

## USE OF REFERENCE STATIONS IN NAVIGATION

## ВИКОРИСТАННЯ РЕФЕРЕНТНИХ СТАНЦІЙ В НАВІГАЦІЇ

**E. Avramenko**, senior lecturer, **P. Demydenko**, associate professor, PhD

**Є.О. Авраменко**, ст.викладач, **П.П. Демиденко**, доцент, к.т.н.

National University «Odessa Maritime Academy», Ukraine

Національний університет «Одеська морська академія», Україна

### ABSTRACT

*One of the most important instruments on a ship is the Global Navigation Satellite System (GNSS) receiver, which is designed to determine the ship's position. But these receivers, working with open source, determine the location of the vessel with an accuracy of (10 ... 15) m. In some situations, much greater accuracy is required. For this purpose, there were created stations that operate in differential mode, with their help you can determine the location of the vessel with an accuracy of 2-4 meters.*

*Transmission of differential corrections from the base station to the consumer can be carried out using radio communication, satellite communication systems (for example, INMARSAT), as well as using digital data transmission technology RDS (Radio Data System) on the frequencies of FM radio stations. Currently, many countries already have a developed network of base (differential) stations, constantly broadcasting corrections to a certain territory. For example, in the USA, differential corrections are transmitted by the Coast Guard through marine radio buoys operating at frequencies (283.5...325.0) kHz.*

*This research article analyzes the influence of reference stations on the accuracy of determining the location during navigation. By comparing the known coordinates (obtained as a result of precision geodetic surveying) with the coordinates measured by the receiver and the calculated ranges, the basic navigation receiver forms corrections that are transmitted to consumers via communication channels. Combining several differential stations into a single computer system allows you to perform operations on the transportation of oversized cargo in restricted conditions (rivers, canals, ports, etc.), conducting hydrographic work with great accuracy. For water transport, the precise positioning system has many applications: dredging, prevention and analysis of accidents during the navigation in restricted areas, control of mooring of ships. Accurate navigation systems are technologies of the future. Their application is one of the main trends in the development of modern science and industry.*

**Keywords:** Global Navigation Satellite System, reference stations, differential mode, GNSS receiver, accuracy.

### **Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями**

Сучасний стан та розвиток водного транспорту визначаються багатьма взаємопов'язаними факторами, серед яких ефективно використання водних шляхів та вдосконалення автоматизованих систем керування рухом суден (АСКРС). Удосконалення АСКРС в умовах модернізації інфраструктури морської та річкової галузі необхідно в умовах впровадження нових форм і видів інформаційної взаємодії.

Одним з головних елементів АСКРС є система навігації і позиціонування, в тому числі, супутникова. Удосконалення цієї системи є необхідним етапом на шляху розвитку транспортної галузі. Широке впровадження супутникових технологій дозволить підняти на

більш високий рівень забезпечення транспортної безпеки на водних шляхах як при розстановці навігаційних знаків [1], так і судноводіння [2].

На тлі загальної глобалізації технології дуже швидко застарівають. Наприклад, ще 10 років тому в Україні було офіційно всього три системи координат: СК-95, WGS 84 і місцева система координат (МСК) регіону, району або населеного пункту. Але їх точності на даний момент не вистачає. Потужності супутникових систем для вирішення цієї проблеми поки залишають бажати кращого.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми**

Рішенням проблеми стала технологія референтних станцій, яка забезпечує диференціальний режим визначення координат об'єкта.

Нажаль, в Україні технології референтних станцій в системі управління водним транспортом ще не знайшли належного застосування. Так, на сьогоднішній момент в Україні введена в лад пілотна комерційна мережа референтних станцій для забезпечення високої точності визначення координат - до одиниць сантиметрів - з використанням сигналів від глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС).

Нині, в Державному космічному агентстві України (ДКАУ), існує пілотна мережа референтних станцій, яка розгорнута оператором мережі - українсько-швейцарським СП System Solutions - і на сьогоднішній день покриває Київ і Київську область.

В жовтні 2014 року в Головній астрономічній обсерваторії Національної академії наук (НАН) України було підписано Угоду про створення Національної об'єднаної мережі українських референтних станцій глобальних навігаційних супутникових систем.

Національна мережа референтних станцій ГНСС створена в інтересах впровадження і розвитку в Україні технологій та сервісів точного позиціонування і навігації, які забезпечать високоточною диференціальною коректувальною інформацією користувачів ГНСС державних установ у сфері оборони і національної безпеки, охорони правопорядку і надзвичайних ситуацій, а також при виконанні наукових досліджень.

Мережа об'єднала 78 перманентних базових станцій, що дозволило забезпечити доступ до високоточної коректувальної інформації на більш ніж 90% території країни.

В об'єднану мережу увійшли: мережа станцій системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України Державного космічного агентства України; ГНСС-станції, встановлені в рамках Державної програми створення Державної служби єдиного часу і еталонних частот, що знаходяться в розпорядженні Головної астрономічної обсерваторії

(ГАО) НАН України; станції мережі активних референтних ГНСС - станцій «System.NET», що належать ПрАТ «Систем Солюшнс».

### **Формулювання цілей статті (постановка завдання)**

Розглянути та проаналізувати вплив референтних станцій на точність визначення місця об'єкта при навігації на водних шляхах.

### **Виклад матеріалу досліджень з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів**

Всі *референтні* системи побудовані на основі забезпечення роботи супутникових систем в так званому *диференціальному* режимі.

Диференціальний режим реалізується за допомогою контрольного навігаційного приймача системи ГНСС, розташованого на базовій станції (рис. 1).

Точність визначення координат споживача, яку забезпечують системи ГНСС, становить близько 10 м. Однак в багатьох випадках, таких як навігація суден на вузьких фарватерах, геодезії, навігації літальних апаратів, подібна точність є недостатньою. Для збільшення точності визначення місцезнаходження був запропонований метод диференціальної навігації, який забезпечує точність до декількох десятків сантиметрів.

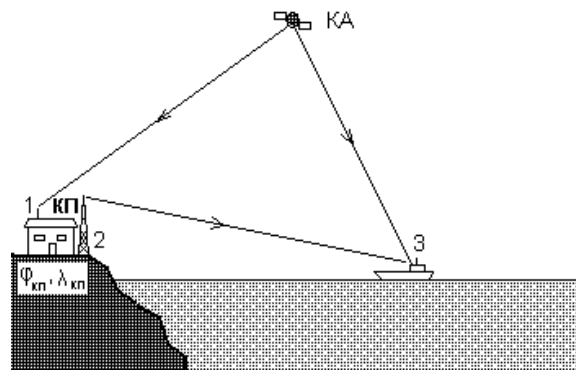


Рис. 1. До суті диференціального режиму

Сутність диференціального режиму полягає в наступному - у виконанні вимірювань координат двома приймачами: один приймач GPS (1) встановлюється на базовій (контрольній) станції - контрольному пункті (КП) з відомими *геодезичними* координатами  $\varphi_{кп}$ ,  $\lambda_{кп}$  (див. рис.1), а інший – у визначеному місці, наприклад, на судні (3). [3,12].

Оскільки відстань від штучних супутників Землі (ШСЗ) до приймачів значно більше відстані між самими приймачами, можна вважати, що умови прийому сигналів обома приймачами практично однакові. Отже, величини помилок також будуть близькі.

Ідея полягає в тому, що на КП опорні прийомоіндикатора ГНСС, що вимірюють псевдо дальності до космічного апарату (КА), розраховують точні дальності (за точними координатами пункту та КА). Розраховуються і псевдо координати, поправки до координат чи дальностей. Ці поправки передаються по радіо до споживачів, що знаходяться поблизу (морські судна - 3) (рис.1). Використовуючи виправлення, приймачі визначають навігаційні параметри з високою точністю.

Порівнюючи відомі координати (отримані в результаті прецизійної геодезичної зйомки) з вимірними координатами приймачем та розраховані дальності, базовий навігаційний приймач формує поправки, які передаються споживачам по каналах зв'язку.

Ці поправки виключають кореговані похибки, обновними із них є:

- похибки ефемерид (положення КА);
- похибки неузгодженості шкал часу КА та приймачів;
- похибки за умови поширення радіохвиль - іоносферна та тропосферна;
- геодезичні похибки.

Приймач споживача враховує прийняті від базової станції поправки при вирішенні навігаційної задачі. Це дозволяє визначити його координати з точністю до одного метра.

Розрізняють два методи обчислення поправок:

- метод корекції координат, коли в якості диференціальних поправок з базової станції передають добавки до вимірних в обумовленому пункті координатами. Недоліком цього методу є те, що приймачі базового і визначуваного пунктів повинні працювати по одному робочому сузір'ю ГНСС. Це незручно, оскільки всі споживачі, що використовують диференціальні поправки, повинні працювати за одними і тими ж штучними супутниками Землі (ШСЗ);

- метод корекції навігаційних параметрів, при використанні якого на базовій станції визначаються поправки до вимірюваних параметрів (наприклад, псевдо дальність) для всіх супутників, які потенційно можуть бути використані споживачами. Ці поправки передаються споживачам і враховуються при вирішенні навігаційної задачі. Недоліком цього методу є підвищення складності апаратури споживачів (рис. 2).

Результати, отримані за допомогою диференціального методу, в значній мірі залежать від відстані між споживачем і базовою станцією. Застосування цього методу найбільш

ефективно, коли переважаючими є систематичні помилки, обумовлені зовнішніми (по відношенню до приймача) причинами. Ці помилки в значній мірі компенсуються при близькому розташуванні базової станції і приймача споживача. Тому зона обслуговування базової станції становить не більше 500 км.

Передача диференціальних поправок від базової станції до споживача може здійснюватися за допомогою радіозв'язку, по системам супутникового зв'язку (наприклад, INMARSAT), а також з використанням технології передачі цифрових даних RDS (Radio Data System) на частотах FM-радіостанцій. В даний час в багатьох країнах вже діє розвинена мережа базових (диференціальних) станцій, постійно транслюючи поправки на певну територію.

Наприклад, в США диференціальні поправки передаються береговою охороною через морські радіобуї, що працюють на частотах (283,5...325,0) кГц.

Супутникова **референтна** станція (СРС), система якої приведена на (рис. 2), призначена для забезпечення даними **диференціальної корекції** при відзначенні точного місця розташування об'єктів за допомогою Глобальних Навігаційних супутникових систем (ГНСС). СРС надає дані в режимі реального часу (Real Time Kinematic) для подальшої післяобробки (Post Processing) [1,4,10].

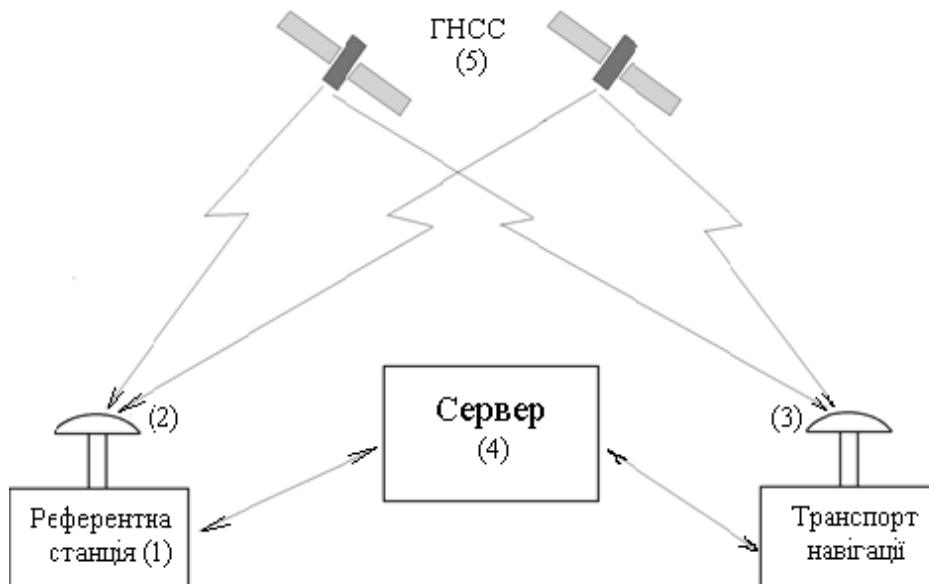


Рис. 2. Структура системи референтних станцій

До складу референтної станції входять: жорстко закріплена на спеціальному пілоні антена (рис. 2, «2»), наприклад, приймачі GPS«Навстар» (один працюючий безпосередньо з самою станцією (рис. 2, «1») і другий - бортовий (рис. 2, «3»)). Для управління референтними станціями і формування вимірювальної і коректувальної інформації супутникового позиціонування **служить сервер з програмним забезпеченням** (рис. 2, «4»). Дані для роботи в режимі реального часу **надаються через мережу Інтернет**. Референтні станції мають «жорстко» зафіксовані за ними координати [3].

Технологія роботи полягає в наступному. В межах часу робіт (моніторингу транспортного засобу) вибирається інформація, отримана з супутника ГНСС (рис. 2, «5») синхронно кожною з референтних станцій і бортовим приймачем (переносним) в деякі моменти  $0, t, \dots, t_n$ . За цими даними обчислюються координати бортового приймача, потім визначаються середні значення координат в кожний з моментів  $t_j$  ( $J = 0, n$ ) ( $\lambda, \varphi, h$  - відповідно довгота, широта і висота) [3]:

$$\lambda_k(t_j) = \left(\frac{1}{k}\right) \sum_{j=1}^k \lambda_i,$$

$$\varphi_k(t_j) = \left(\frac{1}{k}\right) \sum_{j=1}^k \varphi_i,$$

$$h_k(t_j) = \left(\frac{1}{k}\right) \sum_{j=1}^k h_i. \quad (1)$$

Наступним етапом обчислюються ухилення від середнього в лінійній мірі:

$$\Delta\lambda_i = \lambda_i - \lambda_k,$$

$$\Delta\varphi_i \cos \lambda = (\varphi_i - \varphi_k) \cos \lambda,$$

$$\Delta h_i = h_i - h_k. \quad (2)$$

і середні квадратичні помилки координат по одному вектору (від однієї референтної станції):

$$m_{\lambda 1} = \left[ \left( \frac{1}{k-1} \right) \sum_{j=1}^k \Delta\lambda_i^2 \right]^{1/2},$$

$$m_{\varphi 1} = \left[ \left( \frac{1}{k-1} \right) \sum_{j=1}^k \Delta\varphi_i^2 \cos^2 \lambda \right]^{1/2},$$

$$m_{h 1} = \left[ \left( \frac{1}{k-1} \right) \sum_{j=1}^k \Delta h_i^2 \right]^{1/2}. \quad (3)$$

Середні квадратичні помилки за вимірюваннями до *референтних* станцій:

$$m_{\lambda k} = m_{\lambda 1} / \sqrt{k},$$

$$m_{\varphi k} = m_{\varphi 1} / \sqrt{k},$$

$$m_{hk} = m_{h 1} / \sqrt{k}. \quad (4)$$

Середні квадратичні помилки визначення бортового приймача по всьому часу проведення ( $n$  моментів) дорівнюють:

$$m_{\lambda} = \left[ \left( \frac{1}{n} \right) \sum_{j=1}^k m_{\lambda_{kj}}^2 \right]^{1/2},$$

$$m_{\varphi} = \left[ \left( \frac{1}{n} \right) \sum_{j=1}^k m_{\varphi_{kj}}^2 \right]^{1/2},$$

$$m_h = \left[ \left( \frac{1}{n} \right) \sum_{j=1}^k m_{h_{kj}}^2 \right]^{1/2}. \quad (5)$$

Вимірювання координат центра бортового приймача виробляються з дискретністю 0,5с, а вимірювання референтних станцій з дискретністю 1с. Потім за координатами, обчисленими від референтних станцій, виконується інтерполювання на моменти, кратні 0,5с. Отримані результати порівнюються з відповідними координатами, отриманими від бортового приймача з дискретністю 0,5с. Різниця між ними містить помилки вимірювань і інтерполяції [3,7,11]. Помилки вимірів оцінюються за різницями координат, обчислених за вимірюваннями бортового приймача і референтних станцій в моменти, кратні 1с. Виключаючи із загальної помилки помилку вимірювань, виходить помилка інтерполяції на моменти, кратні 0,5с. Зазвичай ця помилка становить (0...4) см.

На водному транспорті система точного позиціонування має безліч застосувань: днопоглиблювальні роботи, запобігання та попередження аварій на водному транспорті, контроль швартування суден та ін.

Область застосування референтних станцій, крім систем навігації водного транспорту, досить широка [4,5]:

- встановлення меж адміністративно-територіальних утворень;
- геодезичне забезпечення гірничо-геологічних робіт, пов'язаних з освоєнням корисних копалин;
- геодезичне забезпечення будівництва доріг і трубопроводів;
- рішення задач лісовпорядкування;
- рішення задач високоточної навігації і диспетчеризації наземних, річкових і повітряних транспортних засобів;
- координатно-часове забезпечення пошуково-рятувальних робіт;
- моніторинг надзвичайних ситуацій;
- геодезичне забезпечення сільськогосподарських робіт (аж до управління машинами і агрегатами, сільськогосподарського призначення).

Дані, одержувані від референтних станцій, вірні й надійні. Точні навігаційні системи - це технології майбутнього. Їх застосування є однією з головних тенденцій розвитку сучасної науки і промисловості.

### **Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку**

Зміст статті буде корисним судноводцям при навігації в обмежених умовах: у каналах, при плаванні по річках, у вузьках; для забезпечення необхідної точності при проведенні днопоглиблювальних робіт та інших роботах, де потрібна висока точність визначення місця розташування .

### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Стандарт RTCM 10402.3 версія 2.3, розроблена спеціальним комітетом Радио Технічної Комісії Морських Сервісів (RTCM104) 20.08.2011 г.

2. Нырков А. П. Безопасность информационных потоков в АСУДС /Нырков А. П., Викулин П. В. // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы, 2010.- № 4, с.78-82.
3. Демиденко П.П. Судовые радиолокационные и радионавигационные системы: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. - О. Феникс, 2016. - 368 с.
4. Каретников В. В., Сикарев А. А. Топология дифференциальных полей и дальность действия контрольно-корректирующих станций высокоточного местоопределения на внутренних водных путях, - СПб.: СПГУВК, 2008. - 353 с.
5. Вагущенко Л.Л. Інтегровані системи ходового містка: Нав.посіб./ОНМА. Латстар,2003.- 170с.
6. Бойков В. В. Техническая реализация спутниковых систем межевания земель./ Бойков В. В., Пересадыко Е. С., Мельников А. В. // ГЕОПРОФИ № 1, 2004.
7. Нырков А. Оценка погрешности коррелированных навигационных измерений / Нырков А., Черненко А. // Речной транспорт (XXI век).— 2009.— Т. 1,— № 5 (41).— с. 71-75.
8. Нырков А. П. Методика проектирования безопасных информационных систем на транспорте / Нырков А. П., Башмаков А. В., Соколов С. С. // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы.— 2010.- № 3, -с. 58-61.
9. COMMITTEE NO. 104. JANUARY 15, 1998. Radio Technical commission For Marine Services. 1800 Diagonal Road. Suite 600. Alexandria. Virginia 22314-2840 U.S.A.
10. Whitehead M.L., Penno G., Feller W.J., Messinger I., Bertiger W.I., Muellerschoen RTCM PAPER 11-98/SC104-STD. RTCM recommended standarts for differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) servise. version 2.2. DEVELOPED BY RTCM SPESIAL R.J., Ijima B.A., Piesinger G. A Close Look at Satloc's Real-Time WADGPS System. GPS Solutions. 1998. Vol. 2. - 2. P. 46-63.
11. Muellerschoen R.J., Bertiger W.I., Whitehead M.L. Flight Tests Demonstrate Sub 50 cms RMS Vertical WADGPS Positioning. Proceedings of ION GPS-99. Nashville. Tenn. September 1999. P. 199-210.
12. Ceva J., Parkinson B., Bertiger W., Muellerschoen R., Yunck T. Incorporation of Orbital Dynamics to Improve Wide-Area Differential GPS. Proceedings of ION GPS-95. P. 647-659. The 8th International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation.

## REFERENCES

1. Standard RTCM 10402.3 version 2.3, developed by a special committee of the Radio Technical Commission for Marine Services (RTCM104) on 20.08.2011
2. Nyrkov A. P. Security of information flows in the automated control system / Nyrkov A. P., Vikulin P. V. // Problems of information security. Computer systems, 2010.- No. 4, p.78-82.
3. Demidenko P.P. Ship radar and radio navigation systems: Textbook. 2nd ed., revised. and additional - O. Phoenix, 2016. - 368 p.
4. Karetnikov V. V., Sikarev A. A. Topology of differential fields and the range of high-precision positioning control and correction stations on inland waterways, St. Petersburg: SPGUVK, 2008. - 353 p.
5. Vagushchenko LL Integrated bridge systems: Manual / ONMA. Latstar, 2003.-170p.
6. Boikov V. V. Technical implementation of satellite land surveying systems. / Boikov V. V., Peresadko E. S., Melnikov A. V. // GEOPROFI No. 1, 2004.
7. Nyrkov A. Evaluation of the error of correlated navigation measurements / Nyrkov A.,

- Chernenko A. // River transport (XXI century). - 2009. - V. 1, - No. 5 (41). - p. 71-75.
8. Nyrkov A. P. Methods for designing secure information systems in transport / Nyrkov A. P., Bashmakov A. V., Sokolov S. S. // Problems of information security. Computer systems. - 2010. - No. 3, - p.58-61.
  9. COMMITTEE NO. 104. JANUARY 15, 1998. Radio Technical commission For Marine Services. 1800 Diagonal Road. Suite 600. Alexandria. Virginia 22314-2840 U.S.A.
  10. Whitehead M.L., Penno G., Feller W.J., Messinger I., Bertiger W.I., Muellerschoen RTCM PAPER 11-98/SC104-STD. RTCM recommended standarts for differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) servise. version 2.2. DEVELOPED BY RTCM SPESIAL R.J., Ijima B.A., Piesinger G. A Close Look at Satloc's Real-Time WADGPS System. GPS Solutions. 1998. Vol. 2. - 2. P. 46-63.
  11. Muellerschoen R.J., Bertiger W.I., Whitehead M.L. Flight Tests Demonstrate Sub 50 cms RMS Vertical WADGPS Positioning. Proceedings of ION GPS-99. Nashville. Tenn. September 1999. P. 199-210.
  12. Ceva J., Parkinson B., Bertiger W., Muellerschoen R., Yunck T. Incorporation of Orbital Dynamics to Improve Wide-Area Differential GPS. Proceedings of ION GPS-95. P. 647-659. The 8thInternational Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation.