

УДК 656.61.052  
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.6/36>

**Мельник О.М.**

Одеський національний морський університет

**Корякін К.С.**

Одеський національний морський університет

## СУЧАСНІ ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ СТАНДАРТІВ ТОЧНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ СУПУТНИКОВИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

*Невід'ємною частиною сучасних технологій є супутникові системи, що використовуються для визначення місцеположення об'єктів у будь-якій точці земної поверхні із застосуванням спеціальних навігаційних приймачів. GNSS-технологія широко застосовується у геодезії, будівництві, транспорті, але не менш важливого значення вона набула як штатне обладнання супутникової навігації морських суден. Одною з актуальних проблем залишається підвищення точності сигналів і надійність роботи GPS. Розвиток геостационарних служб навігаційного покриття, безумовно, покращує роботу GPS на території світового океану, завдяки чому правильність інформації, яка передається через GPS, підвищується. Так точність місцеположення об'єкта значно підвищується, додатково отримується інформація про можливі помилки у наданих даних або недостовірність супутникових сигналів. Щодо підвищення точності позиціонування, то використовуються два підходи, це використання декількох сигналів на різних частотах, що передаються із супутника як більш сучасніший підхід, але ще не адаптований до усіх супутників, і система опорних станцій, розташування яких відоме для створення і передачі поправок, які підвищують точність позиціонування. У роботі представлений розгляд основних принципів визначення місцеположення об'єктів, визначено способи та методи, що застосовуються для підвищення точності супутникових сигналів, приведено дані про точність позиціонування наявних супутникових навігаційних систем і визначені фактори, що впливають на точність визначення місцеположення об'єктів у просторі, досліджено методи, що використовуються для підвищення точності навігаційних визначень, представлено формалізований опис широкозонних систем диференціальної корекції, які використовуються для коригування інформації для усунення або зменшення похибок позиціонування.*

**Ключові слова:** GPS-сигнали, точність позиціонування, супутникова навігація.

**Постановка проблеми.** У процесах визначення місцеположення об'єктів існують поточні проблеми, які потребують вирішення, це наявність і стабільність сигналу супутникових сигналів, що можуть бути заглушені навмисними штучними перешкодами або підробленням даних що знижують точність позиціонування, а також додаткові обмеження навколишнього середовища, такі як спотворення електрично активної сфери, що впливає на час приходу сигналів, пертурбації тропосфери та варіації орбіт супутників, що можуть також сприяти неточності позиціонування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розвиток супутникових навігаційних систем почали своє створення ще у 50-ті роки минулого століття. Цьому сприяло декілька факторів, серед яких недосконалість технологій радіонавігації, заснованих на радіомаяках. Вони вирішували задачу курсоуказання руху об'єкта, але не дозволяли вирішити завдання його точного позиціонування, тобто визначення його географічних

координат. У роботах [1; 3–5] представлені особливості використання сучасних глобальних навігаційних супутникових систем. У [2] наведено експлуатаційні вимоги до судового супутникового обладнання. Наукові праці [6–9; 15] присвячені вивченню проблемам точності позиціонування й огляду регіональних систем. Питання загальної безпеки судна розглянуті у [10–14].

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Супутникові методи визначення просторових координат об'єктів об'єднуються в один термін GNSS (Global Navigation Satellite System), тобто глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС). GNSS-технології успішно застосовуються у морській навігації, де необхідна точна інформація про просторове положення суден на земній поверхні та зміну параметрів їх руху у часі, тобто позиціонування суден як об'єктів спостереження. Такими параметрами можуть бути координати судна, вектор його швидкості переміщення, точний час позиціонування. Базуючись на

цьому система супутникової навігації вирішує два основних завдання – навігації, тобто визначення миттєвого стану та швидкості судна, і синхронізації шкал часу. Система ділиться на три сегменти: космос, управління та приймач. Наземні або морські станції прийому сигналу отримують сигнал із супутника і синхронізують його з атомним годинником, який розташований на ньому.

Кожен супутник постійно передає спеціальні сигнали з часом та персональну інформацію про своє положення, для виявлені наземними або морськими станціями, які коригують дані, що передаються супутником, далі приймач декодує сигнал кількох супутників і калькулює своє положення методом «трилатерації», тобто побудови ланцюга чи мережі послідовно пов'язаних між собою трикутників і виміри у кожному їх усіх трьох сторін. Кути цих трикутників і координати їхніх вершин визначають із тригонометричних обчислень. Для визначення своїх географічних координат у певний час приймач використовує годинник з високою стабільністю ходу та одержує сигнали із чотирьох супутників (для більш точного позиціонування).

$$\begin{cases} (T+D_1-T_0) C = \text{Pos}(x_1, y_1, z_1) - \text{Pos}(x, y, z); \\ (T+D_2-T_0) C = \text{Pos}(x_2, y_2, z_2) - \text{Pos}(x, y, z); \\ (T+D_3-T_0) C = \text{Pos}(x_3, y_3, z_3) - \text{Pos}(x, y, z); \\ (T+D_4-T_0) C = \text{Pos}(x_4, y_4, z_4) - \text{Pos}(x, y, z); \end{cases}$$

де:  $D_1, D_2, D_3, D_4$  – розрахунок затримок у приймачі;  $T_0$  – час, за який проводиться обчислення;

$x, y, z$  -координати ( $x_1, y_1, z_1$  – координати супутника 1;  $x_2, y_2, z_2$  – координати супутника 2, тощо).

Приймач розраховує відстань до кожного із чотирьох супутників шляхом розрахунку різниці у часі між сигналами супутника та місцевим часом. Положення супутника визначається порівнянням його сигналу із внутрішньою базою даних. Усі супутники використовують різний порядок сигналу, що дозволяє їм усім передавати сигнали на одній частоті, а приймач може за типом сигналу зрозуміти, який супутник його передає. Цей принцип називається Code Division Multiple Access (CDMA) і часто використовується в стільниковому зв'язку. Використовуються дві частоти: 1575,42 МГц (L1) та 1227,60 МГц (L2). Перша частота L1 несе в собі код, доступний всім, з грубими даними загального доступу (C/A), так само, як і код P(Y), високоточні дані, що використовується у закритих для загального користування системах. Але сигнал на другій частоті L2, зазвичай несе лише код P(Y). Ключі, які використовують коди P(Y) є державною таємницею уряду США, використовуються лише у військових цілях, тому що ці ключі радикально підвищують точність вимірювання та позиціонування.

Разом з цим точність GPS сигналів може бути збільшена за рахунок декількох методів, рис.2;

До таких методів належать:

1) Використання мережі наземних станцій Differential GPS (DGPS). Станції передають інформацію про різницю вимірної та реальної

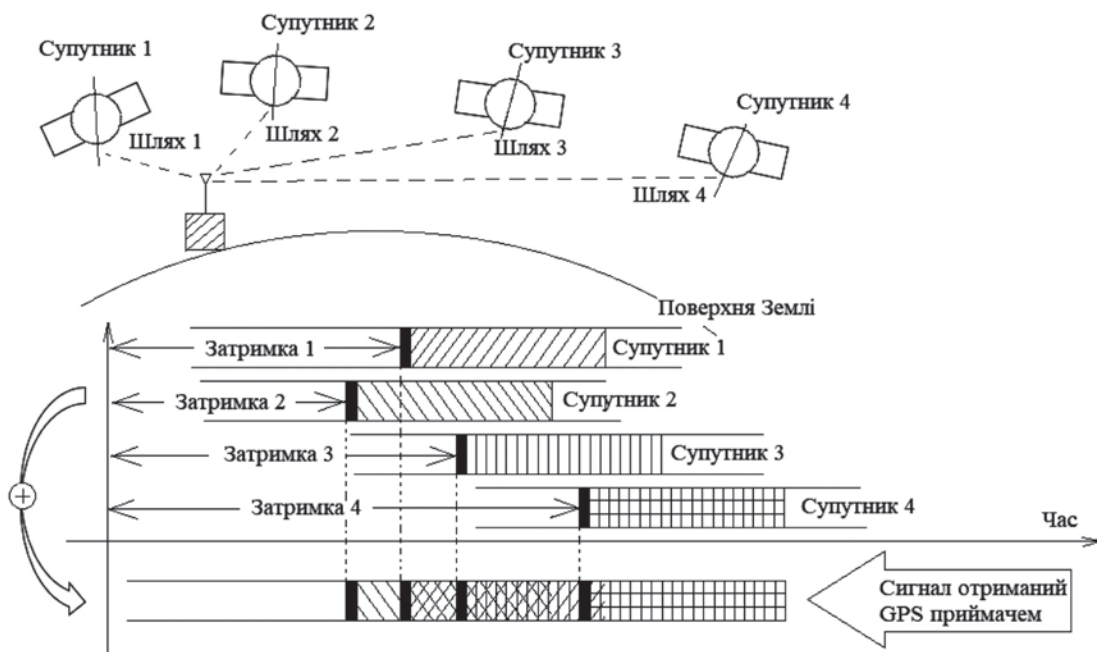


Рис. 1. Принцип позиціонування об'єкта

псевдодальності, приймачі можуть коригувати інформацію за їх сигналами.

2) Використання системи наведення EDGE (Exploitation of DGPS for Guidance Enhancement) для DGPS, яка використовується у тому числі для високоточної зброї.

3) Використання системи Wide-Area Augmentation System (WAAS), яка складається з наземних станцій, що розраховують корекцію GPS сигналів від супутників на геосинхронних орбітах для передачі їх на GPS приймачі включаючи інформацію про затримки в іоносфері, похибки індивідуальних годин супутників.



Рис. 2. Методи підвищення точності супутникових сигналів

4) Застосування локальної системи коригування LAAS (Local-Area Augmentation System). Вона аналогічна WAAS, але передачі даних йде з локального джерела.

5) Застосування системи Wide Range GPS Enhancement (WAGE) як спроба поліпшення точності ходу атомного бортового годинника та відправлення ефемерних орбітальних даних для спеціальних приймачів.

6) Відносне кінематичне позиціонування РКР (Relative Kinematic Positioning). Приводить акуратність отримання сигналів до похибки менше 10 см. Це досягається за рахунок циклічності

сигналів, які відправляються та приймаються приймачем.

Узагальнену таблицю існуючих супутникових навігаційних систем і точність їх позиціонування наведено у табл. 1.

Однак усі означені супутникові навігаційні системи поєднують фактори, що впливають на точність визначення місцеположення об'єктів, а саме:

1. Неоднорідність іоносферних і тропосферних шарів Земної атмосфери. Точність вимірів залежить від сталої швидкості поширення радіохвиль, яка через різноманіття неоднорідностей в атмосфері може змінюватися. Як наслідок, виникають іоносферні та тропосферні помилки у визначенні відстаней до супутників.

2. Багатопротенава природа поширення радіохвиль. Приймач СНС приймає не тільки прямі радіохвилі, а й відбиття від будь-яких об'єктів – земля, водна поверхня. Відбиті сигнали створюють додаткові перешкоди, які впливають точність виміру.

3. Помилки синхронізації. Для точного виміру затримки сигналу від супутника використовується синхронізація приймача із супутниковим сигналом.

4. Неточність розрахунку становища супутника у просторі, тобто ефемеридні помилки (помилки зміни орбіти).

5. Геометричний чинник. (GDOP – Geometrical delusion of precision). У момент, коли супутники, на які проводиться обсервація, знаходяться під кутами близькими до прямих, точка перетину кіл орбіт може бути обчислена з меншою похибкою, ніж у випадку, коли супутники знаходяться під гострими кутами.

6. Сонячна активність. Спалахи на сонці супроводжуються викидами гігантських мас сонячної речовини, що породжують різкі зміни властивостей магнітосфери й іоносфери Землі. Такі спалахи циклічні та під час їх появи помилки у позиціонуванні зростають.

7. Виборча точність позиціонування шляхом кодування сигналів, що передаються із супутника. Комерційний короткий код дозволяє отримати точність гірше, ніж довгий код для військових потреб.

Таблиця 1

Точність позиціонування провідних навігаційних систем

СНР (супутникова навігаційна система)	GPS (США)	ГЛОНАС (Росія)	GALILEO (Європа)	Baidou (КНР)	QZSS (Японія)	IRNSS (Індія)
Точність, м	3.6 метри	7 метрів	До 1 метра	10 метрів	До 1 метра	До 10 метрів

8. Похибки апаратури споживача. Апаратурні похибки, які поділяються на систематичну похибку апаратурної затримки радіосигналу та флуктуаційні похибки, зумовлені шумами та динамікою споживача.

Проте сучасні глобальні навігаційні супутникові системи задовольняють потреби у навігаційному обслуговуванні великої кількості споживачів як на суші так і на морі, але існує низка завдань, які вимагають підвищення точності позиціонування. Наприклад: зліт, захід на посадку та посадка літаків, судноводіння у прибережних водах, навігація автомобілів, останнім часом активно починають використовуватися автоматичні системи керування транспортом (дрони, безпілотні судна).

Для підвищення точності навігаційних визначень найбільш поширене використання отримав метод диференціального (відносного) режиму визначень, який передбачає використання одного або більше базових приймачів, розміщених у точках із відомими координатами, які одночасно із приймачем споживача (рухомим або мобільним) здійснюють прийом сигналів однакових супутників.

Підвищення точності позиціонування цим способом досягається за рахунок того, що помилки вимірювання навігаційних параметрів споживачого та базових приймачів є картельованими. При формуванні різниць вимірюваних параметрів більшість таких похибок компенсується. В основі методу лежить знання координат опорної точки – контрольно-коригуючої станції або системи опорних станцій, щодо яких обчислюються поправки до визначення псевдодальностей до навігаційних

супутників. Поправки враховуються в апаратурі споживача, і точність розрахунку, зокрема координат підвищується у десятки разів. Диференціальні системи входять до функціональних доповнень ГНСС, які надають споживачам додаткову коригуючу інформацію. Функціональні доповнення надають споживачам додаткову інформацію, яка дозволяє підвищити точність і достовірність визначення просторових координат, швидкості руху та часу.

Вихідна інформація функціональних доповнень доводиться до споживачів спеціальними каналами зв'язку. Вона містить коригуючу інформацію (для усунення або зменшення похибок позиціонування споживачів) та інформацію про цілісність супутникових сигналів для забезпечення достовірності результатів позиціонування.

Нині розвиваються п'ять широкозонних систем диференціальної корекції: СДКМ (SDCM), WAAS, EGNOS, GAGAN, MSAS. Карта покриття систем наведена на рис. 3.

Окреме місце у способах підвищення точності займає «сервіс PPP» (Precise Point Positioning – високоточне абсолютне позиціонування), що забезпечує точність позиціонування на рівні від дециметра до сантиметра і більше (для режиму статички) при поєднанні точних супутникових орбіт і годинників із двочастотним приймачем сигналів ГНСС (за рахунок урахування ефекту впливу іоносфери).

До основних переваг технології PPP стосовно інших методів диференціального позиціонування слід віднести те, що для реалізації PPP потрібен

Таблиця 2

Системи диференціальної корекції сигналів

Назва широкозонної системи диференціальної корекції	Розшифровка	Країна
СДКМ (SDCM)	Широкозонна система диференціальної корекції та моніторингу	Росія
WAAS	Широкозонна система функціональних доповнень (Wide Area Augmentation System)	США
EGNOS	Європейська геостационарна служба навігаційного покриття (European Geostationary Navigation Overlay Service)	Європейська співдружність (ЄС)
GAGAN	Геостационарне навігаційне доповнення системи GPS (GPS-aided GEO augmented navigation)	Індія
MSAS	Багатофункціональна система диференціальної корекції супутникового базування (Multi-functional Satellite Augmentation System)	Японія
StarFire Navigation system	Комерційна система компанії John Deere	Приватна глобальна система
Starfix DGPS System та OmniSTAR	Комерційна система голландської компанії Fugro NV	Приватна глобальна система



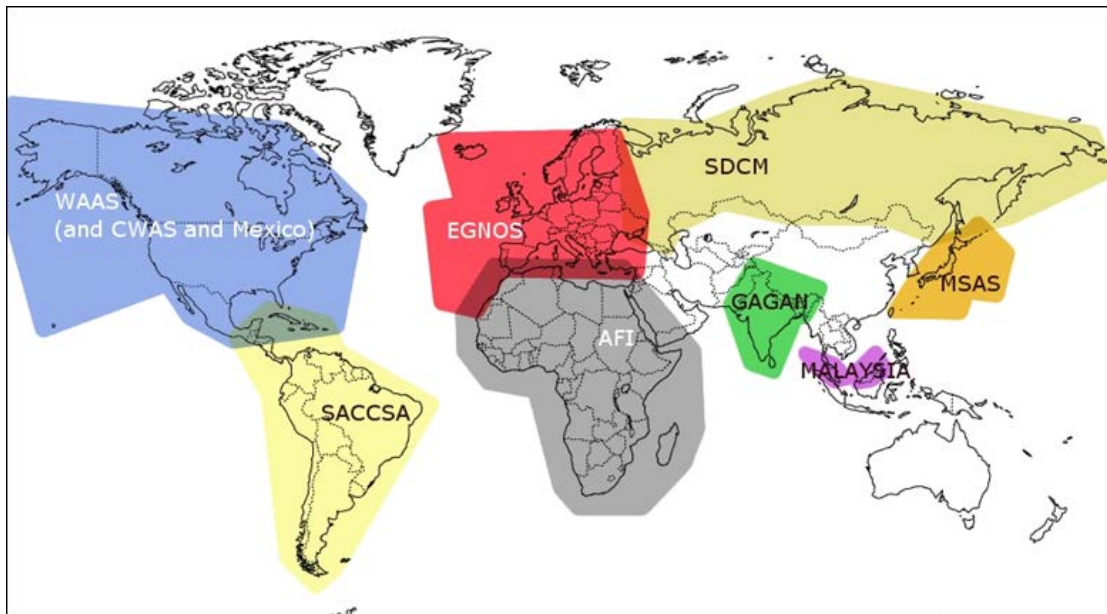


Рис. 3. Карта покриття систем диференціальної корекції

лише один приймач і не потрібні спеціальні базові станції у безпосередній близькості від користувача. Необхідно також торкнутися теми перешкодозахищеності ГНСС, яка останнім часом дуже впливає на надійність роботи GPS оскільки існують загрози доступності ГНСС внаслідок виникаючих навмисних перешкод і глушення сигналів GPS. Наслідки перешкод можуть бути серйозними, особливо коли потужність сигналу цих перешкод можна порівняти з істинним сигналом GPS. У таких умовах спостерігається небезпечна інформація, що вводить в оману та призводить до спрацювання сигналізації й одночасної відмови декількох систем навігаційного містка, включаючи судновий радар, гірокомпас і автоматичну ідентифікаційну систему (AIS). Нині вважається, що ці системи забезпечують точну ситуаційну обізнаність і часто розглядаються як резерв, на який можна покластися у разі відмови ГНСС, проте вони самі виявляються вразливими.

**Висновки.** Останнім часом перелік пристроїв для незаконного придушення точності GPS сигналів досить швидко поширився та доступний для вико-

ристання зловмисниками, які здатні придушувати супутникові сигнали. Це має певний зв'язок із процесами забезпечення безпеки навігації судна. Безумовно у будь-яких випадках на факт втручання або перешкоджання прийому сигналів від супутників GPS, реагують існуючі засоби сповіщення команди навігаційного містка, проте найбільший ризик, полягає у наданні помилкових даних про географічні координати судна від приймачів GPS. Це може проявлятися у вигляді зображення судна на суші, значень надмірної швидкості руху або похибки у визначенні положення на значній відстані від істинного. Помилкові положення судна також спостерігаються в судовій електронній картографічній системі (ECDIS), автоматичної системи ідентифікації (AIS) і на радарі. Втрата місцеположення судна не дозволяє пристрою розрахувати дальності або пеленги до цілей для процесів маневрування та розходження. Як підсумок це має вплив не тільки на ситуаційну обізнаність екіпажу, але й може спричинити вихід із ладу значної частини навігаційного обладнання та створювати аварійні ситуації що загрожують безпеці судна.

#### Список літератури:

1. Конин В.В., Харченко В.П. Системы спутниковой радионавигации / Национальный авиационный университет. Киев : Холтех, 2010. 520 с.
2. Резолюція MSC.115(73) Експлуатаційні вимоги до об'єднаного судового приймального обладнання систем GPS/Глонасс, 2000 р.
3. Куприянов А.О. Глобальные навигационные спутниковые системы : учебное пособие. Москва : МИИГАиК, 2017. 76 с.
4. Либерман Ю.И., Липин А.В, Сарайский Ю.Н. Применение спутниковых навигационных систем. Аэронавигация. Санкт-Петербург, ГУГА, 2011. 69 с.

5. Рыбакова О.А., Лапшин Э.В. Глобальные космические системы. *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2009. № 1. С. 80–84.
6. Суворов Є.Ф. Літопис зародження, розвитку та перших кроків реалізації ідеї вітчизняної супутникової системи. Москва : Кучкове поле, 2014. 232 с.
7. Galileo High Accuracy Service (HAS) European Space Agency. URL: <https://gssc.esa.int>.
8. Dimc, F., Music, B., Osredkar, R. Attaining required positioning accuracy in archeo-geophysical surveying by gps. *Proceedings of the 12th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2006.
9. Lecce, V.D., Amato, A., Piuri, V. Neural technologies for increasing the GPS position accuracy. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications*, 2008.
10. Onyshchenko S., Melnyk O. Modelling of changes in ship's operational condition during transportation of oversized and heavy cargo. *Technology audit and production reserves*. 2020. № 6/2 (56). P. 66–70. DOI:10.15587/2706-5448.2020.221653
11. Onyshchenko, S., Shibaev, O. and Melnyk, O. Assessment of Potential Negative Impact of the System of Factors on the Ship's Operational Condition During Transportation of Oversized and Heavy Cargoes, *Transactions on Maritime Science*. 2021. № 10 (1). DOI: 10.7225/toms.v10.n01.009
12. Мельник О.М., Щербина О.В., Корякін К.С., Бурлаченко Д.А (2021). Огляд та перспективи використання сучасних систем курсовказання на морських суднах для забезпечення навігаційної безпеки. *Наукові вісті Давіського університету*. № 21. DOI: 10.33216/2222-3428-2021-21-13
13. Мельник О.М., Бичковський Ю.В. Сучасна методика оцінки рівню безпеки судна та шляхи його підвищення. *Розвиток транспорту*. 2021. № 2 (9). P. 37–46. DOI:10.33082/td.2021.2-9.03
14. Мельник О.М., Онищенко С.П., Волошин А.О., Корякін К.С., Бурлаченко Д.А. Аналіз показників аварійності світового флоту та шляхи їх зниження. *Традиційні та інноваційні підходи до наукових досліджень: матеріали II міжнар. наук конф.* 10 вересня, 2021, Одеса. С. 115–117. DOI:10.36074/mcnd-10.09.2021
15. Мельник О.М., Корякін К.С., Волошин О.А., Окулов В.І., Пуляев І.О. Використання технології CDMA у супутникових системах навігації морських суден. *Ricerche scientifiche e metodi della loro realizzazione: esperienza mondiale e realtà domestiche* : матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф., м. Болонья, 12 лист. 2021 р. Т. 2. С. 49–51. DOI:10.36074/logos-12.11.2021.v2.15

#### **Melnyk O.M., Koryakin K.S. MODERN WAYS TO IMPROVE THE STANDARDS OF ACCURACY AND RELIABILITY OF SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS**

*An inseparable part of modern technology is the satellite systems used to determine the location of objects at any point of the earth's surface using special navigational receivers. GNSS-technology is widely used in geodesy, engineering, transport, but no less important value it acquired as a standard equipment of ship's navigation satellite system. One of the current problems is to increase the accuracy of signals and reliability of GPS. Development of geostationary services for coverage, insantly improves the performance of GPS on the world's oceans due to what, the correctness of the information, which is transmitted through the GPS, is increasing. Thus, the accuracy of the location of the object significantly increases, additionally received information about possible errors in the given data or the lack of satellite signals. To improve the accuracy of positioning, two approaches are used, the use of multiple signals at different frequencies transmitted from the satellite as the most modern approach, but not yet adapted to all satellites and a system of reference stations, the location of which is known for the creation and transmission of corrections that increase the accuracy of positioning. This work presents a review of the basic principles of objects positioning, identifies methods and techniques that are used to improve the accuracy of satellite signals, and gives data on the accuracy of the positioning of existing satellite navigation systems. Identified factors, which are influencing the accuracy of positioning of objects in space, and methods used to improve the accuracy of the navigation system investigated, formalized description of wide-area differential correction systems used for information correlation in order to eliminate position abnormalities presented.*

**Key words:** GPS-signals, positioning accuracy, satellite navigation.