

Получена: 22.12.2017 г.

Приета: 28.05.2018 г.

PRECISE POINT POSITIONING (PPP) ЗА НУЖДИТЕ НА ГЕОДЕЗИЧЕСКАТА ПРАКТИКА

Ю. Цановски¹, Ц. Данчев²

Ключови думи: Precise Point Positioning (PPP), анализ, приложение

РЕЗЮМЕ

Докладът има за цел изследването и анализирането на възможността за прилагане на метода Прецизно определяне на точка (*Precise Point Positioning – PPP*) в геодезическата практика. Извършени са двудневни наблюдения на 8 дълбоко фундирани стълба с устройства за принудително центриране. Използвани са 3 поколения GPS/GNSS приемника, а събраните данни са обработени с различни софтуерни пакети – научноизследователския Bernese 5.2, комерсиалните Trimble Business Center и Leica GeoOffice 6.0, както и web-базирани приложения за изчисление на координати посредством PPP. На база на получените резултати са извършени различни по характер сравнения и анализи.

1. Въведение

С течение на годините се наблюдава развитие на радионавигационните спътникови системи – модернизация на американската NAVSTAR GPS, на руската GLONASS, както и постепенното налагане на европейската GALILEO, китайската COMPASS и др. Днес вече е възприет терминът Глобална навигационна спътникова система (ГНСС), представляваща комбинация от всички съществуващи навигационни системи. С неспирания подем на системата се развива и Международната ГНСС служба – IGS (International GNSS Service). С повишаване на качеството на предлаганите от службата продукти (спътникови ефемериди, корекции към спътникови часовници, атмосферни

¹ Юри Цановски, доц. д-р инж., кат. „Висша геодезия“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: yuuri@abv.bg

² Цочо Данчев, инж, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: tsdanchev@gmail.com

модели и т.н.) търпи развитие и представлява все по-голям интерес за учените в сферата на геодезията и един метод, на който до преди около 20 години не е обръщано внимание – **Прецизното определяне на единична точка – PPP (Precise Point Positioning)**.

В началото на ХХІ век методът придобива популярност в по-голям кръг от учени в сферата на геодезията и свързаните с нея дисциплини. Развиват се модули към софтуерни продукти от най-висок клас, позволяващи прилагането на PPP. Все по-привлекателна и за практически насочените геодезисти става идеята за постигането на висока точност с един единствен приемник от гледна точка на намирането на икономически изгодни решения. На различни геодезически форуми се представят доклади, свързани не само с теоретичното развитие на метода, но и с чисто практическото му приложение. Редица учени изследват приложимостта на PPP, било то в статичен или кинематичен режим, необходимата продължителност на измерване за получаване на задоволителни резултати и др. Усъвършенстват се голяма част от елементите, анализират се източниците на грешки, подобряват се различните модели, използвани при решенията.

Целта на изследването е анализирането на възможността за прилагане на метода (*Precise Point Positioning – PPP*) в геодезическата практика. За осъществяването ѝ са извършени дейности в следните направления:

- двудневни полеви наблюдения на 8 дълбоко фундаментирани стълба с устройства за принудително центриране и обработката им с цел получаване на надеждна информация;
- сравнение на координатите, получени по метода PPP от различни източници (софтуерни продукти и web-базирани платформи) с координати, получени по конвенционални ГНСС методи;
- извеждане на зависимост между продължителност на измерителна сесия и надеждност на получените резултати;
- изследване на зависимостта между геометричната конфигурация на спътниковото съзвездие и полученото решение за къси наблюдателни сесии.

2. Precise Point Positioning – същност

Формирането на фазови разлики (единични, двойни и тройни) е най-разпространената методика при обработката на относителни ГНСС измервания. Съществува и друга фазова разлика – нулевата, т.е. използване на недиференцирани наблюдения от един единствен приемник. Специфичен случай при обработката на нулеви разлики е прецизното определяне на единична точка – PPP. До преди около 20 години почти не е отделено внимание на тази методика за измерване и обработка, а причината се крие в невъзможността за елиминиране на грешки, лесно отстраними при двойни фазови разлики. С развитието на продуктите, предоставяни безвъзмездно от центровете за анализ на Международната ГНСС служба (IGS – International GNSS Service) започва да се обръща внимание на метода PPP. Същността на метода е в използването на прецизни данни за орбитите на спътниците и корекции към часовниците им, предоставяни от IGS, както и моделиране на източниците на систематични грешки, а повишаването на качеството на тези продукти е ключово в развитието на PPP. Към измерените кодови и фазови псевдоразстояния се нанасят корекции, по-голямата част от които са пренебрежими при относителните определяния, но са ключови в абсолютните. Използват се различни тропосферни и йоносферни модели, отчитат се релативистични ефекти, земни и океански при-

ливи и др. Чрез отчитане на динамиката в развитието на метода е систематизирана таблица с положителните и отрицателните качества на метода.

Таблица 1. Положителни и отрицателни страни на метода PPP

Положителни страни	Отрицателни страни
Използване на един ГНСС приемник	Сравнително голяма продължителност на измерване за постигане на сантиметрова и суб-сантиметрова точност
Съкращаване на разходите	
Премахване на нуждата от използване на референтна станция и зависимостта от инфраструктурни мрежи	Невъзможност за съставяне на фазови разлики
Възможност за анализ на систематични грешки, съпътстващи измерването	Невъзможност за постигане на висока точност в кинематичен режим
Възможност за бъдещо развитие	

2.1. Основи на метода

Оптимални резултати чрез PPP се постигат при наличие на двучестотни измервания със съставянето на йоносферно освободената комбинация L_3 , чрез която се елиминира ефектът на йоносферата от първи порядък (първи ред). Опростен вид на уравненията на измерените кодови и фазови псевдоразстояния (за дадена епоха, към един сателит) може да бъде представен чрез следните формули:

$$L_P = \rho_P + c(dt - dT) + ztd + \varepsilon_P, \quad (1)$$

$$L_\Phi = \rho_\Phi + c(dt - dT) + ztd + N\lambda + \varepsilon_\Phi, \quad (2)$$

$$L_P = \frac{P_1 f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{P_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}, \quad (3)$$

$$L_\Phi = \frac{\lambda_1 \Phi_1 f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{\lambda_2 \Phi_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}, \quad (4)$$

където са използвани следните означения:

L_P и L_Φ са йоносферно-освободените комбинации съответно за кодовите и фазовите измервания;

ρ – геометричното разстояние между спътника (X^S, Y^S, Z^S) и приемника (x, y, z):

$$\rho = \sqrt{(X^S - x)^2 + (Y^S - y)^2 + (Z^S - z)^2}, \quad (5)$$

c – скоростта на светлината във вакуум;

dt и dT – грешките в часовниците на приемника и спътника;

ztd – общото тропосферно закъснение на сигнала;

λ – дължината на вълната на носещата честота или на комбинацията;

N — нееднозначността на йоносферно-освободената комбинация;
 ε_p и ε_Φ – съответните шумови компоненти, включително многопътност и други ефекти, които не са включени като отделни членове във формулата.

2.2. Алгоритми за обработка

Наблюденията към всички сателити се обработват съвместно за получаването на неизвестните: координатите на приемника, грешката в часовника му, тропосферното забавяне и нееднозначностите. Един от фундаменталните алгоритми е предложен от P. Négoix и J. Kouba. Те предлагат изравнение по МНМК с въведени априорни тежести на параметрите. Разработената от тях изравнителна процедура е последователен филтър, адаптиращ се към различна потребителска динамика. Прилагането му обръща внимание на вариациите в състоянието на параметрите между съседните епохи.

Важен момент при различните алгоритми за обработка на измерванията е изборът на подходящ тежестен модел. Има няколко предложени модела, като част от тях са: определяне на тежестта като функция на ъгъла над хоризонта на сателита; определяне на тежестта като функция на отношението сигнал-шум и т.н.

Съществуват и други математически модели на обработка на измервания по метода PPP, но предпочитани са филтрите, еквивалентни на последователни изравнения със стъпки, съвпадащи с епохите на наблюдение. При обработката на недиференцирани измервания те са удачен избор, в сравнение ги с останалите видове изравнения. Недостатък е само нуждата от моделирането на т.нар. process noise, дължащ се на вариациите на параметрите между съседните епохи в интервала Δt .

2.3. Корекции за елиминиране на източниците на систематични грешки

За да се използва пълният потенциал на PPP, е необходимо да се извърши усъвършенстване на математическия модел, като освен стандартните източници на грешки, трябва да се вземат предвид негативните влияния, част от които се пренебрегват при диференциалните методи. Коректното моделиране на измерванията е ключов фактор за постигането на максимална точност. Една от възможните класификации разделя източниците на грешки на:

- *грешки, свързани със спътниците* – отместване и вариации на фазовия център на спътниковите антени; корекция заради ориентацията на антената, или т.нар. фазово завъртане/завихряне (Phase wind-up); релативистични ефекти;
- *геофизични влияния* – приливни (вътрешно-плочови приливи) деформации; океански приливи;
- *атмосферни влияния* – тропосфера и йоносфера.

3. Описание на проведения експеримент

Извършени са измервания на територията на УОБ „Веринско“ в два последователни дни на изградена база от 8 дълбокоземно стабилизирани стълба с устройства за принудително центриране. Измерванията са извършени в един и същ часови диапазон,

което осигурява идентична конфигурация на спътниковото съзвездие. Използвани са 8 двучестотни фазови приемника:

- 2 приемника Sokkia GRX2, произведени през 2014 г. (фиг. 1а);
- 4 приемника Leica System 900 с антени LEIATX900, произведени през 2008 г. (фиг. 1б);
- 2 приемника Trimble 4400 с антени TRM22020+GP, произведени през 1997 г. (фиг. 1в).



Фиг. 1. Използвани приемници и антени

През първия ден са извършени статични измервания с цел осигуряване на достатъчно количество данни за високоточно определяне на координатите на стълбовете посредством изравнение на мрежа от базисни вектори, която се привързва към перманентни станции от EPN (European Permanent Network). В последващите анализи тези координати ще се използват като „еталонни”, както и ще се използват за обработката по метода PPP. Измерванията са проведени в една сесия, при 5-секунден интервал на запис и при 0° зададена маска на височината. Втория ден са извършени статични измервания на две от точките (с номера 2 и 6), а на наблюдателен стълб 4 са извършени два вида наблюдения в кинематичен режим – RTK с потребителска базова станция и използване на услугите на инфраструктурна мрежа. Извършени са също и DGNSS измервания, като е използван европейският SBAS доставчик на диференциални поправки EGNOS. За да се симулира кинематичен режим на движение, е използвана специална ротираща механизмирана конструкция (фиг. 2), върху която са монтирани ГНСС антените.



Фиг. 2. Ротираща конструкция, използвана при кинематичните измервания

4. Обработка на събраната информация

В настоящата точка са разгледани етапите в обработката на различните видове измервания: относителни статични, RTK и PPP, както и резултатите от тази обработка. Целта е получаването на качествени резултати, осигуряващи коректен сравнителен анализ на метода Precise Point Positioning в единна координатна система – БГС2005.

4.1. Определяне на координатите на станциите чрез изравнение на мрежа от базисни вектори със софтуерен пакет Bernese GNSS Software v5.2

Резултатите са получени в реализация на Международната Земна Координатна Система ITRF2008 и чрез известни трансформационни параметри и скорости на точките координатите на осемте определяеми стълба са трансформирани в ETRS89, реализация ETRF2005, епоха 2005,0 – т.е. в БГС2005. Геоцентричните координати и техните средни квадратни грешки в БГС2005 са представени в табл. 2. Средната квадратна грешка за единица тежест от изравнението на мрежата е 0,00112 m.

Таблица 2. Еталонни координати и грешки в БГС2005, получени чрез изравнение на мрежата от вектори

N	X [m]	m_x [m]	Y [m]	m_y [m]	Z [m]	m_z [m]
1	4312801.45328	0.00098	1894955.20588	0.00055	4286732.42831	0.0009
2	4312792.76188	0.00181	1894966.96541	0.00081	4286735.90687	0.0021
3	4312772.55779	0.00087	1894994.35415	0.00049	4286744.07267	0.0008
4	4312737.94975	0.00095	1895041.26047	0.00054	4286758.04694	0.0009
5	4312685.97291	0.00091	1895111.71961	0.00049	4286779.07100	0.0009
6	4312726.74575	0.00091	1894992.71042	0.00061	4286794.04514	0.0009
7	4312738.39967	0.00089	1894913.46008	0.00050	4286819.26726	0.0009
8	4312678.69823	0.00083	1894992.75909	0.00047	4286841.95230	0.0008

4.2. Обработка на измерванията по метода Precise Point Positioning

Суровите измервания са предварително конвертирани в RINEX формат и са обработени посредством различни софтуерни продукти, което позволява анализирането на голяма част от съвременните възможности за получаване на решения по метода PPP. Извършена е обработка посредством научноизследователския софтуер Bernese, както и чрез няколко безплатни web-базирани платформи.

4.2.1. Обработка с PPP модула на Bernese

Референтната система, в която е извършена обработката, е ITRF2008, епоха 2017. Благодарение на известните (интерполирани) тектонски скорости на точките и трансформационни параметри за преминаване между различните координатни системи и реал-

лизации, получените координати на осемте стълба са трансформирани в координатната система, в която ще се извършват анализите – БГС2005. Трансформацията е извършена изцяло в средата на Bernese.

Таблица 3. Координати и грешки в БГС2005 в резултат от обработката с PPP модула на Bernese

N	X [m]	m_x [m]	Y [m]	m_y [m]	Z [m]	m_z [m]	Продължителност
1	4312801.4318	0.0046	1894955.2041	0.0047	4286732.4178	0.0036	04:41:35 ч.
2	4312792.7300	0.0080	1894966.9668	0.0117	4286735.8845	0.0099	01:37:30 ч.
3	4312772.5301	0.0037	1894994.3527	0.0044	4286744.0584	0.0032	04:44:50 ч.
4	4312737.9308	0.0042	1895041.2512	0.0054	4286758.0361	0.0032	04:03:10 ч.
5	4312685.9426	0.0038	1895111.7220	0.0045	4286779.0558	0.0031	04:31:20 ч.
6	4312726.7229	0.0033	1894992.7030	0.0043	4286794.0261	0.0031	05:33:35 ч.
7	4312738.3705	0.0042	1894913.4651	0.0050	4286819.2556	0.0031	04:17:10 ч.
8	4312678.6698	0.0032	1894992.7599	0.0035	4286841.9369	0.0027	05:11:15 ч.

4.2.2. Canadian Spatial Reference System (CSRS) PPP (<https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>)

Web-приложението на Канадската пространствена референтна система (CSRS) за PPP позволява високоточни координатни изчисления, използвайки двучестотни ГНСС данни от измервания в RINEX формат. CSRS-PPP използва орбитни данни от IGS и поддържа статичен и кинематичен PPP режим. Няколко минути след изпращането на RINEX файла на посочения от подателя на заявката e-mail адрес се получават няколко файла, включващи освен координатите на станцията (заедно с техните точности) в избраната координатна система и UTM проекция, също и информация, описваща етапите от обработката, оценката на тропосферните параметри и др.

Получените геоцентрични координати в ITRF14, епоха 2017, са трансформирани до ITRF2008 за епоха 2017, чрез използване на web-приложението ETRF/ITRF Transformation в сайта на Европейската Перманентна ГНСС мрежа – <http://www.epncb.oma.be>. В резултат са получени координати в ITRF2008, епоха 2017, които са трансформирани в средата на Bernese в две стъпки:

- като се използва вече наличната информация за тектонските скорости на точките, координатите са екстраполирани до епоха 2005;
- чрез използване на известните трансформационни параметри е извършена трансформация от ITRF2008 епоха 2005 до ETRS89 – ETRF 2005 епоха 2005.0, т.е. до БГС2005.

По същия начин са трансформирани и координатите, получени в резултат на обработката чрез останалите web-платформи. При координатите от APPS е пропусната трансформацията от сайта на EPN, тъй като те са директно в ITRF2008.

Таблица 4. Координати и грешки в БГС2005 в резултат от обработката с CSRS-PPP

N	X [m]	m_x [m]	Y [m]	m_y [m]	Z [m]	m_z [m]	Продължителност
1	4312801.4431	0.0196	1894955.2087	0.0194	4286732.4367	0.0177	04:41:35 ч.
2	4312792.7601	0.0372	1894966.9623	0.0376	4286735.9073	0.0350	01:37:30 ч.
3	4312772.5591	0.0180	1894994.3557	0.0187	4286744.0757	0.0168	04:44:50 ч.
4	4312737.9601	0.0244	1895041.2587	0.0283	4286758.0527	0.0198	04:03:10 ч.
5	4312685.9731	0.0192	1895111.7187	0.0228	4286779.0697	0.0170	04:31:20 ч.
6	4312726.7401	0.0167	1894992.7037	0.0192	4286794.0467	0.0177	05:33:35 ч.
7	4312738.3851	0.0202	1894913.4647	0.0220	4286819.2687	0.0175	04:17:10 ч.
8	4312678.6861	0.0157	1894992.7577	0.0157	4286841.9527	0.0151	05:11:15 ч.

4.2.3. The Automatic Precise Positioning Service (APPS), <http://apps.gdgps.net/>

APPS-PPP, подобно на CSRS-PPP, е web-базирана услуга за обработка на GPS измервания по метода Precise Point Positioning. APPS е разработен на базата на подобния на Bernese научноизследователски софтуер GIPSY/OASIS, използван и създаден от учените в JPL (където до голяма степен може да се твърди че е „рожденното място“ на PPP). Оттам идва и една от основните разлики между APPS и останалите безплатни web-базирани платформи за обработка на подобен тип данни – APPS използва орбитни данни, генерирани от JPL. APPS приема двучестотни GPS данни за обработка в статичен или кинематичен режим, но предлага и значително повече възможности за персонализиране на изчислителния процес. Съществуват няколко възможности за изпращане на данни за обработка – директно от web-страницата на платформата, по e-mail или през ftp сървър. Получените координати са в координатна система ITRF2008, във формат XYZ или BLH. Геоцентричните координати са трансформирани в координатна система БГС2005 и са представени в табл. 5 заедно със средните квадратни грешки.

Таблица 5. Координати и грешки в БГС2005 в резултат от обработката с APPS-PPP

N	X [m]	m_x [m]	Y [m]	m_y [m]	Z [m]	m_z [m]	Продължителност на сесията
1	4312801.4519	0.0025	1894955.2075	0.0013	4286732.4218	0.0024	04:41:35 ч.
2	4312792.7534	0.0039	1894966.9586	0.0018	4286735.8957	0.0039	01:37:30 ч.
3	4312772.5535	0.0022	1894994.3535	0.0011	4286744.0624	0.0022	04:44:50 ч.
4	4312737.9906	0.0023	1895041.2736	0.0011	4286758.0842	0.0023	04:03:10 ч.
5	4312686.0181	0.0021	1895111.7328	0.0010	4286779.1121	0.0021	04:31:20 ч.
6	4312726.7547	0.0021	1894992.7142	0.0012	4286794.0476	0.0022	05:33:35 ч.
7	4312738.4012	0.0021	1894913.4625	0.0011	4286819.2639	0.0021	04:17:10 ч.
8	4312678.7008	0.0020	1894992.7612	0.0011	4286841.9481	0.0020	05:11:15 ч.

4.2.4. GNSS Analysis and Position Software – GAPS, <http://gaps.gge.unb.ca/>

GAPS е софтуер и web-платформа, разработени от Катедрата по Геодезия и Геоматика към Университета в Ню Брънзуик, Канада. Отличава се от вече изброените с редица неща, като например възможност за обработка освен на GPS измервания, и на такива от Galileo и BeiDou. Също така, в web-страницата подробно е описана стратегията за

обработка на измерванията. Платформата поддържа два режима – основен (Basic) и „за напреднали“ (Advanced). При основния режим, при прикачването на RINEX файла, потребителят използва по-опростен вариант, като избира от следното: ГНС система, априорни координати на станцията, статичен или кинематичен режим и маска на височината. При Advanced режима освен гореспоменатите настройки има и такива като: избор на доставчик на спътникови и часовникови продукти, избор на параметри за същинската обработка на данните, атмосферни модели, mapping функции, различни априорни стойности и др. Съществува и опция за добавяне на калибрационна информация за приемниковата антена в ANTEX формат, поддържан от GAPS. На лице са толкова много опции за моделиране на решението, защото освен източник на високоточни координати по метода PPP, GAPS е разработен и за различни видове ГНС анализи (от където идва и името му). Използва се йоносферно освободената линейна комбинация L_3 , при която се елиминира йоносферното забавяне от първи порядък, но не се нанасят корекции за елиминирането на по-високите степени. Водеща е mapping функцията Vienna, като е възможен изборът на Neill.

Въпреки безспорните качества и предимства, приложението не успя да даде решение за 3 от стълбовете – 4 и 5, заради невъзможност за разпознаване на антената GRX2 и стълб 2, най-вероятно заради по-кратката сесия.

Таблица 6. Координати и грешки в БГС2005 в резултат от обработката с GAPS

N	X [m]	m_x [m]	Y [m]	m_y [m]	Z [m]	m_z [m]	Продължителност на сесията
1	4312801.442	0.0021	1894955.199	0.0022	4286732.440	0.0019	04:41:35 ч.
2							
3	4312772.557	0.0020	1894994.352	0.0022	4286744.084	0.0019	04:44:50 ч.
4							
5							
6	4312726.753	0.0019	1894992.707	0.0021	4286794.061	0.0021	05:33:35 ч.
7	4312738.397	0.0021	1894913.465	0.0024	4286819.280	0.0019	04:17:10 ч.
8	4312678.698	0.0018	1894992.763	0.0017	4286841.967	0.0018	05:11:15 ч.

4.3. Обработка на измерванията по метода RTK и DGPS

RTK измерванията не изискват сериозна обработка, като това е една от причините за налагането им в масовата геодезическа практика. Извършено е изследване на резултатите за наличие на груби грешки и тяхното филтриране в планово и височинно отношение. На двете рамена на механизирания конструкция (фиг. 2) са монтирани две антени, извършващи измервания в RTK режим, с използване на поправки от инфраструктурна мрежа (приемник GRX2) и потребителска базова станция (приемник Leica, антена ATX900). В оста на машината е поставен приемник GRX2, регистриращ SBAS сигнали. В идеалния случай координатите, определени от приемниците в двата края на машината, трябва да описват окръжности с радиус, равен на дължината на тези рамена, но заради точността на измерванията, както и влиянието на различни фактори, определените координати не описват теоретичната окръжност.

Проспектната точност в хоризонтално отношение за използвания приемник Leica е 10 mm, като на тази база са филтрирани 15% от измерванията. Като средна стойност за координати на стълб 4 в проекция UTM, зона 34N.

Таблица 7. Координати на стълб 4 в UTM34N, определени в RTK режим с потребителска базова станция

Стълб 4	X [m]	Y [m]
BaseRTK	4708194.264	723599.946

Въпреки намалената проспектна точност при режим RTK-NET на 20 mm, филтрираните данни са значително по-голям брой – 33%, което е доказателство за по-нестабилното решение, получавано при този метод.

Таблица 8. Координати на стълб 4 в UTM34N, определени в RTK-NET режим с Инфраструктурна мрежа

Стълб 4	X [m]	Y [m]
NET-RTK	4708194.262	723599.949

Подобно на резултатите от RTK, определените чрез диференциалните SBAS измервания също следва да бъдат филтрирани за груби грешки. Филтрирани са значително по-голям брой измервания – 50% – и са получени следните резултати.

Таблица 9. Координати на стълб 4 в UTM34N, определени в RTK-NET режим с Инфраструктурна мрежа

Стълб 4	X [m]	Y [m]
EGNOS-SBAS	4708194.849	723600.062

4.4. Обработка на статични относителни измервания, чрез използване на виртуални станции (VRS)

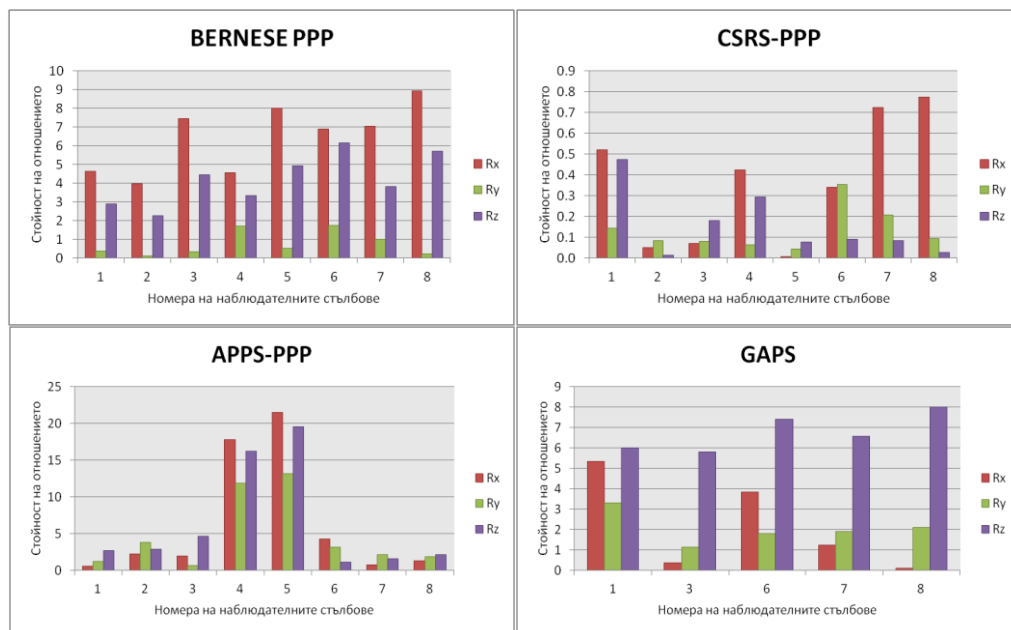
Инфраструктурните мрежи предоставят и услугата виртуални референтни станции (VRS) за последваща обработка, като генерираните данни се използват като изходни при обработка на мрежа от базови вектори. Генерирани са три виртуални станции (с продължителност на измервания 60 мин.) в близост до изследваните стълбове и чрез софтуерния пакет Trimble Business Center е извършено изравнение на мрежата от вектори, като са използвани статичните наблюдения от първия ден. В таблицата са представени изравнените координати в БГС2005 в UTM проекция, получени в резултат на обработката.

Таблица 10. Координати и грешки в БГС2005 (в проекция UTM34N) в резултат от обработката с VRS

N	X [m]	m_X [m]	Y [m]	m_Y [m]	H [m]	m_H [m]
1	4708156.164	0.000	723496.794	0.000	814.007	0.001
2	4708161.360	0.001	723510.887	0.001	813.983	0.002
3	4708173.491	0.001	723543.718	0.000	813.990	0.001
4	4708194.268	0.000	723599.943	0.000	813.983	0.002
5	4708225.491	0.001	723684.405	0.000	813.995	0.001
6	4708239.630	0.000	723558.537	0.001	816.324	0.001
7	4708270.066	0.000	723480.267	0.000	817.717	0.001
8	4708305.252	0.001	723575.818	0.000	816.262	0.000

5. Анализ на получените резултати и изводи

5.1. Анализ на получените средни квадратни грешки по метода PPP и тяхната състоятелност



Фиг. 3. Диаграма на отношенията между координатните разлики и средните квадратни грешки на резултатите от Bernese PPP и web-платформите CSRS-PPP, APPS и GAPS

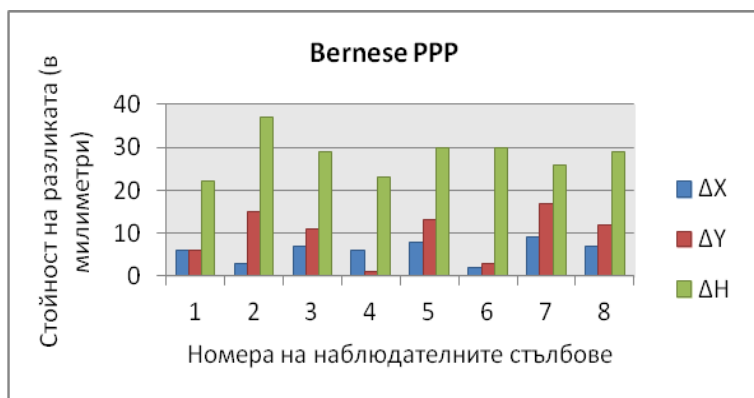
За проверката на състоятелността на средните квадратни грешки, получени при обработката на измерванията, е направена съпоставка на координатите, получени по метода PPP и приетите за еталонни (действителни) – от изравнението на мрежата чрез научноизследователския софтуер Bernese. Интерес представлява отношението между едноименните координатни разлики и получената средна квадратна грешка за X, Y и Z

компонентите, по метода PPP. В следващите диаграми е представена стойността R_X – отношението между координатните разлики и съответните средни квадратни грешки $\left(\frac{|\Delta X|}{m_{\Delta X}} \right)$. Аналогични са означенията за Y и Z .

При резултатите от web-платформата APPS стойностите на отношенията са по-ниски от тези при Bernese PPP. Изключение правят отношенията при точки 4 и 5, което вероятно се дължи на проблем при обработката на измерванията с приемника на Sokkia – GRX2. Като обобщение може да се отбележи фактът, че единствено средните квадратни грешки, получени от платформата CSRS-PPP, се доближават до действителните разлики между получените координати и еталонните. Средните стойности за трите координатни компоненти при CSRS са от 5 до 10 пъти по-високи, в сравнение с получените от другите софтуери. Това е и причината при сравнително близки координати да се получат по-ниски стойности на изследваните съотношения и да се приемат за най-състоятелни.

5.2. Сравнение на получените координати по метода PPP и еталонните

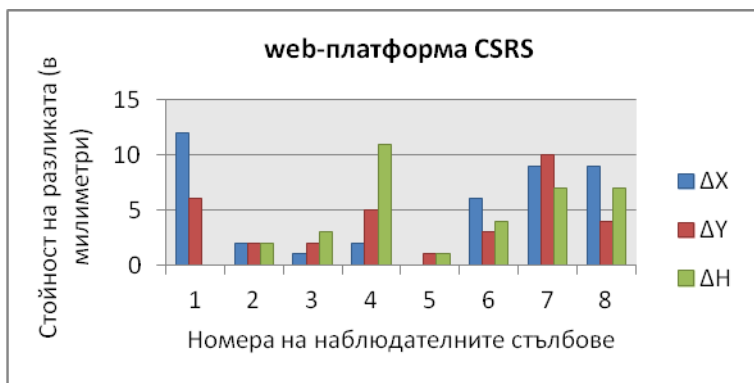
Геоцентричните координати не дават ясна представа за положението на точката в планово и височинно отношение. Това е причината всички получени геоцентрични координати в БГС2005 да бъдат трансформирани в проекционни, посредством софтуерния продукт BGSTrans (достъпен за свободно ползване от сайта на Агенцията по Геодезия, Картография и Кадастър). Избрани са правоъгълни равнинни координати в проекция UTM, зона 34N. Във височинно отношение са представени чрез елипсоидните си височини H – фиг. 4.



Фиг. 4. Диаграма на разликите между еталонните координати и получените от PPP обработката с Bernese, трансформирани в UTM34N

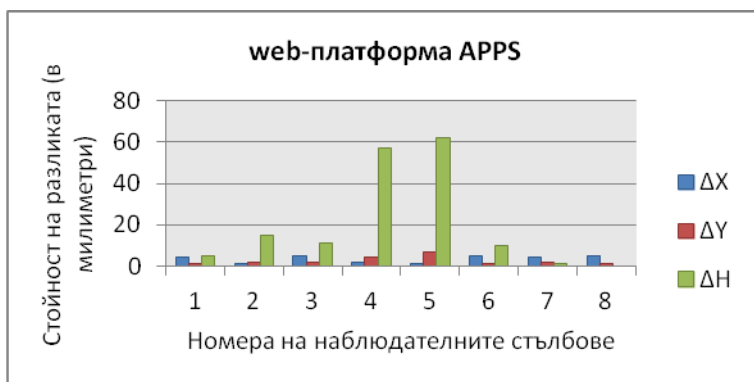
Очаквано, най-висока стойност на разликите има във височинно отношение. Това е характерно за всички ГНСС определения, като е напълно оправдано точността по височина да е около 2 пъти по-ниска от тази по положение. Въпреки това, на лице е нищожна разлика между резултатите от метода PPP и еталонните координати. Средноаритметичните стойности за разликите по X , Y и H са съответно -6, -10 и 28 милиметра.

Резултатите от PPP определения, посредством безплатната платформа CSRS се характеризират с още по-малки разлики – средната им стойност по компоненти е съответно $\Delta X = 5$ mm, $\Delta Y = 1$ mm и $\Delta H = 1$ mm.



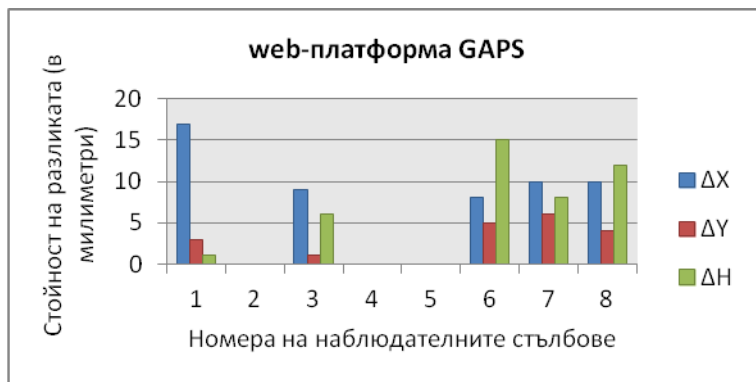
Фиг. 5. Диаграма на разликите между еталонните координати и получените от PPP обработката с CSRS, трансформирани в UTM34N

Резултатите от обработката с APPS са много близки до тези от CSRS. Повечето координатни разлики не надвишават един сантиметър. Прави впечатление многократно по-голямата разлика във височинната компонента за точки 4 и 5. На тези точки са използвани еднакви модели антени – GRX2 и е възможно при обработката софтуерът на APPS да не е разпознал антените, следователно да не са нанесени корекции заради положението на APC (Antenna phase center, фазов център на антената) спрямо ARP (Antenna Reference Point, референтна точка на антената). Без информация за отместването на APC получената височина на точката е по-висока от действителната. Ако игнорираме височините на точки 4 и 5, средноаритметичните стойности на координатните разлики са съответно 3, 1 и 4 mm – фиг. 6.



Фиг. 6. Диаграма на разликите между еталонните координати и получените от PPP обработката с APPS, трансформирани в UTM34N

Резултатите от GAPS също се доближават в голяма степен до еталонните. Стойностите на координатните разлики са незначително по-високи от получените при останалите web-платформи. Средноаритметичните стойности за координатните разлики са съответно -11, 0 и -8 милиметра. Както беше отбелязано – не са получени решения за точки с номера 2, 4 и 5.

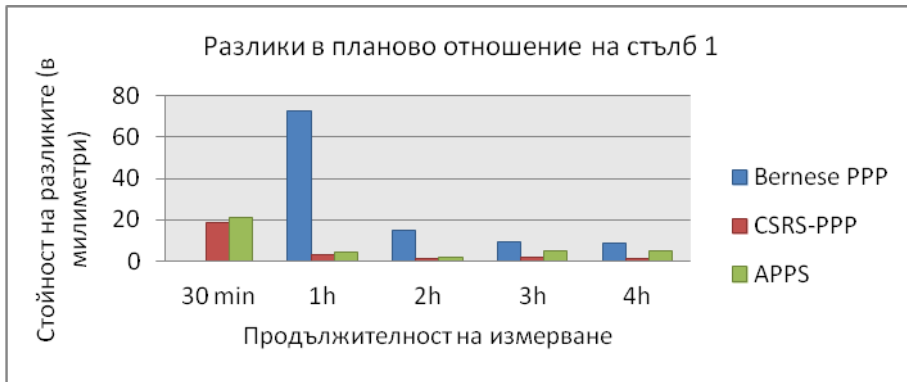


Фиг. 7. Диаграма на разликите между еталонните координати и получените от PPP обработката с GAPS, трансформирани в UTM34N

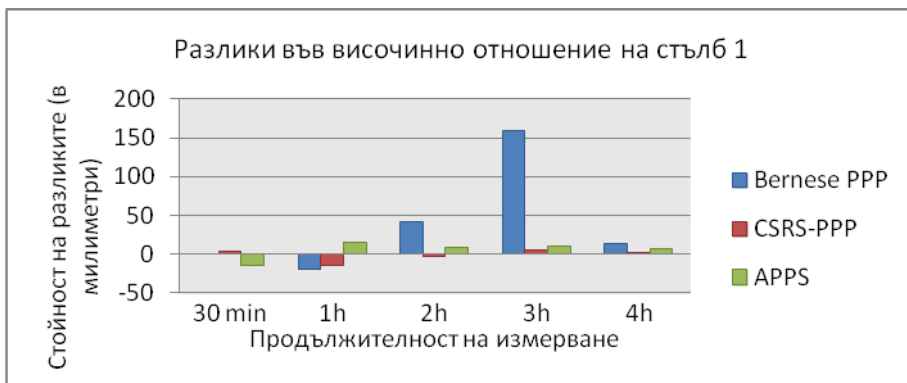
Ако се анализират стойностите на разликите на координатите, получени по метода PPP и еталонните, може да се направят изводи, че резултатите от различните софтуерни продукти са много близки помежду си, като същевременно са близки и до еталонните стойности (в рамките на 1 – 2 cm). Това е знак за сериозните възможности на метода PPP за постигане на надеждно решение. Най-добри резултати се получават от web-платформата CSRS-PPP, което е забележително предвид начина, по който са получени – безплатно и автоматизирано.

5.3. Анализ на връзката между продължителността на измерванията и получените резултати

Необходимостта от голяма продължителност на измерването се счита за един от недостатъците на метода Precise Point Positioning. През годините много автори са публикували статии и са изнасяли доклади, анализирайки връзката между продължителност на измерването и постиганата точност. Тенденцията е с развитието на ГНСС и IGS продуктите, както и изчислителните модели, продължителността да се намали до такава степен, че методът да стане конкурентен на конвенционалните ГНСС определения, както в статичен, така и в кинематичен режим. Минималната продължителност на измерване за получаване на задоволителни резултати е част от проблематиката на настоящия доклад. За да се изследва тази зависимост RINEX файловете са разделени на сесии с различна продължителност – 30 минути, 1 час, 2 часа, 3 часа и 4 часа. Извършена е обработка със софтуерните продукти Bernese, CSRS-PPP и APPS (стратегията за обработка е същата както при пълните сесии). Трябва да се отбележи, че с PPP модула на Bernese не са получени резултати за измерванията с 30-минутна продължителност. Резултатите за координатите на точките са трансформирани в БГС2005 и конвертирани в UTM проекция, като са сравнени получените резултати и еталонните в планово $\left(\Delta P_i = \sqrt{\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2}\right)$ и височинно $\left(\Delta H_i = H_i^{em} - H_i^{PPP}\right)$ отношение.



Фиг. 8. Координатни разлики в планово отношение за точка 1 при сесии с различна продължителност

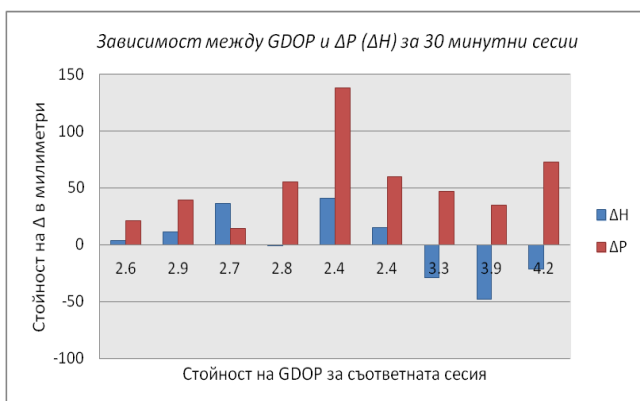


Фиг. 9. Координатни разлики във височинно отношение за точка 1 при сесии с различна продължителност

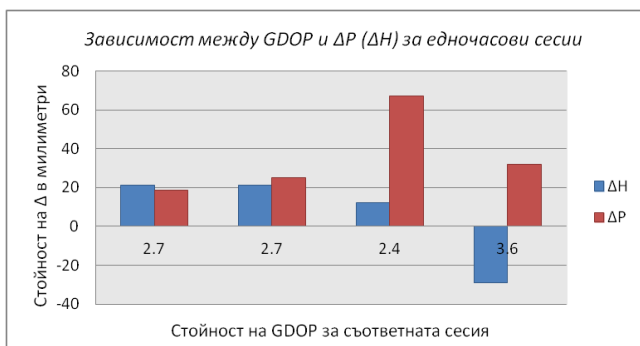
На базата на получените стойности за ΔP и ΔH може да се заключи, че по-голямата продължителност на измерване очаквано постига по-стабилни резултати, но ясно се вижда, че дори при половинчасови сесии координатите на точките, определени по PPP, се доближават на няколко сантиметра до еталонните. Това е отличен пример за развитието на метода, като се има предвид, че до преди няколко години за постигането на дециметрова точност са били нужни значително по-дълги измервателни сесии от изследваните.

5.4. Връзка между GDOP и координатните разлики при сесии с продължителност 30 минути и 1 час

Извършено е изследване на зависимостта на GDOP и разликата между еталонните координати и определените по метода PPP от гледна точка на измервателни сесии с дължина 30 минути и 1 час. За целта RINEX файлът с наблюденията на стълб 5 (с обща продължителност 4 часа и 31 мин.) е разделен на 9 половинчасови сесии и на 4 едночасови. Файловете са обработени посредством web-платформата CSRS-PPP по аналогичен начин на вече описания. Изчислени са стойностите на разликите с еталонните координати по височина и в планово отношение и е изчертана диаграма – фиг. 10 и фиг. 11.



Фиг. 10. Стойности на GDOP, ΔH и ΔP за 30-минутни последователни измервателни сесии за наблюдателен стълб номер 5



Фиг. 11. Стойности на GDOP, ΔH и ΔP за 60-минутни последователни измервателни сесии за наблюдателен стълб номер 5

При 30-минутните сесии не се забелязва съществена зависимост между стойността на GDOP и $\Delta H/\Delta P$, вероятно заради сравнително ниската точност, постигната при наблюдения с такава продължителност. При тях грешката, породена от геометричната конфигурация на спътниците, не оказва голямо въздействие за сметка на другите източници на грешки. Резултатите при едночасовите сесии са значително по-добри. Забелязва се голяма грешка по положение в третия интервал, в който влиза и интервалът с най-голяма стойност на ΔP от фиг. 9. В тази диаграма по-ясно личи повишаването на стойността на ΔH с повишаване на GDOP. Същото се отнася и за ΔP , с изключение на трета сесия.

5.5. Сравнение на резултатите от RTK и SBAS измерванията с еталонни

Филтрираните координати на наблюдателен стълб 4, получени по RTK с потребителска базова станция (означение BaseRTK в табл. 11), при ползване на инфраструктурна мрежа (озн. NetRTK), са сравнени с еталонните. Сравнени са и резултатите от EGNOS и са представени в табл. 11.

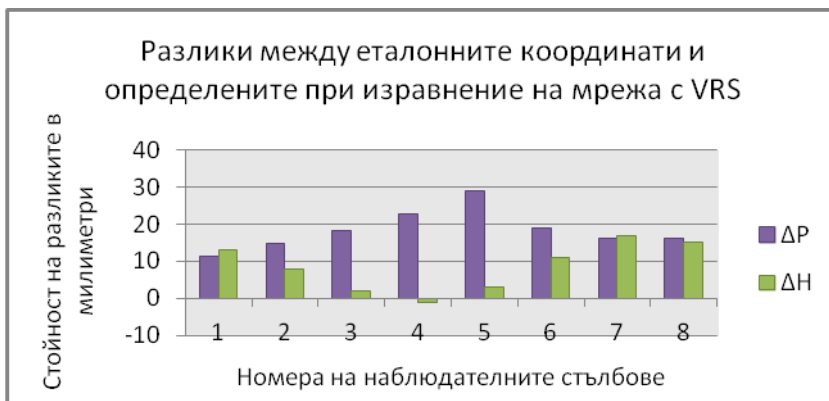
Таблица 11. Разлики между еталонните координати и определените по RTK и SBAS методите

	X [m]	Y [m]	ΔX [m]	ΔY [m]
BaseRTK	4708194.264	723599.946	0.021	0.012
NetRTK	4708194.262	723599.949	0.023	0.009
EGNOS (SBAS)	4708194.849	723600.062	-0.564	-0.104

Вижда се, че RTK координатите са със сравнително висока точност. Трябва да се отбележи, че броят филтрирани наблюдения е близо два пъти повече при NetRTK в сравнение с BaseRTK. Очаквано, определените чрез SBAS поправки се различават значително от еталонните, което прави резултатите неприложими за геодезически цели.

5.6. Сравнение на резултатите от статични относителни измервания (с използване на VRS) с еталонните координати

Освен диференциални поправки за измервания в RTK режим, инфраструктурните мрежи предлагат и генерирането на виртуални станции, позволяващи използването им за обработка на мрежи от базисни вектори. Резултатите от тази обработка са сравнени с еталонните. За нагледно представяне на разликите в планово и височинно отношение е направена диаграма.



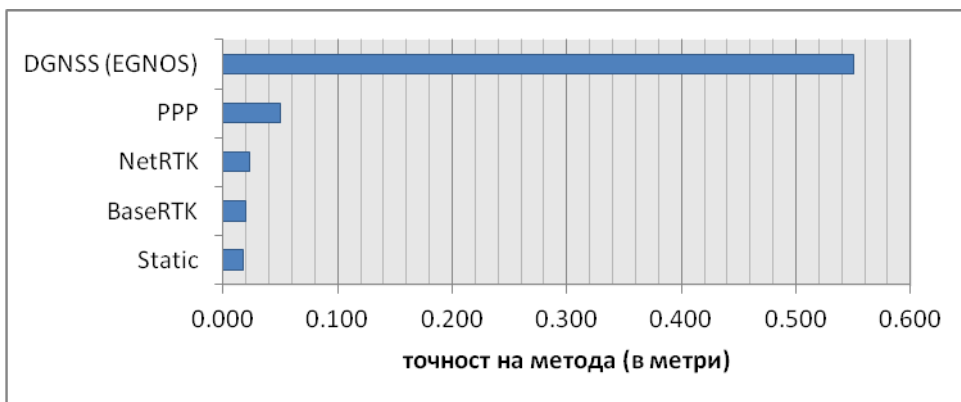
Фиг. 12. Разлики в планово и височинно отношение между еталонните координати и определените при изравнение на мрежа с VRS

Разликите (особено тези в планово отношение) са близки до тези, получени при PPP определенията с дължина на наблюдателните сесии 30/60 мин. Близките резултати от сравнението на PPP координатите и получените от обработката на конвенционални ГНСС определения са показателни за качеството на изследвания метод и неговата нарастваща конкурентоспособност.

Получените резултати от обработката по сравнително иновативната техника за абсолютното определяне на координати Precise Point Positioning и извършените анализи показват, че методът има изключителен потенциал за налагането си в широката геодезическа практика. Въпреки разликите в някои от използваните модели и данни при обра-

ботката, резултатите от PPP определения с различни софтуерни продукти до голяма степен се доближават един до друг, особено координатите, определени посредством web-базираните платформи. Освен помежду си, резултатите се доближават и до еталонните, определени с висока точност посредством научноизследователския софтуер Bernese v5.2. Това е забележителен резултат предвид абсолютния характер на наблюденията – използването на един приемник, без референтни станции и без диференциални поправки. Единствената необходимост е от наличието на прецизни данни за спътниковите орбити и часовници, както и различни атмосферни, геофизични и други модели, които понастоящем са свободно достъпни.

Анализите показват, че с малки изключения безплатните web-приложения CSRS-PPP и APFS дават най-надеждни резултати след около 2 часа продължителност на измерването, осигуряваща разлики с еталонните координати в рамките на 10 mm. Резултатите от измервания с 30-минутна продължителност също са добри – повечето са в рамките на 50 mm. Ако се приеме, че получените координати са с такава точност, това означава, че методът е напълно конкурентноспособен на конвенционалните ГНСС методи. Трябва да се вземат под внимание точностите, предоставяни от web базираните платформи, които в някои случаи са доста завишени и несъстоятелни, както бе показано, което налага изготвянето на методика за контрол на получените координати.



Фиг. 13. Точност на изследваните методи

Благодарности

Изказваме благодарности на кап. д-р инж. Георги Михайлов и кап. д-р инж. Станимир Миховски от Военно-географската служба – гр. Троян, за компетентната помощ и съдействие при обработката с научноизследователския софтуер Bernese 5.2.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Александров, Б., Цановски, Ю., Йорданов, Й.* Изграждане на еталонна база за комплексна проверка на геодезическа апаратура. Доклад на Международна юбилейна научно-приложна конференция УАСГ, София 15-17 ноември, 2012.

2. *Минчев, М., Здравчев, И., Георгиев, И.* Основи на приложението на GPS в геодезията. УАСГ, София, 2005.

3. Boucher, C., Altamimi, Z. Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign. 2011.
4. Dach, R., Lutz, S., Walser, P., Fridez, P. Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual, Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing. DOI: 10.7892/boris.72297; ISBN: 978-3-906813-05-9, 2015.
5. Héroux, P., Kouba, J. GPS Precise Point Positioning with a Difference. Geomatics '95, Ottawa, Ontario, Canada, June 13-15, 1995.
6. Kouba, J., Héroux, P. Precise point positioning using IGS orbit products. GPS Solution, vol. 5 No. 2, pp. 12-28, 2001.
7. Witchayangkoon, B. Elements of GPS PRECISE Precise Point Positioning. The University of Maine, December, 2000.
8. Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., Webb, F. H. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. Journal of Geophysical Research, Vol. 102, 5005-5017, 1997.
9. <http://www.epncb.oma.be> – уебсайт на Европейската Перманентна ГНСС мрежа.
10. <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php> – уебсайт на Canadian Spatial Reference System (CSRS) PPP.
11. <http://apps.gdgps.net/> – уебсайт на The Automatic Precise Positioning Service (APPS).
12. <http://gaps.gge.unb.ca/> – уебсайт на GNSS Analysis and Position Software – GAPS.

PRECISE POINT POSITIONING (PPP) FOR THE NEEDS OF GEODETIC PRACTICE

Y. Tsanovski¹, Ts. Danchev²

Keywords: *Precise Point Positioning (PPP), analysis, application*

ABSTRACT

The paper aims at studying and analyzing the possibility of applying the method *Precise Point Positioning – PPP* in geodetic practice. Two-day observations of 8 deep-set pillars with forced centering devices are carried out. Three generations of GPS/GNSS receivers are used, and the data collected is processed with different software packages – research Bernese 5.2, commercial Trimble Business Center and Leica GeoOffice 6.0, as well as web-based applications for coordinate calculation via PPP. On the basis of the results obtained, different comparisons and analyses are performed.

¹ Yuri Tsanovski, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Geodesy”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: yuuri@abv.bg

² Tsocho Danchev, Eng., UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: tsdanchev@gmail.com