

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІДСТАНЕЙ МІЖ БАЗОВИМИ СТАНЦІЯМИ І СУПУТНИКОВИМ ПРИЙМАЧЕМ НА ТОЧНІСТЬ КООРДИНАТНИХ ВИЗНАЧЕНЬ

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF SURFACES BETWEEN BASIC STATIONS AND SATISFACTORY RECOGNITION ON THE ACCURACY OF COORDINATING DEFINITIONS



Неізнестна Наталія Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри проектування доріг, геодезії та землеустрою, Національний транспортний університет, кафедра проектування доріг, геодезії та землеустрою, доцент, super-nesh@ukr.net, +380957970158,

<https://orcid.org/0000-0003-2406-3906>



Хом'як Анна Ярославівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри проектування доріг, геодезії та землеустрою, Національний транспортний університет, кафедра проектування доріг, геодезії та землеустрою, доцент, akhomjak@gmail.com, +380673990164,

<https://orcid.org/0000-0002-2483-8153>



Омельчук Сібілла Костянтинівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри проектування доріг, геодезії та землеустрою, Національний транспортний університет, кафедра проектування доріг, геодезії та землеустрою, доцент, sib@ukr.net, +380974403827,

<https://orcid.org/0000-0003-2191-1551>



Малько Марія Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном e-mail: mariya.malko@gmail.com, тел. +380674021765, <https://orcid.org/0000-0003-4450-1387>

Анотація. Досліджено відстані між різними базовими станціями і мобільним приймачем, а також помилки координатних визначень при різних відстанях між базовою станцією і мобільним приймачем. Для реалізації поставлених завдань були застосовані наступні методи досліджень: польових вимірювань, метод математичного моделювання та методи математичної статистики для обробки експериментальних даних. Встановлено ступень впливу відстаней між базовою станцією і супутниковим приймачем на точність координатних визначень в RTK-режимі.

Ключові слова: RTK-режим, базова станція, супутниковий приймач, помилки, ГНСС, координати, GPS, ГЛОНАСС.

Вступ. В даний час визначення просторових координат об'єктів земної поверхні з використанням мережі перманентних базових станцій (БС) стає все більш затребуваною технологією. Це пояснюється цілою низкою їх переваг щодо традиційних мереж триангуляції і полігонометрії, а саме: висока продуктивність і оперативний збір високоточної просторово-часової інформації для подальших координатних визначень, не потрібна наявність прямої видимості між вихідним і обумовленими пунктами, станції можуть бути встановлені в зручних місцях, там, де вони необхідні (а не на віддалених вершинах), геометрія мережі не є такою критичною як в традиційних мережах.

Існує ряд труднощів при створенні і використанні мережі базових станцій, пов'язаних новизною технології та, як наслідок, з недостатньою вивченістю.

Найважливішою проблемою, при створенні мережі базових станцій є визначення оптимальної відстані між ними. Зменшення відстаней між станціями веде безумовно до підвищення точності позиціювання, але збільшує число станцій, що природно викликає зростання витрат на створення і підтримку мережі. У науково-технічній літературі, присвяченій даному питанню, є суперечлива інформація. Так довжина базисів мережі SAPOS (Germany) становить 40 ... 70 км і включає 250 станцій, GPS network in the urban area of Recife (Brazil) - 20 ... 50 км (4 шт.), RTK Network System in the Tokyo area (Japan) - 50 ... 100 км (6 шт.). ТОВ «Навігаційно геодезичний центр» (мережа БС в Харківській області) вказує, що в статичному режимі максимальна відстань від базової станції до місця проведення зйомки не повинно перевищувати 30 км і лише в деяких випадках допускається робота до 50 км. «Інжиніринговий Центр ГФК» (мережа БС в Ульяновської області РФ) вважає, що максимальна дальність роботи в режимі RTK до 50 км, роблячи позначку, що в періоди активності сонця спотворення радіосигналів супутників ГНСС в іоносфері призводить до погіршення точності або неможливості виконувати точні вимірювання на відстанях більше 25 км. Протиріччя всіх пропозицій полягає в тому, відстань, на яке дозволяє віддалятися від БС приймач, що працює в RTK-режимі, менше, ніж статичний метод виконання вимірювань.

Таким чином, зростаюча популярність використання мереж БС вимагає детального вивчення вищевказаних питань.

Мета і методи. Для встановлення ступеня впливу відстаней між базовою станцією і супутниковим приймачем на точність координатних визначень в RTK-режимі необхідно провести експериментальні дослідження з метою виявлення залежності точності визначення координат в режимі RTK при різних відстанях між супутниковим приймачем і базовою станцією, а також зробити аналіз точності координатних визначень при різних способах формування мережевих поправок. На основі отриманого аналізу, розробити рекомендацій з проектування перманентних базових станцій.

Для визначення залежності точності координат пункту спостережень від одиночних базових станцій були виконані експериментальні дослідження на пункті триангуляції III класу Бортничі. Схема розташування пункту представлена на рисунку 1.



Рисунок 1 – Схема розташування пункту триангуляції Бортничі
Figure 1 – Scheme of location of the point of triangulation Bortnichi

Пункт був обраний таким чином, щоб вплив багатоколійний було мінімальним, тобто навколо пункту вимірювань відсутні високі споруди і дерева, які могли б стимулювати явище багатоколійний і стати джерелом перешкод при прийомі радіосигналів від навігаційних супутників. Загальний вигляд пункту з встановленою на ньому антеною приймача показаний на рисунку 2.

З огляду на, що пункт Бортничі відноситься до 3 класу і невідомо його стан в даний час, то перед виконанням досліджень був виконаний контроль його координат. Для виконано координування пункту в режимі статика щодо 3-х найближчих базових станцій. Накопичення даних здійснювалося протягом 2 годин. За період вимірювань приймалися сигнали від 20-ти навігаційних супутників, з яких 12 є супутниками GPS і 8 ГЛОНАСС. Постобробка цих вимірювань виконана в програмному комплексі SpiderWEB.



Рисунок 2 – Загальний вигляд пункту спостереження
Figure 2 – The general view of the observation point

Результати і пояснення. В результаті виконаних вимірювань отримані координати, які наведені в таблиці 1. Ці координати дещо відрізняються від каталожних значень координат пункту, які були раніше визначені в результаті лінійно-кутових побудов. З огляду на якість сучасних технологій і вимірювань, було прийнято рішення, що в якості еталонних координат пункту, будуть прийняті координати з супутникових спостережень.

Таблиця 1 – Еталонні координати пункту Бортничі в СК-63
Table 1 – The reference coordinates of the Bortnichi point in SC-63

Бортничі	x	y	h
III клас	5573987,371	3386228,936	113,138
Статика	5573987,441	3386228,945	113,044
Різниця координат, мм	+70	+9	-96

Для вирішення поставленого завдання досліджень, а саме - встановлення залежності точності визначення координат від одиночних базових станцій в RTK, були незалежно визначені координати пункту Бортничі від 6-ти базових станцій, віддалених на різні відстані в діапазоні від 6 до 235 км. Схема розміщення базових станцій щодо пункту Бортничі показана на рисунку 3.

Відстані до БС і напрямлення на них наведені в таблиці 2. На кожну БС було виконано трохи більше 300 вимірювань (табл.2) при автозбереженні даних з інтервалом в 1 с. Всі вимірювання виконувалися в умовах чистого небосхилу при вугіллі маски в 10 градусів. В результаті того, що спостереження проводилися у вечірній то це сприяло зменшенню впливу іоносферних затримок. Таким чином, можна констатувати, що умови проведення експериментальних вимірювань були найкращими.

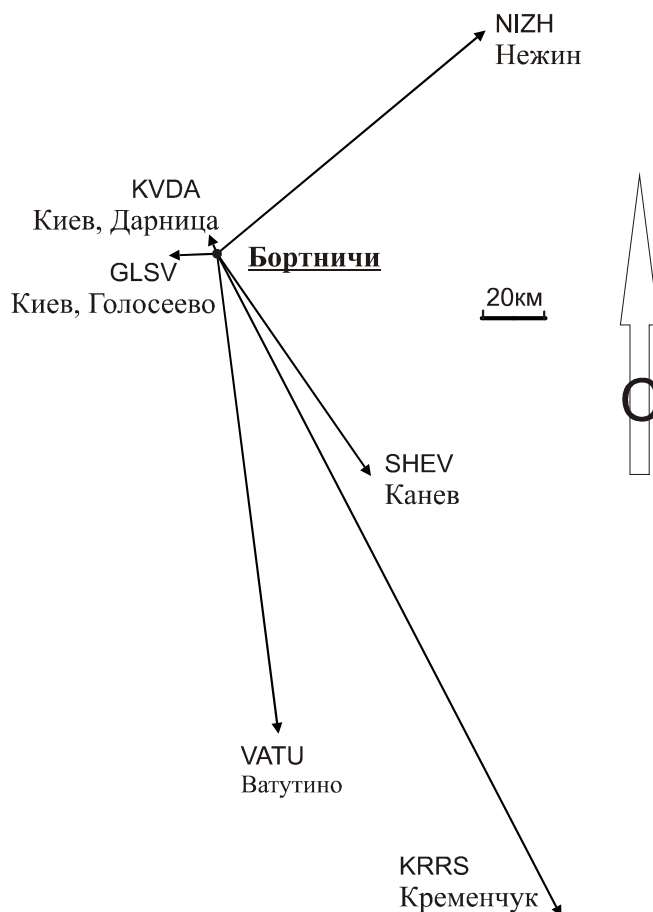


Рисунок 3 – Схема взаємоположення базових станцій пункту спостережень
Figure 3 – Scheme of interconnection of base stations of the point of observation

Попередній аналіз отриманих результатів показує, що значення, розкиду, випадкових середніх квадратичних помилок і систематичних помилок зростають зі збільшенням відстаней до БС. Крім того, істотно змінюється розсіювання планових координат (рисунок 4).

Аналіз цих графіків показує, що область розсіювання при вимірах від БС KVDA, GLSV і NIZH формує еліпс. Зі збільшенням відстані між супутниковим приймачем і БС область розсіювання стає витягнутою, що свідчить про переважання систематичних помилок вимірів.

Систематичні помилки в плані практично лінійно залежать від відстані до базової станції (рисунок 5). Ця залежність описується лінійною функцією з коефіцієнтом кореляції рівним 0,986:

$$\delta_l = 0,0037 S_{km} \quad (1)$$

Якщо задатися дециметровою точністю, тобто систематична помилка в плані не повинна перевищувати 0,1 м, то відстань до БС не повинно перевищувати 25 км.

Таблиця 2 – Характеристики вимірних векторів і результати оцінки точності

Table 2 – Characteristics of measured vectors and results of estimation of accuracy

Назва БС	KVDA	GLSV	SHEV	NIZH	VATU	KRRS
Розташування БС	Київ, Дарниця	Київ, Голосеєво	Канів	Ніжин	Ватутіна	Кременчук
Відстань, км	6,6	15,3	85,1	109,9	152,3	235,1
Дирекційний кут, градус	272,06	338,25	145,31	50,25	172,71	152,54
Число вимірів n_j	312	311	328	329	329	329
Розкид значень, м						
за $x - \Delta x^j$	0,008	0,029	0,029	0,087	0,105	0,721
за $y - \Delta y^j$	0,009	0,017	0,029	0,049	0,121	0,302
за висотою - Δh^j	0,022	0,040	0,069	0,189	0,113	0,532
Середня квадратична похибка за відхиленнями від середнього значення, м						
за $x - \sigma_x^j$	0,002	0,005	0,005	0,026	0,028	0,160
за $y - \sigma_y^j$	0,002	0,003	0,007	0,012	0,035	0,061
у плані - σ_l^j	0,003	0,006	0,009	0,029	0,045	0,171
за висотою - σ_h^j	0,003	0,009	0,013	0,047	0,023	0,070
Відхилення від стандарту (систематична помилка), м						
за $x - \delta x^j$	-0,015	-0,012	-0,263	0,029	-0,438	-0,763
за $y - \delta y^j$	0,004	0,023	0,087	0,304	0,3183	0,527
у плані - δl^j	0,016	0,026	0,277	0,306	0,541	0,927
дир.кут відхилення, градус - α_l^j	180	152	108	5	126	125
за висотою - δh^j	-0,004	-0,023	-0,012	-0,001	-0,147	0,212

При значних відстанях спостерігається відхилення значень планових координат у напрямку до базової станції.

Систематичні помилки по висоті істотно менше і при відстанях до 100 км не перевищують 0,1 м.

Випадкові помилки вимірювань істотно менше систематичних (рисунок 6). Вони теж зростають з ростом відстаней, але не перевищують 0,1 м при відстанях до 180 км.

Ці графіки показують, що спостерігається тенденція зміщення координат з плином часу. При вимірах від БС KRRS спостерігаються скачки в координатах - це явище пояснюється тим, що пункт спостереження знаходиться від БС в більш ніж 200 км і супутниковий приймач постійно намагається виконати ініціалізацію.

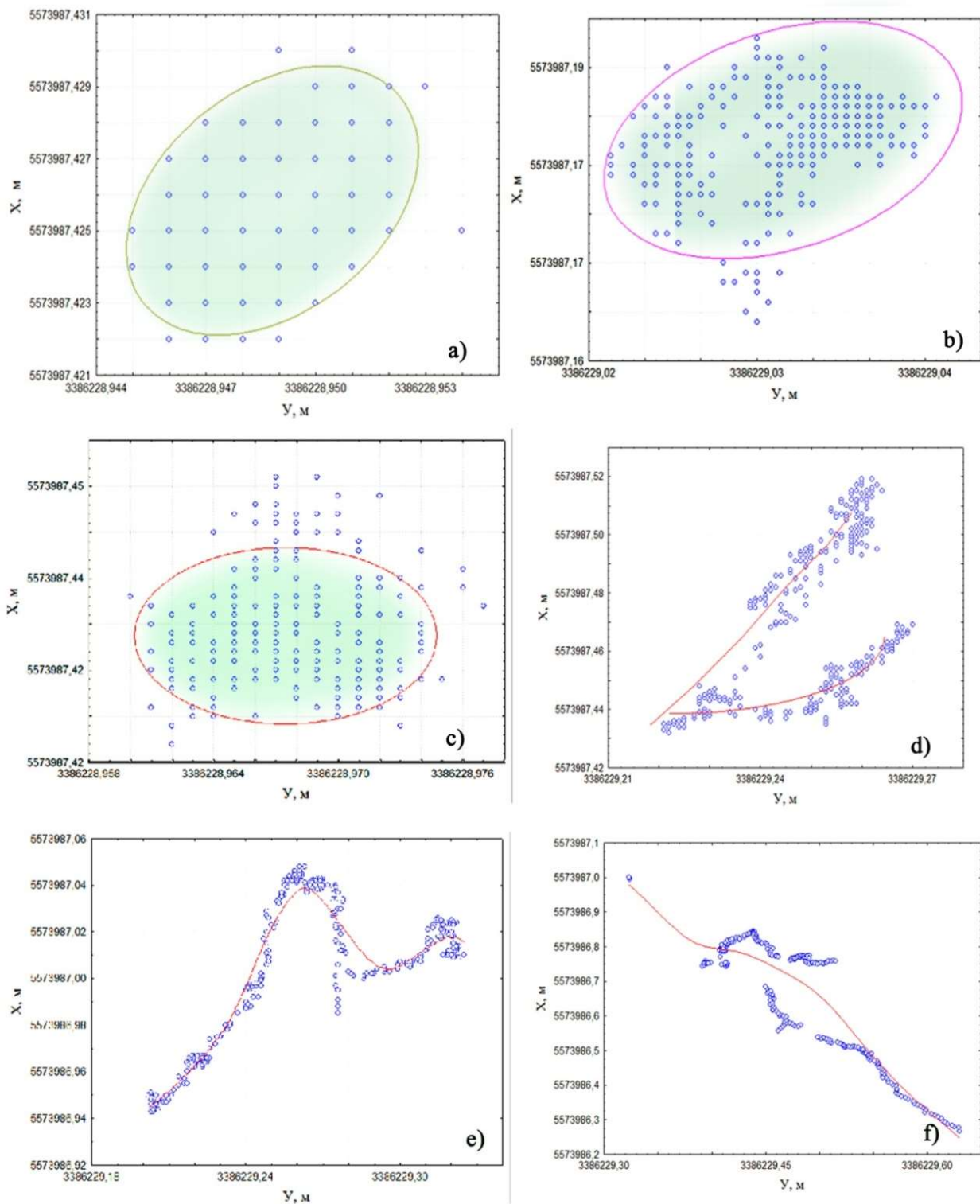


Рисунок 4 – Область розсіювання координат пункту спостережень з базових станцій: а) KVDA ($s = 7$ км); б) GLSV ($s = 15$ км); в) SHEV ($s = 85$ км); г) NIZN ($s = 110$ км); д) VATU ($s = 152$ км); е) KRRS ($s = 235$ км)

Figure 4 – Scope of the coordinates of the point of observation from the base stations: а) KVDA ($s = 7$ km); б) GLSV ($s = 15$ km); в) SHEV ($s = 85$ km); г) NIZN ($s = 110$ km); д) VATU ($s = 152$ km); е) KRRS ($s = 235$ km)

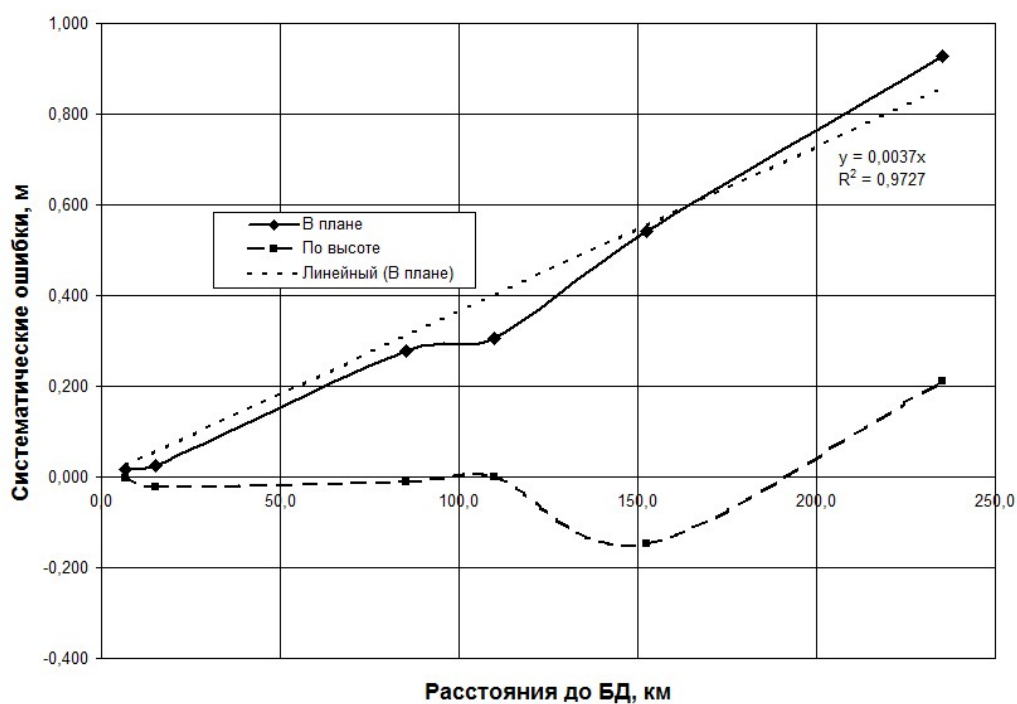


Рисунок 5 – Графіки зміни систематичних помилок
 Figure 5 – Changes in systematic errors

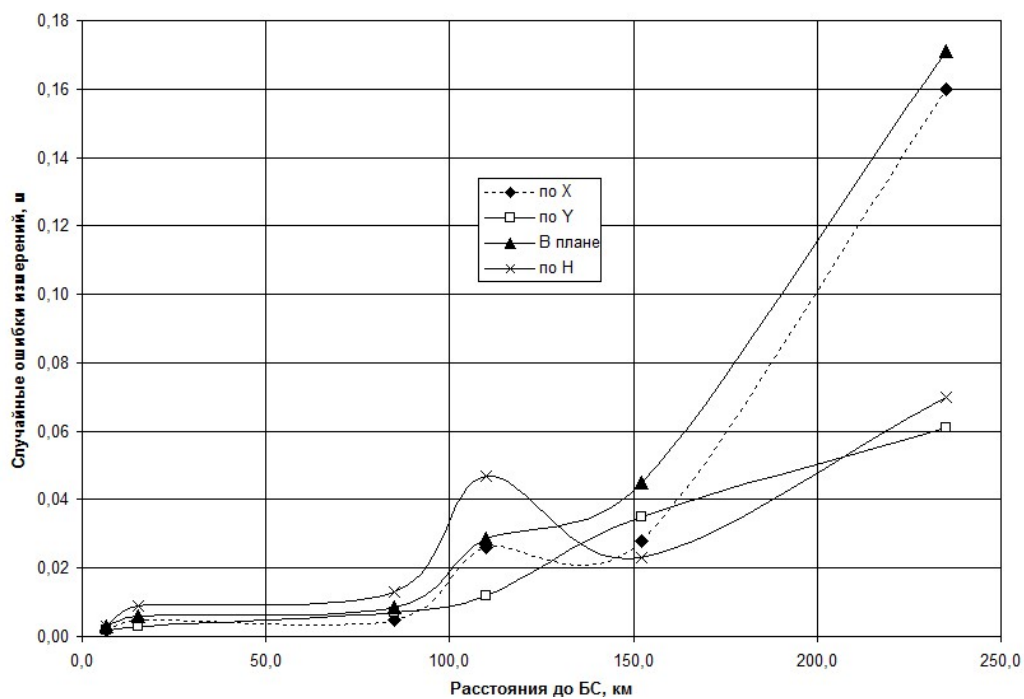


Рисунок 6 – Графіки зміни випадкових помилок
 Figure 6 – Charts for changing random errors

Висновки та рекомендації. На основі виконаних досліджень встановлено, що випадкові похибки вимірювань істотно менше систематичних і вони не є чинником, що визначає відстані до БС. Основним чинником, що обмежує допустимі відстані між супутниковим приймачем і БС, є систематичні помилки, обумовлені неможливістю використовувати передані поправки на відстанях більше 25-30 км. При цьому поправки в плані визначаються гірше, ніж по висоті. З огляду на перекриття зон впливу від окремих станцій можна вважати, що відстані між станціями повинні складати не більше 50-60 км.

Перелік посилань

1. Старостин А.Ю. Концепция сети постоянно действующих станций virtual reference station (vrs) компании trimble и технология ее поэтапного создания/А.Ю. Старостин/ ЗАО НПП «Навгеоком» /г. Москва. / [Электронный ресурс] /Режим доступа: <http://www.credo-dialogue.com/getattachment/ce89a4a8-abce-4139-b059-2e9a3080f3ff/Kontseptsiaj-seti.aspx>, свободный.
2. Руководящий технический материал РТМ 68-14-01 спутниковая технология геодезических работ. Термины и определения / Федеральная служба геодезии и картографии России центральный ордена «знак почета» научно-исследовательский институт геодезии, аэросъемки и картографии им. Ф.Н. Красовского. – М.: ЦНИИГАиК, 2001г.
3. Евстафьев О.В. Организационно-технические мероприятия создания сети постоянно действующих спутниковых референчных станций / О.В. Евстафьев / Создание региональной сети постоянно действующих спутниковых станций: семинар (г. Ульяновск, 9 июня 2011 г.) – Ульяновск: Инжиниринговый Центр ГФК, 2001г..
4. Базовые станции и сети GPS / [Электронный ресурс] / Глобальные навигационные спутниковые системы и их наземная инфраструктура / Режим доступа: http://www.rogtectmagazine.com/PDF/Issue_013/09_SatelliteSystems.pdf, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ..
5. Горб А.А. Экспериментальная оценка точности определения координат диф. режиме / А.А. Горб, Р.Н. Федоренко // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва, випуск I (17) 2009г..
6. Евстафьев О.В. Наземная инфраструктура ГНСС для точного позиционирования / О.В. Евстафьев / Геопрофи. — 2008. — № 1. — С. 21–24.
7. G.Hedling, B. Jonsson, C. Lilje, M. Lilje. SWEPOS® - The Swedish network of permanent gps reference station (Status February 2001)
8. B. Jonsson, G.Hedling, P. Wiklund. SWEPOS® Network-RTK Services – status, applications and experiences. ION GPS/GNSS 2003, 9-12 September, 2003, Portland, Oregon, U.S. - [ionswep3091_pub.pdf](#)
9. EUREF Permanent Networks / [Электронный ресурс] / GPS Permanent Networks in Germany and Europe / Режим доступа: <http://www.epncb.oma.be>, свободный.
10. Sapos / [Электронный ресурс] / Служба спутникового позиционирования Геодезического Управления Германии / Режим доступа: <http://www.sapos.de>, свободный.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF SURFACES BETWEEN BASIC STATIONS AND SATISFACTORY RECOGNITION ON THE ACCURACY OF COORDINATING DEFINITIONS

Neizvestna Natalia, National Transport University, Department of Road Designing, Geodesy and Land Management, PhD in technical science, Associate Professor, supernesh@ukr.net, +380957970158, <https://orcid.org/0000-0003-2406-3906>

Khomiak Anna, National Transport University, Department of Road Designing, Geodesy and Land Management, PhD in technical science, Associate Professor, akhomjak@gmail.com, +380673990164, <https://orcid.org/0000-0002-2483-8153>

Omelchuk Sibilla, National Transport University, Department of Road Designing, Geodesy and Land Management, PhD in technical science, Associate Professor, sib-@ukr.net, +380974403827, <https://orcid.org/0000-0003-2191-1551>

Malko Marya M., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National Transport University, Associate Professor of the Department of Transport Engineering and Management
e-mail: mariya.malko@gmail.com, tel. +380674021765, <https://orcid.org/0000-0003-4450-1387>

Summary: The distance between different base stations and the mobile receiver, as well as errors of coordinate definitions at different distances between the base station and the mobile receiver are investigated. For realization of the set tasks the following methods of research were applied: field measurements, mathematical modeling method and methods of mathematical statistics for the processing of experimental data. The degree of influence of distances between the base station and the satellite receiver on accuracy of coordinate definitions in RTK-mode is established.

Key words: RTK-mode, base station, satellite receiver, errors, GNSS, coordinates, GPS, GLONASS.

References

1. Starostin A.Y. The concept of the trimble's virtual reference station (vrs) and the technology of its step-by-step creation / A.Yu. Starostin / CJSC NPP "Navgeokom" / g. Moscow. / [Electronic resource] / Access mode: <http://www.credo-dialogue.com/getattachment/ce89a4a8-abce-4139-b059-2e9a3080f3ff/Kontseptsiaj-seti.aspx>, free.
2. The leading technical material of RTM 68-14-01 satellite technology of geodetic works. Terms and definitions / The Federal Service of Geodesy and Cartography of Russia is the central Order of the "Honorable Mark" Research Institute of Geodesy, Aerial Photography and Cartography. FN Krasovskogo. - Moscow: TsNIIGAiK, 2001
3. Evstafiev O.V. Organizational-technical measures for the creation of a network of permanently operating satellite reference stations / O.V. Evstafiev / Creation of a regional network of permanently operating satellite stations: a seminar (Ulyanovsk, June 9, 2011) - Ulyanovsk: Engineering Center of GFK, 2001.
4. Base stations and GPS / [Electronic resource] / Global navigation satellite systems and their terrestrial infrastructure / Access mode: http://www.rogtectmagazine.com/PDF/Issue_013/09_SatelliteSystems.pdf, free. - Zagl. from the screen. - I'm from. Russian, English ..
5. Gorb AA Experimental estimation of the accuracy of the determination of the coordinates diff. mode / AA Gorb, RN Fedorenko // Modern achievements in geodetic science and production, issue I (17) 2009.
6. Evstafiev O.V. Ground-based GNSS Infrastructure for Precision Positioning / O.V. Evstafiev / Geopros. - 2008. - No. 1. - P. 21-24.
7. G.Hedling, B.Jonsson, C.Lilje, M.Lilje. SWEPOS® - The Swedish network of permanent gps reference station (Status February 2001)
8. B. Jonsson, G.Hedling, P. Wiklund. SWEPOS® Network-RTK Services - status, applications and experiences. ION GPS / GNSS 2003, September 9-12, 2003, Portland, Oregon, U.S. - ionswep3091_pub.pdf
9. EUREF Permanent Networks / [Permanent Networks in Germany and Europe / Access Mode: <http://www.epncb.oma.be>, free.
10. Sapos / [Electronic resource] / Satellite Positioning Service of the Geodetic Office of Germany / Access Mode: <http://www.sapos.de>, free.
11. DSTU B V.2.7-47 Budivelni materiali. Betoni. Metodi viznachennya morozostiykosti. Zagalni vimogi.