

ІНФОКОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.396.94

РЕГІОНАЛЬНА НАВІГАЦІЙНА СУПУТНИКОВА СИСТЕМА ЯК ДЖЕРЕЛО PNT ПІД ЧАС НАВМИСНИХ ТРИВАЛИХ ЗАГРОЗ СИГНАЛАМ GNSS

DOI 10.36994 / 2788-5518-2023-01-05-08

Гайдаманчук В.А., к.т.н. WIRCOM, Київ, Україна. gva@wircom.ua

Матеїєнко М.В., WIRCOM, Київ, Україна.

Пастушенко І.М., WIRCOM, Київ, Україна.

Семенко А.І., д.т.н., проф. Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Київ, Україна. setel@ukr.net

Анотація: Статтю присвячено розгляду проблем щодо забезпечення споживачів PNT (Position, Navigation, Time) інформацією в умовах зростання загроз стабільному функціонуванню систем GPS та інших систем GNSS. Розглянута можливість створення і використання, як альтернативного, більш захищеного джерела сигналів PNT для споживачів, задіяних в забезпеченні критичної інфраструктури, регіональної супутникової системи навігації ((Regional Navigation Satellite System - RNSS), яка була б більш ніж GNSS захищена від навмисних загроз та могла би бути доступною на всій території України.

Розглянуто можливості та основні обмеження використання вже існуючих супутників на геосинхронних орбітах (GEO, IGSO) в якості ретрансляторів PNT інформації у разі, якщо такі сигнали будуть створюватись і передаватись через них спеціалізованими наземними станціями.

Розглянуто особливості адаптації і вдосконалення таких технічних рішень для умов України, можливості застосування в складі RNSS модернізованих станцій VSAT зв'язку та супутників на геостационарних орбітах з використанням широкосмугових сигналів (ШСС) з розширенням спектру методом прямої послідовності (Direct Sequence Spread Spectrum – DSSS) та завадостійкого кодування, що суттєво зменшить можливість їх виявлення та ускладнить протидію їх роботі.

Ключові слова: Навігація, Jamming, Spoofing, GPS, GNSS, RNSS, PNT, NAVSOP, GEO, IGSO, VSAT.

REGIONAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM AS PNT SOURCE DURING INTENTIONAL LONG-TERM THREATS TO GNSS SIGNALS

Viktor A. Gaidamanchuk, Ph.D., WIRCOM, Kyiv, Ukraine. gva@wircom.ua

Mykola V. Matvienko, WIRCOM, Kyiv, Ukraine.

Ihor M. Pastushenko, WIRCOM, Kyiv, Ukraine.

Anatoliy Semenko, Dr.habil., Prof. Open International University of Human Development "Ukraine", Kyiv, Ukraine. setel@ukr.net

Abstract: The article is devoted to consideration of the possibility, in the conditions of growing threats to the stable functioning of GPS and other GNSS systems due to long-term deliberate interference, to use as an alternative, more protected source of PNT (Position, Navigation, Time) signals, a local satellite navigation system, which will be capable to function, providing coverage of all or a significant part of the territory of Ukraine.

The possibilities and limitations of using already existing satellites in geosynchronous orbits (GEO, IGSO) as relayers of PNT information in the event that such NAVSOP signals will be created and transmitted through them by specialized ground stations.

The peculiarities of adaptation and improvement of such technical solutions for the conditions of Ukraine are considered along with the possibility of using VSAT stations adapted to such a system, which are part of satellite communication systems using satellites in geostationary orbits with the use of interference-resistant coding and DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) signals that will significantly reduce the possibility of their detection and make it more difficult to counter their reception during long-term threats to GNSS signals.

In addition, the implementation of authentication algorithms in such systems will make it possible to ensure their protection against detection and alteration of data transmission, and to increase the accuracy of PNT determination and expand the scope of application in the future, the regional navigation satellite system (RNSS) can be transformed

into a hybrid one by supplementing it with additional sources of PNT and NAVSOP.

Key words: *Navigation, Jamming, Spoofing, GPS, GNSS, RNSS, PNT, NAVSOP, GEO, IGSO, VSAT.*

Вступ

Системи глобальної навігації GNSS при їх створенні мали стати основним та надійним джерелом інформації PNT для різноманітних, як у промисловості, наукових дослідженнях та обороні, так і для широкого кола споживачів. І якщо не брати до уваги чутливості таких систем до ненавмисних і навмисних перешкод, загалом їм вдається забезпечувати необхідної точності глобальну навігацію [1]. Однак, оскільки сигнали GNSS відносно слабкі, досить незначного рівня перешкод для виникнення перебоїв при прийомі сигналів споживачами, що, відповідно, знижує якість позиціонування та синхронізації часу та частоти. У зв'язку з цим наявність навмисних та/або ненавмисних перешкод не дозволяє повною мірою покладатися на GNSS як на завжди доступне джерело PNT, особливо для деяких критично важливих застосувань, таких як критична інфраструктура та оборона. З можливих технічних рішень, які дозволять при цьому покращити доступ до PNT інформації, можна вирізнити ті, що спрямовані на покращення прийому GNSS в умовах вразливості, а саме рішення для виявлення та придушення перешкод на рівні антени, а також на рівні обробки сигналу, а також такі технічні рішення, що використовують при розробці нові або модернізують існуючі джерела PNT, які можуть забезпечити альтернативу GNSS з формування сигналів достатньої якості для забезпечення споживачів інформацією PNT. Такі системи відомі як системи навігації NAVSOP (Navigation via Signals of Opportunity) мають різноманітні конфігурації та використовують радіосигнали від різних джерел та технологій для обчислення місцезнаходження споживача за методом триангуляції. Відповідно, використання в системах NAVSOP існуючих супутників які не включені до складу систем GNSS дозволяє не тільки забезпечувати інформацією PNT регіони із великою площею а також може забезпечувати підвищений рівень захисту в умовах застосування довготривалих навмисних перешкод.

Виконання досліджень

Створення регіональної навігаційної супутникової системи RNSS, сигнали якої можуть бути використані як сигнали NAVSOP в якості альтернативи для глобальних систем навігації GNSS, хоча й істотно менш витратне рішення, ніж створення будь-якої системи навігації з сімейства GNSS, проте передбачає використання групи супутників та наземних станцій, а також спеціалізованих приймачів, що потребує як значних інвестицій у розробку, так і значних адміністративних зусиль при її впровадженні та експлуатації. У зв'язку з цим необхідно зазначити, що не для всіх випадків появи перебоїв з прийомом сигналів GNSS, пов'язаних з навмисними перешкодами, подібне рішення є єдино можливим, і деякі проблеми такого типу можуть бути вирішені значно простіше й з меншими витратами. Розглядаючи більш детально причини та тривалість критичного погіршення прийому сигналів GNSS, при яких можна обійтися без їх заміни на сигнали RNSS, можна виділити з них кілька, коли цілком достатньо застосування більш простих і менш витратних рішень.

Так у разі нетривалих за часом проблем із прийомом сигналів GNSS досить ефективно дозволить мінімізувати проблему сукупність наступних факторів, врахованих при побудові комплексної системи навігації: наявність антени та приймача сигналів GNSS з опцією захисту від «Jamming&Spoofing» [2], наявність інерційної системи у складі системи навігації і високоточного внутрішнього опорного генератора, – що в сукупності дозволить захистити систему навігації від короткочасної відсутності прийому сигналів GNSS і в тому числі завдяки можливості забезпечити точність часу не гірше 100 нс (на час відсутності сигналів GNSS) при використанні кварцових генераторів HP OCXO (до 1 години) або атомних генераторів “Chip Scale Atomic Clock” (до 2 годин) [4].

Також, наприклад, у разі такого розташування джерел навмисних радіоперешкод, при якому напрямок поширення сигналу істотно відрізняється від напрямку поширення сигналів GNSS (наприклад при їх наземному розташуванні). Для таких випадків існують ефективні технології, які дозволяють за рахунок використання сучасних антенних систем мінімізувати негативний вплив на прийом GNSS навмисних перешкод у більшості випадків. Для формування діаграми спрямованості антени використовуються адаптивні багатоелементні комбіновані антени, так звані антени з регульованою діаграмою спрямованості, де створюється такий промінь діаграми спрямованості антени, який має нулі в напрямку небажаних сигналів або максимальне посилення сигналу в напрямку потрібних сигналів супутників, завдяки чому мінімізується вплив передавача перешкод на приймачі GNSS [5;6] або більш універсальна альтернатива – місцева NAVSOP з використанням наземних сигналів мереж радіо та мобільного зв'язку, Wi-Fi, телебачення та низькоорбітальних супутників (LEO).

Але у ситуаціях, коли користувачі PNT знаходяться в умовах, коли прийому сигналів GNSS протидіють сучасні систем РЕБ, і вони виявляються повністю ізольованими від сигналів GPS і територія, де це відбувається є значною за площею, потрібно забезпечити повну заміну джерела надання такої інформації на систему, куди повинні входити як більш приховані і завадостійкі джерела сигналів NAVSOP, так і спеціальні приймачі, на які в таких ситуаціях повинні перемикатися споживачі, що дозволить приймати і

обробляти інформацію PNT, що надходить [7]. Отже, необхідність забезпечення споживачів сигналами системи NAVSOP рівня RNSS доцільна в тих випадках, коли протидія прийому сигналів GNSS є довготривалою, впливає на велику кількість критично важливих споживачів, розташованих на великій території.

Якщо розглянути наявні супутники різного призначення, то одним з найбільш придатних для адаптації та подальшого використання в якості RNSS є системи супутникового зв'язку, які складаються з геосинхронних супутників зв'язку разом з відповідною наземною апаратурою та VSAT станціями споживачів [8].

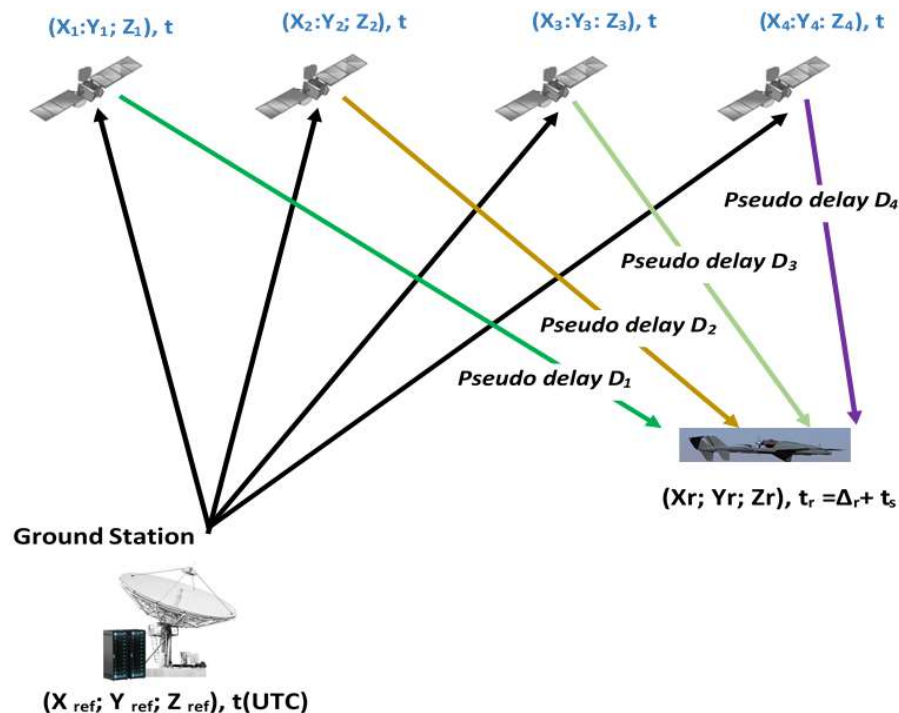


Рис.1. Схема передачі PNT інформації з використанням супутникової системи зв'язку

При використанні супутників зв'язку GEO для розрахунків розповсюдження PNT у складі RNSS (рис. 1) як і у випадку GNSS в загальному вигляді можна застосовувати систему рівнянь (1) [8], де D_i – псевдодальність; x_i, y_i, z_i – позиція супутника; x_r, y_r, z_r – позиція споживача; c – швидкість світла; Δt – зсув годинника приймача відносно UTC:

$$\begin{aligned} cD_1 &= [(x_1 - x_r)^2 + (y_1 - y_r)^2 + (z_1 - z_r)^2]^{1/2} + c\Delta t \\ cD_2 &= [(x_2 - x_r)^2 + (y_2 - y_r)^2 + (z_2 - z_r)^2]^{1/2} + c\Delta t \\ cD_3 &= [(x_3 - x_r)^2 + (y_3 - y_r)^2 + (z_3 - z_r)^2]^{1/2} + c\Delta t \\ cD_4 &= [(x_4 - x_r)^2 + (y_4 - y_r)^2 + (z_4 - z_r)^2]^{1/2} + c\Delta t \end{aligned} \quad (1).$$

Основна системна відмінність в функціонуванні RNSS полягає в тому, що на відміну від систем GNSS, в яких інформація PNT, що надходить споживачу, формується безпосередньо на супутнику, в RNSS інформація PNT формується в наземній базовій станції і передається споживачу через супутник зв'язку. Ці системи не потребують при їх створенні використання нових спеціалізованих супутників, а використовують вже існуючі телекомунікаційні супутники, що не потребує аж занадто великих інвестицій порівняно з глобальними навігаційними супутниковими системами GNSS. Крім того, локальна система навігації такого типу може використовувати існуючі супутники в режимі, який не заважає виконанню їх основних функцій. Щодо наявності таких супутників, то згідно з даними UCS Satellite Database на геосинхронних орбітах зараз сумарно знаходиться більше 500 супутників. Разом з тим, треба зазначити, що RNSS в забезпеченні точності PNT, як правило, поступаються системам GNSS. І тому дуже важливо, щоб при їх створенні вибір супутників, з яких складається RNSS, відбувався з врахуванням концепції DOP (Dilution of Precision), згідно з якою на погіршення точності супутникової навігації суттєво впливає не оптимальна геометрія взаємного розташування супутників. Досягти такої геометрії розташувань, як в спеціально створених супутникових системах навігації, таких як GNSS, і відповідно такого ж рівня точності PNT в системах RNSS дуже складно.

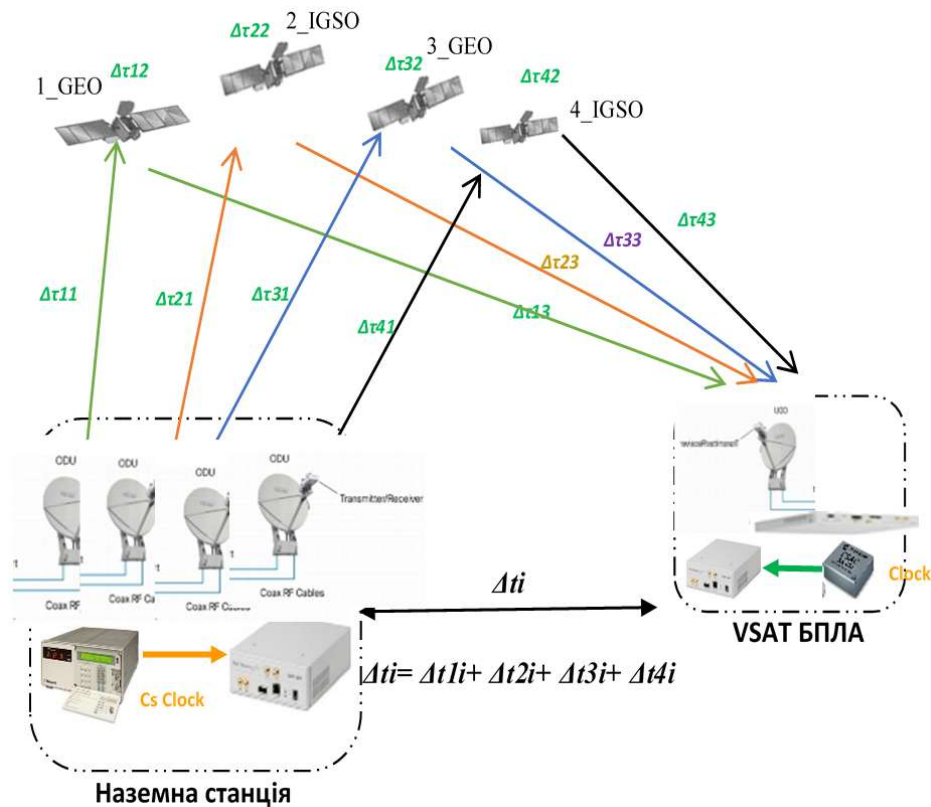


Рис. 2. Навігаційна система RNSS з використанням супутників GEO та IGSO.
Зв'язок між показниками DOP та точністю супутникових систем навігації видно з наступного виразу:

$$\text{Помилка PNT} = \text{DOP} * \text{UERE} \quad (2)$$

де UERE (User Equivalent Range Error) – загальна помилка визначення псевдодальності, яка визначає похибку відстані між приймачем споживача PNT і конкретним супутником, який входить до складу супутникової системи навігації. Для забезпечення точності позиціонування згідно з розрахунками показників DOP необхідний оптимальний вибір геометрії їх взаємного розташування при поєднанні разом з супутниками GEO супутників IGSO. Такий принцип, наприклад, використовується в китайській регіональній супутниковій навігаційній системі CAPS (Chinese Area Positioning System) [9]. Космічний сегмент CAPS складається не тільки з декількох супутників GEO, а також використовує декілька супутників IGSO на нахиленій геосинхронній орбіті. При цьому, як видно з Таблиці 1, найкращих показників DOP і, відповідно, точності RNSS можливо досягти лише при спільному використанні в RNSS 6 супутників та забезпеченні максимального показника доступності RNSS, який залежить від географічних координат країни чи регіону покриття сигналами [10].

Таблиця 1.
Значення DOP в залежності від складу RNSS

Склад RNSS	Доступність RNSS	DOP ^G	DOP ^P	DOP ^H
4*1 GSO 2* GEO	100%	4.93	4.3	2.64
2*1 GSO 4* GEO	100%	6.1	5.71	4.09

Таким чином, космічний сегмент RNSS може бути створений у складі супутників зв'язку GEO та IGSO у кількості та геометрії взаємного розташування виходячи з мінімально можливих показників DOP з врахуванням того, що для території України доступність GEO/IGSO RNSS буде складати ~ 92%.

Разом з тим дуже важливою особливістю розробки системи RNSS є можливість при її створенні реалізувати спеціальні заходи захисту від виявлення сигналів (прихованості) системи RNSS та від

різноманітних перешкод. Сигнали ШСС DSSS [11], які використовуються в GPS, є надзвичайно пристосованими для протидії перешкодам за своєю природою, але в умовах функціонування GNSS ці їх властивості не можуть бути використані в повному обсязі, як це можливо при створенні систем RNSS. Якщо взяти до уваги такі параметри як прихованість та завадостійкість і звернути увагу на рівняння, якими їх можна описати, то побачимо, що завадостійкість DSSS визначається формулою (3), що зв'язує відношення сигнал-перешкода на виході приймача споживача q^2 з відношенням сигнал-перешкода на вході приймача ρ^2 :

$$3q^2 = 2B\rho^2 \quad (3)$$

а прихованість або час виявлення T визначається формулою:

$$T \approx F \cdot (\rho^2)^{-2} \cdot 2 \cdot q^4 \quad (4)$$

$$\text{для } F\Delta t > 1 \quad \Delta t \approx 2d^2/Rc$$

де R – відстань між передавачем і приймачем, F – ширина спектру, B – база DSSS.

Таким чином, чим ширший спектр сигналів PCCH, тим вища завадостійкість та прихованість як сигналів, так і системи навігації в цілому. Виходячи з того, що однією з основних причин створення систем RNSS є неможливість сталого прийому GNSS в умовах довготривалих навмисних перешкод, цілком зрозуміло, що особлива увага при створенні RNSS повинна бути приділена забезпеченню стійкості від перешкод та мінімізації можливості виявлення функціонування системи RNSS тобто її прихованості.

Крім цих питань, при створенні RNSS дуже важливою є модернізація VSAT станцій, які сумісні з відібраними для RNSS супутниками GEO/IGSO для забезпечення роботи наземної станції RNSS з відповідним рівнем системи шкали часу [12] та приймачів споживачів RNSS з використанням технологій адаптивних ФАР [13] (рис. 3).

Також враховуючи специфіку розташування та дрейфу на орбіті супутників GEO/IGSO при створенні RNSS дуже важливо забезпечити калібрування та тестування основних системних параметрів на основі відповідних методик, одна із яких схематично представлена на рис. 3.

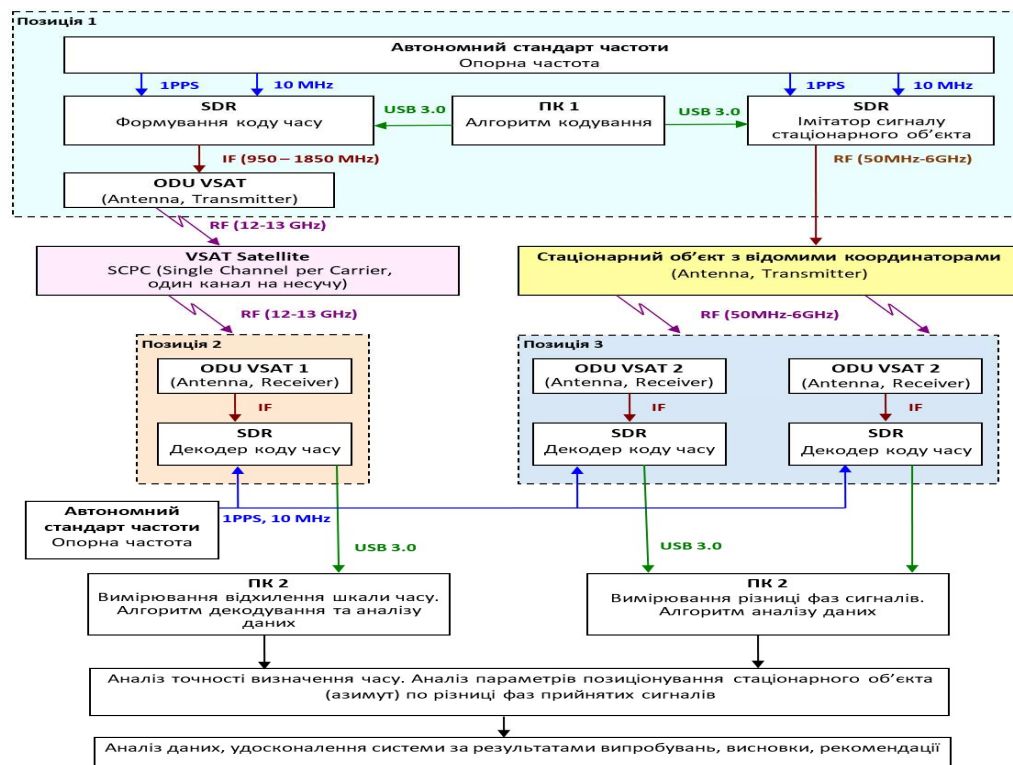


Рис.3. Схема проведення досліджень точності параметрів позиціонування RNSS

Треба також зазначити, що в Україні накопичений успішний досвід [14] при розробці та виробництві НВО «Сатурн» (м. Київ) VSAT «Епіграма» на основі ШСС DSSS (рис. 4), який може бути продуктивно використаний при створенні системи навігації RNSS для потреб України та дозволить суттєво зменшити витрати та терміни розробки.

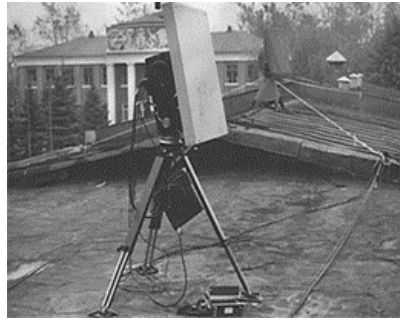


Рис. 4. Наземна станція (VSAT) супутникового зв'язку GEO «Епіграма» (Україна) з використанням ШСС DSSS сигналів та адаптивної ФАР

Висновки

Зважаючи на те, що глобальні навігаційні системи GPS (GNSS) є вразливими до навмисних перешкод, в випадках коли ці перешкоди довготривалі, поширені на великих територіях та регулярно створюють загрози прийому споживачам PNT інформації, доцільним є створення і використання регіональних навігаційних систем з використанням супутників GEO/IGSO. Такі системи працюють більш ефективно на широтах, де доступність до супутників з яких вони складаються є не менше 80% та забезпечують посилену захищеність від довготривалих навмисних перешкод Jamming, Spoofing та інших перешкод РЕБ за рахунок застосування ШСС DSSS, алгоритмів зміни псевдовипадкових кодів та завадостійкого кодування. Крім того, введення алгоритмів автентифікації в таких системах дозволить забезпечити їх захищеність від виявлення та підміни передачі даних. Для підвищення точності в подальшому система RNSS може буде перетворена в гібридну RNSS за рахунок доповнення додатковими джерелами PNT

Література

1. M.S. Grewal, A.P. Andrews, C.G. Bartone. Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration. – Wiley, 2020. – 568 p.
2. J.J. Spilker. Digital Communications by Satellite. – Prentice-Hall Inc., 1977. – 592 p.
3. J. Zhang, X. Cui, H. Xu, M. Lu. A Two-Stage Interference Suppression Scheme Based on Antenna Array for GNSS Jamming and Spoofing, Journal, Sensors, 2019, 19 (18).
4. Low-Noise Chip-Scale Atomic Clock. Datasheet, rev H. – Microchip Technology Inc., 2019.
5. K. Hünerbein, W. Lange Timing and Navigation in UAVs: Synchronization of UAV Swarms and Testing GPS Error Effects on GNSS Reception. - Embedded Selforganizing Systems, Vol 5. No 1. 2018, pp. 17-25.
6. S. Albrektsen, T. Johansen User-Configurable Timing and Navigation for UAVs. - Sensors, 2018, 18, 2468
7. G. Y. Ma, Q.T. Wan, T. Gan. Communication-based positioning systems: past, present and prospects. – Research in Astron. Astrophys. 2012 Vol. 12 No. 6, pp. 601–624.
8. J.W Betz. Engineering Satellite-Based Navigation And Timing. – Wiley, 2016. – 640 p
9. B. Li, A. Dempster. China's Regional navigation Satellite System – CAPS// Inside GNSS – June 2010, pp. 59-63.
10. F. Keyvani, S.Torabi. Design and Simulation of Regional Navigation Constellation with Optimized Mean DOP based on Hybrid GEO and IGSO Satellites. International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace, 6(2). – 2019, pp.1-18.
11. Л. Е. Варакин Системы связи с шумоподобными сигналами. – Радио и связь, 1985. – 384 с.
12. V. Gaidamanchuk, A. Semenko et al. Peculiarities of TWSTFT modem development for national time dissemination system, – IEEE International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo), Kyiv – 2016.
13. R.A. Monzingo, T. W. Miller. Introduction to Adaptive Arrays. – John Wiley&Sons, 1980. – 240 p.
14. V. Gaidamanchuk, M. Matvienko. Main principles of the satellite system providing PNT information for moving objects under GNSS vulnerability, Journal of Information and Telecommunication Sciences/ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2017, - Vol. 9, No. 2, pp. 27-31

References

1. M.S. Grewal, A.P. Andrews, C.G. Bartone. Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration. Wiley,2020. – 568 p.
2. J.J. Spilker. Digital Communications by Satellite. – Prentice-Hall Inc., 1977. – 592 p.
3. J. Zhang, X. Cui, H. Xu, M. Lu. A Two-Stage Interference Suppression Scheme Based on Antenna Array for GNSS Jamming and Spoofing, Journal, Sensors, 2019, 19.

4. Low-Noise Chip-Scale Atomic Clock. Datasheet, rev H. – Microchip Technology Inc., 2019.
5. K. Hünerbein, W. Lange Timing and Navigation in UAVs: Synchronization of UAV Swarms and Testing GPS Error Effects on GNSS Reception, Embedded Selforganizing Systems, 2018, Vol 5. No 1. - pp. 17-25.
6. S. Albrektsen, T. Johansen User-Configurable Timing and Navigation for UAVs. – Sensors, 2018, 18.
7. G. Y. Ma, Q.T. Wan, T. Gan. Communication-based positioning systems: past, present and prospects. – Research in Astron. Astrophys. 2012 Vol. 12 No. 6, pp. 601–624.
8. J.W Betz. Engineering Satellite-Based Navigation And Timing. – Wiley, 2016. – 640 p.
9. B. Li, A. Dempster. China's Regional navigation Satellite System – CAPS// Inside GNSS – June 2010, pp. 59-63.
10. F. Keyvani, S.Torabi. Design and Simulation of Regional Navigation Constellation with Optimized Mean DOP based on Hybrid GEO and IGSO Satellites. International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace, 6(2). – 2019, pp.1-18.4.
11. L. E. Varakyn Системи зв'язу з шумоподобними сигналами. – Радіо у зв'яз, 1985. – 384 с.
12. V. Gaidamanchuk, A. Semenko et al. Peculiarities of TWSTFT modem development for national time dissemination system, – IEEE International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo), Kyiv – 2016.
13. R.A. Monzingo, T. W. Miller Introduction to Adaptive Arrays. – John Wiley&Sons, 1980. – 240 p.
14. V. Gaidamanchuk, M. Matvienko. Main principles of the satellite system providing PNT information for moving objects under GNSS vulnerability, Journal of Information and Telecommunication Sciences/ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2017, - Vol. 9, No. 2, pp. 27-31.