ПЧК вздовж ребра пояснює схема:

$$\Delta I_{1,z} = \int_{B_l}^{B_{l+1}} G_x(x, A_i, u_2, \dots, u_N) dx, \quad (9)$$

$$\Delta I_{1,e} = \int_{A_m}^{A_{m+1}} G_y(y, B_i, u_2, \dots, u_N) dy, \quad (10)$$

$$\Delta I_{1,d} = \int_{B_m}^{B_{m+1}} G_x(x, \alpha, \beta_k, u_2, \dots, u_N) dx, \quad (11)$$

де індекси z, e, d вказують спрямування відповідно горизонтальних, вертикальних і діагональних ребер з відповідними діапазонами інтегрування по змінному параметру.

У всіх випадках коли локальне керування першого гравця не задовольняє обмеження (3) за наявних бортових ресурсів, це означає, що перехід стану гри уздовж такого конкретного ребра неможливий.

Сигналізація про це управління реалізується для горизонтальних, вертикальних, діагональних ребер графа функціями заборони:

$$\delta_z = \begin{cases} 1, & |u_{1z}| \leq u_{1\max}, \\ 0, & |u_{1z}| > u_{1\max}, \end{cases} \quad (12)$$

$$\delta_e = \begin{cases} 1, & |u_{1e}| \leq u_{1\max}, \\ 0, & |u_{1e}| > u_{1\max}, \end{cases} \quad (13)$$

$$\delta_o = \begin{cases} 1, & |u_{1o}| \leq u_{1m}, \\ 0, & |u_{1o}| > u_{1m}, \end{cases} \quad (14)$$

де $u_{1\max}$ – реальний запас ресурсу, що за розрахунком оцінки потреб може витрачатися стандартним чином на відповідну форму переходу.

Налагодження оперативних моделей. Базову основу математичної моделі складають рівняння (1÷14). Символьні перетворення дозволяють отримати явні формалізовані формули. Диференціальні рівняння динаміки у вигляді (4) та (5) дозволяють без втрати точності отримати частинну похідну:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{f_2(x, y, u, v)}{f_1(x, y, u, v)} \quad (15)$$

де всі змінні й координати стану фізичного процесу СДС зберігають ідентичність початкової задачі моделювання. Керування першого гравця з урахуванням (15) перетворимо у функцію залежності від координат стану x, y , похідної $\frac{dy}{dx}$ та керувань всіх інших учасників гри у вигляді:

$$u_1 = U(x, y, \frac{dy}{dx}, u_2, \dots, u_N) \quad (16)$$

Плату першого гравця згідно рівняння (2) представимо відповідно у двох формах:

$$I_x = \int_{X_0}^{X_k} G_x(x, y, u_1, u_2, \dots, u_N) dx + H(X_k, Y_k) \quad (17)$$

$$I_x = \int_{y_0}^{Y_k} G_y(x, y, u_1, u_2, \dots, u_N) dy + H(X_k, Y_k) \quad (18)$$

де нові розрахункові функції $G_x(\bullet) = F_1(\bullet) / f_1(x)$ та $G_y(\bullet) = F_1(\bullet) / f_2(x)$ враховують алгебраїчну розбіжність між функціями (2) оцінок якості моделювання перехідних процесів та іншими функціями динаміки реальних природних явищ СДС, які відображають формальні відношення (4) та (5) відповідно; $X_k = X(t_k)$ та $Y_k = Y(t_k)$ значення позиції на час t_k закінчення гри; $H(X_k, Y_k)$ – особа функція термінального кінцевого стану, коли гра досягає многовиду M [4,5,13]. Конкретизація під кожен задачу практики з отриманням розрахункових функцій $G_x(\bullet)$ та $G_y(\bullet)$ дозволяє їх застосовувати при структурній параметризації по формулам (9), (10), (11) для ребер пошукових проміжних станів фазової траєкторії. Коли починаємо наближатись до кінцевого стану, тоді потрібно враховувати

$H(X_k, Y_k)$ з урахуванням (2), (17), (18). Розрахункові формули отримуємо шляхом підстановки в них рівнянь (6) для реалізації умов особі вершини кінцевого стану гри. Верифікація і контроль формалізованих моделей, структур, алгоритмів ТТЗ завжди виконується на текстових задачах.

Приклад моделювання по графах безкоаліційної гри $N=3$ [5]. Динаміка зміни стану гри має фізичний сенс у вигляді рівняння:

$$dx/dt = -y; \quad dy/dt = 5u_1 + 2u_2 + u_3, \quad (19)$$

де на керування всіх гравців дано обмеження $|u_i| \leq 1, i=1,2,3$; стан гри початок ($X_0 = 4, Y_0 = 0$), кінець ($X_k = Y_k = 0$). Квадратна решітка з одиничним $h_x = h_y = 1$ кроком (Рис.2). Виключаємо час з рівнянь (19), отримуємо (15) у вигляді:

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{5u_1 + 2u_2 + u}{y} \quad (20)$$

Диференціальна гра на швидкодію має функціонали у вигляді:

$$I_i = \int_{t_0}^{t_k} dt; \quad I_x = -\int_{x_0}^{x_k} \frac{dx}{y}; \quad I_y = -\int_{y_0}^{y_k} \frac{dy}{5u_1 + 2u_2 + u_3}; \quad (21)$$

На двох наборах граничних керувань гравців маємо значення векторів:

$$\begin{aligned} [u_1 = 1, u_2 = -1, u_3 = -1] \text{ та} \\ [u_1 = -1, u_2 = 1, u_3 = 1] \end{aligned} \quad (22)$$

Тоді мінімальне значення функціонала (20) приймає вигляд:

$$dy/dx = 2/y \quad (23)$$

Принцип мінімакса для функціоналів (21) у даній задачі:

$$\begin{aligned} \min_{u_1} \max_{(u_2, u_3)} \int_{x_0}^{x_k} \frac{dx}{-y} \text{ та} \\ \min_{u_1} \max_{(u_2, u_3)} \int_{y_0}^{y_k} \frac{dy}{5u_1 + 2u_2 + u_3} \end{aligned} \quad (24)$$

Розрахунок ваги ребер графа відповідає умовам:

$$0 \leq \left| \frac{dy}{dx} \right| < \frac{h_y}{2h_x} \text{ або } 0 \leq \left| \frac{2}{y} \right| < \frac{1}{2} \text{ горизонтальні,} \quad (25)$$

$$\frac{h_y}{2h_x} \leq \left| \frac{dy}{dx} \right| = 2 \frac{h_y}{2h_x} \text{ або } \frac{1}{2} \leq \left| \frac{2}{y} \right| \leq 2 \text{ діагональні,} \quad (26)$$

$$\left| \frac{dy}{dx} \right| > 2 \frac{h_y}{2h_x} \quad \text{або} \quad \left| \frac{2}{y} \right| > 2 \quad \text{вертикальні.} \quad (27)$$

Якщо умови (25) не виконуються, то горизонтальні будуть заборонені. На квадратній решітці (Рис. 2) тани ребра блокуються лише тонкі лінії. Діагональні ребра згідно (21) на кроці розраховуємо за даними [5]:

$$\Delta I_{km} = \ln \left| \frac{B_{m+1} + \beta_k}{B_m + \beta_k} \right| \quad \text{або} \quad \Delta I_{km} = \ln \left| \frac{X_{i+1} + 1}{X_i + 1} \right| \quad (28)$$

де вага діагоналі $Y = x + 1$, $\forall x_i = 0, 1, 2, 3$; $x_{i+1} = 1, 2, 3, 4$. Всі діагональні ребра з вершинами (Рис. 2) на осі абсцис а також ребра, що вище рівня $Y_i = 4$, будуть заборонені згідно (26). Для вертикальних ребер графа, всі що вище горизонталі заборона згідно (27). Робочі вертикальні ребра за умов наборів управління (22) всі мають вагу 0,5 та знаходяться між віссю абсцис $Y = 0$ й горизонталлю за умов (27). Дерево розв'язку задачі мінімальних шляхів від кореня ($x_0 = 4$, $y_0 = 0$) до кінця відображено на Рис.2 жирними орієнтованими векторами руху. Коло кожної раціональної вершини графа вказує час, що потрібен для гарантованого (безпечного за кількома критеріями) переміщення у просторі станів під дією управління першого гравця та максимальним “протидіям” інших двох гравців. Контрольна для тестування задача (19) має точний аналітичний розв'язок:

$$\begin{cases} Y^2 = 4x & \text{при } 0 \leq x \leq 2 \\ Y = 16 - 4x, & \text{при } 2 \leq x \leq 4, T = \sum_{\Delta} t = \sqrt{8} \approx 2,83 \end{cases} \quad (29)$$

Порівняння аналітичного (29) та апроксимаційного (рис.2) розв'язків [5] наведено на рис.3, де точний розв'язок визначено пунктиром. Вздовж оптимального шляху визначені набори управління всіх гравців (рис.3). Вони співпадають з точними значеннями стратегій для кожного. Тестові задачі дозволяють вибирати масштаби та кроки дескретизації відповідно особливостям й специфіці конкретній диференціально-ігровій задачі. Моделювання на графах за допомогою адекватних моделей дозволяє швидко (завчасно) стримувати суттєві знання стосовно гарантованої якості прийняття рішень для реалізації стрибкоподібних (real time) маневрів за нелінійними законами ГАУ МТЗ АКТ. Візуалізовані графічні складові рішення чітко розподіляють зони нелінійного руху й звертають увагу на причини тенденцій зростання похибок, що поки належать заданому допуску.

Паралельні обчислювання [14] у задачах диференціальних ігр доцільні для засобів

реального часу ГАУ МТЗ АКТ, для яких поняття безпеки життя, гарантування, стійкості, точності, прогнозу, ефективності, й економічності взаємозалежні [4,5].

Запропонований метод структурної декомпозиції складної задачної системи диференціальної гри N гравців та моделювання гри на графах-решітках, що покривають повний фазовий простір станів у ПЧК, дозволяє отримувати рішення (Рис.1) на відомих ЕОМ, паралельних обчислювальних системах та гібридних комплексах з раціональним розподілом функцій учасників ПЕВО, наприклад, для управління космічними апаратами [15].

У аналогових моделях вага (8) ребер графа задається часом затримки між моментом приходу електричного сигналу на вхід моделі ребра та моментом його появи на її виході. Тривалість інтервалу часу проходження електричного сигналу між початковою і кінцевою вершинами графа буде визначатися саме конфігурацією найкоротшого шляху для пропорційного мінімаксного значенню плати (1) першого гравця.

У цифрових моделях з запам'ятовуючими багатоядерними пристроями за адресами, що задають значення наборів керувань гравців, існують ефективні методи розв'язання цієї ТТЗ. Бібліотека ПАК має апробовані [16] алгоритми, що додатково враховують різноманітні аспекти безпеки та інших критеріїв “найкоротшого” транспортного шляху. Гарантуюча стратегія першого гравця обґрунтовується покроковими наборами найгірших (за наслідками для першого) набору актів дії всіх інших гравців. Коли треба аналогічно з позицій будь-якого іншого активного гравця (наприклад хакера, інсайдера, агента протидії) можливо для СППР визначати гарантуючі стратегії таких гравців заздалегідь та упереджено ухилятися від них. Багато задач практики [17,18] дозволяють за принципом мінімакса обирати набір гарантуючих керувань у запропонований нами спосіб (рис.1) одночасно на N апробованих, спеціалізованих, адаптованих графах. Саме це доцільно для додаткового контролю точності апроксимації при побудові графів-решіток різних ЗПРП та для стратегічних, тактичних й оперативних задач, сукупність яких глобально оптимізує витрати TESIMFO ресурсів на реалізацію конкретних АКТ-РКТ у ЗНОС.

Накопичення знань безаварійних рухів МТЗ та різноманітних космічних апаратів стосовно процедур прогнозування їх гарантованих траєкторій у штатних та екстремальних режимах функціонування є важливою діяльністю вітчизняних ПЕВО космічної галузі включаючи Національний центр управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України.

Висновки. Якісне гарантування безпечного руху космічних апаратів у нестационарному аерокосмічному середовищі запропоновано здійснювати за парадигмою диференціальної гри.

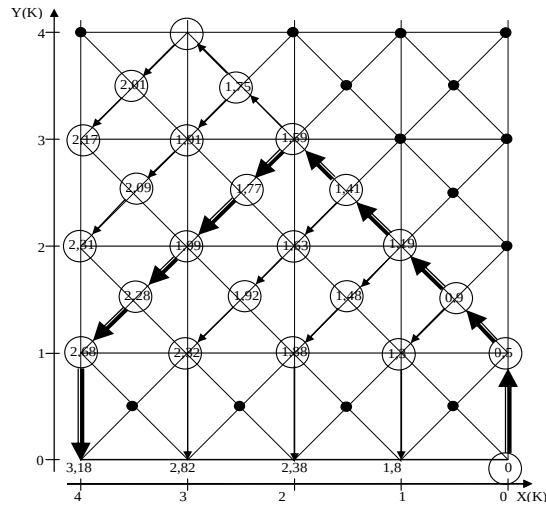


Рис.2. Візуалізація апроксимаційного графа – решітки з деревом мінімаксних розв'язків можливих орієнтовних шляхів та околom заборони сусідніх вершин й ребер без оцінок значення досягнення умов тестової задачі: $N=3$; $\frac{dx(t)}{dt} = -y$; $\frac{dy(t)}{dt} = 5U_1 + 2U_2 + U_3$, керування: $U_{m1} = \pm 1$; $U_{m2} = \pm 1$; $U_{m3} = \pm 1$.

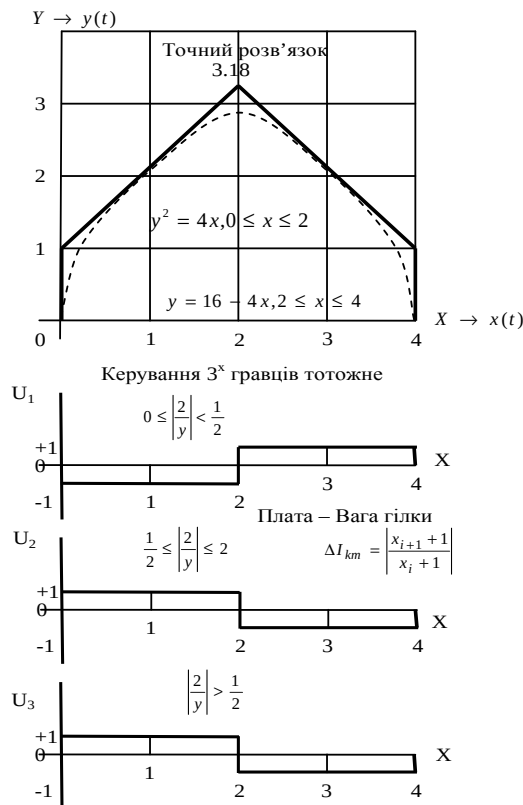


Рис.3. Графічне порівняння аналітичних (пунктир) та апроксимаційних (жирні) розв'язків траєкторій й стратегічне точних керувань 3х гравців у тестовій задачі: $\frac{dy(t)}{dx(t)} = \frac{(5U_1 + 2U_2 + U_3)}{y} = \frac{2}{y}$; $\Delta I_{im} = \frac{1}{y_i}$

Отримані результати дослідження дозволяють сформулювати наступні висновки.

1. Кожний етап чи крок структуризації складних динамічних систем та практичної задачної системи спрямований на формування типових формалізмів з конструктивних ефективних моделей. Вони забезпечують застосування паралельних алгоритмів та обчислювальних структур для гарантовано

адаптивного управління за вимогами реального часу реалізації авіаційно-космічних та ракетно-космічних технологій. СДС та ЗНОС, а також КСЦМ як засоби взаємодії між ними, моделюємо паралельними базисними макромоделями, які уточнюються деталізованими мікромоделями з типових елементів.

2. Структурне комплексне моделювання СДС за парадигмою диференціально-ігрових задач потребує