



Получена: 01.02.2017 г.

Приета: 24.02.2017 г.

СОФТУЕРНИ ПРИЛОЖЕНИЯ С ОТВОРЕН КОД ЗА ПРЕЦИЗНО ГНСС ПОЗИЦИОНИРАНЕ В РЕАЛНО ВРЕМЕ – ОБЩИ ПРИНЦИПИ И ФУНКЦИОНАЛНОСТ

Т. Илиева¹

Ключови думи: прецизно ГНСС позициониране в реално време, услуги с корекционни данни от Международната ГНСС служба, BKG Ntrip Client (BNC), RTKLIV

РЕЗЮМЕ

В статията е направен преглед на теоретичния модел за прецизно ГНСС позициониране в реално време, източниците на грешки, влияещи върху решенията и начините за намаляване на тяхното влияние. Разгледани са също услугите с корекционни данни, които се предоставят от Международната ГНСС служба.

В тази връзка е представена функционалността и е направена съпоставка за това как две различни софтуерни приложения с отворен код прилагат описания теоретичен модел.

1. Въведение

Прецизното ГНСС позициониране в реално време (Real Time Precise Point Positioning – RT PPP) представлява метод за координиране на местоположенията на статични или движещи се обекти. При този метод се използват недиференцирани кодови и фазови измервания, заедно с допълнителни корекционни данни за определяне на координатите на точките и получаване, оценки за точността им.

Услуги с корекционни данни за извършването на прецизно позициониране в реално време се предоставят от Международната ГНСС служба (International GNSS Service – IGS). Данните са достъпни за потребителите след регистрация и включват корекции към орбитите и скалите за време на спътниците – т.нар. State Space Representation (SSR) във формат RTCM 3.

¹ Тамара Илиева, ас. инж., кат. „Геодезия и геоинформатика“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046, София, e-mail: ilieva_tamara@yahoo.com

В настоящото изследване са разгледани прилаганите решения за две различни софтуерни приложения с отворен код, а именно BKG Ntrip Client (BNC) и RTKLIB. Тъй като приложенията са с отворен код и лицензът им е свободен, то те могат лесно да бъдат доразработвани и надграждани като функционалност.

Целта на изследването е да бъде установен точният принцип на работа за двете софтуерни приложения, предвид това да бъде разработена допълнителна функционалност, както и да се изследва възможността за подобряване на решенията, в съответствие с последните тенденции в областта на прецизното позициониране в реално време.

2. Теоретичен модел за получаване на решенията при прецизно ГНСС позициониране в реално време

Прецизното ГНСС позициониране в реално време представлява съвременен метод за координиране на местоположенията на статични или движещи се обекти с точност, която може да бъде от порядъка на няколко сантиметра до няколко дециметра. При позиционирането се използват недиференцирани кодови и фазови измервания, както и корекционни данни за спътниковите орбити и скалите за време, които могат да бъдат предоставени напр. от Международната ГНСС служба (International GNSS Service – IGS). Използват се също така двучестотни ГНСС приемници за елиминирание на първостепенния йоносферен ефект.

Много от източниците на грешки при ГНСС наблюденията се елиминират при относителните измервания с образуването на двойни фазови разлики (най-вече за къси вектори – до 10 km), но при прецизното позициониране в реално време това не е така. Поради тази причина се прилагат различни начини за минимизиране на влиянието на грешките от тези източници, чрез които се достига едно по-приемливо ниво на точността.

Всички продукти на IGS, включително орбитните данни и скалите за време, са определени в системата IGB08. Предвид това координатите на всички точки, които се определят чрез прецизно ГНСС позициониране се получават в същата система. Реализация IGB08 на ITRS практически може да се приеме за идентична с последните реализации на WGS84 (World Geodetic System 1984) – на ниво под 2 cm [3].

Въз основа на [1 – 8] по-долу е представен теоретичният модел за PPP при регистрация на кодови и фазови измервания, за който видът на ГНСС наблюденията (в случая е разгледан пример само за GPS системата) за съответната носеща честота L_i има следния израз:

$$P_{Li} = \rho + c(\delta t_R - \delta t^s) + d_{orb} + I + ZTDm_F + \varepsilon_{P_{Li}}, \quad (1)$$

$$\Phi_{Li} = \rho + c(\delta t_R - \delta t^s) + d_{orb} - I + ZTDm_F + \lambda_{Li} N_{Li} + \varepsilon_{\Phi_{Li}}, \quad (2)$$

където ρ е геометричното разстояние между приемника R и спътника S , изчислено от координатите на спътника и точката на стоене, в дименсия [m]:

$$\rho = \rho_R^s = \sqrt{(X^s - X_R)^2 + (Y^s - Y_R)^2 + (Z^s - Z_R)^2}; \quad (3)$$

P_{Li} е измереното псевдоразстояние от приемника до спътника за съответната честота [m];

Φ_{Li} е измерването от приемника до спътника за фазата на съответната носещата честота [m];

c е скоростта на светлината във вакуум [m/s];

δt^s е грешката в скалата за време на спътника [s];

δt_R е грешката в скалата за време на приемника [s];

d_{orb} е грешката в орбитата на спътника [m];

I е грешката заради влиянието на йоносферната рефракция [m];

$ZTDM_F$ е грешката заради влиянието на тропосферната рефракция [m];

λ_{Li} е дължината на вълната за съответната честота [m];

N_{Li} е реалният брой на циклите [cycle];

$\varepsilon_{P_{Li}}$ и $\varepsilon_{\Phi_{Li}}$ са случайната грешка, съответно за кодовите и фазови измервания, вкл. шум на измерванията, влияние на отразените сигнали и влияние на други немоделирани ефекти [m].

Влиянието на първостепенния ефект на йоносферната рефракция от уравнения (1) и (2) се елиминира чрез комбиниране на кодовите и фазови измервания за две носещи честоти по следните формули:

$$P_{IF} = \alpha P_1 + \beta P_2, \quad (4)$$

$$\Phi_{IF} = \alpha \Phi_1 + \beta \Phi_2, \quad (5)$$

където

$$\alpha = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}, \quad \beta = \frac{-f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}, \quad (6)$$

където

$$f_1 = 154 f_0, \quad f_2 = 120 f_0, \quad f_0 = 10,23 \text{ MHz}. \quad (7)$$

Кодовите и фазовите измервания за йоносферно независимата комбинация, след елиминирание на първостепенния ефект на йоносферната рефракция, се изразяват по следните формули:

$$P_{IF} = \rho + d_{orb} + c(\delta t_R - \delta t^s) + ZTDM_F + \varepsilon_{P_{IF}}, \quad (8)$$

$$\Phi_{IF} = \rho + d_{orb} + c(\delta t_R - \delta t^s) + ZTDM_F + \lambda_{IF} N_{IF} + \varepsilon_{\Phi_{IF}}. \quad (9)$$

От така получените уравнения грешките в орбитите и скалите за време на спътниците се редуцират чрез използване на SSR (State Space Representation) корекционни данни в RTCM 3 формат. Тъй като тук са разгледани само GPS измервания, то корекционните SSR съобщения, които се използват, са 1057 и 1058 – това са корекционни данни съответно към орбитите и скалите за време на спътниците.

Ако векторът, определящ позицията на спътника за момента на измерване е r^s , то тогава коригираният позиционен вектор с използване на корекционното съобщение 1057 ще има вида:

$$r^s = r_{broadcast}^s - (e_{radial}, e_{along}, e_{cross}) \delta O, \quad (10)$$

$$\delta O = \begin{bmatrix} \delta O_{radial} \\ \delta O_{along} \\ \delta O_{cross} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta' O_{radial} \\ \delta' O_{along} \\ \delta' O_{cross} \end{bmatrix} (t - t_0), \quad (11)$$

където $r_{broadcast}^s$ е позиционният вектор на спътника, определен от навигационните ефемериди;

$e_{radial}, e_{along}, e_{cross}$ са единичните вектори по направление на радиалния, надлъжния и напречния компонент в орбиталната система;

$\delta O_{radial}, \delta O_{along}, \delta O_{cross}, \delta' O_{radial}, \delta' O_{along}, \delta' O_{cross}$ са корекционните параметри към орбитите и техните скорости – скоростите са необходими за получаване на позиционния вектор на спътника за епохата на измерване t , спрямо епохата за която са изчислени параметрите t_0 .

Скалата за време на спътника се коригира с използване на корекционното съобщение 1058, като се добавя корекция от вида:

$$\delta C = C_0 + C_1(t - t_0) + C_2(t - t_0)^2, \quad (12)$$

$$T^s = T_{broadcast}^s - \delta C / c, \quad (13)$$

където $T_{broadcast}^s$ се определя от навигационните ефемериди за спътника, а коефициентите C_0, C_1, C_2 се предават с корекционното съобщение.

При използването на корекционни данни от IGS задължително се добавя още и корекция заради релативистичния ефект към скалите за време на спътниците:

$$\Delta T^{rel} = \frac{2r_{broadcast}^s v_{broadcast}^s}{c^2}, \quad (14)$$

където $v_{broadcast}^s$ е скоростта на спътника, която се определя по следната формула:

$$v_{broadcast}^s = \frac{r_{broadcast}^s(t + \Delta t) - r_{broadcast}^s(t)}{\Delta t}, \quad (15)$$

където Δt се приема 0,001 s.

Такава корекция не се нанася при GLONASS системата, но при останалите спътникови системи задължително се включва.

Още една корекция, свързана с релативистичния ефект, е т.нар. ефект на Sagnac, която трябва да бъде въведена в модела заради въртенето на Земята, което пречи за синхронизирането на скалите за време на спътника и приемника.

Друга корекция, която се нанася към фазовите измервания, е заради т.нар. phase wind-up ефект – изпреварване или закъснение на фазата на носещата честота заради завъртане на антената по време на измерванията. Този ефект се моделира и се нанася за антените на спътниците, а в случай, че антената на приемника не е неподвижна, то тогава за приемника също се нанася такава корекция.

Константните отмествания (офсетите) и вариациите на фазовия център на антената спрямо базовата ѝ точка (Antenna Reference Point – ARP) за спътниците и приемниците се вземат стандартно от igs08.atx файлове, които се публикуват от IGS. В тези файлове са включени абсолютните офсети и вариации на фазовите центрове.

Към измерванията може да се включат приливни корекции за твърдото земно тяло, океаните и атмосферата, както и за движението на полюса чрез прилагане на модели в конвенциите на Международната служба за въртене на Земята (International Earth Rotation Service – IERS). Тези корекции за къси базисни линии се пренебрегват, тъй като ефектът им се елиминира с образуването на двойни фазови разлики, но при PPP трябва да се отчете влиянието им. Може да се използват допълнително и ERP файлове, чрез които да се въведат координати на полюса, когато те не са отчетени при изчисляване на орбитите. В случай на използване на данни за орбитите от IGS не е необходимо да се ползват такива.

За елиминиране на цикличните параметри за широколентовата комбинация $L_1 - L_2$ (при дължина на вълната $\lambda_{\Phi_{L_1-L_2}} = 86,2$ cm) може да се подходи чрез използване на освободените от първостепенния йоносферен ефект уравнения. Премахва се към т.нар. Melbourne-Wubbena комбинация, при която се образува разликата между широколентова комбинация $L_1 - L_2$ за фазовите измервания и теснолентова комбинация $L_1 + L_2$ за кодовите измервания:

$$MW_{comb} = \frac{f_1\Phi_1 - f_2\Phi_2}{f_1 - f_2} - \frac{f_1P_1 + f_2P_2}{f_1 + f_2}. \quad (16)$$

След нанасянето на всички или част от описаните по-горе корекции се преминава към изчисляване на неизвестните коефициенти в уравнения (8) и (9). Тези уравнения, представени в матричен вид, могат да се запишат по следния начин:

$$A\delta X + W - v = 0, \quad (17)$$

където A е конфигурационната матрица с коефициентите пред неизвестните нараствания на аргументите δX ($X = X^0 + \delta X$), а W и v са съответно векторите на свободните членове и поправките. Векторът с неизвестните включва трите координати на точката, в която се извършват измерванията (X_R, Y_R, Z_R) , грешката на скалата за време в потребителския приемник δt_R и тропосферното закъснение на сигнала за спътника в зенита ZTD. При последното неизвестно за приблизителна стойност се приема обикновено модел със стандартна атмосфера.

Тъй като уравнения (8) и (9) са в нелинеен вид, то за получаване на коефициентите на конфигурационната матрица A уравненията трябва да бъдат линеаризирани чрез развитие в ред на Тейлър:

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{IF}^1}{\partial X_R} & \frac{\partial P_{IF}^1}{\partial Y_R} & \frac{\partial P_{IF}^1}{\partial Z_R} & \frac{\partial P_{IF}^1}{\partial \delta_R} & \frac{\partial P_{IF}^1}{\partial ZPD_R} & 0 \dots 0 & 0 \\ \frac{\partial \Phi_{IF}^1}{\partial X_R} & \frac{\partial \Phi_{IF}^1}{\partial Y_R} & \frac{\partial \Phi_{IF}^1}{\partial Z_R} & \frac{\partial \Phi_{IF}^1}{\partial \delta_R} & \frac{\partial \Phi_{IF}^1}{\partial ZPD_R} & \frac{\partial \Phi_{IF}^1}{\partial N_{IF}^1} & 0 \\ & & \dots & & & 0 \dots 0 & 0 \\ & & \dots & & & 0 \dots 0 & 0 \\ \frac{\partial P_{IF}^n}{\partial X_R} & \frac{\partial P_{IF}^n}{\partial Y_R} & \frac{\partial P_{IF}^n}{\partial Z_R} & \frac{\partial P_{IF}^n}{\partial \delta_R} & \frac{\partial P_{IF}^n}{\partial ZPD_R} & 0 \dots 0 & 0 \\ \frac{\partial \Phi_{IF}^n}{\partial X_R} & \frac{\partial \Phi_{IF}^n}{\partial Y_R} & \frac{\partial \Phi_{IF}^n}{\partial Z_R} & \frac{\partial \Phi_{IF}^n}{\partial \delta_R} & \frac{\partial \Phi_{IF}^n}{\partial ZPD_R} & 0 \dots 0 & \frac{\partial \Phi_{IF}^n}{\partial N_{IF}^n} \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Свободните членове W се получават като разлика между приблизителна и измерена стойност, а случайният шум в уравнения (8) и (9) се приема за равен на 0.

От уравнение (17) след налагане на минимизационното условие ($A^T P v = 0$) се изчисляват неизвестните, а с тях и оценките на търсените величини:

$$\delta X = (A^T P A)^{-1} (A^T P W), \quad (19)$$

$$X = X^0 + \delta X. \quad (20)$$

Тежестната матрица P е диагонална, а тежестите на измерванията се приемат 1 за кодовите и 100 за фазовите измервания. След решението на системата се получават и оценки на точността за търсените величини.

За да се получат решенията в реално време след първата епоха въз основа на изчислените параметри се прогнозира тези за следващата. Използва се филтър на Калман, при който се прогнозира както вектора на неизвестните за следващата епоха, така и оценките на точността.

3. Услуги с корекционни данни от Международната ГНСС служба

Услугите с корекционни данни от Международната ГНСС служба (IGS) включват ГНСС корекции към орбитите и скалите за време на спътниците, предавани с навигационното съобщение. Корекционните потоци се предават чрез NTRIP (Networked Transport of RTCM via IP) протокол и са във формат, съответстващ на стандарта RTCM SSR [9]. Корекциите за орбитите се предоставят в референтна система ITRF08, реализация IGB08 [3].

Корекционните данни представляват комбинирани решения, получени от обработката на отделните решения в реално време от отделните центрове за анализ [10]. Чрез комбинирането на различните резултати на централите за анализ се получават по-надеждни и стабилни резултати.

Официално одобрените корекционни данни, които се предоставят за регистрираните потребители [9] са следните:

- **IGS01 / IGC01:** Комбинирани корекции към спътниковите орбити и скалите за време за GPS системата, за отделна (единична) епоха. Корекциите за последователни епохи са напълно независими. Процесът на комбиниране премахва разликите в скалите за време на спътниците, които са получени в отделните решения на центровете за анализ. Данните за скалите за време се проверяват за груби грешки и се задават тежести за всяко отделно решение, включено в общото решение. За получените от всички центрове за анализ данни се прави изравнение. Корекционните данни са достъпни във варианти IGS01 и IGC01 – първите са отнесени към фазовите центрове на спътниците, докато вторите са отнесени към масовия център.
- **IGS02:** Корекции към спътниковите орбити и скалите за време за GPS системата, които се комбинират във филтър на Калман. При прилагането на филтъра на Калман се изискват няколко минути за получаване на сходимост на решението. След като се получи сходимост, точността се поддържа, освен ако има прекъсване. При използването на този тип корекционни данни има въведен допълнителен алгоритъм, за да се избегне представянето или публикуването на резултатите по време на периода за получаване на сходимост. Информацията за орбитите при IGS02 се извлича от ултра бързите решения. Във филтъра на Калман скалите за време от отделните центрове за анализ се използват като псевдоизмервания в процеса на изравнение. Всяко измерване се моделира като линейна функция на три прогнозни параметъра: корекция за скалата за време на отделен център за анализ на данните, корекция за скалата за време от всички центрове, окончателна стойност на корекцията, която представлява краен резултат от комбинирането. Използва се рекурсивен алгоритъм за изключване на грубите грешки.

Стойността с най-голямата разлика измежду отделните решения на центровете за анализ се изключва и с останалите данни се изчислява средната позиция за спътника. Ако максималната стойност надвишава предварително определения праг, то тези данни се изключват за конкретната епоха и се обработват отново останалите.

Международната ГНСС служба работи по включването на решения за останалите спътникови констелации. Първата допълнителна спътникова констелация, която е включена, е GLONASS. Комбинацията от корекционни данни, която поддържа корекции за GPS и GLONASS е IGS03 – това все още е експериментален корекционен поток от данни:

- **IGS03:** При тези корекционни данни е следван същият подход като при IGS02. Основната разлика е в това, че са включени GLONASS корекции в допълнение към GPS. Докато скалите за време се комбинират за двете системи в един филтър на Калман, данните за орбитите се отделят и проверяват за груби грешки. Центровете за анализ използват информация за орбитите или от ултра-бързите IGS решения, или извеждат собствени оценки.

Включените в корекционните данни RTCM съобщения, както и обобщение на описаното по-горе, е дадено в табл. 1.

Таблица 1. Обобщение на описаните в т. 3 RTCM съобщения и корекционни данни

Наим. на корекц. поток	Описание	Реф. точка	RTCM корекционни съобщения, интервал [s]
IGS01	Корекции към орбитите и скалите за време за GPS за отделна (единична) епоха	Фазов център на спътн.	1059 (5), 1060 (5)
IGC01	Корекции към орбитите и скалите за време за GPS за отделна (единична) епоха	Масов център на спътн.	1059 (5), 1060 (5)
IGS02	Корекции към орбитите и скалите за време за GPS, комбинации чрез филтър на Калман	Фазов център на спътн.	1057 (60), 1058 (10), 1059 (10)
IGS03	Корекции към орбитите и скалите за време за GPS и GLONASS, комбинации чрез филтър на Калман	Фазов център на спътн.	1057 (60), 1058 (10), 1059 (10), 1063 (60), 1064 (10), 1065 (10)

Корекционните RTCM съобщения, които са изброени по-горе, могат да бъдат използвани за изпитване и тестове на методите и алгоритмите за прецизно позициониране в реално време, както и на различни свързани с него приложения. В Дадените по-горе RTCM съобщения:

- 1057 и 1063 – GPS и GLONASS корекции към орбитите от радионавигационните ефемериди;
- 1058 и 1064 – GPS и GLONASS корекции към скалите за време от радионавигационните ефемериди;
- 1059 и 1065 – GPS и GLONASS диференциални разлики за кодовите измервания (инструментални разлики за различните честоти).

Международната ГНСС служба предоставя и допълнителни корекционни потоци от данни, които могат да бъдат използвани за прецизно позициониране в реално време – данни от различните центрове за анализ, данни от наблюдения от ГНСС станции, радионавигационни ефемериди и други.

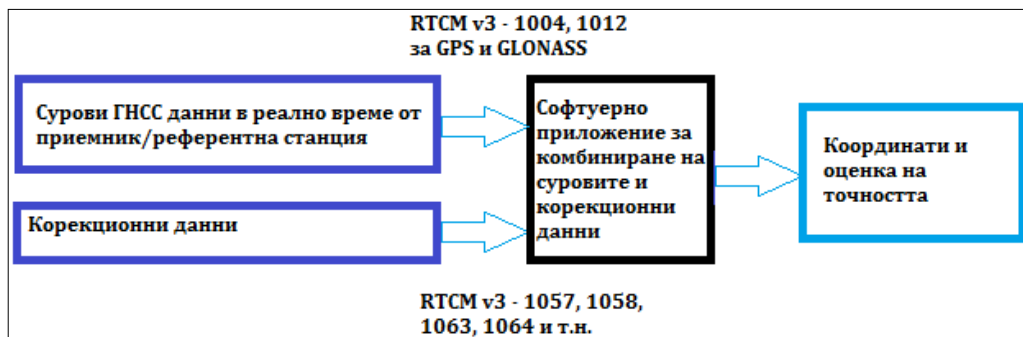
Корекционни данни от IGS се предоставят също и в някои локални референтни системи – напр. ETRF2000 за Европа, NAD83 за САЩ и други [11]. При използването на тези корекционни данни получаваните при PPP решения автоматично се привеждат към локалната референтна система – трансформацията на корекционните данни се прави преди тяхното разпространение.

4. Софтуерни приложения с отворен код за прецизно ГНСС позициониране в реално време

ГНСС приемниците в голямата си част са хардуерни, макар че понастоящем се наблюдава тенденция производителите да включват все повече и повече софтуерни

компоненти. Това е наложено най-вече от възможността софтуерните компоненти да се модифицират и актуализират много по-бързо и лесно спрямо хардуерните компоненти. Ако приемникът не е разработен с концепцията да може да прилага решения от вида PPP, то тогава единственият начин да бъдат изпълнявани такива наблюдения в реално време с него е чрез използване на допълнителни софтуерни продукти и преносим компютър или таблет, който се свързва с приемника.

За настоящото изследване са използвани две софтуерни приложения – това са BNC и RTKLIV [7] и [8]. Основният принцип за получаване на решенията при прецизно ГНСС позициониране в реално време и за двете приложения е показан схематично на фиг. 1.



Фиг. 1. Схематично представяне на основния принцип за получаване на решенията при прецизно ГНСС позициониране в реално време

И двете софтуерни приложения са със свободен лиценз GNU General Public License (GPL) и сорс кодът им е достъпен, вкл. се разрешават модификации и създаване на собствена функционалност въз основа на наличната.

Разбира се, двете приложения имат и много различия – напр. RTKLIV не може да ползва допълнителни данни за радионавигационни ефемериди, но пък има възможност за извеждане на получените решения към TCP/IP, докато BNC позволява да се комбинират корекционни потоци от данни и да се генерират собствени потоци. Друга съществена разлика е тази, че BNC позволява много по-малко потребителски настройки по отношение на моделирането на влиянието на различните фактори при измерванията, докато другият софтуер е много по-развит в тази си част.

По-долу е описана функционалността на двете софтуерни приложения по отношение на получаването на решенията при извършването на прецизно ГНСС позициониране в реално време.

4.1. Софтуерно приложение BNC – функционалност

Това софтуерно приложение е разработено от Федералната агенция по картография и геодезия във Франкфурт, Германия (BKG) и Техническият университет в Прага, Чехия. Написано е на C++, а интерфейсът му е разработен с Qt. Софтуерът работи под операционна система Windows (версия 7 или по-висока).

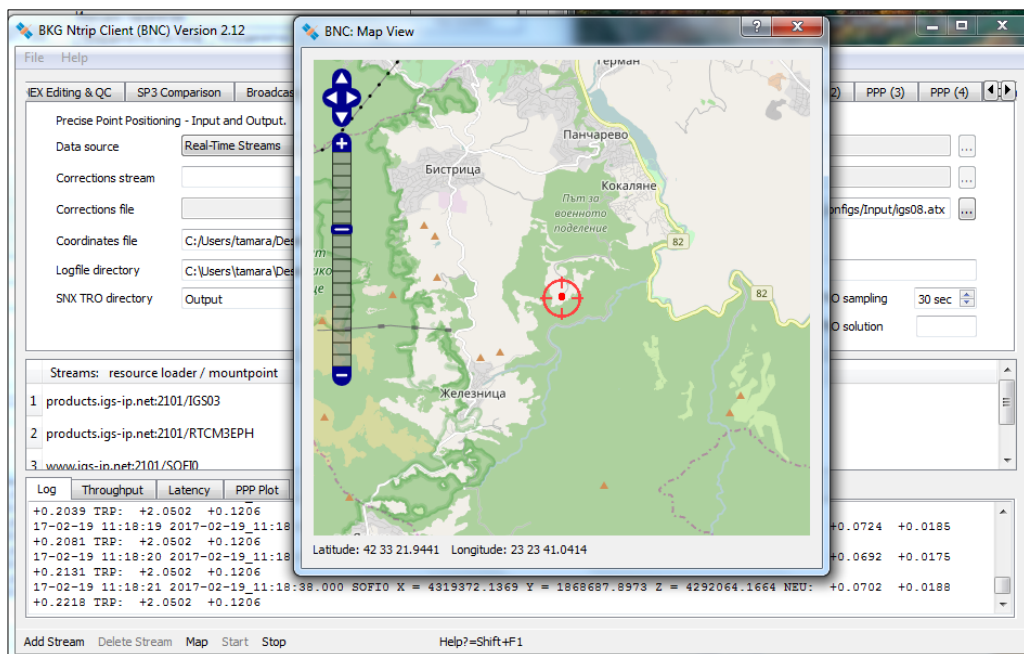
За да се конфигурира приложението за работа, се използва конфигурационен файл, който въвежда първоначалните настройки за работа. Добавят се потоците от данни – суровите ГНСС и корекционните данни, които ще бъдат използвани за PPP решението. При

настоящото изследване са използвани данни от ГНСС референтна станция, но може да се добавят и данни от потребителски приемник, свързан на сериен комуникационен порт.

Потребителските настройки се правят в четири отделни форми: приблизителни координати за точката, от която са суровите данни, параметри на антената (офсети и вариации на фазовия център), файл за изход на данни, тип на решението (с използване на кодови и фазови измервания за различни спътникови констелации), височина на маската над хоризонта, а също така може да се проследяват получените решения в реално време. Екранен изглед от софтуерното приложение BNC е показан на фиг. 2.

Предвид описания в т. 2 теоретичен модел трябва да се отбележи това, че в софтуерното приложение:

- се получава решение, което е базирано на йоносферно независимата комбинация с използване на кодови и фазови измервания;
- се нанасят корекции за земните приливи, но без да се отчитат тези за океаните (при станции, които са разположени по крайбрежието, влиянието може да достигне до около 10 cm [8]) и атмосферата;
- не се нанасят корекции заради движението на полюса (около 2 cm [8]);
- се нанасят корекции заради изпреварване или закъснение на фазата на носещата честота при завъртане на антената по време на измерванията – phase wind-up;
- се нанасят корекции за офсетите и вариациите на фазовия център за приемника, но без вариации на фазовите центрове на спътниците (около 2 cm [8]).



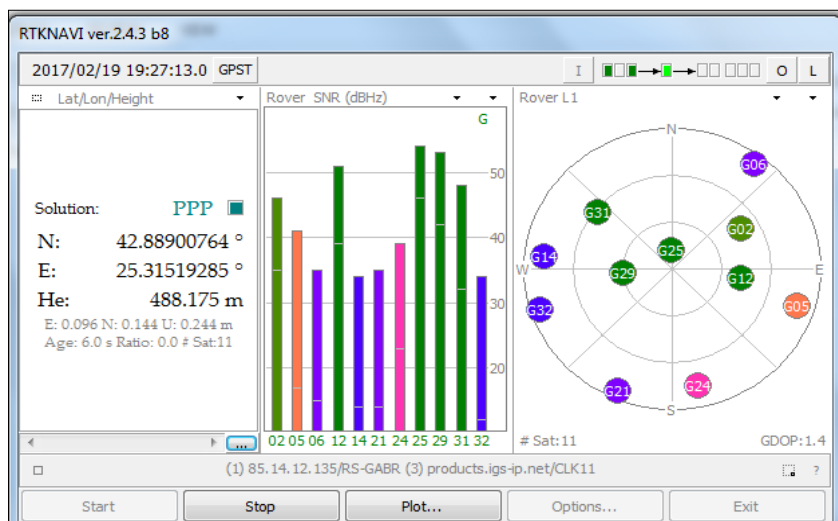
Фиг. 2. Екранен изглед от софтуерното приложение BNC

4.2. Софтуерно приложение RTKLIV – функционалност

Софтуерното приложение е разработено от Tomoji Takasu в Tokyo University of Marine Science and Technology. Всички функции и библиотеки на приложението са разработени на C, а потребителският интерфейс е разработен със C++ и компилиран с Embarcadero C++. Софтуерът работи под операционна система Windows (версия 7 или по-висока).

Приложението отново се конфигурира за работа с използването на конфигурационен файл. Чрез него се въвеждат първоначалните настройки за работа. Добавят се потоците от данни – суровите ГНСС и корекционните данни, които ще бъдат използвани за PPP решението. И тук може да се използват данни от ГНСС референтна станция чрез NTRIP или потребителски приемник, свързан на сериен комуникационен порт.

Следва да се направят следните потребителски настройки: указва се видът на решението, избират се спътникови констелации, както и височина на маската над хоризонта, начинът на определяне на корекциите за йоносферното и тропосферното закъснение на сигнала (в случая се избира Iono-Free LC и Estimate ZTD). Може да се използват допълнителни файлове с диференциални разлики за кодовите измервания (инструментални разлики за различните честоти). Избира се дали да се нанасят корекции заради изпреварване или закъснение на фазата на носещата честота при завъртане на антената по време на измерванията – phase wind-up. Задава се дали да се определят цикличните параметри за широколентовата комбинация и дали да се нанасят приливни корекции (корекциите за земните и океанските приливи се нанасят поотделно, а може да се използват допълнително и ERP файлове за координатите на полюса). Въвеждат се параметри на антените (офсети и вариации на фазовия център за приемника и за спътниците) от ATX файлове. Добавят се файлове за изход на данни, а също така получените решения може да се проследяват в реално време. Екранен изглед от софтуерното приложение RTKLIV е показан на фиг. 3.



Фиг. 3. Екранен изглед от софтуерното приложение RTKLIV

Предвид описаното в т. 2, за разлика от BNC, където взаимодействието на потребителя е много по-ограничено, при софтуерното приложение RTKLIV потребителят може да прави много повече настройки за получаване на решенията.

5. Съпоставка на функционалността на двете софтуерни приложения

Съпоставка на функционалността на двете софтуерни приложения въз основа на дадения по-горе теоретичен модел е дадена в табл. 2.

Таблица 2. Съпоставка на функционалността на BNC и RTKLIB

Компоненти на теоретичния модел за PPP	Софтуерно приложение BNC – налична функционалност	Софтуерно приложение RTKLIB – налична функционалност
Първостепенен ефект на йоносферната рефракция – коригиран чрез йоносферно независима линейна комбинация	Да – няма опция потребителят да избира друго	Да – има опции да се добавят и друг вид йоносферни корекции
Корекции към орбитите и скалите за време	При изключване на корекционните данни се преминава към навигационно решение	При изключване на корекционните данни се преминава към навигационно решение
Корекции заради релативистичния ефект към скалите за време на спътниците	Да – Няма опция да бъде изключена тази корекция в софтуера	Да – Няма опция да бъде изключена тази корекция в софтуера
Корекции заради ефект на Sagnac – заради въртенето на Земята по време на измерванията	Да – Няма опция да бъде изключена тази корекция	Да – Няма опция да бъде изключена тази корекция
Корекции заради т.нар. phase wind-up ефект (изпреварване или закъснение на фазата на носещата честота заради завъртане на антената по време на измерванията)	Да – само за спътниците – няма опция да бъде изключена тази корекция в софтуера	Да – Може да се указва от потребителя
Корекции заради офсети и вариации на фазовия център на антената спрямо базовата ѝ точка (Antenna Reference Point – ARP) – за спътниците	Офсети – Да Вариации – Не Не може да се указват	Офсети – Да Вариации – Да Може да се указват
Корекции заради офсети и вариации на фазовия център на антената спрямо базовата ѝ точка за приемника	Офсети – Да Вариации – Да Може да се указват	Офсети – Да Вариации – Да Може да се указват
Допълнително задаване на приливни корекции и ERP файлове, чрез които да се въведат координати на полюса	Приливна корекция за твърдото земно тяло се изчислява, но няма опция да бъде изключена тази корекция в софтуера	Да – приливните корекции може да се задават поотделно за твърдото земно тяло и океаните, вкл. може да се добавят и ERP файлове
Елиминирани на цикличните параметри за широкополентовата комбинация L_1 - L_2	Не	Да

За съпоставка на функционалността на двете софтуерни приложения в настоящият експеримент са използвани данни от:

- перманентна ГНСС станция GABR, поддържана от ЕсБиГруп ЕАД и включена в ГНСС инфраструктурната мрежа „СМАРТ БУЛ.НЕТ“;
- перманентна ГНСС станция SOFI, включена в IGS и EUREF мрежите;
- корекционни данни от IGS – RTCM 3 формат, съобщения 1057 и 1058.

Направените тестове са с продължителност по 1 час, при включване и изключване на различните опции в софтуерните приложения, като за всяка точка са добавени първо всички възможни корекции и след това последователно са изключвани опциите. Получените координати са съпоставени с дадените координати на двете перманентни станции, определени към система IGB08. Координатите на станциите предварително са трансформирани към тази система с използване на онлайн калкулатор на интернет страницата на EUREF.

Като резултат от тестовете може да се обобщи това, че получените решения се различават от дадените координати за съответната епоха с до +/- 30 cm в плановите компоненти и до +/- 65 cm по височина. Влиянието на различните фактори върху резултатите от измерванията е много трудно и дори практически невъзможно да се установи, предвид точността на метода, т.е. влияния от порядъка на 2 – 3 и дори 5 cm много трудно биха могли да бъдат идентифицирани, като за целта ще са необходими много повече и време, и много по-детайлни анализи.

Съвместно с точността на измерванията е съблюдавано и времето за получаване на сходимост на решението и за двете софтуерни приложения. При BNC за по-бързо получаване на сходимост на решението единствено може да се използва като похват въвеждането на приблизителни координати за станцията от външен файл, докато при RTKLIV и без въвеждането на приблизителни координати сходимостта се получава по-бързо (под 3 минути) при използването на опцията за определяне на цикличните параметри за ширококоловата комбинация.

Благодарности

Специални благодарности към „Мапек“ АД и „Ес Би Груп“ ЕАД за предоставения достъп до поток от данни в реално време от станция GABR, която е част от инфраструктурната ГНСС мрежа СМАРТ Бул.НЕТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Geq M., G. Gendt, M. Rothacher, C. Shi, J. Liu.* Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations. Journal of Geodesy, Springer-Verlag, 2007.
2. *Hadas, T.* GNSS-WARP software for Real-Time Precise Point Positioning. ARTIFICIAL SATELLITES, Vol. 50, No. 2 – 2015.
3. *Koubaq J.* A guide to using International GNSS service (IGS) products, Geodetic Survey Division, Natural Resources Canada, May 2009, Last updated September 2015.

4. *Laurichesse, D.* The CNES Real-time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution demonstrator. ION GNSS 2011, September 19 – 23, 2011.
5. *Schmitz, M.* RTCM State Space Representation Messages. Status and Plans PPP-RTK & Open Standards Symposium, Frankfurt, Germany, March 12 – 13, 2012.
6. *Shi, J.* Precise Point Positioning Integer Ambiguity Resolution with Decoupled Clocks. UCGE Reports, University of Calgary, Department of Geomatics Engineering, December 2012.
7. *Takasu, T.* RTKLIB Manual version 2.4.2, version 2.4.3 Beta 8 & Beta 13, April 2013.
8. *Weber, G., L. Mervart, A. Stürze, A. Rülke, D. Stöcker.* BKG Ntrip Client (BNC) Manual Version 2.11. and Version 2.12., Federal Agency for Cartography and Geodesy (BKG), Frankfurt, Germany and Czech Technical University Prague, Department of Geodesy, March 2016.
9. IGS Real-time Service: <http://www.igs.org/rts/products>.
10. IGS Analysis Centers: <http://www.igs.org/about/analysis-centers>.
11. Real-time Satellite Orbit and Clock Corrections to Broadcast Ephemeris from IGS and EUREF Resources: <https://igs.bkg.bund.de/ntrip/orbits>.

OPEN SOURCE SOFTWARE APPLICATIONS FOR REAL-TIME GNSS PRECISE POINT POSITIONING – GENERAL PRINCIPLES AND FUNCTIONALITY

T. Ilieva¹

Keywords: *Real-time Precise Point Positioning, real-time services by the International GNSS Service, BKG Ntrip Client (BNC), RTKLIB*

ABSTRACT

The paper gives an overview of the theoretical model for Real-time Precise Point Positioning, the impact of the error sources on the solutions and the ways to reduce their effect. In addition, the Real-time services provided by the International GNSS Service are described.

Related to this, the functionality of two different open source software applications is presented and a comparison is given about how the theoretical model is applied.

¹ Tamara Ilieva, Assist. Prof. Eng., Dept. “Surveying and Geoinformatics”, UACEG, 1 H. Smirnovski Blvd., Sofia 1046, e-mail: ilieva_tamara@yahoo.com