

**МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. ИВАН РИЛСКИ“**

КАТЕДРА „МАРКШАЙДЕРСТВО И ГЕОДЕЗИЯ“

---

**Аспарух Красенов Камбуров**

**ПРИЛОЖЕНИЕ НА МЕТОДА WARTK В СЪВРЕМЕННИТЕ  
2D И 3D СЕИЗМИЧНИ ПРОУЧВАНИЯ ЗА ТЪРСЕНЕ НА  
НЕФТ И ГАЗ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

на дисертация за придобиване на  
образователна и научна степен „доктор“  
по научна специалност: 02.16.01 „Обща, висша и приложна геодезия“

Научен ръководител:

доц. д-р инж. Момчил Минчев

Рецензенти:

проф. д.т.н. инж. Иван Георгиев

доц. д-р инж. Михаил Авджиев

София, 2012 г.

## **I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

### **1. Актуалност на проблема**

Сеизмичните изследвания в нефто-газодобивната промишленост се извършват основно с цел откриване на нови находища на течни и газообразни въглеводородни полезни изкопаеми. Методът на изследване се състои в изкуствено генериране на сеизмични вълни в земната кора, наблюдение, регистриране, анализ и интерпретация на техните отражения. Прилагат се различни технологични схеми за наблюдение, сред които най-използвани са профилните (2-D) и площните (3-D).

Правилният анализ на геофизичните данни изисква местоположенията, в които се извършва генериране и регистриране на сеизмичните вълни, да бъдат трасирани и определени с достатъчна точност в зададена планова и височинна координатна система. За целта се използват основно съвременни ГНСС методи. Приложението на тези методи е свързано със специфични изисквания към наличната геодезическа и телекомуникационна инфраструктура, каквато твърде често липсва в изолираните райони от земната повърхност. Такива са геоложките райони, изключително перспективни за изучаване чрез сеизмични методи - Северна Африка, Близкия Изток, Средна Азия и др.

Затрудненото прилагане на съществуващите към момента ГНСС методи налага търсене на нови, способни да осигурят оптимално геодезическо производство в тези и други подобни райони.

### **2. Цели и задачи на работата**

Целта на дисертационния труд е изследването на възможностите за приложение на нов диференциален ГНСС метод с широк обхват, наречен WARTK (Wide Area RTK), за нуждите на геодезическото производство в рамките на сеизмичните 2-D и 3-D проучвания за търсене на нефт и газ.

В дисертацията са формулирани следните задачи:

- Анализ на основните изисквания към геодезическите работи в сеизмичните проучвания;
- Изследване на теоретичните основи на класическите ГНСС методи и предлагания нов метод WARTK;
- Изследване на възможностите за приложение на класически ГНСС методи в реални условия и оценка на предимствата и недостатъците им;
- Експериментално проучване на метода WARTK;
- Оценка на възможните предимства на предлагания метод на базата на съпоставката му с класическите ГНСС методи.

### 3. Методи и средства на изследване

В дисертацията са използвани следните теоретични и емпирични методи на изследване:

- Анализ – анализирани са теоретичните основи на сеизмичните методи за търсене на нефт и газ с цел извеждане на основните изисквания към използваните в тях геодезически дейности;
- Сравнение – извършено е сравнение на емпирични резултати от геодезически дейности в реални проучвателни условия, с цел извеждане на основните им недостатъци и обобщаване на функционалните направления, в които е възможно да се търси оптимизиране.
- Експеримент – извършена е емпирична верификация на алгоритъма за определяне на местоположение по метода WARTK.

Експерименталната работа е извършена със следните средства:

- софтуер за оценка на данни по МНМК – „gCAT“;
- софтуер за оценка на данни чрез калманов филтър – „kalman“;
- софтуер за търсене на фиксирани циклични параметри – „ambisolv“;
- среда за графична визуализация на резултатите – „gnuplot“.

### 4. Научна новост

Дисертационният труд представлява научна новост в следните пунктове:

- Класифицират се за първи път методите за приложение на ГНСС в реални 2-D и 3-D сеизмични проучвания за търсене на нефт и газ;
- Изследват се за първи път възможностите за приложение на метода WARTK за сеизмични проучвания в перспективен за търсене на нефт и газ райони.

### 5. Приложимост и полезност

Методът WARTK е приложим във всички случаи, когато са изпълнени следните изисквания:

- Да е необходимо ГНСС позициониране в реално време с дециметрова точност;
- Да е в обхвата на диференциалните WARTK корекции – около 400 km от мрежовите станции за мониторинг на SBAS системата EGNOS.

След достигане на пълна оперативност методът WARTK ще може да се използва успешно за цялостно геодезическо осигуряване на сеизмологичните проучвания за търсене на нефт и газ в отдалечени и труднодостъпни райони от Африка и Азия. Допълнителна приложимост може да се търси във всички сфери, в които се изисква

определяне на местоположение в реално време с дециметрова точност. Такива могат да бъдат:

- геофизични проучвания;
- кадастър;
- картиране, утилити, ГИС;
- земеделие и др.

## **6. Обем и структура на дисертационната работа**

Дисертационният труд е структуриран в увод, три глави, заключение, претенции за приноси, публикации на автора по темата, използвана литература, седем приложения. Общият обем на дисертацията е 251 страници.

## **II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

### **Глава 1 - Сеизмични методи за търсене на нефт и газ**

#### **1.1. Въведение**

Предмет на разглеждане в тази глава от дисертацията е проучвателната сеизмология за търсене находища на нефт и газ под сушата, извършвана по 2-D и 3-D сеизмични методи.

#### **1.2. Същност на сеизмичните методи**

При прилагане на 2D и 3D сеизмични методи на проучване вълните се предизвикват чрез изкуствено възбуждане на земната повърхност с взривни и невзривни източници. Основна роля играят невзривните източници и на първо място виброеизмичното възбуждане (т. нар. виброеиз). Като се разпространяват в дълбочина, тези вълни срещат границите на различните по литология скални серии. Благодарение на това, че съществува скок в еластичните свойства, образуват се отразени и пречупени вълни, които се завръщат обратно към повърхността на Земята.

Регистрираните записи на отделните групи от импулси, които са резултат от пречупването и отразяването на първоначалния сеизмичен импулс от границите между отделните слоеве на земната кора, се наричат сеизмограма. След систематизиране на записите на сеизмичните вълни, получени в различни точки на повърхността или в сондажи, на сеизмограмата могат да се разграничат импулсите, предизвикани от пристигането на различни по вид сеизмични вълни – отразени или пречупени. Това дава възможност да се определи положението на отделните граници на разреза, на които се пречупват и отразяват вълните.

#### **1.3. Геоложки основи на сеизмичните методи**

При търсенето и проучването на полезни изкопаеми чрез сеизмичните методи се изучават антиклинали, куполовидни подувания, разседи, ъглови несъгласия, връзки

между различните структури, особености на стратиграфските граници и др. Специално в нефтотърсенето сеизмичните методи играят авангардна роля не само в процеса на търсенето, но и при детайлното проучване и прогнозната оценка на структурите, за да се подготвят те за сондиране и експлоатация [27].



Фиг. 1. Типично разположение на нефтогазоносните залежи в антиклинални структури

#### 1.4. Общи понятия за разпространение на сеизмични вълни в реални среди

При преминаването на сеизмични вълни през дадена среда може да се наблюдава отдалечаваща се от източника тясна зона на деформация, в която частиците извършват трептящи движения. Така в еластична среда се отделят три области: външна област на покой, деформирана област и вътрешна област, в която трептеливото движение вече е завършило. *Фронт на вълната* се нарича повърхността, която отделя деформираната област на средата от областите, в които частиците се намират в покой. Всяка вълна има два фронта: преден и заден. Частиците трептят в три измерения. *Профилът на вълната* показва колко са отдалечени отделните частици от равновесното им положение. Точките, в които преместването е максимално, се наричат *върх (гребен)* или *дол на вълната*. Разстоянието между два съседни върха на вълната се нарича *дължина на вълната*. Като се съпоставят формите на записите на трептенията в няколко близко разположени точки на пространството или равнината, могат да се получат необходимите данни и се изучи типът на вълните.

#### 1.5. Генериране и регистриране на сеизмични вълни

Полевият апаратурен комплекс при работа по системата “вибросеиз” се състои от две основни звена – хидравлични сеизмовибратори и регистрираща сеизмична апаратура. Сеизмовибраторите са мощни хидравлично задвижвани машини, монтирани на специално проектирано високо проходимо превозно средство. Регистрирането на отраженията се извършва от сеизмоприемници, които възприемат механичните трептения на почвата, предизвикани от разпространението на деформацията под форма на еластична вълна, и ги преобразуват в електрически сигнали. Регистрираните сеизмични вълни се предават към многоканални сеизмични станции, където се извършва предварителна обработка на сеизмичните данни с помощта на специален

софтуер, с цели отделяне на слабите полезни вълни и отстраняване на пречещите смутители.

### **1.6. Методи за наблюдение**

Преди началото на проучването се съставя проект за работа, в която са описани подробно всички параметри на сеизмичната програма. В зависимост от геоложките и теренни условия се избира подходящ метод на наблюдение – 2D или 3D.

В основата на 2D метода лежи възбуждане на сеизмични трептения, създадени от  $n$  източника, разположени през равни интервали по линии (профили) на възбуждане, и регистрирането на отразени вълни в  $n$  точки, разположени през равни интервали по линии на приемане. В общия случай профилите на възбуждане и приемане съвпадат по направление. Системата на 2D наблюдение се характеризира с един източник, фиксиран по отношение на базата на регистриране.

При търсенето и проучването на залежи от нефт и газ в неантиклинален тип структури се използват площни 3D системи на наблюдение, които осигуряват пространственото изучаване на геоложкия разрез. Опростена схема на такъв тип наблюдения се приема използването на определен брой линейни успоредни профили (фиг.18). При този метод линиите на приемане и линиите на възбуждане са разположени под ъгъл едни спрямо други, като най-широко прилагано е взаимно-перпендикулярното разположение.

### **1.7. Методика на обработка и интерпретация на сеизмичните данни**

Обработването на сеизмичните материали преминава през следните обобщени етапи:

- Предварителна обработка;
- Построяване на предварителен сеизмичен разрез;
- Коригиране на статичните и кинематични поправки;
- Построяване на динамичен дълбочинен разрез.

Цялостната обработка и интерпретация на данните завършва с построяване на структурни карти по опорни сеизмични граници. На тези карти са нанесени използваните профили, стойностите на изодълбочините, селищата и други геоложки, геодезични и геофизични сведения.

### **1.8. Геодезически работи в сеизмопроучването**

Непосредствените 2D и 3D полеви сеизмични проучвания се предхождат от цикъл спомагателни работи - геодезически, сондажни, вибросеизни и др. Геодезическите работи започват в най-ранен етап от извършването на сеизмичното проучване и е необходимо да изпреварват достатъчно началото на същинският вибросеиз. В съвременните сеизмични проучвания за търсене на нефт и газ описаните по-горе геодезически работи се извършват основно с използване на ГНСС методи. Основните

видове ГНСС дейности и методи са типизирани в табл. 1. Със специфични изисквания към точността и оперативността на резултатите, те изискват приложението на високоточни геодезически ГНСС приемници, както и на различни методи за обработка и интерпретация на измерванията.

**Табл. 1. Основни геодезически дейности в сеизмичните проучвания**

| Дейности                          | Изисквания                                  |                                           | ГНСС методи   |
|-----------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------|
|                                   | Точност                                     | Оперативност                              |               |
| Създаване на геодезическа основа  | 2–5 cm                                      | С последваща обработка                    | Статичен      |
| Трасиране на точки                | 50 cm                                       | В реално време                            | RTK, PPP      |
| Определяне на координати на точки | По положение - 20 cm<br>По височина - 50 cm | В реално време;<br>С последваща обработка | RTK, PPK, PPP |

Основните изисквания към геодезическите работи в сеизмичните проучвания могат да бъдат систематизирани както следва:

- *Независимост* – геодезическите работи трябва да могат да бъдат извършвани навсякъде, във всеки район по света, указан от техническото задание, независимо от наличието или липсата на съществуваща геодезическа основа, единични или мрежови инфраструктурни референтни станции в района на работа и пр.;
- *Оперативност* – геодезическите работи трябва да изпреварват достатъчно същинските геофизични дейности в проучването, а при необходимост от наваксване на изоставане или внезапна промяна в работния план - да се извършват със значително по-висока скорост от тях. Също така, проектното положение на точките от сеизмичните профили е необходимо да бъде трасирано на терена, поради което геодезическите работи трябва да бъдат извършвани в реално време;
- *Точност* – освен независимост от условията и висока оперативност, към геодезическите работи в сеизмичните проучвания има изисквания и за висока точност: 20 cm по положение и 50 cm по височина.

### **1.9. Заключение**

Като неизменен компонент от съвременното сеизмично проучване, с цел осигуряване на необходимата точност и производителност, комплексът от геодезически работи е необходимо да бъде извършван по най-съвременните геодезически методи. Като такива могат да бъдат посочени методите, базирани на Глобалните навигационни спътникови системи (ГНСС). Това са единствените методи, които могат да осигурят изпълнение на изискванията за независимост, оперативност и точност на геодезическите работи в рамките на 2-D и 3-D сеизмичните проучвания. Провеждането на последните поставя изисквания за бързи и високоточни геодезически измервания независимо от съществуващите условия в изследвания геоложки район, което

представлява предизвикателство дори за най-развитите съвременни ГНСС методи. Това налага адаптиране на съществуващи и търсене на нови ГНСС методи, които да изпълняват в максимална степен основните изисквания пред геодезическите работи в 2-D и 3-D сеизмичните изследвания за търсене на нефт и газ.

## **Глава 2 - Теоретични основи на съвременните ГНСС методи, прилагани в сеизмичните проучвания за търсене на нефт и газ**

### **2.1. Въведение**

Във втора глава на дисертацията са разгледани съвременни ГНСС методи, използвани за геодезическо осигуряване в 2D и 3D сеизмични проучвания за търсене на нефт и газ. Представен е нов, намиращ се все още в експериментална фаза ГНСС метод - WARTK (Wide Area Real Time Kinematic), с приложението на който, могат да бъдат изпълнени в максимална степен изискванията за независимост, оперативност и точност на геодезическите работи.

### **2.2. Основни видове ГНСС**

Според обхвата си съвременните ГНСС могат най-общо да бъдат разграничени в два сегмента [25]:

- Глобални системи
- Регионални

Системите в тези сегменти осигуряват извършването на единични ГНСС измервания, чиято точност е от порядъка на 15-20 m - твърде ниска за прецизни геодезически приложения. За повишаване на тази точност, в сеизмичните проучвания се прилагат още следните типове системи:

- Класически ДГНСС;
- ДГНСС с широк обхват;
- Усъвършенствани спътникови диференциални системи (SBAS).

### **2.3. Основни понятия от обработката на ГНСС сигнали**

Обработката на ГНСС сигнали преминава през няколко основни етапа:

- Обработка на кодови измервания
- Обработка на фазови измервания
- Съставяне на разлики между измерените величини
- Съставяне на линейни комбинации
- Оценка на параметри по резултатите от измерванията

#### **2.3.1. Кодови измервания**

Формулата за определяне на псевдоразстояние до спътник чрез кодови измервания е:

$$P_A^s(t) = \varrho_A^s(t) + c \Delta\delta_A^s(t), \quad (2.1)$$

където  $P_A^s(t)$  - измерено псевдоразстояние между ГНСС приемник А и спътник s,  $\varrho_A^s(t)$  -геометричното разстояние между тях,  $c$  - скорост на светлината във вакуум,  $\Delta\delta_A^s(t) = \delta_A(t) - \delta^s(t)$  - комбинирана грешка в скалите за време на спътника и приемника спрямо системното ГНСС време. Геометричното разстояние  $\varrho_A^s(t)$  се определя по формулата:

$$\varrho_A^s(t) = \sqrt{(X^s(t) - X_A)^2 + (Y^s(t) - Y_A)^2 + (Z^s(t) - Z_A)^2}, \quad (2.2)$$

където  $X^s(t), Y^s(t), Z^s(t)$  - компоненти на геоцентричния вектор на спътника в епоха  $t$ ;  $X_A, Y_A, Z_A$  - геоцентрични координати на неподвижен ГНСС приемник. Грешката в скалите за време на спътниците се предават в навигационното съобщение.

### 2.3.2. Фазови измервания

Измерванията на фазите на носещите честоти носят по-висока точност от кодовите. Основният проблем в процеса на тяхната обработка е определянето на точния брой цикли на носещата честота между спътника и приемника. Процесът на това определяне се нарича *фиксиране на цикличните параметри*. Основното уравнение на фазовото ГНСС измерване в епоха  $t$ , изразено в брой цикли, е:

$$\Phi_A^s(t) = \frac{1}{\lambda^s} \varrho_A^s(t) + N_A^s + \frac{c}{\lambda^s} \Delta\delta_A^s(t), \quad (2.3)$$

където  $\Phi_A^s(t)$  - фазово измерване между приемник А и спътник s,  $\varrho_A^s(t)$  - действителното геометрично разстояние между тях,  $\lambda^s$  - дължина на вълната на носещата честота,  $N_A^s$  - целочислен цикличен параметър,  $c$  - скорост на светлината във вакуум,  $\Delta\delta_A^s(t) = \delta_A(t) - \delta^s(t)$  - комбинирана грешка от потребителската и спътниковата скали за време.

### 2.3.3. Разлики между измерваните величини

В математическите модели на относителните ГНСС измервания елиминирането на паразитните величини в (2.1) и (2.3) се извършва с използване на разлики между уравненията на измерванията в референтната и определяемите станции. За целта се използват единични и двойни кодови и фазови разлики.

### 2.3.4. Линейни комбинации

Линейните комбинации намират приложение в различни етапи на обработката измерванията, в случаите когато е необходимо мерната единица да се скъси или удължи – например, когато се търси фиксирано решение. Получават се след смесване на кодовите и фазовите измервания по  $L_1$  и  $L_2$ , като сума и разлика от тях. Прилагането

на математическия апарат на линейните комбинации дава възможност и за определяне на влиянието на отделните източници на грешки в ГНСС измерванията, по следната обобщена формула:

$$L_{iAB}^{sk} = \varrho_{AB}^{sk} + B_{iAB}^{sk} + \alpha_i I_{AB}^{sk} + T_{AB}^{sk}, \quad (2.11)$$

където  $\varrho_A^s$  - геометрично разстояние между приемника и спътника,  $B_i$  – плаващ циклически параметър,  $T$  – тропосферна рефракция,  $I$  – йоносферна рефракция,  $\alpha_i = 40.3/f_i^2$ ,  $\lambda_i$  - дължина на вълната на носещата честота.

Линейните комбинации се използват основно чрез техните двойни кодови и фазови разлики. Освен елиминиране на грешките в скалите за време на спътниците и приемниците, двойните разлики по комбинации, в които целочисления характер на циклическите параметри се запазва, отстраняват и систематичните, честотно зависими инструментални закъснения в спътника и приемника. Основните линейни комбинации са:

#### 2.3.4.1. Широколентови комбинации

$$L_{WAB}^{sk} = \varrho_{AB}^{sk} + \lambda_W (N_{1AB}^{sk} - N_{2AB}^{sk}) + T_{AB}^{sk} + \alpha_W I_{AB}^{sk}, \quad (2.15)$$

където  $\lambda_W = \frac{c}{f_1 - f_2} = 86.2 \text{ cm}$ ,  $N_{1AB}^{sk} - N_{2AB}^{sk} = N_{WAB}^{sk}$  - широколентов циклически параметър (цяло число).

#### 2.3.4.2. Йоносферно независими комбинации

$$L_{CAB}^{sk} = \varrho_{AB}^{sk} + B_{CAB}^{sk} + T_{AB}^{sk}, \quad (2.18)$$

#### 2.3.4.3. Геометрично независими комбинации

$$L_{IAB}^{sk} = \alpha_I I_{AB}^{sk} + \lambda_1 B_{1AB}^{sk} - \lambda_2 B_{2AB}^{sk} = \alpha_I I_{AB}^{sk} + \lambda_1 B_{IAB}^{sk} - \lambda_2 B_{2AB}^{sk}. \quad (2.21)$$

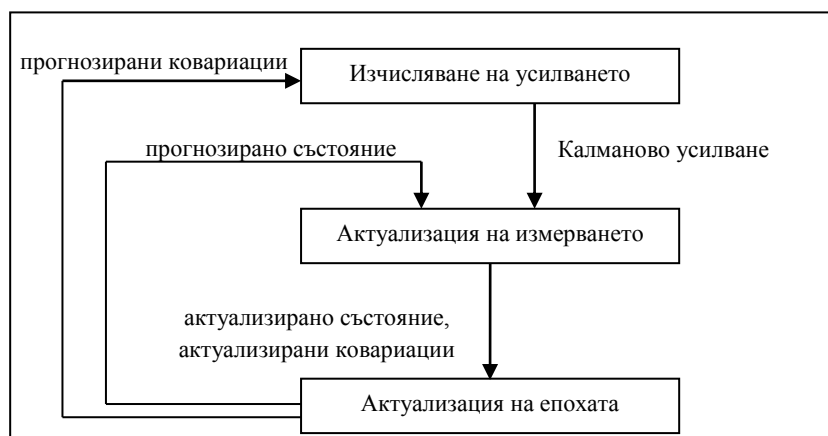
### 2.3.5. Оценка на параметри по резултати от ГНСС измервания

#### 2.3.5.1. Определяне на циклическите параметри - включва три основни стъпки:

- определяне на циклическите параметри като реални (плаващи) числа чрез параметрично изравнение по МНМК;
- генериране на област за търсене на потенциални цели числа на циклическите параметри;
- оценка на окончателните елементи на базисния вектор с използване на фиксираните към цяло число циклически параметри.

#### 2.3.5.2. Филтриране по Калман

В RTK методите, включително WARTK, е необходимо оценяваните величини да се актуализират в реално време. Ето защо в тези методи, за разлика от класическото оценяване на геодезически измервания по МНМК, се използват рекурсивни методи за оценяване на параметри, при които стойността на всяка оценявана величина от дадена епоха се използва като прогноза за стойността ѝ в следващата епоха. Сред най-прилаганите такива методи е филтрирането на Калман, при което оценяването на неизвестните величини се извършва в три рекурсивно повтарящи се стъпки (Фиг. 21):



Фиг. 21. Схема на обработка на данни с Калманов филтър

- a) Изчисляване на коефициентите на усилване на Калман
- b) Актуализация на измерването
- c) Актуализация на епохата

Когато актуализираните състояние и корелации достигнат зададени прагови стойности и критерии се приема, че оценяването е приключено успешно.

## 2.4. Класически ГНСС методи в сеизмопроучването

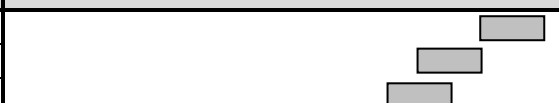
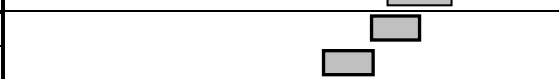
### 2.4.1. Въведение

В зависимост от различните качествени критерии, класификацията на съвременните ГНСС методи в общи линии има вида:

- кодови и фазови методи – в зависимост от използвания за позициониране елемент от демодулирания ГНСС сигнал;
- едночестотни, двучестотни и мултичестотни – в зависимост от броя на обработваните честоти от ГНСС сигналите;
- статични и кинематични методи – в зависимост от състоянието на движение/покой на ГНСС приемниците по време на измерване;
- единични, диференциални и относителни методи – в зависимост от начина на обработка на измерваните ГНСС величини: самостоятелно или съвместно с диференциални корекции или фазови данни от референтни станции. В зависимост от броя на референтните станции диференциалните и относителните методи могат да се осъществяват:

- с единична референтна станция;
  - чрез мрежи от референтни станции.
- в реално време или след последваща обработка – в зависимост от оперативността на получаваните резултати;
  - с пасивни, активни и мониторингови перманентни станции – в зависимост от типа на използваната мрежова инфраструктура;
  - с наземна или спътникова комуникация – в зависимост от начина на предаване на корекционните данни от референтните станции към потребителите.

Табл. 2. Видове ГНСС измервания и осигурявана точност

| Измервания                                                                                                                                                                                      |                   | Точност                                                                            |   |   |   |   |           |   |   |    |           |   |   |   |    |    |    |     |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|-----------|---|---|----|-----------|---|---|---|----|----|----|-----|--|
| Кодови                                                                                                                                                                                          | SPS+S/A           |  |   |   |   |   |           |   |   |    |           |   |   |   |    |    |    |     |  |
|                                                                                                                                                                                                 | SPS               |                                                                                    |   |   |   |   |           |   |   |    |           |   |   |   |    |    |    |     |  |
|                                                                                                                                                                                                 | PPS               |                                                                                    |   |   |   |   |           |   |   |    |           |   |   |   |    |    |    |     |  |
| Диференциални                                                                                                                                                                                   | Класически (DGPS) |  |   |   |   |   |           |   |   |    |           |   |   |   |    |    |    |     |  |
|                                                                                                                                                                                                 | Усъвършенствани   |                                                                                    |   |   |   |   |           |   |   |    |           |   |   |   |    |    |    |     |  |
| Фазови                                                                                                                                                                                          | Кинематични       |  |   |   |   |   |           |   |   |    |           |   |   |   |    |    |    |     |  |
|                                                                                                                                                                                                 | Статични          |                                                                                    |   |   |   |   |           |   |   |    |           |   |   |   |    |    |    |     |  |
| Видове измервания и резултати:                                                                                                                                                                  |                   | . . . . .                                                                          |   |   |   |   | . . . . . |   |   |    | . . . . . |   |   |   |    |    |    |     |  |
|   - кодови/фазови           |                   | 0                                                                                  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5         | 1 | 5 | 20 | 50        | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 |  |
|   - абсолютни/относителни |                   | mm                                                                                 |   |   |   |   | cm        |   |   |    | m         |   |   |   |    |    |    |     |  |

## 2.4.2. Методи с единична референтна станция

### 2.4.2.1. Статичен относителен метод

Извършва се чрез поне два ГНСС приемника, последващата съвместна обработката на измерванията от които позволява фиксиране на цикличните параметри и определяне на пространствения вектор между тях с висока точност. Необходимо условие за това е в двете точки да бъдат наблюдавани еднакви спътници в еднакви епохи от време. Продължителността на наблюденията зависи от разстоянието между референтната и определяемата точка, както и от вида на последната – част от изходна геодезическа основа, подробна точка и пр.

В сеизмичните проучвания статичният относителен метод с единична референтна станция се прилага основно на етапа на създаването на геодезическа основа. Приложението му се осъществява основно чрез фазови двучестотни измервания.

### 2.4.2.2. Кинематичен метод в реално време (RTK)

Кинематичните методи в реално време се базират на фазови измервания, извършвани едновременно от неподвижен приемник в референтна станция с известни координати, и от подвижни приемници - в определяемите точки. На базата на разликите между измерените и геометричните разстояния в референтната станция, за всяка двойка „станция-спътник“ се изчисляват т. нар. RTK корекции, които се излъчват в реално време чрез радио- или клетъчни телекомуникационни канали. Това позволява

коригиране с висока точност на измерванията от подвижния приемник псевдоразстояния, фиксиране на цикличните параметри в реално време, вследствие на което резултатите от измерванията са налични веднага.

В сеизмичните проучвания метода RTK с единична референтна станция се прилага основно на етапа на трасиране и измерване на точките от сеизмичните профили. Използват се основно двучестотни фазови измервания.

#### *2.4.2.3. Кинематичен метод с последваща обработка (PPK)*

Характерно за този метод е сравнително краткото времетраене на наблюденията в подвижните приемници – при последващата обработка на кинематично ГНСС измерване с продължителност от порядъка на десетина секунди се постига сантиметрова до милиметрова точност. По-особеното в случая е, че кинематичното измерване се предхожда от статично определяне на цикличните параметри, с необходимо първоначално време от порядъка на 6-10 min при видимост минимум 5 спътника. Веднъж инициализирани, ГНСС приемници могат да измерват подробни точки с производителност, близка до тази при RTK метода, но резултатите от измерванията са налични не в реално време, а само след съвместната им последваща обработка с наблюденията в референтната станция.

В сеизмичните проучвания методът PPK може да се използва само в случаите, когато подробните точки са предварително трасирани на терена по други методи (чрез стоманен кабел, оптични геодезически методи и др.).

#### *2.4.2.4. Диференциални методи*

Диференциалните методи (ДГНСС) с единична референтна станция, подобно на метода RTK, се базират на неподвижни ГНСС приемници, извършващи измервания в станции с известни координати, и подвижни приемници, извършващи кинематични измервания в определяемите точки. За разлика от метода RTK, при който се предават фазови измервания и корекции, в диференциалните методи измерванията на подвижните приемници се коригират с т. нар. диференциални корекции – поправки към псевдоразстоянията, данни за орбитите и грешки в скалите за време на спътниците, поправки за йоносферната рефракция и др.

#### *2.4.3. Мрежови методи*

Мрежовите методи се реализират чрез мрежова инфраструктура, състояща се от референтни станции, свързани по различни комуникационни канали - интернет, телефонни линии и др., - с контролен изчислителен център. За разлика от методите с единични станции, мрежовите методи осигуряват работа с висока точност на значително по-големи разстояния от референтните станции, както и по-точно определяне на параметрите, водещи до поява на грешки в измерванията – йоносферна и тропосферна рефракция, грешки в орбитите на спътниците и др. В зависимост от вида и

оперативността на данните, събирани в мрежовите инфраструктурни референтни станции, могат да бъдат разграничени няколко основни типа:

- пасивни перманентни станции;
- активни перманентни;
- перманентни станции за мониторинг.

В зависимост от метода на ГНСС позициониране, който се осигурява с данните от мрежовите станции, основните мрежови методи могат да се разделят на:

- Мрежови относителни методи – реализират се в два режима:
  - в реално време (RTK);
  - с последваща обработка (статични).
- Мрежови диференциални методи

#### *2.4.3.1. Мрежови методи с пасивни перманентни станции*

Пасивните перманентни станции са част от различни по площ на покритие и предназначение инфраструктурни мрежи, които основно се делят на:

- глобални (IGS);
- континентални - EUREF (Европа) и др.;
- регионални - AUSPOS (Австралия и Азия) и др.

Мрежовият относителен метод с данни от пасивни перманентни станции се прилага на етапа на създаване на геодезическа основа за сеизмични проучвания, намиращи се в отдалечени и труднодостъпни области, където липсват съществуващи опорни геодезически мрежи.

#### *2.4.3.2. Мрежови методи с активни перманентни станции*

##### *2.4.3.2.1. Диференциални методи*

При тези методи мрежовите диференциални корекции се предават в реално време към подвижните приемници посредством радио- или клетъчна комуникация. В общия случай корекциите представляват усреднени поправки към псевдоразстоянията, измервани в референтните станции. Постижимата точност е до половин метър.

##### *2.4.3.2.2. Относителни методи*

Мрежовите относителни методи осигуряват фазови измервания или корекции към тях, в реално време (RTK) или за последваща обработка, оптимизирани чрез моделиране на физическите източници на грешки в обхвата на нейното покритие. Корекциите за работа в реално време се предават посредством радио- или клетъчни

комуникации, а суровите измервания за последваща обработка - чрез поръчка и изтегляне от интернет. Основните видове мрежови относителни подходи са следните:

- Виртуална референтна станция (VRS)

Основната концепция, заложена при метода VRS, е преобразуване на реални ГНСС измервания от физически референтни станции в изкуствени ГНСС измервания, отнесени към местоположението на несъществуващи, т. нар. виртуални референтни станции. Това се постига чрез двупосочна комуникационна връзка, което позволява разполагането им на незначително разстояние от истинското местоположение на подвижните приемници.

- Метод на площните поправки (FKP)

Те се генерират за една избрана референтна станция (обикновено най-близката до подвижния приемник) от наблюденията в цялата мрежа и представляват линейни корекционни параметри, описващи поведението на всички компоненти на грешките в ГНСС измерванията в рамките на обхват на мрежата [21, 23].

- MAX корекции

Създаването на тези корекции се базира на организиране на станциите от дадена инфраструктурна мрежа в отделни групи и клетки. Корекциите за всички станции от групата се предават към подвижния приемник, който на място решава кои са най-удачни за конкретното му местоположение и извършва интерполация към избраната главна станция (която не е задължително да бъде главната).

От гледна точка на геодезическите работи в сеизмичните проучвания приложението на мрежовите относителни методи е удобно и удачно, тъй като се избягва необходимостта от разполагане на собствени референтни станции. Проблеми в прилагането на тези методи произтичат от необходимостта от изградена мрежова ГНСС инфраструктура, както и от двупосочна връзка с мрежовите сървъри чрез мобилни интернет комуникации.

#### *2.4.3.3. Мрежови методи чрез станции за мониторинг и геостационарни спътници*

Тези методи се базират на мрежи от перманентни мониторингови станции, на базата на измерванията от които се генерират диференциални корекции, които се предават към потребителите посредством геостационарни спътници. OmniSTAR е основната и най-използвана към момента глобална мрежова ДГНСС с широк обхват. Осигурява корекции за работа в реално време с три нива на точност:

- виртуална референтна станция (VBS) – точност до метър;
- разширена услуга (XP) – точност под 20 cm;
- високоточна услуга (HP) – точност под 10 cm.

Системата OmniSTAR се използва успешно в сеизмичните проучвания, особено в отдалечени и труднодостъпни области – Северна Африка, Югоизточна Азия и другаде. Съществено неудобство обаче представлява необходимостта от продължителна инициализация.

EGNOS е регионална SBAS система, осигуряваща корекции за работа в реално време на територията на Европа и част от Северна Африка. Състои се от 34 перманентни станции за мониторинг, 4 контролни станции и 3 геостационарни спътника. Тя не намира самостоятелно приложение в 2D и 3D сеизмични изследвания за търсене на нефт и газ, а се използва като помощна инфраструктура от основния метод, разгледан в дисертацията – метода WARTK.

#### 2.4.4. Формати за обмен на данни

Най-популярните формати за обмен на данни при съвременните единични и мрежови ГНСС измервания са следните:

2.4.4.1. *RINEX* - служи за обмен и съвместна обработка на ГНСС данни, извършвани с различни търговски марки приемници.

2.4.4.2. *RTCM* - служи за предаване на корекции между базов и подвижен ГНСС приемник.

2.4.4.3. *NTRIP* - протокол, регламентиращ предаването на RTCM съобщения по интернет.

2.4.4.4. *NMEA-0183* - служи за обмен на данни между различни видове електронни устройства, включително ГНСС приемници.

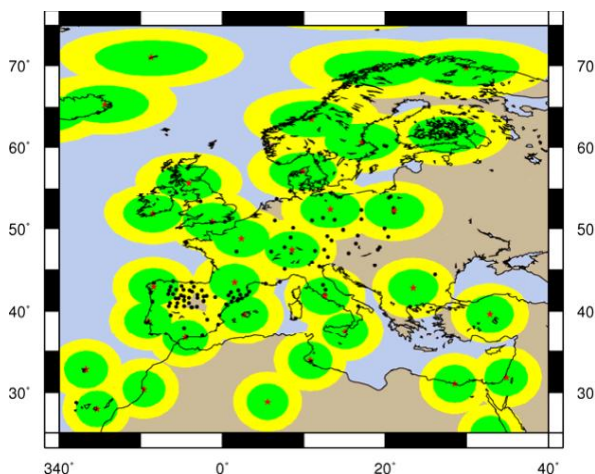
#### 2.4.5. Обобщение

Един от най-съществените недостатъци на класическите RTK методи е ограничеността на приложението им на разстояния до 10 km от референтните ГНСС станции. По-съвременна алтернатива на класическия RTK метод с единична станция са мрежовите RTK методи – VRS, FKP, MAX, осигуряващи възможност за работа с фиксирани циклични параметри на разстояния до 30-35 km от референтните станции на инфраструктурните мрежи. Недостатъкът на мрежовите RTK методи е необходимостта от изградена инфраструктура от активни ГНСС станции, каквато често не е налице в интересните за сеизмични проучвания райони. Друга алтернатива е прилагането на диференциални корекции от системата OmniSTAR, чиято услуга XP осигурява прецизни данни за спътниковите орбити и грешки в скалите за време, предавани в реално време към подвижните приемници от геостационарни спътници. Недостатъкът на този подход се състои в продължителното начално време - над 15 минути, необходимо за инициализация до изискваната в сеизмичните проучвания 20 cm точност.

## 2.5. WARTK – съвременен мрежов диференциален метод за определяне на местоположение

### 2.5.1. Въведение

Методът WARTK (Wide Area Real Time Kinematic) е разработен в края на 90-те години от научно-изследователската група по астрономия и геоматика gAGE към Каталунския политехнически университет (UPC) в Барселона. Според вида на корекциите, които осигурява – поправки към йоносферното влияние, и начинът за тяхното създаване – чрез мрежа от референтни станции, отдалечени до 1000 km една от друга, WARTK спада към диференциалните ГНСС методи с широк обхват. Методът дава възможност за фиксиране на циклични параметри в реално време от подвижни приемници на разстояния над 400 km от тези станции. Съгласно договореност с ESA, WARTK използва наземната и спътниковата инфраструктура на системата EGNOS [2,3,4], (Фиг. 30).



Фиг. 30. Разположение на RIMS станциите на системата EGNOS в Европа и Северна Африка

### 2.5.2. Същност на влиянието на йоносферата и начини за неговото определяне

Йоносферата представлява пласт от йонизирани от слънчевата радиация свободни електрони, разположен между 50 и 1000 km от земната повърхност. Свободните електрони в йоносферата не са равномерно разпределени, а образуват променливи и бързо изменящи се нееднородни слоеве и облаци, които оказват съществено влияние върху преминаващите през тях ГНСС сигнали. Йоносферното влияние  $I$  е с противоположен ефект – модулиращите кодовете закъсняват, а носещите фази избързват. Стойността на тези изменения може да бъде изразена чрез величината  $TEC$ , отразяваща общото количество свободни електрони  $N_e$ , интегрирано по линия на разпространение на сигнала между спътник  $s$  и приемник  $A$ :

$$I = \alpha_i \int_A^s N_e ds_0,; \quad (2.49)$$

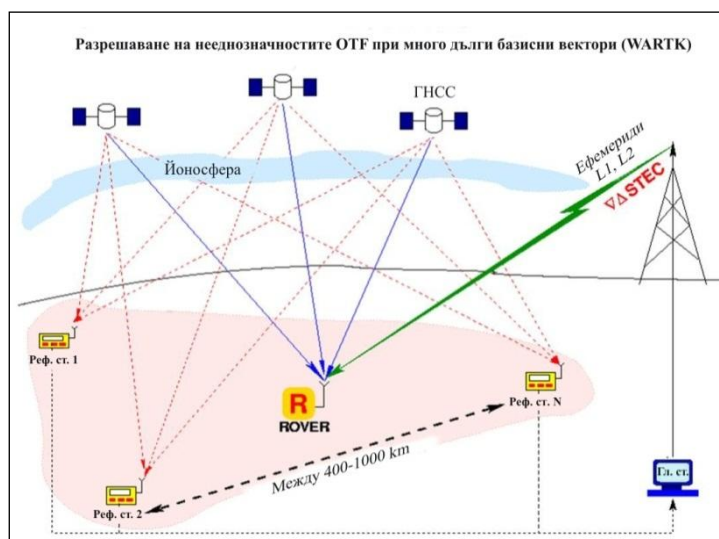
където  $\alpha_i = \frac{40.3}{f_i^2}$ ,  $\int_A^S N_e ds_0 = TEC$  (Total Electron Content) - общо съдържание на електрони по лъча на разпространение на сигнала между спътника и приемника,  $s_0$  - геометрично разстояние по тази линия. Величината за измерване на TEC се нарича TECU:  $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ Ne/m}^2$ . В линейна мярка йоносферното влияние се изразява чрез величините VTEC (Vertical TEC) и STEC (Slant TEC), интегриращи стойността на TEC по съотв. зенитното и истинското (насочено) направление на лъча между спътника и приемника.

Същността на метода WARTK се основава на използването на прецизен йоносферен модел, създаден на базата на йоносферна томография чрез наблюдения в перманентни референтни станции. На базата този модел, в комбинация с паралелно моделиране на тропосферата и поведението на цикличните параметри от същите тези наблюдения, се генерират диференциални йоносферни STEC поправки, предавани към потребителите по радио или клетъчни канали, или от геостационарни спътници (Фиг. 31). Те позволяват бързо фиксиране на цикличните параметри в кинематичен режим, с постигане на дециметрова точност на разстояния над 400 km от мрежовите референтни станции [2].

### 2.5.3. Създаване на диференциални STEC корекции

Създаване на диференциални STEC корекции чрез наблюдения в мрежа от референтни станции се извършва в няколко стъпки:

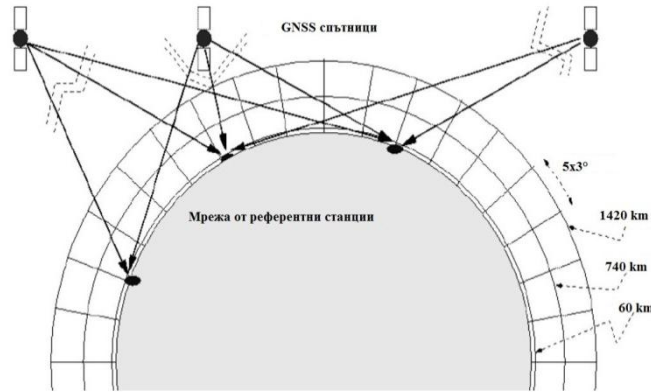
- Определяне в реално време на йоносферен модел;
- Оценка в реално време на тропосферната рефракция и плаващите стойности на тяснолентовите цикличните параметри;
- Фиксиране на циклични параметри;
- Определяне на диференциални STEC корекции за референтните станции;



Фиг. 31. Същност на метода WARTK

### 2.5.3.1. Създаване на йоносферен модел

Йоносферният модел е дефиниран от два слоя пространствени триизмерни клетки, ориентиран в геоцентрична инерциална координатна система (Фиг. 32).



Фиг. 32. Меридианен разрез на двуслоен йоносферен модел за определяне на STEC

Броят на свободните електрони в двуслойния модел може да се определи чрез величината STEC със зависимостта:

$$STEC = \alpha_i \int_A^s N_e ds_0 \approx \sum_m \sum_l \sum_n (N_e)_{m,l,n} \Delta S_{m,l,n} \quad (2.50)$$

където  $m$ ,  $l$  и  $n$  - индекси на отделните клетки от модела ( $m$  - местно време,  $l$  - географска ширина,  $n$  - височина над повърхността),  $(N_e)_{m,l,n}$  - количество свободни електрони във вокселите,  $\Delta S_{m,l,n}$  - сумарната геометричната дължина на сигнала, преминаващ през клетките  $m$ ,  $l$ ,  $n$ ; Стойностите за STEC се оценяват в реално време чрез Калманов филтър.

### 2.5.3.2. Моделиране на тропосферната рефракция и йоносферно независимите циклични параметри

Освен за създаване на йоносферен модел, ГНСС измерванията в референтните станции се използват и за паралелно оценяване, също в реално време, на остатъчната тропосферна рефракция  $T$  (след прилагане на стандартен атмосферен модел) и тяснолентовия цикличен параметър  $B_C$ . За целта се прилага научноизследователски софтуер от типа на Bernese или GIPSY-OASIS и прецизни ефемериди. Използват се двойните разлики по йоносферно независимата комбинация  $L_C$  (2.18). Получената от софтуера оценка за тропосферната рефракция се използва при фиксирането на цикличните параметри по широколентовата комбинация. Плаващата оценка за  $B_C$  служи като корекция при окончателното фиксиране на цикличните параметри по йоносферно независимата комбинация.

### 2.5.3.3. Фиксиране на циклични параметри по широколентовата комбинация

Определените в предишните стъпки оценки за тропосферната рефракция  $T$ , йоносферно независимите циклични параметри  $B_C$  и йоносферната рефракция  $I$  от топографския модел, дават възможност за коригиране на геометричните разстояния между референтните станции и спътниците и фиксиране на цикличните параметри. За целта се използват двойни разлики по широколентовата комбинация (2.14):

#### 2.5.3.4. *Фиксиране на тяснолентови циклични параметри по йоносферно независимата комбинация*

След фиксиране на цикличните параметри по широколентовата комбинация следва окончателно фиксиране на цикличните параметри по йоносферно независимата, с използването на определения с достатъчна точност от научноизследователския софтуер тяснолентов цикличен параметър  $B_C$ . След неговото фиксиране се определят и окончателните фиксирани стойности за  $N_{1AB}^{sk}$  и  $N_{2AB}^{sk}$ :

#### 2.5.3.5. *Определяне на диференциални йоносферни STEC корекции по геометрично независимата комбинация*

От получените стойности за  $N_{1AB}^{sk}$  и  $N_{2AB}^{sk}$  се определят двойни разлики за йоносферните корекции STEC за референтните станции, с използването на геометрично независимата комбинация:

$$\alpha_I STEC_{AB}^{sk} = L_{IAB}^{sk} - (\lambda_1 B_{1AB}^{sk} - \lambda_2 N_{2AB}^{sk}); \quad (2.57)$$

Стойностите на STEC се изчисляват за всяка двойка спътник-референтна станция. Всички стойности се проверяват чрез оценка с Калманов филтър, като се приемат само тези, определени с грешка  $< \lambda_I/2 = 2.7$  cm. Тестовите показват, че получаването на тези стойности в достатъчен процент от случаите става при височина на наблюдаваните спътници над  $20^\circ$ . Получените за референтните станции от мрежата йоносферни корекции се предават към потребителите посредством радио- или клетъчни канали, или от геостационарни спътници.

#### 2.5.4. Прилагане на диференциалните STEC корекции в подвижните приемници

Фиксирането на цикличните параметри в подвижните приемници се извършва в няколко стъпки:

- Интерполация на получените STEC корекции;
- Оценка на йоносферно независими циклични параметри в реално време;
- Фиксиране по широколентовата комбинация;
- Фиксиране по геометрично независимата комбинация;
- Фиксиране на тяснолентовия цикличен параметър по йоносферно независимата комбинация;
- Изчисляване на координати в реално време.

#### 2.5.4.1. Интерполация

Получените от референтните станции йоносферни корекции се интерполират спрямо точното местоположение на подвижните приемници. Използва се линейно интерполиране по разстоянието между приемниците и станциите.

#### 2.5.4.2. Оценка на тяснолентовия цикличен параметър по йоносферно независимата комбинация

Подвижният приемник извършва в реално време кодови и фазови измервания и съставяне на двойни разлики от йоносферно независими комбинации са всяка двойка приемник-спътник. Определянето на неизвестните параметри в тези комбинации (2.18) – координати на точката, циклични параметри  $B_C$ , орбити на спътници и тропосферна рефракция - се извършва чрез Калманов филтър. При започване на измерването първоначалните оценки, получени от филтъра за цикличните параметри са плаващи числа., които се използват като корекция към широколентовата комбинация.

#### 2.5.4.3. Фиксиране на цикличните параметри по широколентовата комбинация

Фиксирането на цикличните параметри се извършва първо по широколентовата комбинация. За целта, комбинацията се коригира с интерполираните йоносферни STEC корекции, йоносферно независима комбинация  $L_C$  и плаващата оценка на  $B_C$ . Тази процедура се извършва за всяка двойка спътник-подвижен приемник, за която има надеждно определени йоносферни корекции (грешка < 2.7 cm). Фиксираните стойности се определят чрез закръгляне към най-близкото цяло число

#### 2.5.4.4. Фиксиране на цикличните параметри по геометрично независимата комбинация

След фиксиране на двойните разлики на цикличните параметри по широколентовата комбинация, се пристъпва към тяхното фиксиране по  $L_1$  и  $L_2$ , чрез съставяне на геометрично освободени комбинации  $L_I$  и коригирането им с йоносферните корекции STEC и фиксираните широколентови циклични параметри  $N_W$ .

След определяне на цикличните параметри  $N_1$  и  $N_2$  може да се изчисли фиксираната стойност на тяснолентовия цикличен параметър  $B_C$ , чрез:

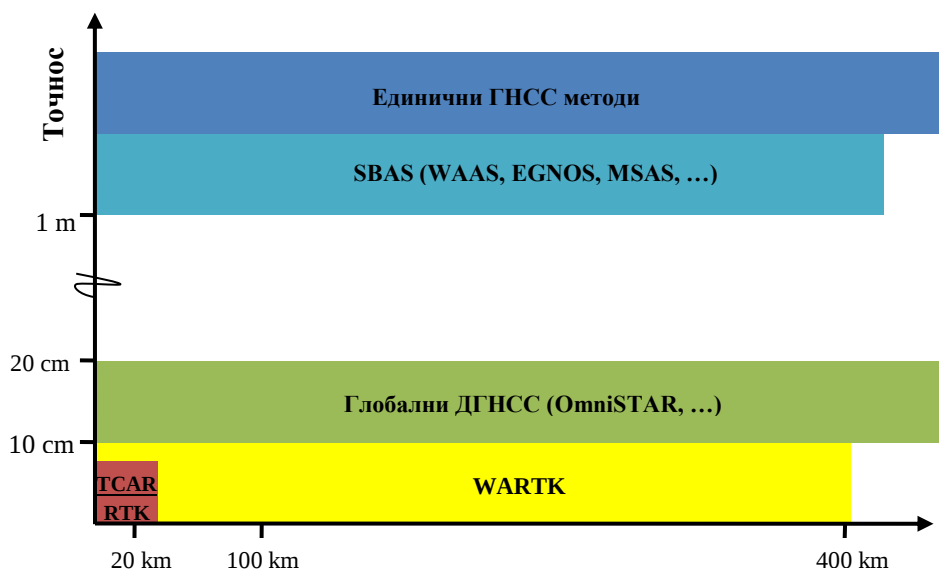
$$B_{C_{AB}}^{sk} = \lambda_W \left( \frac{N_{1_{AB}}^{sk}}{\lambda_1} - \frac{N_{2_{AB}}^{sk}}{\lambda_2} \right). \quad (2.61)$$

Всяка фиксирана стойност за  $B_C$  се въвежда като допълнително псевдонаблюдение в Калмановия филтър на потребителския софтуер. Експериментално е установено [10], че с период на актуализиране на филтъра от 2 min и без прилагане на техники с области за търсене, стойностите на грешката на  $B_C$  достигат под критичната стойност от 21.5 cm след три актуализации на филтъра, т.е. за инициализация са нужни 6 min. С прилагане на методи за генериране на област за търсене на циклични

параметри и мултичестотни измервания инициализацията отнема от 10-50 s при 400 km-ви базисни вектори до моментално при 100 km-ви вектори [45].

### 2.5.3. Експериментални резултати

В тази точка са представени някои по-важни резултати от различни експерименти, проведени от учените в gAGE/UPC, съвместно с ESA и други научно-изследователски организации и агенции. На Фиг. 34 е илюстрирана точността и времето за инициализация на WARTK 3.2 спрямо класическите ГНСС методи.



Фиг. 34. Графика на постиганите при различните ГНСС методи точности в зависимост от отдалечеността на референтната станция

#### 2.5.3.1. Проект FES-WARTK

В рамките на този проект са изследвани точността, интегритета и времената за инициализация по метода WARTK. Интегритета е представен чрез показателите за хоризонтално и вертикално ниво на защита (HPL и VPL).

Табл. 4. Резултати от проекта FES-WARTK

|                                       | Време за инициализация | Хор. точност | Верт. точност | Хор. ниво на защита (HPL) | Верт. ниво на защита (VPL) |
|---------------------------------------|------------------------|--------------|---------------|---------------------------|----------------------------|
| GPS (базисен вектор ~ 250 km)         | < 10 min               | < 5 cm       | < 10 cm       | ~ 20 cm                   | ~ 40 cm                    |
| GPS+Galileo (базисен вектор ~ 250 km) | < 30 sec               | < 5cm        | < 10 cm       | ~ 20 cm                   | ~ 40 cm                    |
| GPS (базисен вектор ~ 410 km)         | < 10 min               | 10 cm        | 15 cm         | ~ 40 cm                   | ~ 60 cm                    |
| GPS+Galileo (базисен вектор ~ 410 km) | < 30 sec               | 10 cm        | 15 cm         | ~ 40 cm                   | ~ 60 cm                    |

#### 2.5.3.2. Съвместимост между WARTK и EGNOS

В тази точка са показани резултати, получени в рамките на експеримент на gAGE-UPC [48]. Целта му е установяване на поведението на системата EGNOS чрез позициониране с WARTK корекции, генерирани с използване на нейната мрежова инфраструктура. Този експеримент доказва успешната взаимна съвместимост между WARTK и различните сегменти на системата на EGNOS (станции и спътници).

#### 2.5.4. Обобщение

Методът WARTK представлява иновационен, модерен и удобен начин за създаване и разпространяване на диференциални корекции за геодезически приложения с дециметрова точност. Методът е изключително подходящ за приложение в изолирани места, отдалечени на стотици километри от изходни референтни станции и опорни геодезически мрежи. Намира се все още в експериментална фаза, като функционалността му се изследва и подобрява по най-съвременни методи, включително чрез симулатори на Galileo и EGNOS сигнали в лабораторни условия. Резултатите от проведените през годините множество изследователски проекти показват успешната приложимост на WARTK и големия потенциал за неговото използване в най-различни сфери от геодезията, включително за сеизмични проучвания за търсене на нефт и газ.

### 2.6. Заключение

В съвременните 2D и 3D сеизмични изследвания за търсене на нефт и газ, намират приложение широк диапазон геодезически ГНСС методи – диференциални и относителни, статични и кинематични, мрежови и единични. RTK методите осигуряват достатъчна за сеизмичните проучвания точност от 20 cm в реално време на разстояния до 10 km от единични референтни станции, и до 35 km чрез RTK корекции от активни мрежови перманентни станции. Диференциалните корекции на системата OmniSTAR позволяват работа на значително по-големи разстояния от своите перманентни мониторингови станции, с достатъчна точност, която обаче изисква продължителни периоди за инициализация на приемниците. За разлика от тези методи, WARTK осигурява моментална инициализация и работа с фиксирани циклични параметри на разстояния над 400 km от мрежови референтни станции. Същността на този метод се състои в прецизно моделиране на йоносферата в реално време и предаване на йоносферни STEC корекции към потребителите. Основното направление на развитие на метода WARTK е с използване на перманентните станции за мониторинг на системата EGNOS, което осигурява площ на покритие на метода в Европа и значителна част от Северна Африка. Резултатите от проведените експериментални проекти показват, че WARTK може да замени успешно класическите и мрежови диференциални и RTK методи, корекциите от системата OmniSTAR и изобщо всички методи, използвани към момента за трасиране и измерване на точки в сеизмични проучвания за търсене на нефт и газ.

## **ГЛАВА 3 - Изследване на възможностите за приложение на метода WARTK в Северна Африка**

### **3.1. Въведение**

В трета глава от дисертацията е направен анализ на възможностите за приложение на метода WARTK за геодезическо осигуряване на 2D и 3D сеизмични проучвания в района на Северна Африка. Основната цел на анализа е доказване на предимствата на този нов метод пред класическите ГНСС методи, използвани в момента. Включени са следните три задачи:

- Изследване на приложението на класически ГНСС методи в 2D и 3D сеизмични проучвания за търсене на нефт и газ;
- Определяне на местоположение чрез метода WARTK - верификационен експеримент с използване на диференциални йоносферни корекции;
- Съпоставка на класическите ГНСС методи с WARTK.

### **3.2. Изследване на приложението на класически ГНСС методи в 2D и 3D сеизмични проучвания за търсене на нефт и газ**

#### **3.2.1. Въведение**

Изследването има за цел извеждане на основните недостатъци, характерни за приложението на класически ГНСС методи в сеизмичните проучвания за търсене на нефт и газ. Изследването е извършено на базата на критериите за *независимост*, *оперативност* и *точност*, постигнати по класическите методи.

#### **3.2.2. Метод за провеждане**

Методът на изследването представлява анализ на геодезическите дейности в четири сеизмични проучвания:

- 2D проучване в концесия „Враца – Запад“, гр. Монтана, 2005 г.
- 3D проучване в концесия „Бутан“, с. Бутан, 2006 г.
- 3D проучване в концесия „BagueI“, Тунис, 2008 г.
- 3D проучване в концесия „Блок 12“, Камбоджа, 2008 г.

Методите са подредени съгласно реда на тяхното теоретично представяне в Глава 2: първо са тези с използване на единична референтна станция, следвани от мрежовите ГНСС методи.

##### **3.2.2.1. С единична референтна станция**

###### **3.2.2.1.1. Статичен относителен метод за създаване на геодезическа основа**

###### **а) Изходна постановка**

Анализирана е технологията на геодезическото производство в извършеното през 2005 г. 2-D сеизмично проучване в района на гр. Монтана, Северна България. Проучването има за цел изясняване на регионалната геология в района на контакта между Мизийската платформа и Предбалканската зона.

#### b) Технология на геодезическите работи

За трасиране и измерване на точките от двата сеизмични профила е използван RTK метод от единични референтни станции. Същите са част от новоизградена геодезическа основа (ГО). За нейното създаване и привързване е избран статичния относителен метод, поради наличието на качествена и удобна за района на работа опорна геодезическа мрежа – държавната GPS мрежа на България (в състоянието ѝ към края на 2005 г.).

#### c) Анализ на приложението

Анализът на работата в конкретното сеизмично проучване показва следните основни недостатъци:

- провеждане на твърде обстойна полева рекогносцировка за установяване на удобни опорни геодезически точки и планиране на подходящи местоположения на станциите от ГО, поради ограничените изисквания за дължина на базисните вектори при статичните измервания.
- в процеса на работа се установи, че много от точките от Държавната GPS мрежа, предоставени от АГКК, липсват;
- извършване на продължителни сесии от статични ГНСС измервания за определяне на точките от ГО;
- необходимост от поне два ГНСС приемника за извършване на относителните измервания;
- усложнена организация на работата - транспорт и логистика, свързани с ежедневното обхождане на точките за разполагане на оборудването, както и необходимост от допълнителен персонал за охрана на референтните ГНСС устройства;
- отделяне на ресурс – време, софтуер и хардуер, за последваща обработка на резултатите;

#### d) Изводи

На избраните за анализ критерии за независимост, оперативност и точност, статичният относителен метод с единична референтна станция отговаря по следния начин:

- *независимост*: методът е твърде зависим от наличието и качеството на съществуващи опорни геодезически мрежи;

- *оперативност*: методът се характеризира с твърде голяма продължителност на ГНСС наблюденията; методът не осигурява работа в реално време – следователно невъзможност за трасиране на точките по ГНСС способ;
- *точност*: при правилно прилагане и подходящо оборудване методът осигурява достатъчно висока точност.

#### 3.2.2.1.2. Кинематичен метод в реално време (RTK)

##### а) Изходна постановка

Класическият RTK метод с единична референтна станция е основно използваният в геодезическото осигуряване на сеизмични проучвания метод за трасиране и измерване на профили. Тук е изследвана технологията на работа по този метод в три отделни сеизмични проекта, различаващи се по своите мащаби на проучване и избраната схема на наблюдение: 2D сеизмично проучване „Враца-Запад“, 3D сеизмично проучване „Бутан“ и 3D сеизмично проучване „Baguel

##### б) Технология на геодезическите работи

По отношение на основните параметри и ред на работа няма съществена разлика между използваните в 2-D и 3-D проучвания RTK методи с единична референтна станция.

- в двата типа проучвания се използват собствени референтни ГНСС станции в точки от предварително създадена ГО;
- изискванията към точността на измерените сеизмични точки е еднаква – 20 cm;
- трасировъчно-измервателните работи се извършват чрез двучестотни подвижни ГНСС приемници, с използване на RTK корекции, предавани чрез радиомодеми от референтните станции.

По-съществена разлика в организацията и провеждането на геодезическото производство в 2-D и 3-D проучванията произтича от обема на необходимата за извършване геодезическа работа.

##### с) Анализ на приложението

Анализът на проведените геодезически работи в трите проучвания позволява да се изведат следните основни недостатъци на RTK метода:

- ограничение в отдалечеността на подвижните приемници до 10 km от референтните станции на ГО. Над тази граница точността бързо деградира и излиза извън зададените в техническите задания стойности;
- предаването на RTK корекции, извършвано от радиомодемите в референтните станции по ултракъси вълни, е твърде чувствително към промени в топографията. При поява на дори незначителни препятствия по линията на разпространение на корекционния поток – дюни, хълмове, сгради, гори и пр., приемането им в подвижните

приемници се затруднява, което налага разполагане на допълнително оборудване – ретранслатори, или преместване на референтния ГНСС приемник в нова станция;

- необходимост от поне два ГНСС приемника за осигуряване на относителните измервания в собствената референтна станция;

- затруднена организация на работата - транспорт и логистика, свързана с ежедневното посещение и разполагане на референтната ГНСС апаратура и необходимостта от охраняването ѝ.

#### d) Изводи

На избраните за анализ критерии за независимост, оперативност и точност, методът РТК с единична референтна станция отговаря по следния начин:

- *независимост*: приложението на метода е ограничено на разстояния до 10 km от референтните станции на ГО;

- *оперативност*: методът осигурява успешно изискването за работа в реално време, необходима за трасиране на точките от сеизмичните профили;

- *точност*: на разстояние до 10 km от референтните станции методът осигурява достатъчна точност.

#### 3.2.2.1.3. Кинематичен метод с последваща обработка (РРК)

##### a) Изходна постановка

В определени условия в сеизмичните изследвания се прилага и кинематичния метод с последваща обработка (РРК). В този раздел е описано приложението на РРК в част от 3-D сеизмично проучване “Бутан”.

##### b) Технология на геодезическите работи

Работата по метода протича в следния ред:

- инсталиране на референтна ГНСС станция и настройване за работа в режим РРК;
- инициализация на приемника – фиксирането на цикличните параметри изисква първоначален период от 8-минутни наблюдения към поне 6 видими спътника (според фабричните настройки на използваното оборудване);
- трасиране на проектното положение на точките чрез стоманен кабел, при допустимо отклонение 50 cm;
- ГНСС измервания в режим “Торо point”- в три епохи от по пет секунди на всяка от точките;
- последваща обработка на резултатите.

##### c) Анализ на приложението

По точността на резултатите и производителността на работа, които осигурява, методът РРК се доближава до RTK измерванията. Сравнен с него, методът РРК има следните основни недостатъци:

- необходимост от продължително време (6-8 минути) за първоначална статична инициализация;
- лесна загуба на инициализация при преминаване покрай дори незначителни препятствия и необходимост от повторна такава;
- необходимост от последваща обработка на измерванията;
- невъзможност за точно трасиране на проектното положение на точките (допустимо отклонение до 50 cm), поради използваният за целта автономен ГНСС режим, осигуряващ метрова точност. На места се наложи трасиране с калибриран стоманен кабел.

#### d) Изводи

На избраните за анализ критерии за независимост, оперативност и точност, методът РРК с единична референтна станция отговаря по следния начин:

- *независимост*: методът изисква наличие на референтна ГНСС станция, работеща в статичен режим; фиксиране на цикличните параметри е възможно на разстояние до 10 km от тези станции;
- *оперативност*: методът не осигурява работа в реално време, следователно невъзможност за трасиране по ГНСС способ;
- *точност*: на разстояние до 10 km от референтните станции методът осигурява достатъчна точност.

В сравнение с RTK, този метод осигурява значително по-ниска дневна производителност. Въпреки достатъчната точност, която осигурява, приложението му за геодезически работи в сеизмичните проучвания е препоръчително само при липса на алтернативни методи.

#### 3.2.2.2. Методи с използване на мрежова инфраструктура

##### 3.2.2.2.1. Статичен относителен метод с данни от пасивни перманентни станции

#### a) Изходна постановка

През 2008 г. в района на Централен Тунис, в концесионен блок „Baguel“, е извършено 3-D сеизмично проучване с възложител – нефтената компания „Perenco Tunisia“ и подизпълнител – геофизичната компания „PGS Onshore“ Ltd. Поради липсата на съществуващи опорни геодезически мрежи в района на работа, изходната геодезическа основа е привързана към пасивните перманентни станции от мрежите на IGS и EUREF, разположени в съседство на проучвания район.

## б) Технология на геодезическите работи

Методът беше приложен при спазване на следния приблизителен ред на работа:

- планиране на ГО с достатъчна гъстота, необходима за геодезическо осигуряване на проучваната площ;
- извършване на денонощни ГНСС наблюдения в две точки от планираната ГО, избрани за изходни;
- изпращане на данните в RINEX формат до службите AUSPOS и SOPAC, предлагащи безплатна автоматизирана онлайн обработка на ГНСС наблюдения, които обработват съвместно с предварителни ефемериди от глобалните и регионални мрежи от пасивни перманентни станции. За конкретната обработка бяха използвани станциите от мрежите IGS и EUREF, разположени на разстояния от съотв. 650 km (CAGZ, о-в Сицилия) и 400 km (LAMP, о-в Лампедуза).
- използване на получените изходни точки за разширяване и привързване на цялата ГО;

## с) Анализ на приложението

Анализът на проведените геодезически работи в това проучване позволява да се изведат следните основни недостатъци на метода:

- необходимост от обработка на базисни вектори с дължина от порядъка на няколкостотин километра, възможно единствено с използването на прецизни данни за орбитите и часовниците на спътниците и употреба на научноизследователски софтуер;
- забавяне в създаването на ГО поради технологичното време, необходимо за изчисляване на прецизни орбитни данни от мрежовите сървъри;
- при автоматизираната компютърна обработка на статичните измервания, извършвана от службите AUSPOS и SOPAC, съществува риск от неправилно прилагане на йоносферни и тропосферни модели за райони на работа, подложени на повишена слънчева активност (напр. пустинните части на Северна Африка); в конкретното проучване проблем от такова естество се появи в данните, обработени от AUSPOS, което наложи допълнително изпращане на RINEX файлове и обработка до получаване на задоволителна точност на базисните вектори (Приложение 3).
- необходимост от достъп до интернет за изтегляне на прецизни ефемериди или изпращането на файловете с измервания до съответните служби за онлайн обработка.

## д) Изводи

На избраните за анализ критерии за независимост, оперативност и точност, мрежовият метод с използване на прецизни ефемериди от пасивни перманентни станции отговаря по следния начин:

- *независимост*: методът е независим от наличието на съществуващи опорни геодезически мрежи в района на работа; методът е твърде зависим от качеството на автоматизираната обработка на ГНСС измерванията, извършвана от предлагащите

подобни услуги служби; изпълнението на този метод е зависимо и от наличието на комуникационна инфраструктура в района на проучването, поради необходимостта от обмен на данни по интернет със сървърите на тези служби;

- *оперативност*: методът не осигурява работа в реално време;
- *точност*: при правилно прилагане и обработка на измерванията методът осигурява достатъчна точност за създаване на точки от ГО;

Съгласно посочените резултати може да се направи извода, че освен като възможност за допълване на метода на статичните относителни ГНСС измервания в условия на съществуваща опорна геодезическа мрежа, методът на статичните относителни ГНСС измервания с използване на данни от перманентни станции е успешно приложим за изграждане на ГО и при липса на такава. Възможностите и високата точност, които осигурява използването на прецизни данни за спътниковите орбити и часовници, както и независимостта на ГНСС измерванията от наличието на съществуваща опорна мрежа обуславят оптималното приложение на този метод за създаване на ГО в слаборазвити и труднодостъпни пустинни райони.

#### 3.2.2.2.2. *RTK с активни перманентни станции (VRS)*

##### а) Изходна постановка

Описаните в предишните раздели трасировъчно-снимачни геодезически работи се извършват основно по RTK методи с използване на специално създадени за целта единични станции. Организацията на измерванията никак не е проста и се налага координираното действие на един или повече екипа от специалисти, използването на допълнителен помощен персонал за транспортиране, следене на работата и охрана на референтната станция. Посочените затруднения може да се преодолеят в значителна степен ако се използват ГНСС инфраструктурни мрежи.

##### б) Технология на геодезическите работи

За осъществяване на експеримента е избрана площадка, намираща се в най-горната част на района “Слатински редут” в София. На различни места в рамките на площадката са избрани и означени с геодезически пирони 7 точки. За осъществяване на експеримента са приложени кинематични методи за определяне на точки в реално време (RTK) в две разновидности – с единични и мрежа от активни референтни станции. Използвани са две подвижни ГНСС конфигурации:

- приемник Trimble R8 GNSS;
- приемник Topcon Hiper;

Измерванията с подвижния приемник Trimble R8 GNSS са извършени само с референтни данни, предоставени от “NAVITEQ”, по три начина с различна продължителност. Измерванията с подвижния приемник Topcon Hiper са извършени както с потребителски, така и с инфраструктурни референтни данни.

### с) Анализ на резултатите

Анализът на резултатите е насочен към намирането на отговори на следните въпроси:

- в каква степен продължителността на измерванията влияе върху резултатите, получени с помощта на ГНСС инфраструктурни мрежи;
- значителна ли е разликата между резултатите (в т.ч. тяхната точност), получени с потребителски и инфраструктурни референтни станции;
- различават ли се резултатите, получени с различни типове потребителска апаратура.

#### ➤ *Влияние на продължителността на измерванията*

Ако се съпоставят резултатите от измерванията с изходните координати на т. 9225 се вижда, че в почти всички случаи продължителността на измерванията е определяща единствено за точността по височина.

**Извод:** Продължителността на измерванията в реално време не е толкова съществен фактор колкото е геометричната обусловеност на решението. Известно е, че същото твърдение е в сила и при бързите методи, осъществявани с помощта на потребителски референтни станции. Продължителността на RTK определенията с помощта на ГНСС инфраструктура влияе върху качеството на резултатите по начина, типичен за класическия RTK метод, и се определя по същите правила.

#### ➤ *Потребителски срещу инфраструктурни референтни станции*

Съпоставката с изходните координати на т. 9225 дава известно основание да се търси систематична разлика единствено по положение. При това обаче, разликата е в едни и същи граници както в случаите на използване на потребителска референтна станция, така и при работа с мрежата “NAVITEQ”.

**Извод:** Произходът на референтните данни не води до отклонения извън типичните за метода стойности на грешките. Точността на резултатите, получени с ГНСС инфраструктура в реално време е напълно съпоставима с тази на класическите RTK определения в реално време.

#### ➤ *Сравнение между потребителската апаратура (Trimble vs. Topcon)*

По резултатите от съпоставката на координатите на т. 9225, определени по време на експеримента с техните изходни стойности не може еднозначно да се прецени кой от двата вида ГНСС апаратура води до получаването на по-достоверни резултати. Отклоненията са в рамките на типичните за метода грешки.

**Извод:** Разликата между резултатите, получавани с различни видове ГНСС апаратура се абсорбира от грешките на прилаганите методи за определяне на точки.

Типът на потребителската апаратура не оказва значим ефект върху точността на получаваните резултати, тъй като на преден план излизат специфичните за метода RTK грешки.

#### d) Изводи

Анализът на резултатите позволяват да се направят следните изводи относно приложението на мрежови и единични RTK методи:

- *независимост*: мрежовият и единичният RTK метод са независими от вида на използваната ГНСС апаратура – получените резултати от двата типа ГНСС приемници са сходни;
- *оперативност*: мрежовият RTK метод осигурява еднаква оперативност с RTK метода с единична референтна станция;
- *точност*: мрежовият и единичният RTK метод осигуряват еднаква точност;

Приложението на ГНСС инфраструктура осигурява точността на съответния метод - статичен или кинематичен, за определяне на положението на точки с помощта на единични референтни станции, а предимствата му се състоят преди всичко в по-високата ефективност и удобство на полевите работи.

#### 3.2.2.2.3. Със станции за мониторинг и геостационарни спътници

##### a) Изходна постановка

В тази точка е показано приложението на диференциалните корекции от системата OmniSTAR за осигуряване на геодезическите работи в реално време в 2-D сеизмично проучване в Камбоджа.

##### b) Технология на геодезическите работи

Изборът на метода OmniSTAR е обусловен от факта, че за района на проучването липсват съществуващи изходни опорни точки или инфраструктурна ГНСС мрежа от активни станции, а условията на терена - преобладаващо равнинен, покрит с джунгли и обширни минни полета, не позволяват изграждането на ГО с удобно разположени ГНСС референтни станции (Приложение 5). Използвана е диференциалната услуга OmniSTAR XP, осигуряваща точност по положение до 20 cm.

##### c) Анализ на приложението

Прилагането на диференциални корекции от системата OmniSTAR за 2-D проучването в „Блок 12“, Камбоджа, показва следните недостатъци:

- Необходимост от продължително време - над 15 min, - за първоначална инициализация до необходимата в сеизмичните проучвания дециметрова точност;

- Лесна загуба на инициализация от налични препятствия в околната среда (сложен терен, дървета и т.н.) и необходимо повторно изчакване за достигане до необходимите стойности;

- Неоптimalно използване на наличната ГНСС апаратура, тъй като по-голямата част от ГНСС приемниците в геодезическия отдел (Приложение 5) не поддържат кодирания формат на диференциалните ХР корекции;

- Необходимост от абонаментно заплащане към компанията OmniSTAR;

#### d) Изводи

Приложението на метода OmniSTAR ХР в „Блок 12“, Камбоджа, позволява да се направят следните изводи за неговата функционалност:

- *независимост*: методът осигурява висока независимост на ГНСС измерванията – диференциалните корекции на този метод са налични на разстояния до 1000 km от най-близките станции за мониторинг на системата; методът е твърде зависим от вида на използваната ГНСС апаратура, тъй като диференциалните корекции се излъчват в кодиран формат, поддържан само от определени ГНСС устройства;

- *оперативност*: методът осигурява оперативност на измерванията в реално време, но само след твърде продължителен период на първоначална инициализация, необходим преди началото на всяка сесия;

- *точност*: след постигане на инициализация, методът осигурява достатъчна за сеизмичните проучвания точност.

#### 3.2.3. Заключение

В условията на Северна Африка, където се намират някои от най-богатите залежи на нефт и газ, приложението на описаните дотук геодезически методи е особено затруднено, най-вече поради отдалечеността, липсата на телекомуникационна и друга инфраструктура, както и изостаналото от геодезическа гледна точка развитие на много от районите. Съществен затрудняващ приложението фактор се явяват и обширните пустинни терени и екстремалните атмосферни условия.

Високата перспективност на този район, но затрудненото прилагане на съществуващите ГНСС методи в условията там, налага търсене на нови геодезически методи. Методите трябва да осигуряват независимост на ГНСС измерванията (подобно на статичните методи), трябва да бъдат оперативни в реално време (както RTK) и трябва да бъдат високоточни като тях.

### 3.3. Изследване на функционалността на метода WARTK

#### 3.3.1. Въведение

В този раздел е са представени резултати, получени от верификационен експеримент за изследване на алгоритъма за определяне на местоположение по метода WARTK чрез фиксиране на циклични параметри в кинематичен режим за две станции

от мрежата EUREF, разположени на разстояние над 100 km една от друга. Целта на експеримента е изследване на функционалността на метода WARTK и верификация на резултатите, получени по време на експеримента BELLKIN, проведен от създателите на метода WARTK през 1999 г.

3.3.2. Фиксиране на циклични параметри в кинематичен режим между референтни станции

#### *3.3.2.1. Изходна постановка*

Базирайки се на експеримента BELLKIN'99, изследването на докторанта се състои в анализ на възможността за фиксиране на циклични параметри в кинематичен режим между две перманентни ГНСС станции от мрежата EUREF – BELL и EBRE, намиращи се на територията на Испания, с използване на диференциални корекции, създадени чрез йоносферен томографски модел на gAGE/UPC.

##### *3.3.2.1.1. Използвани изходни данни*

- RINEX файлове с наблюдения в EUREF станциите EBRE и BELL, проведени на 23.03.1999 г.;
- Файлове с радиоефемериди и прецизни орбитни данни за същата дата;
- Йоносферни STEC корекции, предоставени от gAGE (Приложение 6.4);

##### *3.3.2.1.2. Използван софтуер*

- GCAT – програма за обработка и анализ на кодови и фазови ГНСС измервания.
- kalman – Калманов филтър за определяне на неизвестните параметри в уравненията на измерванията;
- ambisolv – програма за фиксиране на циклични параметри по различни линейни комбинации;
- скриптове за форматиране и преобразуване на ГНСС измерванията.

Обработката на данните и получаването на резултатите с описания софтуер е извършено в среда на Linux, реализация Ubuntu 8.04. Допълнително са използвани някои стандартни функции и команди от програмния език gawk, поддържан от командния ред (терминала) на Ubuntu. Графичните материали са създадени с приложението Gnuplot.

##### *3.3.2.2. Задачи на експеримента*

- Оценка на точността на плаващото и фиксираното решение, чрез сравнение на известните и получените по кинематичен начин координати за референтна станция BELL (третирана от калмановия филтър като подвижна), определени с използването на фиксирани или плаващи стойности на тяснолентовия цикличен параметър BC и йоносферни корекции от томографски модел;

- Оценка на влиянието на йоносферната рефракция между станции EBRE и BELL, чрез сравнение на известните и получените по кинематичен начин координати за референтна станция BELL (третирана от калмановия филтър като подвижна), определени със и без използването на йоносферни корекции от томографския модел;

- Сравнение на получените резултати с резултатите от експеримента BELLKIN'99, получени от gAGE/UPC.

### *3.3.2.3. Метод за провеждане на експеримента*

#### *3.3.2.3.1. Определяне на елементите от матрицата на коефициентите на уравненията на измерванията чрез програмата GCAT*

Входящи данни - RINEX файлове с наблюденията от станции BELL и EBRE

Резултат - файл с елементите на матрицата на коефициентите.

#### *3.3.2.3.2. Определяне на плаващите стойности на цикличните параметри $\Delta V B_C$ чрез програмата kalman*

Входящи данни - файла с елементите на матрицата на коефициентите, определен в предишната точка; конфигурационен файл, моделиращ стохастичното поведение на координатите на определяемата точка;

Резултат - файлове, съдържащи линейните отклонения по трите оси на търсената точка спрямо предварително известните ѝ координати, както и плаващите циклични параметри за всеки спътник, за всяка отделна епоха.

#### *3.3.2.3.3. Фиксиране на цикличните параметри $\Delta V B_C$ чрез програмата ambisolv*

Входящи данни - файл с двойните фазови разлики по различните линейни комбинации за базов спътник 21 и станциите **BELL** и **EBRE**; файл с йоносферните корекции STEC, получени от йоносферен томографски модел на gAGE/UPC; файл с плаващите стойности на  $B_C$ , получени от обработката с Калмановия филтър

Резултат - файл, съдържащ двойните разлики на фиксираните стойности на  $B_C$ . Тези стойности се въвеждат обратно във файла с уравненията на измерванията за получаване на коригираните стойности на елементите на базисния вектор и атмосферните закъснения. Файлът с коригираните стойност се въвежда отново в Калмановия филтър и се обработва по алгоритъма за кодови измервания (т.е. плаващият цикличен параметър в уравненията на измерванията се изпуска), в резултат на което се получават крайните координатни разлики между известните и изчислените координати на определяемата точка.

### *3.3.2.4. Анализ на резултатите*

Крайният резултат от експеримента е графичен сравнителен анализ между резултатите, получени със и без използването на йоносферни STEC корекции, по всяка от трите координатни оси. Графиките показват координатните разлики между получените резултати от Калмановия филтър и предварително известните координати на станция BELL.

#### *3.3.2.5. Изводи*

Резултатите за фиксираното решение от трите графики са сходни с публикуваните в [10] резултати от експеримента BELLKIN'99. Анализът на графиките показва, че получените резултати са съпоставими като точност с реалните експериментални резултати на gAGE/UPC. Съпоставката обхваща еднакъв период от време. Както се вижда от получените графики, времето за инициализация под 10 cm и по трите оси, необходимо на Калмановия филтър, е приблизително 13 min. За сравнение, времето за инициализация в експеримента BELLKIN е значително по-кратко, което може да се обясни с опростения софтуер, използван от докторанта. Независимо от това резултатите показват успешно фиксиране на циклични параметри на големи разстояния (над 100 km) с използване на йоносферни корекции в реално време.

#### *3.3.3. Заключение*

Проведеното изследване с йоносферни STEC корекции потвърди качествените показатели на метода WARTK, получени в рамките на експеримента BELLKIN'99.

### **3.4. Съпоставка на класически ГНСС методи с WARTK**

#### *3.4.1. Изходна постановка*

От съществено значение за геодезическите работи по метода WARTK, вкл. в рамките на сеизмичните проучвания за търсене на огромните залежи от нефт и газ в Северна Африка, е планираното инсталиране на EGNOS станции в Александрия и Абу Симбел (Египет), Таманрасет (Алжир), Агадир (Мароко) и Нуакшот (Мавритания).

#### *3.4.2 Анализ на ГНСС методи*

В този раздел е направено сравнение между метода WARTK и останалите ГНСС методи, описани в дисертацията, за геодезически работи в сеизмични проучвания за търсене на нефт и газ. В сравнението е поставен акцент върху района на Северна Африка, избран заради високата перспективност за провеждане на сеизмични проучвания поради доказано високите залежи на нефт и газ, разположени в твърде изолирани райони, където липсват прецизни изходни геодезически мрежи и ГНСС инфраструктура. Това налага търсене на нови методи за кинематични измервания в реално време, сред които мрежи с много рядка гъстота на референтните станции и голям обем на диференциални корекции, към които спада и метода WARTK.

#### *3.4.2.1. WARTK v/s статични относителни методи с единични референтни станции*

Описание, анализ и изводи от приложението на статичния относителен метод с единична референтна станция за създаване на ГО е дадено в 3.2.2.1.1. Съпоставен с него, методът WARTK показва предимства по следните критерии:

- независимост
  - не разчита на собствени референтни станции;
  - увеличен обхват - до 400 km от мрежовите референтни станции;
- оперативност
  - осигурява работа в реално време;

#### *3.4.2.2. WARTK v/s RTK с единична станция*

Описание, анализ и изводи от приложението на метода RTK с единична референтна станция е дадено в 3.2.2.1.2. Съпоставен с него, методът WARTK показва предимства по следният критерий:

- независимост
  - увеличен обхват - до 400 km от мрежовите референтни станции;
  - не разчита на собствени референтни станции;
  - не изисква достъп до наземни комуникации (мобилен интернет, радиоизлъчване, Wi-Fi и др.), каквито липсват в отдалечени райони – диференциалните WARTK корекции са достъпни чрез геостационарни спътници;

#### *3.4.2.3. WARTK v/s PPK*

Описание, анализ и изводи от приложението на метода PPK е дадено в 3.2.2.1.3. Съпоставен с него, методът WARTK показва предимства по следният критерий:

- независимост
  - увеличен обхват - до 400 km от мрежовите референтни станции;
  - не разчита на собствени референтни станции;
- оперативност
  - осигурява работа в реално време.

#### *3.4.2.4. WARTK v/s статични относителни методи с мрежи от пасивни перманентни станции*

Описание, анализ и изводи от приложението на статичния относителен метод с данни от пасивни перманентни станции за създаване на ГО е дадено в раздел 3.2.2.2.1. Съпоставен с него, методът WARTK показва предимства по следните критерии:

- независимост
  - не изисква достъп до интернет за обмен на данни – диференциалните корекции са достъпни чрез геостационарни спътници;

– избягва се риска от поява на грешки от прилагането на неподходящи атмосферни модели – към момента активните станции за мониторинг на EGNOS в Северна Африка са разположени по-благоприятно за определяне на такива модели, отколкото съществуващите перманентни станции на IGS.

- оперативност
  - осигурява работа в реално време;

#### *3.4.2.5. WARTK v/s мрежови RTK методи с активни станции*

Описание, анализ и изводи от приложението на мрежовия RTK метод VRS е дадено в раздел 3.2.2.2. Избраният за анализ мрежов метод – VRS, - не се отличава съществено от останалите мрежови методи с ГНСС инфраструктура от активни станции – FKP и MAX, поне що се отнася по показателите за независимост, оперативност и точност. Съпоставен пряко с VRS, и по аналогия с FKP и MAX, WARTK показва предимства по следният критерий:

- независимост
  - увеличен обхват - до 400 km от мрежовите референтни станции;
  - не изисква достъп до наземни комуникации (мобилен интернет, радиоизлъчване, Wi-Fi и др.), каквито липсват в отдалечени райони – диференциалните WARTK корекции са достъпни чрез геостационарни спътници;

#### *3.4.2.6. WARTK v/s OmniSTAR*

Описание, анализ и изводи от приложението на метода OmniSTAR XP е дадено в раздел 3.2.2.3. Съпоставен с него, методът WARTK показва предимства по следните критерии:

- независимост
  - избягва се риска от поява на грешки от прилагането на неподходящи атмосферни модели – към момента активните станции за мониторинг на EGNOS в Северна Африка са разположени по-благоприятно за определяне на такива модели, отколкото станциите за мониторинг на OmniSTAR (вж. Фиг. 27 и 30).
- оперативност
  - бърза първоначална инициализация на ГНСС измерванията;
  - бързо възстановяване на инициализацията поради технологията за обработка на ГНСС сигнала – работа с фиксирани циклични параметри.

#### **3.4.3. Заключение**

Аналитичната съпоставка с метода WARTK показва, че същият осигурява по-голяма независимост и оперативност на геодезическите работи спрямо всички към момента използвани ГНСС методи - в реално време или с последваща обработка.

#### **3.5. Заключение**

Представените в тази глава изследвания спомагат за илюстриране на качествата на метода WARTK, като показват недостатъците на класическите ГНСС методи и начините, по които те могат да се избегнат с неговото прилагане. Основните резултати, постигнати от изследванията според реда на тяхното представяне, могат да се резюмират както следва:

- Извеждане на основните недостатъци на класическите ГНСС методи при прилагането им за геодезически работи в 2D и 3D сеизмични проучвания;
- Проверка и потвърждение на точността, независимостта и оперативността, осигурявани чрез диференциалните корекции на метода WARTK;
- Извеждане на основните предимства на метода WARTK пред класическите ГНСС методи.

Тъй като методът се намира все още в експериментална фаза, някои параметри, обуславящи неговото приложение, все още не са известни, сред които:

- Цена на предоставяната комерсиална услуга;
- Формат на предаване на корекциите – стандартен или кодиран;
- Изисквания за съвместимост към ГНСС апаратурата и др.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основните изисквания към геодезическите работи в сеизмичните проучвания за търсене на нефт и газ се удовлетворяват от метода WARTK, както следва:

- *Независимост* – методът може да осигури независимост на измерванията от наличието или липсата на съществуващи опорни геодезически или инфраструктурни мрежи в района на работата. За разлика от класическите RTK (ограничение на разстояние до 10 km от референтните станции) и мрежовите RTK (до 35 km) методи, съгласно приведените в дисертацията експериментални резултати е видно, че WARTK осигурява пълна независимост на геодезическите ГНСС измервания на разстояния над 400 km от станции за мониторинг на системата EGNOS. Текущото развитие на тази SBAS система в района на Северна Африка (Фиг. 98-102, Приложение 6.9) осигурява достатъчна перспективност за приложение на WARTK в сеизмичните изследвания в този район.

- *Оперативност* – съгласно приведените експериментални резултати за метода WARTK в раздел 2.5 е видно, че за първоначалното кинематично фиксиране на цикличните параметри с използване на две носещи честоти са необходими няколко минути, а с използване на три – моментално, с ГНСС измервания от единична епоха. Това осигурява висока оперативност на метода в района на валидност на йоносферните WARTK корекции (400 km от референтни станции на EGNOS).

- *Точност* – методът WARTK осигурява дециметрова точност в обхвата на йоносферните корекции, която покрива изискванията за точност в сеизмичните проучвания, а именно 20 cm по хоризонтално положение и 50 cm височина.

Въпреки, че се намира все още в експериментална фаза, изследванията на метода WARTK, както и сравнението му с широко използваните в сеизмичните проучвания ГНСС методи показват, че с приложението на WARTK се избягват редица недостатъци, характерни за геодезическите работи по останалите методи. В дисертацията е направен опит за доказване на оптималната приложимост на WARTK в условията на Северна Африка – регион, изключително богат на нефто-газоносни залежи, но беден откъм съществуваща геодезическа основа и инфраструктура. Целесъобразно би било изследванията за приложимостта на WARTK в геодезическите работи за търсене на нефт и газ да продължат.

Методът WARTK е тясно свързан с Европейската космическа агенция (ESA), в качеството ѝ на разработчик на системата EGNOS, станциите от която са в основата на метода. В близко бъдеще предстои разработка на тестов диференциален сигнал с WARTK корекции, достъпен за по-широко гражданско ползване. Сигналът ще се използва от производителите на ГНСС апаратура за разработване на съвместими приемници, които ще дадат възможност на потребителите да получават WARTK корекции и по-широко експериментиране с възможностите на метода, включително за приложение в сеизмичните проучвания за търсене на нефт и газ. Всичко това дава перспективата да се смята, че методът WARTK ще има все по-важна роля сред съвременните ГНСС методи, прилагани в сеизмичните проучвания за нефт и газ.

Приложението на метода в България е напълно възможно, тъй като в София има разположена RIMS станция на системата EGNOS – платформа за генериране на диференциални корекции с радиус на приложение над 400 km от столицата. Дециметровите точности в реално време, които осигурява метода, могат да бъдат използвани в сферите на:

- Геофизични изследвания за търсене на нефт и газ – въпреки сравнително ниската перспективност на нефто-газоносните пластове в България, геофизични сеизмични проучвания продължават да се извършват на много места в северната и североизточната ѝ част. Геодезическите работи в рамките на тези проучвания могат да бъдат значително подпомогнати с използването на WARTK. Методът е способен да удовлетвори изискванията към определяне на местоположение и при други геофизични методи на проучване – магнитни, електрически и др.

- Земеделие – за проверка на място на земеделски имоти, субсидирани от еврофондове.

- Кадастър – бъдещото развитие на системата Galileo, в комбинация със сигналите от сега действащата система GPS, ще осигури моментално фиксиране на WARTK решения дори в трудни за ГНСС измерване градски условия – сгради, паркове и пр. Това, заедно с осигуряваната от метода дециметрова точност, е предпоставка за

потенциалното му приложение за кадастрални измервания в урбанизирани и неурбанизирани територии – при определяне на трайно и нетрайно материализирани граници на поземлени имоти, очертания на сгради от основното и допълващото застрояване, граници на поземлени имоти и др. Същото важи и за измервания за нуждите на горските стопанства.

- Утилити и ГИС – обезпечава се събирането на данни за утилити приложения – изграждане и поддържане на ВиК инфраструктура, електропреносни и електроразпределителни мрежи, газоснабдяване; събиране на геопространствени данни в реално време за изграждане на ГИС на населени места и др.

- Открити рудници – методът WARTK е приложим за всички геоложки дейности в откритите рудници, при които е достатъчна дециметрова точност по положение и височина.

### III. ПРЕТЕНЦИИ ЗА ПРИНОСИ

1. Изследвани и систематизирани са изискванията на съвременните сеизмични проучвателни методи към независимостта, оперативността и точността на осигуряването с геодезически данни.

2. Извършен е сравнителен анализ на класическите ГНСС методи с оглед на приложението им в 2-D и 3-D сеизмични проучвания. Обобщени и съпоставени са предимствата и недостатъците на всеки един от тях.

3. Изследвани са възможностите за приложение на метода WARTK в дейностите по геодезическото осигуряване на сеизмичните проучвания и са установени предимствата му пред класическите ГНСС методи в типичните за сеизмопроучвателните работи условия.

### IV. ПУБЛИКАЦИИ, СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

1. Камбуров, А. *“WARTK – позициониране с дециметрова точност в реално време на разстояния над 400 km от референтни станции”*. сп. „Геомедия“, брой 6, 2011
2. Камбуров, А. *“WARTK – съвременен геодезически ГНСС метод в 3-D сеизмичните проучвания за търсене на нефт и газ”*. сп. „Геодезия, картография, земеустройство“, кн. 1, 2012 г.
3. Камбуров, А. *“WARTK – съвременен геодезически ГНСС метод в 3-D сеизмичните проучвания за търсене на нефт и газ”*. сп. „Минно дело и геология“, бр. 1, 2012 г.
4. Kamburov, A. *“WARTK – contemporary geodetic GNSS method in 3-D seismic investigations for oil and gas”*. 21<sup>th</sup> International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields, 2011 г.
5. Камбуров, А. *„Диференциални ГНСС методи с използване на мрежа от референтни станции“*. сп. „Геомедия“, бр. 1, 2010 г.
6. Kamburov, A. *“Application of GNSS methods in 2-D seismic exploration program”*. 9th International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference & EXPO - SGEM, 14-19 June 2009, Albena resort, Bulgaria.

## V. SUMMARY

of a dissertation named “Application of WARTK method for geodetic activities in 2-D and 3-D seismic explorations for oil and gas”

The theoretical basis of 2-D and 3D seismic exploration for oil and gas requires generating artificial seismic waves in the ground and recording the reflected waves back on the ground from the different geologic strata below. The exact points of generating and recording the waves are arranged along straight perpendicular lines. These points must be marked on the ground and surveyed with decimal accuracy. Contemporary seismic explorations on a global scale rely strongly on GNSS methods for measuring those seismic points, as these are the most productive methods for such tasks.

Such large-scale programs are mainly applicable for desert and unpopulated areas, where there are no terrain or anthropogenic obstacles. In the deserts of North Africa 2-D and 3-D seismic projects are performed quite intensively, as the region has vast proven oil and gas deposits. The so far mostly used geodetic GNSS methods are the conventional RTK method, the Network RTK/VRS concept (unavailable in the desert areas) or the worldwide OmniSTAR GNSS services. The application analysis of all these methods shows significant problems when implemented in the deserts of North Africa. A probable solution of these problems is likely to be found by implementing the WARTK method instead.

The dissertation is structured in 3 chapters. The first chapter depicts the general theoretical base of the seismic exploration for the oil and gas industry. The second chapter gives a description of the modern GNSS geodetic methods, used for surveying of the seismic lines (profiles) in the exploration. The third part of the dissertation includes experimental results from various real applications of GNSS methods in 2-D and 3-D seismic projects, in which the Ph.D. student has participated over the years – Bulgaria, Tunisia and Cambodia.

The main objective of the dissertation is to adapt a new DGNSS method - WARTK, for optimization of the geodetic activities as part of seismic explorations in remote desert areas of North Africa. The main accomplished tasks include:

- Analysis of the general requirements for the geodetic activities in seismic explorations;
- Theoretical investigation of modern GNSS methods basics and WARTK;
- Analysis of GNSS methods as applied in real seismic explorations;
- Verification of the WARTK positioning algorithm;
- Comparison of the classical GNSS methods and the proposed WARTK.

The Ph. D student believes that the WARTK method may successfully replace the use of traditional real-time GNSS methods for the needs of the seismic industry.