БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ



НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО ГЕОФИЗИКА, ГЕОДЕЗИЯ И ГЕОГРАФИЯ



ДЕПАРТАМЕНТ ГЕОДЕЗИЯ

Петър Георгиев Ковачев

### Съвременни методи за анализ на грешките на GPS приемници в DGPS/RTK режим

### Автореферат

за присъждане на научно-образователната степен "доктор"

по професионално направление: 5.7. "Архитектура, строителство и геодезия" Научна област: Обща, висша и приложна геодезия [02.16.01]

Научен консултант: Чл.-кор. проф. дмн дтн Красимир Атанасов

София, 2018 г.

Дисертационната работа съдържа 148 страници, от които 26 страници приложения, включва 54 фигури и 21 таблици в 11 глави.

Библиографията обхваща 174 заглавия, от които 18 на кирилица и 156 на латиница. Дисертационната работа е разгледана и насочена за защита от заседание на семинара на Департамент Геодезия към Националния институт по геофизика, геодезия и география при БАН на 25.04.2018 г.

Защитата на дисертацията ще се състои на ...... от ....... от ......часа, в зала ......, блок ......, НИГГГ-БАН.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на НИГГГ-БАН.

Номерацията на формулите, фигурите и таблиците в автореферата съответстват на номерацията им в дисертационния труд.

В списъка с литература са поместени само заглавията, които са цитирани в автореферата.

#### Научно жури:

#### Външни членове:

- 1. чл. кор. Красимир Атанасов, ИБИББИ БАН;
- 2. доц. д-р Стоян Порязов, ИМИ БАН;
- 3. доц. д-р Юри Цановски, УАСГ;
- 4. проф. д-р Момчил Минчев, МГУ, резервен член

Вътрешни членове:

- 1. проф. дтн Иван Георгиев;
- 2. проф. дтн Явор Чапанов;
- 3. доц. д-р Николай Димитров, резервен член.

#### 1. Увод

#### 1.1 Актуалност на проблема

В последните години DGPS/RTK (*Differential GPS*/Real-Time Kinematic) измерванията в реално време стават все по предпочитан метод за осъществяването на голям брой геодезически дейности. Тази технологията позволява да се намалят разходите за конкретния проект с 20 ÷ 80%, както и многократно да се намали времето за осъществяването му.

Всички по-големи производители на GPS обурудване предлагат геодезически клас приемници с възможности за постигане на сантиметрова точност при определяне на положението в реално време.

Комбинирането им с други върхови технологии: лазерните далекомери, лидари (<u>LIght</u> <u>Detection And Ranging</u>) и други системи за дистанционно сондиране (Remote Sensing Systems) води до нов качествен скок в геодезическите измервания.

Според офертите на предлагащите GPS RTK приемници фирми, точността на RTK метода е от порядъка на 1-2 сантиметра + 1 ррт в хоризонталните координати и 2-3 пъти по-ниска във вертикалната координата. В действителност, обаче, съществуват редица фактори, описани в Глава 3, пренебрегването или непознаването на които могат да доведат до грешки от порядъка на метри.

Коректното решаване на фазовата неопределеност е ключът към високоточното позициониране в реално време. За решаването на този проблем производителите на GPS обурудване използват различен дизайн на хардуера на приемниците и антените, както и различни функционални и стохастични модели. Поради конкуренцията между фирмите, тези техники са патентно защитени и недобре описани. Различните подходи затрудняват и работата по въвеждането на общ стандарт за предаването на диференциалните поправки.

В рекламните брошури обикновено се посочват резултати от тестове, проведени при найблагоприятни условия на измерване. Затова е необходимо да се познават качествата и поведението на приемника при различни неблагоприятни условия на наблюдение. Това налага периодичното тестване на приемниците (и техните антени) за да се осигури:

- вътрешен контрол на качеството на приемника

- подобряване на точността, достигана от този приемник

- легализиране (узаконяване) на метрологичните му характеристики.

Особено важен е качественият контрол на приемника в момента на закупуването му и проверката, дали той отговаря на спецификациите на производителя. Тези проверки след това трябва да се извършват най-малко един път годишно, а също така преди и след кампании, които изискват висока точност на измерванията. Методите за тестване на GPS приемници са описани в Глава 3.15.

#### 1.2 Цели и задачи

Целта на проекта е:

С помощта на изследователски тестове да се изследват факторите, които влияят на точността на конкретни DGPS/RTK приемници при работа в диференциален режим (реално или почти реално време).

На базата на получените резултати от експериментите да се създаде подходяща методика (алгоритми) и софтуер за анализ на грешите и тестване на този клас GPS приемници в DGPS/RTK режим.

Създаването на подходяща методика (алгоритми) за тестване на DGPS/RTK приемници ще повиши вътрешния контрол на качеството на GPS приемниците, ще допринесе за подобряването на точността на измерванията и ще помогне за легализирането (узаконяването) им.

Натрупаният статистически значим масив от DGPS/RTK измервания ще помогне за извеждането на критерии за границите на приложимост на метода и условията при които трябва да се вземе решение за използването на други GPS техники.

Целта на проекта ще се постигне чрез анализа на тестови точки, на които ще се изследва влиянието и степента на корелираност на грешките/систематичните отклонения, характерни за метода, върху *точноста*, *надеждността*, *достъпността* и *интегритета* (виж Приложение 1) на измерванията.

#### 1.3 Изследователски методи

Тъй като факторите, които влияят на точността на този вид измервания са изключително много и не са постоянни във времето и пространството, а подходите за достигане на желаната точност (хардуерни и софтуерни) при различните GPS приемници и системи се различават, то се налага разглеждането на конкретния приемник като "черна кутия". Различните изследователски тестове целят да определят влиянието на конкретен фактор върху точността на измерените координати и границите на приложимост на съответния метод. Това се постига като резултатите от експериментите се сравняват с данни, предварително получени с помощтта на по-точен метод на измерване (в случая статични GPS измервания).

Създаден е софтуер, позволяващ максимално да се автоматизира процеса на извличаене, филтрация, визуализация и статистически анализ на интересуващите ни данни.

Статистическите методи, използвани в отделните модули от програмата включват: Статистическо оценяване на параметри; Статистически анализ на връзки между явленията (корелационен и регресионен анализ); Анализ на динамиката на явленията (анализ на времеви редове с помощтта на МНМК-моделиране на тенденции; Дисперсионен анализ (дисперсии на Алан, дисперсия на Адамар); Интеркритериален анализ.

#### 1.4 План на изследванията

С данни от перманентни станции (SOFA и SOFI) да се изследва точността, надеждността и достъпността на APPS (*Automatic Precise Positioning Service*) на Глобалната Диференциална GPS система (*Global Differential GPS* - GDGPS) в кинематичен режим. Този режим позволява подетайлното изследване на параметрите на решението (трите пространствени координати и времето) чрез представянето им във времеви редове.

Да се разработят алгоритми и софтуер за визуализация, филтрация и анализ на измерванията. Използваните методи за анализ на решенията позволява същите алгоритми да се прилагат и при анализа на RTK (Real Time Kinematic) измервания.

С помощтта на този софтуер да се изследва:

• Процентът на успеваемост - процентът (в интервала 0-100%) на успешните решения (в границите на допустимата грешка).

- Анализ на шума в данните.
- Оптималния период на усредняване.
- Възможното влияние на отразени сигнали върху изследваните точки.

• Съотношението сигна/шум на всички спътници, участващи в решението по двете честоти L1 и L2 в зависимост от височината им над хоризонта и възможната корелация на това съотношение с грешките, причинени от отразени сигнали.

• Метрологичните характеристики на осцилатора (часовника) на GPS приемниците. Познавайки метрологичните характеристики на осцилатора да се изследва възможността за извеждане на статистически достоверен критерий за филтриране на грешките в PVT (позиция, скорост, време) решението в реално време.

• Корелацията между параметрите на решението на проблемни области и да се сравни с тази от успешните решения.

• Влиянието на пространствено корелираните грешки върху точността на решението.

#### 2. Съвременно състояние на изследванията по проблема

#### 2.1 Определяне на местоположението с GPS

Според начина (модела) на определяне, координатите на измерваната точка могат да бъдат наречени *абсолютни* (определяне на положението на отделна тока) или *относителни* (*релативни* – определяне на относителното положение спрямо точка с предварително известни координати). Съществува теоретична разлика между относителното (релативното) определяне на положението и диференциалното определяне на положението. *Диференциалното определяне на положението* е подобрен метод за определяне на положението на отделна точка, която повишава точността на решението чрез нанасянето на поправки (прогнозирани) към измерените псевдоразстояния (или координати). Тези поравки се определят и се получават от референтна станция (или станции) с предварително известни координати. Методът осигурява моментни решения (решения в реално време), като значително се повишава точността, спрямо координатите на референтната станция.

В миналото, опредлянето на положението на отделна точка се е свързвало с навигацията, а определянето на относителното (релативното) положение – с геодезията. Също така, по традиция, терминът "релативно" се използва при измервания на фазата на носещата честота, а докато терминът "диференциално" се използва при кодови измервания [2].

Измерванията могат да се разделят, също така и на *статични* и *кинематични*. При статичните приемникът е неподвижен, докато кинематичните се извършват в движение. Тогава, абсолютните измервания (определяне на положението на отделна точка) могат да се разделят на *абсолютни статични* и *абсолютни кинематични* (навигация на превозни средства), а относителните (релативните) – на статично определяне на относителното положение и на кинематично определяне на относителното положение.

Статичното определяне на относителното положение с измерването на фазата на носещата честота е най-точният метод за определяне на положението. В зависимост от продължителността на сеансите, качествата на приемниците и на обработващия софтуер, с този метод може да се достигне милиметрова точност, дори и при много дълги бази (от порядъка на стотици километри) [3, 4].

При кинематичното определяне на относителното положение също може да бъде постигната висока точност (от порядъка на няколко сантиметра и по-добра). Използването на радиоканал за предаването на данните в реално време от референтната станция към подвижния приемник, води до така наречения кинематичен метод в реално време (RTK – Real Time Kinematik). В зависимост от характера на данните (фази или поправки към фазите) методът спада към относителното или към диференциалното определяне на положението (Фиг. 1).

# 2.2 Класификация на съвременните диференциални системи за спътникова навигация

Диференциалните системи могат да се разделят по методите си на наблюдение, постиганата точност и зоните на покритие на:

Диференциални системи за навигация по кодови измервания - измерват и обработват кодовите псевдоразстояния, имат голяма (от порядъка на стотици километри) област на действие и грешката при определяне на положението е от няколко метра до дециметри.

Диференциални системи с фазови измервания CDGPS (Carrier-Phase DGPS) - характеризират се с много висока точност при определяне на положението (до части от сантиметъра), но областта

им на действие е ограничена до ~10-12 км за едночестотните приемници и ~70 км за двучестотните.

Алтернативен на навигационния режим е контролният режим IDGPS (Inverted DGPS), при който измерващият приемник изпраща "суровите" си данни на референтната станция за обработка.

Диференциалните системи за навигация по кодови измервания, от своя страна се разделят на локални (LADGPS-Local Area Differential GPS), широкообхватни (WADGPS -Wide Area Differential GPS) и глобални (GDGPS -Global Differential GPS).

Диференциалните поправки могат да се формират по метода на корекция на координатите (the position-domain approach) и метода на корекция на навигационните параметри (the measurement-domain approach) [6, 7].

В широкообхватните системи за диференциална навигация (WADGPS) се използва мрежа от референтни станции за събиране на информация и принципно друг метод за формиране на диференциалните поравки [8, 9].

Този метод е известен, като *the state-space approach* (дословно: *метод за корекция на параметрите в пространството на състоянията*, или по-съдържателно: метод за корекция на параметрите на модела на движението на спътниците, параметрите на модела за йоносферната поравка и на модела за изместването на скалата за време на навигационните спътници). Измерванията от двучестотните приемници, раположени на референтните станции от мрежата се събират в един център, където се провежда тяхната съвместна обработка с цел, оперативно уточняване на параметрите на модела на движението на спътниците, изместването на скалата за време на спътниците и съставяне на карти на вертикалните йоносферни закъснения. Коригираните данни след това се предават на потребителите, които ги използват за уточняване на данните извлечени от сигналите на навигационните спътници. Тези ситеми осигуряват точност при определяне на положението в границите на ~0,5 м (средна квадратна грешка) в зоната обхваната от референтните станции и в близките на нея райони [7].

На територията на САЩ са разгърнати и се експлоатират няколко широкообхватни системи [10]: Морска (Maritime) DGPS; Национална (Nationwide) DGPS; Авиационна (Aeronautical GPS Wide Area Augmentation System - WAAS).

В Европа функционира системата *EGNOS* (*European geostationary navigation overlay system*), аналогична на WAAS.

Чрез EGNOS точността на позициониране се подобрява до 1 - 2 метра [12], а предупреждението за нарушен интегритет достига до потребителите за по-малко от десет секунди.

По своята структура, глобалните системи за диференциална навигация (GDGPS) много приличат на WADGPS [13, 14]. Те също използват наземна мрежа от референтни станции за събиране на информация и същият метод за формиране на диференциалните поравки (*the statespace approach*). Разликата е, че изключването на йоносферните грешки се осъществява с използването на двучестотни измервания.

Изключването на необходимостта да се изчисляват подробни карти за вертикалните йоносферни закъснения, позволява силно да се намали плътността на референтните станции от наземната мрежа. За оперетивното уточняване на орбитите на навигационните спътници в тази система, се използва същият пакет приложни програми *RTG* (*Real Time Gipsy*), както и за WADGPS. За предаване на измерванията в центъра за обработка се използва Internet.

Резултатите от изпитанията показват, че средната квадратна грешка в хоризонталните координат е < 0.1м, а за вертикалната < 0.2м.

Системите EGNOS, WAAS и MSAS (Multi Satellite-based Augmentation System- японският аналог на WAAS) са обединени под общото наименование *SBAS (satellite-based augmentation system)*.

Разработват и усъвършенствани локални системи със земно базиране GBAS (ground-based augmentation system) от типа на LAAS (Local Area Augmentation System). Целта е те да покрият всички високи изисквания за безопасност на полетите, включително до Cat IIIc (автоматично кацане).

Повечето от тези системи в настоящия момент използват кодови измервания (изгладени по фаза) и не удовлетворяват високите изисквания за точност в геодезията. Затова все повече се прилага RTK метода, с измерването на фазата на носещия сигнал. Ограниченията, налагани от характерните грешки на метода, налагат изграждането на мрежи от референтни станции (все по разширяваща се тенденция в последните години). Обикновено, с тази дейност се занимават частни компании или отделни държавни организации, които предоставят данните на потребители с различни изисквания за точност, срещу заплащане. Предимствата на тези синхронно работещи мрежи са: по-висока *надеждност* (reliability), по-дълги успешно определени базови вектори и помалък брой референтни станции. Като примери, могат да се посочат германската SAPOS [15], шведската SWEPOS [16],Кооперативната RTK мрежа на щата Тексас<sup>1</sup>, RTK мрежата с национален обхват в Япония [17, 18].

#### 2.3 Състоянието на проблема в България

По-големите геодезически фирми вече притежават геодезически двучестотни GPS приемници с възможност за извършване на RTK измервания.

Съществува ИНСТРУКЦИЯ № РД-02-20-25 от 20 септември 2011 г. за определяне на геодезически точки с помощта на глобални навигационни спътникови системи, Министерство на регионалното развитие и благоустройството, Държавен вестник, брой: 79, от дата 11.10.2011 г., в която са посочени областите на приложение и изискванията при провеждането на този тип измервания. Всички производители на GPS приемници също дават свои инструкции за провеждането на този тип измервания, но все още липсват глобални стандарти за контрол на качеството, поради което може да се очаква възникването на приблеми при доказване на точността и узаконяването им пред съответните институции.

Съществува стандарт ISO 17123-8:2007 за тестване и оценка на качеството на GNSS приемниците, използвани в строителството, геодезически и индустриални измервания, за които осигуряваната точност на кинематичния режим в реално време (RTK) е достатъчна. Тестовете в стандарта ISO 17123-8 са предназначени за проверка на конкретен приемник - дали отговаря на спецификациите, посочени от производителя, и не се използват като стандарти за приемане или оценяване на резултатите от конкретните измервания. Софтуер за работа със този стандарт е приложен в експерименталната част на дисертацията.

Публикации от български автори по разглежданите в дисертацията проблеми [20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27]: В България действат две мрежи от референтни станции, които предлагат DGPS/RTK услуги. На фирмата NAVITEQ<sup>2</sup> и на фирмата "Зенит-Гео" и "Trimble"<sup>3</sup>.

#### 3. Теоретична постановка

#### 3.1 Фактори, влияещи на точността на измерванията

В зависимост от използваната апаратура, методиката на обработка на данните и редица други фактори, които са обект на разглеждане в този проект за дисертация, точността на GPS измерванията варира от няколко милиметра до десетки метри. Освен това, на точността влияе и опита на наблюдателя, както и познанията му върху всички компоненти от работата на GPS системата.

Измерените кодови и фазови псевдоразстояния са повлияни от систематични или случайни грешки. Доплеровите измервания се влияят само от измененията на случайните грешки. Различните видове грешки могат да бъдат отделени в три групи:

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> <u>http://txrtk.com/PDFFiles/Network.pdf</u>

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> <u>http://www.naviteq.net/bg/1</u>

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> <u>http://www.geonet.bg/home.html</u>

- Грешки на космическия сегмент на навигационната система (спътниците):
  - грешки в орбитните елементи (ефемеридите на спътниците);
  - грешки в честотно-временното обурудване на спътниците (часовниците);
  - релативистки ефекти.
- Грешки от влиянието на средата на разпространение на спътниковите сигнали:
  - йоносферна рефракция;
  - тропосферна рефракция.
- Грешки в приемната апаратура на потребителя:
  - изменение на фазовия център на антената;
  - грешки в честотно-временното обурудване на приемника (часовниците);
  - шумове в приемната апаратура (антена, приемник);
  - влияние на отразени сигнали (multipath);
  - влияние на преднамерено или непреднамерено излъчени заглушаващи сигнали;
  - греши на оператора.

Повечето от систематичните грешки могат да бъдат моделирани и това води до допълнителни членове в моделите за разрешаване на навигационната задача. Систематичните грешки могат да бъдат елиминирани и чрез подходяща комбинация на измерените величини.

Влиянието на случайните грешки при определяне на псевдоразстоянията (тук се изключват грубите случайни грешки породени от наблюдателя, като неточно въвеждане на височината на антената и др.) са в рамките на:

0.0002-0.005 m.

-	при кодови измервания (С/А- код)	0.1 - 3.0  m
-	при кодови измервания (Р - код)	0.1 - 0.3  m

- при фазови измервания

#### 3.2 Грешки в ефемеридите на спътниците

Този вид грешки е свързан с неточното определяне на параметрите на орбитата на навигационните спътници, а също така и с непредсказуемото изменение на положението на спътниците поради различни случайни фактори. По различни оценки, големината на тези грешки се изменя в интервала 0.6–10 м.

Ефемеридните грешки зависят от времето, изминало от зареждането на спътниците със съответните данни от наземния център за управление.

#### 3.3 Грешки в честотно-времевия тракт на спътниците

Тези грешки са сведени до възможния минимум с използването на високоточни рубидиеви и цезиеви стандарти за време и честота. Всеки спътник от Блок II/IIA съдържа два цезиеви (Cs) и два рубидиеви (Rb) атомни часовника. Всеки спътник от Блок IIR съдържа три рубидиеви (Rb) атомни часовника. Относителната нестабилност на честотата на тези часовници е от порядъка на 10<sup>-13</sup>.

#### 3.4 Релативистки ефекти

Относителното движение на спътниците спрямо GPS приемника, както и разликата в гравитационния потенциал между спътниците и GPS приемника води до допълнителна грешка в измереното псевдоразстояние – така наречените релативистки ефекти. Те се изразяват в смущения в орбитите на спътниците (смущаващо ускорение от порядъка на  $3.10^{-10}$  m/s<sup>2</sup>), разпространеннието на спътниковите сигнали (при определяне на относителното положение грешката е ~ 0.001 ppm) и хода на часовниците на спътниците, породени от природните закони, описани от специалната и общата теория на относителността. Последният ефект се отстранява чрез изменение в основната честота на часовниците на спътниците на 10.22999999545 MHz, която земният GPS приемник ще

приеме като 10.23 MHz – номиналната честота на GPS системата. Другите релативистки ефекти се коригират от софтуера на приемника [28, 29, 30].

#### 3.5 Йоносферни грешки

Тези грешки са свързани с разпространението на електромагнитните вълни по трасето навигационен спътник – потребител. В атмосферата съществуват огромен брой заредени частици, захванати от магнитното поле на Земята. При несмутено магнитно поле, горната граница на атмосферата се разпростира на височина до 2 – 3 земни радиуса. При висока слънчева активност, горната граница на атмосферата се разширява до 20 земни радиуса.

Поради различните физични процеси, свързани с преминаването на радиовълните, атмосферата се разделя на две области:

- *тропосфера* - с височина до 20 км в екваториалните области, 10 км в средните ширини и до 7 км в полярните области,

- йоносфера – частта от атмосферата, намираща се над тропосферата.

Йоносферата причинява дисперсионен (честотно зависим) ефект, зависещ от моментното количество (плътност) на свободните електрони. Количеството на свободните електрони зависи от слънчевата активност, изменяща се циклично с период от 11 години. Броят на слънчевите петна е количествен показател, характеризиращ слънчевата активност и при планирането на високоточни RTK измервания прогнозните данни за 2-3 дневен период трябва да се вземат под внимание. Йоносферният ефект води до лошо следене на спътниците, смущения в каналите за предаване на данни, грешки в определеното положение и при точното решаване на фазовата неопределеност.

Разпространението на сигнала през атмосферата зависи от коефициента на пречупване n ( $n_{ph}$  – фазов коефициент на пречупване;  $n_{gr}$  – групов коефициент на пречупване - тези коефициенти имат отношение, съответно към фазовите и кодовите GPS измервания). (Пояснение: скоростта на разпространение на група вълни със слабо различаващи се честоти се дефинира чрез груповата скорост  $v_{gr}$ :

$$v_{gr} = -\frac{df}{d\lambda}\lambda^2$$

Тази скорост трябва да се разглежда при кодовите измервания [2].

Съответно, фазовата скорост (на носещата честота) се определя от  $v_{ph} = c / n_{ph}$ , а груповата скорост от  $v_{qr} = c / n_{qr}$ ).

Разликата  $\Delta^{\text{Iono}}$  между измереното (s) и геометричното разстояние (s<sub>0</sub>) се нарича йоносферна рефракция:

$$\Delta$$
Iono =  $\int nds - \int ds_0$ 

Тогава, при кодовите и фазовите GPS измервания *йоносферната рефракция* се задава съответно с формулите:

$$\begin{split} \Delta^{Iono}_{ph} &= -\frac{40.3}{f^2} \int N_e ds_0 \ \mathbf{M} \\ \Delta^{Iono}_{gr} &= \frac{40.3}{f^2} \int N_e ds_0 \ , \end{split}$$

J където  $N_e$  е броят на електроните в кубичен метър (т.е. електронната плътност) по трасето на разпространение на сигнала [2].

Дефинирайки пълното съдържание на електрони – ТЕС като:

$$TEC = \int N_e ds_0$$

можем да запишем:

$$\Delta_{ph}^{Iono} = -\frac{40.3}{f^2} TEC^{W}$$
$$\Delta_{gr}^{Iono} = \frac{40.3}{f^2} TEC.$$

Обикновено *TEC* се задава в единици *TECU* (1 *TECU* =  $10^{16}$ ) и по начина, дефиниран в (3.1) означава общото съдържание на електрони в стълб с напречно сечение 1 м<sup>2</sup> по протежение на пътя от спътника до приемника. От практични съображения се дефинира *вертикалното пълно съдържание на електрони* (*VTEC*) – пълното съдържание на електрони по вертикалата. Тогава за произволни визирни линии трябва да се отчита и зенитния ъгъл на спътника (Фиг. 3.):

$$\Delta_{ph}^{Iono} = -\frac{1}{\cos z'} \frac{40.3}{f^2} VTEC \text{ M}$$
$$\Delta_{ph}^{Iono} = \frac{1}{\cos z'} \frac{40.3}{f^2} VTEC$$

Намаляването на йоносферните грешки се осъществява по няколко начина:

- моделиране на трасето спътник потребител
- двучестотни измервания
- едночестотни измервания, при наличието на излишък от данни.

Информация за йоносферата може да се получи и от CODE – Center for Orbit Determination in Europe – един от центровете за анализ на IGS (International GPS Service for Geodynamics) на адрес<sup>4</sup>.

#### 3.6 Тропосферни грешки

Разпространението на електромагнитните сигнали с честота до 15 GHz през тропосферата е честотно независимо, поради което не може да се елиминира тропосферната рефракция (тропосферното закъснение на сигналите) с използване на двете честоти L1 и L2.

Тропосферното закъснение [2] се дефинира чрез:

$$\Delta^{Trop} = \int (n-1) ds,$$

където *n* е коефициента на пречупване, а интегрирането се извършва по геометричния път на сигнала. Обикновено се използва аналогичната формула:

$$\Delta^{Trop} = 10^{-6} \int N^{Trop} \, ds,$$

където  $N^{Trop} = 10^6 (n-1).$ 

В зависимост от влиянието, което оказва на разпространението на сигналите, тропосферата може да бъде разделена на два компонента – суха (доминираща с 90% принос в закъснението на сигнала)  $N_d^{Trop}$  и мокра  $N_w^{Trop}$  (наличието на водни пари) - 10%. Тогава [36]:

$$N^{Trop} = N_d^{Trop} + N_w^{Trop} ,$$

и съответно:

$$\Delta^{Trop} = \Delta_d^{Trop} + \Delta_w^{Trop} = 10^{-6} \int N_d^{Trop} \, ds + 10^{-6} \int N_w^{Trop} \, ds$$

За определяне на сухата и мократа компонента на тропосферната рефракция се използват много модели, като най-голямо приложение намира моделът на Хопфийлд (Hophield (1969)):

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> http://www.aiub.unibe.ch/ionosphere/

$$\Delta_d^{Trop}\left(E\right) = \left(\frac{10^{-6}}{5}\right) \frac{77.64 \frac{p}{T}}{\sin\sqrt{E^2 + 6.25}} [40136 + 148.72(T - 273.16)]$$
$$\Delta_w^{Trop}\left(E\right) = \left(\frac{10^{-6}}{5}\right) \frac{-12.96T + 3.718.10^5}{\sin\sqrt{E^2 + 2.25}} \frac{e}{T^2} 11000,$$

където:

*Е* е височината на станцията на наблюдение (изразена в градуси), а визирната линия е опростена до права линия,

р е атмосферното налягане (в милибари mb)

*Т* е температурата в градуси по Келвин (К), а

*е* е парциалното налягане на водните пари в mb.

Измервайки *p*, *T* и *e* в мястото на наблюдение и изчислявайки вертикалния ъгъл *E*, получаваме общото вертикално закъснение (в метри) сумирайки двете формули от (2.4).

Съществуват и много други модели – модифициран модел на Хопфийлд -Remondi (1984) [37], модел на Саастамойнен [38], модели, използващи функцията на изображение на Марини [39] и др [40, 41].

Причината за съществуването на толкова много модели за тропосферата е трудността при моделирането на налягането на водните пари. Само с измервания на температурата, налягането и влажността в района на наблюденията не може да се постигне необходимата точност.

Използването на тропосферен модел позволява да се оцени закъснението на сигнала с точност до няколко наносекунди (без използването на тропосферен модел, грешката нараства до няколко десетки наносекунди) [42].

#### Локални метеорологични ефекти

• Ефект от снега върху радиопрозрачното покритие на GPS антената

• Силна зависимост от височината на спътниците над хоризонта, когато антената е покрита със сняг: локални рефракционни ефекти

#### 3.7 Грешки от преднамерени и непреднамерени електомагнитни смущения

Тези грешки са едни от най-сериозните при определяне на положението в реално време. Смущенията могат да бъдат естествени или специално организирани (преднамерени). Естествените смущения са свързани с характера на електромагнитната обстановка в района на приемане на сигналите (радиоемисии в същата или близка честотна лента и хармонични сигнали от различни други източници, като радио и телевизионни предаватели, линиите за високо напрежение, мобилни телефони, радарни системи, радиообурудването на колите на полицията и бърза помощ и др.). Намаляването им до приемливи размери се регламентира от стандартите за електромагнитна съвместимост.

Преднамерените смущения представляват умишлено създадени сигнали, с цел изкривяване и заглушаване на полезните сигнали. Един от методите за борба с тези смущения е пространствената филтрация, при който се използват специални антени (адаптивна антенна решетка), която подавя смущаващите сигнали, без да въздейства на полезните сигнали от спътниците. При критични приложения (например, свързани с безопасността на полетите) е необходима и специална апаратура за детектиране и локализиране на източника на преднамерени смущения.

#### 3.8 Грешки причинени от въздействието на отразени сигнали

В антената на потребителя, освен преките сигнали от спътниците, могат да постъпват и отразени сигнали от земната повърхност или от различни обекти. В резултат на това, на входа на

приемника постъпват няколко сигнала, което води до допълнителни грешки в идентификацията на полезния сигнал, а след това и при определянето на точното положение.

Съществуват три метода за намаляване на влиянието на тези грешки:

• Поставянето на антената на добре проучена точка, където приемането на отразени сигнали е невъзможно, или тяхната интензивност е малка.

- Хардуерни и програмни методи за обработка на сигналите.
- Специален дизайн на антената на приемнка.

Ефектите, дължащи се на влиянието на отразени сигнали се изразяват в периодични отклонения в измерванията и определеното положение (ако в решението участват едни и същи спътници на едно и също място, в едни и същи периоди от време, изместени с 4 минути напред за следващия ден). При кинематичните режими, поради непрекъснатото изменение на положението на антената, отразените сигнали оказват по-малко влияние на точността на измерванията, в сравнение със статичните режими.

Други възможни ефекти причинени от отразени сигнали

• Дълговременно въздействие на отразени сигнали (long-term multipath).

• Разсейването на радиовълните в околността на антената комбинирано с бавно променящата се геометрия на спътниците може да предизвика дълговременно отместване на фазовия център на антената

#### 3.9 Грешки от шумовете в хардуера на приемника

Тези грешки се определят от качествените решения, заложени в апаратурата на потребителя и методите за обработка на сигналите. Те зависят от характеристиките на антенно-фидерния тракт, дизайна и взаимната шумозащитеност на отделните модули в приемника, дизайна на корелаторите и другите съставящи електронни модули. В някои приемници могат да достигнат и до няколко метра при определяне на псевдоразстоянието<sup>5</sup>.

Ефективността (качеството) на приемника е функция на броя на видимите спътниците, времето на измерване, условията на измерване, обструкциите, дължината на базовия вектор и влиянието на околната среда (атмосферни, йоносферни ефекти, температура, налягане, вибрации и др.) и следователна, фактическата ефективност ще варира с промяната на тези фактори.

Затова е много важно да се разбере какво може да се очаква от приемника при промяната на условията и как той се държи в неблагоприятна среда.

Най-често използваните критерии за качеството на полезния сигнал са съотношението сигнал/шум (SNR - *signal-to-noise-ratio*) и плътността на мощността на отношението носеща честота/шум ( $C/N_0$  - *carrier-to-noise-power-density ratio*).  $C/N_0$  се дефинира, като отношението на мощността на сигнала към мощността на шума в честотна лента от 1 Hz.  $C/N_0$  се разглежда като основен параметър, описващ качеството на работата на GPS приемника (до колко добре той може да разпознае и обработи приетия сигнал) и неговата големина определя до голяма степен точността на кодовите и фазовите измервания.

Вътрешни за приемника фактори, които влияят на SNR и C/N<sub>o</sub> ca:

- *термичен шум* - Това е най-основния вид шум, генериран от движението на електроните във всеки материал с температура над абсолютната нула.

- изглаждането и корелацията на данните в приемника - повечето от приемниците извършват осредняване (или изглаждане) на данните за някакъв период от време и така ги правят статистически зависими. Това на практика означава, че шума в едно единично измерване е почти идентичен със другите близки измервания и новата точка от данните няма да внесе значима допълнителна информация. Т.е. средната квадратна грешка извлечена от тези данни ще зависи от степента на изглаждане при обработката. Още по-комплицирано е положението при двучестотните

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> <u>http://www.cfm.ohio-state.edu/research/webreceivers/performance.htm</u>

приемници използващи различни техники (безкодови или квази-безкодови) за достъп до честотата L2 под въздействието на Anti-Spoofing (AS). Тези техники внасят допълнителна корелация в данните използвани от високоточните геодезически приемници.

#### 3.9.1 GNSS приемници

Съвременните навигационни приемници са аналого-цифрови системи [43].

Преходът към цифрова обработка се осъществява на една от междинните честоти, като тенденцията е аналого-цифровото преобразуване да става на все по-висока честота.

GPS/GLONASS приемникът се състои от четири функционални части [44]:

- антенна система
- радиочестотна част
- цифров блок за корелационна обработка
- навигационен процесор.

При конструирането на приемниците се отчитата коефицентът на шума и коефициентът на усилване на всяка каскада и Q-фактора на лентовите филтри. Тези характеристики се определят, изхождайки от мощността на сигналите на входа на антената, от чувствителността на приемника и от неговия динамичен диапазон.

#### 3.10 Грешки в честотно-времевия тракт на приемника

#### 3.10.1 GNSS часовници – общи бележки

Всеки стандарт за време и честота (високоточен часовник), генериращ честота  $v_0$ , генерира и смущения и грешки, имащи не само случаен, но и систематичен характер. За описанието на отклоненията на характеристиките на реалния стандарт от предполагаемите идеални характеристики се използват понятията *точност*, *прецизност* и *стабилност* (Фиг. 6).



Фиг. 6 Точност, прецизност и стабилност [151].

Точността е мярка за способността на стандарта да генерира честота, съотношението на която с идеалната  $v_0$  е известно възможно най-точно. Тази способност може да бъде оценена само чрез щателно изследване на всички възможни смущаващи ефекти. Всяко потенциално отместване от предполагаемата номинална величина  $v_0$  се нарича *отклонение*. Резултатите от изследването на всички отклонения и техните неопределености обикновено се описва в *списък на грешките*, а комбинацията от неопределеностите на отклоненията и съответстващите им тежести представлява оценка, наричана *точностна характеристика* на изследвания стандарт. Под *прецизност (разсейване)* се разбира степента на съгласуваност на данните със средната стойност на извадката, а под *стабилност* - степента на изменение на измерваната величина във функция на определени параметри като време, температура, вибрации, удари, радиация и др. Във времевата област може да бъде описана с дисперсията на ред от измервания, разглеждан като времеви ред.

Разработени са статистически модели и методи за анализ [48], отчитащи типа на флуктуационните спектри, дължината на отделните извадки и "мъртвото време" между измерванията. Анализът във времевата област (т.е. определянето на дисперсиите и стандартните

отклонения във функция от времевата извадка) е най-подходящ при изследването на бавни флуктуации. Съществува и промеждутъчен диапазон, където е възможно използването и на двата метода [49].

Точното познаване на хода и другите метрологични характеристики на вътрешния часовник дава възможност за предвиждане на отместването на вътрешната скала за време и получаването на адекватно решение за известен период от време, дори и при наличието на само три видими спътника [52]. Определените параметри на часовника в период с повече спътници и добра геометрия (добър GDOP - Geometric Dilution of Precision) (геометричен фактор за загуба на точност) могат да се използват след това в период с лоша геометрия на спътниците [53]. Дори и при повече видими спътници, по-стабилният осцилатор осигурява по-добро решение от гледна точка на точността, достъпността до системата (availability) и надеждността (reliability).

От изследването на характеристиките на часовниците на GPS приемниците могат да се направят следните изводи [58]:

• Грешката във вертикалната компонента е почти линейно корелирана с грешката в отместването на часовника. Колкото по-голям е VDOP, толкова по-корелирани са двете грешки.

• Хоризонталните грешки са почти независими от грешката на часовника, когато геометрията на спътниците е добра. Колкото е по-лоша геометрията на спътниците, толкова тези две грешки са по-корелирани с грешката на часовника.

• Високостабилен часовник, използван от приемника, подобрява вертикалната компонента на решението. При лоша геометрия на спътниците, могат да бъдат подобрени и хоризонталните компоненти.

В диференциален режим, грешката на часовника на подвижния приемник може да се раздели на две части – грешката на часовника на базовата станция и грешката при синхронизацията със системното GPS време.

#### 3.10.2 Метрология на часовниците

Основен фактор определящ точността на формиране на скалите за време и тяхната синхронизация в различните радиотехнически системи е характеристиката на нестабилността на честотата на задаващите генератори [59].

Поради различни причини, истинската стойност на честотата на генератора се отличава от номиналната стойност  $f(\tau) = f_0 + \Delta f(\tau)$  и формираната скала за време не съвпада с истинската:

$$T(t) = t + \int_{0}^{t} \frac{\Delta f(\tau)}{f_0} dt = t + \Delta T(t)$$

където  $\Delta T(t)$  е грешката (отклонението) на формираната скала за време.

Като ефективен модел, описващ относителното отклонение на истинската стойност на честотата на генератора от номиналната стойност, широко се използва изразът:

$$\Delta f(t)/f = \Delta f(t)/f_O + \beta(t) + \gamma(t) + v(t),$$

където  $\Delta f(t)/f_o$  е началното относително отклонение на истинската стойност на честотата на генератора;  $\beta(t)$  е коефициент, характеризиращ систематическото изменение на истинската стойност на честотата на генератора във времето;  $\gamma(t)$  е случайното изменение на честотата, обусловено от процеси в самия генератор, а v(t) е изменението на честотата, причинено от влиянието на външната среда –температура, атмосферно налягане, механически въздействия, магнитно поле, радиация.

Изменението на честотата на генераторите, причинено от факторите на външната среда, се описва с нелинейни функции и отчитането им обикновено е затруднено. На практика се приемат

специални мерки за отстраняване на влиянието на тези фактори. Затова, можем да приемем, че v(t) = 0, а възможното остатъчно влияние да разглеждаме като случайно изменение на честотата.

В практиката, основно, съществуват два подхода (във времевата и честотната област) при дефинирането на относителна мярка за стабилността на честотата на изследвания генератор.

Мигновеното изходно напрежение на генератора може да се опише с:

$$V(t) = [V_0 + \varepsilon(t)]\sin[2\pi v_0 t + \phi(t)],$$

където  $V_0$  и  $v_0$  са съответно номиналната амплитуда и честота, а  $\varepsilon(t)$  и  $\phi(t)$  са отклоненията на амплитудата и честотата от номиналните им стойности. При условие, че  $\varepsilon(t)$  и  $d\phi / dt$  са достатъчно малки за целия период t, относителното мигновено отклонение на честотата от номиналната се определя като:

$$y(t) = \frac{1}{2\pi v_0} \frac{d\phi}{dt}$$

Тогава, като мярка за стабилност в честотната област се приема едностранната спектрална плътност  $S_y(f)$  на зависещата от времето променлива y(t) (power law spectral densities):

$$S_{y}(f) = 4 \int_{0}^{\infty} R_{y}(\tau) \cos(2\pi f \tau) d\tau,$$

където  $R_y(\tau) = s \langle y(t)y(t-\tau) \rangle$  е автокорелационната функция на y(t), а  $\langle \rangle$  означава усредняване в безкрайни граници, а f е съответната честота на Фурие.

При описанието на случайните изменения на честотата във времевата област, средната стойност се приема  $M[\gamma(\tau)] = 0$ , а за мярка служи дисперсията на тези случайни изменения за времето т. Най-голямо разпространение са получили следните два вида дисперсии [60]:

N – извадкова:

$$\sigma_{y}^{2}(N,T,\tau) = \left\langle \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N} \left( \overline{y}_{n} - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} \overline{y}_{k} \right)^{2} \right\rangle$$

и двуизвадкова дисперсия на Аллан:

$$\sigma_{y}^{2}(\tau) = \left\langle \sigma_{y}^{2}(2,\tau,\tau) \right\rangle = \left\langle \frac{\left(\overline{y}_{k+1} - \overline{y}_{k}\right)^{2}}{2} \right\rangle$$

където:

$$\overline{y}_k = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_{k+\tau}} y(t) dt$$

е к-тата отделна извадка, усреднена по времето  $\tau$ , T е интервалът от време между началните моменти на две последователни извадки ( $t_{k+1} = t_k + T$ ) и (T- $\tau$ ) е следователно, "мъртвото време" между измерванията. N е броят на извадките при изчисляването на дисперсията. За дискретни сигнали, каквито са сигналите, които реално обработваме, тези две дисперсии се задават с формулите:

$$\begin{split} \sigma_{\nu}^{2}(N,T,\tau) &= \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} \left[ (\Delta f/f) i(\tau) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left( (\Delta f/f) \right) i(\tau) \right]^{2}, \\ \sigma_{\nu}^{2}(2,\tau,\tau) &= \frac{1}{2(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} [(\Delta f/f) (i+1)(\tau) - (\Delta f/f) i(\tau)]^{2}, \end{split}$$

където N е броят на измерванията, T е "мъртвото време" между отделните измервания, ( $\Delta f/f$ ) $i(\tau)$  е резултатът от измерването на честотата в момента  $\tau$  относно опорен генератор с много по-добри характеристики от тези на изследвания.

Предимството на двуизвадковата дисперсия на Аллан е приближаването към "истинската" дисперсия  $\sigma^2_{V}(\tau)$  при  $N \to \infty$  за всички пет вида случайни изменения на честотата (шумове) на генератора, докато N – извадковата дисперсия зависи от N и T. Между двете дисперсии съществува връзка, която позволява да се преминава от единия вид дисперсия към другия:

$$E(N,\alpha) = \sigma^2_{\nu}(N,T,\tau) / \sigma^2_{\nu}(2,\tau,\tau)$$

Зависимостта на  $\sigma^2_{V}(N,T,\tau)$  или на  $\sigma^2_{V}(2,\tau,\tau)$  от  $\tau$ , построена в логаритмичен мащаб, с достатъчна степен на точност показват вида на шумовете на генератора в различните мащаби от време (Фигура 7).

Причината за ограничаването на броя на извадките до N = 2 не е само в простотата на пресмятанията, но също и във факта, че обобщената дисперсия с N извадки няма крайна стойност, когато  $N \rightarrow \infty$  за най-често срещаните типове спектри на шумовете.



Фигура 7. Дисперсията на Алан позволява да се определи доминиращият шум в генератора [116]



Фигура 8. Различни видове шумове, генерирани от източника на честота.

Влиянието на различните на шумове в генератора (Фигура 8): бял фазов шум (white PM noise – W PM), бял честотен шум (white FM noise – W FM), трептене на фазата (flicker PM noise – F PM), трептене на честотата (flicker FM noise – F FM), случайно блуждаене на честотата (random walk noise - RWN) (Фиг.7) може да бъде сведено до достатъчно реалистичен модел, който описва спектралната плътност  $S_v(f)$  с първите членове от степенния ред:

$$S_{y}(f) = h_{-2}f^{-2} + h_{-1}f^{-1} + h_{0} + h_{1}f^{1} + h_{2}f^{2}$$

при  $0 \le f \le f_h$  и  $S_y(f) = 0$  при  $f > f_h$ , като при това,  $f_h$  - горната граница на честотата трябва да е приемлива и за съответния измервателен прибор.

За този модел от честотната област съществува проста връзка с времевата област [61].

За всеки член на  $S_y(f)$  от вида  $h_{\alpha} f^{\alpha}$ , съответствуващата дисперсия  $\sigma_y^2(\tau)$  е пропорционална на  $\tau^{\mu}$ , като:

$$\mu = -\alpha - 1$$
 за  $-3 < \alpha < 1$  и  
 $\mu = -2$  за  $1 \le \alpha$ .

В повечето случаи в реалния генератор присъстват няколко различни процеса, създаващи шумове, водещи до появата на един или няколко члена от вида  $h_{\alpha} f^{\alpha}$ .

Ако тези процеси са некорелирани, то сумарната (пълна) спектрална плътност и съответстващата дисперсия могат да бъдат получени с простото добавяне на членове.

В Таблица 1. са показани типичните членове, описващи различните видове шумове.

	Фаза	Честота	
α			μ
-2	-	случайно блуждаене (random walk - RW)	1
-1	-	трептене на честотата (flicker FM noise)	0
0	случайно блуждаене (random walk - RW)	бял честотен шум (white FM noise W FM)	-1
1	трептене на фазата (flicker PM noise - F PM)	-	-2
2	бял фазов шум (white PM noise –W PM)	-	-2

Таблица 1. Връзката между моделите от честотната област и времевата област

Понякога се срещат и други типове шумове, като *разходящ, трепящ и случайно блуждаещ* (divergent flicker walk noise) ( $\alpha$ =-3) и *случайно пробягващ* (*преминаващ*) (random run noise) ( $\alpha$ =-4).

Изразът, определящ грешката на формираната скала за време от сигналите на задаващия генератор има вида:

$$\Delta T(t) = \Delta T_{0} + \Delta f t / f + \beta t^{2} / 2 + \varepsilon(t), \qquad (3.1)$$

където  $\Delta T_0$  е грешката в началното установявяне на скалата за време спрямо опорната скала, а  $\varepsilon(t) = \int_0^t \gamma(t) dt$  е случайната съставяща, обусловена от случайните изменения на честотата на генератора.

Като отчетем, че M[γ(τ)] = 0, за средната стойност и дисперсията на случайната съставяща на отместването на скалата за време, можем да запишем:

$$\begin{array}{c} \mathbf{M}[\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{T})] = \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\sigma}^{2}[\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{t})] = \mathbf{t}^{2}\boldsymbol{\sigma}_{\nu}^{2}(\mathbf{t}) \end{bmatrix} \end{array}$$

Следователно, отклонението на истинската стойност на честотата на генератора от номиналната и нейното изменение във времето, води до систематическа (детерминирана) съставяща грешка във формираната скала за време, а наличието на случайно изменение на честотата – до случайна съставяща грешка. Горните изрази позволяват да се оцени възможната точност на формираната скала за време от сигналите на задаващия генератор.

Увеличаването на автономността на функциониране на системите за синхронизация все почесто се обезпечава с използването на статистически методи за обработка на времевата информация и оптимизация на алгоритмите за управление. Тези методи се базират на решаването на задачата за идентификация и прогнозиране на процеса на формиране на скалата за време от сигналите на задаващия генератор. За тяхното осъществяване най-често се използват:

- 1) Методът на най-малките квадрати (МНМК).
- 2) Обобщеният модел на авторегресия с пълзящо средно.
- 3) Калманов филтър.

#### 3.11 Други фактори, влияещи на точността на измерванията

Шифроване (засекретяване) на сигнала (Anti-Spoofing - A/S) Работоспособност на спътниците (Satellite Health)

Параметър, определящ точността на измереното псевдоразстояние от спътника до ползвателя (URA – User Range Accuracy)

Разполагане на антената

#### Параметрите на съхраняваните данни [99]

• *Маска на PDOP* – позволява да се зададе максимална допустима стойност на PDOP. За получаване на сантиметрова точност, някои приемници изискват да се въведе маска на PDOP = 4.

• *Нивото на сигнала (SNR - signal-to-noise ratio)* Съществуват четири най-разпространени причини, които водят до отслабване на спътниковите сигнали:

- Сигналът достига до антената след преминаване през препятствие (например, корони на дървета);

- Сигналът се отразява от някаква повърхност и достига до фазовия център на антената не по права линия (multipath);

- Колкото по-ниско е разположен спътникът над хоризонта, толкова по-слаб сигнал достига до антената, тъй като преминава по-дълъг път през йоносферата и тропосферата;

• Маска на височината на спътника – това е ъгълът, под който спътниците не се използват.

#### 3.12 Диференциални грешки на измереното псевдоразстояние

Разликите между предадените диференциални поправки и измерените грешки от потребителя се наричат *диференциални грешки* на измереното псевдоразстоянието. Те могат да се разделят на три типа:

- Зависещи от разстоянието между референтния и подвижния приемник грешки (йоносферни и тропосферни грешки и грешки от ефемеридите на спътниците)

- Зависещи от времето грешки, причинени от закъснението на поправките. Този ефект се нарича латентност.

- *Некорелирани грешки* – Тези грешки не са общи за *референтната станция* и подвижния приемник и не могат да бъдат коригирани от DGPS/RTK метода (влиянието на отразени сигнали, измененията във фазовия център на антените, шумове в приемниците, местни заглушаващи сигнали).

Фирмите производителки на GPS обурудване вземат специални мерки, за да намалят ефекта от тези диференциални грешки, но редица проблеми остават все още нерешени. Това се отразява най-вече на коректното решение на фазовата неопределеност за средни и дълги базови вектори.

#### 3.13 Моделите за прецизното опредляне на положението с GPS

Точността на измерените псевдоразстояния и достоверността на моделите, използвани за обработката на тези измервания, определят до голяма степен и точността на определените координати на GPS приемника [63].

Моделът за определяне на положението може да бъде представен (опростено) в матричен вид:

#### $\Delta P_c = A \Delta x + e_c$ ,

където:  $\Delta P_c$  - е **n**-мерен вектор на разликите между измерените и приблизителните псевдоразстояния изчислени за точката на линеаризация,  $\Delta x$  е четириелементен вектор на неизвестните – отместванията на трите координати на приемника и отклонението на часовника; **A** е матрицата на частните производни от псевдоразстоянията, диференцирани по неизвестните, с размер **n** x 4; **e**<sub>c</sub> - е **n**-мерен вектор на грешките от измерването и на всички останали грешки.

Приемникът (или софтуерът за обработка) пресмята матрицата с помощта на МНМК (Метод на най-малките квадрати), в резултат на което се получава следното решение:

#### $\Delta x = - (A^T W A)^{-1} A^T W \Delta P_c,$

където W е матрицата на тежестите, която определя количествено характера на грешките в едновременните измервания и степента на корелация между тях. Тази матрица е еквивалентна на  $\sigma_0^2 C_{\Delta Pc}^{-1}$ , където  $C_{\Delta Pc} - e$  ковариационната матрица на грешките в псевдоразстоянията, а  $\sigma_0^2 e$  мащабиращ фактор, известен като *априорна дисперсия за тежест единица* (priori variance of unit weight). По принцип, за достигането на верен резултат при решаването на нелинейни задачи, трябва да бъдат изпълнени няколко итерации.

От закона за разпространение на грешките, известен още като ковариационен закон, може да се определи доколко грешките в измерените псевдоразстояния и геометрията на спътниците влияят на точността получените координатите на приемника и отклонението на часовника. Той има следния вид:

$$\mathbf{C}_{\Delta \mathbf{X}} = [(\mathbf{A}^{\mathrm{T}} \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^{\mathrm{T}} \mathbf{W}] \mathbf{C}_{\Delta \mathbf{P}_{\mathrm{c}}} [(\mathbf{A}^{\mathrm{T}} \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^{\mathrm{T}} \mathbf{W}]^{\mathrm{T}} = (\mathbf{A}^{\mathrm{T}} \mathbf{C}_{\Delta \mathbf{P}_{\mathrm{c}}}^{-1} \mathbf{A})^{-1},$$

където  $C_{\Delta x}$  е ковариационната матрица за оценка на параметрите.

Доколкото поправките към неизвестните, получени по МНМК, просто се добавят към първоначалните оценки за неизвестните в точката на линеаризация (линейна операция), то оценките на параметрите ще имат същата ковариантнност. Тогава диагоналните елементи на матрицата  $C_{\Delta x}$ , ще представляват дисперсията на координатите на приемника и отклонението на часовника, а недиагоналните елементи (ковариации) ще показват степента на корелация на тези оценки.

За да се получи оптимално решение с помощтта на МНМК е необходимо коректно да се изберат *функционалния* (детерминистичен) и *стохастичните* GPS модели. Функционалният модел определя връзката между наблюдаваните и определяните (неизвестни) параметри, докато стохастичните модели представят характеристиките на шумовете в измерванията. Изборът на найподходящ стохастичен модел е по-труден в сравнение с избора на функционалния модел при дълги базови вектори и при кинематичните измервания [64].

Некоректните стохастични модели правят трудно решаването на фазовата неопределеност. Това се отразява на правилното определяне на параметрите на решението [65].

Стохастичните модели са включени, основно, в три етапа от обработката на GPS данните – контрола на качеството и сигурността на измерваните величини, отстраняването на фазовата неопределеност и обработката на измерванията с помощта на МНМК.

Некоректните стохастични модели правят трудно решаването на фазовата неопределеност. Това се отразява на правилното определяне на параметрите на решението [65].

Когато разглеждаме стохастичен модел, обикновено имаме предвид варианц-ковариационната матрица. За да получим тази матрица, трябва да определим корелацията между наблюдаваните величини в данните от времевата извадка. Различават се два вида корелации – физическа и

*математическа*. Обикновено физическата корелация се пренебрегва, но при високоточното позициониране в реално време, тя трябва да се има предвид. В GPS наблюденията, обикновено се срещат три типа физическа корелация:

- Крос-корелация между наблюдаваните величини (наблюденията на фазата на носещите честоти L1 и L2 и псевдоразстоянията, измерени по C1, P1 и P2).

- Времева корелация между съседните измервания.

- Пространствена корелация между всички възможни едновременни измервания.

Възможна е и физическа корелация между отделните канали на приемника.

Ако приемникът, при обработката на наблюденията, използва моделите с двойни и тройни разлики се появява и математическа корелация.

Съществуват няколко подхода, които могат да осигурят достатъчно реалистичен стохастически модел. Сравнение на качествата на тези модели може да се намери в работите на Langley (1997) [66] и *Tiberius et al.* (1999) [67].

В разгледаните подходи могат да се откроят три основни проблема: празноти в пълната варианц-ковариационна матрица; неотчитане на времевата корелация в данните и липса на достатъчен излишък от данни за приложенията работещи с дълги базови вектори.

#### 3.14 Мрежи от референтни станции

Световна тенденция, в настоящия момент, е разгръщането на мрежи от перманентно действащи референтни станции, вместо една самостоятелно действаща референтна станция. Предимствата се изразяват в общото увеличение на надеждността на позициониране в реално време, също така и за средно дълги разстояния и при неблагоприятни атмосферни условия.

Като пример за такава мрежа може да се посочи тази на Geo++®, която от началото на 1990 разработва софтуер в областта на мрежите от референтни станции [68, 69].

Разработките са с цел да се предскаже и представи пълния модел на състоянието на всички физически параметри, участващи в измерванията и да се даде възможност на подвижната система автономно да прилага информация за състоянието им или извадка от необходимите параметри.

#### Концепция за изчисление на параметрите без образуване на разлики от наблюденията

Линейните комбинации от GPS наблюденията се използват за отстраняване на определени грешки. Освен това намаляват ефекта от корелацията между различните грешки.

При разглеждания подход на Geo++® GNSMART не се използват разликите (единични, двойни тройни) между наблюденията. Следователно необходимо е да се моделират и изчислят всички компоненти на грешките, включително грешките от часовниците. Така получената информация при обработката на GPS наблюдения, без образуване на разлики, води до подобряване на резултатите. Този метод е по-строг в сравнение с метода, при който се образуват двойни разлики и където корелацията при използването на множество от станции обикновено се пренебрегва при изравнението. При двойните разлики се елиминират някои грешки, но и се губи информация.

#### Уравнения на наблюденията

Уравнението на наблюденията за псевдоразстоянието *PR*, получено от фазови измервания, е нелинейна функция на геометричното разстояние  $\left| \overrightarrow{R_{k}^{k}} \right|$ 

$$\left| \overrightarrow{R_i^k} \right| = \overrightarrow{X^k} - \overrightarrow{X_i}$$
(3.14.1)

между предполагаемия фазов център на антената на спътника k и приемника i, целочислената фазова неопределеност  $N_{si}^k$ , няколко отклонения ( $\delta B_{si}^k$ ), които ще бъдат разгледани по-долу и случайните грешки на измерванията  $\varepsilon_{si}^k$ :

$$PR_{si}^{k} = \left| \overrightarrow{R_{i}^{k}} \right| + \lambda_{s} N_{si}^{k} + \delta B_{si}^{k} + \varepsilon_{si}^{k}$$
(3.14.2)

За всеки сигнал *s*, който се предава от радионавигационен спътник се съставя по едно наблюдателно уравнение. Трябва да се въведат различните дължини на носещите вълни  $\lambda_s^f$  за всеки спътник. Всички грешки в (3.14.2) и в следващите уравнения се представят като грешки на разстоянието. Тъй като всички величини са зависими от времето, не е показан съответният индекс. Отклоненията описани по-долу се отнасят за остатъчните отклонения на модела.

Членът  $\delta B_{si}^k$  обхваща всички часовникови грешки  $\delta C_{si}^k$ , систематичното влияние в зависимите от разстоянието грешки  $\delta D_{si}^k$ , грешките на станцията  $\delta S_{si}^k$ :

$$\delta B_{si}^k = \delta C_{si}^k + \delta D_{si}^k + \delta S_{si}^k \tag{3.14.3}$$

Времето на излъчване на сигнала от спътника и времето на неговото получаване от приемника се огрешават от часовниковите грешки  $\delta t^k$  и  $\delta t_i$ , както и закъсненията на сигнала  $\delta d_s^k$  и  $\delta d_{si}$  от спътника и приемника, съответно:

$$\delta C_{si}^{k} = \delta t_{i} + \delta d_{si} - \delta t^{k} - \delta d_{s}^{k} = \delta C_{si} - \delta C_{s}^{k}$$
(3.14.4)

Векторът на орбитните грешки  $\delta \vec{o^k}$ , заедно с промените в разпространението на сигнала, причинени от йоносферата  $\delta I_{si}^k$  и тропосферата  $\delta T_i^k$ , образуват следното зависимо от разстоянието отклонение:

$$\delta D_{si}^{k} = \frac{\overrightarrow{R_{i}^{k}}}{\left|\overrightarrow{R_{i}^{k}}\right|} \delta \overrightarrow{o^{k}} + \delta I_{si}^{k} + \delta T_{i}^{k}$$
(3.14.5)

 $\delta D_{si}^k$  не се включва само при къси базови вектори. Изчислението на тези пространствено и времево зависими грешки е ключов момент за прецизно позициониране в реално време. Успешното моделиране при мрежите от референтни станции подобрява фиксирането на неопределеностите, като съкращава времето за фиксирането им (TTFA - time to fix ambiguity) и значително повишава надеждността. Позициониране на сантиметрово ниво е осъществимо също и при по-големи разстояния между станциите.

Изменението на фазовия център на антената на приемника (PCV- phase center variations)  $\delta A_{fi}^k$  и приемането на отразени сигнали  $\delta M_{si}^k$  са зависими от разположението на станцията. Вариациите на фазовия център  $\delta E_{fi}^k$  и приемането на отразените сигнали  $\delta W_{si}^k$  от антената на спътника са също включени в члена  $\delta S_{si}^k$ , въпреки че те все още не се взимат под внимание в практиката:

$$\delta S_{si}^k = \delta A_{fi}^k + \delta M_{si}^k + \delta E_{fi}^k + \delta W_{si}^k \tag{3.14.6}$$

Основната характеристика на компонентите в този израз, които зависят от положението на станцията е, че те не са корелирани със съответните компоненти за друга станция. По тази причина, те трябва да се редуцират, поправят или да се пренебрегнат.

*Пространство на наблюденията и пространство на състоянията* (OBSERVATION SPACE AND STATE SPACE) [68, 69]

Определянето на поправки към псевдоразстоянията и фазовите измервания представлява много по-гъвкав подход при диференциялното позициониране и поради тази причина, те са основните параметри на повсеместно прилагания RTCM стандарт. Този тип поправки са еквивалентни на обработка на суровите данни посредством метода с образуване на единични или двойни разлики. Във всеки случай, всички грешки, определени на референтната станция формират един параметър, който описва пълното влияние върху наблюденията. Иначе казано, поправките са дадени в *наблюдателното пространствоо*. Например, при стандартни RTK приложения, един от ограничаващите работата фактори е разстоянието до референтната станция. Друг проблем е възможността специфични за референтната станция грешки, като приемането на отразени сигнали да се предават заедно с поправките. Като алтернативен метод се предлага вече споменатата концепция за *диференциално позициониране в пространствоо на състоянията* (state space domain), базирана на изчислителен процес без образуване на разлики между параметрите. Вместо да се генерира една сумарна грешка за всички влияния, от измерванията за цялата мрежа от референтни станции се определя състоянието на всеки отделен съставен компонент на общата грешка.

Предимствата на метода на измерване на параметрите на състоянието (state space подхода) могат да се обобщят в няколко аспекта. Представянето (в пространството на състоянието) на компонентите на грешките за спътниците и горните атмосферни слоеве вече не е свързано с определена референтна станция (включително виртуална референтна станция) или група от референтни станции.

#### 3.15 Тестване на GPS приемници

#### Методи за качествен контрол на GPS приемниците

#### 3.15.1 Калибровъчни тестове

Три стратегии за тестване могат да се приложат в тази категория:

#### Мониторинг на интегритета (Integrity Monitoring)

Една от стратегиите за мониторинг на интегритета е използването на перманентна мрежа от GPS приемници, разположени на точки с известни координати [72], които следят всички видими спътници и съответните им параметри и изпращат предупредителни съобщения до ползвателите, когато някой от тези параметри излезе извън допустимите граници. GPS приемникът получава тази информация чрез RAIM (Receiver Autonomous Integriti Monitoring) съобщение [74].

#### Тест с нулев базов вектор

Този тест може да се използва за да се изследва точността на различни приемници, тяхната коректна работа, както и работата на съответния софтуер.

Два GPS приемника се свързват с една и съща антена [77, 78].

Когато двата приемника използват една и съща антена, някои от систематичните грешки, като грешките от спътниците (часовници и ефемериди), атмосферните грешки (йоносферни и тропосферни), както и някои други, като влиянието на отразени и/или заглушаващи сигнали взаимно се унищожават при обработката. Качеството на полученото решение, следователно е функция на случайните грешки (или шума) в измерванията и от средата на разпространение, които не са могли да бъдат отстранени от съответния приемник.

Влиянието на остатъчните систематични грешки в решението на базовия вектор, които са функция на неговата дължина не могат да бъдат оценени.

Този тест служи за добра проверка на качеството и функционирането на електронните схеми в приемника, а също така и на качеството на антените [79, 80].

#### Лабораторни калибровъчни тестове

Производителите на GPS апаратура изпълняват голям брой тестове на различните компоненти на приемниците, като кварцовите осцилатори, отделните компоненти на хардуера, вътрешната памет, компонентите на антената, батериите и т.н. Освен това, тези тестове се изпълняват в широк температурен диапазон (примерно от -30°C до +50°C), при различни стойности на атмосферното налягане, ускоренията, вибрациите и в условията на изкуствени заглушаващи сигнали [81, 82].

#### 3.15.2 Сертификационни тестове

## Тестове на Националният под-комитет на Съединените Щати за геодезически контрол (U.S. Federal Geodetic Control Sub-committee (FGCS))

FGCS тества всички GPS приемници, както едночестотните, така и двучестотните, реализирани на пазара. Няма друга организация, която така систематично да тества GPS приемниците по този начин. Така, тя функционира *de facto*, като сертифицираща агенция.

Всички тестове се изпълняват върху мрежа, изградена от 10 станции в околностите на Вашингтон. Базовите вектори варират от 186 m до 105 km. Критерий за оценка на резултатите от измерените базови вектори е сравняването им с високоточни геодезически данни, получени от конвенциални измервания с точност 1-2 ppm и с всички предишни измервания, съхранявани в базата данни на FGCS.

GPS измервания се извършват при условия възможно най-близки до реалните и "суровите" данни се обработват с използването на ефемеридите от алманаха на спътниците.

Въз основа на измерванията на средните бази (от 8 до 105 km) се оценяват зависещите от разстоянието грешки, докато измерванията на късите бази (<2km) служат за оценка на грешките, зависещи от други фактори.

Резултатите се анализират относно: повтарящи се измервания на базата, несъвпаденията по затворени фигури (loop miscloses), пространствено изравнение по МНМК на мрежите като самостоятелни (minimally constrained 3-D Least Squares adjustments), сравнението им с срезултатите, получени от измервания с конвенционална геодезическа техника (comparisons with the terrestrial standard) и сравнението им с предишни FGCS GPS тестове.

#### Тестове, преди изпълнението на дадена мисия

Ако съществуват съмнения в правилното функциониране на GPS екипировката и за да се провери дали хардуерът и софтуерът изпълнявават изискванията за точност на измерванията, могат да бъдат проведени някои локални тестове:

- тест с нулев базов вектор;

- тест върху локална микро мрежа, с цел изпробване на апаратурата, връзката с антената, захранването на приемниците и капацитета на резервните батерии;

- "стандартен" сертификационен тест (виж: Издаване на сертификат за узаконяване на измерванията).

Тези тестове са изцяло прерогатив на екипа, извършващ измерванията и той може да ги осъществи винаги и в размерите, които счете за нужно.

#### 3.15.3 Изследователски тестове

Целта на тези тестове е да се изследва и разбере влиянието на определен феномен върху точността на измерванията, чрез осъществяването на щателно подготвени експерименти. Факторите, влияещи върху точността на измерената база са твърде много и поради това е необходимо ограничаването и стандартизирането на колкото е възможно повече от тях. Това може да бъде осъществено чрез:

- Осъществяваме измерванията само върху един базов вектор, като варираме други фактори, например времетраенето на сесиите, моментът на измерване и т.н.

- Тестване на няколко различни приемника едновременно.

- Използване на едни и същи данни, като варираме определени опции при обработката на данните и дори целия софтуер за да измерим точното влиянието на различните модели и стратегии за обработка.

Въвеждане при тестовете на смущаващи фактори за да се определи реалната точност на приемника в зависимост от възможните външни влияния.

Тестовете включват експерименти за изучаването на:

- цикличности в резултатите на измерената база причинени от изменението на геометрията на спътниците;

- влиянието на различни стратегии за предварителна обработка на данните;

- качеството на "суровите" данни при различни външни условия на измерване;
- използването на различни типове антени;
- влиянието на различните софтуерни пакети за обработка на данните;
- влиянието на различните модели на решение.

Друг тип тестове се стремят да изследват променливостта (вариациите) в решението за базовия вектор. То се влияе от:

- типа наблюдения (и оттук от шума в измерванията);
- наличието на "изкривени" сигнали (водещи до систематични грешки);
- използваните алгоритми (определящи систематичните грешки и точността на решението);

- Други фактори, като: геометрията на спътниците, продължителността на наблюдателната сесия, статична или подвижна антена, дължината на базата и т.н.

#### 3.16 Анализ на времеви редове

Времеви ред е съвкупност от наблюдения, проведени през равни интервали от време върху един и същ обект или явление. В този случай, предположението за статистическа независимост на наблюденията в извадката може да се окаже невярно. Това води до необходимост от прилагането на нови, по-сложни статистически модели, особено когато е необходимо прогнозирането на бъдещото състояние на обекта или явлението.

Анализът на времеви редове е клон от математиката който изследва влиянието на тренда, сезонните изменения и цикличността във времевите редове [89].

Методите на този анализ се опитват да разберат времевите редове, основните процеси, генерирали точките в данните.

Анализът:

• Осигурява по-реалистична оценка на грешките на измерените геодезически параметри.

• Стохастичните модели могат да помогнат за определяне на източника на грешките.

• Стохастичните модели могат да осигурят ключ към обяснението на физичните процеси довели до наблюдавания феномен.

Анализът на времеви редове получени от GPS измервания е важно допълнение на глобалния анализ на GPS мрежите. Той изучава времевите редове на всяка GPS станция поотделно. Предимствата му са следните:

• Той е по-ефективен, отколкото глобалния анализ.

• По-лесен е за откриване на големите различия в стойностите (outliers).

• Грешките в един времеви ред (например: всеки локален ефект на едно място), няма да повлияят на оценките на другите точки.

Геодезическите времеви редове получени от високоточни геодезически GPS приемници съдържат геофизична информация. Под геодезически времеви редове разбираме вариациите на пресметнатите *геодезически параметри* (координатите на точките и параметрите на часовника на приемника, координати на геоцентъра, UT1, координати на полюса) във времето.

За да отделим геофизичната информация (*геофизичните параметри* - координатите на точките, тропосферно закъснение (Zenith Total Delay - ZTD), йоносферна концентрация на свободните електрони – TEC) от шума, трябва да използваме подходящи модели.

Най-простият модел за времеви ред е:

#### X(t) = f(t) + e(t),

където X(t) е наблюдение или измерване, f(t) е детерминирана функция на времето (например полином или тигонометрична функция), а за грешките e(t) се предполага, както и в регресионния анализ, че имат нормално разпеделение и са независими помежду си.

Задачата за оценка на параметрите на тренда на функционалния модел съвпада със задачата на регресионния анализ. В практиката много рядко се оказва, че такъв модел е адекватен – грешките се оказват зависими.

За разлика от класическия регресионен анализ, тук моделът определя поведението на един и същ обект. За стохастичните модели е характерно, че в грешката се включва влиянието на голям брой неотчетени фактори. При времевите редове част от тях са присъщи на обекта, т.е. те влияят през цялото време и се отразяват на всички наблюдения.

Това налага при оценяването на f(t) да се използват методи, отчитащи взаимната корелация на грешките, т.е. подробно да се изучава зависимостта във времето, различните ѝ форми и прояви.

Когато съществува зависимост между измерванията и времето, статистическите критерии стават неприложими. Тези оценки имат смисъл само за такива части от данните, за които може да се предположи, че са извлечени при едно и също (константно) разпределение. Обаче, чрез моделиране на зависимостта на данните от времето е възможно, също, да се отделят полезните за нас данни от страничните смущения (грешни данни), които изкривяват коректния анализ на изследвания феномен. Остатъчната (след моделирането), приемана за случайна, част от сигнала приемаме за шум. Най-големите остатъци (residuals) (по амплитуда) на шума, можем да приемем за груби грешки, ако успеем да докажем, че те се получават от разпределение, различно от това на останалите данни [87].

Трябва да се отбележи, обаче, че при анализа на този вид данни, обикновено е по-важно да се определи и оцени вътрешната корелация на случайните остатъци, отколкото да се направи детайлен анализ на тяхното разпределение по големина. Правилното определяне и успешното отстраняване (чрез подходяш модел) на систематичния компонент в данните е несъмнено найважната част от нашата работа.

Дали съществува действително изменение на състоянието или само грешка в данните, можем да определим само ретроспективно, чак след като получим нови данни (след съмнителната точка). В робастната статистика (robust statistics) се прави разлика между *натрупващи се кумулативни груби грешки* (additive outliers) и *"грешки" стартиращи нов тренд на данните* или *отместване в текущия тренд* (innovative outliers). Във втория случай стартира нов тренд на данните, докато при първия случай отстраняването от данните на отделна точка решава проблема.

Пример за втория случай е загубата на сигнала cycle slip при фазовите GPS измервания. Решение за това, дали е налице нов тренд можем да вземем само след натрупване на достатъчно данни след момента на прекъсване.

В "напасването" на модела към данните е извънредно опасно предоверяването, особено ако използваме готови програми без реално да разбираме същността на проблемите. Можем да се изкушим да дадем прекалено голям кредит на доверие на резултати, които може да са напълно грешни и подвеждащи. Това може да се случи, ако значително ошумени данни се напасват към посложен полиномен модел, като вярваме, че по-голямата сложност на модела непременно ще доведе до по-добри резултати. Тази опасност може да се дискутира от няколко гледни точки:

Първо, нормалните уравнения при решението по МНМК са обикновено лошо обусловени (детерминантата е близка до сингулярната), освен ако не се извърши предварителна трансформация на данните, преди обработката по МНМК, за да доведем началните координати в областта на приложимост на данните. Ако това не бъде направено, дори малки грешки в данните могат да доведат до неприемливо големи грешки в решението, като го направят негодно за използване.

Втората опасност е в сляпата вяра в съдържателността на получените коефиценти на полиноми от по-висока степен при използването на готови програми. Проблемът идва от факта, че дори в случая с предварителна трансформация на данните, матриците, включени в такива решения са близки до сингулярните и малки грешки могат да доведат до напълно грешни решения, ако няма достатъчно данни за пресмятането на тези коефициенти на полиномите от по-висока степен.

Правилния път за отстраняването на тази опасност е да се използва решение по МНМК, включващо разлагане по сингулярни стойности - SVD (singular value decomposition) [90] и (Приложение 3).

Друга опасност е използването на програми без визуален контрол на резултатите. Същото се отнася и при използването на Калманов филтър. Визуалният контрол е практически единственият сигурен начин за правилната интерпретация на данните.

Друг препоръчителен и често пренебрегван принцип е да се проверяват няколко модела, като водещ е принципът за максимална простота. Прибягването до по-сложни модели трябва да става само в случай на очевидна необходимост [91, 92].

Критерий за коректност на модела е отсъствието на тренд при анализа на остатъците. Ако остатъците имат случаен характер и спектър, характерен за белия шум, тогава цялият систематичен компонент е отстранена от модела.

Шумът в данните може лесно да бъде определен, ако сме избрали подходящ модел за "напасване" (отстраняване на систематичния компонент). Тогава, като мярка можем да приемем средната квадратна грешка на остатъците. Възможно е, обаче да получим прекрасна оценка за характера и големината на шума, дори и без употребата на напасващ модел с използването на *квадратен корен от средната стойност на последователните разлики на данните* (rms successive difference), по-известна като *дисперсия на Алан* (Allan variance) (виж Глава 3.10.2. Метрология на часовниците ), широко използвана при определянето на нестабилността на честотата на осцилаторите [94].

#### Работа с навигационни данни в реално време

При обработка на навигационни данни в реално време решението, дали постъпващите данни съдържат грешки, или следва промяна на тренда, не може да се вземе моментално, а с известно закъснение. Прилагането на Калманов филтър за отстраняването на натрупващите се, кумулативни груби грешки също води до малко закъснение при обработката на данните [95].

Много ефективен метод е използването на вътрешните GPS часовници с достатъчно висока кратковременна (<600 s) стабилност на честотата. Колкото повече допълнителна информация използваме, толкова по-просто и надеждно е откриването и отстраняването на грешни измервания.

#### 3.17 Времеви редове на положението на точките

#### Стабилност на референтната система (реализация) и на модела на движение на станциите

Земната повърхност е подложена на непрекъснати деформации, дължащи се на влиянието на вътрешни сили с продължителност на въздействието от няколко секунди до милиони

години. Тези влияния трябва да бъдат отчитани както при реализацията на референтната система, така и от модела на движение, използван при анализа на наблюденията.

Добър начин да разберем съвременното състояние на моделите на движението на станциите е анализът на координатите им, разглеждани като дълги временни редове, получени от голям брой непрекъснати CGPS (continuous GPS) наблюдения. В тези времеви редове амплитудата на остатъчната периодична компонента може да достигне 1-2 ст. За сигнали със сезонна периодичност голяма част от отклоненията се дължат на атмосферни и хидрологични промени [161], докато природата на някои вътрешносезонни максимуми остава неясна.

Сега съществуващите модели на движението на станциите са коректни в рамките на 1-2 cm [162]. Може да се заключи, че за хоризонталните компоненти са постижими модели на скоростите с точност 1-2 mm/yr за много региони (особено за стабилните части от плочите). Обаче, за сега съществуващите модели и при времеви интервал от 10 години, моделната грешка може да достигне 3 cm, като в тектонично активните зони са възможни и по-големи грешки.

За вертикалната компонента на скоростите ситуацията е още по-сложна. Освен регионалните явления (като следледниково възстановяване), пространствените размери на вертикалните движения са значително по-малки отколкото за хоризонталните компоненти (обикновено от порядъка на няколко км) и могат да се получат разлики от няколко mm/yr на разстояние от няколко десетки км. В някои райони се наблюдават значителни нелинейни вертикални движения от няколко сm/yr, причинени от човешката дейност. Засега не съществуват модели предсказващи такива движения.

Разглеждайки времевите редове на часовниците (Фигура 8) и времевите редове на X, Y, Z на измерените точки, можем да направим аналогия между процесите в часовниците на GPS приемниците (Глава 3.10.2) и физичните процеси, определящи Земята като система, разбира се, в различен времеви мащаб.

#### Корелации във времевите редове на положението на точките

Спектралният анализ на времевите редове установява наличието на бял шум (White noise) + "цветен" шум, спектрален индекс = 2 (random walk);

Амплитудата на шума на монумента му корелира с вида на геоложката основа и с типа на монумента.

Корелираният шум е "скрит" във времевите редове.

Съществуват модели за синтетични (съчетаващи различни шумове) времеви редове:

$$x(t)=x_0+rt+a\alpha(t)+b_{\kappa}\beta(t)$$

където:  $x_0$  е точката на пресичане с остта x, r = скоростта (константа), a и  $b_k$  са амплитудата на

белия и "цветните" шумове, съответно, α и β са некорелирани случайни променливи.

Трябва да се наблегне върху правилния избор на мястото и на стабилността на монумента за да се редуцира RWN (random walk noise).

#### Ефектът от различните шумове върху скоростите на точките и свързаните с тях оценки на точността

Приемането на модел само с бял шум (нормално разпределение), недооценява истинската точност.

В [96] е представен емпиричен модел комбиниращ бял, фликер и random walk шум,

Моделът е получен след анализа на 23 глобално разположени GPS станции за тригодишен период на наблюдение. Анализът показва, че ако приемем модел само с бял шум, грешките на скоростите на GPS координатите могат да бъдат недооценени от 5 до 11 пъти.

#### 3.18 Изводи от теоретичната част

Геодезическите времеви редове съдържат следната информация:

- Линеен тренд.
- Структура:
  - стъпаловидни изменения в тренда;
  - периодични вариации;
  - непериодични вариации.

Как да различим шума от сигнала за приложените функционални модели?

• За специалистите, занимаващи се с изследването на йоносферата, тропосферата и геологията, обикновено се получава следното: "Твоят шум е моят сигнал" (и обратно).

• Геодезическите времеви редове съдържат геофизична информация.

• Преди да пристъпим към анализа на определен геофизичен модел трябва да сме сигурни, че сме отстранили всички "инструментални" систематични грешки.

• За да отделим геофизичната информация от шума трябва да използваме подходящи модели на шума. Критерий за коректност на модела е отсъствието на тренд при анализа на остатъците. Ако остатъците имат случаен характер и спектър, характерен за белия шум, тогава цялият систематичен компонент е отстранена от модела.

При определяне на неопределеностите в скоростите на GPS точките трябва да отчитаме, че:

• Строгата оценка на характера и големината на грешките изисква пълно познаване на спектъра на грешките (т.е. времевата и пространствената корелираност на всички фактори, влияещи на измерванията – което е невъзможно на този етап).

• Каквито и модели на грешките да приемем и средства за тяхното оценяване, проверката им с външни независими източници е особено важно.

• Не съществува модел, който да улавя надеждно най-нискочестотната част от спектъра на шума.

• Шумът често е нестационарен. Работи се с времеви редове с варираща дължина и празноти в данните.

#### 4. Експериментална част

Всяка държава, в съответствие с политката си за развитие на GNSS технологиите, може да определя свои правила за тестване на GNSS приемниците и съответното обурудване. Съществуват инструкции [101], които са насочени към това как трябва да бъдат извършвани конкретните измервания и с каква точност, но в тях не са посочени приемливи процедури за тестване на апаратурата. Особено важен е качественият контрол на приемника в момента на закупуването му и проверка, дали той отговаря на спецификациите на производителя. Тези проверки след това трябва да се извършват най-малко един път годишно, а също така преди и след кампании, които изискват висока точност на измерванията [102].

Разработените в Дисертацията софтуерни продукти и алгоритми целят да се дадат насоки за решаване на някои от следните много важни въпроси:

• Кои са източниците на грешки?

• Колко от грешките и до каква степен можем да отстраним чрез по-добро моделиране?

• Достатъчна ли е информацията от получените наблюдения за да направим коректни изводи за характера на грешките?

• Какви математически инструменти да използваме, за да определим неизвестните и грешките?

• Да даде визуална и количествена оценка на точността и надеждността на конкретни измерванията.

• Изследването на пространствените и времеви вариации на приетите отразени сигнали от референтните станции.

Разработените софтуерни продукти целят интегриране на използваните математически методи (формализъм) в единен модел и в единна среда за обработка, която да ускори и улесни анализа на данните. Крайната цел е пълната автоматизация на анализа.

Такъв подход елиминира използането на скъпи софтуерни пакети и повишава производителността.

В дисертацията е използван само софтуер със свободен достъп и собствени софтуерни решения.

## 4.1 Предварителен тест на GPS приемници в кинематичен режим – реално време по стандарта ISO 17123-8:2007 [97]

Разработеният на базата на стандарт ISO 17123-8:2007 софтуер е предназначен за тестване и оценка на качеството на GNSS приемниците, използвани в строителството, геодезически и индустриални измервания, за които осигуряваната точност на кинематичния режим в реално време (*real-time kinematic*, *RTK*) е достатъчна. Тестовете в стандарта ISO 17123-8 са предназначени за проверка на конкретен приемник – дали отговаря на спецификациите, посочени от производителя, и не се използват като стандарти за приемане или оценяване на резултатите от конкретните измервания [98], [99].

Резултатът от теста се влияе от различни фактори като конфигурацията на спътниците в момента на измерване, йоносферните и тропосферните условия, влиянието на отразени и заглушаващи сигнали около точките, прецизността на оборудването, качеството на софтуера на подвижния приемник и на системата, генерираща данни, предавани от базовата станция.

Стандартът ISO 17123-8 съдържа две полски процедури за тестване на приемниците – опростен (кратък) тест и пълен тест. Операторът може да избере процедурата, която е найподходяща за изискванията на конкретния проект.

Тестът се провежда с използването на една базова и две "подвижни" точки. Местоположението на подвижните точки трябва бъде в близост до района на съответната задача. Разстоянието между двете подвижни точки трябва да е минимум 2 m и не трябва да надвишава 20 m (Фигура 10). Хоризонталното разстояние и разликата във височините между двете подвижни точки се определя чрез методи, позволяващи точност, по-голяма от 3 mm. Тези стойности се считат за номинални и се използват при първия етап на двете полски процедури. Хоризонталното разстояние и разликите във височината на двете подвижни точки, които се изчисляват от измерените координати във всяка серия от измервания, се сравняват с номиналните стойности, за да се гарантира, че измерванията са свободни от груби грешки. Номиналните стойности не се използват в статистическите тестове.

Измерванията се извършват на серии, като всяка серия съдържа 5 групи от измервания. Всяка група съдържа последователни измервания между "подвижните" точка 1 и точка 2.



Фигура 10. Схема на измерванията: 1 – "подвижна" точка; 2 – базова точка; а – разстоянието между двете подвижни точки 1; b – разстоянието между базовата и двете подвижни точки.

Последователните измервания се извършват през приблизително 5-минутен интервал от време. Това изискване определя времето за измервания във всяка серия да бъде приблизително 25 min.

На двете "подвижни" точки се извършва серия от по 5 измервания, равномерно разпределени в интервала от време. По този начин всяка серия е с времетраене 25 min, което позволява серията да покрие и периодът на получаване на грешки от отразени сигнал, обикновено ненадхвърлящ 20 min.

Отделните серии измервания се извършват през 90 min. По този начин може да се отчете влиянието на другите фактори, влияещи на точността на определяне на положението на точките, като конфигурацията на спътниците и промените на йоносферата и тропосферата.

Поради това стандартните отклонения, определени от всички измервания, ще представляват количествена мярка за точност, отчитаща влиянието на повечето от типичните фактори, причиняващи грешки при определяне на точните координати на точките.

Краткият тест съдържа само една серия от измервания и следователно служи само за откриване на груби грешки без да определя статистическа оценка на решението. Процедурата на пълния тест се състои от три серии и позволява получаване на оценки за стандартните отклонения и прилагане на статистически тестове.

Пълният тест се приема като най-добрата мярка за оценка на точността на използваното оборудване.

Освен това, тази процедура може да се използва, за да се определят:

• оценката за точността на оборудването при определени условия (включително краткопериодичните и дългопериодичните влияния);

• оценката за точността на оборудването, използвано в различни периоди от време или различни условия;

• оценката за възможностите на различна по точност апаратура, извършвано при еднакви условия на измерване.

Статистическите тестове се прилагат за определяне дали извадката от експеримента принадлежи към една и съща *генерална съвкупност* (популация) и/или да се определи дали две извадки от различни експерименти принадлежат към една и съща популация [100].

Статистическите тестове се прилагат само при пълния тест. Тълкуването на резултатите от статистическите тестове се извършва с помощта на емпиричните стандартни отклонения където  $S_{ISO-GNSS \ RTK-xy}$  и  $S_{ISO-GNSS \ RTK-h}$ , получени от измерванията, и съответни степени на свобода и отговорят на следните въпроси (виж Таблица 3):

а) Дали изчисленото експериментално стандартно отклонение  $s_{ISO-GNSS\,RTK-xy}$  за еднократно определено положение (x, y) е по-малко или равно на съответната стойност  $\sigma_{xy}$ ?

b) Дали изчисленото експериментално стандартно отклонение  $s_{ISO-GNSS\,RTK-h}$  за еднократно определена височина *h* по-малко или равно на съответната стойност  $\sigma_h$ ?

с) Дали двете експериментални стандартни отклонения  $s_{ISO-GNSS\,RTK-xy}$  и  $\tilde{s}_{ISO-GNSS\,RTK-xy}$  за еднократно определено положение (x, y), определени от две различни извадки от измервания, принадлежат към една и съща генерална съвкупност (популация), като се приема, че двете извадки имат еднакъв брой степени на свобода  $v_x + v_y$  и  $\tilde{v}_x + \tilde{v}_y$ ?

d) Дали двете експериментални стандартни отклонения  $s_{ISO-GNSS\,RTK-h}$  и  $\tilde{s}_{ISO-GNSS\,RTK-h}$  за еднократно определена височина h, определени от две различни извадки от измервания, принадлежат към една и съща генерална съвкупност (популация), като се приема, че двете извадки имат еднакъв брой степени на свобода  $v_h$  и  $\tilde{v}_h$ ?

Експерименталните стандартни отклонения *s* и *s* могат да бъдат получени от:

- две извадки от измервания с едно и също оборудване;
- две извадки от измервания с различно оборудване.

В зависимост от характера на измерванията, за разглежданите тестове се предполага ниво на значимост  $1 - \alpha = 0.95$  и степени на свобода  $v_x + v_y = 56$  или  $v_h = 28$ .

Въпрос	Нулева хипотеза	Алтернативна хипотеза
a)	$s_{ISO-GNSSRTK-xy} \le \sigma_{xy}$	$s_{ISO-GNSSRTK-xy} > \sigma_{xy}$
б)	$s_{ISO-GNSSRTK-h} \leq \sigma_h$	$s_{ISO-GNSSRTK-h} > \sigma_h$
в)	$\sigma_{xy} = \tilde{\sigma}_{xy}$	$\sigma_{xy} \neq \tilde{\sigma}_{xy}$
г)	$\sigma_h = \widetilde{\sigma}_h$	$\sigma_h \neq \widetilde{\sigma}_h$

Таблица 3. Статистически тестове

След като бъдат изпълнени коректно всички полски процедури, описани в стандарта, разработената под Visual Basic.NET (VB.NET) програма позволява бързо и лесно да се получат резултатите от теста.

#### Последователност на действията

**1.** Измерените координати x, y и h на двете "подвижни" точки 1 се записват в текстов файл (xxxxx.txt).

**2.** В раздела "Измервания" (*Measurements*) се попълват данните за проекта (Фигура 11):

**3.** С бутоните "Кратък тест" (*Short Test*) и "Пълен тест" (*Full Test*) се стартира желаната тестова процедура.

- Извършва се проверка за грешно въведени данни в раздела "Измервания";
- Отваря се менюто за избор на файл;
- Извършва се проверка на файла;

- Изпълнява се Краткият тест;
- Изпълнява се Пълният тест (ако е натиснат съответният бутон).

**4.** Резултатите от теста се представят в Таблица В1 "Измервания и отклонения" (*Measurements and deviations*) (Фигура 11), Таблица В2 "Измервания и остатъци" (*Measurements and Residuals*) (Фигура 12), както и раздела "Решение" (*Solution*).

**5.** В раздела "Решение" (*Solution*) се представят резултатите от четирите статистически теста.

• След натискане на бутона "Запази" (*Save Test*) се създава текстов файл с всички резултати от теста (по подразбиране).

Measuremen	ts					Chort Te	-		Full Test					Settinge		Saus Tau
Observer	Rowan Alkinson	Nominal Values (m)				JINIT TO	a.		TUR TOOL					Car Jennige		3816 16
Weather:	Normal	Horizontal Distance	19.994			Seq.	Series	Set	Rover	X [m]	Y [m]	h [m]	Hor. Dist. D(X,Y) m	Height h [m]	Deviations eD [mm]	Deviation eh [mm]
Receiver:	Leica GX1230	Height Difference	.028		-	10070		4		00542.40	C2022 105	210 772				
Antenna	Choke Bing Antenna	Pre-defined Stands	ard Deviation		1	2	1	1	2	CCEE0 200	-03032,100 62041 627	210,772	10.210	0.027	0.676	0.001
Data	15 12 2014 # 21/21 #	Sxy [mm]	: 15			3	1	2	1	-66542 479	-63932 188	219,799	13,310	0,027	-0,070	-0,001
Date.	13.12.20141.21.214.	Sh [mm]	25			4	1	2	2	66559 376	63941 525	219.824	19 305	0.036	-0.689	0.008
		Gir planty.				5	1	3	1	-66542.48	63932 189	219 789	13,303	0,030	-0,003	0.000
ab dias						6	1	3	2	-66559 387	-63941 529	219.81	19.315	0.021	-0.679	-0.007
Statistical	leds					7	1	4	1	-66542.476	-63932.192	219.793				-,
First set	of data					8	1	4	2	-66559.393	-63941.53	219.808	19.323	0.015	-0.671	-0.013
a) STD	ISO (m) c/c SIGMA (m) 1		c/a SIGMA AN 2			9	1	5	1	-66542 481	-63932 192	219 794				-
6.22	= 17.25</td <td>9.68</td> <td><!--= 30.5</td--><td></td><td></td><td>10</td><td>1</td><td>5</td><td>2</td><td>-66559.39</td><td>-63941.522</td><td>219.803</td><td>19.312</td><td>0.009</td><td>-0.682</td><td>-0.019</td></td>	9.68	= 30.5</td <td></td> <td></td> <td>10</td> <td>1</td> <td>5</td> <td>2</td> <td>-66559.39</td> <td>-63941.522</td> <td>219.803</td> <td>19.312</td> <td>0.009</td> <td>-0.682</td> <td>-0.019</td>			10	1	5	2	-66559.39	-63941.522	219.803	19.312	0.009	-0.682	-0.019
The	A homesthese is for filled	The set if he wath	ania in 6 Mile d			11	2	1	1	-66542.478	-63932.191	219.8		100000		
menu	al hypothesis is fullilled	me nul hypoth	esis is fulfiled			12	2	1	2	-66559.399	-63941.535	219.823	19.33	0.023	-0.664	-0.005
						13	2	2	1	-66542.479	-63932,193	219.798		10,000		-
Second se	t of data					14	2	2	2	-66559.392	-63941.528	219.828	19.318	0.03	-0.676	0.002
a) STD*	ISO (xy) = SIGMA (xy) ?</td <td>b) STD* ISO (h)</td> <td><!--= SIGMA (h) ?</td--><td></td><td></td><td>15</td><td>2</td><td>3</td><td>1</td><td>-66542.477</td><td>-63932 194</td><td>219.78</td><td></td><td>10000</td><td></td><td></td></td>	b) STD* ISO (h)	= SIGMA (h) ?</td <td></td> <td></td> <td>15</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>1</td> <td>-66542.477</td> <td>-63932 194</td> <td>219.78</td> <td></td> <td>10000</td> <td></td> <td></td>			15	2	3	1	-66542.477	-63932 194	219.78		10000		
6,17	= 17.25</td <td>10.44</td> <td><!--= 30.5</td--><td></td><td>-</td><td>16</td><td>2</td><td>3</td><td>2</td><td>-66559.396</td><td>-63941.53</td><td>219,797</td><td>19.324</td><td>0.017</td><td>-0.67</td><td>-0.011</td></td>	10.44	= 30.5</td <td></td> <td>-</td> <td>16</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>2</td> <td>-66559.396</td> <td>-63941.53</td> <td>219,797</td> <td>19.324</td> <td>0.017</td> <td>-0.67</td> <td>-0.011</td>		-	16	2	3	2	-66559.396	-63941.53	219,797	19.324	0.017	-0.67	-0.011
The null	hypothesis is fulfilled	The null hypothes	sis is fulfilled	1	ISO 17	123-8 R	TK Test			and so it is not		X				
													19,327	0.026	-0.667	-0.002
c) 1/(E 0.9)	75(56.56)) = (STD(w)^2)</td <td>/(STD*6v)^2) <!--=</td--><td>E 0.975(56.56) 2</td><td></td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></td>	/(STD*6v)^2) =</td <td>E 0.975(56.56) 2</td> <td></td> <td>1</td> <td></td>	E 0.975(56.56) 2		1											
0,588	= 1,016</td <td><!--=</td--><td>1,700</td><td></td><td></td><td></td><td>D(ISU(h))</td><td>and SI</td><td>D^(ISO(h)</td><td>belong to the</td><td>same populati</td><td>on.</td><td>19,324</td><td>0,028</td><td>-0,67</td><td>0</td></td>	=</td <td>1,700</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>D(ISU(h))</td> <td>and SI</td> <td>D^(ISO(h)</td> <td>belong to the</td> <td>same populati</td> <td>on.</td> <td>19,324</td> <td>0,028</td> <td>-0,67</td> <td>0</td>	1,700				D(ISU(h))	and SI	D^(ISO(h)	belong to the	same populati	on.	19,324	0,028	-0,67	0
STDUS	D(xy)) and STD*(ISO(xy) belon:	to the same population	on													
													19,317	0.028	-0.677	0
d)																
1/(F 0.9	/5(56,56)) = (STD(h) 2)/</td <td>(STD*(h)*2) <!--=</td--><td>F 0.975(56,56) ?</td><td>4</td><td>1</td><td>24</td><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td>-060003,338</td><td>-63541,032</td><td>215,823</td><td>19,325</td><td>0.018</td><td>-0,669</td><td>-0,01</td></td>	(STD*(h)*2) =</td <td>F 0.975(56,56) ?</td> <td>4</td> <td>1</td> <td>24</td> <td>3</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>-060003,338</td> <td>-63541,032</td> <td>215,823</td> <td>19,325</td> <td>0.018</td> <td>-0,669</td> <td>-0,01</td>	F 0.975(56,56) ?	4	1	24	3	2	2	-060003,338	-63541,032	215,823	19,325	0.018	-0,669	-0,01
0,463	0.00	0-	2,130			25	3	3	1	-66542,485	-63932,199	219,799				
STD(IS	D(h)) and STD*(ISO(h) belong t	to the same population	1.			26	3	3	2	-66559,4	-63941,534	219,813	19.32	0.014	-0.674	-0.014
						27	3	4	1	-66542,474	-63932,195	219,804				
						28	3	4	2	-66559,394	-63941,532	219,831	19,325	0,027	-0,669	-0,001
D 17123-8 P	RTK Test			Ó.		29	3	5	1	-66542,483	-63932.2	219,793				
					*	30	3	5	2	-66559.398	-63941,537	219,833	19,321	0.04	-0.673	0.012
e first set of	data				1							m				

Фигура 11. Основно меню (показва и Таблица В1 от стандарта).

	Seq. No.	Series	Set	Rover Point	X (m)	Y (m)	h (m)	Residual Rx (mm)	Residual Ry (mm)	Residual Rh (mm)	Rx^2 [mm]	Ry*2 (mm)	Rh^2 [mm]
	1	1	1	1	66542,47	-63932,197	219,792	8	4	-2	64	16	4
	2	1	1	2	-66559.389	-63941.527	219,799	4	3	-17	16	9	285
	3	1	2	1	-66542,479	-63932,188	219,788	-1	5	-6	1	25	36
	4	1	2	2	66559,375	-63941,525	219,824	17	5	8	259	25	64
	5	1	3	1	66542,48	-63932,189	219,789	-2	4	-6	4	16	25
	6	1	3	2	-66559,387	-63941,529	219.81	6	1	-6	36	1	36
	7	1	4	1	-66542,476	-63932,192	219,793	2	1	-1	4	1	1
	8	1	4	2	66559,393	-63941,53	219,808	0	0	-8	0	0	64
	9	1	5	1	66542,481	-63932,192	219,794	-3	1	0	9	1	0
	10	1	5	2	-66559.39	-63941.522	219.803	3	8	-13	9	64	169
	11	2	1	1	-66542.478	-63932,191	219.8	0	2	6	0	4	36
	12	2	1	2	66559,399	-63941,535	219,823	6	-5	7	36	25	49
	13	2	2	1	-66542,479	-63932,193	219,798	4	0	4	1	0	16
	14	2	2	2	-66559.392	-63941.528	219.828	1	2	12	1	4	144
	15	2	3	1	-66542,477	-63932,194	219,78	1	-1	-14	1	1	196
	16	2	3	2	66559,396	-63941,53	219,797	-3	0	-19	9	0	361
	17	2	4	1	-66542,475	-63932,191	219,706	3	2	-8	9	4	64
	18	2	4	2	-66559.395	-63941.532	219.812	-2	-2	4	4	4	16
	19	2	5	1	46542,475	-63932,191	219.784	2	2	-10	4	4	100
	20	2	5	2	66559,391	-63941,534	219,812	2	4	4	4	16	16
	21	3	1	1	46542,479	-63932,194	219,798	4	-1	4	1	1	16
	22	3	1	2	-66559.391	-63941.529	219.826	2	1	10	4	1	100
	23	3	2	1	-66542,478	-63932.195	219,805	0	-2	11	0	4	121
	24	3	2	2	66559,398	-63941,532	219,823	8	-2	7	25	4	49
	25	3	3	1	46542,485	-63932,199	219,799	-7	-6	5	49	36	25
	26	3	3	2	-66559.4	-63941,534	219.813	-7	-4	-3	49	16	9
	27	3	4	1	-66542,474	-63932,195	219,804	4	2	10	16	4	100
	28	3	4	2	66559,394	-63941,532	219,831	4	-2	15	1	4	225
	29	3	5	1	-66542,483	-63902.2	219,793	-5	-7	-1	25	49	1
*	30	3	5	2	-66559.398	-63941.537	219.833	-5	-7	17	25	45	289

Фигура 12. Таблица В2 "Измервания и остатьци" (Measurements and Residuals).

При наличието на грешки съответните грешни данни се оцветяват в червено в таблица В1.

Софтуерът е проверен с данните от тестовия пример на стандарта ISO 17123-8:2007.

#### 4.2 Тест на GPS приемници Trimble 4000SSE при работа в диференциален режим

Приемниците Trimble 4000SSE [104] са разработени за високоточни геодезически и навигационни измервания с използването Р-кода и на двете L1, L2 честоти.

В диференциален режим (DGPS), единият приемник може да генерира RTCM поправки с период на обновяване 1 s и да ги изпраща на другия, за повишаване на точността на измерванията.

Приемниците Trimble 4000SSE могат да генерират различни типове изходни данни, които се предават през два серийни RS-232 порта към компютър или принтер. Тези съобщения могат да бъдат циклични (излъчвани при завършването на всеки цикъл от измервания) или единични (след поискване от потребителя).

Най-информативно е първото съобщение (POSITION CALCULATIONS), което се използва в програмния пакет за визуализация и анализ на DGPS данните (примерът по-долу):

```
ID DAY DOY DATE TIME LATITUDE LONGITUDE HGT PDOP CLOCK V.VEL H.VEL G FREQ.OFFSET CONT S SVS
THU 305 01-NOV-01 12:32:37d42:40.5701N 023:22.1640E +0620 02.1 316753 +000.01 000 000.0 +7.7996E-07 2,28,8,7,9,23,26,18]
[00 THU 305 01-NOV-01 12:32:40d42:40.5701N 023:22.1640E +0620 02.1 319093 -000.000.00 000.0 +7.8019E-07 2,28,8,7,9,23,26,18]
[00 THU 305 01-NOV-01 12:32:41d42:40.5701N 023:22.1640E +0621 02.1 319873 +000.000.00 000.0 +7.8027E-07 2,28,8,7,9,23,26,18]
[00 THU 305 01-NOV-01 12:32:42d42:40.5701N 023:22.1640E +0621 02.1 319873 +000.000.00 000.0 +7.8027E-07 2,28,8,7,9,23,26,18]
[00 THU 305 01-NOV-01 12:32:42d42:40.5701N 023:22.1640E +0621 02.1 320654 +000.000.00 000.0 +7.8029E-07 2,28,8,7,9,23,26,18]
EL AZM SN IODC CONT GPS.TIME L2SN
51 053 24 0156 0340 +390780.000 31.0
44 051 24 0278 0560 +390780.000 25.5
73 258 23 0108 0561 +390780.000 29.6
17 307 07 0015 0559 +390780.000 20.0
ID DAY DOY DATE TIME LATITUDE LONGITUDE HGT PDOP CLOCK V.VEL.VEL HDG FREQ.OFFSET CONT S SVS
THU 305 01-NOV-01 12:32:47d42:40.5701N 023:22.1640E +0621 02.1 324556 -000.00 000 000.0 +7.8059E-07 2,28,8,7,9,23,26,18]
```

Модулът за извличане на данните е разработен на Visual Basic 6.0.

Програмата за анализ на данните помага да се извлекат и запишат като времеви редове данните за:

Времето на измерване (HH:MM:SS), географските координати на точката, които програмата трансформира в правоъгълни сферични координати (X, Y, Z), PDOP, данни за отклоненията на часовника на приемника и относителното изменение на честотата на кварцовия осцилатор (CLOCK, FRQOffset).

Извличат се и данните за траекторията на съответния спътник по азимут и височина, както и за съотношението сигнал/шум (S/N) по двете честоти L1 и L2 за същия интервал от време. Това позволява да бъдат изследвани аномалии в зависимост от геометрията между изследваната точка, конкретния спътник и обекти по трасето на сигнала, които могат да причинят обструкции или появата на отразени сигнали.

• Менюто ViewData (Фигура 13) визуализира отклоненията в координатите по X, Y, Z, имененията на базата R, PDOP за периода на измерванията, данните за отклоненията на часовника на приемника и относителното изменение на честотата на кварцовия осцилатор.

• Визуализират се и данните за участващите в решението спътници и съотношението сигнал/шум по двете честоти L1 и L2, за всеки от тях. За по-лесна интерпретация на резултатите, това съотношение е представено в цветови код.

• Графиката горе в дясно на Фигура 14 показва траекторията на съответния спътник по азимут и височина. Тя позволява да бъдат изследвани някои аномалии в данните в зависимост от геометрията между изследваната точка, конкретния спътник и обекти по трасето на сигнала, които могат да причинят обструкции или появата на отразени сигнали.

• Постигната точност се описва съгласно общоприетите при GPS измерванията термини (Фигура 15а, б):



15а. Статистически GPS термини	
--------------------------------	--

15б. Резултати от теста

#### Изводи

Представените измервания [172] имат по-скоро историческа стойност, като едни от първите реални DGPS тестове в България. Постигнатата точност не отговаряше на високоточните геодезически изисквания. Забелязва се значително влияние на отразени сигнали.

Препоръка: Ако искаме тези точки да бъдат използвани за GPS измервания, височината им трябва да се увеличи до 2 м над повърхността на покрива, за да се намали влиянието на отразени сигнали.

4.3 Анализи на резултатите от решенията на перманентни GPS станции, получени с помоща на APPS (Automatic Precise Positioning Service) на Глобалната Диференциална GPS система (Global Differential GPS - GDGPS) на НАСА и JPL (Jet Propulsion Laboratory) и програмата Gipsy 6.3.

Глобалната диференциална GPS (GDGPS) система<sup>6</sup> осигурява висока точност и стабилност за GPS измервания в реално време. Използвайки голяма наземна мрежа от референтни приемници (>120), иновативна архитектура на мрежата, както и многократно награждаван софтуер за обработка на данни в реално време, система GDGPS осигурява суб-дециметрова (<10 cm) точност на позициониране навсякъде по света, на земята, във въздуха, и в пространството, независимо от местната инфраструктура.

GDGPS в момента използва софтуерния пакет GIPSY 6.3 (март 26, 2014).

GIPSY 6.3, за разлика от други широко употребявани софтуерни продукти (Bernese и GAMIT), не използва метода на двойното диференциране, а прилагайки и филтър (Square Root Information Filter - SRIF), изчислява едновременно всички параметри на пълния модел, вместо да елиминира грешките от часовниците на спътниците и приемниците. Обикновено, този софтуер се използва за анализ на мрежи, като наблюденията от много станции се обработват едновременно. По този начин се определят:

- Параметрите на орбитите и часовниците на спътниците;
- Фазовата неопределеност;
- Координатите на станциите от мрежата и параметрите на часовниците им;

• Зависимите от положението на станциите закъснения на сигналите по трасето на разпространение през йоносферата и тропосферата.

Параметрите на решението са дефинирани в ITRF08 (Международната земна референтна рамка - <u>The International Terrestrial Reference Frame (ITRF)</u>).

GIPSY 6.3 използва следните модели – Таблица 4. Всички модели осигуряват субсантиметрова точност.

Receiver/Transmitter Antenna Calibrations	igs08.atx
Troposphere Mapping Function	GPT2
A Priori Dry and Wet Troposphere Model	GPT2
Solid Earth Tide (Geometric and Gravity)	IERS2010
Pole Tide (Geometric and Gravity)	IERS2010 (IERS2010 Mean Pole, including ocean load pole tide)
Ocean Tide Loading Model	GOT4.8ac with harddisp.f
Earth Orientation	IERS 2010 Tidal Model, EOPC04 (ITRF08)
Nutation	IAU2006A
Static Gravity Field	EGM2008 (12x12, C20, C30, C40, C21, S21 per IERS 2010)
Ocean Tide Gravity Field	GOT4.8ac (convolution)
Solar Radiation Pressure	GSPM13 (JPL)
Albedo Model	Knocke (1989)
Antenna Thrust	IGS Recommendation
Transmitter Clocks	5-minute and 30-second Products
Second Order Ionosphere Model	Modeled with ionosphere model IONEX (>= 1999), IRI2012 (<= 1998)
Yaw Rates	Estimated
Data Weighting	$\sin(\text{elevation})/\sigma^2$

Таблица 4. Модели използвани от GIPSY 6.3 при пресмятане на неизвестните параметри.

За получаване на тропосферните параметри GIPSY 6.3 използва стохастичен модел, който разглежда неизвестното остатъчно закъснение на сигнала като вариращ във времето параметър, а шумът в данните се приема за random walk процес ("Брауново движение"). Зенитното закъснение се моделира за всяка епоха като сума от предишното изчислено зенитно закъснение плюс шума от

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> <u>http://apps.gdgps.net/</u>
напълно случаен процес (process noise), ограничаващ измененията в закъснението на сигнала. За целта се използва Калманов филтър (Brown & Hwang, 1992) [106].

Стохастичните модели се използват с допускането, че закъснението на сигнала варира в определени граници за къси интервали от време. По този начин, закъснението на сигнала се определя по начин подобен на този по-който се определят параметрите на отклоненията на часовниците.

След обработката на измерванията се получават прецизните параметри на орбитите на спътниците и часовниците им за всяка епоха на наблюдение. Това дава възможност с използването на тези новополучени параметри да изчисляваме точното положение на индивидуални станции използвайки фазовите двучестотни измервания.

# Концепция на тестовата процедура

По-детайлна оценка на качеството на измерванията може да се получи с разработения софтуерен пакет GPSTests. Програмният код е написан на VB.NET [107], [108].

Пакетът включва няколко отделни модула за:

- Извличане на параметрите на решението от съответните програмни продукти;
- Визуален анализ на параметрите на решението;
- Предварителна обработка на данните;
- Анализ на параметрите на решението;

Коректната обработка на GPS измервания може да се раздели на три етапа (Фигура 17).



Фигура 17. Основна схема при обработката на GPS измерванията.

#### 4.3.1 Извличане на параметрите на решението

Решенията получени онлайн от APPS са записани в текстов файл (APPS Summary file). Файлът има следния вид (Фигура 18):

# APPS Summary file for site SOFI. Produced from RINEX file rnxa000.080 on Tue Sep 29 16:32:58 UTC 2009

# The reference frame is ITRF 2005 (with semi-major axis = 6378136.6 m; flattening factor = 1/298.25642)

# Output data rate is 30 seconds. Minimum elevation angle is 7.5 degrees.

# Satellite antenna phase center offset and maps taken from IGS Standards igs05\_1525.atx.

#

# Kinematic point positioning mode (position as a function of time):

# Total number of Phase measurements: 291. RMS post-fit Phase residuals: 0.004 m. Number of excluded Phase measurements: 0
 # Total number of Pseudorange measurements: 291. RMS post-fit PRange residuals: 1.313 m. Number of excluded PRange measurements: 0
 #

```
# The mean Cartesian coordinates: X = 4319372.5617 \text{ m} Y = 1868688.0810 \text{ m} Z = 4292064.2677 \text{ m}
# The mean Geodetic coordinates: Lat = 42.5561 deg East_Lon = 23.3947 deg Height = 1120.5913 m (above WGS84 Ellipsoid)
#
```

# Time variable estimated parameters:

#Secs\_from\_start GPS\_Time(yyyy:mm:dd:hh:mm:ss.ssss) X(m) Sig(m) Y(m) Sig(m) Z(m) Sig(m) Lat(deg) East\_Lon(deg) Height(m) East(m) North(m) Vert(m) HZTrop(m) WZTrop(m) Sig(m) TropGrad\_N(m) Sig(m) TropGrad\_E(m) Sig(m) Clock(m) Sig(m) 2009:05:30:00:00:30.0000 4319372.56360000 0.1468 1868688.04630000 0.0965 4292064.23660000 0.0588 0.0000 42.5561 23.3947 1120.5614 -336.605 -0.033 -0.015 2.0192 296913630.0000 0.1303 296913630.0000 -0.0070 -0.0096 296913630.000 107603.765 296913630.0000 2009:05:30:00:01:0.0000 4319372.57060000 0.1466 1868688.05110000 0.0968 4292064.24100000 0.0591 30.0000 1120.5705 -336.605 -0.031 -0.017 2.0192 296913660.0000 0.1302 296913660.0000 42 5561 23 3947 -0.0070-0.0096 296913660.000 108162.386 296913660.0000 60.0000 2009:05:30:00:01:30.0000 4319372.56990000 0.1463

Фигура 18. Файлът APPS Summary с параметрите на решението, получени с помощта на APPS.

В кинематичен режим могат да бъдат извлечени и анализирани следните параметри:

Secs\_from\_start - времето от началото на данните (в секунди)

GPS\_Time - GPS времето (във формат уууу:mm:dd:hh:mm:ss.ssss)

X(m) - правоъгълната X координата с център – масовия център на Земята (The Earth-Centered-Earth-fixed - ECEF)(в метри). Изчисляем параметър.

Sig(m) - Грешката в правоъгълната X координата (в метри). Изчисляем параметър.

Y(m) - Правоъгълната ЕСЕГ У координата (в метри). Изчисляем параметър.

Sig(m) - Грешката в правоъгълната У координата (в метри). Изчисляем параметър.

Z(m) - Правоъгълната ЕСЕГ Z координата (в метри). Изчисляем параметър.

Sig(m) -Грешката в правоъгълната Z координата (в метри). Изчисляем параметър.

Lat(deg) - Географската ширина на точката (в градуси). Получава се от X,Y,Z координатите на точката.

East\_Lon(deg) - Географската дължина на точката (в градуси).

Height(m) - Височината над референтния елипсоид на точката (в метри). East(m) - Отклонението от средното положение в източна посока (в метри). Получава се от X,Y,Z координатите на точката.

North(m) - Отклонението от средното положение в северна посока (в метри). Vert(m) - Отклонението от средното положение във вертикална посока (в метри). Получава се от X,Y,Z координатите на точката.

HZTrop(m) - Хидростатичното зенитно тропосферно закъснение (HZTrop) (в метри). Не е определяем параметър, а номинална стойност използвана при изчисляването на общото зенитно закъснение. Може да се получи при наличието на данни за атмосферното налягане или от модел на хидростатичното закъснение като функция на географската ширина.

WZTrop(m) - Зенитното закъснение на "мокрия" тропосферен компонент (WZTrop) (в метри). Изчисляем параметър. Общото зенитно закъснение е сума от HZTrop и WZTrop.

Sig(m) - Грешката на WZTrop (в метри).

TropGrad\_N(m) - Северният компонент на градиента на тропосферното закъснение (TropGrad\_N) (в метри). Изчисляем параметър.

Sig(m) - Грешката на TropGrad\_N (в метри).

TropGrad\_E(m) - Източният компонент на градиента на тропосферното закъснение (TropGrad\_ E) (в метри). Изчисляем параметър.

Sig(m) - Грешката на TropGrad\_ E (в метри).

Clock(m) - Ходът на часовника (в метри).

Sig(m) - Грешката на часовника (в метри).

Модулът извлича всички параметри на еднодневното решение и ги записват в двумерни файлове (време, параметър – времеви редове) или в таблици на Excel.

# 4.3.2 Визуален анализ на параметрите (Data Inspection)

При разработката на софтуера, на случаен принцип, бяха избрани 20 дневни (30.05.2009 – 18.06.2009) кинематични решения за перманентните точки SOFA и SOFI. Сферичните координати на точките X, Y, Z, както и изчисленият базов вектор R, и грешката на часовника ClockSig са представени в графичен формат като времеви редове в Приложение 5 и Приложение 6, съответно.

Графиките са получени от основното меню на програмата GPSTest (Фигура 19).



За SOFI не бяха получени решения за дните 2009-06-05 и 2009-06-10, а за първите 3 дена бяха получени само по 1000 решения.

Фигура 19. Основното меню на програмата GPSTest.



Фигура 20а. Графично представяне на "суровите" данни за перманентна станция SOFA (30.05.2009– 18.06.2009) по X, Y и Z координати (част от Приложение 4)



Фигура 206. Графично представяне на "суровите" данни за перманентна станция SOFA (30.05.2009– 18.06.2009) радиус вектора *R* и вариациите на часовника на приемника (всеки втори ред)(част от Приложение 4)

# Резултати от визуалния анализ за перманентна точка SOFA (Приложение 4)

Няма големи прекъсвания в данните.

Ходът на часовника е стабилен.

Липсва очевидна корелация между грешките на часовника и положението на точката, освен в двата случая на груби грешки (04.06.2009 и 14.06.2009).

Извод: такива груби грешки на часовника, вероятно, могат да се използват като индикатор за груби грешки в определеното положение когато приемникът е в движение.

# Резултати от визуалния анализ за перманентна точка SOFI (Приложение 5)

Непълни решения за първите 3 дена (30.05.2009 – 01.06.2009) – само по 1000 точки. Часовникът на приемника се придържа с точност 1 ms към GPS времевата скала.

Ходът на часовника е нестабилен.

В моментите на прекъсвания в данните ходът на часовника сменя посоката си.

Вероятна причина за прекъсванията, както се вижда от графиките (Приложение 6), е твърде нестабилното поведение на часовника. Възможни са и обструкции в района на точката.

# 4.3.3 Предварителна обработка на данните

Предварителната обработка на данните (**Data Modification**) обикновено е необходима за постигане на максимална точност и надеждност на решението. Подпрограмите на този модул включват:

# Редактиране на данните

- Конфигуриране на проект;
- Конфигуриране на сесия;
- Визуален контрол на данните;
- Привежда времевите данни от входния файл в MJD;
- Обратна трансформация (MJD => година, месец, ден, час, минута секунда);

• Привеждане на параметрите на решението в областта на приложимост на съответния метод за анализ ;

- Съединяване на прозволен брой файлове;
- Отделяне на данните от избран временен прозорец за допълнителен анализ.

Може значително да се намали броят на данните, като се извлече всяка десета стойност от данните за фазата, а данните за честотата съответно могат да се усреднят. Това повишава скоростта на обработка, но е недостатък, когато анализираме решението, използвайки дисперсиите със застъпване на данните или пълните дисперсии.

# Конверсия фаза – честота

• Данните за фазата могат да бъдат конвертирани в данни за честотата чрез разделяне на първите разлики на *τ* :

$$y_i = (x_i - x_{i-1}) / \tau.$$



• Данните за честотата могат да бъдат конвертирани в данни за фазата чрез умножаването им с т и добавяне към фазата:

$$x_i = x_{i-1} + (y_{i-1}) \cdot \tau.$$

Конверсията фаза > честота не работи правилно, когато имаме две съседни еднакви стойности на фазата. Тогава y = 0 и резултатът може да бъде приет като празнина в данните. Използването на много малка ненулева стойност (например, 1е-99) решава този проблем. Но, две идентични съседни стойности на фазата могат да бъдат знак за проблеми в конкретното измерване или при квантуването на данните.

*Конверсията честота > фаза* не може да бъде осъществена, когато съществуват празнини в данните. За да се запази непрекъснатостта на фазата, може да бъде използвана усреднена стойност на честотата, за да се премине липсващия интервал в данните.

Може да бъде използвана индивидуална стъпка вместо фиксирано  $\tau$  за данни, неравномерно разположени във времето.

# Отстраняване на грубите грешки

Много е важно да използваме надежден метод за откриване и отстраняване на грубите грешки, базиран на робастните статистически методи [109].

Грубите грешки се откриват много по-лесно в данните за честотата, отколкото за фазата.

*Медианата* е по-добър избор за определяне на централната стойност (грубите грешки влияят по-силно на средната стойност).

Отклонението от медианата е добър начин за откриване на груби грешки.

Използването на *абсолютното отклонение на медианата* MAD (Median absolute deviation) [110] е добър начин за откриване на груби грешки:

MAD = Median {
$$|y(i) - m| / 0.6745$$
},

където m = Median $\{y(i)\}$ , а коефициентът 0.6745 прави MAD равен на стандартното отклонение за данни с нормално разпределение.

След отстраняването на грубите грешки може да се види дрейфът на честотата и шума [150].

На Фигура 25 са представени два периода с очевидни груби грешки от решенията за SOFA (30.05.2005 – 18.06.2005 - Приложение 4). Резултатите без филтрация на данните са представени в Таблица 5.



Фигура 25. Два периода с очевидни груби грешки

	SOFA (30.05.2005 – 18.06.2005) Кинематични решения												
Values [m]	X	Y	Z	Часовник									
Брой решения	57426	57426	57426	57426									
Брой празнини [%]	174 0.3	174 0.3	174 0.3	174 0.3									
Минимум	4315445,2785	1851260,1189	4300882,5082	-38,342									
Максимум	4325450,4516	1872024,8314	4312933,1838	8857,757									
Mean	4315452,7670	1855717,3217	4300892,9760	0,7042									
STD	55,1768	70,6059	64,2262	48,3547									
Conf. Int.	0,230252	0,2946	0,2680	0,2018									

Таблица 5. Резултати без филтрация при общ брой възможни решения (57600) за SOFA

Резултатите след отстраняването на очевидните грубите грешки с *филтър* 3\*σ (след три итерации) са представени на Фигура 27 и Таблица 7:



Фигура 27. Графики след отстраняване на очевидните груби грешки с филтър 3\*σ (три итерации)

гезулгати	(таолица о	<b>1</b>						
Резултати /	Брой на	Празнини	Минимум	Максимум	Ср.стойност	Медиана	Ср. кв. гр.	Дов. инт.
Параметри	данните	Gaps [N]	YMin	YMax	Mean	Median	Sigma [ $\sigma$ ]	Conf. Int.
[m]	[N]	_					0	[CI]
X	57038	562	4315452,0562	4315452,7385	4315452,4044	4315452,4077	0,0457	0,00019
Y	57111	489	1855717,017	1855717,3783	1855717,1997	1855717,201	0,0244	0,0001
Z	57071	529	4300892,2743	4300892,8389	4300892,5586	4300892,5637	0,0378	0,00016
R	56974	726	6369025,6983	6369026,349	6369026,0308	6369026,0377	0,0567	0,00023
ClockSig	56950	650	-4,342	5,199	0,4333	0,424	1,5513	0,0065

# Резултати (Таблица 6)

Таблица 7. Резултати след филтър 3\*σ (три итерации)

# Еднодневни решения в статичен режим (20 дневен период - 30.05.2005 – 18.06.2005) за перманентна станция SOFI.

Данните са по остта X. Последната точка показва "истинската" стойност на X за средата на периода (ITRF 2005). Има статични решения за целия 20 дневен период.



Фигура 29. Еднодневни решения в статичен режим (20 дневен период - 30.05.2005 – 18.06.2005) за перманентна станция SOFI.

Общ брой възможни решения (на 30 s интервал): SOFI 18 x (86400/30) = 18 x 2880 = 51840 (за два дена отсъстват кинематични данни). За първите 3 дена има само по 1000 решения. Има проблеми със стабилността на часовника (Фигура 30) и (Таблица 8).



Фигура 30. Кинематични решения SOFI (30.05.2005 - 18.06.2005)

S	SOFI (30.05.2005 - 18.06	5.2005) Кинематични ј	решения
Values [m]	X	Y	Z
Брой решения	28633	28633	28633
Брой празнини	23207	23207	23207
[%]	44.77	44.77	44.77
Минимум	4319369,9572	1868687,5663	4292063,8582
Максимум	4319372,9632	1868689,0004	4292064,5505
Mean	4319372,2183	1868687,9576	4292064,1752
STD	0,061305	0,054196	0,044718
Conf. Int.	0,000362	0,000320	0,000264

Таблица 8. Резултати SOFI (30.05.2005 – 18.06.2005)

# Откриване на празнини в данните

За да се получат смислени резултати от анализа изследваните точки трябва да са равномерно разпределени. Някои от прилаганите дисперсии могат просто да прескочат липсващи точки.

Прост метод за изследване на качеството на GPS приемниците изисква събирането на голям брой непрекъснати измервания (не по-малко от 24 часа), след което се сравнява общия брой на възможните измервания спрямо броя на реално записаните във файла измервания. В идеалния случай, отношението на броя на действително проведените измервания към броя на всички възможни измервания за този период трябва да е равно на 1 (или 100%). На практика обаче, се

случват сривове при следенето на фазата на носещата честота, блокиране на спътниковите сигнали от препятствия при малка височина на спътниците, загуба на сигнала при ниско съотношение сигнал/шум. Колкото резултатите са по-близки до 100%, толкова са по-добри възможностите на приемника за захващане и непрекъснато следене на сигналите на спътниците.

# Методи за запълване на празнините в данните (Gap Handling Methods)

• *Пропускане* (Omit): Този метод елиминира празнината, но също така изменя времевата последователност в данните. Той е най-подходящ за отстраняването на няколко изолирани точки.

• *Изключване* (Exclude): Той е най-подходящ за отстраняването на празнини намиращи се в началото или края на данните. Съкращава дължината на анализирания ред.

• *Прескачане* (Skip): Празнините могат да бъдат прескочени автоматично при използването на някои дисперсии (Таблица 9) и [111].

Дисперсия	Празнините се прескачат	Празнините се запълват
AVAR	Х	
OVAR	Х	
MVAR		Х
HVAR	X	

Таблица 9. Дисперсиите с които празнините могат да бъдат прескачани.

• *Запълване* (Fill): Използва се [*Fill function*] за да се запълнят празнините с интерполирани стойности. Празнините автоматично се запълват при някои дисперсии.) Този метод дава задоволителни резултати, ако празнините съставляват по-малко от 5 % от данните [112].

# Анализ на данните, съдържащи празнини

За данните за фазата съдържащи празнини, но не и груби грешки, за предпочитане е да се извърши директен анализ на стабилността. Във всички тези случаи е необходимо да се извърши допълнителна оценка на некоректните резултати. Понякога е по-благоразумно просто да се анализират свободните от празнини данни.

# Отстраняване на отместването (offset)

Отместването може да бъде определено от данните за фазата с един от двата метода:

• Линейна апроксимация (Linear Fit):

Този метод (оптимален за белия фазов шум white PM noise) използва метода на най-малките квадрати (МНМК) за определяне на параметрите на уравнението:

$$x(t) = a + bt,$$

апроксимиращо данните, където y(t) = b е наклонът на правата.

• *Методът на крайните точки (Endpoints):* 

Методът просто използва разликата между първата и последната точка от данните, като наклонът е:

$$y(t) = [x(end) - x(start)]/(M-1),$$

където: *М е* броят на данните.

# Отстраняване на тренда (drift)

За отстраняване на тренда в данните за фазата, обикновено се използват три метода:

• Апроксимация с полином от втора степен (Quadratic Fit): С помощта на МНМК се определят параметрите на полинома:

$$x(t) = a + bt + ct^2,$$

където:

$$y(t) = x'(t) = b + 2ct$$
,

а наклонът е равен на:

$$y'(t) = 2c$$

Този метод е оптимален за белия фазов шум [113].

• *Вторите разлики (2nd Differences):* Този метод използва средната стойност на вторите разлики на данните за фазата:

$$y(t) = [x(t+\tau) - x(t)]/\tau,$$

наклонът е:

 $[y(t+\tau) - y(t)]/\tau = [x(t+2\tau) - 2x(t+\tau) + x(t)]/\tau^2.$ 

Този метод е оптимален за случайно блуждаещия честотен шум (random walk FM noise) [116].

• *Три точки (3-Point)*: Методът използва три точки – от началото, средата и края на данните за фазата, наклонът е:

 $4[x(end)-2x(mid)+x(start)]/(M\tau)^2$ ,

където *М* е броя на данните.

# След отстраняване на тренда - получаваме остатъците [150].

# Отстраняване на тренда с МНМК: $y(t) = a + b^*t$ )

Резултати след отстраняване на тренда (Таблица 10).

Резултати / Параметри	Брой на данните [N]	Празнини Gaps [N]	Минимум Min	Максимум Мах	Ср.стойност Mean	Медиана Median	Ср. кв. гр. Sigma [ σ ]	Дов. инт. Conf. Int.
[m]		_					0	[CI]
X	57038	562	-0,3425	0,344	6,28E-06	0,0013	0,0447	0,00019
Y	57111	489	-0,184	0,180	2,93E-07	0,0011	0,0243	0,0001
Z	57071	529	-0,2874	0,2878	-2,82 E-06	0,0034	0,0371	0,00015
R	56974	626	-0,341	0,3305	5,22E-06	0,0041	0,0554	0,00023

Таблица 10. Резултати след отстраняването на тренда (SOFA 30.05.2005).

# Периоди с грешки (филтрирани данни) (Фигура 33).



Фигура 33. Периоди с грешки SOFA (30.05.2009 - 18.06.2009).

Грешките са съсредоточени главно в периодите 54986.5 - 54986.9 и 54996.2 - 54997 [ MJD ].

На Фигура 34 е представен модулът за предварителна обработка на данните (Modify) от програмата GPSTests.

GPSTests - Modify	
(m) 401902	Data Modification Data Conversion           Stat         Phase Data         FRQ Data         Phase
	Stat         Peace > frequency         Frequency > Peace           Mody         NONE         Centeing         Nomains         LMS SVD           Data Transformation: (1-A) / B:         A = 0         B = 1         LMS SVD           Argonization entri- representation entri- representation         TAU = RELERN * STD = 1         Affects         Frequencies           USS_STD = RELERN * STD = 1         1.45564950423556E 10         LMS_Parameters         Frequencies           0.3555591459541741 3.7644316150121E 07         Restation         Restation
0.31 0 10000 20000 30000 40000 50000 60000 70000 80000 [s]	Statics         Data Piets         2880         X Dimension:         [n]         Y Dimension:         [n]           X Mn:         0         X Max:         96370         X Offset:         0           Y Mn:         0.3072         Y Max:         0.4810         Y Offset:         4315452
Number of Data = 2000         Files Modification           3TD_110 = 3K 8300024178795         Silp Fastor: 1         Averaging Fastor: 1           3TD_110 = 5K 830024178795         Silp Fastor: 1         Averaging Fastor: 1           3TD_110 = 5K 830024178795         Silp Fastor: 1         Averaging Fastor: 1	MEAN: 0.4045 Skewwess: 0.5391 V MEDIAN: 0.4071 Kutoss: 0.4392 V SIGMA: 0.0277
Marten Galari, 66: ERRP, a 55:1152212578:17 EALERP, 45:5185212578:17 TAU - RELERR * 5TD_11 = 1.4854939A12656:10 Date: Time: Date: Time:	Conf. Int.: 0.0005
CC() = 3355551959547 CC() = 3355551959547 YY(1580) = 3355551959547 YY(1580) = 3355551955267 YY(1580) = 3355551955127 Ten Scale Convertion 0 0005414051317259 0 0005414051317759 0 000541405150 0 00054110000000000000000000000000000000	LMS SVD - Approximation with: y() = a + b1
00         -0.0148115460581226         w         Model 2018           C:GPSTeel:0507.109/V_2009651150FA.sum         C:GPSTeel:0507.109/V_2009651150FA.sum         C:GPSTeel:0507.109/V_2009651150FA.sum	* , Teg: 30 Gaps: 0 Save Cancel

Показано е отстраняването на отместването и дрейфа на координатите (X, Y и Z) чрез линейна апроксимация по (МНМК) и данните са подготвени за анализ (Фигура 35).

Фигура 34. Модул за предварителна обработка на данните (**Modify**).



Фигура 35. Времевите редове за X, Y и Z (SOFA 30.05.2009) и съответните им хистограми.

# 4.3.4 Анализ на параметрите на решението

# 4.3.4.1 Дисперсионен анализ

За оценка на нестабилността на точките се използват статистически методи. Най-често използаван е централният момент от втори ред, характеризиращ разсейването около номиналната стойност, разделен на броя на измерванията N – 1 (*дисперсията* - variance):

$$\sigma^{2}(N) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} (y_{i} - \bar{y})^{2}$$

Резултатът често се представя като квадратен корен от дисперсията, т.е. *стандартното отклонение* (deviation – STD или  $\sigma$ ).

За съжаление *стандартното отклонение* не клони към единична стойност за различните типове шумове в осцилатора, с изключение на белия честотен шум (white FM noise – W FM), с нарастването на броя на наблюденията (Фигура 37).



Брой на наблюденията N

Фигура 37. Разходимост на шумовете с нарастването на броя на наблюденията [173].

Поради тази причина бяха разработени следните дисперсии, на които дължината на данните не оказва влияние и които са лесно приложими за определяне на характера на случайните флуктуации [116], [117] (Таблица 12):

Видове дисперсии	Характеристики
Стандартна дисперсия σ <sup>2</sup> (N)	Не е подходяща за някои от шумовете в часовника – да не се използва
Дисперсия на Алан (Allan variance) $\sigma^2_y(\tau)$ (AVAR)	Използва се само ако е необходимо – Ниска статистическа надеждност
Дисперсия на Алан със застъпване на данните (Overlapping Allan Variance) $\sigma^2_y(\tau)$ (OVAR)	Най-широко използвана – 1-ви избор за анализ на данните
Пълна дисперсия на Алан (Total Allan Variance) σ <sup>2</sup> total(τ) (TOTVAR)	По-висока статистическата надеждност за дълги периоди на усредняване
Модифицирана дисперсия на Алан (Modified Allan Variance) Mod $\sigma^2_y(\tau)$ (MVAR)	Използва се за да се разграничи белия фазов шум (white PM noise) от трептенето на фазата (flicker PM noise)
Пълна модифицирана дисперсия на Алан (Total Modified Variance) Mod $\sigma^{2}_{total}(\tau)$ (TOTMVAR)	По-висока статистическата надеждност за дълги периоди на усредняване
Временна дисперсия	Равна на $(\tau^2/3)$ · Mod Allan variance

(Time Variance) $\sigma_{X}^{2}(\tau)$ (TVAR)	
Пълна временна дисперсия (Total Time Variance) $\sigma_{x}^{2}$ total ( $\tau$ ) (TOTTVAR)	Пълна версия на временната дисперсия
Дисперсия на Адамар (Hadamard Variance) $H\sigma^2_y(\tau)$ (HVAR)	Отстранява дрейфа на честотата
Дисперсия на Адамар със застъпване на данните (Overlapping Hadamard Variance) $H\sigma^2_y(\tau)$ (OHVAR)	По-висока статистическата надеждност в сравнение нормалната дисперсия на Адамар
Пълна дисперсия на Адамар (Total Hadamard Variance ) H $_{total} \sigma^2_y(\tau)$ (TOTHVAR)	По-висока статистическата надеждност от дисперсията на Адамар
Thêo 1	Осигурява анализ за цялата дължина на данните.

Таблица 12. Видове дисперсии – общи характеристики [118]

Дисперсия на Алан (Allan variance) AVAR [174]

$$\sigma_{y}^{2}(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} (y_{i+1} - y_{i})^{2} = \frac{1}{2(N-2)\tau^{2}} \sum_{i=1}^{N-2} (x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_{i})^{2}$$

където:

M = N - 1 броя на данните за относителното изменение на честотата у за  $\tau = \tau_0$ ;

*N* – броят на данните за фазата;

 $\tau_0$  – периодът на дискретизация (data sampling) или интервалът на измерване;

 $\tau = m\tau_0$ , където m е коефициентът на усредняване (averaging factor,  $\tau$  се среща в литературата

още като sample time или averaging time (време на усредняване).

Дисперсията на Алан е:

- Сходима за всички шумови процеси, наблюдавани в генераторите
- Има проста връзка със степенните компоненти на спектралната плътност.
- Лесна за изчисляване

По-бърза и по-точна при определянето на шумовия процес от бързите Фурие трансформации (FFT).

На Фигура 38 е показана графика на дисперсията на Алан в логаритмичен мащаб. От нея се вижда, че стабилността на генератора се подобрява с увеличаването на периода на усредняване  $\tau$ , понеже по този начин се елиминират някои типове шумове. Но от определена точка нататък увеличаването на периода на усредняване не подобрява резултатите. Тази точка се нарича *праг на шума* (noise floor), а промяната на хоризонталния тренд говори за наличието на нестационарен шумов процес.



Фигура 38. Дисперсия на Алан (логаритмична скала) [150]

*Дисперсиите на Адамар* (Hadamard) HVAR [174] бяха разработени, за да се получи добра сходимост за всички типове шумове на осцилатора и да се елиминира дрейфът на честотата.

$$H\sigma_{y}^{2}(\tau) = \frac{1}{6(M-2)} \sum_{i=1}^{M-2} (y_{i+2} - 2y_{i+1} + y_{i})^{2} = \frac{1}{6(N-3)\tau^{2}} \sum_{i=1}^{N-3} (x_{i+3} - 3x_{i+2} + 3x_{i+1} - x_{i})^{2}$$

Тези дисперсии ни дават няколко ефективни статистически инструмента за анализ на нестабилността на изследваната честота (Таблица 6).

#### Извадки със застъпване на данните (overlapping)

Някои изследвания на стабилността на източника на честота могат да бъдат проведени с използването на извадки със застъпване на данните (Фигура 30). Използването на застъпващи се извадки повишава статистическата надеждност с цената на увеличаване на времето за обработка. Тези извадки не са напълно независими, но въпреки това увеличават ефективния брой на степените на свобода и по този начин подобряват статистическа надеждност.

Извадките със застъпване могат да се приложат при анализи с помощтта на дисперсиите на Алан и Адамар. Пълните (total) дисперсии винаги ги използват.

Тогава формулата за дисперсията на Алан придобива вида:

$$\sigma_{y}^{2}(\tau) = \frac{1}{2m^{2}(M-2m+1)} \sum_{j=1}^{M-2m+1} \sum_{i=j}^{j+m-1} (y_{i+m} - y_{i})^{2},$$

а формулата за дисперсията на Адамар придобива вида:

$$H\sigma_{y}^{2}(\tau) = \frac{1}{6m^{2}(M-3m+1)} \sum_{j=1}^{M-3m+1} \sum_{i=j}^{j+m-1} (y_{i+2m} - 2y_{i+m} + y_{i})^{2}$$

# Модифицираната дисперсия на Алан (MVAR) [174]

MVAR дава възможност да бъде разграничен белият фазов шум (white PM noise) от трептене на фазата (flicker PM noise), а съответните дисперси със застъпване на данните (overlapping) или пълни (total - използващи всики възможни комбинации) дисперсии обезпечават по-голяма надеждност.

За честотните данни:

$$\operatorname{Mod} \sigma^{2} {}_{\mathbf{y}}(\tau) = \frac{1}{2m^{4} (M - 3m + 2)} \sum_{j=1}^{M-3m+2} \left\{ \sum_{i=j}^{j+m-1} \left( \sum_{k=i}^{i+m-1} [y_{k+m} - y_{k}] \right) \right\}^{2}$$

а за данните за фазата:

$$\operatorname{Mod} \sigma^{2} \mathbf{y}(\tau) = \frac{1}{2m^{2}\tau^{2}(N-3m+1)} \sum_{j=1}^{N-3m+1} \left\{ \sum_{i=j}^{j+m-1} \left[ x_{i+2m} - 2x_{i+m} + x_{i} \right] \right\}^{2}.$$

# Общи бележки за различните видове дисперсии

• Всички дисперсии от Таблица 12 са моменти от втори ред, определящи дисперсията или нестабилността на честотата спрямо номиналната.

• Всички са нормализирани към стандартното отклонение за белия честотен шум (white FM noise).

• Всички, с изключение на стандартното отклонение имат добра сходимост за основните видове шумове.

• Модифицираните дисперсии съдържат допълнителни усреднявания, които помагат да се разграничи белият от трептящия фазов шум.

• Дисперсиите във времевата област се базират на модифицираните варианти.

• Дисперсиите на Адамар са сходящи и за *разходящия трепящ и случайно преминаващ* (divergent flicker walk noise  $\alpha = -3$ ) и *случайно пробягващия (преминаващ) шум* (random run noise  $\alpha = -4$ ).

• Дисперсите със застъпване на данните имат по-висока статистическата надеждност от класическата дисперсия на Алан.

• Пълните дисперсии (Total variances) имат по-висока статистическата надеждност при подълги периоди на усредняване в сравнение с дисперсите със застъпване на данните.

• Thêo1 (Theoretical Variance #1) осигурява анализ за цялата дължина на данните.

• Пълните дисперсии изискват голямо изчислително време, особено ако се изследват резултатите от всички възможни времена на усредняване.

Не е достатъчно само да изчислим една от разгледаните по-горе дисперсии. Необходимо е също така да знаем, към каква стойност се очаква да клони и колко близко се доближава до нея.

Дисперсията на Алан е дефинирана така, че се очаква да има същата стойност като стандартната дисперсия за белия честотен шум.

Всяка от тези дисперсии клони към една и съща очаквана стойност, чиято статистическата надеждност (*confidence*) нараства с увеличаването на големината на извадката.

За определяне на доверителни интервали се използва  $\chi^2$  - разпределението за дисперсията.

Това изисква познаването на *еквивалентния брой на степени на свобода* (*equivalent number* of degrees of freedom, *EDF*), който също са функция на вида на шума и дължината на извадката.

# Разпознаването на вида на шума

Разпознаването на вида на шума е важно не само за разбирането на физическите процеси, влияещи на стабилността на точките, но също така, за да бъдат приложени корекциите към изместените оценки и да бъде определена доверителната вероятност.

Въпреки че типът на шума може да бъде предварително известен или определен "ръчно", желателно е да имаме някакъв аналитичен метод за неговото разпознаване, който да бъде приложен автоматично, като част от алгоритмите за анализ за всяка точка от данните, особено ако трябва да бъдат въвеждани корекции и/или вертикални скали на грешките.

Видът на шума може да е известен предварително (*a priori*) или може да бъде определен от предварителния анализ на *Сигма – тау диаграмите* ( $\sigma_y^2(\tau) - \tau$ ), представени в логаритмичен машаб.

#### Сигма – тау диаграми

Сигма – тау диаграмите ( $\sigma_y^2(\tau) - \tau$ ) (Фигура 40а), представени в логаритмичен мащаб, показват зависимостта на стабилността на честотата от времето на усредняване  $\tau$  и са добро средство за определяне на видовете шумове в данните, които имат различни наклони на тези графики.

За предпочитане е вида на шума да бъде определян автоматично за всеки период на усредняване, в границите на изследвания интервал, с едновременно определяне на корекциите към изместените оценки и да бъде направена оценка на грешките.



Фигура 40а. Сигма – тау диаграми ( $\sigma_y^2(\tau)$ - $\tau$ ) [150]



Фигура 40б. Сигма – тау диаграми ( $\sigma_v^2(\tau)$ -т) за X, Y и Z (SOFA 30.05.2009)

От Фигура 406 се вижда, че стабилността ( $\sigma$ ) на решенията за X, Y и Z се подобрява с увеличаването на периода на усредняване  $\tau$ , понеже по този начин се елиминират някои типове шумове. Но, от определена точка нататък ( $\tau \sim 128$ ), увеличаването на периода на усредняване не подобрява резултатите. Тази точка се нарича *праг на шума* (noise floor - flicker FM noise), а промяната на хоризонталния тренд ще даде индикация за наличието на нестационарен шумов процес, често причинен от въздействието на обкръжаващата среда.

Извод: Усредняването на тези решения за период по-голям от 30 s няма да подобри надеждността на статистическата оценка.

# Разпознаване на шума с автокореалционната функция при анализа на сигналите

Автокореалционната функция ACF (Autocorrelation Function) е най-полезна в теоретични изследвания, за откриване на неслучайни компоненти в отделни части от данните, или в техните поправки, за откриване на периодични компоненти в данните и за определяне на доминиращия тип на шумовете в осцилатора.

На Фигура 41а,б,в са представени диаграмите на АСF, заедно със съответния изглед на данните (в горния десен ъгъл) от различни генератори, характеризиращи белия, трептящия и случайно блуждаещия шум [150].

На Фигура 41 г са представени автокореалционната функция (ACF) за X, Y и Z координатите за SOFA (30.05.2009). Резултатите говорят за наличието на Flicker шум.



Очевидна е голямата разлика в степента на корелация между тези данни, изразена във формата на тяхната автокорелационна функция [134], [135], [136], [137].



Фигура 41г. Автокореалционната функция (ACF) за X, Y и Z (SOFA 30.05.2009)

Анализът на автокорелационните функции от Фигура 41а, дава аналогични резултати, като Сигма – тау диаграмите от Фигура 40б за (SOFA 30.05.2009). Забелязват се и периодични флуктуации, причинени от отразени сигнали.

*Автоматично разпознаване на вида на шума* може да се извърши с помощта на приложения по-долу алгоритъм [138].

АСГ с лаг (стъпка) к се дефинира като:

$$\rho_k = \frac{E[(z_t - \mu)(z_{t+k} - \mu)]}{\sigma_z^2}$$

където  $z_t$  е времеви ред,  $\mu$  е средноаритметичното на z,  $\sigma_z^2$  е дисперсията, а E ематематическото очакване.

Автокорелационната функция обикновено се изчислява по формулата:

$$r_{k} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} (z_{t} - \bar{z})(z_{t+k} - \bar{z})}{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N} (z_{t} - \bar{z})^{2}}$$

където  $\overline{z}$  е средноаритметичното, а *N* е броят на данните [138].

# Алгоритъм за автоматично идентифициране на шума [138]

Алгоритъмът е бърз и изисква изчисляването само на една стойност за автокорелацията, както и първите разлики за няколко епохи от време. Алгоритъмът е независим от стойностите на дисперсията.

Алгоритъм за идентифициране на шума

Done = False, 
$$d = 0$$
  
While Not Done  

$$\overline{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} z_i$$

$$r_i = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (z_i - \overline{z})(z_{i+1} - \overline{z})}{\sum_{i=1}^{N} (z_i - \overline{z})^2}$$

$$\delta = \frac{r_1}{1 + r_1}$$
If  $d \ge d_{\min}$  And $(\delta < 0.25$  Or  $d \ge d_{\max})$   

$$p = -2(\delta + d)$$
Done = True  
Else  

$$z_1 = z_2 - z_1, \dots, z_{N-1} = z_N - z_{N-1}$$

$$M = N - 1$$

$$d = d + 1$$
End Iff  
End While

Бележка: р може да се закръгли до най-близкото цяло число.

	_	-						_	
					Laş	g 1 Autoc	orrelatio	n, r <sub>1</sub> <sup>T</sup>	
Noise	α	Phase Data*	d=0 ACF of	d=	=0	d	=1	d	=2
Туре		x(t)	Phase Data	x(t)	y(t)	x(t)	y(t)	x(t)	y(t)
W PM	2		alina analana ana	0	-1/2	-1/2	-2/3	-2/3	-3/4
F PM	1			≈0,7	-1/3	-1/3	-3/5	-3/5	-5/7
W FM	0			≈l	0	0	-1/2	-1/2	-2/3
F FM	-1			≈l	≈0.7	≈0.7	-1/3	-1/3	-3/5
RW FM	-2			≈1	≈l	≈l	0	0	-1/2

Фигура 42. Автокорелация с лаг 1: представяне и резултати [150]

Стойностите в сивите полета се използват за идентификация на шума ID (Identification) за конкретния шум и тип на данните.

Методът, използващ автокорелация с лаг 1, дава добри резултати, като надеждно идентифицира чистите шумове за стойности от  $\alpha = 2$  до –4 при брой на елементите в извадката 30 или повече, и в повечето случаи идентифицира преобладаващия тип на шума при смесени шумове, ако той е с поне 10 % по-силен от останалите. При наличие на смесица от близки по характеристики шумове, дробната част на стойностите може да е индикатор за съотношението помежду им.

Преди извършването на анализа данните трябва да бъдат подложени на предварителна обработка, за да бъдат отстранени грубите грешки, прекъсванията и систематичните грешки.

**Еквивалентният брой на степените на свобода** (EDF - the equivalent number of degrees of freedom)

След като сме определили вида на шума, еквивалентния брой на степени на свобода (*EDF*) за различните дисперсии се получават от таблици 9, 10, 11 и 12.

# В разработения софтуер GPSTests, се използва обобщен алгоритъм, предложен от С. А. Greenhall, W. J. Riley (2003) [141], за автоматично определяне на EDF за всички дисперсии, използващ данните от горните таблици.

Програмата GPSTests (**Analyse**) (Фигура 43а) анализира времеви редове, използвайки алгоритмите от глава 4.3.4.



Фигура 43а. Основно меню за дисперсионен анализ (Analyse).



Фигура 436. Модул за автоматично разпознаване вида на шума.

# Доверителни интервали

Разглежданите дисперсии имат разпределение:

$$\chi^2 = \frac{EDF.s^2}{\sigma^2},$$

където  $\chi^2$  е разпределението хи-квадрат,  $s^2$  е извадковата (емпиричната) дисперсия,  $\sigma^2$  е съответната "истинска" дисперсия (от която се интересуваме, но можем да определим само с известно приближение), а EDF е еквивалентният брой на степените на свобода (не обезателно цяло число). *EDF* зависи от броя на анализираните точки и от вида на шума. По много причини  $\chi^2$  е дефинирана така, че *EDF* участва изрично в горното уравнение.

За разгледаните дисперсии могат да бъдат определени едностранни или двустранни доверителни интервали (confidence intervals) и вертикални скали на грешките (error bars) при съответната доверителната вероятност (*confidence factor*), базиращи се на  $\chi^2$  - разпределението.

Стандартната процедура е да се избере доверителната вероятност p, да се пресметне съответстващата  $\gamma^2$  стойност, да се определи *EDF* в зависимост от съответната дисперсия, типа на шума и броя на точките в извадката и тогава да се поставят статистически граници на дисперсията. За двустранен тест:

$$\sigma_{\min}^2 = s^2 \frac{EDF}{\chi^2(p, EDF)} \ \text{II} \ \sigma_{\max}^2 = s^2 \frac{EDF}{\chi^2(1-p, EDF)}$$

Пресмятането (оценката) на доверителния интервал на дисперсията на Алан зависи не само от типа на обработката (без застъпване на данните, със застъпване, модифицирана или времева) и номиналната ѝ стойност, но и от коефициента на усредняване и броя на данните, а така също и от избраната статистическа доверителна вероятност и от типа на шума.



Фигура 43в. Модул за определяне на стойността на  $\chi^2$ .

#### Алгоритъм

Процедурите за анализ и метрологичен контрол на часовниците на GPS приемници [111], [112], могат да се използват и при анализа на геодезически времеви редове и се извършват по следния алгоритъм:

- 1. Отваря се файлът с данните за фазата.
- 2. Извършва се визуален контрол на данните.
- 4. Отстраняват се грубите грешки.

- 5. Отстраняват се отместването и дрейфът на честотата.
- 6. Разглеждат се остатъците.
- 7. При необходимост се запълват празнините.

8. Извършва се статистически анализ с описаните в дисперсионния анализ методи (Глава 4.3.4.1).

9. Резултатите от анализа се представят в графичен и текстов формат.

При анализа на други параметри, представени като времеви ред може да се следва същия алгоритъм или да се изберат подходящите модули от програмата. Описаната методика може да намери приложение в GPS системите за мониторинг и контрол. На Фигура 44 е представен модулът, автоматично изчисляващ дисперсиите AVAR, OVAR, MVAR и HVAR по описаните в Глава 4.3.4 алгоритми.

								_							Toto Pa	cameter.		
	Sec	GP	S_Time	X(m)	X_5	ig(m)	Y(m)		Y_Sig(m)	Z(m)		Z_Sig(m)	Lat(deg)	- 1	X	i di lindi di la		
	U	200	9:05:30:00:0.	. 431545	2.4068 0.01	4/	1855/1	7.1921	0.0079	4300892.5	693	0.0136	42.6678		Mean	-1 682547390	STD	0.045
	30	200	9:05:30:00:0.	. 431545	2.4026 0.01	4/	1855/1	7.1908	0.008	4300892.5	652	0.0136	42.6678					
	60	200	9:05:30:00:0.	. 431545	2.4126 0.01	46	1855/1	/.1928	0.008	43008923	641	0.0136	42.6678		ľ.			
	_					_	_	_		_	_	_			Mean	1800/17.199	SID	0.024
															z			
															Mean	4300892.558	STD	0.037
															Ck			
								-	T 00		0.005/44	1 0.05			Mean	0.4333	STD	1.551
JE	V Tables	Data n	4um: 2880		Tauu: T	Avera	ging Factor:	2	Tau: 30	CHI	2 PDF(Alp	na): 0.05 👻	Save la	loies				
_	Data	Deviation	Ciamo	Tru 0	Auro Englar	Tau	Neise	EDE	CHIC2(Alaba)	Chuin	Classe	Emm	Ex. (%)					
	Lidia X (m)	AV/AR	5igma	1	Avig. Factor	1	E PM	1930 2649	0.05	0.0092	0.0105	25	1	E				
	X (m)	AVAD	0.0059	1	2	2	E PM	929 4759	0.05	0.0054	0.0065	29	1					
	X (m)	AVAD	0.0033	1	4	4	E PM	401 2495	0.05	0.0034	0.0003	20	1					
	X (m)	AVAR	0.0033	1	8	8	EPM	196.8384	0.05	0.0023	0.0025	32	1					
-	1.400		0.002					100.0001	0.00	0.0011	0.0020	0.		_				
	Data	Deviation	Sigma	Tau 0	Awrg. Factor	Tau	Noise	EDF	CHI^2(Alpha)	Clmin	Clmax	Errors	Err. [%]	^				
	X (m)	OVAR	0.0098	1	1	1	F PM	1830.2648	0.05	0.0092	0.0105	404	14	E				
	X (m)	OVAR	0.006	1	2	2	F PM	829.4758	0.05	0.0055	0.0066	528	18					
	X (m)	OVAR	0.0035	1	4	4	F PM	401.3485	0.05	0.0031	0.004	640	22					
	X (m)	OVAR	0.0022	1	8	8	F PM	196.8384	0.05	0.0018	0.0027	697	24	-				
-	Data	Deviation	Siama	Tru 0	Aven Eactor	Tau	Noise	EDE	CHI <sup>(2)</sup> (Alpha)	Clasin	Cleary	Error	Ex. (7)					
	X (m)	MVAR	0.0098	1	1	1	F PM	1830 2648	0.05	0.0092	0.0105	404	14					
	X (m)	MVAR	0.0045	1	2	2	E PM	829.4758	0.05	0.0041	0.005	595	21					
	X (m)	MVAR	0.0022	1	4	4	E PM	401.3485	0.05	0.0019	0.0025	694	24					
	X (m)	MVAR	0.0014	1	8	8	F PM	196.8384	0.05	0.0012	0.0017	729	25					
1																		
	Data	Deviation	Sigma	Tau 0	Avrg. Factor	Tau	Noise	EDF	CHI^2(Alpha)	Clmin	Clmax	Errors	Err. [%]	^				-
	X (m)	HVAR	0.0101	1	1	1	F PM	1830.2648	0.05	0.0095	0.0108	393	14	E				
	X (m)	HVAR	0.0062	1	2	2	F PM	829.4758	0.05	0.0056	0.0068	525	18					
	X (m)	HVAR	0.0034	1	4	4	F PM	401.3485	0.05	0.003	0.0039	648	22					
		-								0.0017	0.0005	700	24					

Фигура 44. Модул за автоматично определяне на AVAR, OVAR, MVAR и HVAR в зависимост от вида на шума в данните, степента на усредняване и големината на съответната извадка.

Модулът филтрира грешните данни и представя резултатите в таблици на Excel (Таблици 20).

Data	Deviation	Sigma	Avrg.	Tau	Noise	EDF	CHI^	CImin	CImax	Errors	Err. [%]
		_	Factor				2(Alpha)				
X (m)	AVAR	0.0098	1	1	F PM	1830.2648	0.05	0.0092	0.0105	25	1
X (m)	AVAR	0.0059	2	2	F PM	829.4758	0.05	0.0054	0.0065	28	1
X (m)	AVAR	0.0033	4	4	F PM	401.3485	0.05	0.0029	0.0038	30	1
X (m)	AVAR	0.002	8	8	F PM	196.8384	0.05	0.0017	0.0025	32	1
X (m)	AVAR	0.0013	16	16	F PM	96.921	0.05	0.001	0.0018	33	1
X (m)	AVAR	0.0007	32	32	F PM	47.6749	0.05	0.0005	0.0011	35	1
X (m)	AVAR	0.0004	64	64	F PM	23.2957	0.05	0.0002	0.0008	35	1
X (m)	AVAR	0.0003	128	128	F PM	11.4641	0.05	0.0002	0.0008	35	1
Data	Deviation	Sigma	Avrg.	Tau	Noise	EDF	CHI^2	CImin	CImax	Errors	Err. [%]
			Factor				(Alpha)				
X (m)	OVAR	0.0098	1	1	F PM	1830.2648	0.05	0.0092	0.0105	25	1
X (m)	OVAR	0.006	2	2	F PM	829.4758	0.05	0.0055	0.0066	28	1
X (m)	OVAR	0.0035	4	4	F PM	401.3485	0.05	0.0031	0.004	30	1
X (m)	OVAR	0.0022	8	8	F PM	196.8384	0.05	0.0018	0.0027	32	1
X (m)	OVAR	0.0014	16	16	F PM	96.921	0.05	0.0011	0.0019	33	1

X (m)	OVAR	0.0008	32	32	F PM	47.6749	0.05	0.0006	0.0013	35	1
X (m)	OVAR	0.0004	64	64	F PM	23.2957	0.05	0.0002	0.0008	35	1
X (m)	OVAR	0.0003	128	128	F PM	11.4641	0.05	0.0002	0.0008	35	1
Data	Deviation	Sigma	Avrg.	Tau	Noise	EDF	CHI^2	CImin	CImax	Errors	Err. [%]
			Factor				(Alpha)				
X (m)	MVAR	0.0098	1	1	F PM	1830.2648	0.05	0.0092	0.0105	25	1
X (m)	MVAR	0.0045	2	2	F PM	829.4758	0.05	0.0041	0.005	30	1
X (m)	MVAR	0.0022	4	4	F PM	401.3485	0.05	0.0019	0.0025	32	1
X (m)	MVAR	0.0014	8	8	F PM	196.8384	0.05	0.0012	0.0017	32	1
X (m)	MVAR	0.0009	16	16	F PM	96.921	0.05	0.0007	0.0012	35	1
X (m)	MVAR	0.0004	32	32	F PM	47.6749	0.05	0.0003	0.0006	35	1
X (m)	MVAR	0.0002	64	64	F PM	23.2957	0.05	0.0001	0.0004	35	1
X (m)	MVAR	0.0002	128	128	F PM	11.4641	0.05	0.0001	0.0006	35	1
Data	Deviation	Sigma	Avrg.	Tau	Noise	EDF	CHI^2	CImin	CImax	Errors	Err. [%]
			Factor				(Alpha)				
X (m)	HVAR	0.0101	1	1	F PM	1830.2648	0.05	0.0095	0.0108	25	1
X (m)	HVAR	0.0062	2	2	F PM	829.4758	0.05	0.0056	0.0068	28	1
X (m)	HVAR	0.0034	4	4	F PM	401.3485	0.05	0.003	0.0039	30	1
X (m)	HVAR	0.002	8	8	F PM	196.8384	0.05	0.0017	0.0025	32	1
X (m)	HVAR	0.0013	16	16	F PM	96.921	0.05	0.001	0.0018	33	1
X (m)	HVAR	0.0008	32	32	F PM	47.6749	0.05	0.0006	0.0013	35	1
X (m)	HVAR	0.0004	64	64	F PM	23.2957	0.05	0.0002	0.0008	35	1
X (m)	HVAR	0.0003	128	128	F PM	11.4641	0.05	0.0002	0.0008	35	1
Data	Deviation	Sigma	Avrg.	Tau	Noise	EDF	CHI^ 2	CImin	CImax	Errors	Err. [%]
1			Factor	1			(Alpha)		1		

Таблици 20. Резултати от дисперсионния анализ за SOFA (30.05.2009) при доверителна вероятност CHI^2 (Alpha) = 0.5.

# Изводи от Глава 4.3.4.1

За тествания период (30.05.2009– 18.06.2009) перманентна станция SOFA показва по-добри резултати от очакваните с използването на APPS (стандартното отклонение σ за съответните дисперсии е в рамките на 1 sm. Процентът на успеваемост е над 99 %, с изключение на два кратки периода, които ще бъдат анализирани по-нататък в Дисертацията.

Разгледаните дисперсии показват сравнително еднакви резултати.

Шумът в данните е flicker PM, като *прагът на шума* (flicker FM noise) – се достига при период на усредняване  $\tau$  между 64 и 128, което е в съгласие със Сигма – тау диаграмите ( $\sigma_v^2(\tau)$ - $\tau$ )).

Перманентна станция SOFI показва голям брой прекъсвания. Процентът на успеваемост е нисък, от порядъка на 55 %. Стандартното отклонение е в рамките на 5 – 6 sm. Анализът на данните трябва да се извършва на части.

# 4.3.4.2 Корелационен анализ

Като следваща стъпка можем да изследваме влиянието на моделите, генериращи параметрите на решението на APPS, чрез степента на корелация на параметрите на решението в периодите с верни решения и степента на корелация на параметрите на решението в периодите с грешни решения.

Най-популярен коефициент е корелационният коефициент на Пиърсън. Той характеризира степента на линейна зависимост между променливите. Тя се дефинира като:

$$r = \frac{\sum_{i} (x_i - \overline{x})(y_i - \overline{y})}{\sqrt{\sum_{i} (x_i - \overline{x})^2} \sqrt{\sum_{i} (y_i - \overline{y})^2}}$$

Трябва да се има предвид, че този коефициент се използва за оценка на връзката между две нормални случайни променливи. Ако разпределението е далеч от нормалното, коефициентът все още характеризира степента на зависимост, но не могат да приложат тестове за значимост. Коефициентът на корелация на Пиърсън не е стабилен спрямо крайните стойности. Ако случайната променлива има отрицателни стойности, можете да извлечете грешното заключение за наличието на корелация. Следователно, ако разпределението е далече от нормалното или променливата може да има отрицателни стойности, е по-добре да се използва *коефициента на корелация на Спиърман (Spearman)*.

### Коефициентът на корелация на Спиьрман е непараметричен корелационен коефициент.

Той характеризира степента на произволна нелинейна зависимост в рамките на модела "ако една променлива се увеличава, втората променлива увеличава също".

Корелационният коефициент на Спиьрман може да се използва за оценка на връзката между променливите независимо от тяхното разпределение. Този коефициент също така е по-малко чувствителен към крайните стойности, което е важно при работа с експериментални данни.

На Фигура 45а, б са представени корелационните коефициенти на Пиърсън за периоди с верни и периоди с грешни решения за X, Y и Z.



C:\GPSTest\0SOFA\_Excel\2009-05-30.SOFA.xlsx Pearson Correlation – коректни решения

Фигура 45а. Коефициенти на корелация на Пиърсън за период с нормални решения

mput Exel Tab	e	File: C:\	GPSTest	\0SOFA_E	xcel\Par	tSOFA04x	lsx	Start: 469	50	Stop:	54420	TrueSIGM/	A		Filter Clock Sig
46680		2009:06:0	4:12:58:0	431545	2#5369	0#073	31	1855717#2312	0#0132	4	300892#6896	0#0901	42#6678	23#268	667#5
46920		2009:06:04	1:13:0	4325450	.4516	9.748		1851260.1189	14.87	43	310465.5579	10.34	42.6858	23.1706	12620
46950		2009:06:04	1:13:0	4315620	.3049	10.13		1855559.7092	15.72	43	301038.3973	10.88	42.6682	23.2659	834.25
46980		2009:06:04	4:13:0	4315610	.4211	10.45		1855564.7846	16.51	43	301031.7645	11.37	42.6682	23.266	824.55
47010		2009:06:04	4:13:0	4315602	.8058	10.73		1855567.5171	17.26	43	301026.6714	11.81	42.6682	23.2661	816.75
47040		2009:06:04	1:13:0	4315596	.8876	10.96		1855569.9406	17.96	43	301023.2051	12.22	42.6682	23.2662	811.11
Correlation	Save Pearson Table			Correlation S	peaman		Save Spea	arman Table	Save to	Word					
	x	X Sig	Y	Y Sig	z	Z Sig	HZTrop	WZTrop	WZTrop Sig	Trop Grad N	Trop Gra N Sig	d Trop Grad E	Trop Grad E Sig	Clock	Clock Sig
×	1	0.08	1	0.08	1	0.08	0.8	1	0.65	1	0.08	1	0.5	1	0.01
X Sig	0.08	1	0.08	0.86	0.08	0.95	0.01	0.08	0.5	0.08	0.74	0.08	0.61	0.08	0.06
Y	1	0.08	1	0.08	1	0.07	0.8	1	0.66	1	0.07	1	0.5	1	0
Y Sig	0.08	0.86	0.08	1	0.08	0.84	0.06	0.08	0.59	0.08	0.83	0.08	0.69	0.08	0.01
Z	1	0.08	1	0.08	1	0.08	0.8	1	0.65	1	0.08	1	0.5	1	0.01
Z Sig	0.08	0.95	0.07	0.84	0.08	1	0	0.08	0.56	0.08	0.85	0.08	0.71	0.08	0.07
HZTrop	0.8	0.01	0.8	0.06	0.8	0	1	0.8	0.76	0.8	0.03	0.8	0.48	0.8	0.6
WZTrop	1	0.08	1	0.08	1	0.08	0.8	1	0.65	1	0.08	1	0.5	1	0
WZTrop:	ig 0.65	0.5	0.66	0.59	0.65	0.56	0.76	0.65	1	0.65	0.61	0.65	0.17	0.65	0.42
TropGrad	N	0.08	1	0.08	1	0.08	0.8	1	0.65	1	0.08	1	0.5	1	0
TropGrad	NSig 0.08	0.74	0.07	0.83	0.08	0.85	0.03	0.08	0.61	0.08		0.08	0.81	0.08	0.12
TropGrad	E 1	0.08	1	0.08	1	0.08	0.8	1	0.65	1	0.08	1	0.5		0
TropGrad	ESig 0.5	0.61	0.5	0.69	0.5	0.71	0.48	0.5	0.17	0.5	0.81	0.5		0.5	0.11
	1	0.08		0.08	1	0.08	0.8	1	0.65	1	0.08	1	0.5		0
Clock			_												

C:\GPSTest\0SOFA Excel\2009-05-04.SOFA.xlsx Pearson Correlation – грешни решения

Фигура 456. Коефициенти на корелация на Пиърсън за период с груби грешки.

На Фигура 45а координатите X, Y и Z са строго корелирани с тропосферните параметри и часовника. Грешките X\_Sig, Y\_Sig и Z\_Sig са некорелирани с грешките на тропосферните параметри и часовника.

На Фигура 456, в периода с грешни решения, корелацията между Х, Y и Z и тропосферните параметри намалява, а се увеличава корелацията между съответните им грешки.

На Фигура 46а, б са представени корелационните коефициенти на Спиърман за периоди с верни и периоди с грешни решения за X, Y и Z.

	х	X Sig	Y	Y Sig	Z	Z Sig	HZTrop	WZTrop	WZTrop Sig	Trop Grad N	Trop Grad N Sig	Trop Grad F	Trop Grad F Sig	Clock	Clock Sig
X	4	0 24	0.62	0.03	0 78	0 11	0.03	0.23	0.38	0.23	0	0.23	0.12	0.23	0.06
X Sig	0.24	1	0.24	0.26	0.26	0.19	0.03	0.11	0.03	0.11	0.02	0.11	0.05	0.11	0.09
Y	0.62	0.24	1	0.08	0.58	0.06	0.03	0.34	0.36	0.34	0.18	0.34	0.45	0.34	0.04
r Sig	0.03	0.26	0.08	1	0.07	0.16	0.03	0.31	0.3	0.31	0.21	0.31	0.18	0.31	0.04
z	0.78	0.26	0.58	0.07	1	0.16	0.03	0.34	0.48	0.34	0.01	0.34	0.12	0.34	0.02
Z Sig	0.11	0.19	0.06	0.16	0.16		0.03	0.2	0.12	0.2	0.09	0.2	0.27	0.2	0.07
HZTrop	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	1	0.03	0.03	0.03	0	0.03	0.01	0.03	0.01
WZTrop	0.23	0.11	0.34	0.31	0.34	0.2	0.03	1	0.67	t.	0.36	1	0.2	Ť	0.04
WZTrop Sig	0.38	0.03	0.36	0.3	0.48	0.12	0.03	0.67	1	0.67	0.2	0.67	0.23	0.67	0.16
TropGradN	0.23	0.11	0.34	0.31	0.34	0.2	0.03		0.67	1	0.36	1	0.2	1	0.04
TropGradNSig	0	0.02	0.18	0.21	0.01	0.09	0	0.36	0.2	0.36	<b>T</b>	0.36	0.21	0.36	0.18
TropGradE	0.23	0.11	0.34	0.31	0.34	0.2	0.03	1	0.67	1	0.36	1	0.2	1	0.04
TropGradESig	0.12	0.05	0.45	0.18	0.12	0.27	0.01	0.2	0.23	0.2	0.21	0.2	1	0.2	0.12
Clock	0.23	0.11	0.34	0.31	0.34	0.2	0.03	<b>1</b>	0.67	1	0.36	1	0.2	Ť	0.04
Clock Sig	0.06	0.09	0.04	0.04	0.02	0.07	0.01	0.04	0 16	0.04	0 18	0.04	0 12	0.04	0.04

C:\GPSTest\0SOFA\_Excel\2009-05-30.SOFA.xlsx Spearman Correlation - коректни решения

Фигура 46а. Коефициенти на корелация на Спиърман за период с нормални решения (SOFA 2009-05-30).



C:\GPSTest\0SOFA\_Excel\2009-05-04.SOFA.xlsx Pearson Correlation - грешни решения

Фигура 46б. Коефициенти на корелация на Спиьрман за период с груби грешки (SOFA 2009:06:04 (00:00:00-01:18:00))

При корелационните коефициенти на Спиьрман (Фигура 46а,б) се забелязват същите зависимости, както и значително повишена корелация между X, Z и Clock\_Sig.

# 4.3.4.3 Интеркритериален анализ

Интеркритериалният анализ, чиято идея и първите стъпки на изследването започнаха в края на 2013 г., бяха представени пред 12-ия международната конференция по интуиционистки размити множества и обобщени мрежи, 2013 г., Варшава и публикувани в [160].

Подходът използва индексирана матрицата M с индекси на редовете  $O_1$ , ...,  $O_m$  и на колоните  $C_1$ , ...,  $C_n$ , където за всеки p, q ( $1 \le p \le m$ ,  $1 \le q \le n$ ),  $O_p$  е обект,  $C_q$  е критерий, а  $e_{Op,Cq}$  е оценката на p-тия обект спрямо q-тия критерий, определена като реално число.

	$C_1$		$C_k$		$C_l$		$C_n$
$M = O_1$	$e_{O_{1},C_{1}}$		$e_{O_1,C_k}$		$e_{O_1,C_l}$		$e_{O_1,C_n}$
:	÷	÷.,	÷	÷.,	:	÷.,	:
$O_i$	$e_{O_i,C_1}$		$e_{O_i,C_k}$		$e_{O_i,C_l}$		$e_{O_i,C_n}$
:	÷	÷.,	÷	÷.,	:	÷.,	:
$O_j$	$e_{O_i,C_1}$		$e_{O_i,C_k}$		$e_{O_i,C_l}$		$e_{O_i,C_n}$
:	÷	·	÷	÷.,	÷	·	:
$O_m$	$e_{O_m,C_1}$		$e_{O_m,C_i}$		$e_{O_m,C_l}$		$e_{O_m,C_n}$

Нека R е отношение на наредба над реалните числа. Например, една от релациите  $\langle , \rangle$ , =. Нека отношение <u>R</u> на отношението R, т.е, R е вярно в случаите, когато отношението <u>R</u> е невярно, и обратно.

За нуждите на настоящият метод за вземане на решения, сравнения на двойки между всеки два различни критерии се правят по всички оценявани обекти. По време на сравнението се поддържа един брояч за броя пъти, когато е изпълнено съотношението R, и друг брояч за <u>R</u>.

Нека  $S_{k,l}^{\mu}$  е броят на случаите, в които отношенията  $R(e_{O_iC_k}, e_{O_jC_k})$  и  $R(e_{O_iC_l}, e_{O_jC_l})$  са едновременно удовлетворени. Нека, също така,  $S_{k,l}^{\nu}$ ,е броят на случаите, в които отношенията  $R(e_{O_iC_k}, e_{O_jC_k})$  и  $\underline{R}(e_{O_iC_l}, e_{O_jC_l})$  са едновременно удовлетворени. Като общият брой на двойките сравненията между обекта са m(m-1)/2, вижда се, че съществуват неравенства:

$$0 \le S_{k,l}^{\mu} + S_{k,l}^{\nu} \le \frac{m(m-1)}{2}$$

За всеки k, l, така че  $1 \le k \le l \le m$ , и за  $m \ge 2$  са дефинирани следните две числа:

$$\mu_{C_k,C_l} = 2 \frac{S_{k,l}^{\mu}}{m(m-1)}, \ V_{C_k,C_l} = 2 \frac{S_{k,l}^{\nu}}{m(m-1)}.$$

Очевидно е, че и двете  $\mu_{Ck Cl}$ ,  $v_{Ck Cl}$  се намират в интервала [0. 1], и тяхната сума е число в този интервал. Допълнението до 1 е числото  $\pi_{Ck Cl}$ , което съответства на степента на несигурност.

Двойката, получена от тези две числа, играе ролята на интуиционна размита оценка на отношенията, които могат да бъдат установени между всеки два критерия  $C_k$  и  $C_l$ . По този начин, индексираната матрица M, която свързва оценените обекти с критериите за оценка, може да бъде преобразувана в друга индексирана матрица М \*, която дава връзката между критериите:

$$M^{*} = \frac{C_{1} \dots C_{n}}{C_{1} | \langle \mu_{C_{1},C_{1}}, \nu_{C_{1},C_{1}} \rangle | \dots \langle \mu_{C_{1},C_{n}}, \nu_{C_{1},C_{n}} \rangle}.$$
  

$$\vdots \qquad \vdots \qquad \ddots \qquad \vdots$$
  

$$C_{n} | \langle \mu_{C_{n},C_{1}}, \nu_{C_{n},C_{1}} \rangle \dots \langle \mu_{C_{n},C_{n}}, \nu_{C_{n},C_{n}} \rangle.$$

От практични съображения е по-гъвкаво да се работи с две индексирани матрици  $M^{\mu}$  и  $M^{\nu}$ , отколкото с индексираната матрица М\*.

Последната стъпка на алгоритъма е да се определят степента на корелация между критериите в зависимост от избора на потребителя за  $\mu$  и *v*. Ние наричаме тези корелации между критериите:

позитивен консонанс, негативен консонанс и "дисонанс". Нека  $\alpha, \beta \in [0, 1]$  да бъдат праговите стойности, с които сравняваме стойностите на  $\mu_{C_k, C_l} u v_{C_k, C_l}$ . Казваме, че критериите  $C_k$  и  $C_l$  са в:

- $(\alpha, \beta)$  позитивен консонанс, ако  $\mu_{Ck,Cl} > \alpha$  и  $\nu_{Ck,Cl} < \beta$ ;
- $(\alpha, \beta)$  негативен консонанс, ако  $\mu_{Ck,Cl} < \beta$  и  $v_{Ck,Cl} > \alpha$ ;
- в противен случай ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) са в "дисонанс".

# Правила за определяне степента на консонанс и дисонанс

След анализ на различни видове данни, медицински, химически, икономически, екологични, авторите на метода стигат до заключението, че е необходимо да се уточнят алгоритмите за определяне на стойностите на степента на консонанс и дисонанс. В изследваните досега приложения, сравняването на отношенията водят до увеличаване на степените на консонанс, липса на консонанс или дисонанс съгласно следното правило (таблица 21).

>,>	>, =	>, <	=,>	=, =	=, <	<,>	< ,=	<, <
$\mu$ +	$\pi^+$	$\nu +$	$\pi^+$	$\pi^+$	$\pi^+$	$\nu$ +	$\pi^+$	$\mu +$

Таблица 21. Правила за консонаснс и дисонанс

# Скали за определяне на консонанс или дисонанс между двойки критерии

Съответните стойности, свързани с скалата на консонанс / дисонанс са представени на Фигура 47, където: 0% - 5% is Strong Negative Consonance (SNC), 5% - 15% is Negative Consonance (NC), 15% - 25% is Weak Negative Consonance (WNC), 25% - 33% Weak Dissonance (WD), 33% - 43% is Dissonance (D), 43% - 57% is Strong Dissonance (SD), 57% - 67% is Dissonance (D), 67% - 75% is Weak Dissonance (WD), 75% - 85% is Weak Positive Consonance (WPC), 85% - 95% is Positive Consonance (PC), 95% - 100% is Strong Positive Consonance (SPC).



На Фигура 48 са представени получените резултати от коректни решения за X, Y и Z за SOFA 2009:06:04, а на Фигура 49 – период с грешни решения.

# Positive Consonance

																WZTrop	TropGrad	TropGrad	TropGrad	TropGrad		
mu	Sec	X(m)	X_Sig	Y(m)	Y_Sig	Z(m)	Z_Sig	Lat(deg)	Lon(deg)	Height	East	North	Vert	HZTrop	WZTrop	_Sig	_N	_Nsig	_E	_Esig	Clock	Clock_Sig
Sec	1	0.3128	0.5304	0.7111	0.3737	0.3064	0.444	0	0.6729	0.3389	0.6118	0.7109	0.1134	0.5228	1	0.0132	1	0.7855	1	0	1	0.5001
X(m)	0.3128	1	0.7091	0.5849	0.4551	0.9861	0.7986	0.3803	0.2703	0.9597	0.2496	0.5824	0.5704	0.0326	0.3128	0.6706	0.3128	0.2551	0.3128	0.6218	0.3128	0.7998
X_Sig	0.5304	0.7091	1	0.6333	0.4747	0.7162	0.8077	0.2458	0.4087	0.7419	0.3681	0.6347	0.4551	0.1953	0.5304	0.4663	0.5304	0.4303	0.5304	0.4248	0.5304	0.7463
Y(m)	0.7111	0.5849	0.6333	1	0.6625	0.5918	0.4758	0.0001	0.673	0.6247	0.6119	0.9973	0.1817	0.3729	0.7111	0.3001	0.7111	0.606	0.7111	0.2415	0.7111	0.5444
Y_Sig	0.3737	0.4551	0.4747	0.6625	1	0.4668	0.3852	0.2708	0.3664	0.4579	0.2862	0.6617	0.5179	0.5352	0.3737	0.6346	0.3737	0.2928	0.3737	0.5712	0.3737	0.3402
Z(m)	0.3064	0.9861	0.7162	0.5918	0.4668	1	0.8042	0.3801	0.2715	0.9656	0.2494	0.5902	0.5787	0.0299	0.3064	0.6769	0.3064	0.2529	0.3064	0.6241	0.3064	0.7995
Z_Sig	0.444	0.7986	0.8077	0.4758	0.3852	0.8042	1	0.3797	0.2837	0.8029	0.2506	0.4768	0.601	0.1333	0.444	0.5458	0.444	0.329	0.444	0.5192	0.444	0.7671
Lat(deg)	0	0.3803	0.2458	0.0001	0.2708	0.3801	0.3797	1	0.3262	0.3501	0.3418	0.0011	0.5972	0.386	0	0.5827	0	0.1494	• •	0.6609	0	0.3071
Lon(deg)	0.6729	0.2703	0.4087	0.673	0.3664	0.2715	0.2837	0.3262	1	0.3013	0.8971	0.674	0.0105	0.5161	0.6729	0.0163	0.6729	0.7049	0.6729	0.0598	0.6729	0.3447
Height	0.3389	0.9597	0.7419	0.6247	0.4579	0.9656	0.8029	0.3501	0.3013	1	0.277	0.6222	0.5444	0	0.3389	0.6447	0.3389	0.2849	0.3389	0.5918	0.3389	0.8296
East	0.6118	0.2496	0.3681	0.6119	0.2862	0.2494	0.2506	0.3418	0.8971	0.277	1	0.6129	0.008	0.4795	0.6118	0.017	0.6118	0.7206	0.6118	0.0825	0.6118	0.3126
North	0.7109	0.5824	0.6347	0.9973	0.6617	0.5902	0.4768	0.0011	0.674	0.6222	0.6129	1	0.1827	0.374	0.7109	0.2996	0.7109	0.607	0.7109	0.2424	0.7109	0.5437
Vert	0.1134	0.5704	0.4551	0.1817	0.5179	0.5787	0.601	0.5972	0.0105	0.5444	0.008	0.1827	1	0.4147	0.1134	0.8653	0.1134	0.0713	0.1134	0.8121	0.1134	0.5
HZTrop	0.5228	0.0326	0.1953	0.3729	0.5352	0.0299	0.1333	0.386	0.5161	0	0.4795	0.374	0.4147	1	0.5228	0.3469	0.5228	0.5363	0.5228	0.3522	0.5228	0.1195
WZTrop	1	0.3128	0.5304	0.7111	0.3737	0.3064	0.444	0	0.6729	0.3389	0.6118	0.7109	0.1134	0.5228	1	0.0132	1	0.7855	1	0	1	0.5001
WZTrop_Sig	0.0132	0.6706	0.4663	0.3001	0.6346	0.6769	0.5458	0.5827	0.0163	0.6447	0.017	0.2996	0.8653	0.3469	0.0132	1	0.0132	0.0161	0.0132	0.8948	0.0132	0.4844
TropGrad_N	1	0.3128	0.5304	0.7111	0.3737	0.3064	0.444	0	0.6729	0.3389	0.6118	0.7109	0.1134	0.5228	1	0.0132	1	0.7855	1	0	1	0.5001
TropGrad_Nsig	0.7855	0.2551	0.4303	0.606	0.2928	0.2529	0.329	0.1494	0.7049	0.2849	0.7206	0.607	0.0713	0.5363	0.7855	0.0161	0.7855	1	0.7855	0.0844	0.7855	0.3879
TropGrad_E	1	0.3128	0.5304	0.7111	0.3737	0.3064	0.444	0	0.6729	0.3389	0.6118	0.7109	0.1134	0.5228	1	0.0132	1	0.7855	1	0	1	0.5001
TropGrad_Esig	0	0.6218	0.4248	0.2415	0.5712	0.6241	0.5192	0.6609	0.0598	0.5918	0.0825	0.2424	0.8121	0.3522	0	0.8948	0	0.0844	0	1	0	0.4511
Clock(m)	1	0.3128	0.5304	0.7111	0.3737	0.3064	0.444	0	0.6729	0.3389	0.6118	0.7109	0.1134	0.5228	1	0.0132	1	0.7855	1	0	1	0.5001
Clock_Sig	0.5001	0.7998	0.7463	0.5444	0.3402	0.7995	0.7671	0.3071	0.3447	0.8296	0.3126	0.5437	0.5	0.1195	0.5001	0.4844	0.5001	0.3879	0.5001	0.4511	0.5001	1

# Negative Consonance

	-															WZTrop	TropGrad	TropGrad	TropGrad	TropGrad		Clock_Sig
nu	Sec	X(m)	x_sig(m)	Y(m)	Y_Sig(m)	2(m)	2_Sig(m)	Lat(deg)	Lon(deg)	Height(m)	East(m)	North(m)	Vert(m)	H21rop(m)	W21rop(m)	_Sig(m)	_N(m)	_NSig(m)	_E(m)	_ESig(m)	Clock(m)	(m)
Sec	0	0.687	0.4681	0.2888	0.6257	0.6935	0.5558	0.5918	0	0.6611	0	0.288	0.8813	0.3324	0	0.9823	0	0	0	0.9034	0	0.4997
X(m)	0.687	0	0.2891	0.4148	0.5441	0.0135	0.2009	0.2118	0.4028	0.04	0.3625	0.4163	0.424	0.8229	0.687	0.3248	0.687	0.5307	0.687	0.2817	0.687	0.1998
X_Sig(m)	0.4681	0.2891	0	0.3651	0.5232	0.2822	0.1906	0.3466	0.2645	0.2566	0.2442	0.3629	0.5381	0.6593	0.4681	0.5282	0.4681	0.3553	0.4681	0.4787	0.4681	0.252
Y(m)	0.2888	0.4148	0.3651	0	0.3368	0.4081	0.5238	0.5918	0	0.3752	0	0.0015	0.8129	0.4824	0.2888	0.6953	0.2888	0.1796	0.2888	0.662	0.2888	0.4554
Y_Sig(m)	0.6257	0.5441	0.5232	0.3368	0	0.5326	0.614	0.3208	0.3064	0.5415	0.3255	0.3367	0.4762	0.3194	0.6257	0.3604	0.6257	0.493	0.6257	0.332	0.6257	0.6591
Z(m)	0.6935	0.0135	0.2822	0.4081	0.5326	0	0.1954	0.2118	0.4015	0.0343	0.3625	0.4086	0.4159	0.8254	0.6935	0.3185	0.6935	0.5327	0.6935	0.2794	0.6935	0.2002
Z_Sig(m)	0.5558	0.2009	0.1906	0.5238	0.614	0.1954	0	0.2122	0.3893	0.1969	0.3614	0.5219	0.3934	0.7218	0.5558	0.4495	0.5558	0.4564	0.5558	0.3841	0.5558	0.2325
Lat(deg)	0.5918	0.2118	0.3466	0.5918	0.3208	0.2118	0.2122	0	0.591	0.2417	0.5454	0.5918	0	0.3501	0.5918	0.0131	0.5918	0.5268	0.5918	0	0.5918	0.2849
Lon(deg)	0	0.4028	0.2645	0	0.3064	0.4015	0.3893	0.591	0	0.3715	0	0	0.6677	0.3011	0	0.6586	0	0	0	0.6361	0	0.3283
Height(m)	0.6611	0.04	0.2566	0.3752	0.5415	0.0343	0.1969	0.2417	0.3715	0	0.3348	0.3766	0.4503	0.8552	0.6611	0.3508	0.6611	0.5006	0.6611	0.3117	0.6611	0.1703
East(m)	0	0.3625	0.2442	0	0.3255	0.3625	0.3614	0.5454	0	0.3348	0	0	0.6091	0.277	0	0.5992	0	0	0	0.5977	0	0.2993
North(m)	0.288	0.4163	0.3629	0.0015	0.3367	0.4086	0.5219	0.5918	0	0.3766	0	0	0.8112	0.4823	0.288	0.6953	0.288	0.1796	0.288	0.662	0.288	0.4551
Vert(m)	0.8813	0.424	0.5381	0.8129	0.4762	0.4159	0.3934	0	0.6677	0.4503	0.6091	0.8112	0	0.442	0.8813	0.1251	0.8813	0.7138	0.8813	0.089	0.8813	0.4945
HZTrop(m)	0.3324	0.8229	0.6593	0.4824	0.3194	0.8254	0.7218	0.3501	0.3011	0.8552	0.277	0.4823	0.442	0	0.3324	0.5082	0.3324	0.2813	0.3324	0.4948	0.3324	0.7357
WZTrop(m)	0	0.687	0.4681	0.2888	0.6257	0.6935	0.5558	0.5918	0	0.6611	0	0.288	0.8813	0.3324	0	0.9823	0	0	0	0.9034	0	0.4997
WZTrop_Sig(m)	0.9823	0.3248	0.5282	0.6953	0.3604	0.3185	0.4495	0.0131	0.6586	0.3508	0.5992	0.6953	0.1251	0.5082	0.9823	0	0.9823	0.7737	0.9823	0.0127	0.9823	0.5109
TropGrad_N(m)	0	0.687	0.4681	0.2888	0.6257	0.6935	0.5558	0.5918	0	0.6611	0	0.288	0.8813	0.3324	0	0.9823	0	0	0	0.9034	0	0.4997
TropGrad_NSig(m)	0	0.5307	0.3553	0.1796	0.493	0.5327	0.4564	0.5268	0	0.5006	0	0.1796	0.7138	0.2813	0	0.7737	0	0	0	0.7733	0	0.3977
TropGrad_E(m)	0	0.687	0.4681	0.2888	0.6257	0.6935	0.5558	0.5918	0	0.6611	0	0.288	0.8813	0.3324	0	0.9823	0	0	0	0.9034	0	0.4997
TropGrad_ESig(m)	0.9034	0.2817	0.4787	0.662	0.332	0.2794	0.3841	0	0.6361	0.3117	0.5977	0.662	0.089	0.4948	0.9034	0.0127	0.9034	0.7733	0.9034	0	0.9034	0.4524
Clock(m)	0	0.687	0.4681	0.2888	0.6257	0.6935	0.5558	0.5918	0	0.6611	0	0.288	0.8813	0.3324	0	0.9823	0	0	0	0.9034	0	0.4997
Clock_Sig(m)	0.4997	0.1998	0.252	0.4554	0.6591	0.2002	0.2325	0.2849	0.3283	0.1703	0.2993	0.4551	0.4945	0.7357	0.4997	0.5109	0.4997	0.3977	0.4997	0.4524	0.4997	0

Фигура 48. Период с коректни решения (SOFA 2009:06:04 (00:00:00-01:18:00)).

# Positive Consonance

Positive	Con	isona	ance																			
mu	Sec	X(m)	X_Sig(m)	Y(m)	Y_Sig(m)	Z(m)	Z_Sig(m)	Lat(deg)	Lon(deg)	Height(m)	East(m)	North(m)	Vert(m)	HZTrop(m)	WZTrop(m)	WZTrop_	TropGrad	TropGrad_	TropGrad_	TropGrad_	Clock(m)	Clock_Sig(
Sec	1	0.7728	0.3562	0.6874	0.5581	0.75	0.6455	0	· c	0.7645	0	0.4285	0.4956	0	1	0.0232	1	0.244	1	0.8046	1	0.1465
X(m)	0.7728	1	0.2594	0.827	0.4019	0.8882	0.6617	0.0019	0.0019	0.9422	0.0019	0.4539	0.4937	0.0019	0.7728	0.2347	0.7728	0.3295	0.7728	0.678	0.7728	0.2796
X_Sig(m)	0.3562	0.2594	1	0.2799	0.7015	0.2784	0.4478	0.0713	0.0713	0.2648	0.0713	0.4666	0.4351	0.0713	0.3562	0.5509	0.3562	0.3777	0.3562	0.3613	0.3562	0.4913
Y(m)	0.6874	0.827	0.2799	1	0.3724	0.8243	0.6307	0.0031	0.0031	0.8414	0.0031	0.6229	0.5145	0.0031	0.6874	0.2969	0.6874	0.3473	0.6874	0.6019	0.6874	0.3304
Y_Sig(m)	0.5581	0.4019	0.7015	0.3724	1	0.3976	0.5912	0.0407	0.0407	0.401	0.0407	0.4327	0.4257	0.0407	0.5581	0.4271	0.5581	0.36	0.5581	0.4231	0.5581	0.5182
Z(m)	0.75	0.8882	0.2784	0.8243	0.3976	1	0.6726	0.0013	0.0013	0.9409	0.0013	0.4832	0.6014	0.0013	0.75	0.2389	0.75	0.3232	0.75	0.6659	0.75	0.2858
Z_Sig(m)	0.6455	0.6617	0.4478	0.6307	0.5912	0.6726	1	0.0759	0.0759	0.673	0.0759	0.3787	0.532	0.0759	0.6455	0.3028	0.6455	0.2354	0.6455	0.6372	0.6455	0.334
Lat(deg)	0	0.0019	0.0713	0.0031	0.0407	0.0013	0.0759	1	. 1	0.0008	1	0.0641	0.0568	1	0	0.008	0	0.2209	0	0.1283	0	0.0001
Lon(deg)	0	0.0019	0.0713	0.0031	0.0407	0.0013	0.0759	1	. 1	0.0008	1	0.0641	0.0568	1	0	0.008	0	0.2209	0	0.1283	0	0.0001
Height(m)	0.7645	0.9422	0.2648	0.8414	0.401	0.9409	0.673	0.0008	0.0008	1	0.0008	0.4781	0.5435	0.0008	0.7645	0.2363	0.7645	0.3228	0.7645	0.6743	0.7645	0.2821
East(m)	0	0.0019	0.0713	0.0031	0.0407	0.0013	0.0759	1	1	0.0008	1	0.0641	0.0568	1	0	0.008	0	0.2209	0	0.1283	0	0.0001
North(m)	0.4285	0.4539	0.4666	0.6229	0.4327	0.4832	0.3787	0.0641	0.0641	0.4781	0.0641	1	0.4926	0.0641	0.4285	0.4875	0.4285	0.4152	0.4285	0.3834	0.4285	0.4645
Vert(m)	0.4956	0.4937	0.4351	0.5145	0.4257	0.6014	0.532	0.0568	0.0568	0.5435	0.0568	0.4926	1	0.0568	0.4956	0.4269	0.4956	0.3478	0.4956	0.4617	0.4956	0.4165
HZTrop(m)	0	0.0019	0.0713	0.0031	0.0407	0.0013	0.0759	1	. 1	0.0008	1	0.0641	0.0568	1	0	0.008	0	0.2209	0	0.1283	0	0.0001
WZTrop(m)	1	0.7728	0.3562	0.6874	0.5581	0.75	0.6455	0	· .	0.7645	0	0.4285	0.4956	0	1	0.0232	1	0.244	1	0.8046	1	0.1465
WZTrop_Sig(m)	0.0232	0.2347	0.5509	0.2969	0.4271	0.2389	0.3028	0.008	0.008	0.2363	0.008	0.4875	0.4269	0.008	0.0232	1	0.0232	0.5375	0.0232	0.0817	0.0232	0.8647
TropGrad_N(m)	1	0.7728	0.3562	0.6874	0.5581	0.75	0.6455	0	·	0.7645	0	0.4285	0.4956	0	1	0.0232	1	0.244	1	0.8046	1	0.1465
TropGrad_NSig(m)	0.244	0.3295	0.3777	0.3473	0.36	0.3232	0.2354	0.2209	0.2209	0.3228	0.2209	0.4152	0.3478	0.2209	0.244	0.5375	0.244	1	0.244	0.3426	0.244	0.5117
TropGrad_E(m)	1	0.7728	0.3562	0.6874	0.5581	0.75	0.6455	0	· C	0.7645	0	0.4285	0.4956	0	1	0.0232	1	0.244	1	0.8046	1	0.1465
TropGrad_ESig(m)	0.8046	0.678	0.3613	0.6019	0.4231	0.6659	0.6372	0.1283	0.1283	0.6743	0.1283	0.3834	0.4617	0.1283	0.8046	0.0817	0.8046	0.3426	0.8046	1	0.8046	0.0848
Clock(m)	1	0.7728	0.3562	0.6874	0.5581	0.75	0.6455	0	0	0.7645	0	0.4285	0.4956	0	1	0.0232	1	0.244	1	0.8046	1	0.1465

# Negative Consonance

nu	Sec	X(m)	X_Sig(m)	Y(m)	Y_Sig(m)	Z(m)	Z_Sig(m)	Lat(deg)	Lon(deg)	Height(m)	East(m)	North(m)	Vert(m)	HZTrop(m	) WZTrop(m)	WZTrop_	TropGrad	TropGrad_	TropGrad_	TropGrad_	Clock(m)	Clock_Sig
Sec	0	0.2253	0.5725	0.3095	0.4013	0.2487	0.2785	o	· c	0.2347	c	0.5073	0.4476	. c	o o	0.9688	0	0.5351	0	0.0671	0	0.8534
X(m)	0.2253	0	0.6682	0.168	0.5562	0.1086	0.2613	0	· c	0.0551	. o	0.4802	0.4481		0.2253	0.7556	0.2253	0.4497	0.2253	0.193	0.2253	0.7184
X_Sig(m)	0.5725	0.6682	0	0.6463	0.2247	0.65	0.4389	0	. a	0.6632	0	0.4112	0.4481		0.5725	0.3775	0.5725	0.4027	0.5725	0.4902	0.5725	0.4375
Y(m)	0.3095	0.168	0.6463	0	0.5843	0.1713	0.2908	0	. a	0.1547	0	0.3104	0.4259		0.3095	0.692	0.3095	0.4305	0.3095	0.268	0.3095	0.6664
Y_Sig(m)	0.4013	0.5562	0.2247	0.5843	0	0.5611	0.335	0	· .	0.5577	0	0.4689	0.4829		0.4013	0.5306	0.4013	0.4107	0.4013	0.4401	0.4013	0.4412
Z(m)	0.2487	0.1086	0.65	0.1713	0.5611	0	0.2508	0	· .	0.0572	0	0.4516	0.3411		0.2487	0.752	0.2487	0.4559	0.2487	0.2059	0.2487	0.7128
Z_Sig(m)	0.2785	0.2613	0.4389	0.2908	0.335	0.2508	0	0	· .	0.2503	0	0.4895	0.3442		0.2785	0.6183	0.2785	0.506	0.2785	0.2113	0.2785	0.5902
Lat(deg)	0	0	0	0	0	0	0	o	. a	0 0	. a	0	0	. c	o o	0	0	0	0	0	0	0
Lon(deg)	0	0	0	0	0	0	0	o	· .	) a	· 0	· 0	0	· .	o o	0	0	0	0	0	0	0
Height(m)	0.2347	0.0551	0.6632	0.1547	0.5577	0.0572	0.2503	0	. a	) o	· 0	0.457	0.3992		0.2347	0.755	0.2347	0.4557	0.2347	0.1968	0.2347	0.717
East(m)	0	0	0	0	0	0	0	o	· .	) 0	· 0	· 0	0	· .	) o	0	0	0	0	0	0	o
North(m)	0.5073	0.4802	0.4112	0.3104	0.4689	0.4516	0.4895	0	· .	0.457	0	· 0	0.3953		0.5073	0.4414	0.5073	0.3339	0.5073	0.4464	0.5073	0.4715
Vert(m)	0.4476	0.4481	0.4481	0.4259	0.4829	0.3411	0.3442	0	. a	0.3992	0	0.3953	0		0.4476	0.5094	0.4476	0.4049	0.4476	0.3715	0.4476	0.5266
HZTrop(m)	0	0	0	0	0	0	0	0	· .	0	0	0	0	· .	。 。	0	0	0	0	0	0	0
WZTrop(m)	0	0.2253	0.5725	0.3095	0.4013	0.2487	0.2785	0	· .	0.2347	0	0.5073	0.4476		o o	0.9688	0	0.5351	0	0.0671	o	0.8534
WZTrop_Sig(m)	0.9688	0.7556	0.3775	0.692	0.5306	0.752	0.6183	0	. a	0.755	0	0.4414	0.5094		0.9688	0	0.9688	0.246	0.9688	0.7941	0.9688	0.1272
TropGrad_N(m)	0	0.2253	0.5725	0.3095	0.4013	0.2487	0.2785	0	· .	0.2347	0	0.5073	0.4476		) o	0.9688	0	0.5351	0	0.0671	0	0.8534
TropGrad_NSig(m)	0.5351	0.4497	0.4027	0.4305	0.4107	0.4559	0.506	0	· .	0.4557	0	0.3339	0.4049		0.5351	0.246	0.5351	0	0.5351	0.462	0.5351	0.2675
TropGrad_E(m)	0	0.2253	0.5725	0.3095	0.4013	0.2487	0.2785	0	· .	0.2347	o	0.5073	0.4476		0 0	0.9688	0	0.5351	0	0.0671	o	0.8534
TropGrad_ESig(m)	0.0671	0.193	0.4902	0.268	0.4401	0.2059	0.2113	0	· .	0.1968	0	0.4464	0.3715		0.0671	0.7941	0.0671	0.462	0.0671	0	0.0671	0.7868
Clock(m)	0	0.2253	0.5725	0.3095	0.4013	0.2487	0.2785	0	· .	0.2347	0	0.5073	0.4476		。 。	0.9688	0	0.5351	0	0.0671	0	0.8534
Clock_Sig(m)	0.8534	0.7184	0.4375	0.6664	0.4412	0.7128	0.5902	0		0.717	0	0.4715	0.5266		0.8534	0.1272	0.8534	0.2675	0.8534	0.7868	0.8534	0

Фигура 49. Период с грешни решения (SOFA 04-06-2009 г. (13:02:00- 14:21:00)).

# Изводи от Корелационния и Интеркритериалния анализ

И в трите разгледани метода се забелязат големи разлики в корелационните коефициенти (и критериите) между определените координати (и техните грешки) и тропосферните параметри (и техните грешки) за периодите с "нормални" решения и периодите с грешни решения.

Изказваме хипотезата, че с натрупването и анализирането на голяма база данни, могат да се определят подходящи прагови стойости на съответните коефициенти на корелация (и критерии), като критерии за периоди с грешни решения и отделянето тези периоди за изследване на факторите, причинили грешките.

Интересно е да се проучи наблюдението, че интеркритериалият анализ дава по-близки резултати с корелационните, когато данните са коректни, отколкото, когато данните са некоректни. Може би, това ще се окаже удобен критерий за проверка на коректността на данните.

Следваща задача е, да се определят зависимостите между увеличаването и намаляването на грешките в координатите и остналите корелационни (и критериални) параметри в горните таблици. Ще се наложи автоматизиране на процеса на обработка, поради големия големият обем от данни.

Това може да помогне за поставянето на по-адекватни тежести във функционалните модели, конкретно в системите за мониторинг на тропосферата и системите за синхронизация на високоточни скали за време.

# Други изводи от анализа на параметрите на решението на APPS

Часовниците на съвременните геодезически GPS приемници нямат необходимата стабилност, за да осигурят независим китерий, алармиращ за грешно определени координати. Независимо от това, параметърът ClockSig от решенията на APPS, при подходящо зададена прагова стойност, може да се използва като критерий за отстраняването груби грешки (Фигура 50а,б).

Ако получаваме този параметър в реално време на подвижния приемник, ще можем да реагираме моментално.



Фигура 50а. Параметърът ClockSig сигнализира за груби грешки в данните (SOFA 04-06-2009 за периода между 46740 sec и 54420 sec за съответния ден).



Фигура 50б. Груби грешки в данните (SOFA 04-06-2009 за периода между 46740 sec и 54420 sec за съответния ден).

# 5. Софтуер за визуализция и анализ на качеството на GPS приемници с помощта на програмата TEQC на UNAVCO

Добра възможност за контрол на качеството на измерванията ни дава модулът QUALITY CHECK на програмата TEQC на UNAVCO (University Navstar Consortium)<sup>7</sup>.

Това е софтуер за контрол на качеството на статични и кинематичните измервания, направени с двучестотни GPS и GLONASS приемници. Потребителите могат да извършват оценка на качеството на даните, като за това са необходими данните, получени от само един приемник. Получените резултати могат да се използват за редактиране на данните преди основната им обработката

Модулът използва линейни комбинации от псевдоразстояния и фазови наблюдения, за да се изчисли (1) степента на влиянието на отразените сигнали върху псевдоразстоянията (multipath) за *CIA* или Р кодовите измервания на честотата L1, (2) степента на влиянието на отразените сигнали върху псевдоразстоянията (multipath) за Р кодовите измервания на честотата L2, (3) йоносферното закъснение на сигналите и (4) скоростта на промяната на йоносферното закъснение на сигналите. Информацията, касаеща грешките на часовниците, цикличните грешки (загуба на сигнала по LI и/или L2 честотата), приемането на отразени сигнали за конкретната станция, азимута и височината на спътниците над хоризонта, дрейфа на часовника на приемника, отношението сигнал/шум за приемника и други полезни параметри, се записва в изходен (текстов) файл в UNAVCO COMPACT или COMPACT2 формат (Фигура 51).

COMPACT SVS 01:01 02:02 03:03 04:04 05:05 06:06 07:07 08:08 09:09 10:10 11:11 12:12 13:13 14:14 15:15 16:16 17:17 18:18 19:19 20:20 21:21 22:22 23:23 24:24 25:25 26:26 27:27 28:28 29:29 30:30 31:31 32:32 T\_SAMP 30.0 START TIME MJD 54981.000000 8 03 06 16 18 21 22 24 29 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 -1 0.103 -0.007 -0.007 -0.042 0.002 -0.084-0.0420.079 -1 0.114 0.054 -0.068 0.022 -0.049 -0.087 -0.163 0.046 COMPACT2 T\_SAMP 30.0 START\_TIME\_MJD 54981.000347 11 G03 G06 G15 G16 G18 G21 G22 G24 G25 G29 G31 17.442 33.013 5.508 59.196 45.896 71.588 23.512 27.407 4.734 32.075 3.933 11 G03 G06 G15 G16 G18 G21 G22 G24 G25 G29 G31 17.628 33.200 5.599 59.303 46.102 71.366 23.734 27.215 4.763 31.902 3.769 Фигура 51. Пример за данните в СОМРАСТ/ СОМРАСТ2 формат

Основните алгоритми, използвани в TEQC, следват уравненията, използвани в първоначалната QC програма на UNAVCO. Фазовите измервания и псевдоразстоянията се моделират посредством (Hatch, 1982; Kelecy, 1990; Rocken et al., 1996) [142], [143], [144]:

$$L_i = R + c(dt_r + dt_s) - I_i + N + m_i + n_i\lambda_i$$
(5.1)

$$P_i = R + c(dt_r + dt_s) + I_i + N + M_i$$
(5.2)

където:

 $L_i = \phi$ азата на сигнала за честота *i* (в метри)

 $P_i$  = псевдоразстоянието за честота *i* (в метри)

*R* = разстоянието между спътника и антената на приемника (в метри)

с = скоростта на светлината (в метри)

 $dt_r$  = грешката на часовника на приемника

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> <u>http://facility.unavco.org/software/teqc/tutorial.html</u>

 $dt_s$  = грешката на часовника на спътника

 $I_i$  = йоносферната грешка в разстоянието за честота i

*N* = закъснението на сигнала породено от неутралната атмосфера

 $m_i = \phi$ азовата грешката от отразени сигнали за честота i

*M<sub>i</sub>* = грешката в псевдоразстоянията причинена от отразени сигнали за честота *i* 

 $n_i \lambda_i$  = целочислената фазова неопределеност за честота *i*.

където i = 1 или 2 се отнася за двете носещи честоти на GPS signalite1575.42 MHz и 1227.60 MHz.

При разработката на софтуера са използвани данни от перманентните станции SOFI от IGS (BKG) и SOFA от мрежата Hemus Net. Данните са за 20 дневен период.

Модулът на Фигура 54а визуализиращ данните за съотношението сигнал/шум по двете честоти за всички спътници за избрания ден.



Фигура 54а. SOFA (SN1/SN2) 04-06-2009 г. – отбелязан е периода с грешни данни.

Следващите модули на Фигура 546, в визуализират съотношението сигнал/шум (SN1, SN2) и multipath (MP1, MP2) във функция от пространственото разположение на спътниците за конкретен, избран от наблюдателя интервал от време (периода с грешни данни от Фигура 52).



Фигура 53. Съотношението сигнал/шум (SN1, SN2) и влиянието на отразени сигнали (multipath) във функция от пространственото разположение на спътниците в избрания интервал от време.

Възможна е интерференция на сигналите на спътниците SN#18 и SN#25.

# 6. Обобщение и заключение

В Дисертацията са изяснени и систематизирани основните източници на грешки в DGPS/RTK режима и е проведен подробен анализ на факторите, причиняващи грешки, при този род измервания.

Разгледани са моделите за прецизното опредляне на положението с GPS и мрежите от референтни станции.

Систематизирани са методите за тестване на GPS приемници.

Анализирани са видовете дисперсии, използвани при метрологичния контрол на високоточни скали за време и са предложени подходящи дисперсии за оценка и анализ DGPS/RTK измервания.

Изяснени са проблемите, възникващи при обработката и анализа на геодезическите времеви редове и характера на шума в тях.

Въз основа на тези анализи, е избран поход, различаващ се от глобалния анализ на GPS мрежите, и е създадена методика включваща:

Предварителен тест на GPS приемници в кинематичен режим – реално време по стандарта ISO 17123-8:2007;

Анализ на времеви редове с помощтта на: МНМК; Дисперсионен анализ (дисперсии на Алан, дисперсия на Адамар); Статистически анализ на връзките между параметрите на решението и техните грешки (Корелационен анализ); Интеркритериален анализ.

За целите на Дисертацията бяха създадени няколко програмни продукта:

Програма за Предварителен тест на GPS приемници в кинематичен режим – реално време по стандарта ISO 17123-8:2007;

Програма за тестване на GPS приемници Trimble 4000SSE при работа в диференциален режим;

Програма за анализи на параметрите на решнието на перманентни GPS станции получени с помоща на APPS (Automatic Precise Positioning Service) на Глобалната Диференциална GPS система (Global Differential GPS - GDGPS) на НАСА и JPL и програмата Gipsy 6.3;

Програма за визуализция и анализ на качеството на данните от GPS приемници с помощта на програмата TEQC на UNAVCO.

Общо, за тези четири програми бяха създадени алгоритми за извличане на интересуващите ни параметри, автоматично оразмеряване на скалите, и визуализацията на параметрите.

Програмата за анализи на параметрите на решението на перманентни GPS станции получени с помоща на APPS (**GPSTests**) е създадена на модулен принцип. Създадени са алгоритми за следните модули:

Визуален анализ на параметрите (Data Inspection);

Предварителна обработка на данните (Modify);

Анализ на параметрите на решението (Analyse);

Дисперсионен анализ (ExcelDEVTables);

Корелационен анализ (ExcelCORRTables);

Тези програми дават възможност да се автоматизира и ускори, до голяма степен, процесът на обработка на наблюденията.

Програмите са разработени на Visual Basic.NET (VB.NET). Този програмен език е част от безплатния пакет Visual Studio (2008) на средата за разработка на софтуер (.NET) Framework на Microsoft. В основата на .NET Framework стои *средата за изпълнение на общия език* (*common language runtime*, CLR). CLR предлага много предимства, като възможност програмистите да програмират, на който и да е от съвместимите с CLR 17 (.NET) езика (като Visual Basic, C++, C#, FORTRAN и т.н.). Компонентите, написани на Visual Basic.NET, могат да бъдат извикани и използвани на всеки един от тези езици и обратно.

Освен VB.NET са използвани и програмите от стандартния пакет Microsoft Office, както и функции от програмата за статистически анализ със свободен достъп XAlglib. От библиотеката на XAlglib са използвани следните функции: pearsoncorr2, spearmancorr2, invchisquaredistribution, samplemedian, samplemoments.

Общият размер на програмния код, без вградената програмата за статистически анализ със свободен достъп XAlglib, е над 9.3 MB.

С помощтта на този софтуер се изследва:

• Процентът на успеваемост - процентът (в интервала 0-100%) на успешните решения (в границите на допустимата грешка).

• Анализира на шума в данните.

- Оптималния период на усредняване.
- Възможното влияние на отразени сигнали върху изследваните точки.

• Съотношението сигна/шум на всички спътници, участващи в решението по двете честоти L1 и L2 в зависимост от височината им над хоризонта и възможната корелация на това съотношение с грешките, причинени от отразени сигнали.

• Изследва възможността за извеждане на статистически достоверен критерий за филтриране на грешките в РVТ (позиция, скорост, време) решението в реално време.

• Корелацията между параметрите на решението на проблемни области и се сравнява с тази от успешните решения.

• Влиянието на пространствено корелираните грешки върху точността на решението.

В дисертацията са посочени конкретни примери от тези операции. Представянето на всички възможни моменти от анализа би надхвърлило значително приемливия обем на Дисертацията.

# Валидиране на разработения софтуер

В дисертацията са използвани следните методи за валидиране на разработения софтуер:

1. Сравняване на резултатите от програмата с ръчно изчислени малки масиви от данни (като в NBS Monograph 140Annex 10.E).

2. Сравняване с публикувани резултати. Важен метод за валидиране е сравнение на резултатите от програмата с тест пакет, като например тези в публикации [147] и [141]. Копия от тези данни са достъпни он-лайн [149].

3. Проверки за съответствие: Новите програми са проверени за вътрешна съгласуваност, като например получаването на същите резултати за стабилността на фазата и честотата.

4. С имитация на данни.

5. Освен VB.NET са използвани и програмите от стандартния пакет Microsoft Office, както и функции от програмата за статистически анализ със свободен достъп XAlglib.

# Развитие на проекта

Изказваме хипотезата, че с натрупването и анализирането на голяма база данни, могат да се определят подходящи прагови стойости на съответните коефициенти на корелация (и критерии), като критерии за периоди с грешни решения и отделянето тези периоди за изследване на факторите, причинили грешките.

Интересно е да се проучи наблюдението, че интеркритериалият анализ дава по-близки резултати с корелационните, когато данните са коректни, отколкото, когато данните са некоректни. Може би това ще се окаже удобен критерий за проверка на коректността на данните.

Следваща задача е, да се определят зависимостите между увеличаването и намаляването на грешките в координатите и остналите корелационни (и критериални) параметри в горните таблици. Ще се наложи автоматизиране на процеса на обработка, поради големия големият обем от данни.

Интеркритериалният анализ, наред с останалите методи, предложени в дисертцията, могат да бъдат използвани при анализа на грешките и на другите GNSS системи (ГЛОНАСС, Galileo).

Областите на приложение на DGPS/RTK метода, в които резултатите от анализите и програмните продукти от тази Дисертация могат да бъдат използвани са:

Сгъстяване на опорни геодезически мрежи;

Едромащабни топографски снимки;

Трасиране на профили при геофизични измервания;

Геодезически измервания при експолатацията на нефтени и газови находища;

Топограско-геодезически измервания при провеждането на гравиметрични снимки;

Натрупването на геодезически данни за ГИС с различно приложение;

Градския и поземлен кадастър;

Геодезически измервания при строителството на инженерни съоръжения;

Паспортизация на пътища;

Геодинамичен мониторинг;

Хидрографски снимки на акваторията на пристанища и континенталния шелф;

Аерофотограмметрични снимки;

Лесовъдството;

Мониторинг на деформациите.

В авиацията се предвижда GNSS (Global Navigation Satellite System) да се превърне в основно средство за навигация.

Военни приложения.

# 7. Приноси

- Изяснени основните източници на грешки в DGPS/RTK режима и е проведен подробен анализ на факторите, причиняващи грешки, при този род измервания.
- Анализирани са видовете дисперсии, използвани при метрологичния контрол на високоточни скали за време и са предложени подходящи дисперсии за оценка и анализ DGPS/RTK измервания.
- Проведен е статистически анализ и оценки на качеството на кинематични решения, получени с помощта на APPS (*Automatic Precise Positioning Service*) на Глобалната Диференциална GPS система (*Global Differential GPS* GDGPS) на HACA и JPL, за две перманентни станции SOFA и SOFI.
- Създадени са програми и алгоритми за извличане, визуализация и анализ на резултатите от DGPS/RTK измерванията (описани в Глава 6) и методика за оценка на грешките, описана в експерименталната част на Дисертацията.

# 8. Публикации, свързани с дисертационния труд

1. Kovachev P. (2010), Specialized software for analysis of differential GPS data, Geodesy Vol.21, ISNN 0324-1114,137-146

2. Valentin Kotzev, Nikolay Dimitrov, Katia Kotzeva, Peter Kovachev (2003) Velocities for the EUREF stations in Bulgaria – поредица "Висша геодезия", №16, 2003, 142-144

3. П. Ковачев (2010), Методи за анализ и метрологичен контрол на часовниците на GPS приемници, Годишник на секция "Информатика" Съюз на учените в България, Том 3, 2010, ISSN 1313-61052, 67-89

4. П. Ковачев, Основна последователност на обработката и анализа на данните от GPS измервания (алгоритъм), Годишник на секция "Информатика" Съюз на учените в България, Том 4, 2011, ISNN 1313-61052, 68-89

5. P.Kovachev (2012), Specialized software for visualization and analysis of GPS data quality using TEQC (UNAVCO) program, Bulgarian Academy of Sciences, Geodesy 22, ISNN 0324-1114,77-87

6. Ковачев П., Коцева К. (2014), Софтуер за тестване на GNSS приемници в кинематичен режим – реално време по стандарта ISO 17123-8:2007, Годишник на секция "Информатика" Съюз на учените в България, Том 7, 2014, 65–77

7. Mitev, G., P. Kovachev, N. Dimitrov, K. Kotzeva (2003): Implementation for transmission of differential corrections between GPS Receivers, ELECTRONICS, ET'2002, Book 4, 66

# 8. Използвана литература

1. Коцев В., Ганчев Н., Ковачев П., Коцева К. (2002): Военни приложения на глобалната позиционна система (GPS) - Международна научна конференция - Изследвания и технологии за нуждите на отбраната "Модернизация на въоръжените сили - крайъгълен камък по пътя към НАТО"(2001)

2. Хофман-Веленхоф Б., Лихтенгер Х., Колинс Дж., Глобална система за определяне на местоположение. Теория и практика., София, 2002

3. Коцев, В., Наков Р., Бърчфийл К., Димитров Н., Куртев К., Данчев П., Коцева К., Ковачев П., (2003): Активни напрежения и сеизмична опасност в централната част на западна България, International Research Publications, IV (1), 286-292

4. Valentin Kotzev, Nikolay Dimitrov, Katia Kotzeva, Peter Kovachev: "Velocities for the EUREF stations in Bulgaria" – поредица "Висша геодезия", №16, 2003

5. RTCM PAPER 11-98/SC104-STD. RTCM RECOMMENDED STANDARTS FOR DIFFERENTIAL GNSS (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS) SERVISE. VERSION 2.2. DEVELOPED BY RTCM SPESIAL COMMITTEE NO. 104. JANUARY 15, 1998. Radio Technical commission For Marine Services. 1800 Diagonal Road. Suite 600. Alexandria. Virginia 22314-2840 U.S.A.

6. Muellerschoen R.J., Bertiger W.I., Whitehead M.L. Flight Tests Demonstrate Sub 50 cms RMS Vertical WADGPS Positioning. Proceedings of ION GPS-99. Nashville. Tenn. September 1999. P. 199–210

7. Global Positioning System: Theory and Applications. Edited by B.W. Parkinson and J.J. Spilker Jr. Published by the American Institute of Aeronautics and Astronomics Inc. 1996.

8. Ceva J., Parkinson B., Bertiger W., Muellerschoen R., Yunck T. Incorporation of Orbital Dynamics to Improve Wide-Area Differential GPS. Proceedings of ION GPS-95. P. 647–659. The 8thInternational Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation

9. 2001 Federal Radionavigation Systems, Published by Department of Defense and Department of Transportation, National Technical Information Service, Springfild, Virginia 22161, DOT-VNTSC-01-3.1/DOD-4650.5]

10. Filip, A., H. Mocek, L. Bazant. GPS/GNSS Based Train Positioning for Safety Critical Application. Signal+Draht, (93) №5/2001, p. 51-55

11. Muellerschoen R.J., Bertiger W.I., Lough M., Stovers D. and Dong D. An Internet-Based Global differential GPS System, Initial Results. ION National Technical Meeting. Anaheim. CA. Jan. 2000

12. Muellerschoen R.J., Bar-Sever Y.E., Bertiger W.I., Stovers D.A. Decimeter Accuracy. NASA's Global DGPS for High-precision Users. GPS World. January 2001. P. 14–20

13. Rosenthal G., Requirements for the implementation of geodetic reference systems and their compliance with GNSS reference station networks, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON "GEODETIC, PHOTOGRAMMETRIC AND SATELLITE TECHNOLOGIES – DEVELOPMENT AND INTEGRATED APPLICATION" Sofia, 08 – 09 November, 2001

14. Swedish Radio Navigation Plan, Summary, 2002, Swedish Maritime Administration

15. Wübbena, G., A. Bagge, M. Schmitz, Network-Based Techniques for RTK Applications, Presented at the GPS Symposium, *GPS JIN 2001*, GPS Society, Japan Institute of Navigation, November 14-16, 2001, Tokyo, Japan 16. Wübbena, G., A. Bagge, M. Schmitz RTK Networks based on Geo++® GNSMART - Concepts, Implementation, Results. Presented at the International Technical Meeting, *ION GPS-01*, (2001), Salt Lake City, Utah

17. Минчев М., Диференциални GPS-определения. Първи резултати в България, брой 1, 1995

18. Минчев М., Андреев А., Върху приложението на диференциални GPS методи. Научна сесия 2002, Сборник научни трудове, част III, НВУ, Шумен 2003, 199 – 204

19. Минчев М., Здравчев И., Георгиев И., Основи на приложението на GPS в геодезията, София, 2005

20. Petrov G., Experimental Research on Differential GPS Models, INTERNATIONAL SYMPOSIUM: APPLICATION OF GEODETIC AND INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE PHYSICAL PLANNING OF THE TERRITORIES, November 2000, Sofia

21. MILEV G., VALEV G., MINCHEV M., VASSILEVA K., TASHKOV T.: *National Report of Bulgaria*. EUREF Symposium, 16-18 may 2001, Dubrovnik, Croatia, 8

22. MILEV G., VALEV G., MINCHEV M., VASSILEVA K., GABENSKI P., TASHKOV T., MISHEV D.: *Some Aspects of GNSS Applications in Bulgaria*. UN/USA Workshop on the Use of Global Navigation Satellite Systems. Austria Centre Vienna. Vienna, Austria, 26-30 November 2001, 10

23. MILEV, G., VASSILEVA K., PETROV G., ROSENTHAL G., HARDEL D., ROKAHR F.: *SAPOS*®analoges DGNSS-Referenzstationssystem in Bulgarien. 4. SAPOS-Symposium der AdV, Hannover, 21.-23. Mai 2002, Sammelband, 227-237

24. ROSENTHAL, G., MILEV G., ROKAHR F., VASSILEVA K.: *SAPOS DGNSS Reference Station System in Germany and its Analog in Bulgaria*. UN/USA Workshop on the Use of Global Navigation Satellite Systems. Austria Centre Vienna. Vienna, Austria, 26-30 November 2001,10

25. Zhu S., Groten E. (1988): Relativistic effects in GPS. In: Groten E., Strauβ R. (eds): GPS-techniques applied to geodesy and surveying. Springer, Berlin Heidelberg New York Tokio, 41-46

26. Bhattacharji S., Friedman G., Neugebauer H., Seilacher A. (eds): Lecture Notes in Earth Sciences, vol. 19

27. Grafarend E., Schwarze V., (1991): Relativistic GPS positioning. In: Caputo M., Sansò F. (eds): Proceedings of the geodetic day in honor of Antonio Marussi. Accademia Nazionale dei Lincei, Rome. Atti dei Convegni Lincei, vol. 91: 53-66

28. Hopfield H., Two-quartic troposferic refractivity profile for correcting satellite data. Journal of Geophysical Research, 74(18): 4487-4499

29. Remondi B., Using the Global Positioning System (GPS) phase obserwable for relative geodesy: modeling, processing, and results. University of Texas at Austin, Center for Space Research

30. Saastamoinen J., Contribution to the theory of atmospheric refraction. Bulletin Géodésique, 107:13-34

31. Herring T., Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data. In: Munck JC de, Spoelstra TAT (eds): Refraction of transatmospheric signals in geodesy. Netherlands Geodetic Commission, Delft, new series, vol 36: 157-164

32. Janes H., Langley R., Analysis of tropospheric delay prediction models: comparison with ray-tracking and implications for GPS relative positioning. Bulletin Géodésique, 65: 151-161

33. Spilker J., Tropospheric effects on GPS. In: Parkinson B., Spilker J. (eds): Global Positioning System: theory and applications. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington DC, vol 1: 517-546

34. Brunner F., Welsch W., Effect of the troposphere on GPS measurements. GPS World, 4(1): 42-51

35. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС/ Под ред. В.Н. Харисова, А.Ф. Перова, В.А. Болдина. М.: ИПРЖР, 1998

36. Kaplan E., Understanding GPS. Principles and application. 1996. GP2010. GPS Receiver RF Front End. /Supersedes edition in August 1996 Global Positioning Products Handbook, HB4305-1.0 DS4056-3.4. October 1996

37. Barnes J., Chi A., Cutler L., Healey D., Leeson D., McGunigal T., Mullen J., Smith W., Sydnor R., Vessot R., Winkler G., "Characterization of frequency stability", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol IM-20,pp105-120, May 1971; also NBS Tech. Note 394, Oct. 1970

38. Edmundo A. Marques Filho, Hélio Koiti Kuga, Roberto V. F. Lopes, REAL TIME ESTIMATION OF GPS RECEIVER CLOCK OFFSET BY THE KALMAN FILTER, Proceedings of COBEM, 2003, 17-th International Congress of Mechanical Engeneering, November 10-14, 2003, Sao Paulo, SP

39. Sturza, M.A. (1984), "GPS Navigation Using Three Satellites and a Precise Clock", Global Positioning System, Vol. ii, Washington, DC: The Institute of Navigation, pp. 122-132

40. McBurney, P.W. and Brown, R.G. (1988), "Receiver Clock Stability: An Important Aid in GPS Integrity Problem", Poc. ION National Technical Meeting, Santa Barbara, CA, 526 – 537

41. Murphy, J.J. and Skidmore, T.A. (1994), "A Low-cost Atomic Clock: Impact on the National Airspace and GNSS Availability", Proceeding of ION GPS-94, Salt Lake City, pp. 1329-1336

42. Misra, P., M. Pratt, B. Burk and R. Ferranti (1995a), "Adaptive Modeling of Receiver Clock for Meterlevel DGPS Vertical Positioning", Proceeding of ION GPS-95, pp. 1127 – 1135

43. Lee, Y.C. (1993), "RAIM Availability for GPS Augment with Barometric Altimeter Aiding and Clock Coasting", Navigation, The Journal of ION, Vol. 40, No. 2, pp. 179-198

44. Misra, P., M. Pratt, R. Muchnik and B. Manganis (1995b), "A General RAIM Algorithm Based on Receiver Clock", Proc. ION GPS-95, 1941 – 1948

45. Zhaonian Zhang, Impact of Rubidium Clock Aiding on GPS Augmented Vehicular Navigation, UCGE Reports, Number 20112, THE UNIVERSITY OF CALGARY, Department of Geomatics Engineering, December 1997

46. Б.И. Лобойко, Оценка точности формирования шкал времени, Измерения времени и частоты, 389.14:529.781

47. Аллен, "Статистически характеристик атомных стандартов частоты", *ТИИЭР*, т. 54, № 2, стр. 132-142 (февраль 1966)]
48. Langley R., (1999), Dilution of Precision. GPS World, 10(5), 52-59

49. Kim D., Langley R. (2001), Estimation of the Stochastic Model for Long-Baseline Kinematic GPS Applications, *Presented at the ION National Technical Meeting, January* 22-24, 2001, *Long Beach, CA* 

50. Kim, D. and R.B. Langley (2000). "A Reliable Approach for Ambiguity Resolution in Real-time Longbaseline Kinematic GPS Applications." Proceedings of ION GPS-2000, Salt Lake City, UT, 19-22 September, pp. 1081-1092

51. Langley, R. B. (1997). "GPS observation noise." GPS World, Vol. 8, No. 6, April, pp. 40-45

52. Tiberius, C. C. J. M., N. Jonkman and F. Kenselaar (1999). "The stochastics of GPS observables." *GPS World*, Vol. 10, No. 2, February, pp. 49-54

53. Wübbena, G., A. Bagge (1995). GPS-bezogene Ortungssysteme. Presented at 37. DVW-Seminar Hydrographische Vermessungen - heute -, 28.-29. März 1995, Hannover. *Schriftenreihe des DVW*, Band 14, Verlag Konrad Wittwer, 43

54. Juang J. and Jang C., 1998, Failure Detection Approach Applying To GPS Autonomous Integrity Monitoring, IEE Proceedings-Radar Sonar and Navigation 145 (6), p. 342-346

55. Hewitsyn S., 2003, GNSS Receiver Autonomous Integrity Monitoring: A Separability Analysis, ION GPS/GNSS 2003, September 9-12, Oregon, Portland]

56. Featherstone W.E., Stewart M.P., Tsakiry M., Forward T.A. Penna N., McCarthy R., Houghton H., and Xanthis G., 2001, Establishment of GNSS Testing and Validation Facilities in Perth, Western Australia, Proc. 5<sup>th</sup> International Symposium on Satellite Positionong and Applications, Canbera

57. Jackson M., Meertens C., Andreatta V. and Van Hove T., 2000, GPS Receiver and Antenna Testing Report for SuomiNet, UNAVCO-University NAVSTAR Consortium, Boulder CO

58. Plumb J., Larson K., White J., Powers E., and Beard R., 2002, Stability and Error Analysis For Absolutely Calibrated Geodetic GPS Receivers, 34<sup>th</sup> Annual Precise Time And Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, December 3-5, 2002, Reston, Virginia

59. Wanninger L., and Manja M., 2000, Carrier Phase Multipath Calibration of GPS Reference Station, Proc. ION GPS 2000, Salt Lake City UT, pp.132-144

60. Stombaugh T., Shearer S.A., Fulton J., and Ehsani R., 2002, Elements Of A Dinamic GPS Test Standard, ASAE Annual International Meeting/CIGR XVth World Congress, Chicago, Illinois

61. Holt G., Lightsey E.G., and Montenbruck O., 2003, Benchmark Testing For Spaceborne Global Position System Receivers, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 11-14 August 2003, Austin, Texas

62. Morrissey T., Shallberg K., Van Dierendonck A. and Nicholson M., 2004, GPS Receiver Performance Characterization Under Realistic Ionospheric Phase Scintillation Environments, Radio Science 39 (1): art. no. RS1S20].

63. Gernot M.R. Winkler, "Introduction to Robust Statistics and Data Filtering", Tutorial at 1993 IEEE Freq. Contrl. Symp., Sessions 3D and 4D, June 1, 1993

64. George E. Forsythe, Michael M. Malcolm, and Cleve B. Moler (1977) "Computer Methods for Mathematical Computations," Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, QA297.F568 76-30819, ISBN 0-13-165332-6.

65. Harold Jeffreys (1939) "Theory of Probability," Oxford At The Clarendon Press. See p.4 and p.345, [Spyros Makridakis and Michele Hibon (1979) "Accuracy in Forecasting: An Empirical Investigation," J. R. Stat. Soc. Assn., Vol. 142, Part 2, pp. 97-145]

66. F. Scheid (1968) "Numerical Analysis," Chapter 21, p. 250, Schaum's Outline Series, McGraw-Hill, New York

67. CCIR:Recommendations and Reports of the CCIR, XVIth Plenary Assembly Geneva, 1986, Vol. VII, Standard Frequencies and Time Signals. Report 580-1, "Characterization of Frequency and Phase Noise"

68. Martin Salzmann (1993) "Least Squares Filtering and Testing for Geodetic Navigation Applications," Netherlands Geodetic Commission Publication on Geodesy, New Series Number 37, Delft, The Netherlands. ISBN 90 6132 245 6 (FAX 31-15-782348)

Mao A, Harrison CGA, Dixon TH (1999) Noise in GPS coordinate time series. J Geophys Res 104: 2797–2816

70. Ковачев П., Коцева К. (2014), Софтуер за тестване на GNSS приемници в кинематичен режим – реално време по стандарта ISO 17123-8:2007, Годишник на секция "Информатика" Съюз на учените в България, Том 7, 2014, 65–77

71. Michael D. Londe, Standards and Guidelines for Cadastral Surveys Using Global Positioning Methods, FIG XXII International Congress, Washington, D.C. USA, April 19-26 2002.

72. Real-Time Kinematic Surveying, Training Guide, Trimble, Part Number 33142-40, Revision D, September 2003.

73. Инструкция № РД-02-20-25 от 20 септември 2011 за определяне на геодезически точки с помощта на глобални навигационни спътникови системи, Обн. ДВ. бр. 79 от 11 Октомври 2011.

74. Petridiu-Chrysohoidou N., Doukas I.D., Ifadis, P.Savvaidis I.M., 2004, Investigative Testing of GPS Receivers, International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields, November 04-05, Sofia, Bulgaria.

75. P.Kovachev (2008), Specialized software for analysis of differential GPS data, Bulgarian Academy of Sciences, Geodesy 21, Sofia 2008, ISNN 0324-1114]

76. Джон Конел, Програмиране на Microsoft Visual Basic .NET, SoftPress Computer Publishing, 2003, ISBN 954-685-248-1.

77. Пуя Бемби, Кулийт Каур, Microsoft Visual Basic .NET Професионални проекти, Дуо Дизайн ООД, 2003, ISBN 954-8396-11-4.

78. Gernot M.R. Winkler, "Introduction to Robust Statistics and Data Filtering", *Tutorial at 1993 IEEE Freq. Contrl. Symp., Sessions 3D and 4D*, June 1, 1993

79. Barnett, V. and T. Lewis, *Outliers in Statistical Data*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Chichester, 1994, ISBN 0-471-93094-6.

80. Ковачев, П., (2010), Методи за анализ и метрологичен контрол на часовниците на GPS приемници, Годишник на секция "Информатика" Съюз на учените в България, Том 3, 2010,67-89, ISSN 1313-6852.

81. Ковачев, П., (2011), Основна последователност на обработката и анализа на данните от GPS измервания (алгоритъм), Годишник на секция "Информатика" Съюз на учените в България, Том 4, 2011, ISNN 1313-6852

82. Barnes, J.A., "Tables of Bias Functions, B1 and B2, for Variances Based on Finite Samples of Processes with Power Law Spectral Densities", *NBS Technical Note 375*, January 1969].

83. Weiss, M., Allan D., Howe D., Confidence on the Second Difference Estimation of Frequency Drift, *Proc. 1992 IEEE Freq. Contrl. Symp.*, pp. 300-305, June 1992

84. Y.-K. Yong and J. R. Vig, "Resonator Surface Contamination - A Cause of Frequency Fluctuations?," IEEE Tr. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr., vol. UFFC-36, No. 4, pp. 452-458, July 1989

85. R. L. Filler, "The Acceleration Sensitivity of Quartz Crystal Oscillators: A Review," IEEE Tr. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr., vol. UFFC-35, pp. 297-305, 1988

86. Riley W., Use of the Autocorrelation Function for Frequency Stability Analysis, Hamilton Technical Services

87. W.H. Press, B.P. Flannery, S.A. Teukolsky and W.T. Vetterling, *Numercial Recipes in C*, Cambridge University Press, 1988, ISBN 0-521-35465-X, Section 13.2

88. G. Box and G. Jenkins, *Time Series Analysis*, Holden-Day, Inc., 1976, ISBN 0-8162-1104-3

89. D.B. Percival and A.T. Walden, *Spectral Analysis for Physical Applications*, Cambridge University Press, 1993, ISBN 0-521-43541-2

90. C. Greenhall, "Another Power-Law Identifier That Uses Lag-1 Autocorrelation", private communication, August 28, 2003

91. Greenhall C.A., "Recipes for Degrees of Freedom of Frequency Stability Estimators", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 40, No. 6, pp. 994-999, December 1991

92. C. A. Greenhall, W. J. Riley (2003), UNCERTAINTY OF STABILITY VARIANCES BASED ON FINITE DIFFERENCES, *35th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting* 

93. Hatch, R. (1982). The synergism of GPS code and carrier measurements. Proceedings of the Third International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, pp. 1213-1231.

94. Kelecy, T.M. (1990). Precise Relative Sea Surface Positioning on a Floating Platform Using the Global Positioning System, Ph.D. Thesis, University of Colorado, Boulder.

95. Leva, J.L., de Haag, M.U., & Van Dyke, K. (1996). Performance of standalone GPS. In E.D. Kaplan (Ed.), Understanding GPS: Principles and applications (pp. 237-320). Boston: Artech House.

96. W.J. Riley, "Addendum to a Test Suite for the Calculation of Time Domain Frequency Stability", *Proc.* 1996 IEEE Freq. Contrl. Symp., pp. 880-882, June 1996.

97. Stable32 Software for Frequency Stability Analysis, Hamilton Technical Services, Beaufort, SC 29907 USA, www.wriley.com.

98. 2001 Federal Radionavigation Systems, Published by Department of Defense and Department of Transportation, National Technical Information Service, Springfild, Virginia 22161, DOT-VNTSC-01-3.1/DOD-4650.5]

99. Atanassov, K., Mavrov, D., & Atanassova, V. (2014) Intercriteria Decision Making: ANew Approach for Multicriteria Decision Making, Based on Index Matrices and IntuitionisticFuzzy Sets. *Issues in Intuitionistic Fuzzy Sets and Generalized Nets*, 11, 1–8.

141. Greenhall C.A., Riley W.J., UNCERTAINTY OF STABILITY VARIANCES BASED ON FINITE DIFFERENCES, 35th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, 2003, 267 - 280

161. Blewitt, G. & Lavall'ee, D., 2002. Effect of annual signals on geodetic velocities, J. Geophys. Res., 107

162. McCarthy, 1996: McCarthy, D. D., 1996. *IERS Conventions 1996*, IERS Technical Note 21, Observatoire de Paris, 95 pages

172. Mitev, G., P. Kovachev, N. Dimitrov, K. Kotzeva (2003): Implementation for transmission of differential corrections between GPS Receivers, ELECTRONICS, ET'2002, Book 4, 66

173. D.A. Howe, D.W. Allan, and J.A. Barnes, PROPERTIES OF OSCILLATOR SIGNALS AND MEASUREMENT METHODS, Time and Frequency Division, National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado 80303

174. W.J. Riley, Handbook of Frequency Stability Analysis, NIST Special Publication 1065, July 2008

## Съдържание

1.	Увод	1
	1.1 Актуалност на проблема	4
	1.2 Цели и задачи	4
	1.3 Изследователски методи	5
	1.4 План на изследванията	5
2.	Съвременно състояние на изследванията по проблема	6
	2.1 Определяне на местоположението с GPS	6
	2.2 Класификация на съвременните диференциални системи за спътникова навигация	6
	2.3 Състоянието на проблема в България	8
3.	Теоретична постановка	8
	3.1 Фактори, влияещи на точността на измерванията	8
	3.2 Грешки в ефемеридите на спътниците	9
	3.3 Грешки в честотно-времевия тракт на спътниците	9
	3.4 Релативистки ефекти	9
	3.5 Йоносферни грешки	10
	3.6 Тропосферни грешки	11
	3.7 Грешки от преднамерени и непреднамерени електомагнитни смущения	12
	3.8 Грешки причинени от въздействието на отразени сигнали	12
	3.9 Грешки от шумовете в хардуера на приемника	13
	3.9.1 GNSS приемници	14
	3.10 Грешки в честотно-времевия тракт на приемника	14
	3.10.1 GNSS часовници – общи бележки	14
	3.10.2 Метрология на часовниците	15
	3.12 Диференциални грешки на измереното псевдоразстояние	19
	3.13 Моделите за прецизното опредляне на положението с GPS	20
	3.14 Мрежи от референтни станции	21
	3.15 Тестване на GPS приемници	23
	3.15.1 Калибровъчни тестове	23
	3.15.2 Сертификационни тестове	24
	3.15.3 Изследователски тестове	25
	3.16 Анализ на времеви редове	25
	3.17Времеви редове на положението на точките	27
	3.18 Изводи от теоретичната част	29
4.	Експериментална част	30
17	4.1 Предварителен тест на GPS приемници в кинематичен режим – реално време по стандарта ISO 123-8:2007 [97]	30
	4.2 Тест на GPS приемници Trimble 4000SSE при работа в диференциален режим	34

4.3Анализи на резултатите от решенията на перманентни GPS станции, получени с помог (Automatic Precise Positioning Service) на Глобалната Диференциална GPS система (Global Differe	ца на APPS ntial GPS -		
GDGPS) на HACA и JPL (Jet Propulsion Laboratory) и програмата Gipsy 6.3			
4.3.1 Извличане на параметрите на решението			
4.3.2 Визуален анализ на параметрите (Data Inspection)			
4.3.3 Предварителна обработка на данните	40		
4.3.4 Анализ на параметрите на решението			
4.3.4.1 Дисперсионен анализ			
4.3.4.2 Корелационен анализ			
4.3.4.3 Интеркритериален анализ	61		
5. Софтуер за визуализция и анализ на качеството на GPS приемници с помощта на програмата TEQC на			
UNAVCO	65		
6. Обобщение и заключение	67		
7. Приноси70			
8. Публикации, свързани с дисертационният труд70			
10. Използвана литература70			