

## АНАЛІЗ ЯКОСТІ МЕРЕЖЕВОГО РОЗВ’ЯЗКУ В АКТИВНИХ GNSS МЕРЕЖАХ

© Савчук С. Г., Ланьо О.В., 2011

*На основе проведенного экспериментального исследования на активной сети UA-EUPOS/ZAKPOS показана зависимость качества сетевого решения от расстояния между базовыми GNSS станциями.*

*On the basis of experimental research on the active network UA-EUPOS/ZAKPOS shows the quality of network solutions of the distance between GNSS base stations.*

**Постановка проблеми.** Новітні досягнення в сфері напівпровідникових технологій, покращення якості й надійності зв’язку, зростання попиту на вимірювальні роботи зумовили істотний поштовх розвитку так званого наземного сегменту GNSS. Істотної модернізації зазнало не тільки обладнання постійно діючих референсних станцій, а й сама концепція їх використання. Почала набирати оберти тенденція побудови активних GNSS мереж різного призначення. В Україні прикладом такої мережі слугує GNSS мережа UA-EUPOS/ZAKPOS [1].

Головною концептуальною перевагою будь-якої активної GNSS мережі, порівняно з поодинокими GNSS станціями, є можливість генерування так званого мережевого розв’язку – моделювання стану актуальних умов. Програмна реалізація мережевого розв’язку може ґрунтуватись на різних технологічних методах - FKP, VRS, MAX, RTCM3Net тощо, але до того ж завжди присутня одна спільна ознака – одночасне використання вимірювальної інформації від всіх станцій мережі.

Загалом цей процес виглядає так. Програмне забезпечення, базуючись на відомих точних координатах станцій та щосекундній вимірювальній інформації, формує миттєві похибки для кожної станції. Далі за допомогою математичних фільтрів моделюється поле похибок, яке слугує відправним пунктом для генерування мережевого розв’язку обраним технологічним методом.

Проблемою, що залишається сьогодні, є розроблення дієвого методу аналізу якості мережевого розв’язку, передусім в контексті густоти розташування станцій в GNSS мережі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сьогодні густота розташування базових станцій в GNSS мережах насамперед зумовлена рекомендаціями фірм-виробників обладнання й мережевого програмного забезпечення. Як правило, йдеться про відстань між станціями приблизно в 60 км [2]. Також вони радять ще більше згущувати мережі у зв’язку з циклічним збільшенням сонячної активності в найближчі роки [2, 5].

З іншого боку, в налаштуваннях програмного забезпечення не існує навіть рекомендаційних обмежень щодо відстаней між станціями у разі налаштування мережевих алгоритмів, хоча за замовчуванням, як правило, виставлене значення у 100 км між користувачем та найближчою базовою станцією. Якщо припустити, що станції розташовані рівномірно одна від одної, одержимо значення відстані між станціями більше ніж 170 (!) км.

Оскільки різниці достатньо істотні, то складається враження про дещо комерційне походження зазначених рекомендацій.

Також варто відмітити, що фундаментальні положення стосовно розміщення та експлуатації постійно діючих станцій не поновлювались протягом останніх років й не містять конкретних рекомендацій щодо взаємного розташування таких станцій у мережах [3,4].

**Постановка завдання.** Основна мета роботи – проаналізувати якість мережевого розв’язку за різних відстаней між базовими станціями в активних GNSS мережах.

**Виклад основного матеріалу.** Одним з найпопулярніших сьогодні методів мережевого розв’язку є метод VRS (Virtual Reference Station), базовий алгоритм якого розроблено в німецькій фірмі Terrasat наприкінці минулого століття. Він полягає в формуванні поправок відносно умовної точки – віртуальної базової станції, координати якої приблизно відповідають навігаційним координатам рухомого приймача. Цей метод до сьогодні є основою одержання мережевого розв’язку у програмних комплексах провідних фірм виробників Trimble, Leica Geosystems, Topcon та інших.



Рис. 1. Загальна схема GNSS мережі UA-EUPOS/ZAKPOS станом на квітень 2011 р.

Фактично, мережевий розв’язок методом VRS є стовідсотковим математичним моделюванням актуальних умов у будь-якій точці в зоні покриття мережі. Враховуючи те, що вихідною інформацією для програмного забезпечення обчислювального центру активної GNSS мережі є вимірвальна інформація від базових станцій, логічно припустити, що якість мережевого розв’язку погіршується з відключенням будь-якої станції, тобто із збільшенням відстаней до найближчих працюючих станцій. Але наскільки?

Суть питання полягає у взаємному порівнянні точних координат будь-якого фіксованого пункту за різних конфігурацій базових станцій, що працюють у мережі, тобто у порівнянні результатів мережевого розв’язку за різних відстаней між базовими станціями.

Нині єдиною мережею на території України, яка пропонує користувачам мережеві розв’язки методами VRS та RTCM3Net, є GNSS мережа активних референсних станцій UA-EUPOS/ZAKPOS (див. рис. 1).

Детальну інформацію щодо мережі UA-EUPOS/ZAKPOS можна знайти на інформаційному сайті мережі [www.zakpos.zakgeo.com.ua](http://www.zakpos.zakgeo.com.ua).

Для дослідження якості мережевого розв’язку було обрано Західний сегмент мережі активних референсних станцій UA-EUPOS/ZAKPOS, який обладнано сучасними GNSS приймачами Trimble NetR5. Станції розташовані в Закарпатті у містах Мукачево, Хуст, Рахів, Міжгір’я та В.Березний (див. рис.2) і мають відповідні назви: MUKA, HUST, RAHI, MIZG, VBER.

Особливість цього типу базових приймачів полягає у можливості додатково працювати в так званому режимі NMEA-приймача. Це дає можливість порівняти точні координати станції, одержані опрацюванням тривалих серій спостережень, з миттєвими координатами, що одержані із мережевих розв’язків в реальному часі за різних конфігурацій базових станцій.



Рис. 2. Станції мережі UA-EUPOS/ZAKPOS, які устатковані приймачами Trimble NetR5

Схема експериментальних досліджень така:

- створення декількох мереж (суто програмно) з мінімальною кількістю різних базових станцій, очевидно, що відстані між станціями різні;
- одержання мережевого розв'язку від утворених мереж на загальний фіксований пункт – станцію, яка не бере участі в генеруванні мережевого розв'язку;
- порівняння одержаних результатів між собою та з контрольними даними.

Було створено п'ять повністю незалежних між собою тестових GNSS мереж. До складу кожної мережі введено чотири базові станції. Серед них були як станції GNSS мережі UA-EUPOS/ZAKPOS, так і окремі станції GNSS мереж сусідніх країн – Польщі (USDL), Словаччини (SKSV, TREB), Румунії (SATU, BAIA, VISE) та Угорщини (VASA) (див. рис. 3).

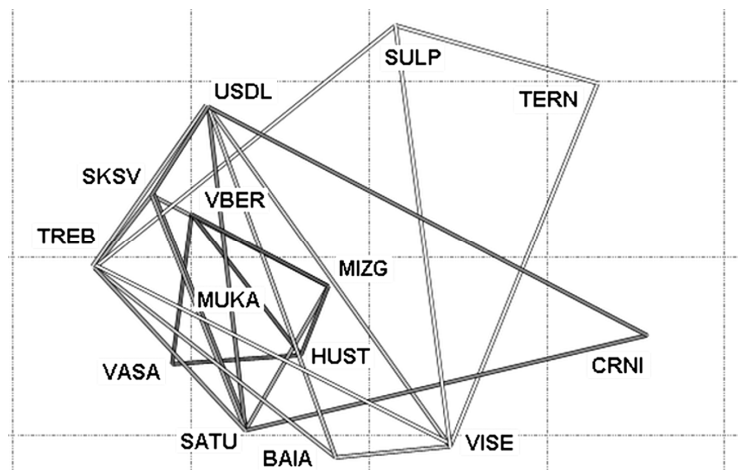


Рис. 3. Схема п'яти тестових незалежних повнофункціональних GNSS мереж

Всі мережі мають в загальному різні відстані між станціями, різну площу покриття, різну геометрію та різну сумарну швидкість в надходженні даних від станцій до обчислювального центру. Станції мереж також обладнано різними приймачами та антенами, наприклад, від сучасних мультисистемних GNSS приймачів Trimble NetR5 та Leica GRX1200GGpro до суто GPS приймачів, наприклад, Trimble 4700.

Детально про обладнання базових станцій можна дізнатися на відповідних сайтах операторів GNSS мереж :

- GNSS мережа Польщі – ASG-EUPOS, сайт [www.asgeupos.pl](http://www.asgeupos.pl)
- GNSS мережа Словаччини – SKPOS, сайт [www.skpos.gku.sk](http://www.skpos.gku.sk)
- GNSS мережа Румунії – ROMPOS, сайт [www.rompos.ro](http://www.rompos.ro)
- GNSS мережа Угорщини – GNSSnet.hu, сайт [www.gnssnet.hu](http://www.gnssnet.hu)

Для проведення тестування було виділено окремий сервер з мережевим програмним забезпеченням, також було створено п'ять точок монтування на окремому кластері.

Конфігурація мереж була обрана так, щоб у зоні покриття кожної опинилась мінімум одна базова станція з приймачем Trimble NetR5, властивості якого заплановано використати для досліджень. Для мереж TREB-SKSV-MIZG-SATU та VASA-VBER-MIZG-HUST – це є станція MUKA. Для мереж SATU-SKSV-USDL-CRNI, TREB-SULP-TERN-VISE та TREB-USDL-VISE-BAIA – це є станції MUKA та MIZG.

Точні координати всіх станцій є відомими, зокрема і координати станцій МУКА та MIZG, які ми прийняли за контрольні для порівняння з окремими розв'язками від створених мереж.

Вбудоване програмне забезпечення GNSS приймача Trimble NetR5 повноцінно підтримує технологію NTRIP (кастер, сервер та клієнт), що дозволило обирати джерело одержання поправок на кастері та наочно відображати результати. Відображення результатів реалізовано побудовою певних графіків, на яких наводяться точні (встановлені) координати приймача й поточні координати з мережевого розв'язку. Окремо будуються графіки для локальних координат  $e, n, h$  (у напрямі Схід/Північ –east/north та висоти -height).

Поточні координати можна відсилати у відкритому форматі NMEA, наприклад, NMEA-GGK за технологією client-server на будь-яку IP-адресу, що потенційно дозволяє створити додаткове програмне забезпечення для аналізу або моніторингу одержаних розв'язків. Відзначимо, що формат NMEA-GGK передбачає наявність параметра GPS Quality Indicator (Індикатор якості GPS), який дає змогу проводити ефективну фільтрацію результатів за типом розв'язку, застосованого в кожний момент часу. А це, своєю чергою, дозволяє одержати статистичні дані про факт застосування кожного типу розв'язку протягом певного періоду (див. рис. 4).

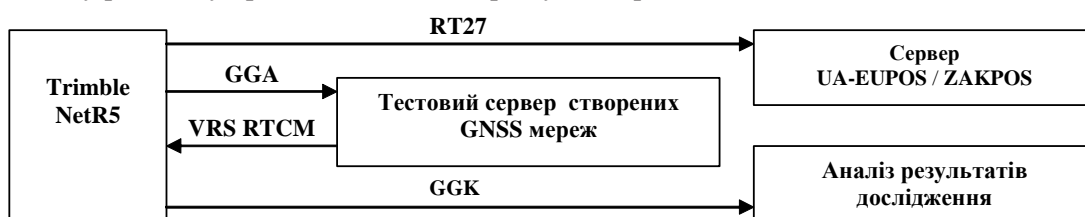


Рис. 4. Загальна схема передачі даних під час дослідження

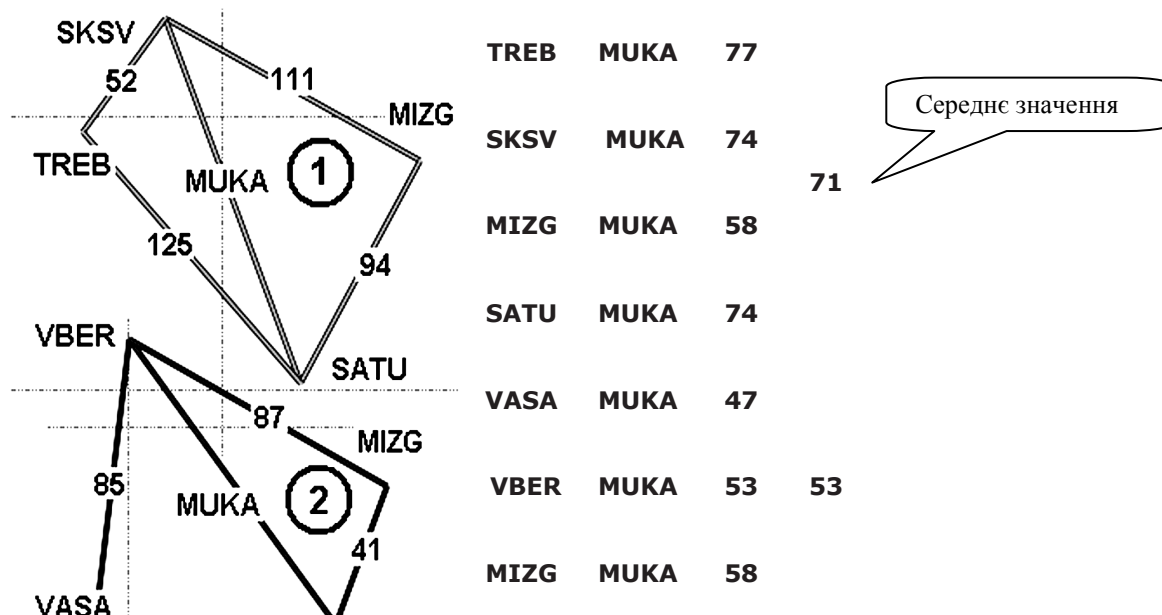
Подібний підхід використали на фірмі Trimble під час розроблення програмних комплексів для контролю цілісності GNSS мереж (Trimble Integrity Manager) та для моніторингу зсувів і деформацій за допомогою GNSS мереж (Trimble 4D Control) [6].

Протягом всього дослідження всі задіяні приймачі продовжували безперервно працювати в мережах своїх операторів. Дані на сервер для дослідження надходили паралельно до основного напрямку.

Нижче в таблиці наведені схеми розташування базових станцій в п'яти тестових мережах, відстані між базовими станціями по периметру та між базовими станціями і тестовим пунктом (станція МУКА або станція МУКА та MIZG) в кілометрах. Окремо зазначені середні відстані між базовими станціями і тестовим пунктом також у кілометрах.

Таблиця 1

Схеми розташування тестових базових станцій



<b>HUST</b>	<b>MUKA</b>	<b>52</b>			
<b>SATU</b>	<b>MUKA</b>	<b>74</b>		<b>SATU</b>	<b>MIZG 94</b>
<b>SKSV</b>	<b>MUKA</b>	<b>74</b>		<b>SKSV</b>	<b>MIZG 112</b>
			<b>124</b>		<b>127</b>
<b>USDL</b>	<b>MUKA</b>	<b>110</b>		<b>USDL</b>	<b>MIZG 121</b>
<b>CRNI</b>	<b>MUKA</b>	<b>239</b>		<b>CRNI</b>	<b>MIZG 182</b>
<b>TREB</b>	<b>MUKA</b>	<b>77</b>		<b>TREB</b>	<b>MIZG 132</b>
<b>SULP</b>	<b>MUKA</b>	<b>181</b>		<b>SULP</b>	<b>MIZG 150</b>
			<b>163</b>		<b>146</b>
<b>TERN</b>	<b>MUKA</b>	<b>241</b>		<b>TERN</b>	<b>MIZG 188</b>
<b>WISE</b>	<b>MUKA</b>	<b>151</b>		<b>WISE</b>	<b>MIZG 114</b>
<b>TREB</b>	<b>MUKA</b>	<b>77</b>		<b>TREB</b>	<b>MIZG 132</b>
<b>USDL</b>	<b>MUKA</b>	<b>110</b>		<b>USDL</b>	<b>MIZG 121</b>
<b>WISE</b>	<b>MUKA</b>	<b>151</b>	<b>112</b>	<b>WISE</b>	<b>MIZG 114 116</b>
<b>BAIA</b>	<b>MUKA</b>	<b>108</b>		<b>BAIA</b>	<b>MIZG 97</b>

Програмне забезпечення на сервері було налаштовано для генерації мережевого розв'язку за умови наявності мінімум п'яти "спільних" супутників, що є стандартною умовою технології RTK.

За характеристику якості мережевого розв'язку для локальних координат  $h, e, n$  було прийнято значення  $\mu$  та  $\sigma$  ( $\mu$  – усереднене значення координати,  $\sigma$  – усереднена квадратична похибка). До таблиці внесено добові значення для  $\mu$  та  $\sigma$  з урахуванням часу під час втрат фіксованого мережевого розв'язку. Розмір максимальних викидів  $\Delta_{\max}$  наведено тільки для фіксованого мережевого розв'язку (див. табл. 2).

Таблиця 2

Характеристики якості мережевого розв'язку

Мережа	Пункт (CORS)	Середня відстань, км	Наявність фіксованого мережевого розв'язку (%)	Кількість втрат мережевого розв'язку	Локальні координати	$\Delta_{\max}$ , м	$\mu$ , м	$\sigma$ , м
1	MUKA	71	99%	6	$h$	0.095	0.015	0.036
					$e$	0.011	-0.001	0.014
					$n$	0.015	-0.003	0.010
2	MUKA	53	99%	5	$h$	0.105	0.014	0.036
					$e$	0.010	-0.002	0.016
					$n$	0.015	-0.003	0.009
3	MUKA	124	95%	25	$h$	0.077	0.017	0.070
					$e$	0.020	0.001	0.029

					<i>n</i>	0.020	-0.009	0.071
4	MUKA	163	94%	39	<i>h</i>	0.145	0.026	0.108
					<i>e</i>	0.150	0.005	0.066
					<i>n</i>	0.160	0.002	0.073
5	MUKA	112	98%	11	<i>h</i>	0.037	0.003	0.015
					<i>e</i>	0.014	-0.001	0.019
					<i>n</i>	0.019	0.001	0.010
3	MIZG	127	94%	28	<i>h</i>	0.081	0.011	0.109
					<i>e</i>	0.029	0.009	0.056
					<i>n</i>	0.038	-0.004	0.072
4	MIZG	146	93%	41	<i>h</i>	0.125	0.024	0.087
					<i>e</i>	0.120	0.005	0.024
					<i>n</i>	0.100	0.006	0.014
5	MIZG	116	96%	11	<i>h</i>	0.066	0.008	0.011
					<i>e</i>	0.014	0.018	0.028
					<i>n</i>	0.019	0.019	0.031

Треба зазначити, що всі викиди, які були зафіксовані під час дослідження, траплялися винятково в перші дві-три секунди відновлення фіксованого мережевого розв'язку.

Під час проведення аналізу одержаних даних потрібно звернути увагу ще на такий факт, як часове співвідношення відсутності мережевих розв'язків для тестових станцій MUKA та MIZG. Так, наприклад, для тестових мереж з номерами 3, 4, 5 зафіксовано різний час відсутності фіксованого мережевого розв'язку для зазначених станцій. Це пов'язано з додатковою затримкою в лініях зв'язку з станцією MIZG порівняно з станцією MUKA, яку було підключено до тестового серверу локально (затримка практично відсутня).

Значення  $\mu$  свідчить про високу узгодженість встановлених точних координат базових станцій у всіх тестових мережах, що підкреслює надійність вихідних даних для дослідження. Значення  $\sigma$  свідчать про практичну працездатність алгоритмів моделювання мережевого розв'язку на середніх відстанях понад 100 км між базовими станціями та пунктом спостережень.

**Висновки.** Грунтуючись на одержаних результатах та специфіці проведення дослідження якості мережевого розв'язку в GNSS мережах, можемо зробити такі висновки:

- за середніх відстаней більше ніж 150 км між базовими станціями та тестовим пунктом фіксований мережевий розв'язок залишається достатньо якісним для багатьох задач;
- у разі збільшення відстаней вагомішою стає проблема наявності “спільних” супутників, ніж проблема погіршення якості фіксованого мережевого розв'язку;
- рекомендації щодо відстаней між базовими станціями в активних GNSS мережах не можуть бути загальними, обов'язково потрібно враховувати технічні характеристики обладнання, мережевого програмного забезпечення та ліній зв'язку;
- оскільки до уваги не брали наявні різниці впливу іоносфери та тропосфери між базовими станціями і тестовими пунктами, то одержані результати потрібно вважати спотвореними до покращення.

1. Savchuk S., Kalynych I., Prodanets I. *Creation of ZAKPOS active Network Reference Stations for Transcarpatian Region of Ukraine // International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-based and Ground-based Augmentation Systems and Applications. – Berlin, 11–14 November 2008. EUPOS Presentations.* 2. Романовский С. *Состояние мировой GNSS системы // Профильный семинар по GNSS технологиям. – Москва, 15 сентября 2010. Презентация.* 3. *Guidelines for New and Existing Continuously Operating Reference Stations (CORS) // National Geodetic Survey, National Ocean Survey, NOAA. - February 2006, Silver Spring, MD 20910. [http://www.ngs.noaa.gov/PUBS\\_LIB/CORS\\_guidelines.pdf](http://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/CORS_guidelines.pdf)* 4. *Guidelines for EPN Stations & Operational Centres // EPN Central Bureau. - May 2007.* 5. *Solar Cycle Progression // Space Weather Prediction Center, NOAA. – Updated April 2011. <http://www.swpc.noaa.gov/SolarCycle>* 6. Schrock G. *The Birthplace of VRS // The American Surveyor, Vol.7, No.3.*

Надійшла 09.04.2011 р.