

УДК 621.396.969

Л.Б. Каневський, к.т.н.

С.В. Ковбасюк, к.т.н., с.н.с.

*Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова
Державного університету телекомунікацій*

ЗАСТОСУВАННЯ ОПТИЧНИХ ЗАСОБІВ СПОСТЕРЕЖЕННЯ З МЕТОЮ КОНТРОЛЮ КОСМІЧНОГО ПРОСТОРУ В УКРАЇНІ

У статті було проаналізовано можливості використання оптичних засобів спостереження. Запропоновано алгоритм просторово-часової оцінки траєкторії космічних об'єктів з метою визначення та подальшого ефективного планування сеансів пасивного оптичного спостереження. Наведено результати імітаційного моделювання.

Ключові слова: оптичні засоби, космічні об'єкти, контроль космічного простору.

Вступ. Досвід сучасних війн і воєнних конфліктів та проведений аналіз тенденцій розвитку форм і способів збройної боротьби свідчить про важливість оперативного і точного інформаційного забезпечення всіх органів і структур, які належать до системи національної безпеки України.

Виконання заходів зміцнення обороноздатності держави на сьогодні проводиться в умовах реалізації Державної комплексної програми реформування і розвитку Збройних Сил України. Основними питаннями даних заходів [1] є: створення системи моніторингу національної безпеки, впровадження механізму оперативного реагування на ризики та загрози національній безпеці, забезпечення функціонування єдиних форм інформування керівників центральних і місцевих органів виконавчої влади про розвиток ситуації в різних сферах національної безпеки. Вирішення таких завдань свідчить про необхідність та важливість розвитку космічної галузі держави, яка проводиться відповідно до інших законодавчих документів [2]. При цьому окреме місце займає питання контролю космічного простору, забезпечення якого є актуальним як для військових завдань, так і для розвитку комерційних послуг космічної галузі на світовому ринку.

Постановка проблеми. Одними з головних споживачів космічної інформації (космічної розвідки) є розвідувальні органи, розвиток яких спрямований на підвищення ефективності розвідувальної й інформаційно-аналітичної діяльності. На сьогодні розглядається два напрямки: розвиток технічних засобів розвідки, зокрема її космічної складової, і другий напрямок – це створення окремих аналітичних підрозділів космічної розвідки, основною сферою діяльності яких є здобуття, аналіз та обробка даних космічної інформації з подальшим інформуванням вищого державного керівництва країни і Збройних Сил України з таких питань [3]:

- стан і характеристики військових формувань, військових і стратегічних об'єктів певних країн;
- виникнення кризових ситуацій в різних районах Земної кулі з метою прогнозування і контролю їх розвитку;
- надання даних про наслідки екологічних катастроф, які можуть потенційно негативно вплинути на екологічну обстановку в Україні;
- розвідувальне забезпечення миротворчих контингентів;
- інформаційно-розвідувальне забезпечення у випадку кризових ситуацій поблизу кордонів України;
- відстеження стану і змін орбітальних угруповань країн світу з подальшою оцінкою космічної обстановки.

На жаль, проблем у космічній галузі держави з вирішенням суто військових завдань на користь національної оборони є чимало: недофінансування основних установ держави, відсутність власних сучасних військових космічних засобів розвідки (нині використовуються переважно можливості іноземної космічної техніки та інформація з апаратів подвійного призначення), відсутність безпосередньо військового управління наземними засобами контролю космічного простору України щодо відстеження стану і змін орбітальних угруповань країн світу (такі засоби повністю передані на баланс та для використання Державному космічному агентству України).

Розглядаючи питання можливостей системи контролю й аналізу космічної обстановки неможливо не звернути увагу на ще ряд проблем, основною з яких є технічна можливість застосування наявних в Україні наземних засобів спостереження (радіолокаційних, радіотехнічних, оптичних та оптико-електронних), використання яких є необхідним не лише за своїми супутниками, а здебільшого за іноземними космічними апаратами і об'єктами штучного походження, що вже відпрацювали свій ресурс. На сьогодні в Україні такі завдання можливо виконувати лише оптичними засобами спостереження (ОЗС), аналіз роботи яких на предмет ведення каталогу космічних об'єктів (КО) є мало дослідженим, що не дозволяє цілком використовувати їх потенціал для завдань контролю космічного простору.

Враховуючи той факт, що специфіка сучасного стану космічної діяльності України полягає у значній невідповідності досягнутого рівня космічних технологій ефективності їх використання, то існує необхідність розроблення якісно нової моделі провадження космічної діяльності відповідно до сучасних умов та національних інтересів, яка дасть змогу втілити в життя взаємопов'язані інноваційні рішення, узгодити питання, що виникли у зв'язку з багатофункціональністю космічної діяльності.

Метою статті є дослідження можливостей застосування однопозиційних ОЗС для оперативного контролю космічного простору України з частковим вирішенням завдання ефективного планування їх застосування.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Велика кількість робіт [4–6] була спрямована на покращення точнісних характеристик початкових умов руху космічних апаратів при вторинній обробці траєкторної інформації. Дані роботи здебільшого були спрямовані на розробку різноманітних математичних прийомів обрахунку і, як правило, базувалися на кінцево-різницевих методах розрахунку.

У [7–12] розглянуто можливості використання ОЗС, зокрема в [7] показано як теоретичні, так і практичні дослідження щодо підвищення проникної здатності телевізійних ПЗС-матриць при спостереженні низькоорбітальних космічних об'єктів в полі зору оптичних засобів спостереження. У [8] – оперативні методи обробки траєкторних даних в автономному ОЗС та у складі багатопозиційної оптичної системи, [9] запропоновано метод обробки прийнятої оптичної інформації, який базується на обробці серії ПЗС-кадрів, де передбачена попередня обробка кадрових дефектів (відкидання «битих» та «гарячих» пікселів) з подальшим накопиченням сигналу, що дає змогу здійснювати визначення космічних об'єктів зі слабкою яскравістю. Технічні пропозиції, щодо розширення можливостей спостереження астрономічних обсерваторій за природними небесними тілами та дослідження навколишнього простору викладено у [10–12]. За результатами роботи установ-учасників української мережі оптичних спостережень [13], до яких увійшло 11 наземних станцій оптичного спостереження, де було виявлено здатність їх роботи на різних типах орбіт, сформовано зведений каталог космічних об'єктів, але при цьому не було проаналізовано впливу природного явища тіні Землі на оперативне та точне отримання інформації про параметри руху КА для ведення каталогу КО саме ОЗС.

Тінь Землі – це частина простору, в яку не потрапляє пряме сонячне проміння через його блокування тілом Землі [14]. Воно має форму, яка майже не відрізняється від круглого конуса, що має вершину, віддалену від Землі приблизно на 1,4 млн. км.

При входженні штучних супутників Землі в її тінь вони зникають з поля зору ОЗС. Існує думка, що на низьких орбітах такі спостереження взагалі є неможливими, адже тінь Землі простягається на значні відстані з великим діаметром її зрізу на них. Доказом цього є Місяць, що обертається навколо Землі, та його затемнення, яке спостерігається на поверхні Землі з приблизною відстанню 384400 км, тобто набагато вище, ніж високоеліптичні штучні супутники Землі. Найпростіші геометричні розрахунки вказують на те, що на відстані приблизно 1382030 км від центру Землі радіус напівтіні складає приблизно 11870 км, що в 1,9 раза більше за радіус Землі. Штучні супутники літають на відстані набагато меншій за 1,4 млн. км, але слід зауважити, що просторове коло розрізу конуса тіні Землі на небесну сферу залежатиме від багатьох факторів: широти місця ОЗС, його тактико-технічних характеристик та часу доби (нічний сеанс спостереження), тобто відповідь на питання «чи можливо оптичними засобами України спостерігати за низькоорбітальними КО та окремо один від одного проводити ефективну обробку траєкторної інформації?» можливо отримати шляхом додаткових досліджень.

Викладення основного матеріалу. На практиці при веденні (оновленні) каталогу КО шляхом застосування ОЗС, як правило, важливу роль відіграє точне та оперативне вирішення задач з наближеним рішенням нульового чи першого порядків. Метод розв'язку таких задач у більшості випадків зводиться до прямих числових методів. Але навіть за наявності обчислювальних машин, які забезпечують високу швидкість математичних обрахунків, при проведенні статистичного аналізу з розв'язання великої кількості задач попередньої оцінки, шуканий результат виявляється достатньо ресурсоємним та довготривалим. Зважаючи на обмеженість території України, кількість вимірювачів, погодні й добові обмеження їх функціонування, отримання точних даних про рух КО зі збільшенням пропускну здатності системи для забезпечення повноти ведення каталогу КО необхідно здійснювати в межах інтервалу спостереження на одному мірному витку, за умови:

$$t_{c\ddot{a}} \leq 10 \text{ хв.}, \text{ при } t_{I\dot{C}\ddot{N}} \rightarrow \max, \quad (1)$$

де $t_{c\ddot{a}}$ – час розв'язання задачі визначення параметрів руху КО; $t_{I\dot{C}\ddot{N}}$ – час спостереження КО в зоні контролю космічного простору ОЗС.

З метою підвищення точності та оперативності визначення параметрів руху КО за даними ОЗС доцільним є використання розробок, запропонованих в [15], але, враховуючи повноту ведення каталогу КО, що приблизно становить 15000 об'єктів, навіть при диференційованому підході за важливістю КО вимагає більш якісного підходу до застосування ОЗС.

Наприклад, при розгляді штучного супутника, що обертається навколо Землі по еліптичній орбіті, виникають завдання, що потребують вирішення, а саме: визначення моментів проходження КО через висхідний та низхідний вузли, моментів входу в тінь Землі і виходу з неї, моментів часу початку і кінця роботи ОЗС. Такі завдання можуть бути вирішені, якщо їх обробку проводити складними методами числового аналізу, тобто шляхом числового інтегрування рівнянь динамічного руху КО з перевіркою на кожному кроці інтегрування виконання умови перебування супутника у вузлі, у тіні Землі тощо. Очевидно, що таким способом можна отримати очікувані результати розв'язку цих задач з великою витратою часу.

При розв'язку задач вказаного типу із застосуванням спрощених методів, що базуються на виборі відповідних систем координат [16] та їх змінних, неважко отримати кеплереві рішення з більш високою швидкістю в аналітичному вигляді:

$$\dot{A} = \gamma \pm \arccos \left[\frac{\beta e + \cos \psi}{\sqrt{(\beta + e \cos \psi)^2 + (1 - e^2) \xi^2}} \right], \text{ при цьому } 0 \leq \dot{A} \leq 2\pi, \quad (2)$$

де e – ексцентриситет; ψ – кут, що характеризується точкою на орбіті КО та напрямками на його радіус-вектор r і радіус-вектор Сонця R ; γ , β , ξ – допоміжні кути, що визначаються за виразами [17]:

$$\sin \gamma = \frac{(1 - e^2) \xi}{\sqrt{(\beta + e \cos \psi)^2 + (1 - e^2) \xi^2}},$$

$$\beta = \frac{PR}{|R|}, \quad \xi = \frac{QR}{|R|}.$$

де P та Q – ортогональні одиничні вектори, що класично визначаються за параметрами орбіти КО в прямокутній системі координат, з яких вектор P спрямований на перицентр, а вектор Q розміщений в площині орбіти і спрямований у бік збільшення істинної аномалії.

Рівняння (2) дає змогу визначати два граничні значення ексцентричної аномалії, що відповідатимуть моментам часу, необхідним для ввімкнення системи спостереження ОЗС за заданим сектором освітленого сонячним промінням космічного простору та другого моменту часу, за яким подальше спостереження космічного простору ОЗС є недоцільним через тінь Землі. Безпосереднє визначення таких моментів часу можна провести за виразом:

$$t_i = \frac{E_i - e \sin E_i}{k a^{\left(\frac{-3}{2}\right)} \sqrt{\mu}} + T; \quad i = 1, 2, \dots, \quad (3)$$

де T – час проходження КО через перицентр; k – гравітаційна стала; μ – сума мас Землі та КО; a – велика піввісь орбіти планети.

Отримані таким чином аналітичні вирази можуть породжувати твердження, що розв'язок в даних межах є лише наближеним і не може забезпечувати достатньої точності моментів ввімкнення та вимкнення оптичних засобів, щодо спостереження за КО. В умовах розосередженості ОЗС лише на території України та з урахуванням впливу часового інтервалу спостереження траєкторії руху КО на різних висотах (табл. 1) з урахуванням виразу (1) виникає завдання ефективного планування застосування ОЗС за рахунок прогнозованого визначення максимальних інтервалів супроводження КО.

Таблиця 1

Залежність точнісних характеристик визначання параметрів руху КО від часового інтервалу спостереження при моделюванні різних типів орбіт

Тип орбіти	Повний час спостереження, хв.	Характеристики щодо точності	Варіант часу вимірювання		
			1 хв.	2,5 хв.	весь час в зоні спостереження
Низька колова	3,9	σ_r , км	3,538	1,457	0,412
		σ_v , км/с	$5,2 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$
Середня колова	7,4	σ_r , км	1,997	0,781	0,235
		σ_v , км/с	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$0,4 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Еліптична	5,5	σ_r , км	3,048	1,172	0,305

в перигеї		σ_v , км/с	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$
Еліптична в апогеї	10,2	σ_r , км	1,897	0,677	0,218
		σ_v , км/с	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$0,4 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$

Слід зазначити, що якщо на початку вирішення відповідної задачі використати теорію збурень [17] і отримати відповідно шукані моменти часу, а потім уточнити їх шляхом представлення у вигляді рядів, величини яких в дійсності не є постійними, то при проведенні аналізу з використанням збурюючих елементів кеплерової орбіти з подальшим ітераційним розв'язок таких задач дозволить отримати більш точніший результат за рахунок використання уточнених елементів. Такий процес можна продовжувати доти, поки не буде досягнута бажана точність. У випадку використання ОЗС такий спосіб, як і попередній, не виправдовує себе у швидкодії. Один з даних недоліків і має система LEO [18], що структурно складається з 7 ОЗС, кожна з яких містить 3 телескопи.

Розглядаючи дану методику відбору статистичних даних з прив'язкою до каталогу КО та з метою підвищення оперативності планування сеансів спостереження ОЗС пропонується алгоритм просторово-часової оцінки траєкторій КО, придатних для пасивного оптичного спостереження, що базується на побудові багатовимірних просторово видимих траєкторних зон та послідовному визначенні їх спільних часових точок спостереження.

Алгоритмом просторово-часової оцінки траєкторій КО, придатних для пасивного оптичного спостереження передбачається:

- ітераційне прогнозування освітлених зон спостереження з використанням виразу (3) при фіксованому значенні широти, для заданих меж довготи, з подальшим записом отриманих графіків у бази літнього чи зимового періодів;

- ітераційне прогнозування освітлених зон спостереження з використанням виразу (3) при фіксованому значенні довготи, для заданих меж широти, з подальшим записом отриманих графіків у бази літнього чи зимового періодів;

- проведення екстраполяції положення КО на заданий момент часу з використанням методу розрахунку других частинних похідних від поточних параметрів за вектором початкових умов на базі багатовимірних диференціальних перетворень [19];

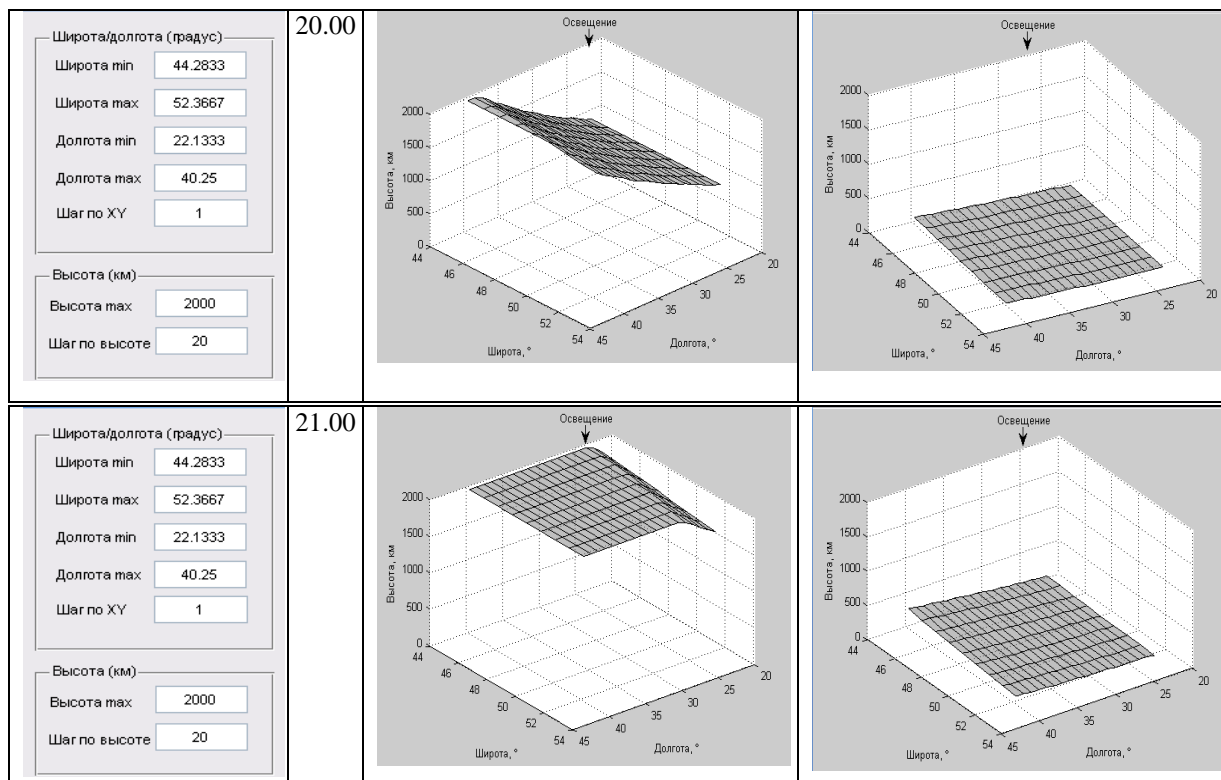
- порівняння відповідних баз даних, які вибираються відносно екстрапольованого положення КО на обраний період часу з визначенням інтервалів супроводження КО та моментів часу початку і кінця його спостереження відносно ОЗС в обраному квадраті місцевості.

Використання такого алгоритму дає змогу проаналізувати можливість застосування ОЗС до низькоорбітальних КО, результат такого аналізу показаний в таблиці 2.

Таблиця 2

3D графіки просторово-часової оцінки траєкторій КО в межах території України

Вхідні параметри області спостереження	Час, год.	Результат розрахунку в заданий день відповідної пори року	
		зима, 15.01.2014	літо, 15.07.2014
Широта/долгота (градус) Широта min: 44.2833 Широта max: 52.3667 Долгота min: 22.1333 Долгота max: 40.25 Шаг по XY: 1 Висота (км) Висота max: 2000 Шаг по высоте: 20	19.00		



З отриманих результатів видно, що влітку при розгляді низькоорбітальних КО ситуація дещо гірша, ніж взимку, оскільки спостереження за його траєкторією можливо проводити рідше, а сеанси спостереження є менш тривалими. Незважаючи на це, доцільність проведення сеансів спостереження за КО ОЗС є і припадає на 22 годину ночі, що на 23 % ефективніше в зимовий період за заданою траєкторією руху КО на всій широті та довготі розміщення ОЗС на території України, при цьому найкращим часом спостереження є період з 4–5 години ночі.

Висновки. Таким чином, у статті розглянуто один з небагатьох підходів до аналізу можливостей використання однопозиційних ОЗС на території України з перевіркою їх застосування до низькоорбітальних КО.

Практична цінність алгоритму просторово-часової оцінки траєкторій КО, придатних для пасивного оптичного спостереження, полягає в підвищенні точності прогнозування часових точок просторового наведення ОЗС за рахунок аналітичного уточнення шуканих моментів часу, із використанням збурюючих елементів кеплерової орбіти.

Розглянуті підходи в подальших дослідженнях дають змогу формувати часткові критерії мінімізації ресурсу ОЗС щодо максимізації точності визначення параметрів руху КО під час планування роботи мобільних ОЗС чи почергового їх включення у стаціонарному виконанні, для оновлення даних каталогу КО.

Список використаної літератури:

1. Біла книга Збройні Сили України [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://mil.gov.ua>.
2. Указ Президента України про рішення ради національної безпеки і оборони України «Про концепцію реформування і розвитку Збройних Сил України на період до 2017 року» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://search.ligazakon.ua>.
3. *Куницький С.В.* Космічна підтримка застосування збройних сил – вимога сучасності / *С.В. Куницький* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://defpol.org.ua>.
4. *Моргун А.А.* Метод оценки параметров движения космического аппарата / *А.А. Моргун* // 36. наук. праць Харківського ун-ту Повітряних Сил – Харків : ХУПС, 2009. – № 4(22). – С. 47–49.
5. *Деденок В.П.* Ієрархічний метод виявлення малорозмірного рухомого об'єкта / *В.П. Деденок, В.Є. Саваневич* // Системи озброєння і військ. техніка. – 2005. – № 1. – С. 40–45.
6. *Каханер Д.* Численные методы и математическое обеспечение / *Д.Каханер, К.Моулер, С.Нэш* ; пер. с англ. – М. : Мир, 1998. – 575 с.

7. Козырев Е.С. Телевизионные наблюдения низкоорбитальных объектов околоземного космического пространства с использованием способа накопления кадров со смещением / Е.С. Козырев, Е.С. Сибирякова, А.В. Шульга // Космічна наука і технологія. – 2011. – Т. 17, № 3. – С. 83–87.
8. Каневський Л.Б. Оперативні методи траскторної обробки в оптичних засобах контролю космічного простору / Л.Б. Каневський, С.В. Ковбасюк // Вісник Дніпропетровського ун-ту. – Дніпропетровськ : ДНУ, 2012. – № 4(20). – С. 143–150.
9. Пат. України на винахід № 80712. Спосіб виявлення рухомих об'єктів / В.Е. Саваневич, В.П. Деденок, А.В. Шульга. – ДП «Український інститут промислової власності», груд. 2007.
10. Докучаева О.Д. Астрономическая фотография: материалы и методы / О.Д. Докучаева. – М. : Изд. физ.-мат. лит., 1994. – 480 с.
11. Пат. України на корисну модель № 39687. Спосіб ідентифікації зірок оптичними засобами контролю космічного простору / О.М. Богдановський, С.Е. Ломоносов, В.Є. Саваневич та ін. – ДП «Український інститут промислової власності», Бюл. № 5, 2009.
12. Розробка науково-методичних засад формування національної віртуальної обсерваторії на основі інформаційних ресурсів обсерваторій України : звіт про наук.-дослідну роботу. – К., 2010.
13. Бюлетень Українського центру визначення параметрів обертання Землі № 7. – К. : Компанія ВАІТА, 2012. – № 7 – 56 с.
14. Технічна енциклопедія [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://techtrend.com.ua>.
15. Пат. 79216 Україна, МПК G 01 S 11/00. Спосіб визначення параметрів руху космічних об'єктів наземними оптичними засобами / Л.Б. Каневський, С.В. Ковбасюк ; заявники та власники патенту автори. – № u2012013111 ; заявл. 19.11.12 ; опубл. 10.04.13, Бюл. № 7.
16. Основы теории полета космических аппаратов / Под. ред. Г.С. Нариманова, М.К. Тихонравова. – М. : Воениздат, 1977. – 240 с.
17. Эскабал П. Методы определения орбит / П. Эскабал. – М. : Мир, 1970. – 472 с.
18. A dynamic observation concept as a key point for an enhanced ssa optical network / L. Cibirin, M. Chiarini, A. Bertoli at oll. // Proceeding of European Space Surveillance Conference, At Madrid 06/2011.
19. Пухов Г.Е. Дифференциальные преобразования и математическое моделирование физических процессов / Г.Е. Пухов. – К. : Наукова думка, 1986. – 159 с.

КАНЕВСЬКИЙ Леонід Броніславович – помічник начальника науково-організаційного відділення Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Державного університету телекомунікацій.

Наукові інтереси:

– застосування оптичних засобів спостереження в СКАКО України.

КОВБАСЮК Сергій Валентинович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник наукового центру Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Державного університету телекомунікацій

Наукові інтереси:

– наземні засоби космічної інфраструктури України.

Стаття надійшла до редакції 22.04.2014