



АГЕНЦИЯ ПО КАДАСТЪРА
УНИВЕРСИТЕТ ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ
ЗВЕНО ЗА ОБУЧЕНИЕ ПО КАДАСТЪР



Момчил Минчев

Иван Здравчев

Иван Георгиев

ОСНОВИ НА ПРИЛОЖЕНИЕТО НА **GPS** В ГЕОДЕЗИЯТА

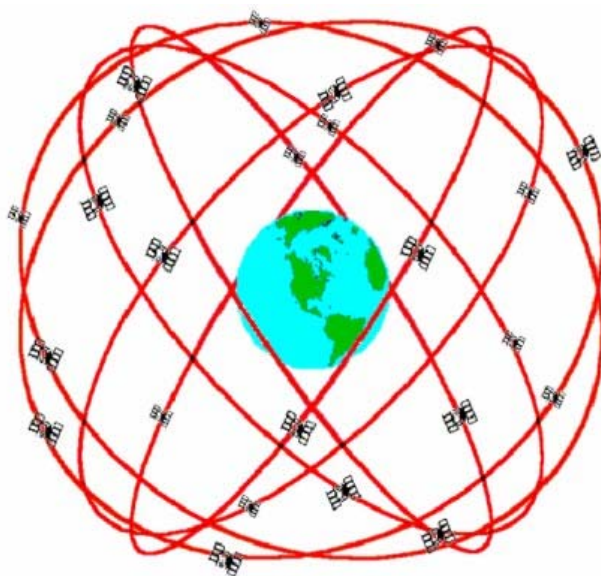


СОФИЯ 2005 г.

доц. д-р инж. Момчил Минчев доц. д-р инж. Иван Здравчев

ст.н.с. д-р инж. Иван Георгиев

ОСНОВИ НА ПРИЛОЖЕНИЕТО НА **GPS** В ГЕОДЕЗИЯТА



София
УАСГ
2005

С този курс се цели да се дадат на специалистите от Службите по кадастъра необходимите основни познания за GPS и нейното приложение при създаването на опорни и работни геодезически мрежи, усъвършенстването на държавните геодезически мрежи, създаването на държавната GPS мрежа, въвеждането на Европейската референтна система и Единната Европейска нивелачна система. Придобитите знания и умения ще се използват при създаването на кадастъра и имотния регистър както и за различни инженерно-геодезически работи.

Автори:	Момчил Минчев Иван Здравчев Иван Георгиев
Технически редактор:	Пламен Гъбенски
Рецензент :	Славейко Господинов
Издателство :	УАСГ
Тираж:	100 бр.

СЪДЪРЖАНИЕ

1. Въведение в космическата геодезия	3
1.1 Дефиниции и основни принципи	3
1.2 Оптични измервания	4
1.3 Доплеров период	4
1.4 Лазерна локация на изкуствени спътници на Земята	5
1.5 Свръхдългобазисна радиоинтерферометрия	6
1.6 Глобална позиционна система GPS	7
1.7 Други спътникови навигационни системи	8
1.8 Спътникови мисии	9
1.9 Земната атмосфера	9
2. Координатни системи	13
2.1 Инерциална координатна системи	13
2.2 Земни координатни системи	13
2.2.1 Дефиниция на Земна координатна система	13
2.2.2 Основни концепции за Земната координатна система	14
2.2.3 Международна Земна координатна система (ITRS)	15
2.2.4 Реализация на координатната система ITRS – ITRF	16
2.2.5 Реализация на ITRS на Международната GNSS служба (IGS)	16
2.2.6 Световна геодезическа система 84 (World Geodetic System 84 WGS84)	16
2.2.7 Европейска земна координатна система ETRS89 (European Terrestrial Reference Frame 89)	17
2.2.8 Геодезическа референтна система GRS80	18
2.2.9 EUREF перманентна GPS мрежа EPN	21
2.2.10 ITRF2000 и ETRF2000	24
2.2.11 Трансформация между ITRS и ETRS89	24
2.3 Връзка между инерциалната и земна координатни системи	24
3. Държавна GPS мрежа на България	28
3.1 Проектиране на точките от основната GPS мрежа	29
3.2 Измерване на основната GPS мрежа	31
3.3 Резултати от обработката на GPS измерванията на основната мрежа	32
4. Координатни системи използвани в България	35
4.1 Исторически бележки	35
4.2 Елементи от теорията	35
4.3 Развитие на референтните и координатните системи в България, 1930 - 2005 г.	44
4.4 Координатна система “1970 г.”	48
4.5 Българска геодезическа система 2000 (БГС 2000)	53
4.6 Трансформационни задачи	57
5. Глобална позиционна система GPS – описание на системата	60
5.1 Контролен сегмент	60
5.2 Спътников сегмент	62

5.3 Потребители	68
6. Структура на GPS сигнала	72
7. Измервани величини при GPS	86
7.1 Кодови измервания	86
7.2 Фазови измервания	88
7.3 Разлики между измерванията	92
7.4 Линейни комбинации	95
8. Видове позициониране	99
8.1 Определяне координатите на единична точка	99
8.2 Диференциално определяне на координати (DGPS)	103
8.3 Релативно определяне на координати	106
9. Източници на грешки	112
9.1 Грешки от синхронизиране на времето на спътниците и приемника	112
9.2 Спътниковата орбита	113
9.3 Тропосферната рефракция	114
9.4 Йоносферната рефракция	116
9.5 Вариации на фазовите центрове на антените	116
9.6 Влияние на отразените сигнали	117
10. Режими и методи на измерване	119
10.1 Начини за приложение на GPS	119
10.2 Статични методи	120
10.3. Кинематични методи	122
10.4. Обработка на резултатите във и извън реално време	124
10.5. Приложение на статични GPS измервания за създаване на ГММП и РГО	124
10.6. Пример	127
11. Определяне на височини с GPS	129
11.1 Ортометрични и елипсоидни височини	129
11.2 Определяна на ортометрични височини с GPS	130
12. Перспективи за развитие на GPS	132
ПРИЛОЖЕНИЯ	140
ИЗПОЛЗВАНИ СЪКРАЩЕНИЯ	170
ЛИТЕРАТУРА	175

ГЛАВА 1

ВЪВЕДЕНИЕ В КОСМИЧЕСКАТА ГЕОДЕЗИЯ

1.1 Дефиниции и основни принципи

Геодезията е наука, изучаваща размера и фигурата на Земята, включително определянето на нейното гравитационно поле. С термина космическа геодезия ние означаваме онези аспекти на геодезията, и геодезическата астрономия, които решават основните ѝ задачи чрез използването на естествени и изкуствени небесни тела като наблюдавани обекти или като наблюдателни платформи. Космическата геодезия следователно се дефинира чрез използваните наблюдателни техники или методи.

Космическата геодезия претърпя бурно развитие през втората половина на XX век. Началото на спътниковата ера се бележи от изстрелването на първия изкуствен спътник на Земята – Спутник 1, на 4 октомври 1957 година, международната геофизична година. Използването на изкуствени спътници на Земята (ИСЗ) позволи разполагането и използването им за изучаване размера и фигурата на Земята както от космоса, така и от земната повърхност. Използването на ИСЗ за геодезически цели се обозначава понякога с термина спътникова геодезия. Втората основна причина за бързото развитие на космическата геодезия е използването на свръхдългобазисната радиоинтерферометрия като инструмент за реализиране на безпрецедентно точна и стабилна инерциална координатна система и мониторинг на ротацията на Земята чрез наблюдения на квазари.

Днес спътниковата геодезия е основен инструмент при изучаване размера, фигурата и деформациите на Земята и нейното движение в пространството. Методите на космическата геодезия са фундаментален инструмент на геодезията, геодезическата астрономия и геодинamikата. Наблюдателните техники на космическата геодезия съдържат информация за положението и движението на наблюдавания обект и наблюдателя и следователно – за трансформацията между земната и инерциалната координатни системи. Трансформацията се дефинира от параметрите на ориентация на Земята – координатите на полюса, UT1, прецесията и нутацията.

1.2 Оптични измервания

За един дълъг период от време (векове) единствените достъпни наблюдения са били оптичните или астрометричните. Във времето преди спътниковата ера астрометричните наблюдения са се използвали за дефинирането на земна координатна система и мониторинг на ротацията на Земята.

Оптични наблюдения се правят и на първото поколение изкуствени спътници на Земята, като Спутник 2 и Explorer 1. Спътниците “балони”, от типа на Echo 1 и 2 и PAGEOS, се наблюдават от оптични станции, разположени по цялото земно кълбо. Този тип спътници са сферични и благодарение на отражателната им способност могат да бъдат фотографирани на фона на звездното небе. Друг тип ИСЗ, като Geos 1 и 2, са екипирани с мигащи светлинни маяци, позволяващи едновременно им фотографирание от различни земни станции.

Резултатите от тази първа фаза на спътниковата геодезия са впечатляващи – геодезически мрежи, разположени на различни континенти са свързани и отнесени към геоцентъра с точност около 5 м. Първите реалистични коефициенти на гравитационното поле на Земята, до степен 15, са получени именно от тези наблюдения.

Новите техники на наблюдение, позволяващи значително подобрене на точността и автоматизиране на самия наблюдателен процес изместват, към средата на 70-те години, оптичните наблюдения.

1.3 Доплеров период

Навигационната спътникова система на флота на САЩ (US Navy Navigation Satellite System NNSS), наречена TRANSIT, има значителен принос в развитието на космическата геодезия. Тя доказва, че измерванията на Доплеровото изместване на сигнал, генериран от стабилен осцилатор на борда на спътниците от системата, могат да се използват за релативно определяне на положение (координати) със забележителна точност – 0.1 – 0.5 м релативно и около 1 м абсолютно (геоцентрично).

Спътниците от системата TRANSIT излъчват на две основни честоти – 400Mhz и 150Mhz. Двете честоти позволяват да се елиминира (до голяма степен) влиянието на йоносферната рефракция. Сравнително малките по обем приемник и антена позволяват лесно измерване, а наблюдателен период от няколко дни осигурява постигането на гореспоменатата точност при регионални и дори глобални мрежи.

Спътниците от системата TRANSIT са с почти кръгови, полярни орбити, на височина около 1100 км. Само един спътник може да бъде наблюдаван от един приемник. Доплеровата техника на наблюдение е

независима от метеорологичните условия.

С пълното разгръщане на Глобалната позиционна система GPS, системата TRANSIT губи своето значение и не се използва за позициониране (декември 1996), но продължава да работи като инструмент за изследване на йоносферата.

1.4 Лазерна локация на ИСЗ

Лазерната технология (LASER – Light Amplification through Stimulated Emission of Radiation) дава възможност да се генерират високо енергетични късовълнови светлинни импулси (от няколко десетки и по-малко пикосекунди). Импулсите, изпратени от един конвенционален астрономически телескоп, изминават пътя до специализирани ИСЗ, снабдени с ретрорефлектори, отразяват се и се приемат обратно от телескопа. Измерва се времето на разпространение на лазерния импулс до спътника и обратно. Умножено със скоростта на светлината, времето на разпространение дава двойното разстояние между спътника и телескопа. Днес, съвременните спътникови лазерни далекоми осигуряват точност на измереното разстояние от няколко милиметра.



Фиг. 1.1. Лазерни измервания до спътници

Лазерната локация на ИСЗ може да се прилага за всеки спътник, снабден с ретрорефлектори. Най-известни спътници от този тип са LAGEOS I (LASer GEOdynamic Satellite) и II. Двата спътника Lageos са сред приоритетните на Международната служба за лазерна локация (ILRS) и наблюденията им имат съществен принос за определяне на земното гравитационно поле. Лазерните наблюдения дават възможност

да се определят широк спектър геодезически параметри – координати на следящите станции и техните скорости, параметрите на ориентация на Земята, вариациите на земното гравитационно поле, положението на геоцентъра и др.

1.5 Свръхдългобазисна радиоинтерферометрия

Свръхдългобазисната радиоинтерферометрия (Very Long Baseline Interferometry VLBI) е единствената наблюдателна техника на космическата геодезия, която не е свързана с използване на ИСЗ. Нейният уникален принос в геодезията и астрономията се състои в дефинирането и реализацията на инерциална координатна система и определяне на трансформацията между инерциалната и земната координатни системи.



Фиг. 1.2. VLBI станция Hobart

Международната звездна координатна система (ICRS International Celestial Reference System) се дефинира и поддържа от Международната служба за ротация на Земята (IERS International Earth Rotation Service). Точната реализация на звездната координатна система е необходимо условие за дефинирането и поддържането на земната координатна система. Свръхдългобазисната радиоинтерферометрия играе важна роля при дефинирането на земната координатна система и за извеждането на трансформацията между двете системи. Тя е единствената наблюдателна техника, която осигурява получаването на разликата $UT1-UTC$, т.е. разликата между ротацията на Земята и

атомната скала за време. Свърхдългобазисната радиоинтерферометрия е и наблюдателната техника, която позволява директното получаване на прецесията и нутацията с резолюция по-малка от хилядна от дъговата секунда.

1.6 Глобална позиционна система GPS

Глобалната позиционна система GPS е спътникова навигационна система позволяваща определянето на (абсолютно) положение в реално време на или около повърхността на Земята с точност от порядъка на няколко метра. Терминът “абсолютни” означава, че получените координати са отнесени към геоцентрична, фиксирана към Земята, координатна система. Обикновено, това е координатната система WGS-84 (World Geodetic System 84), която към момента е привързана към Международната земна координатна система ITRS на ниво сантиметри.

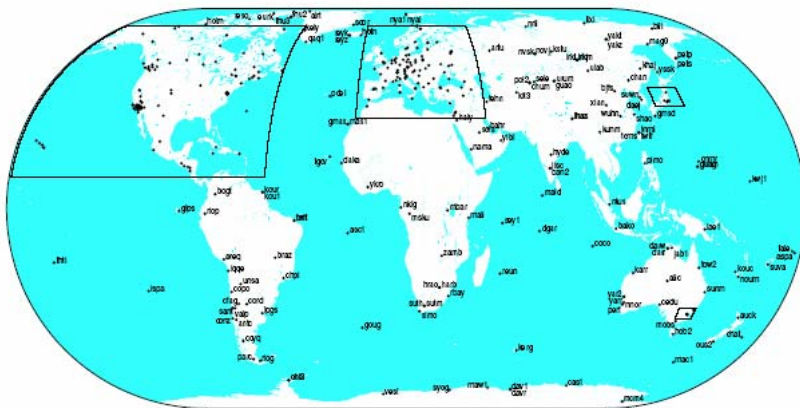
Спътниковата система GPS се състои от 24 спътника (21 активни и 3 резервни). Спътниците са в почти кръгови орбити, разположени в шест орбитни равнини, приблизително 20 000 км над повърхността на Земята. Орбитните равнини имат наклон 55° и пресичат равномерно екватора през 60° . Периодът на обикаляне на спътниците е половин звезден ден (11h 56m), т.е. за дадена точка от земната повърхност конфигурацията на спътниците се повтаря след всяко звездно денонощие.

Всеки спътник излъчва по две носещи честоти – 1.57542 GHz (L1) и 1.22760 GHz (L2), които съответстват на дължини на вълните 19 см и 24 см съответно.

Създадената и функционираща от 1994 година Международна GPS служба (International GPS Service), вече Международна GNSS служба, е доброволна организация на повече от 200 организации от повече от 80 страни. В рамките на Международната служба е изградена мрежа от повече от 300 перманентни GPS станции, разположени по цялото земно кълбо. Станциите изпращат данните от непрекъснатите наблюдения в т.нар. центрове за анализ на IGS, които изчисляват прецизни ефемериди и корекции на часовниците на спътниците, както и други параметри, например йоносферни модели, наречени IGS продукти. Наблюденията от перманентните IGS станции и IGS продуктите са отворени за ползване чрез центровете за данни на IGS.

Продуктите на IGS са предварителни (rapid) и окончателни (final). Предварителните продукти на IGS са достъпни със закъснение от един ден, а окончателните със закъснение от около седмица (табл. 1.1). Точността на окончателните IGS продукти е: спътниковите орбити – 0.05 – 0.10 м, корекции към часовниците на спътниците – 0.3 ns, координати на полюса – 0.1 mares, отговарящи на 3 мм върху земната повърхност и

продължителност на денонощието – 30 μ s. Допълнително центровете за анализ извършват глобално решение за координатите и скоростите на следящите станции за всяка една седмица. Тези резултати, заедно с резултатите от другите наблюдателни техники, се използват за дефиниране и поддържане на Международната земна координатна система ITRS.



Фиг. 1.3. Перманентни станции на Международната GNSS служба

Продуктите на IGS (орбити, параметри на ориентация на Земята, координати и скорости на перманентните станции) се използват като априорна информация при обработката на локални и регионални GPS мрежи.

От гледна точка на космическата геодезия, GPS играе изключително важна роля при дефинирането, поддържането и съгъстяването на земната координатна система и осигурява висока резолюция при получаването на параметрите на ориентация на Земята.

1.7 Други спътникови навигационни системи

Съществуват и други спътникови системи, между които ще споменем:

Руската навигационна система GLONASS (Global Navigation Satellite System), която е с параметри много близки да тези на Глобалната позиционна система GPS. Това е причината да бъдат създадени и да функционират приемници, способни да записват сигналите и на GPS и на GLONASS системата. Международната GNSS служба поддържа прецизни ефемериди и други продукти за системата GLONASS от 1999 година.

Таблица 1.1. Продукти на Международната GNSS служба

Продукти на Международната GNSS служба (IGS) (GPS навигационните стойности са включени за сравнение)				
GPS спътникови ефемериди/спътникови и стационарни часовници	Точност	Закъснение	Осъвременяване на данните	Примерен интервал
Навигационна	~260cm/~7ns	реално време		ежедневен
Екстраполирана (Ultra-Rapid)	~25cm/~5ns	реално време	два пъти дневно	15 min/15 min
Предварителна	5cm/0.2ns	17 часа	ежедневно	15 min/5 min
Окончателна	<5cm/0.1ns	~13 дни	седмично	15 min/5 min
GLONASS спътникови ефемериди				
Окончателна	30cm	~седмици	седмично	15min
Геоцентрични координати на следящи станции от IGS (>130 разположения)				
Окончателни хоризонтални/вертикални местоположения (координати)	3mm/6mm	12 дни	седмично	седмичен
Окончателни хоризонтални/вертикални скорости	2mm за година/3mm за година	12 дни	седмично	седмичен
Параметри на ориентация на Земята				
Предварително движение на Полюса/Изменение на координатите на полюса/Продължителност на деня	0.2mas/0.4mas за година/0.030ms	17 часа	ежедневно	ежедневно
Окончателно движение на Полюса/Изменение на координатите на полюса/продължителност на деня	0.1mas/0.2mas за година/0.020ms	~13 дни	седмично	ежедневно
Атмосферни параметри				
Окончателна тропосфера	4mm зенитно забавяне	<4 седмици	седмично	2 часа
Екстраполирана Ultra-Rapid тропосфера	6mm зенитно забавяне	2-3 часа	всеки 3 часа	1 час
Йоносферна TEC мрежа	в процес на разработване			

Френската спътникова система DORIS (Doppler Orbitography by Radiopositioning Integrated on Satellite) е мощен инструмент за определяне на спътникови орбити. С много добре развитата си мрежа от

следящи станции DORIS е официално приета спътникова техника за наблюдения от Международната служба за ротация на Земята. Спътниковата система PRARE (Precise Range and Range-rate Equipment) може да се разглежда като германския аналог на DORIS. Тя също се използва за определяне на орбити, например от Европейската космическа агенция (European Space Agency) ESA за определяне орбитите на спътниците, които се използват за дистанционни методи (от типа ERS).

1.8 Спътникови мисии

Много са спътниковите мисии, при които спътници се използват като платформи за наблюдение и изследване на различни аспекти на Земята, свързани с геодезията и геодинамиката.

Алтиметричните спътникови мисии предоставят информация за топографията на морското ниво, океанските течения, приливните вариации и др. Съвместна американо-френска алтиметрична мисия е спътникът TOPEX/Poseidon. Това е първият спътник, който е проектиран да изследва океанските течения. За космическата геодезия мисията на TOPEX/Poseidon е известна като “rosetta stone mission”, тъй като неговата орбита се определя чрез три независими спътникови системи – DORIS, GPS и чрез лазерна локация.

За геодезията, геодинамиката и физиката на атмосферата мисиите CHAMP (Challenging Mini-Satellite Payload for Geophysical Research and application), GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), GOCE (Gravity field and Ocean Current Explorer) са от важно значение. Очаква се те да допринесат за изучаване на гравитационното поле на Земята, атмосферата и океана. Всичко това показва една от основните тенденции в космическата геодезия – превръщането и в много важна съвременна интердисциплинарна наука за изследване на Земята.

В табл. 1.2 са дадени международните институции, които имат пряко отношение към космическата геодезия. Всички те са служби под егидата на Международната асоциация по геодезия (International Association of Geodesy IAG).

1.9 Земната атмосфера

В космическата геодезия сигналите от наблюдавания или наблюдаващия небесен обект пресичат земната атмосфера. Това променя пътя и времето на разпространение на сигналите. Тези ефекти са известни като рефракционни ефекти или грешки заради рефракцията в атмосферата. От своя страна използваните в космическата геодезия наблюдения се използват и за изучаване на атмосферата, освен за целите на геодезията и геодинамиката.

Таблица 1.2. Международни служби, имащи пряко отношение към космическата геодезия

Абревиатура	Име, цел, Internet site
CSTG	Commission on International Coordination of Space Techniques – Комисия за Международно Координиране на Космическите Технологии. Координация между космическите геодезически организации, организиране на проекти.
IERS	International Earth Rotation Service – Международна служба за въртене на Земята. Установяване и поддържане на небесната и земната референтна система, генериране на серии от параметри на ориентацията на Земята. http://hpiers.obspm.fr
IGS	International GNSS Service – Международна GNSS служба. Предоставя на разположение GPS данни от нейната глобална мрежа, публикува и разпространява високоточни GPS орбити, параметрите на въртене на Земята, координати на станции, информация за атмосферата и т.н. http://igsceb.jpl.nasa.gov
ILRS	International Laser Ranging Service – Международна Служба за Лазерни Измервания. Събиране, архивиране и публикуване на SLR и LLR серия данни. Създава научни и практични продукти. http://ilrs.gsfc.nasa.gov
IVS	International VLBI (Very Long Baseline Interferometry) Service for Geodesy and Astrometry – Международна VLBI Служба за Геодезия и Астрометрия. Систематизира или поддържа VLBI програми. Организира геодезичните, астрометрични, геофизични научни изследвания и практически дейности. http://ivscc.gsfc.nasa.gov

Рефракционният ефект зависи от дължината на вълната на използвания или анализиран сигнал. Ако се измерват разстояния или разлика в разстояния чрез оптичен метод, рефракционните ефекти могат да бъдат изчислени с милиметрова точност, като се използват стойностите на налягането, температурата и влажността на въздуха измерени на наблюдаващата станция. Може да се смята, че лазерната локация на ИСЗ не е повлияна от рефракцията. Този факт означава също, че лазерната локация може да се използва за калибриране на останалите наблюдатели техники, при които ефекта е значително по-голям.

При микровълновите наблюдателни техники (Доплерови измервания, GPS, VLBI) рефракционните ефекти се разделят на два

вида: йоносферна рефракция, дължаща се на йонизираната горна част на атмосферата (простираща се до 1500 км височина) и тропосферна рефракция, дължаща се на долните, електрически неутрални слоеве на атмосферата.

Йоносферната рефракция е пряко зависима от дължината на вълната и може да бъде (почти напълно) елиминирана ако се приемат сигнали на (две) различни дължини. При GPS наблюденията това се постига с използването на две различни честоти за излъчване на сигналите.

При микровълновите наблюдения тропосферната рефракция е основният фактор, който влошава качеството на получените резултати. За разлика от наблюденията в оптичната част на спектъра, при микровълновите тропосферната рефракция е силно променяща се във времето и пространството. Този факт налага при тяхната обработка и анализ да се въвеждат допълнителни параметри, зависещи от зенитното разстояние и азимута на GPS спътниците над всяка следяща станция или тропосферната рефракция да се моделира като случаен процес.

ГЛАВА 2

КООРДИНАТНИ СИСТЕМИ

2.1 Инерциална координатна система

На своята 23-та Генерална асамблея, през август 1997 година, Международния астрономически съюз (International Astronomical Union IAU) решава: от 1 януари 1998 година звездната координатна система да е Международната звездна координатна система (International Celestial Reference System ICRS), която да се реализира и да е достъпна чрез координатите на референтни извънгалактични радио източници. Тази реализация се нарича International Celestial Reference Frame (ICRF).

Координатното начало на ICRS е в барицентъра на Слънчевата система. Полюса на системата се дефинира от конвенционалните модели на прецесията и нутацията на Международния астрономически съюз. Началото на ректасцензиите се дефинира имплицитно чрез фиксиране ректасцензията на радиоизточника 3C 273B.

Връзката между инерциалната и земната координатни системи се осъществява чрез параметрите на ориентацията на Земята в пространството.

2.2 Земни координатни системи

2.2.1 Дефиниция на Земна координатна система

Дефиниция

Земната координатна система (ЗКС) (Terrestrial Reference System TRS) е пространствена координатна система, ротираща със Земята при нейното денонощно движение в пространството. В такава една координатна система положенията на точките изпитват само малки вариации във времето, предизвикани от геофизични ефекти – тектонични движения, приливни изменения, следледниково издигане.

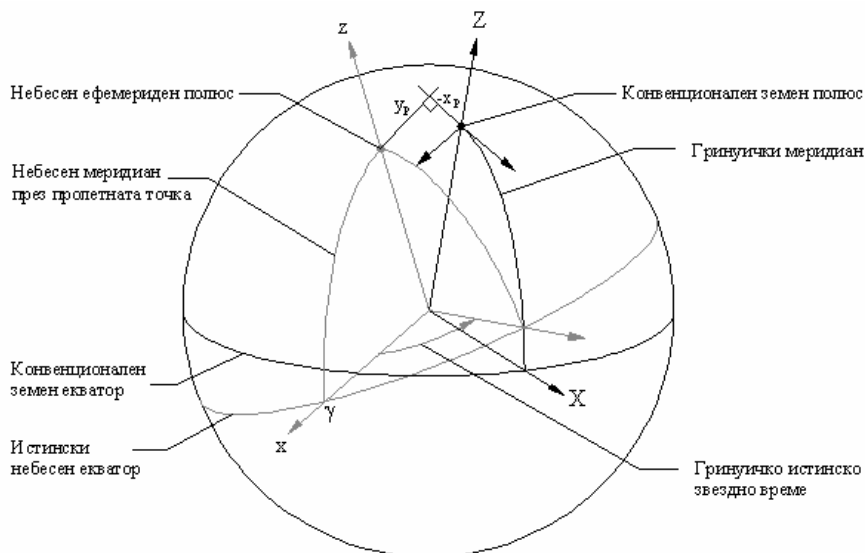
Реализация на Земната координатна система (Terrestrial Reference Frame - TRF) е множеството от физически точки върху земната повърхност с (прецизно) определени координати и скорости (и представени в специфична координатна система – правоъгълна, геодезическа, сферична и др.). Множеството от точки е прието да се нарича реализация на Земната координатна система (РЗКС).

2.2.2 Основни концепции за Земната координатна система

Три са основните концепции за ЗКС:

Идеална Земна координатна система (iTRS)

Една “идеална” ЗКС се дефинира като 3-D пространствена геоцентрична правоъгълна координатна система, ротираща със Земята. По смисъла на Нютоновата механика, геометрията на физическото пространство е като на Евклидово афинно пространство с дименсия три. Избора на афинните координати (O,E) е: O – точка от пространството наречена начало (геоцентъра), а E е базата на векторното пространство, с приети ограничения за координата E – базисните вектори да са ортогонални и да имат еднаква дължина. Ориентацията се задава чрез едно допълнително условие.



Фиг. 2.1. Инерциална и земна координатни системи

В съвременната спътникова геодезия за “идеална” се приема геоцентричната координатна система с начало геоцентъра и екваториална ориентация (оста Z сочи към полюса).

Конвенционална Земна координатна система (CTRS)

С такава координатна система се обозначава множеството от всички конвенции – модели, алгоритми, константи и др., които определят еднозначно оценяването на координатите и скоростите на точките (и ковариационната им матрица) в една идеална ЗКС.

Конвенционална реализация на Земна координатна система (CTRF)

Една конвенционална реализация на Земната координатна система се дефинира като множество от физически точки с (прецизно) определени координати и скорости, чрез използването на множеството конвенции за определянето им. Тази координатна система се нарича реализация на “идеалната” Земна координатна система (iTRS). Различават се два типа РЗКС – динамична и кинематична, в зависимост от това дали се прилага динамичен модел при определяне координатите на точките или не.

РЗКС е достъпна за ползване от потребители.

2.2.3 Международна Земна координатна система (ITRS)

Международната служба за ротация на Земята (MCPЗ) (International Earth Rotation Service IERS) и Секцията за Координатни системи (Terrestrial Reference Frame TRF) на Националния географския институт (Institut Geographique National), Париж, са международните структури, които отговарят за дефинирането, реализацията и разпространението на Международната Земна координатна система (ITRS) в съответствие с резолюциите на Международната асоциация по геодезия (International Association of Geodesy IAG). Международната служба за ротация на Земята дефинира Конвенционалната Земна координатна система (CTRS), която е база на Международната Земна координатна система (ITRS) и нейната реализация (ITRF).

Дефиниция на ITRS

- геоцентрична;
- единица за дължина метър и временна координата в съответствие с локална геоцентрична система (в смисъла на релативистката механика);
- ориентация – начална ориентация идентична с тази на Международното бюро за време (Bureau International de L'heure BIH), чийто приемник е MCPЗ;
- измененията във времето на ориентацията се ограничават чрез условието ротацията по отношение на хоризонталните движения на земната кора върху цялото земно кълбо да е минимална (т.нар. no-net-rotation condition).

Дефиниция на CTRS

- геоцентрична, ротираща със Земята;
- идентична с Геоцентричната координатна система (Terrestrial Geocentric System TGC), дефинирана с резолюциите на Международната асоциация по геодезия;

- временна координата – геоцентрично координатно време (Geocentric Coordinate Time TCG);
- начало в геоцентъра на Земята, включваща океаните и атмосферата;
- минимална ротация по отношение на хоризонталните тектонски движения.

2.2.4 Реализация на координатната система ITRS – ITRF

Реализацията на Международната Земна координатна система ITRS под името ITRF_{yy}, където yy е годината на публикуване, се осъществява от МСРЗ. Настоящата процедура, чрез която се получават реализациите на ITRS се състои от комбиниране на индивидуалните решения, получени от центровете за анализ на космически наблюдения на МСРЗ – Радиоинтерферометрия със свръхдълги бази (Very Long Base Interferometry VLBI), Лазерна локация на Луната (Lunar Laser Ranging LLR), Лазерна локация на ИСЗ (Satellite Laser Ranging SLR), GPS и DORIS (Doppler Orbit Determination and Radiopositioning Integrated on Satellite) – координати, скорости и ковариационни матрици. Получените резултати от използването на различните наблюдателни техники са независими и позволяват да се получи и оценка на систематичните разлики помежду им.

2.2.5 Реализация на ITRS на Международната GNSS служба (IGS)

От декември 2001 година (GPS седмица 1143) всички продукти на IGS (ефемериди, координати на полюса и т.н.) се базират върху т.нар. IGS реализация на ITRS (ITRF2000, епоха 1997.0) – IGS00. Реализацията IGS00 се базира на 54 референтни станции с високоточно определени координати и скорости в ITRF2000.

Предпочитанието, и препоръката, на EUREF са за директно използване на ITRF, а не на IGS00 реализацията. Разликата между двете реализации към момента може да се смята за пренебрежимо малка.

2.2.6 Световна геодезическа система 84 (World Geodetic System 84 WGS84)

Глобалната земна координатна система WGS84 е въведена (дефинирана и реализирана) от Националната агенция за геопространствено разузнаване - National Geospatial Intelligence Agency (NGIA), бившата Национална агенция за изображения и картография – National Imaginery and Mapping Agency (NIMA), и Министерство на отбраната (Department of Defense DoD) на Съединените щати. Началната реализация на WGS84 се базира само на положения, определени чрез

наблюдения на спътниковата система TRANSIT и точността ѝ е от порядъка на 1-2 метра. През следващите години точността на последователните реализации на WGS84 е значително подобрена.

Като първа стъпка към по-добро съответствие между WGS84 и ITRS през 1993 година цялата мрежа от точки на WGS84 е преизчислена по отношение на 8 GPS точки, фиксирани към техните ITRF92 координати. Тази реализация е известна като WGS84 G730 (730 GPS седмица). Съответствието между ITRF92 и WGS84 на реализацията G730 е на ниво 10 см.

По-нататъшното подобрене на координатите на следящите станции довежда през 1996 година до реализацията WGS84 - G873. Тази реализация съдържа 13 земни станции (на NGIA и Въздушните сили на САЩ), като само една от тях е в Европа. Координатите на G873 се съгласуват с тези от ITRF94 на ниво 2 см и по-малко.

Резолюция 4 от EUREF симпозиума в Хелзинки, 3-6 май, 1995 година, препоръчва използването на ITRS или ETRS89, в техните последователни реализации, вместо използването на WGS84 за всички приложения, които изискват субметрова точност.

2.2.7 Европейска земна координатна система ETRS89 (European Terrestrial Reference Frame 89)

Основният недостатък на глобалните координатни системи (ITRS и WGS84) е, че координатите на точките в тези системи се изменят (основно) заради глобалните тектонични движения. Това изменение във времето прави тези координати неподходящи за практически приложения. За да бъде преодолян този проблем Международната асоциация по геодезия IAG и CERGO (Central European Initiative Working Group on Science and Technology) решават през 1987 година да разработят и проектират нова Европейска геодезическа референтна система European Geodetic Reference Frame (EUREF) - ETRS, базирана на GPS измервания. Тя трябва да унифицира националните референтни системи за геодезически измервания, картография, GIS и навигация в Европа.

EUREF трябва да покрива територията на Европа и да осигурява високоточна мрежа с широк спектър приложения: геодинамика, геодезия, картография, навигация и т.н. Програмата EUREF се координира от Международната асоциация по геодезия IAG, подкомисия за Европа.

Концепцията, залегнала в основата на EUREF, се състои в създаването на високоточна континентална мрежа, еднородна като геометрия и точност, отнесена към геоцентъра и невлияеща се (в голяма степен) на изменения във времето. EUREF концептуално се дефинира

чрез мрежа от станции, намиращи се на стабилната част на Евразийската континентална плоча, чиито вътрешни (intra-plate) деформации са пренебрежимо малки (за няколко годишен интервал). Епохата 1989.0 е приета за основна (начало), тъй като това е годината на първото EUREF решение.

Координатната система EUREF е приета като официална геодезическа референтна система в Европейския съюз. Благодарение на изграждането и функционирането на Перманентната мрежа European Permanent Network (EPN), координатната система на практика е четири димензионална.

По време на генералната асамблея на Международния съюз по геодезия и геофизика във Ванкувър (1987) е създадена нова подкомисия на Международната асоциация по геодезия със задача да дефинира и въведе новата 3-D координатна система за континента Европа. През 1989 – 1990 на територията на няколко западноевропейски държави координатната система е въведена, което е (физическата) реализация на ETRS89 – ETRF89. През следващите години EUREF мрежата се разширява в централна и източна Европа.

2.2.8 Геодезическа референтна система GRS80

Дефиниция

Геодезическата референтна система GRS80 (Geodetic Reference System) се характеризира с:

А. Базира се върху теорията на геоцентричния екипотенциален елипсоид, дефиниран чрез следните **конвенционални** константи:

- екваториален радиус на Земята: $a = 6378\,137\text{ m}$,
- геоцентрична гравитационна константа на Земята (включително атмосферата): $GM = 3986\,005 \times 10^8\text{ m}^3\text{ s}^{-2}$,
- динамичен фактор на Земята (зоналната хармоника J_2 , с изключен перманентен прилив : $J_2 = 108\,263 \times 10^{-8}$,
- ъглова скорост на Земята : $\omega = 7292\,115 \times 10^{-11}\text{ rad s}^{-1}$.

В. Използване на същите формули за изчисление, приети на XV-та Генерална асамблея на IUGG в Москва, 1971 година и публикувани от IAG, за Геодезическа референтна система 1967;

С. Елипсоид, ориентиран по такъв начин, че малката полуос да е паралелна на направлението, дефинирано с конвенционалното международно начало (Conventional International Origin) и началния меридиан да е паралелен на приетия от BIH/IERS нулев меридиан (началото на дължините).

Числени стойности

Производни геометрични константи

$b = 6\,356\,752.3141$	малка полуос
$e^2 = 0.006\,694\,380\,022\,90$	e = първи ексцентрицитет
$f = 0.003\,352\,810\,681\,18$	сплеснатост

Производни физически константи

$U_0 = 6\,263\,686.0850 \times 10^3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$	нормален потенциал на елипсоида
$M = 0.003\,449\,786\,003\,08$	$m = \omega^2 a^2 b / GM$
$\gamma_e = 9.780\,326\,7715 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	нормална гравитация на екватора
$\gamma_p = 9.832\,186\,3685 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	нормална гравитация на полюса
$F^* = 0.005\,302\,440\,112$	$f^* = (\gamma_p - \gamma_e) / \gamma_e$
$K = 0.001\,931\,851\,353$	$k = (b \gamma_e - a \gamma_e) / a \gamma_e$

$$a_2 = \frac{1}{2}e^2 + k$$

$$a_6 = \frac{5}{16}e^6 + \frac{3}{8}e^4 k$$

$$a_4 = \frac{3}{8}e^4 + \frac{1}{2}e^2 k$$

$$a_8 = \frac{35}{128}e^8 + \frac{5}{16}e^6 k$$

Гравитационна формула 1980

Затворена формула на Сомиляна (Somigliana) за нормалната гравитация:

$$\gamma_\phi = \frac{a\gamma_e \cos^2 \phi + b\gamma_p \sin^2 \phi}{\sqrt{a^2 \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \phi}}$$

За изчисления формулата:

$$\gamma_\phi = \gamma_e \frac{1 + k \sin^2 \phi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}}$$

със стойности на γ_e , k , и e^2 е по-удобна. ϕ обозначава географската ширина.

Развитието в ред

$$\gamma_0 = \gamma_e \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} a_{2n} \sin^{2n} \phi \right)$$

с

$$a_2 = \frac{1}{2} e^2 + k$$

$$a_6 = \frac{5}{16} e^6 + \frac{3}{8} e^4 k$$

$$a_4 = \frac{3}{8} e^4 + \frac{1}{2} e^2 k$$

$$a_8 = \frac{35}{128} e^8 + \frac{5}{16} e^6 k$$

получава вида

$$\begin{aligned} \gamma_0 = \gamma_e (& 1 + 0.005\,279\,0414 \sin^2 \phi \\ & + 0.000\,023\,2718 \sin^4 \phi \\ & + 0.000\,000\,1262 \sin^6 \phi \\ & + 0.000\,000\,0007 \sin^8 \phi); \end{aligned}$$

и има относителна грешка от 10^{-10} , съответстваща на $10^{-3} \mu\text{ms}^{-2} = 10^{-4} \text{mgal}$.

Конвенционалният ред

$$\gamma_0 = \gamma_e \left(1 + f^2 \sin^2 \phi - \frac{1}{4} f_4 \sin^2 2\phi \right)$$

с

$$f_4 = -\frac{1}{2} f^2 + \frac{5}{2} f m$$

получава вида:

$$\gamma_0 = 9.780327 (1 + 0.0053024 \sin^2 \phi - 0.0000058 \sin^2 2\phi) \text{ms}^{-2}$$

Начало и ориентация

IUGG Резолюцията № 7 от Генералната асамблея в Москва априори постановява, че Геодезическата референтна система 1980 е геоцентрична, т.е., че нейното начало е в масовия център на Земята. Така центърът на елипсоида съвпада с геоцентъра.

Ориентацията на системата е дефинирана по следния начин: ротационната ос на елипсоида е с направление на конвенционалното международно начало (Conventional International Origin) за движение на



Фиг. 2.3. Перманентната станция до София (SOFI)

От континентален мащаб е EUREF перманентната мрежа (EUREF Permanent Network - EPN). Проектът EPN започва своята дейност през 1995 година и към момента се състои от повече от 150 перманентни станции в 32 европейски страни.

От своя страна EUREF е регионално съгъстяване за Европа на Международната GNSS служба, и по-точно, на нейната глобална мрежа



Фиг. 2.4. Перманентната станция в Истанбул (ISTA)

(Резолюция 3 на EUREF симпозиума в Хелзинки, 3-6 май, 1995 година).

От 1997 година IERS включва EUREF перманентната мрежа EPN при всяка от последващите реализации на ITRS (Резолюция 1 от EUREF симпозиума в София, 4-7 юни, 1997 година).



Фиг. 2.5. Перманентната станция в Охрид (ORID)



Фиг. 2.6. Перманентната станция в Букурещ (BUCU)

2.2.10 ITRF2000 и ETRF2000

Реализацията на ITRS – ITRF2000 се смята за изцяло подобрена координатна система като мрежа, качество, надеждност и точност. Индивидуалните решения, от които ITRF2000 е получена чрез комбинация, са свободни от всякакви ограничения и директно отразяват актуалното качество на космическите наблюдения при оценяването на координатите и скоростите. Началото на ITRF2000 е в масовия център, определен от лазерна локация на ИСЗ, а мащабът е изведен от лазерна локация на ИСЗ и свръхдългобазисна интерферометрия. Ориентацията съвпада с тази на ITRF97, а измененията в ориентацията се ограничават от тектонския модел NUVEL-1A (минимално изменение на ориентацията върху цялата земна повърхност).

Най-важният резултат от реализацията на ITRS – ITRF2000, свързан с Европейската координатна система ETRS89 и нейните реализации (включително последната ETRF2000) е този, свързан с ротационния полюс на Евроазиатската континентална плоча, от своя страна неразривно свързан с дефиницията на EUREF. Въпреки, че върху измененията в ориентацията на ITRF2000 (orientation rate) са наложени ограниченията на модела NUVEL-1A (т.е. този модел е използван за нейната дефиниция), остатъчните разлики между модела NUVEL и получените ITRF2000 скорости са значителни, което означава, че модела NUVEL не може да обясни (апроксимира) напълно съвременните движения в Европа, така както са получени според ITRF2000. Несъвпадението между ITRF2000 и модела NUVEL-1A е средно 3 мм/год.

По тази причина е изведен нов ротационен полюс за Евроазиатската плоча, определен от ITRF2000 скоростите на 19 европейски високоточни станции. Новият ротационен полюс е приет от EUREF през 2001 година с Резолюция 2 от EUREF симпозиума в Дубровник, 16-18 май, 2001 година: “Препоръчва NUVEL-1A-NNR ротационната скорост да бъде заменена с тази, определена от ITRF2000 в трансформационните формули между ETRS89 и ITRS”.

2.2.11 Трансформация между ITRS и ETRS89

Одобрената от работната група на EUREF процедура за трансформация между ITRF и ETRF се състои от три стъпки (Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign, Claude Boucher, Zuheir Altamimi, Version 5, 12-04-2001):

1. Реализацията на ITRS – ITRF_{yy} се състои от
- положения в епоха t_0 , $X^I_{yy}(t_0)$ и

- скорости $\dot{X}^I_{yy}$

така, че положението на точка в епоха t се изчислява:

$$X^I_{yy}(t) = X^I_{yy}(t_0) + \dot{X}^I_{yy}(t - t_0);$$

2. Моделът на трансформация между две системи е седем-параметрична трансформация, като трансформационните параметри се считат линейни във времето;
3. Приема се, че всяка нова реализация, одобрена от Работната група, има минимално систематично изместване спрямо ETRF89 и притежава собствен мащаб особено, ако е значително по-точна от ITRF89.

Както беше споменато, от всяка реализация на ITRS, под името ITRF_{yy}, се получава съответната ETRS, под името ETRF_{yy}. Получаването на координатите на точки, получени от дадена GPS кампания в епоха t_c , се извършва по следния начин:

1. GPS измерванията се обработват в ITRS, съответната реализация ITRF_{yy} за епохата t_c .

За тази цел се използва последната реализация ITRF_{yy}. Координатите на станциите с известни координати в ITRF_{yy} (главно перманентните) се фиксират (или получават малки средни квадратни грешки):

$$X^I_{yy}(t_c) = X^I_{yy}(t_0) + \dot{X}^I_{yy}(t_c - t_0).$$

Получените резултати са отнесени в координатната система ITRS, ITRF_{yy} за епоха t_c .

2. Получаване на координатите в ETRS89 за епоха t_c :

$$X^E_{yy}(t_c) = X^I_{yy}(t_c) + T_{yy} + \begin{pmatrix} 0 & -\dot{R}^3_{yy} & \dot{R}^2_{yy} \\ \dot{R}^3_{yy} & 0 & -\dot{R}^1_{yy} \\ -\dot{R}^2_{yy} & \dot{R}^1_{yy} & 0 \end{pmatrix} X^I_{yy}(t_c) \cdot (t_c - 1989.0)$$

където T_{yy} са трансляциите между двете системи (Таблица 2.1), а $\dot{R}_{yy}$ са точно компонентите на ъгловата скорост на Евроазиатската плоча. В Таблица 2.2 са дадени оценки на ъгловата скорост.

3. За да се получат координатите за епоха 89.0:

$$X^E(1989.0) = X^E(t_c) + \dot{X}^E(1989.0 - t_c),$$

$\dot{X}^E$ са скоростите на точката в ETRS89. За стабилната част на Европа те се приемат равни на нула.

Възможен е и друг подход: координатите да се трансформират първо в ITRF_{yy} за епоха t_0 (при известни скорости в ITRF), и след това да се получат ETRF_{yy} за епоха 1989.0.

Таблица 2.1. Оценки на транслационните параметри T_{yy}

YY		T1 cm	T2 cm	T3 cm
89		0	0	0
90	A	1.9	2.8	-2.3
	B	2.6	2.5	-2.6
	±	0.7	0.7	0.7
91	A	2.1	2.5	-3.7
	B	2.3	2.1	-3.1
	±	0.7	0.7	0.7
92	A	3.8	4.0	-3.7
	B	4.3	3.4	-3.2
	±	0.8	0.8	0.8
93	A	1.9	5.3	-2.1
	B	1.0	5.9	-1.4
	±	0.5	0.5	0.6
94	A	4.1	4.1	-4.9
	B	2.9	4.3	-3.6
	±	0.4	0.5	0.5
96	A	4.1	4.1	-4.9
	B	3.9	4.1	-3.9
	±	0.4	0.4	0.4
97	A	4.1	4.1	-4.9
	B	3.4	4.4	-4.3
	±	0.4	0.4	0.4
00	A	5.4	5.1	-4.8
	B	4.2	5.1	-4.6
	±	0.4	0.4	0.4

Таблица 2.2. Оценки на ротациите R_{YY}

YY	R1 mas/y	R2 mas/y	R3 mas/y
89	0.11	0.57	-0.71
90	0.11	0.57	-0.71
91	0.21	0.52	-0.68
92	0.21	0.52	-0.68
93	0.32	0.78	-0.67
94	0.20	0.50	-0.65
96	0.20	0.50	-0.65
97	0.20	0.50	-0.65
00	0.081	0.490	-0.792
	± 0.021	± 0.008	± 0.026

2.3 Връзка между инерциалната и земна координатни системи

Трансформацията между инерциалната и земната координатни системи се дава с:

$$\vec{r}_{inertial} = PNUXY\vec{r}_{terr}$$

където

$\vec{r}_{inertial}$ е радиусвекторът на спътника в инерциалната координатна система,

$\vec{r}_{terr}$ е радиусвекторът на спътника в земната координатна система,

P е матрицата на нутацията.

N е матрицата на прецесията,

U, X, Y са матриците на звездното време и координатите на полюса.

ГЛАВА 3

ДЪРЖАВНА GPS МРЕЖА

Проектът на Държавната GPS мрежа и програмата за измерването ѝ са разработени от подразделенията на Военотопографската служба на Българската армия – 26480, София и 24430, Троян и “Българска геоинформационна компания ООД”.

Държавната GPS мрежа се създава в изпълнение на ПМС 140/04. 06. 2001 г., което определя Българската геодезическа система 2000 и служи за радикално обновяване на Държавната геодезическа мрежа на Република България.

Държавната GPS мрежа на страната се базира на:

- перманентните GPS станции от Перманентната европейска мрежа EPN (European Permanent Network), съответно на Международната GNSS служба IGS (International GNSS Service);
- мрежата от EUREF точки в България или “БУЛРЕФ”, като реализация на Европейската координатна система ETRS89 в България.

Държавната мрежа се състои от два класа точки, обединени в Основна и Второстепенна мрежа.

Основната мрежа се създава с цел да реализира, разпространи и поддържа на територията на страната Европейската координатна система ETRS89 с точност 10 мм по положение и 15-20 мм по височина чрез използването на GPS технологията. С цялостната реализация на Основната и Второстепенната мрежи ще се достигне плътност, която ще позволи точките им да се използват като изходни за изграждане на местни геодезически мрежи за нуждите на практическите приложения.

Отговорностите за изграждането, измерванията, обработката, разпространението на резултатите и поддръжката на Държавната GPS мрежа са регулирани с ПМС 1/06. 01. 2005 г., за разпределение на задачите по геодезия и картография с национално значение.

3.1 Проектиране на точките от основната GPS мрежа

Основната GPS мрежа включва следните видове точки:

1. Всички точки от мрежата “БУЛРЕФ”, в това число точките от Европейската унифицирана височинна мрежа EUVN (European Unified Vertical Network) – Бургас (BUTG) и Варна (VATG);
2. Точки от съществуващата Държавна геодезическа мрежа I и II клас. Тези точки трябва да послужат за изчисление на трансформационните параметри между координатната система ETRS89 и съществуващите на територията на страната координатни системи;
3. Точки от Държавната геодезическа мрежа III и IV клас;
4. Новопостроени точки през периода 2002 – 2003 година специално за Държавната GPS мрежа;
5. Точки със специален статут (на места, където е вероятно в бъдеще да се изградят перманентни GPS станции).

В допълнение, към основната GPS мрежа, са избрани т.нар. “допълнителни” точки. Те са разделени на две подгрупи – свързващи и дублиращи точки, не са част от основната мрежа и се измерват по специална програма.

Свързващите точки са избрани в близост до точките “БУЛРЕФ” и в районите, където няма достатъчен брой точки от ДГМ I и II клас. Предназначени са да подпомогнат изчисляването на трансформационните параметри между ETRS89 и съществуващите в страната координатни системи. Някои от тези точки са включени в проекта на Второстепенната GPS мрежа и ще останат такива след нейното измерване. Останалите ще отпаднат и няма да бъдат поддържани в бъдеще. Точките задължително отговарят на изискванията за високоточно центриране на GPS апаратура и благоприятни условия за GPS измервания.

Дублиращите точки са избрани в близост до точките “БУЛРЕФ” и точките със специален статут. Изискванията към тях са същите като към точките от Държавната GPS мрежа. Предназначени са за евентуално заместване и възстановяване на разрушени и/или унищожени точки от “БУЛРЕФ”.

За изискванията към GPS точките вж. “Държавна GPS мрежа – Проект на мрежата и програма за измерване”, Министерство на отбраната, Военнотопографска служба, София, май 2004.

Таблица 3.1. Точки от основната GPS мрежа

№	Вид на точките	Брой	Забележка
1	Точки от мрежата “БУЛРЕФ”	15	От тях 2 ДГМ I и II клас 2 точки от “БУЛРЕФ”
2	Точки от EUVN	2	
3	Точки ДГМ I и II клас	25	
4	Точки ДГМ III и IV клас	46	
5	Нови точки	22	
6	Точки със специален статут	2	
	Всичко	112	

Таблица 3.2. Допълнителни точки

№	Вид на точките	Брой	Забележка
1	Свързващи	24	
	-към “БУЛРЕФ” точки	10	
	-други	14	
2	Дублиращи		
	- към “БУЛРЕФ” точки	14	
	- към точки със специален статут	2	
	Всичко	38	

Таблица 3.3. EUREF точки (БУЛРЕФ) в България

№	Точки от “БУЛРЕФ”			Свързващи		Дублиращи	
	Номер	Име	Клас	Номер	Клас	Номер	Клас
1	11101M002 ¹	SOFI	I	11101M002	I		
2	31	PANA	II	31	II		
3	8140	GABR		79	II	8404	
4	8141	SHUM		177	II*	8405	
5	8142	KAVA		93	II	6784	IV
6	8143	HARM		148	II	8409	
7	8144	BURG		70	I	8406	
8	8145	SAPA				8412	
9	8146	PETR		103	I	8411	
10	8147	SATO					
11	8148	BERK				8402	
12	8149	VIDI		7	I	8401	
13	8150	GULI		67	II	8403	
14	8151	KERM		165	II	4499	IV
15	8152	MAMA		194	II	8408	

¹ Това е номерът на точка SOFI в съответствие с приетите стандарти на EUREF/IGS

Таблица 3.4. Точки със специален статут

№	Точка	Местоположение	Описание	Дублираща точка
1	TROY	Троян	Поделение 24430	8318
2	VVUA	Шумен	Военно училище	

При проектирането и избора на точките от основната GPS мрежа са съблюдавани следните основни изисквания:

1. Средно разстояние между точките 35 км;
2. Точките да са трайно стабилизирани на терена и да позволяват центриране на GPS антената или конвенционални геодезически инструменти с точност 1 мм;
3. Да са налице благоприятни условия за GPS измервания;

Безпрепятствен достъп с обикновено моторно превозно средство до точките или в непосредствена близост по всяко време и във всякакви условия.

3.2 Измерване на основната GPS мрежа

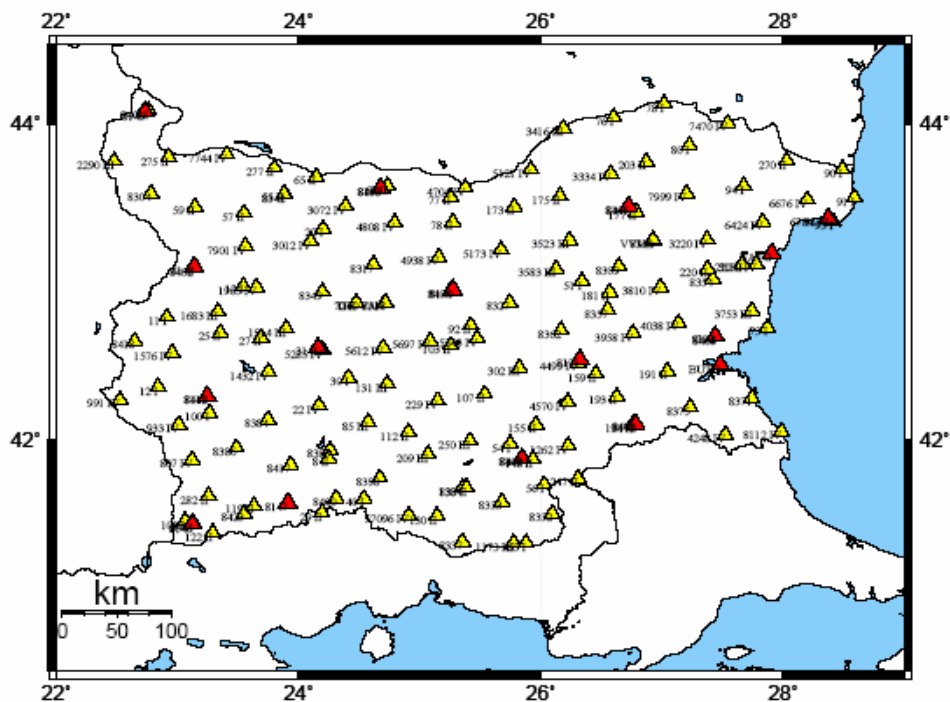
Държавната GPS мрежа е измерена с високоточни геодезически приемници на фирмата Trimble. Измерванията на всички точки от основния клас са извършени в сесии с продължителност две денонощия, считано от 0 часа UTC, като са измерени и допълнително две сесии с продължителност от 5 до 8 часа – преди и след основните две сесии. Измерванията на допълнителните точки е извършено в сесии от по 6 часа, едновременно с точките от основния клас.

Всички измервания са извършени при 15 секунди скорост (честота) на записа и 10 градуса височина над хоризонта.

3.3 Резултати от обработката на GPS измерванията на основната мрежа

Обработката на GPS измерванията е извършена в ITRF2000 реализацията на координатната система ITRS.

Обработката е извършена с научноизследователския софтуер Bernese 5.0 – софтуер за обработка на GPS, отразяващ последните постижения в тази област. Софтуерът е създаден като “инструмент за постигане на най-висока точност при обработката на GPS в различни приложения”. Основната програма включва различни опции – от определяне орбитата на спътниците до комбиниране на различни решения, използвайки нормалните уравнения.



Фиг. 3.1. Държавна GPS мрежа

Приложената стратегия при обработката на GPS измерванията се базира на последните постижения в тази област при обработката на регионални мрежи и на обработката на перманентните измервания на EUREF мрежата (вж. напр. Boucher and Altamimi, 2001; Peter Y., 2001; Becker et al., 2002; Altamimi 2003; Rotacher et al., 1997).

GPS кампанията за определяне координатите на Държавната GPS мрежа е разделена на дневни - 24 часови сесии. За всяка сесия се изчислява т.нар. дневно решение, които решения (нормални уравнения) след това се комбинират за получаване на решение за кампанията.

Окончателното решение за кампанията 2004 година е получено чрез комбиниране на дневните решения. Опорните станции (т.нар. fiducial или anchor sites) са Golosiiv (GLSV), Graz (GRAZ), Jozegoslav (JOZE), Kootwijk (KOSG), Matera (MATE), Metsahovi (METS), Onsala (ONSA), Sofia (SOFI) Wettzell (WTZR), Zimmerwald (ZIMM). Координатите на тези точки получават в изравнението априорни средни квадратни грешки от 0.0001 м (0.1 мм).

Координатите на точките са трансформирани от ITRF2000 в координатна система ETRS89 – ETRF2000, епоха 2004.8.

GPS наблюденията от кампанията EUREF BG 1993 бяха използвани за определяне скоростите на EUREF точките в България.

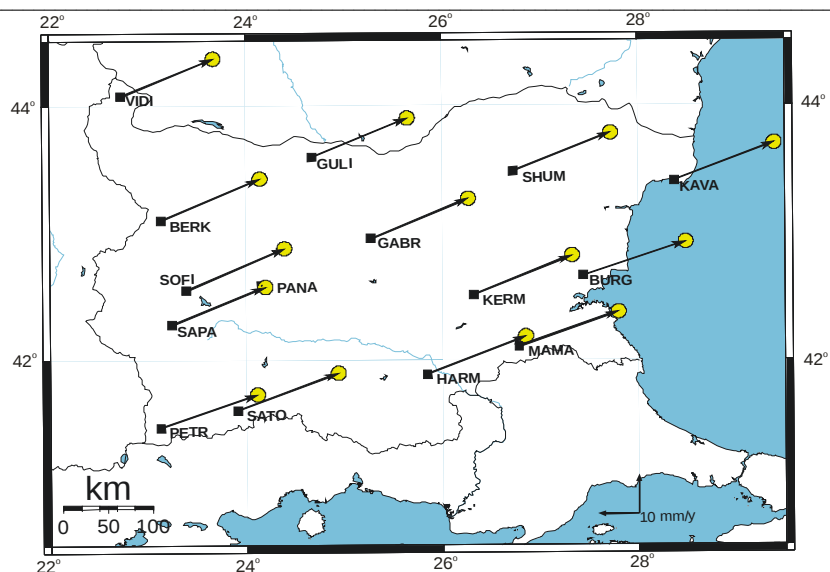
3.3.1 Абсолютни и релативни скорости

По принцип движенията на земната кора в глобален мащаб се изразяват в абсолютен смисъл – абсолютни движения на индивидуалните континентални плочи по отношение на фиксирана координатна система, т.нар. (hotspot reference frame) или като движения на една плоча спрямо съседната. Получените ITRF2000 скорости на точките в този смисъл са абсолютни скорости.

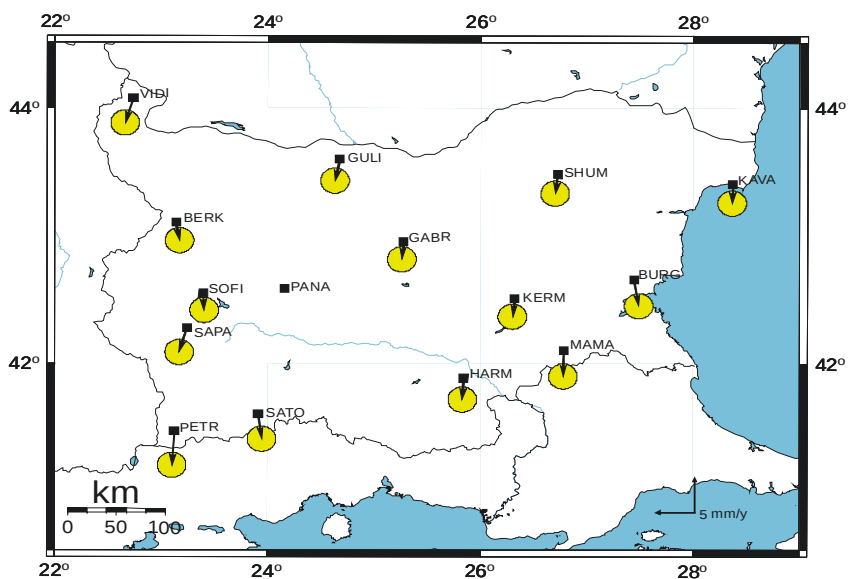
По дефиниция координатната система ETRS89 е привързана към Евроазиатската плоча и по-точно към стабилната ѝ част. EUREF скоростите на точките се получават като от абсолютните им скорости (в случая ITRF2000) се извади ротацията на плочата (т.нар. rigid plate motion). За стабилната част на Европа тези скорости са нули. Остатъчните скорости са точно EUREF скоростите на точките. Те всъщност представляват точно т.нар. вътрешно-плочови деформации и са отлични от нула в тектонски активните райони.

До 2001 година “твърдата” ротация на Евразия се отчиташе чрез движенията на точките, изчислени по модела NUVEL-1A-NNR (DeMets et al., 1994). С последната реализация на ITRS – ITRF2000 (Altamimi and Boucher, 2002) е определен нов ротационен полюс за Евразия, значително по-различен от този на NUVEL-1A-NNR. Altamimi и Boucher са използвали 19 ITRS станции на стабилната част на Евразия с дълги наблюдателни редове и висока точност за определяне на Европейския ротационен вектор.

На фигура 3.2 са показани получените ITRF2000 скорости на EUREF точките, а на фигура 3.3 релативните скорости, едновременно с 3σ елипсите на грешките им.



Фиг.3.2. Абсолютни скорости на EUREF точките в България



Фиг.3.3. Релативни скорости на EUREF точките в България

ГЛАВА 4

КООРДИНАТНИ СИСТЕМИ ИЗПОЛЗВАНИ В БЪЛГАРИЯ

4.1 Исторически бележки

Първата координатна система, която се въвежда в България е системата на Руската триангулация (Иванов Н., 1991). В резултат на усилена работа от страна на руските военни топографи през периода 1877-1879 г. са определени координатите и височините на 1274 триангулационни точки. Мрежата е определена върху елипсоида на Валбек (1819 г.) с голяма полуос $a=6\,376\,896$ m и силеснатост $\alpha=1/302.78$. Изходна точка е минарето на главната джамия в Кюстенджа (днешна Констанца, Румъния), а изходен азимут – този на посоката от нея към западната пирамида на Кюстенджанската база.

За съжаление, триангулационните точки са били стабилизирани със закопани в земята стъклени бутилки и не са се запазили за дълго време. Доста по-късно акад. Владимир Христов е успял да установи връзка между три триангулационни точки в централната част на София (сега те не съществуват) и астрономичната кула зад Централния военен клуб. Тази връзка има единствено историческо значение.

4.2 Елементи от теорията

1. Основни понятия

Всяка координатна система се дефинира в линейно (векторно) пространство със зададена размерност, в което се въвежда база и метрика.

Пространството където се решават масовите геодезически задачи – проекционната равнина, е двумерно. То е с нулева кривина, благодарение на което прилаганият математически апарат е максимално опростен, но се простира в сравнително тесни граници, извън които деформациите заради формата на Земята стават значителни.

За да разширим обхвата на решаваните задачи отново може да си послужим с двумерно пространство, но този път с ненулева кривина. Създава се с помощта повърхнини от втора степен, каквито са например

сферата и елипсоидът. Те са традиционно използвани във висшата геодезия като апроксимации на Земната повърхност, макар че изискват прилагането на значително по-сложен математически апарат.

За да се постигне по-нататъшно обобщение е необходимо да се въведе още едно измерение. В така полученото тримерно пространство с нулева кривина формулировка на геометричните задачи е просто, но се появява и трета координата.

Размерността на пространството е пряко свързана с максималния брой линейно независими вектори, които могат да се дефинират в него. Всяка комбинация от такива вектори може да бъде *база* на пространството. В пространствата с нулева кривина базовите вектори съвпадат с посоката на координатните оси, а в тези с ненулева кривина - с посоката на тангенциалните вектори на криволинейните координатни линии. Изборът на база се свежда на практика до ориентацията на координатната система.

Пространство където е зададено правило, по което на всеки вектор от него съответства число – *норма*, се нарича *нормирано пространство*. Там може да се въведат мерки за дължините на векторите и ъглите между тях. Ако нормата се задава чрез скаларното произведение на два вектора, пространството се нарича *Евклидово*. В този случай скаларното произведение задава *метриката* на пространството, която пък тясно свързана с линейния мащаб.

В геодезията намират приложение едно-, дву- и тримерното Евклидови пространства - E_1 , E_2 , E_3 , съответно в нивелацията, обработката на измервания в равнината и върху повърхността на референтния елипсоид, и в пространствените (3D) модели.

2. Афинно пространство и афинни трансформации

Ако на всеки вектор $\mathbf{v}$ от линейно пространство със зададена размерност съответстват по две точки от дадено множество – $\mathbf{v} = \overline{OP}$, и е изпълнено $\overline{OQ} = \overline{OP} + \overline{PQ}$, пространството се нарича *афинно*. Най-общият случай на смяната на базата в такова, например двумерно пространство –

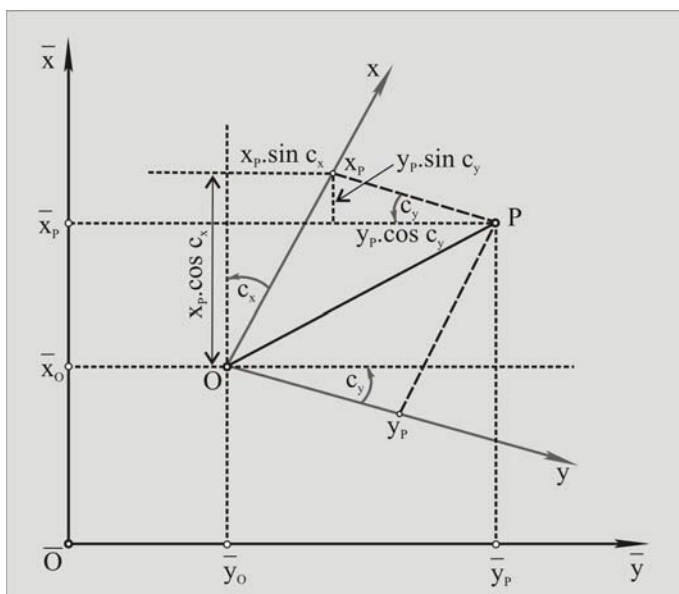
$$(4.1) \quad \begin{aligned} \bar{x} &= a_{00} + a_{10}x + a_{01}y, \\ \bar{y} &= b_{00} + b_{10}x + b_{01}y, \end{aligned}$$

при условие

$$(4.2) \quad h = \begin{vmatrix} a_{10} & a_{01} \\ b_{10} & b_{01} \end{vmatrix} \neq 0$$

където x, y – координатни оси на едната база, а $\bar{x}, \bar{y}$ – на другата, е известен като *афинна трансформация*. Тя е точкова и взаимно еднозначна, т.е. правите линии се преобразуват в прави линии, а успоредните прави – в успоредни прави.

Освен аналитично (4.1), афинната трансформация може да се представи и геометрично (фиг. 4.1).



Фигура 4.1. Геометрично представяне на афинната трансформация

За афинните изображения на координатните оси x, y в координатната система $\bar{x}, \bar{y}$ важат връзките:

$$(4.3) \quad \begin{aligned} \text{за } x\text{-ос:} \quad & \bar{x}_x = a_{00} + a_{10}x, & \bar{y}_x = b_{00} + b_{10}x, \\ \text{за } y\text{-ос:} \quad & \bar{x}_y = a_{00} + a_{01}y, & \bar{y}_y = b_{00} + b_{01}y. \end{aligned}$$

Формулите за мащабите в посока на осите – $m_{\bar{x}}, m_{\bar{y}}$ и ъгловите коефициенти $\text{tg}c_x, \text{tg}c_y$ (фиг. 4.1) се намират по формулите:

$$\begin{aligned}
 (4.4) \quad m_{\bar{x}}^2 &= \left(\frac{\partial \bar{x}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{y}}{\partial x} \right)^2 = a_{10}^2 + b_{10}^2, \\
 m_{\bar{y}}^2 &= \left(\frac{\partial \bar{x}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{y}}{\partial y} \right)^2 = a_{01}^2 + b_{01}^2, \\
 \operatorname{tg} c_x &= \frac{\frac{\partial \bar{y}}{\partial x}}{\frac{\partial \bar{x}}{\partial x}} = \frac{b_{10}}{a_{10}}, \quad \operatorname{tg} c_y = -\frac{\frac{\partial \bar{x}}{\partial y}}{\frac{\partial \bar{y}}{\partial y}} = -\frac{a_{01}}{b_{01}}.
 \end{aligned}$$

Използвайки тези означения, общите уравнения на афинната трансформация (4.1) могат да се запишат във вида

$$(4.5) \quad \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{x}_0 \\ \bar{y}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \operatorname{cose} c_x & -\operatorname{sine} c_y \\ \operatorname{sine} c_x & \operatorname{cose} c_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{\bar{x}} & 0 \\ 0 & m_{\bar{y}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix},$$

където $\bar{x}_0, \bar{y}_0$ - координати на началната точка на системата (x, y) в система $(\bar{x}, \bar{y})$. Очевидно

$$\begin{aligned}
 (4.6) \quad a_{00} &= \bar{x}_0, & a_{10} &= m_{\bar{x}} \operatorname{cose} c_x, & a_{01} &= -m_{\bar{y}} \operatorname{sine} c_y, \\
 b_{00} &= \bar{y}_0, & b_{10} &= m_{\bar{x}} \operatorname{sine} c_x, & b_{01} &= m_{\bar{y}} \operatorname{cose} c_y.
 \end{aligned}$$

В геодезията такава афинна трансформация обикновено се прилага при привързването (ректификацията) на различни дигитализирани или сканирани карти и снимки към дадена координатна система. Поради това почти всички CAD или GIS системи извършват такъв тип трансформации.

3. Конформни и ортогонални трансформации в равнината

С Евклидовото пространство обикновено се свързва ортогонална база със съответната размерност. В двумерния случай, условието за ортогоналност може да се въведе чрез израз

$$(4.7) \quad h = \begin{vmatrix} a_{10} & a_{01} \\ b_{10} & b_{01} \end{vmatrix} = \pm 1,$$

откъдето, с оглед на (4.5) следва $c_x = c_y = c$. Ако детерминантата $h = +1$, ориентацията на осите в двете координатни системи е еднаква – или са десни или леви, а при $h = -1$ тя е разноименна. Като се отчете (4.7) и се приеме условие за изотропност на мащаба - $m_x = m_y = m$, трансформационните параметри ще станат 4 на брой – трансляциите $\bar{x}_0, \bar{y}_0$, ъгълът на завъртане (ротация) c и мащабът m :

$$(4.8) \quad \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{x}_0 \\ \bar{y}_0 \end{bmatrix} + m \begin{bmatrix} \cos c & -\sin c \\ \sin c & \cos c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}.$$

Това са уравненията на *конформната*, или още *Хелмертова* трансформация. Тя запазва подобие, т.е. ъглите между линиите, но не и дължината им, която след трансформацията се променя с мащабния коефициент m . Намира широко приложение в геодезията, като инструмент за съпоставяне на множества от точки, определени в различни координатни системи.

Ако в (4.8) се запазят само трансляцията и ротацията, а мащабът стане равен на единица, то се получават уравненията на ортогоналната трансформация

$$(4.9) \quad \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{x}_0 \\ \bar{y}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos c & -\sin c \\ \sin c & \cos c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}.$$

Матрицата в (4.8) и (4.9) отговаря на изискването (4.7) и е ротационна. Очевидно дължината след трансформацията остава непроменена, т.е. инвариантна -

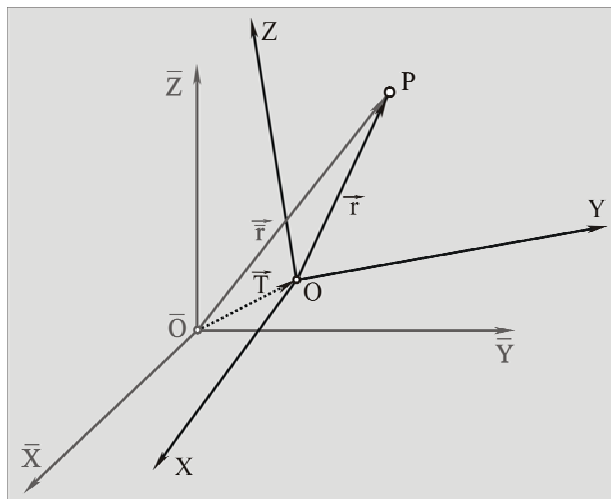
$$(4.10) \quad \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} = \sqrt{(\bar{x}_2 - \bar{x}_1)^2 + (\bar{y}_2 - \bar{y}_1)^2}.$$

Конформните и ортогоналните трансформации може да се разглеждат като специализации на афинните трансформации.

4. Пространствени трансформации

За да се приложи в тримерното пространство, конформната трансформация (4.8) се допълва с един трансляционен параметър по ос z и два ротационни параметъра, с които се въвеждат ротационни преобразувания в равнините OXY и OYZ . Ако трансляционните

параметри се означат с T , а ротационните – с R и се индексират в съответствие с координатните оси, то уравнението на пространствената трансформация (фиг. 4.2) ще добие вида



Фигура 4.2. Пространствена трансформация

$$(4.11) \quad \bar{\mathbf{r}} = \mathbf{T} + m\mathbf{R}\mathbf{r},$$

където

$$(4.12) \quad \mathbf{r} = [X \ Y \ Z]^*, \quad \bar{\mathbf{r}} = [\bar{X} \ \bar{Y} \ \bar{Z}]^*,$$

$$\mathbf{T} = [T_X \ T_Y \ T_Z]^*, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & R_Z & -R_Y \\ -R_Z & 1 & R_X \\ R_Y & -R_X & 1 \end{bmatrix},$$

m – мащабен параметър, $*$ - знак за транспониране. С ротационната матрица $\mathbf{R}$ в (4.11) се променя ориентацията на вектора $\bar{\mathbf{r}}$ (фиг. 4.2) от система XYZ в система $\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$, а с m дължината му се привежда в съответствие с линейния мащаб на последната.

Очевидно ротационните параметри R_X , R_Y , R_Z са ъгли на завъртане около едноименните оси. Ефектът на всеки от тях представя чрез съответните ротационни матрици –

$$(4.13) \quad \mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R_X & \sin R_X \\ 0 & -\sin R_X & \cos R_X \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} \cos R_Y & 0 & -\sin R_Y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin R_Y & 0 & \cos R_Y \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_3 = \begin{bmatrix} \cos R_Z & \sin R_Z & 0 \\ -\sin R_Z & \cos R_Z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

при което

$$(4.14) \quad \mathbf{R} = \mathbf{R}_3 \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1 .$$

Изразът (4.11) може да се представи и по друг начин -

$$(4.15) \quad \bar{\mathbf{r}} = \mathbf{T} + \tilde{\mathbf{R}}\mathbf{r} + \delta \mathbf{r} + \mathbf{r} ,$$

където вместо ротационната матрица $\mathbf{R}$ е използвана матрицата

$$(4.16) \quad \tilde{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} 0 & R_Z & -R_Y \\ -R_Z & 0 & R_X \\ R_Y & -R_X & 0 \end{bmatrix} ,$$

а машабът е подменен с величината $\delta = m - 1$.

В трансформационния модел (4.11, 4.15) центърът на въртене, в който са приложени ротационните параметри R_X , R_Y , R_Z съвпада с началото на координатната система. В случай че (XYZ) – геоцентрична система, тези параметри ще бъдат ясно дефинирани геометрически единствено ако наличните точки имат глобално разпределение, или поне обхващат територия със значителни размери. В противен случай е по-подходящо да се използва локален център на въртене, разположен в точка с координати

$$(4.17) \quad X_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i , \quad Y_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i , \quad Z_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i ,$$

където n – общ брой на точките. Тази точка е фиктивна и обикновено се нарича център на тежестта.

Ако вместо с ъглите R_X, R_Y, R_Z формулираме трансформацията чрез други три ъгъла, приложени в центъра на тежестта (4.17/9.641) - $R_{X_m}, R_{Y_m}, R_{Z_m}$, изразите (4.11) и (4.15) добиват вида съответно

$$(4.18) \quad \bar{\mathbf{r}} = \mathbf{T} + \mathbf{r}_m + m\mathbf{R}_m(\mathbf{r} - \mathbf{r}_m)$$

и

$$(4.19) \quad \bar{\mathbf{r}} = \mathbf{T} + \tilde{\mathbf{R}}_m(\mathbf{r} - \mathbf{r}_m) + \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_m) + \mathbf{r},$$

където $\mathbf{r}_m = [X_m \ Y_m \ Z_m]^*$.

По този начин се стига до два различни пространствени трансформационни модела:

- глобален (4.11, 4.15), известен като модел на Бурша – Волф;
- локален (4.18, 4.19) – модел на Молоденски – Бадекас.

Не е трудно да се види, че формално първият е частен случай втория за $X_m = 0, Y_m = 0, Z_m = 0$.

В глобални и широкомащабни регионални задачи (виж т. 2), успешно приложение намира моделът на Бурша – Волф. Обратно, в малки по площ страни и на ограничени територии преимуществата на модела на Молоденски – Бадекас са безспорни.

5. Трансформация със степенни редове (полиноми)

За да се извърши трансформация на равнинни координати, определени в различни геодезически проекции, може да се приложат редовете

$$(4.20) \quad \bar{x} = \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^i a_{i-k,k} \Delta x^{i-k} \Delta y^k, \quad \bar{y} = \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^i b_{i-k,k} \Delta x^{i-k} \Delta y^k$$

или записани в развит вид:

$$(4.21) \quad \begin{aligned} \bar{x} &= a_{00} + a_{10}\Delta x + a_{01}\Delta y + a_{20}\Delta x^2 + a_{11}\Delta x\Delta y + a_{02}\Delta y^2 + \dots, \\ \bar{y} &= b_{00} + b_{10}\Delta x + b_{01}\Delta y + b_{20}\Delta x^2 + b_{11}\Delta x\Delta y + b_{02}\Delta y^2 + \dots, \\ &, \\ \Delta x &= x - x_0, \Delta y = y - y_0, \end{aligned}$$

където n – степен на полиномите.

Ако двете проекции са конформни, каквато е обикновената практика в геодезията, изображението (трансформацията) (4.21) трябва да бъде конформно, т.е. трябва да са изпълнени Коши-Римановите частни диференциални уравнения

$$(4.22) \quad \frac{\partial \bar{x}}{\partial x} = \frac{\partial \bar{y}}{\partial y}, \quad \frac{\partial \bar{x}}{\partial y} = -\frac{\partial \bar{y}}{\partial x}.$$

По тази причина за коефициентите от уравнения (4.21) важат връзките

$$(4.23) \quad \begin{aligned} a_{10} &= b_{01}, & a_{01} &= -b_{10}, \\ a_{20} &= -a_{02} = b_{11}/2, & b_{20} &= -b_{02} = -a_{11}/2 \end{aligned}$$

и т.н. Оказва се, че с повишаването на степента на полинома с единица, коефициентите се увеличават само с два. Например, полиномът от четвърта степен, представен в матричен вид, има вида

$$(4.24) \quad \begin{bmatrix} \Delta \bar{x} \\ \Delta \bar{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & -k_{12} & k_{21} & -k_{22} & k_{31} & -k_{32} & k_{41} & -k_{42} \\ k_{12} & k_{11} & k_{22} & k_{21} & k_{32} & k_{31} & k_{42} & k_{41} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta x^2 - \Delta y^2 \\ 2\Delta x \Delta y \\ \Delta x^3 - 3\Delta x \Delta y^2 \\ 3\Delta x^2 \Delta y - \Delta y^3 \\ \Delta x^4 - 6\Delta x^2 \Delta y^2 + \Delta y^4 \\ 4\Delta x^3 \Delta y - 4\Delta x \Delta y^3 \end{bmatrix}.$$

Когато проекциите на координатите в системи xu и $\bar{x}\bar{u}$ са известни, могат да се получат аналитични изрази за коефициентите k_{ij} в (4.24) (Даскалова М., Здравчев И., 2005). В линейния случай, полиномиалната трансформация се свежда до афинни и конформни трансформации, където мащабът на изображението е постоянна величина (виж т. 4.2).

6. Геодезически координатни системи – дефиниция и реализация

Една геодезическа координатна система се дефинира чрез въведените по-горе размерност база и метрика. Не по-малко важен е и начинът, по който такава система е осъществена на практика, намиращ израз чрез координатите на множество точки, стабилизирани на терена. Естествено последните се свързват в мрежа чрез геодезически измервания – линейни, ъглови, височинни. Така дадена геодезическа координатна система се характеризира както чрез дефинитивните си параметри, така и чрез мрежата, с чиято помощ е материализирана.

Съвкупността от дефинитивните параметри и свързаните с тях теории, конвенции и методи задава *референтната система*, в която е осъществена обработката на геодезическите измервания. Резултатите от дадени измервания могат да се обработят с едни или други параметри на референтната система, благодарение на което продуктът да получи определени характеристики – ориентация, мащаб и пр. Обратно, една и съща референтна система може да получи различни *реализации*, в зависимост от множеството точки и измерванията, които ги свързват в мрежа.

За да определят координатите на точките, чрез които дадена референтна система се реализира, е необходимо да се построи математическият модел на решаваната задача. В него са формулирани функционалните (физически и геометрически) връзки между тях – в качеството им на оценявани параметри и измерванията в мрежата, с изходни данни параметрите на референтната система. Моделът се решава след въвеждане на подходящо оптимизационно условие, което традиционно е свързано с приложение на метода на най-малките квадрати в една или друга негова разновидност.

При определени условия параметрите на референтната система в дадена реализация могат да се подменят с други по трансформационен път.

4.3 Развитие на референтните и координатните системи в България, 1930 - 2005 г.

1. Система “1930 г.”

За начало на съвременните основни геодезически работи в страната се приема 1920 г., когато е учреден Държавният географски институт при Министерството на войната. По това време точките от Руската триангулация вече отдавна не съществуват, а съсипаното от войните стопанство се нуждае от актуални топографски карти и планове.

Затова приоритетно започват проектирането, строителните и измерителните работи за изграждане на съвременни държавни геодезически мрежи – триангулации и нивелации.

Първокласната триангулация се състои от 76 точки, а второкласната – от 230. Като изходна е приета т. 16 “Черни връх” с координати $\varphi=42^{\circ}33'54.5526''$, $\lambda=23^{\circ}16'51.9603''$, а за изходен азимут е взето направлението към т. 11 “Мечи камък”.

За референтен елипсоид е използван приетият от Международния съюз по геодезия и геофизика през 1924 г. елипсоид на Хейфорд, с размери $a_X=6\,378\,388\text{ m}$ и $\alpha_X=1/297.0$. Кратките срокове за приключване на работата, липсата на какъвто и да е опит, измерителни инструменти и подготвени специалисти, не позволяват да се осъществят достатъчно по брой и качество астрономически измервания за ориентирането на Държавната триангулация. Затова – както скоро след това се оказва – в ориентацията на мрежата, особено по географска дължина, е допусната значителна грешка (Минчев М., 1998).

Равнинни координати се дефинират с помощта на гаусовата проекция, като са използвани стандартни триградусови координатни системи. Правоъгълните координати са намалени мащабно с 0.9999. Абсцисите са се отчитали първоначално от паралела с ширина 41° , а ординатите – от основния меридиан за всяка ивица. Скоро обаче (1941 г.), абсцисното начало е преместено в екватора, като е прибавена мащабно намалената дъга по меридиана за паралела 41° ($4\,540\,198.355\text{ m}$). С цел да се получат само положителни стойности на ординатите, към тях е прибавена стойността $Y_0 = n \cdot 10^6 + 5 \cdot 10^5\text{ m}$, където n е номерът на ивицата.

По този начин, с водещата роля на младия тогава акад. Вл. Христов е създадена известната на българската геодезическа общност координатна система “1930 г.”.

2. Система “1950 г.”

В началото на 50-те години на дневен ред идва съгласуването на координатните и височинните системи на страните от съветския блок. Затова с постановление на Министерския съвет е официално приет референтният елипсоид на Красовски, с размери $a_K=6\,378\,245\text{ m}$ и $\alpha_K=1/298.3$. С помощта на диференциалните формули на Вл. Христов (Христов В., 1964) са трансформирани координатите на всички държавни триангулационни точки от елипсоида на Хейфорд към този на Красовски и са променени координатите на изходната точка. Използвани са следните параметри:

$$\begin{aligned}\Delta a &= a_K - a_X = -143 \text{ m}; \\ \Delta \alpha &= \alpha_K - \alpha_X = -1.46375 \cdot 10^{-5}; \\ \Delta \varphi_{16} &= \varphi_{16}^{50} - \varphi_{16}^{30} = -3.4240''; \\ \Delta \lambda_{16} &= \lambda_{16}^{50} - \lambda_{16}^{30} = -3.6520''; \\ \Delta A_{16-11} &= 0; \quad \Delta S_{i-k} = 0 \text{ m},\end{aligned}$$

където новите координати на Черни връх $\varphi_{16}^{50}, \lambda_{16}^{50}$ са без особени претенции за точност и са взети от каталог на Съветската армия (1948 г.), а с нулевите изменения на последния ред е означено, че ориентацията по азимут и линейният мащаб на мрежата са запазени без изменение.

За геодезическа проекция отново е избрана гаусовата проекция, но с мащаб по основния меридиан равен на единица. Използвани са две триградусови ивици с основни меридиани 24° и 27° и две шестградусови ивици с основни меридиани 21° и 27° . Триградусовите ивици са използвани за граждански цели (кадастралните планове на населените места, едромашабната топографска карта в М 1:5 000 и 1:10 000 и др.), а шестградусовите са използвани за топографските карти в М 1:25 000 и в по-дребни мащаби.

Така, без нови измервания, координатите на точките от Държавната триангулация са преизчислени от система “1930 г.” в дефинираната по-горе референтна система “1950 г.”.

3. Системи “1942 г.” и “1942/83 г.”

След някои малки промени в Държавната триангулация I клас и свързването ѝ със съответната Румънска мрежа, а оттам – със Съветската, през 1957 г. в Москва приключват работите по едно ново изравнение, с което в България се въвежда референтната система “1942 г.”. С това се изпълнява решението на Първата конференция на геодезическите служби на тогавашните социалистически страни, състояла с в София през 1952 г., за приемане на система “1942 г.” като основа на държавните геодезическите работи.

Система “1942 г.” се дефинира върху референтния елипсоид на Красовски, с изходна точка Пулковската обсерватория край Санкт-Петербург и азимут към съседна точка. Като проекционни координати отново са използвани гаусовите координати.

След съществено усъвършенстване на триангулациите II, III и IV класове в периода 1957-65 г., система “1942 г.” се разпространява върху цялата територия на страната с подходяща плътност.

През 1962 г. в Букурещ, на Шестата конференция на

геодезическите служби се взема решение за създаване на Единна астрономо-геодезическа мрежа на европейските социалистически страни, чрез на модернизиране на държавните им триангулации въз основа на съгласувани изисквания. България се включва в този проект с триангулациите I и II класове, след частичната им реконструкция и насищането им с линейни и астрономически азимутални измервания (до 1978 г.).

Тъй като някои елементи на новата референтната система – елипсоид, начална точка, геодезическа проекция, съвпадат с тези на система “1942 г.”, се възприема името “1942/83 г.” – по годината на новото изравнение.

4. Системи “1950 г. – нова” и “1970 г.”

С измерванията през 1957-65 г. съгъстващите класове на Държавната триангулация се преструктурират и усъвършенстват значително. За да се подготви адекватен отговор на тенденцията за разделяне на гражданските и военните геодезически и топографски работи, наред с изравнението на включените мрежи в система “1942 г.” се подготвя и друго решение, въз основа на референтна система “1950 г.”. Последното всъщност е една нова реализация на същата система, откъдето идва и името, което и е дадено – “1950 г. – нова”. Разликите между двете системи достигат до 50-60 cm. Новата система обаче остава без приложение, с което за десетилетия напред гражданската геодезия остава потребител на Държавната триангулация в състоянието ѝ към 1930 г. – за I клас и към началото на 50-те години - за по-ниските класове.

Вместо това страната се разделя на четири зони, в които след преориентиране по азимут координатните регистри в система “1950 г.” се трансформират в конформна конична проекция с параметри индивидуални за всяка зона. За ползване в гражданския сектор се предоставят само проекционните координати. Получената система е известна като “1970 г.”, а координатните ѝ зони - съответно К-3, К-5, К-7 и К-9.

5. Обобщение

Основните моменти от развитието на референтните и координатните системи у нас в периода от 1930 до днес са илюстрирани на фиг. 4.3.

Както става ясно, през този период геодезическата мрежа чрез която референтните системи се осъществяват е била в три състояния:

а) в първоначален вид (1930 г.) – първокласна триангулация от 76 точки, впоследствие допълнена заради присъединяването на нови

територии;

б) в същия вид, минимално променена с някои допълнителни астрономически измервания (1955 г.);

в) астрономо-геодезическа мрежа, получена въз основа на реконструирания триангулации I и II класове, допълнени с множество линейни и астрономически измервания (1979 г.).

Оттук следва пълното сходство в качество на реализация на системите “1930 г.”, “1950 г.” и “1970 г.”. Състоянието на мрежата в система “1942 г.” се различава съществено от това в система “1950 г.”, но не по първокласната, а по запълващите II, III и IV класове, които са с усъвършенствана структура и подобро качество на измерванията. Това се отнася автоматически и за система “1950 г. – нова”. Апогей в реализацията на референтни системи от конвенционален тип бележи система “1942/83 г.”.

По аналогия с несъстоялия се опит за синхронизиране на изходната геодезическа основа с гражданско и военно предназначение посредством система “1950 г. – нова”, в последните години се появиха нови регистри на точките от Държавните геодезически мрежи I – IV класове в система “1970 г.” (на фиг. 4.1 – “1970 г.*”). Базиран на система “1942/83 г.” вместо на система “1950 г.”, координатите в новите регистри са значително по-точни и се различават в рамките на 50-60 cm от съответните им в система “1970 г.”. На фона на съвременното развитие на геодезическите работи, въвеждането на нова координатна система от конвенционален тип е неуместно.

4.4 Координатна система “1970 г.”

Координатна система “1970 г.” не е свързана с въвеждането на нова референтна система, а единствено с различен метод за изчисление на проекционни координати в система “1950 г.”. Поради широкото ѝ приложение за граждански цели, тук тя се разглежда по-подробно.

1. Същност на системата

Координатна система “1970 г.” е въведена за граждански цели с разпореждане №11 от 22 юли 1969 г. на Държавния комитет по отбрана, с цел да се прикрие единната за страните от тогавашния Варшавски договор координатна система “1942 г.”. В духа на онова време, това решение е инспирирано от Москва и е препоръчано за изпълнение от правителствата на всички страни от съветския блок.

Състояние на ДГМ	Триангулация I кл. (1930 г.)	Триангулация I кл. (1955 г.)	ДАГМ I и II кл. (1979 г.)
Референтни системи			
“1930 г.”	“1930 г.”		
“1950 г.”	↓ “1950 г.”	“1950 г.-нова”	
“1942 г.”	↓ “1970 г.”	↑ “1942 г.”	
“1970 г.” ²			“1970 г.*”
“1942/83 г.”			↑ “1942/83 г.”

Легенда

1. Реализации на референтни системи

- а) “1930 г.” - географска и проекционна координатни системи
- б) “1970 г.” - само проекционна координатна система
- в) “1970 г.*” - системи не намерили практическо приложение

2. Връзки между системите

- - трансформация

Фигура 4.3. Развитие на референтните и координатните системи в България, 1930-2005 г.

Изискванията, които са били поставени при нейното разработване, са привидно насочени към усъвършенстване на геодезическите работи в гражданския сектор, но всъщност целят да се

² Система “1970 г.” е изброена наред с референтните системи без всъщност да е такава, защото въвеждането и е свързано с промяна на ориентацията по азимут във всяка от четирите и зони.

фрагментира единното координатно пространство на територията на България и – доколкото го има – на другите европейски социалистически страни, а именно:

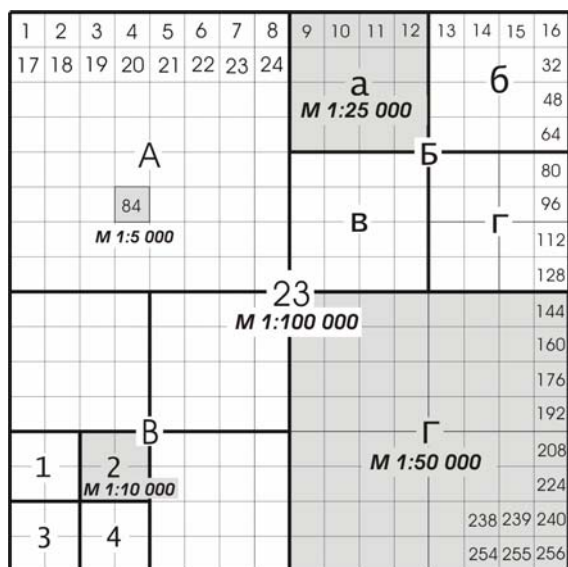
1. Проекцията да е конформна и математически строго определена;
2. Деформациите да са по-малки от тези на координатна система “1942 г.”;
3. Да се дефинират само правоъгълни координати;
4. Територията на страната да се раздели на райони, в които да се използват различни координатни системи.

Последното изискване води до разделянето на България на четири зони – К-3, К-5, К-7 и К-9 (фиг. 4.4), със застъпване помежду им 10 km. Във всяка зона се въвежда конична конформна проекция, допълнително завъртяна на малък ъгъл, така че да не се наруши конформността на изображението. Към равнинните координати са прибавени константи, индивидуални за всяка зона, с което се постига пълно външно сходство на новите координатите с гаусовите.

Тъй като географски координати официално не се дефинират, разграфката на картните листове в система “1970 г.” (фиг. 4.5) се осъществява не по паралели и меридиани, а по километрични линии. За да бъде абсурдът пълен, последните не се номерират.



Фигура 4.4. Координатна система “1970 г.”



Фигура 4.5. Разграфка и номенклатура на картните листове в система “1970 г.”

2. Основни уравнения

Географските координати в система “1970 г.” са междинен продукт и се изчисляват по метода на разгъване (Христов В., 1964), изхождайки от тези в система “1950 г.” -

$$(4.25) \quad \varphi_{1970} = \varphi_{1950} + d\varphi, \quad \lambda_{1970} = \lambda_{1950} + d\lambda,$$

където

$$(4.26) \quad d\varphi = -\cos \varphi_0 (1 + \eta_0^2) dA_0 l + 3 \cos \varphi_0 t_0 \eta_0^2 dA_0 \Delta \varphi l + \frac{1}{6} \cos^3 \varphi_0 (1 + t_0^2) dA_0 l^3,$$

$$d\lambda = \frac{1}{\cos \varphi_0} (1 - \eta_0^2 + \eta_0^4) dA_0 \Delta \varphi + \frac{1}{\cos \varphi_0} t_0 \left(1 - \frac{1}{2} \eta_0^2 \right) dA_0 \Delta \varphi^2 - \frac{1}{2} \cos \varphi_0 t_0 dA_0 l + \frac{1}{3 \cos \varphi_0} (1 + 3t_0^2) dA_0 \Delta \varphi^3 - \frac{1}{2} \cos \varphi_0 (1 + t_0^2) dA_0 \Delta \varphi,$$

$$\Delta\varphi = \varphi_{1950} - \varphi_0, \quad l = \lambda_{1950} - \lambda_0,$$

$$t = tg\varphi, \quad \eta = e' \cos \varphi,$$

e' - втори ексцентрицитет на меридианната елипса. По този начин върху същия елипсоид и при запазване на мащаба се променя единствено ориентацията по азимут с малкия ъгъл dA_0 . Вместо в изходната точка на мрежата, завъртането dA_0 се прилага в една фиктивна точка с координати φ_0, λ_0 и се дължи не на нови астрономически измервания или уточняване на изходните данни в резултат на ново астрономо-геодезическо изравнение, а е резултат на субективен избор. Тази процедура се прилага към точките във всяка от четирите зони на система “1970 г.”, с индивидуални стойности на параметрите $\varphi_0, \lambda_0, dA_0$.

Равнинните правоъгълни координати в система “1970 г.” се изчисляват по известните формули на конформната конична проекция – решение чрез развитие в редове:

$$(4.27) \quad x_{1970} = x_0 + \Delta x, \quad y_{1970} = y_0 + \Delta y,$$

където

$$(4.28) \quad \begin{aligned} \Delta x &= a_{10}\Delta\varphi + a_{20}\Delta\varphi^2 + a_{02}l^2 + a_{30}\Delta\varphi^3 + a_{12}\Delta\varphi l^2 + a_{40}\Delta\varphi^4 + \\ &+ a_{22}\Delta\varphi^2 l^2 + a_{04}l^4 + a_{50}\Delta\varphi^5 + a_{32}\Delta\varphi^3 l^2 + a_{14}\Delta\varphi l^4, \\ \Delta y &= b_{01}l + b_{11}\Delta\varphi l + b_{21}\Delta\varphi^2 l + b_{03}l^3 + b_{31}\Delta\varphi^3 l + b_{13}\Delta\varphi l^3 + b_{41}\Delta\varphi^4 l + b_{05}l^5 \\ \Delta\varphi &= \varphi_{1970} - \varphi_0, \quad l = \lambda_{1970} - \lambda_0. \end{aligned}$$

Изрази за коефициентите в (4.28) може да се намерят в (Даскалова М., Здравчев И., 2005), а стойностите на величините x_0, y_0 са индивидуални за всяка зона.

За осъществяване на непосредствена връзка между проекционните координати в системи “1950 г.” и “1970 г.” се използва полиномна трансформация от четвърта степен –

$$(4.29) \quad \begin{aligned} x_{1970} &= a_{00} + a_{10}\Delta x + a_{01}\Delta y + a_{20}\Delta x^2 + a_{11}\Delta x\Delta y + a_{02}\Delta y^2 + \dots, \\ y_{1970} &= b_{00} + b_{10}\Delta x + b_{01}\Delta y + b_{20}\Delta x^2 + b_{11}\Delta x\Delta y + b_{02}\Delta y^2 + \dots, \end{aligned}$$

където

$$\Delta x = (x_{1950} - x_{00})k, \Delta y = (y_{1950} - y_{00})k,$$

k – мащабен множител. Всички коефициенти в (4.29) са индивидуални за зоните в система “1970 г.”. Обратният преход се извършва по подобни формули.

3. Практическо приложение

Въпреки че е предназначена да създаде подходяща среда за работа в гражданския сектор, без ущърб на отбраната и сигурността на страната и военно-политическия пакт на който е била членка, система “1970 г.” е въведена в практиката под формата на координатни регистри за всяка от четирите зони, без каквито и да било данни за същността ѝ. До началото на 90-те години всички координати на точки в система “1970 г.” са секретни, а по-късно такива остават стойностите на дефинитивните ѝ параметри и коефициентите в трансформационните формули (4.29), които и до днес не са публикувани. По понятни причини, информация за системата - при това не всякога поднесена с необходимата компетентност и изчерпателност, може да се намери в твърде малко литературни източници, появили се едва през последните години [Йовев И., 2003; Стефанов Л., Николов М., 2004].

Пълен анахронизъм в технологично отношение и предпоставка за редица практически затруднения, произтичащи от изкуственото разделяне на страната на зони, липсата на други координати освен проекционни и ползването ѝ “на сляпо”, система “1970 г.” е основа на обемна геодезическа, топографска, кадастрална и пр., продукция създадена през последните 30 години. Затова вероятно ще се ползва още дълго време.

4.5 Българска геодезическа система 2000 (БГС 2000)

1. Предпоставки за въвеждане на БГС 2000

С усъвършенстването на методите и технологиите е нормално да се сменят и поколенията в геодезическите референтни и координатни системи. Практика в редица държави в Европа и по света е две, три и повече системи да намират приложение едновременно, в различни степени и за различни цели. България не прави изключение.

Не е нормално, обаче, гражданският сектор да се изолира от развитието на основните геодезически работи в страната и да се поставя по този начин в неравностойно положение – без да му се дава

възможност да ползва резултатите от усъвършенстването на геодезическите мрежи. От друга страна, зад паравана на секретността остават без контрол важни етапи от изчислителната работа, поддържането на базите данни и обмяна на информация. В такава обстановка се поставят “в шах” дори висококвалифицираните специалисти, а пред масовата практика се издигат непреодолими препятствия.

Проявление на този български феномен е например това, че в координатните регистри на система “1970 г.” са допуснати и продължават да се допускат нееднозначни данни за редица точки. Една от причините е, че в някои случаи тези координати са изчислявани изхождайки от система “1950 г. - нова” вместо от “1950 г.”. Последните се различават помежду си твърде незначително за да бъдат объркани, но достатъчно много за да предизвикат необясними груби грешки. Аналогичен ефект се постига и с въвеждането на система “1942/83 г.”, данни от която в редица случаи се използват за трансформиране на точки в система “1970 г.”, а всъщност се получават в друга система, наречена тук “1970 г.*” (фиг. 4.3).

Остава впечатлението, че нещата в това отношение са отдавна извън контрол и могат да се възстановят единствено с радикални мерки, а не чрез опити за реанимиране на старите референтни системи под една или друга форма. Това е сериозна предпоставка за въвеждане на една нова референтна система, отговаряща на всички съвременни изисквания. Затова в периода 1991 – 2000 г., тогавашното Главно управление “Кадастър и геодезия” на МТРС/МРРБ възложи на колектив от специалисти от Геодезическия факултет на УАСГ, ЦЛВГ при БАН и Военнотопографската служба разработването на теоретически основи за въвеждане на нова референтна система.

Продължителният период от време, множеството административни и персонални промени, затрудненото финансиране и др. доведоха до известна загуба на концентрация и разводняване на резултатите от работата. Независимо от това се очертаха следните поважни изводи, имащи отношение към развитието на референтните и координатните системи:

- страната остро се нуждае от решително обновяване на основните геодезически работи;
- система “1970 г.” не отговаря на съвременните изисквания на гражданския сектор към геодезическата основа;
- нова референтна система трябва да се въведе въз основа на резултатите от дейността по създаването на ETRS89, в която България се включва през 1991-92 г.;
- новата референтна система трябва да се реализира чрез коренно

обновяване на ДГМ с помощта на GPS и при максимална приемственост със съществуващите мрежи;

- на лице са различни алтернативи за оптимизиране на геодезическата проекция и др.

На тази основа и във връзка и във връзка с изискването на Закона за кадастъра и имотния регистър кадастралната карта на страната да се създава и поддържа в единна координатна система, с Постановление №140 на Министерския съвет от 04.05.2001 г. се въведе *Българска геодезическа система 2000*.

2. Същност на БГС2000

Съгласно ПМС №140/04.05.2001 г., Българската геодезическа система 2000 включва:

1. Фундаментални геодезически параметри, определени в Геодезическа референтна система 1980 (GRS 80);

2. Геодезическа координатна система ETRF89, реализирана чрез Европейската геодезическа мрежа EUREF;

3. Височинна система, реализирана чрез реперите от Държавната нивелация, определени във връзка с Единната европейска нивелачна мрежа (UELN), с помощта на данни за силата на тежестта в унифицирана гравиметрична система;

4. Система от равнинни координати, базирана на ETRF89 и конформната конична проекция (Ламбертова) с два стандартни паралела.

5. Международна система за разграфка и номенклатура на картните листове до мащаб 1:2000.

Въвеждането на ETRF89 в България започва още през 1992 г., с провеждането на международните GPS кампании EUREF-BG-92/93, в резултат на които на територията на страната са високоточно определени в тази система координатите на 15 точки, наречени впоследствие “Булреф”. Седем от тях получават статут на точки от европейската мрежа EUREF на територията на България, а от 1997 г. точката край София се превръща в перманентна GPS станция и влиза в състава първоначално на европейската мрежа EPN, а впоследствие и на глобалната мрежа IGS.

Доста по-късно, едва през 2002 г. започва работата по проектирането и изграждането на точките от Държавната GPS мрежа, с която се цели радикалното обновяване на изходната геодезическа основа в страната. Измерванията са осъществени през 2004 и 2005 г., а резултатите от обработката им са преставени в т. 3. До официалното въвеждане на резултатите от определянето на основния клас на Държавната GPS мрежа, за изходни точки във всички практически приложения са ползвани точките от мрежата “Булреф”.

За установяване връзка с Единната европейска нивелачна мрежа (UEN) напоследък приключи новата обработка на измерванията по пъвокласните нивелачни линии. С помощта на съществуващите връзки с нивелачната мрежа на Румъния, в страната по този е създадена възможността за преминаване от Балтийска в Европейска (UEN) височинна система.

По отношение на геодезическата проекция, предстои да се уточнят и приемат окончателно оптималните стойности на основните й параметри, предложени в разработената през 2001 г. от Министерството на регионалното развитие и благоустройството “Инструкция за прилагане на постановление на Министерския съвет на Република България №140 от 04.06.2001 г. за определяне на Българска геодезическа система 2000”. Съгласно този документ, основните параметри на конформната конична проекция (Ламбертова) с два стандартни паралела са следните:

$B_S = 41^{\circ} 15'$ – най-южен паралел;

$B_N = 44^{\circ} 10'$ – най-северен паралел;

$B_1 = 41^{\circ} 51'11''.2153$ – географска ширина на южния стандартен паралел;

$B_2 = 43^{\circ} 28'35''.8786$ – географска ширина на северния стандартен паралел;

$B_m = 42^{\circ} 40' 00''$ – географска ширина на средния паралел (в случай че проекцията се зададе чрез един стандартен паралел с мащабен коефициент 0.9999, респ. единица по B_1 и B_2);

$L_0 = 25^{\circ} 30' 00''$ – географска дължина на централния меридиан.

Предложени са и стойности за изместване на координатната система от точката върху централния меридиан и средния паралел в друга точка, с оглед да се получат положителни стойности на правоъгълните декартови координати.

Въпреки значителните улеснения за практиката, които би дала такава проекция – минимални деформации, отсъствие на зони и пр., тя е дефинирана единствено на територията на страната и поради това не може да остане единствена. Естествено е в редица приложения да продължи използването на универсална проекция – Гаусова или UTM.

В гражданския сектор предстои също така връщане към Международната система за разграфка и номенклатура на картните листове до мащаб 1:2000 включително, която с въвеждането на ситема “1970 г.” на практика беше изоставена. За основа се използва Международната карта на света в мащаб 1:1 000 000 (с размер 4° по меридиана и 6° по паралела), в която България попада в картните листове K-34, K-35, L-34, L-35.

4.6 Трансформационни задачи

За да се осъществи преход от една геодезическа координатна система в друга са необходими следните предпоставки:

- да са известни двете системи;
- да са известни стойностите на трансформационните параметри.

Първата предпоставка означава, че наред с координатните множества са налице и данни за референтните системи, чиято реализация са те – координатно начало и ориентация (т. нар. датум), референтен елипсоид, височинна система, геодезическа проекция и пр. В такъв случай данните от всяко координатно множество биха могли да се преобразуват от един вид в друг – напр. от проекционни в географски или в пространствени декартови координати или обратно, с оглед на приложението на подходящ трансформационен модел.

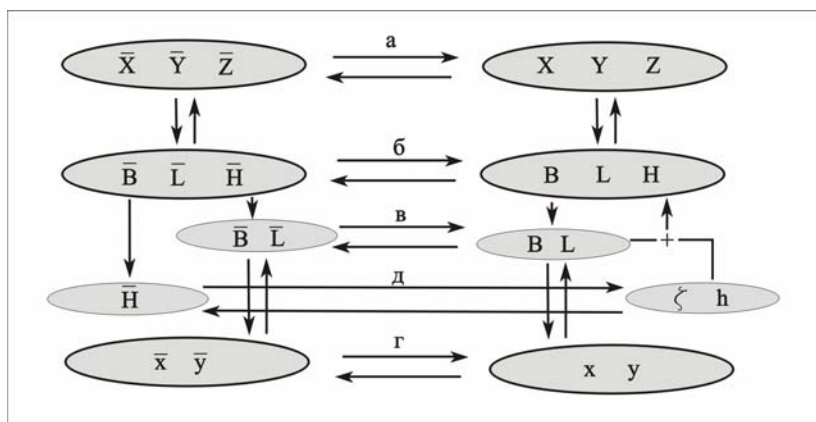
Смисълът на втората предпоставка е, че ако са известни референтните системи на двете координатни множества, то може да се потърсят данни за връзката между тях – трансформационен модел и стойности на параметрите му. По отношение на Световната геодезическа система WGS84 са публикувани трансформационните параметри на няколко десетки референтни системи, прилагани в различни държави и райони на света (Department of Defense WGS84, 1997).

Често едната или двете предпоставки не са изпълнени и се налага сами да определим трансформационния модел, а след това да оценим параметрите му въз основа на данните за *идентични* точки, определени в двете координатни системи.

Случаите в които точките са зададени с пространствени декартови или географски координати (фиг. 4.6 – а, б, в) се решават чрез пространствена трансформация. Тъй като между координатите B , L , H и X , Y , Z съществуват точни аналитични връзки, но в практиката се предпочита първият случай, който е и по-лесен за приложение, особено за случаите, когато се приеме, че и параметрите на трансформация се променят линейно с времето. Ако точките са зададени чрез равнинните им координати в местна система или в държавна система с неизвестни дефинитивни параметри, се прилага равнинна трансформация (г). Ако точките са определени в различни височинни системи и отсъстват данни за аномалиите на височините им, то е необходимо да се извърши самостоятелна трансформация по височина (д).

Необходимото количество идентични точки се определя в зависимост от броя на параметрите на трансформационния модел или от степента на използвания полином (напр. при полином от първа степен са необходими 3 точки, при втора степен – 6 точки и т.н.). За да се получи обаче надеждно решение и да се направи оценка на точността, е

необходимо да се използват повече от необходимия брой точки, а неизвестните трансформационни параметри се определят с помощта на МНМК. Затова минимално допустимият брой на идентичните точки в широко прилаганата пространствена конформна трансформация е четири. Полученото решение е валидно на територията обхваната от тях.



Фигура 4.6. Видове трансформации

Когато се прилага самостоятелна трансформация по височина, в задачата (фиг. 4.6 – а, б) вместо координатите на идентичните точки се включват координатите на проекциите им върху съответните референтни елипсоиди -

$$(4.30) \quad \begin{aligned} X_0 &= N \cos B \cos L, \quad Y_0 = N \cos B \sin L, \quad Z_0 = N(1 - e^2) \sin B \\ \bar{X}_0 &= \bar{N} \cos \bar{B} \cos \bar{L}, \quad \bar{Y}_0 = \bar{N} \cos \bar{B} \sin \bar{L}, \quad \bar{Z}_0 = \bar{N}(1 - \bar{e}^2) \sin \bar{B}, \end{aligned}$$

където

$$(4.31) \quad N = a(1 - e^2 \sin^2 B)^{-\frac{1}{2}}, \quad \bar{N} = \bar{a}(1 - \bar{e}^2 \sin^2 \bar{B})^{-\frac{1}{2}},$$

$a, \bar{a}$ - големи полуоси, $e, \bar{e}$ - първи ексцентрицитети на меридианните елипси. В модифицираната по този начин постановка се прилага най-често трансформационния модел на Молоденски-Бадекас (4.18)

$$(4.32) \quad \begin{bmatrix} \bar{X}_0 \\ \bar{Y}_0 \\ \bar{Z}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{X_0} \\ T_{Y_0} \\ T_{Z_0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{m_0} \\ Y_{m_0} \\ Z_{m_0} \end{bmatrix} + m_0 \mathbf{R}_{m_0} \begin{bmatrix} X_0 - X_{m_0} \\ Y_0 - Y_{m_0} \\ Z_0 - Z_{m_0} \end{bmatrix},$$

където с нулеви индекси са отбелязани величините свързани със съответните референтни елипсоиди. Трансформацията по височина се осъществява чрез полином с подходяща степен (най-често до 3-та), след което резултатите от двете трансформации се обединяват.

ГЛАВА 5

ГЛОБАЛНА ПОЗИЦИОННА СИСТЕМА GPS – ОПИСАНИЕ НА СИСТЕМАТА

Спътниковата навигационна система GPS е предназначена за определяне на координатите на статични и подвижни обекти, намиращи се на Земята, по вода или във въздуха. Създадена в САЩ, приоритетно за нуждите на отбраната, системата е достъпна за ползване и от граждански потребители: изследователски, хидрографски, търговски и риболовни кораби, пътническа и товарна авиация, автомобилен транспорт, охранителна дейност, геоложки и геодезически проучвания и др.

С помощта на GPS е възможно практически непрекъснато определяне на координатите и скоростта на движение на обектите, а също и точното време във всяка точка на земното кълбо или околоземното пространство.

Тъй като GPS работи в пасивен режим, потребителската апаратура е само приемателна. Това позволява използване на системата от практически неограничен брой клиенти, разполагащи с подходящо оборудване.

Достъпът до сигналите на спътниците от системата се осъществява по два канала – груб и прецизен, съответно чрез *C/A* (Coarse acquisition) код и *P* (Precise) код. Структурата на спътниковите сигнали позволява въвеждането на санкциониран достъп до част данните за различните категории потребители.

GPS се състои от три основни части (фиг. 5.1):

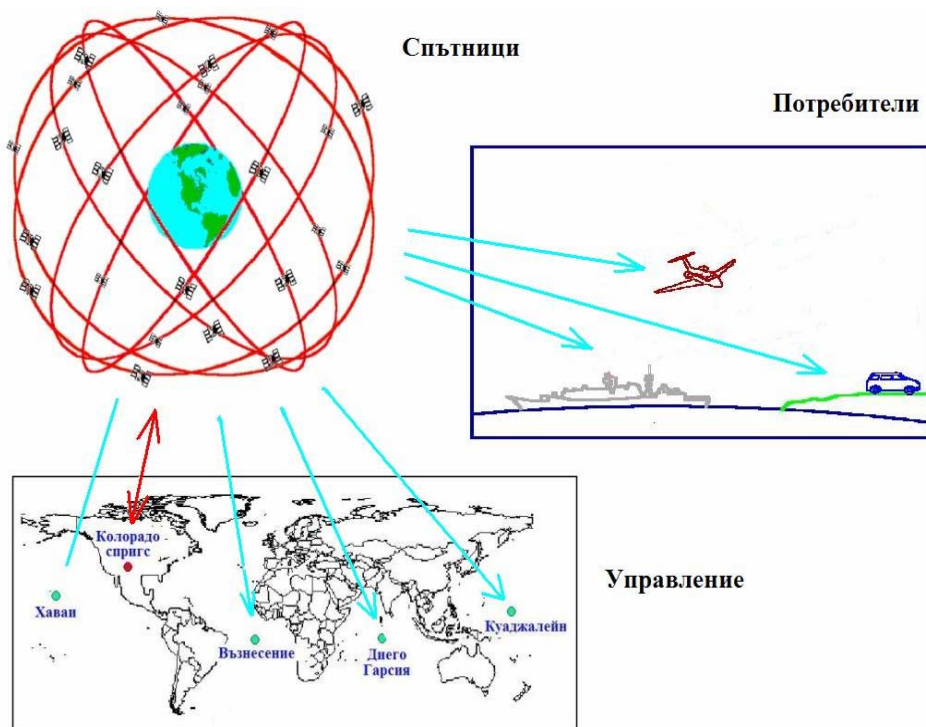
- спътници;
- наземен комплекс за управление;
- потребители.

5.1 Контролен сегмент

Контролният сегмент служи за управление на системата като цяло и се състои от главна станция, разположена във военновъздушната база “Шрийвър”, Колорадо Спригс (САЩ) и четири станции за слеждане на спътниците от системата, разположени съответно на островите Възнесение (в Атлантическия океан), Диего Гарсия (в Индийския океан) и в Тихи океан - Куаджалеин (един от Маршаловите острови) и Хавай

(фиг. 5.2). Последните денонощно приемат радиосигналите, излъчвани от спътниците от системата и ги препредават в реално време на главната станция. Част от тях са в състояние не само да приемат, но и да изпращат към спътниците по телеметричен път данни, необходими за актуализиране на информацията в бордовите им компютри.

По получените данни на главната станция се определят периодически орбиталните параметри на всеки спътник от системата, с които бордовите компютри се презареждат по зададен график. На свой ред спътниците ретранслират към Земята прогнозата за своето положение в пространството по строго определен начин под формата на навигационни съобщения, или *радиоефемериди*, в които се съдържат също и данни за техническите им параметри, състоянието на йоносферата и друга необходима за потребителите информация.



Фиг. 5.1. Основни части на GPS



Фиг. 5.2. Наземен комплекс за управление

Работата на системата се осигурява със собствена скала за време. Тя се формира от три цезиеви стандарта за честота, установени в главната станция за управление и се поддържа на борда на всеки спътник с помощта на цезиеви и рубидиеви честотни стандарти. Скалата за време GPS се отличава от Световното време UTC с цял брой секунди, който се променя периодически и се публикува (табл. 6.3).

5.2 Спътников сегмент

Номиналният брой на спътниците в системата е 24, а максималният - 32. Първата цифра се определя въз основа на минимума необходим за постигане на целта на системата (осигуряване на възможност за определяне на местоположение и навигация по всяко време и навсякъде по света), а втората – изхождайки от капацитета на канала за предаване на навигационни данни.

Спътниците са обикалят Земята в шест орбитални равнини, разположени равномерно през 30° по дължината на екватора (фиг. 5.3). Всяка орбитална равнина е с наклон 55° спрямо екваториалната и съдържа (номинално) четири спътника. Орбитите са почти кръгови, с височина над повърхността на Земята в момент на максимално сближение около 20200 km. Времето за една обиколка около Земята е 11:58 ч. Геометрията на съзвездие от спътници се избира така, че практически във всеки момент от денонощието и всяка точка от земното кълбо да се осигурява радиовидимост едновременно към най-малко четири спътника. В благоприятните случаи, в зоната на радиовидимост на потребителя може да попаднат до 10 спътника. На фиг. 5.4 са показани следите на спътниците от системата върху повърхността на Земята в течение на едно денонощие.

**Таблица 5.2. Хронология на изграждането на космическия сегмент на GPS.
Спътници “Блок I” и “Блок II/IIA”**

No	Име	Тип	Идентифи- катор	Дата на из- стрелване	Ракета	Маса [kg]
1	GPS 1-1 (Navstar 1)	Пробен	1978-020A	22.02.1978	Atlas F	450
2	GPS 1-2 (Navstar 2)	Пробен	1978-047A	13.05.1978		453
3	GPS 1-3 (Navstar 3)	Блок I	1978-093A	07.10.1978		450
4	GPS 1-4 (Navstar 4)	Блок I	1978-112A	11.12.1978		450
5	GPS 1-5 (Navstar 5)	Блок I	1980-011A	09.02.1980		433
6	GPS 1-6 (Navstar 6)	Блок I	1980-032A	26.04.1980		450
7	GPS 1-7 (Navstar 7)	Блок I	-	18.12.1981	Atlas E	163
8	GPS 1-8 (Navstar 8)	Блок I	1983-072A	14.07.1983		163
9	GPS 1-9 (Navstar 9)	Блок I	1984-059A	13.06.1984		433
10	GPS 1-10 (USA 5)	Блок I	1984-097A	08.09.1984		770
11	GPS 1-11 (USA 10)	Блок I	1985-093A	09.10.1985		163
12	GPS 2-1 (USA 35)	Блок II	1989-013A	14.02.1989	Delta 6925	1665
13	GPS 2-2 (USA 38)	Блок II	1989-044A	10.06.1989		1665
14	GPS 2-3 (USA 42)	Блок II	1989-064A	18.08.1989		1665
15	GPS 2-4 (USA 47)	Блок II	1989-085A	21.10.1989		1665
16	GPS 2-5 (USA 49)	Блок II	1989-097A	11.12.1989		1665
17	GPS 2-6 (USA 50)	Блок II	1990-008A	24.01.1990		1665
18	GPS 2-7 (USA 54)	Блок II	1990-025A	26.03.1990		1665
19	GPS 2-8 (USA 63)	Блок II	1990-068A	02.08.1990		1665
20	GPS 2-9 (USA 64)	Блок II	1990-088A	01.10.1990		1665
21	GPS 2-10 (USA 66)	Блок IIA	1990-103A	26.11.1990	Delta 7925	1665
22	GPS 2-11 (USA 71)	Блок IIA	1991-047A	04.07.1991		1665
23	GPS 2-12 (USA 79)	Блок IIA	1992-009A	23.02.1992		1665
24	GPS 2-13 (USA 80)	Блок IIA	1992-019A	10.04.1992		1665
25	GPS 2-14 (USA 83)	Блок IIA	1992-039A	07.07.1992		1165
26	GPS 2-15 (USA 84)	Блок IIA	1992-058A	09.09.1992		1165
27	GPS 2-16 (USA 85)	Блок IIA	1992-079A	22.11.1992		1665
28	GPS 2-17 (USA 87)	Блок IIA	1992-089A	18.12.1992		1665
29	GPS 2-18 (USA 88)	Блок IIA	1993-007A	03.02.1993		1665
30	GPS 2-19 (USA 90)	Блок IIA	1993-017A	30.03.1993		1665
31	GPS 2-20 (USA 91)	Блок IIA	1993-032A	13.05.1993		1665
32	GPS 2-21 (USA 92)	Блок IIA	1993-042A	26.06.1993		1665
33	GPS 2-22 (USA 94)	Блок IIA	1993-054A	30.08.1993		1665
34	GPS 2-23 (USA 96)	Блок IIA	1993-068A	26.10.1993		1665
35	GPS 2-24 (USA 100)	Блок IIA	1994-016A	10.03.1994	Delta 2	1665
GPS официално обявена за действаща				17.07.1995		
36	GPS 2-25 (USA 117)	Блок IIA	1996-019A	28.03.1996		1665
37	GPS 2-26 (USA 126)	Блок IIA	1996-041A	16.07.1996		1665
38	GPS 2-27 (USA 128)	Блок IIA	1996-056A	12.09.1996		1665

На борда на всеки спътник се генерира *основната честота* на системата с номинална стойност $f_0 = 10.23 \text{ MHz}$ и стабилност 1.10^{-13} за едно денонощие. Всъщност, посочената стойност на f_0 умишлено е понижена с 4.45×10^{-10} (около 0.005 Hz) с оглед компенсирането на ефекта от специалната теория на относителността.

За постигане на тези високи изисквания спътниците “Блок II/IIA” са оборудвани с по два цезиеви и два рубидиеви честотни генератори. В спътниците “Блок IIR/IIF” е предвидена възможност за инсталиране на водороден мазер.

Друг важен елемент от бордовото снаряжение на спътниците са корекционните двигатели, чрез които по команда от Земята може да се въвеждат малки изменения на орбитите, с цел оптимизиране на геометрията на съзвездieto.

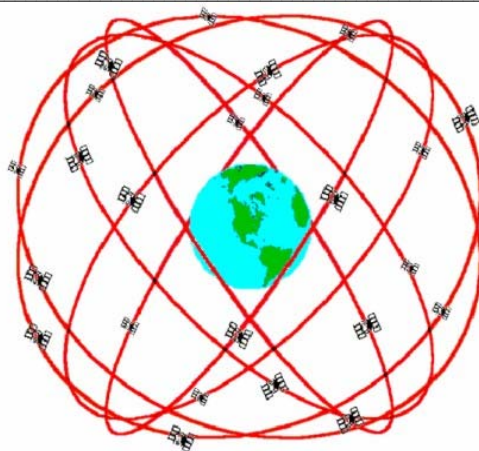
Надеждността на бордовите системи е такава, че да се осигури автономност на действието на системата, без намесата на наземния комплекс за управление до един месец, а за новите поколения спътници – за значително по-дълъг срок.

Досега са създадени няколко типа спътници, известни като “Блок I”, “Блок II” и бъдещите “GPS III”, всички носещи имената на съответния етап от изграждането ѝ.

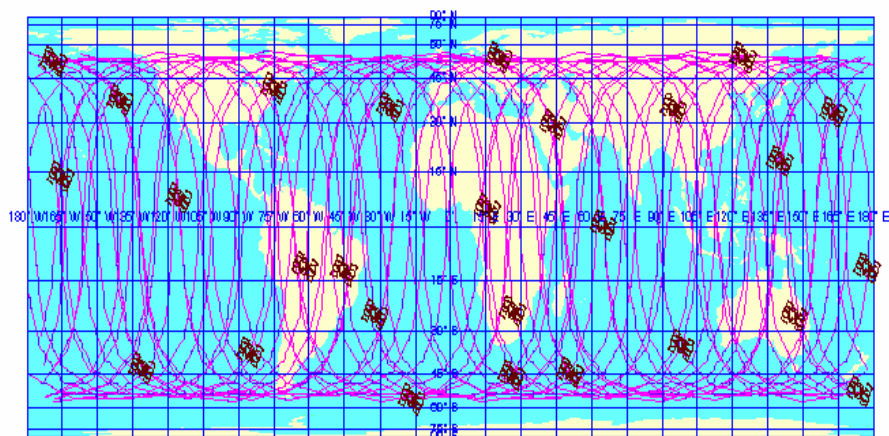
Прототипните спътниците “Блок I” са с тегло 525 kg и се извеждат на орбита с наклон 63° . В периода 1978 - 1985 г., от военновъздушната база “Ванденбърг” в Калифорния, с ракети “Атлас” са изстреляни 11 такива спътника, някои от тях използвани много по-дълго от проектния им четири и половина годишен експлоатационен срок.

Спътниците “Блок II” (фиг. 5.5) са с тегло 845 kg и период на експлоатация 7 години. Първият от тях е изстрелян през 1989 г с ракета “Делта II” от космическия център “Кенеди”, военновъздушна база “Кейп Канаверал” във Флорида (фиг. 5.6). Тези спътници са предназначени за осигуряване на пълното съзвездие на GPS и подмяна на спътниците от “Блок I”.

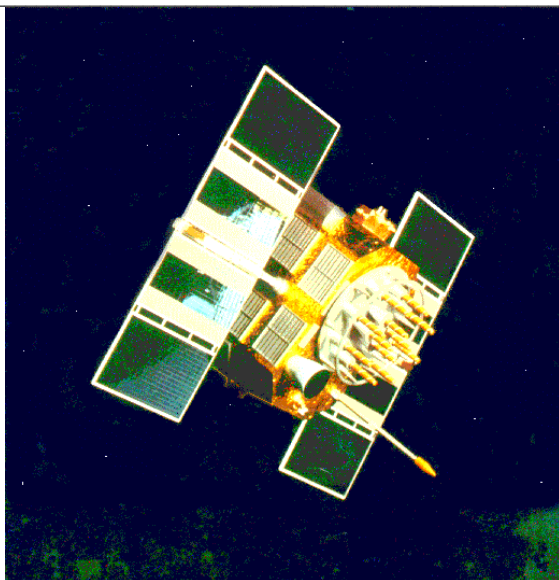
С усъвършенстваните им варианти “Блок IIA”, “Блок IIR” и “Блок IIF”, възможностите на системата получават развитие до 2008 г., а заключителният стадий от развитието (2020 г.) и действието (2030 г.) ѝ ще се реализира с помощта на концептуалния все още “GPS III”.



Фиг. 5.3. GPS спътници



Фиг. 5.4. Следи на GPS спътниците (0:00-24:00 ч. 30.09.1998, 27 спътника)



Фиг. 5.5. GPS спътник “Блок II”



Фиг. 5.6. Изстрелване на GPS спътник “Блок II” с ракета “Делта II”

Спътниците “Блок II/IIA” са оборудвани със средства за междуспътникова свръзка, а някои от тях – също и с отражатели, които дават възможност да бъдат наблюдавани със спътникови лазерни далекомири.

Първият от общо 19 спътника “Блок IIR” е изстрелян на 23.07.1997 г., тежи над 2 тона и е с проектен живот над 10 години. В сигналите излъчвани от спътниците от този тип, изстреляни след 2005 г. (“Блок IIR-M”) се предвижда да се съдържат някои допълнителни компоненти.

По-нататъшно усъвършенстване ще се постигне след 2007 г., чрез спътниците “Блок IIF” – проектен живот 15 г., инерциална навигационна система, излъчване на сигнали на трета честота и пр. До 2012 г. се предвижда извеждането в орбита на 33 спътника от този тип.

Понастоящем третото поколение спътници “GPS III” е в проучвателен период. Някои по-важни характеристики на GPS спътниците са обобщени в табл.5.1.

Таблица 5.1. Спътници “Блок I” и “Блок II”

Тип спътници	Номера	Производител	Режими		
			Нормален	Удължен	Автономен
Блок I	1-13	Rockwell International	+	-	-
Блок II	13-21		+	+	-
Блок IIA	22-40		+	+	-
Блок IIR	41-66	Martin Marietta	+	+	+
Блок IIF		Boeing			

В *нормален* режим на работа данните за орбитата, спътниковите скали за време и др. се обновяват ежедневно от управлението на системата. За да се избегне прекомерната зависимост от редовната свръзка с нея, в спътниците “Блок II” са предвидени разширени възможности за прогнозиране на тези данни за срок до няколко денонощия – т.нар. *удължен* режим.

В *автономния* режим Autonav орбитните данни и корекциите към спътниковите скали за време, въведени от управлението на системата се обновяват автономно, чрез измервания и обмен на данни между спътниците, които се обработват от бордовите компютри. С това се постига независимост от управлението за сравнително дълги периоди от време.

5.3 Потребители

Потребителите на системата са различни видове:

- в зависимост от категорията им - военни и граждански;
- според изискваната точност - високоточни, средноточни и с ниска точност;
- според мобилността - подвижни и статични;
- според изискванията към актуалността на резултатите - във и извън реално време;
- от конструктивна гледна точка: самостоятелна GPS апаратура или модули за вграждане в други потребителски системи, т.нар. OEM модули и пр.

Например, изискванията на военните потребители са за осигуряване на метрова точност в реално време, на мобилни и статични обекти, както в самостоятелен, така и в OEM варианти, при това с повишени изисквания към устойчивостта на външни въздействия. В авиацията намират приложение различни типове апаратура, самостоятелна и OEM, с точност продиктувана от фазата на полета – попътна навигация, подход, кацане, и винаги осигуряваща висока надеждност на резултатите. За хидрография и други видове проучвания се набляга върху точността, както и на възможността за събиране на атрибутни данни за изследваните обекти. За туризъм, риболов и други видове развлечения от първостепенно значение е ниската цена.



Фиг. 5.7. GPS приемници за единични кодови измервания

Оттук следва голямото многообразие на потребителска апаратура, предлагана на пазара от различни производители, която въз

основа на измерваните величини и постиганата точност може да се класифицира в следните групи:

- GPS приемници за единични кодови измервания;
- диференциални (DGPS) приемници;
- геодезически фазови GPS приемници.

Във функционалната схема на GPS приемниците от всички групи са включени следните основни елементи (фиг. 5.9):

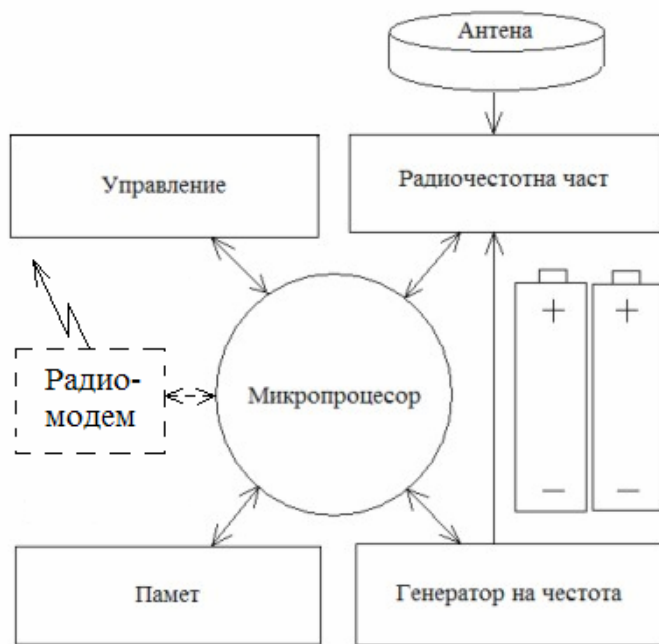
- антена за приемане на спътникови сигнали, с предусилвател;
- радиочестотна част, където се приетите сигнали се преобразуват от аналогови в цифрови и се обработват;
- генератор на честота. Осигурява работата на радиочестотната част с необходимите опорни сигнали;
- микропроцесор, който управлява протичането на всички процеси в приемателната апаратура;
- памет, в която се натрупват резултатите от работата на приемника;
- захранване.



Фиг. 5.8. Геодезически фазови GPS приемници

Освен това, апаратурата предназначена за работа в реално време е съоръжена с предавателен и/или приемателен радиомодем, който позволява обмен с други източници или потребители на GPS данни. Наред с разгледаната по-горе класификация са възможни и други, основаващи се на утилитарните качества на апаратурата. Например:

- GPS приемници с възможности за събиране на атрибутни данни за местни обекти, визуализация и актуализиране на цифрови карти;
- GPS приемници интегрирани с други сензори за пространствени данни, с приложение в навигацията и различни видове проучвателна дейност;
- GPS датчици в системи за комуникация, управление на транспорта, охранително-издирвателна дейност и пр.;
- непредсказуемо широк кръг от любителски приложения.



Фиг. 5.9. Опростена схема на GPS приемник

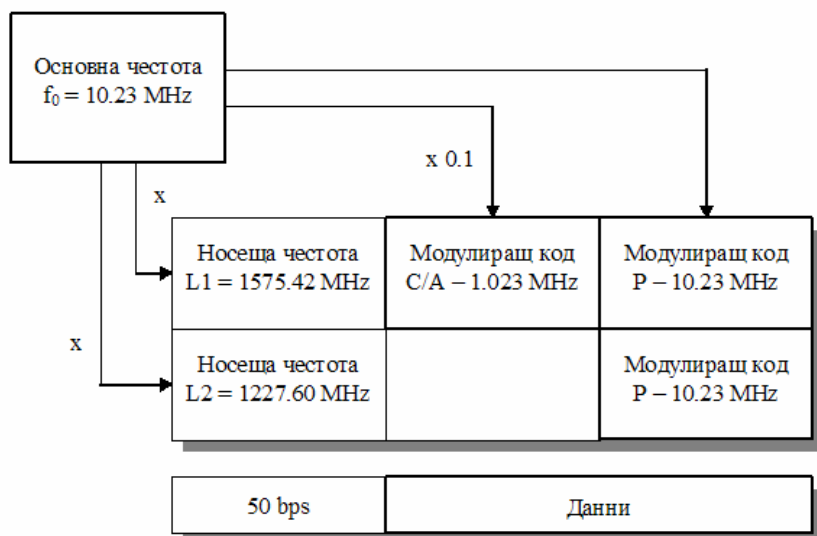
Фазовите GPS приемници са предназначени за приложения, където се изисква постигането на висока точност. Необходимо е

измерванията да се извършват едновременно на две точки, които определят един *базов вектор*. Освен кодовете, GPS приемниците измерват фазата на едната или двете носещи честоти, което налага повишени изисквания към радиочестотната част на апаратурата и приемателните антени.

ГЛАВА 6

СТРУКТУРА НА GPS СИГНАЛА

Данните които се пренасят от GPS спътниците към потребителите не са много, особено ако се прави сравнение със спътниковите комуникации или спътниковата телевизия, където плътността им е несравнимо по-голяма. Независимо от това, GPS сигналите имат сложна структура. Това се дължи на спецификата на задачите, които се решават с помощта на системата.



Фиг. 6.1. Честотни преобразувания и модуляции в GPS сигналите

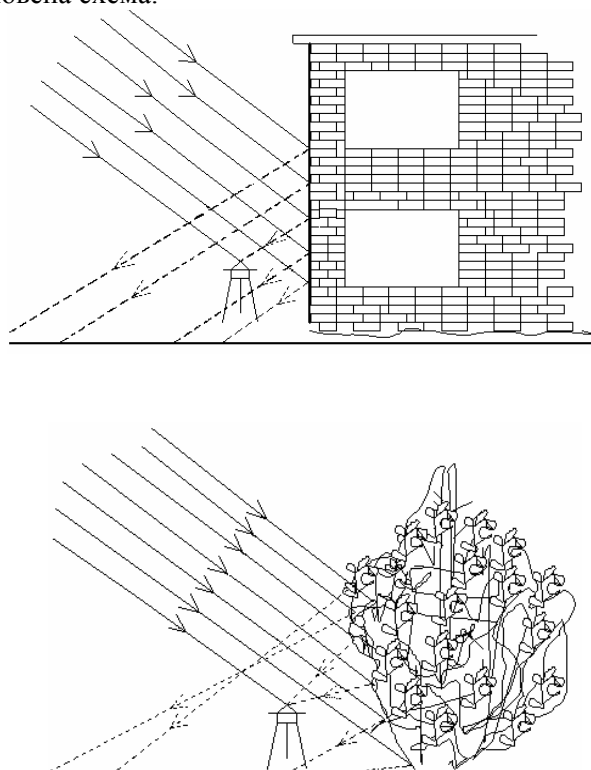
Носещи честоти

Всички спътници от системата излъчват по две носещи честоти с дясна кръгова поляризация – $L1 = 1575.42 \text{ MHz}$ и $L2 = 1227.60 \text{ MHz}$. Получени чрез 154 и 120-кратно умножаване на основната честота f_0 , те имат еквивалентни дължини на вълните приблизително 19 и 24 cm (фиг. 6.1). Излъчват се в честотни ленти с ширина 20.46 MHz, центрирани съответно около $L1$ и $L2$. На Земята се приемат с леко променени заради

Доплеровия ефект стойности.

Начинът на разпространение на носещите честоти е сходен с този на светлината, но те могат да преминават през облаци, мъгли други атмосферни образувания. Подобно на светлината, прегради за L1 и L2 са релефът и масивни местни предмети, а препятствия като корони на дървета, храсти и други видове растителност, особено ако влажността им е висока вследствие на дъжд, роса и пр. са непреодолими за тях. Носещите честоти могат да бъдат отразявани от различни обекти – както със значителни гладки повърхности – водни площи, покриви, стени и пр., така и с неправилни форми, водещи до дифузно отражение (фиг. 6.2).

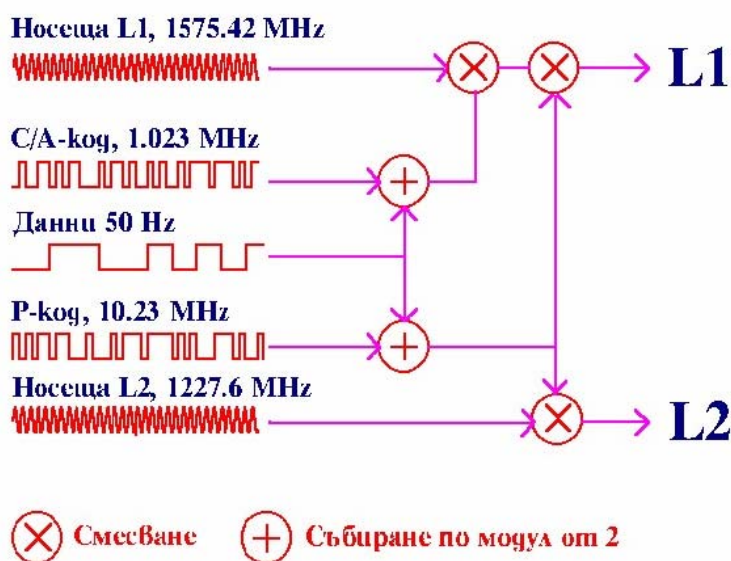
Носещите честоти дават възможност за пренасяне на данни на големи разстояния, без самите те да съдържат каквато и да е информация. За да бъдат използвани като медия те се модулират по строго установена схема.



Фиг. 6.2. Отразяване на сигнали от различни повърхности

Модулиращите данни в системата са два типа – кодове и

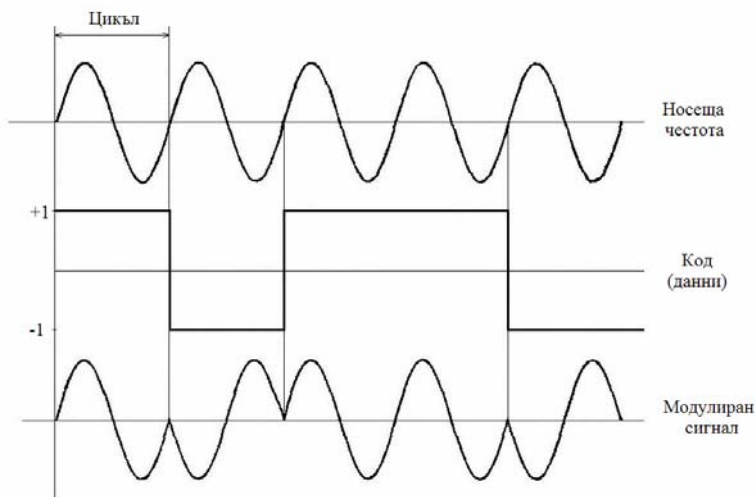
навигационни данни. Първата честота е модулирана с двата GPS кода – P и C/A, а втората – само с P код. По този начин L1 може да се приема от потребители, на които е известен един от тези два кода, докато за приемане на L2 се изисква познаването на P код. Навигационните данни са модулирани върху двете честоти (фиг. 6.3).



Фиг. 6.3. Схема на модулирането на носещите честоти

Тъй като псевдослучайните кодове и навигационните съобщения са числени данни (последователности от двоични нули и единици), носещите честоти се модулират двоично по фаза (фиг. 6.4).

Сигналите излъчени в даден момент от спътника се регистрират на Земята с известно закъснение, дължащо се на крайната скорост на разпространение на електромагнитните вълни. По разликите между закъсненията на L1 и L2 получените резултати могат да се освободят от ефекта на йоносферната рефракция, който е източник на най-големите грешки на GPS измерванията. По тази причина носещите честоти са две.



Фиг. 6.4. Двоична фазова модулация

Таблица 6.1. Прагови стойности на силата на приеманите сигнали

Честоти	Сила на приеманите сигнали [dBW]	
	P(Y) код	C/A код
L1	-163.0	-160.0
L2	-166.0	

Кодове

Носещите честоти L1 и L2 са модулирани с два кода – C/A и P, с честоти съответно 1.023 MHz и 10.23 MHz. Всеки код представлява последователност от двоични нули и единици, наричани още *чипове* (фиг. 6.5). В C/A код тази последователност е с дължина 1023 бита (чипа), предаване се за 1 ms и се повтаря непрекъснато. Двоичната последователност на P код е значително по-дълга – около 2.3547×10^{14} бита, за излъчването на които са необходими 266.4 денонощия.

10111100011001101001110001110001011110001100110100111000111 000



Фиг. 6.5. Двоичен псевдослучаен код

Привидно двоичните нули и единици в двата кода се редуват незакономерно, т.е. случайно, а всъщност последователността им се задава алгоритмично. Затова двата кода се наричат *псевдослучайни*. Тъй като потребителите, за които кодовете са неизвестни не могат да отличат спътниковите сигнали от шум, последните се наричат *псевдослучаен шум* или *шумоподобни* сигнали.

В GPS всички спътници излъчват едни и същи носещи честоти, поради което идентифицирането им се осъществява по техните кодове. Затова е важно те – макар и наподобяващи случайни последователности, да бъдат строго индивидуални, т.е. в максимална степен независими (некорелирани) помежду си. По тази причина C/A код за всеки спътник се генерира по схемата на Голд, а за Голдовите кодове е известно че са почти ортогонални. За P код подобен ефект се постига чрез разделяне на цялата двоична последователност на 37 сегмента с продължителност по една седмица, всяка от които се присвоява на отделен спътник, въз основа на номера му.

За да може да приема излъчените сигнали, потребителската апаратура трябва да генерира същите кодове (т.нар. *реплика*), които се използват на спътниците. За въвеждане на санкциониран достъп до P кода, последният се преобразува допълнително с помощта на секретен код (W код). В резултат на това, вместо известния P код в ефира се разпространява т.нар. Y код, достъп до който имат ограничен кръг военни потребители.

Един чип от C/A код е с продължителност 1 μ s, което е равносилно на 300 m, изхождайки от скоростта за разпространение на електромагнитните вълни. Тъй като е с десетократно по-висока честота от C/A код, продължителността на един чип от P код е 0.1 μ s, или 30 m в линейна мярка.

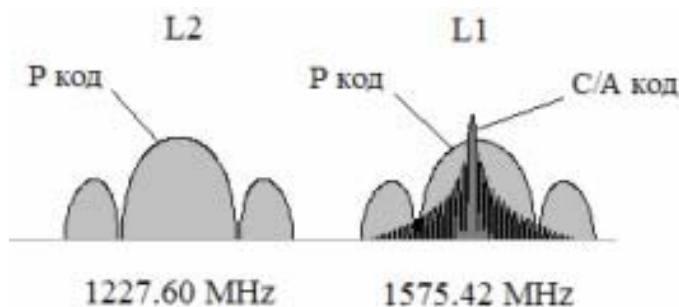
Таблица 6.2. Основни характеристики на кодовете

Код	C/A	P
Честота	1.023 MHz	10.23 MHz
Период на повторение	1 μ s	266.4 денонощия
Дължина на един чип	1 μ s (300 m)	0.1 μ s (30 m)
Дължина на кода	1023 b	2.3547×10^{14} b

Не случайно периодите на повторение на двата кода се различават съществено. Честото повторение на C/A код (1000 пъти в секунда) и сравнително по-голямата интензивност на L1 (табл. 6.2)

способстват за по-лесното откриване на спътниковите сигнали. Изхождайки от известното в радиоизмерванията правило за постигане на точност равна на 1% от дължината на вълната на сигнала, то в случая на C/A код следва да се очаква точност около 3 m, а за P код – 30 cm.

В крайна сметка, разположението на спътниковите сигнали в честотния спектър е представено на фиг. 6.6. Разположението на C/A код в значително по-тясна от P код честотна лента, дължащо се на десетократната разлика на честотите им, позволява приемането на сигнали на честота L1 с по-голяма интензивност, което подпомага приемателната апаратура в периода на първоначално търсене и прихващане.



Фиг. 6.6. Структура на спътниковите сигнали

Навигационно съобщение

а) Структура и съдържание

Освен с шумоподобни кодове, носещите честоти L1 и L2 са модулирани с двоичен сигнал със скорост 50 bps, в който са кодирани различни данни – прогнозиран орбити и корекции към скалите за време на спътниците, прогнозиран модел на йоносферата, както и данни необходими за първоначално откриване на GPS спътниците (т.нар. *алманах*) и тяхното техническо състояние (фиг. 6.7).

Заради от ниската скорост на предаване, навигационното съобщение е организирано по специфичен начин. Всички данни са разположени в 30-битови *думи*. Петдесет думи (1500 b) образуват един *кадър*. В зависимост от вида им, данните са разположени в една от петте *части на кадъра*, всяка от които с дължина 300 бита (10 думи). Данните в първите три части са специфични за всеки кадър, докато тези в четвъртата и петата част са отделни страници от по-големи

информационни блокове. Всеки от последните се състои от по 25 такива страници, разположени съответно в четвъртата и петата части на кадъра. Затова съвкупността от 25 последователни кадъра е най-високата структурна единица на спътниковото съобщение – *главният кадър*.

При скорост 50 bps един бит се предава за 0.02 s, една дума – за 0.6 s, една част от кадър – за 6 s, един кадър – за 30 s, а един главен кадър – за 12:30 min.

Данните които се съдържат в първите три части от всеки кадър са индивидуални за спътника предаващ навигационното съобщение. В първата част се съдържат корекция към скалата за време под формата на коефициенти на полином от втора степен, данни за актуалността на спътниковото съобщение, различни флагове и индикатори. Във втората и третата части са прогнозираните орбитни данни, известни като *радиофемерида*. Те позволяват определянето на положението на спътника с точност около 20 m във всеки момент от интервала време в който са валидни.

В 25-те страници на петата част на кадъра се съдържа системният алманах на спътници с номера 1 – 24, както и флагове за означаване на техническата им изправност. Аналогично, в страниците на четвъртата част на кадъра са алманахът и флаговете на спътници с номера 25 – 32. Останалото място в четвъртата част е заето от данни за йоносферата, UTC, различни флагове и индикатори, както данни за военните потребители.

Данните от четвърта и пета части на навигационното съобщение се предават от всички спътници, благодарение на което информация за състоянието на цялата система може да се получи от който и да е от тях. Необходимо е обаче да се приеме един главен кадър, което означава минимална продължителност на сеанса 12:30 min. Тъй като данните в алманаха са с ниска точност, валидността им е в рамките на един месец.

Съдържанието на навигационните съобщения се обновява автоматично всеки час.

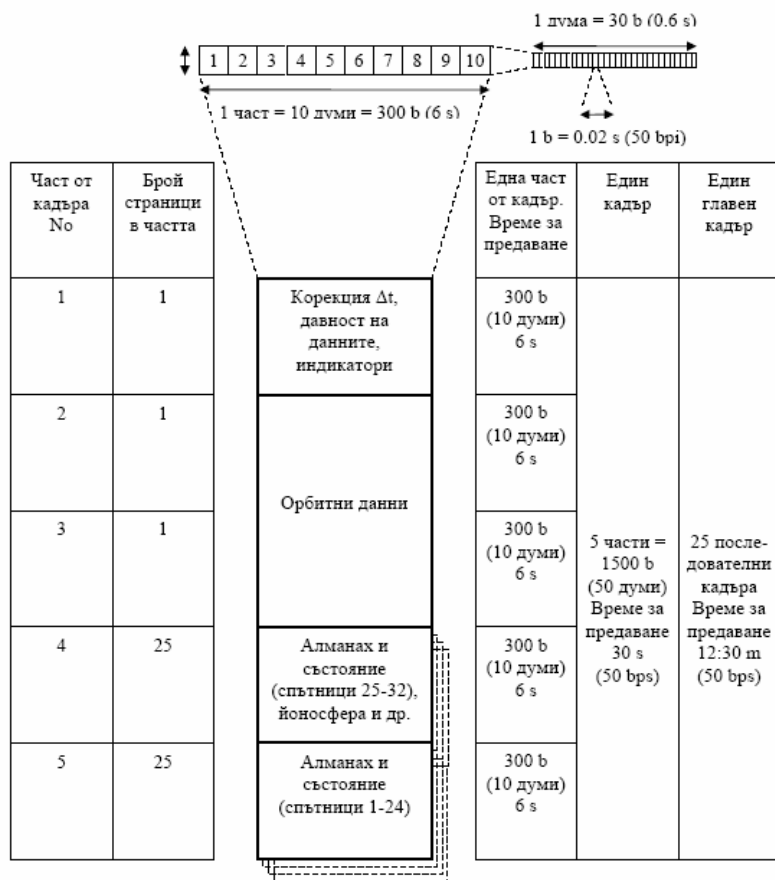
В обобщение, структурата на GPS сигналите е сложна, поради следните съображения:

- пасивният характер на системата, т.е. еднопосочното протичане на данни от спътниците към потребителите, което позволява броят на последните да бъде неограничен;
- възможността за работа в реално време, изискваща да се приемат едновременно сигнали от различни спътници, които да се идентифицират, да позволяват определянето на топоцентрични разстояния по закъснението им и да съдържат орбитални данни;
- постигането на висока точност, във връзка с което се генерира

високочестотният P-код и се излъчват две носещи честоти (в микровълновия диапазон), което позволява определянето на йоносферното закъснение;

- устойчивостта срещу смущения, постигана чрез разлятия честотен спектър на сигналите;

- комбинираното гражданско-военно използване, което налага използването на два различни кода.



Фиг. 6.7. Структура на спътниковото съобщение

б) Измерване на време в GPS

От особено значение за успешното функциониране на GPS е синхронизацията по време между компонентите й – спътници и система за управление. Изхождайки от динамиката на тези компоненти

(спътниците се движат спрямо Земята със скорост около 3.9 km/s), времето следва да се съхранява и регистрира с висока точност.

Системното GPS време (GPST) се измерва от начален момент 00:00:00 ч на 06 януари 1980 г., когато е прието то да съвпада със Световното координирано време UTC. Вместо в познатите единици, системното време се измерва в седмици и секунди, при което за начало на всяка седмица се приема 00:00:00 ч в събота срещу неделя. Така една GPS седмица съдържа 604800 GPS секунди.

За разлика от UTC, GPST е атомно време, поради което то видимо “избързва”. За да не се допуска разминаване между двете скали, към последната периодически се определят корекции в цели секунди, с което съответствието им се поддържа в рамките на 0.5 s (табл. 6.3).

Таблица 6.3. Разлика между системното GPS време и UTC

Дата на въвеждане	Разлики GPST – UTC [s]	Дата на въвеждане	Разлики GPST – UTC [s]
06.01.1980	0	01.01.1991	7
01.07.1981	1	01.07.1992	8
01.07.1982	2	01.07.1993	9
01.07.1983	3	01.07.1994	10
01.07.1985	4	01.01.1996	11
01.01.1988	5	01.07.1997	12
01.01.1990	6	01.01.1999	13

Системното време се разпространява чрез спътниковите сигнали. Затова е важно скалите за време на борда на всеки спътник да са строго синхронизирани с него. Това се постига чрез анализиране на спътниковите сигнали, приемани от следящите станции. От една страна, разликите между спътниковите скали и системното време се поддържат в рамките на 1 ms, а от друга страна – към спътниковите скали се изчисляват корекции по формулата

$$(6.1) \quad \delta = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2,$$

където t – текущ момент в спътниковата скала (секунди в GPS седмицата), t_0 – изходен момент, за който са определени коефициентите a_0 [μs], a_1 [μs/d], a_2 [μs/d²], имащи значенето съответно на разлика, ход и вариация. Прогнозираните стойности на последните се разпространяват чрез спътниковото съобщение, кодирани от първата част на всеки кадър, с което се осигурява 20 ns точност на привързването на спътниковата

скала към GPST, равностойна на 6 m.

Когато системата за избиращен достъп S/A е активирана, точността на коефициентите a_0 , a_1 и a_2 се понижава изкуствено до около 100 ns, което съответства на грешка от порядъка на няколко десетки метра.

в) Моделиране на закъснението на сигналите в йоносферата

Ефектът на йоносферата може да се определи експериментално чрез съпоставка на измервания на различни честоти. GPS сигналите позволяват това да се извърши по два начина:

- пряко, чрез сравнение на последователностите от чипове на P код, модулирани върху L1 и L2;
- по изчислителен път, чрез специална обработка на фазовите измервания на двете носещи честоти.

Тъй като кодовите и фазовите измервания са свързани съответно с груповата и фазовата скорости за разпространение на електромагнитните вълни, то ефектът на йоносферната рефракция се състои в закъснение на псевдослучайните кодови последователности и съответно в избързване на фазата на носещата честота.

Ако потребителят разполага с едночестотна (L1) апаратура, йоносферната корекция δt_z може да се определи единствено въз основа на подходящ прогностичен модел. Най-често се използва моделът на Klobuchar

$$(6.2) \quad \delta t_z = A_0 + A \cos\left(\frac{2\pi(t - t_0)}{P}\right),$$

където δt_z – стойност на корекцията в зенит, $A_0 = 5$ vs – изходна стойност на моделираната величина, A – амплитуда на йоносферното закъснение [s], t – текущ момент в местно време, $t_0 = 14:00$ ч – момент на максимални стойности на корекцията (в местно време), P – период на функцията на йоносферното закъснение [s]. Величините A и P се изчисляват по данните за йоносферния модел α_i , β_i , $i=1-4$, в четвърта част от кадъра на спътниковото съобщение -

$$(6.3) \quad A = \sum_{i=1}^4 \alpha_i \phi_0^{i-1}, \quad P = \sum_{i=1}^4 \beta_i \phi_0^{i-1},$$

където ϕ_0 – геомагнитна ширина на т.нар. йоносферна точка – точката, в която сигналите преминават средната височина h_m на йоносферата (обикновено $h_m = 300 - 400$ km) над повърхността на Земята. Стойностите на α_i , β_i в спътниковото съобщение се актуализират всеки час.

Стойността на корекцията в направлението на спътниковия

сигнал се определя по формулите

$$(6.4) \quad \delta t = \frac{1}{\cos z'} \delta t_z, \quad z' = \arcsin \left(\frac{R}{R + h_m} \sin z \right)$$

където R – среден радиус на Земята, z – зенитен ъгъл на спътника в момента t .

вертикален ъгъл

Обслужване на потребителите

Начинът на обслужване изцяло зависи от типа на потребителите – необходимата точност и оперативност на работата, възможността да ползват права за достъп до санкционирания ресурс на системата. По правило, колкото по-малко данни е необходимо да се декодират от спътниковите сигнали, толкова потребителят е по независим от начина на обслужване.

В най-малка степен се влияят високоточните геодезически приложения, осъществявани чрез фазови измервания на носещите честоти. Ако резултатите от тях не са необходими в реално време, то освен от кодовете, те са независими и от радиоэфемеридите предавани чрез спътниковото съобщение. Вместо тях може да се използват прецизни орбитни данни, предоставяни безплатно чрез Интернет от научни институти и други организации с нестопанска дейност. Потребителите на данни в реално време или близко до него може да се възползват от услугите на наземните мрежи от активни станции, изграждани в много райони на света.

Диференциалните определения са в значителна степен независими от системи за защита като S/A, защото привнесените изкуствено отклонения се компенсират чрез диференциалните корекции към измерените псевдоразстояния. За целта се предоставят разнообразни услуги от държавни и търговски организации. Диференциални корекции се разпространяват по радиото, чрез спътници, по Интернет и пр.

Изцяло зависими от системата на обслужване са единичните кодови определения. Всички ограничителни санкции са насочени към потребителите на координати в реално време с точност в метровия диапазон, чиито контингент се подразделя на две – санкционирани и несанкционирани клиенти на системата. Първите са обект на *стандартното*, а вторите – на *прецизното* потребителско обслужване, известни като *SPS* и *PPS*.

a) SPS и PPS

Обслужването SPS се предлага на всички категории потребители, по всяко време и по целия свят, без заплащане. Осъществява се чрез C/A

код и навигационните данни на честота L1. В зависимост от това дали е активирана системата за избиращен достъп S/A, точността на определяне на местоположение в реално време в 95% от случаите е в рамките на 100 m и 150 m, съответно в хоризонтално отношение и по височина, а точността на пренасяне на време – до 350 ns спрямо UTC.

Кръгът на упълномощените да ползват PPS е силно ограничен и обхваща приоритетно органите за отбрана и сигурност на САЩ. Въз основа на договаряне за всеки конкретен случай, достъп до PPS може да се предоставя за ограничен период от време и на други потребители, с оглед интересите на американското правителство. PPS потребителите ползват апаратура с активирана възможност за декодиране на секретния W код, чрез който P код се прави недостъпен в масовия случай. Така става възможно определянето на псевдоразстояния със значително по-висока точност, благодарение на:

- по-високата честота на P код,
- едновременните измервания на двата канала – L1 и L2, което позволява компенсирането на закъснението на спътниковите сигнали заради йоносферната рефракция.

Освен това, за PPS потребителите не се отнасят ограниченията на системата за избиращен достъп S/A.

В табл. 6 са обобщени данни за точността характерна за двете равнища на потребителско обслужване. Всички данни са представени чрез съответните средни квадратични грешки, т.е. с доверителна вероятност 0.68. Данните за SPS без S/A са емпирични, а всички останали са гарантирани прагови стойности.

Таблица 6.4. Точност на единичните SPS и PPS определения в реално време

Потребителско обслужване		Точност на пространственото положение [m]	Точност по време [ns]
SPS	без S/A	15 – 40	
	със S/A	100	170
PPS		18	100

б) Системи за защита

В настоящия етап на развитието на GPS защитата на координатно-временните ресурси се осъществява по два начина – чрез системите за избиращен достъп S/A и антиспуфинг A-S.

Системата за избиращелен достъп S/A е включена с въвеждането в действие на първия спътник “Блок II”, на 25.03.1990 г. Целта ѝ е да ограничи изкуствено точността на единичните C/A кодови определения, върху които първоначално не е било предвидено да се налагат някакви санкции. Тъй като точността практически постигната през 80-те години със спътниците “Блок I” значително превишава проектната, се е наложило от съображения за сигурност допълнително да се въведат симулирани грешки в данните за орбитите (т.нар. *ε-процес*) и скалите за време (т.нар. *δ-процес*), предавани чрез спътниковите съобщения. Ефективните амплитуди и периоди на действие на двата разстройващи точността процеса са обобщени в табл. 6.5.

Таблица 6.5. Система за избиращелен достъп S/A

Компонент на S/A	Обект на въздействие	Амплитуда	Период
ε-процес	Скала за време	~ 50 m	Няколко минути
δ-процес	Орбитни данни	50 – 150 m	Няколко часа

С изключителен негативен ефект, доказан през целия единайсетгодишен период на действието ѝ, системата S/A беше временно изключена на 02.05.2000 г. по решение на американското правителство. В случай на нужда, системата за избиращелен достъп може да се активира отново.

Първоначално се смятало Р код да бъде разрешен само за военни и други санкционирани потребители. Постепенно се е наложило друго мнение – самият Р код да бъде общо достъпен, но начинът по който се предава от спътниците да позволява два варианта на ползване по команда от системата за управление – ограничен и достъпен. За ограничаване на достъпа, Р код се модулира допълнително със секретния W код с честота 500 KHz, с което се постига двойка ефект:

- върху ползването на Р код се налага санкция;
- ограничават се възможностите за злонамерени имитации на сигналите, откъдето всъщност произлиза името на въведената по този начин система за защита – “*антиспуфинг*”.

По отношение на високоточните геодезически приложения, осъществявани чрез относителни фазови измервания на носещите честоти системата A-S практически не влияе, особено на новото поколение приемателна апаратура, произведено след 1995 г. Това се дължи на усъвършенстваните технологии за обработване на

спътниковите сигнали, които позволяват закъснението на P код на двете носещи честоти да се определи чрез сравнение на аналогични последователности от чипове, без алгоритъмът за генерирането им да бъде известен.

В по-нататъшното усъвършенстване на GPS са предвидени по-гъвкави средства за защита, като *системата за избираща отказ SD*, чрез която достъпът на несанкционирани потребители ще може да се регулира не на глобален принцип, а по отделни географски райони.

ГЛАВА 7

ИЗМЕРВАНИ ВЕЛИЧИНИ ПРИ GPS

При геодезическото приложение на GPS се използват основно кодови и фазови измервания. С помощта на тях се получават разстоянията между приемниците и наблюдаваните от тях спътници. Тъй като тези разстояния съдържат значителни по големина грешки, то е прието те да се наричат псевдоразстояния. При фазовите измервания е невъзможно да се изчислят псевдоразстоянията в реално време и поради тази причина те се свързват основно с кодовите измервания. По-долу накратко ще бъдат разгледани двата основни вида измервания.

7.1 Кодови измервания

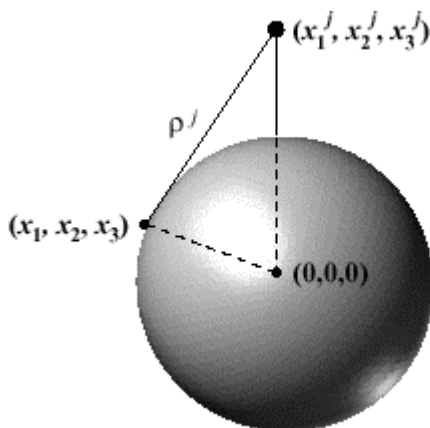
Разстоянията до спътниците ρ се определят по формулата

$$(7.1) \quad \rho_A^S = c\tau,$$

където c – скорост на разпространение на електромагнитните вълни, τ – времето за пристигане на сигнала от спътника до приемника, а с горния и долния индекс на ρ са означени съответно спътникът и точката от която се извършват измерванията. Тъй като потребителите в GPS са пасивни, разстоянията до спътниците се измерват *еднопосочно*, при което

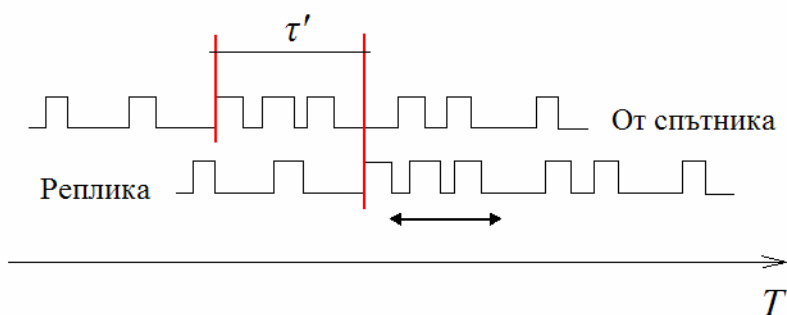
$$(7.2) \quad \tau' = T_A(b) - t^S(a),$$

където a е моментът на излъчване от спътника, а b – моментът на постъпване в приемателната апаратура на *марка* от сигнала, регистрирани съответно в спътникова (t) и потребителската (T) скали за време.



Фиг. 7.1. Геометричното разстояние ρ между спътник и приемник

Тъй като единствените подходящи марки в спътниковите сигнали са модулиращите кодове, то за измерване на разстоянията ρ , приемателната апаратура трябва да е в състояние да ги разпознава. За тази цел GPS приемниците също генерират C/A и/или P код, с който се *репликират* приетите спътникови сигнали. Това се извършва в приемателните канали на потребителската апаратура, където чрез транслиране по време на репликата се търси съвпадение (максимална корелация) между кодовете от приетите сигнали и едноименните им генерирани на място (фиг. 7.2).



Фиг. 7.2. Еднопосочно определяне на закъснение в корелационен приемателен канал

Всъщност τ' е измереното *псевдоразстояние* $\tilde{\rho}$, изразено във време, което се преобразува в метрична мярка като се умножи по скоростта на разпространение на електромагнитните вълни

$$(7.3) \quad \tilde{\rho}_A^S = c\tau',$$

или още

$$(7.4) \quad \tilde{\rho}_A^S = c[T_A(b) - t^S(a)] = c(\tau_A^S + \delta t_A) = \rho_A^S + \delta\rho_A,$$

където ρ – разстояние между спътника S и точката A , δt – грешка на скалата за време на приемника; $\delta\rho$ грешка в разстоянията заради δt . Грешката в часовника на спътника е известна и може да се изчисли от коефициенти, които се предават чрез спътниковото съобщение.

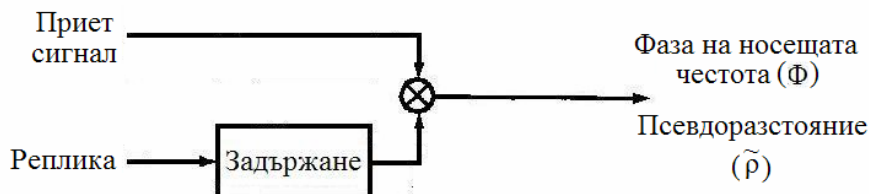
Така на практика шумоподобните кодове C/A и P играят ролята на линейна мярка (аршин) за определяне на разстоянията от приемателната апаратура до спътниците, откъдето идва и името *кодови измервания*.

С помощта на кодови GPS приемници се изчисляват координатите на точката на стоене чрез измервания на C/A или P код, които водят до определяне на псевдоразстоянията от спътниковите предавателни антени до потребителската апаратура. Измерванията на C/A код се извършват с точност от порядъка на 3 m, а тези на P код – са с десетократно по-малка грешка благодарение на по-високата честота на кода. По-съвършените образци от този тип използват носещата честота за повишаване на точността на кодовите измервания в известни граници.

7.2 Фазови измервания

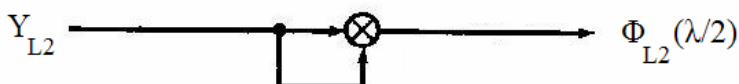
За да се извършват фазови измервания на носещите честоти, необходимо е най-напред кодовете, а след това и спътниковото съобщение да бъдат демодулирани от приетите сигнали. За тази цел се прилагат корелационни канали, където едночестотните приемници репликират C/A кода, а двучестотните – C/A и P кодовете, в резултат на което се определят съответните псевдоразстояния и се дава възможност за измерване на фазите на възстановените носещи честоти (фиг. 7.3).

Това би било напълно достатъчно ако под действието на системата за защита A-S вместо P код не се прилагаше неговият секретен вариант Y код, което налага за обработване на сигналите на честота L2 да се търсят други решения.



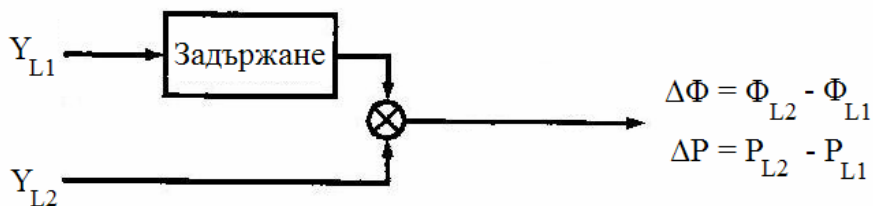
Фиг. 7.3. Корелационен канал

Противоположност на корелационната технология е *квадрирането* на сигналите, където се използва обстоятелството, че приеманите сигнали са двоично модулирани по фаза. Високите (+1) и ниските (-1) равнища на модулиращите кодове умножени сами на себе си дават един у същи резултат - +1, което значи че след такова преобразуване остава само носещата честота. Възстановената чрез квадриране честота обаче е двойно по-висока от оригиналната, а дължината на вълната става $\lambda/2$ (фиг. 7.4).



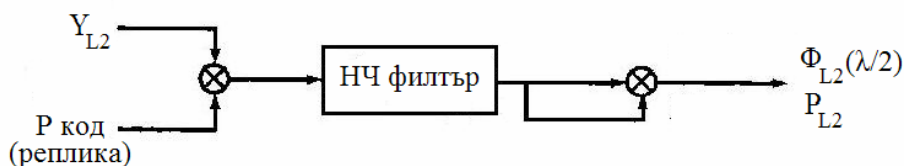
Фиг.7.4. Квадриращ канал

Тъй като шумовете на изхода на квадриращите канали са твърде високи, усъвършенствани решения се търсят в други направления. Ако се използва обстоятелството, че с Y код се модулират двете носещи честоти и ако вместо с реплики приетите сигнали по $L2$ се корелират с тези на $L1$, то може да се определи закъснението помежду им. С други думи, сравнението на неизвестните, но идентични кодове по двете честоти позволява да се определи с висока точност разликата на P -кодовите псевдоразстояния, а наред с това и фазовата разлика на $L2$ и $L1$ – $\Delta\Phi$ (фиг. 7.5), откъдето изхождайки от резултатите получени от корелационните канали на C/A код по $L1$ може да възстанови фазата на втората носеща честота. Този подход е известен като *взаимно корелиране* на Y код.



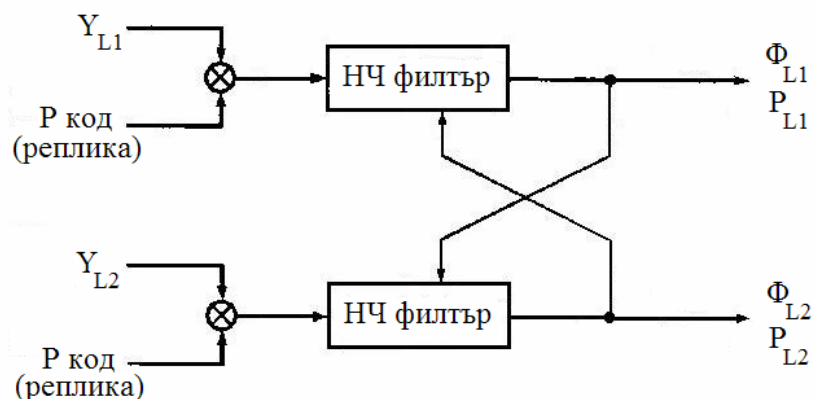
Фиг. 7.5. Взаимно корелиране на Y код по двете носещи честоти

Възможни са и решения, при които се изхожда от структурата на Y код. Известно е, че той се получава в резултат на смесване на P код с един секретен W код със значително по-ниската честота от 500 KHz. Това позволява носещата честота L2 да се възстанови след корелиране на Y код с реплика на P код, прилагане на нискочестотен филтър и квадривиране. За разлика от класическите квадривиращи канали, тук има възможност да се получи и P-кодово псевдоразстояние на L2 (фиг. 7.6).



Фиг. 7.6. Корелиране и квадривиране на Y код по L2

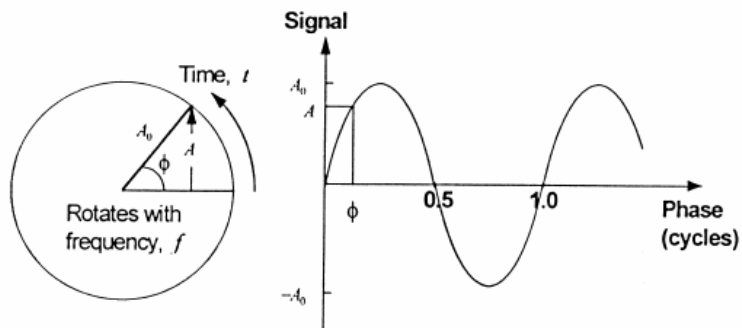
Ако този подход се приложи по отношение на Y код на двете честоти и се анализират близките до W код сигнали, отделени от нискочестотните филтри на L1 и L2, то е възможно възстановяването на двете носещи честоти и получаването на P-кодови псевдоразстояния на всяка от тях. Полученият резултат е освободен от някои недостатъци характерни за квадривирането и взаимното корелиране на Y код, което допринася за широкото разпространение на метода под името *Z-технология* (фиг.7.7).



Фиг. 7.7. Квази-безкодова Z технология

На пръв поглед изглежда, че ограниченията налагани от системата S-A се преодоляват успешно, но трябва да се подчертае, че силата на сигналите на изхода на всяка от посочените схеми (фиг. 7.3 – 7.7) значително намалява – 5 до 10 пъти, в сравнение с тази получавана от класическите корелационни канали (фиг. 7.1). Това води до понижаване на точността на фазовите измервания на честота L2 в случаите когато равнището на шумовете предизвикани от атмосферни и йоносферни смущения, местни смутители и пр. е високо.

Високата точност на фазовите измервания е следствие на малката дължина на вълната на носещите честоти, съответно 19 cm за L1 и 24 cm – за L2, което позволява постигането на точност около 2 mm на измерените величини – фазови разлики между едновременните отчети на двата GPS приемника.



Фиг. 7.8. Фазови измервания (Rothacher M., 2004)

Фазовите измервания се представят чрез уравнението

$$(7.5) \quad \Phi_A^S(T) = F_A^S [T_A(b) - t^S(a)] - 2\pi n_A^S,$$

където, наред с приетите означения, Φ – измерена фаза, F – честота на сигнала, n – брой на целите цикли на честотата, преброени между моментите на излъчване (a) и приемане (b) на сигнала. След като с δT и δt бъдат означени неточностите съответно на потребителската и спътниковата скали за време и се съобрази, че

$$(7.6) \quad T_A(b) - t^S(a) = \tau + [\delta T_A(b) - \delta t^S(a)],$$

както и че “чистото” закъснение τ , което е необходимо на сигналите за да преминат разстоянието от спътника до приемника –

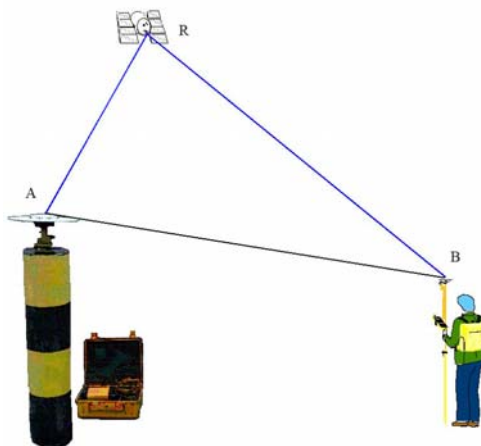
$$(7.7) \quad \tau = \frac{\rho_A^S}{c},$$

уравнението на фазовите измервания може да се запише във вида

$$(7.8) \quad \Phi_A^S(T) = \frac{F_A^S}{c} \rho_A^S + F_A^S [\delta T_A(b) - \delta t^S(a)] - 2\pi n_A^S.$$

7.3 Разлика между измерванията

Така наред с “полезните” параметри $(X, Y, Z)_A$ и $(x, y, z)^S$, които са включени посредством топоцентричния вектор ρ , в уравненията на фазовите измервания присъстват и “паразитните” параметри δT и δt , които може да имат значение единствено ако се решава задача за синхронизиране на скали за време, но не и в този случай. За елиминирането им се използват едновременни измервания на един и същи спътник от две различни станции – A и B . Синхронността на измерванията е постигната чрез обработката на кодовите измервания на двата приемника поотделно, в резултат на което скалите им са привързани към GPST. Затова от уравненията



Фиг. 7.7. Единични фазови разлики

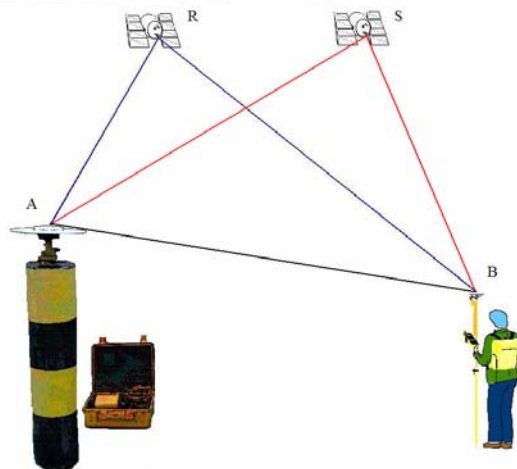
$$(7,9) \quad \Phi_A^S(T) = \frac{F_A^S}{c} \rho_A^S + F_A^S [\delta T_A(b) - \delta t^S(a')] - 2\pi n_A^S$$

$$\Phi_B^S(T) = \frac{F_B^S}{c} \rho_B^S + F_B^S [\delta T_B(b) - \delta t^S(a'')] - 2\pi n_B^S$$

се получава уравнението на първите фазови разлики $\Delta\Phi$ (фиг. 7.7) –

$$(7.10) \quad \Delta\Phi_{AB}^S(T) = \frac{F_A^S}{c} \rho_A^S - \frac{F_B^S}{c} \rho_B^S + F_A^S \delta T_A(b) - F_B^S \delta T_B(b) - 2\pi(n_A^S - n_B^S).$$

Поради това че моментите на излъчване на сигналите a' и a'' почти съвпадат, с достатъчно основание е прието, че $\delta t^S(a'') - \delta t^S(a') = 0$.



Фиг. 7.8. Двойни фазови разлики

Тъй като в уравненията на първите фазови разлики все още присъстват параметрите δT , свързани с неточността на скалите за време на потребителската апаратура в т. A и т. B , има смисъл да се търси по-нататъшно преобразуване на получените изрази. Това се постига чрез изваждането на две уравнения на първи фазови разлики, отнасящи са за едни и същи моменти от време и станции, но за различни спътници (фиг.7.8). В резултат се получават *вторите фазови разлики* $\Delta^2\Phi$ –

$$(7.11) \quad \Delta^2\Phi_{AB}^{RS}(T) = \Delta\Phi_{AB}^R - \Delta\Phi_{AB}^S,$$

$$\Delta^2\Phi_{AB}^{RS}(T) = \frac{F_A^R}{c} \rho_A^R - \frac{F_A^S}{c} \rho_A^S + \frac{F_B^R}{c} \rho_B^R - \frac{F_B^S}{c} \rho_B^S - 2\pi(n_A^R - n_A^S + n_B^R - n_B^S).$$

Единствените параметри, които не могат да намерят подходящо метрично изражение в горните уравнения са бройките цели цикли на носещата честота n . За да бъдат елиминирани, по аналогичен начин следва се извадят две уравнения на двойни разлики, отнасящи за последователните моменти от време T_1 и T_2 . При това, в интервала $[T_1, T_2]$ следенето на спътниковите сигнали, респ. броенето на циклите на носещата честота, се е извършвало непрекъснато:

$$(7.12) \quad \Delta^3\Phi_{AB}^{RS}(T_{12}) = \Delta^2\Phi_{AB}^{RS}(T_2) - \Delta^2\Phi_{AB}^{RS}(T_1)$$

$$\Delta^3 \Phi_{AB}^{RS}(T_{12}) = \frac{1}{c} \left[\left(F_A^R \rho_A^R - F_A^S \rho_A^S + F_B^R \rho_B^R - F_B^S \rho_B^S \right)_{T_2} - \left(F_A^R \rho_A^R - F_A^S \rho_A^S + F_B^R \rho_B^R - F_B^S \rho_B^S \right)_{T_1} \right]$$

В уравненията на *третите разлики* отсъстват цикличните параметри n , но за сметка на това в синтетичните измерени величини $\Delta^3 \Phi$ участват голям брой емпирични данни – осем фазови измервания на носещата честота, което води до значително спадане на чувствителността им (т.е. на единица изменение на координатите на спътник или точка ще съответства минимална промяна на третите фазови разлики). Затова третите фазови разлики не се използват непосредствено в математическия модел на задачата за определяне на координатите на геодезически точки, а само в предварителния анализ на измерванията и откриването на циклични грешки в тях.

7.4 Линеини комбинации

Фазови комбинации

Проблемите наложили получаването на фазови разлики и работата с тях вместо с фазите на носещите честоти не са единствените, които съпътстват обработката на геодезическите GPS измервания. Ако изхождайки от зависимостта $c = F\lambda$ изразим

$$(7.13) \quad \frac{F}{c} = \frac{1}{\lambda}$$

и умножим по уравнението на измерена фаза ще получим

$$(7.14) \quad \Phi_A^S \lambda = \rho_A^S + c [\delta T_A(b) - \delta t^S(a)] - 2\pi \lambda n_A^S.$$

Ако си припомним, че грешките на приемниковата (δT) и спътниковата (δt) скали за време участват наред с чистото закъснение τ в измереното време между моментите на излъчване и приемане а сигнала, и се опитае да обобщим, то бихме могли да запишем

$$(7.15) \quad T_A(b) - t^S(a) = \tau + [\delta T_A(b) - \delta t^S(a)] + \Delta t_I + \Delta t_V,$$

където с последните два члена са означени закъсненията на сигнала под действието на рефракцията на йоносферата и тропосферата. Допуснем ли и възможност за изменение на топоцентричния вектор въвеждайки скоростта

$$(7.16) \quad \dot{\rho} = \frac{d\rho}{dt},$$

то ще стигнем до израза

$$(7.17) \quad \Phi_A^S \lambda = \rho_A^S + (c + \dot{\rho}) [\delta T_A(b) - \delta T^S(a)] + \delta I_A^S + \delta V_A^S - \lambda N_A^S,$$

където с δI и δV са представени грешките заради йоносферата и тропосферата, а $N = 2\pi n$.

След тези необходими уточнения, нека опитаме да запишем уравненията на фазовите измервания на двете носещи честоти както следва:

$$(7.18) \quad \begin{aligned} \Phi_{L1} &= \frac{F_1}{c} \rho + \bar{F}_1 \Delta t + \frac{F_1}{c} \delta I_1 + \frac{F_1}{c} \delta V_1 - N_1 \\ \Phi_{L2} &= \frac{F_2}{c} \rho + \bar{F}_2 \Delta t + \frac{F_2}{c} \delta I_2 + \frac{F_2}{c} \delta V_2 - N_2, \end{aligned}$$

където

$$\bar{F}_i = \frac{c - \dot{\rho}}{\lambda_i} = F_i + \delta F_i.$$

Анализът на горните уравнения показва, че в дясно от равенствата са обособени два геометрични члена, свързани непосредствено с топоцентричното разстояние и скоростта на изменението му, йоносферен и тропосферен членове, както и целочислените параметри N_1 и N_2 . Ако положим

$$\begin{aligned} a &= \frac{\rho}{c} + \left(1 - \frac{\delta F_i}{F_i}\right) \Delta t, \\ b &= -\frac{F_i^2}{c} \Delta I, \end{aligned}$$

с което се въвеждат един геометричен и един йоносферен коефициент, и изпуснем тропосферните членове, стигаме до

$$(7.19) \quad \begin{aligned} \Phi_{L1} &= aF_1 + N_1 - \frac{b}{F_1} \\ \Phi_{L2} &= aF_2 + N_2 - \frac{b}{F_2}. \end{aligned}$$

Оттук се търси подходяща линейна комбинация на фазовите

измервания на двете честоти, в която да се изключат йоносферните членове. За целта първото от горните уравнения се умножава по F_1 , а второто – по F_2 , след което се образува разликата им:

$$(7.20) \quad \Phi_{L1}F_1 - \Phi_{L2}F_2 = a(F_1^2 - F_2^2) + N_1F_1 - N_2F_2.$$

Ако полученото уравнение се умножи по $\frac{F_1}{F_1^2 - F_2^2}$ то ще получим

$$(7.21) \quad \left(\Phi_{L1} - \frac{F_2}{F_1} \Phi_{L2} \right) \frac{F_1^2}{F_1^2 - F_2^2} = aF_1 + \left(N_1 - \frac{F_2}{F_1} N_2 \right) \frac{F_1^2}{F_1^2 - F_2^2},$$

където участват само геометрични членове, т.е. комбинация видимо свободна от влиянието на йоносферата. Заради някои опростявания на действията, в действителност комбинацията не е изцяло независима от йоносферната рефракция, а компенсира нейната линейна част (около 95%). Очевидно цикличният параметър в този случай (вторият член вдясно от равенството) губи характера си на целочислена величина. Йоносферно независимата комбинация може да се запише още като

$$(7.22) \quad \Phi_{L1,L2} = n_1 \Phi_{L1} + n_2 \Phi_{L2},$$

при $n_1 = 1$, $n_2 = -F_{L1}/F_{L2}$. Ако коефициентите n_1 , n_2 приемат други стойности, то могат да се дефинират и други комбинации от двете носещи честоти (табл. 7.1).

Таблица 7.1. Комбинации на носещите честоти

Комбинации	n_1	n_2	λ [cm]
L1	1	0	19.0
L2	0	1	24.0
Тясна лента	1	1	10.7
Широка лента	1	-1	86.2
Йоносферно независима L3	1	$-F_{L1}/F_{L2}$	

Теснолентовата и широколентовата комбинации се получават след смесване на L1 и L2, като сума и разлика от тях. Намират

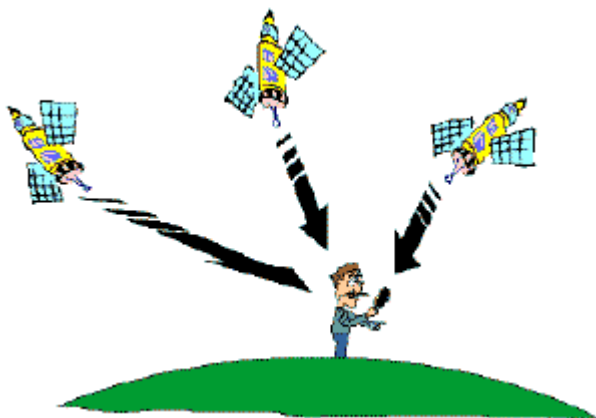
приложение в различни етапи на обработката измерванията, в случаите когато е необходимо мерната единица да се скъси или удължи – например, когато се търси фиксирано решение. Недостатък на всички комбинации е по-високото равнище на шумовете в сравнение с това на изходните честоти.

ГЛАВА 8

ВИДОВЕ ПОЗИЦИОНИРАНЕ

8.1 Определяне координатите на единична точка

В този случай се използва само един GPS приемник и се търсят пространствените координати на точката на стоене (фиг. 8.1). Погледнато чисто геометрически задачата може да се реши с помощта на така наречената трисферация (фиг. 8.2)



Фиг. 8.1. Определяне координатите на единична точка

В случая като измервани величини се използват кодовите псевдоразстояния, които се изразяват с уравнението:

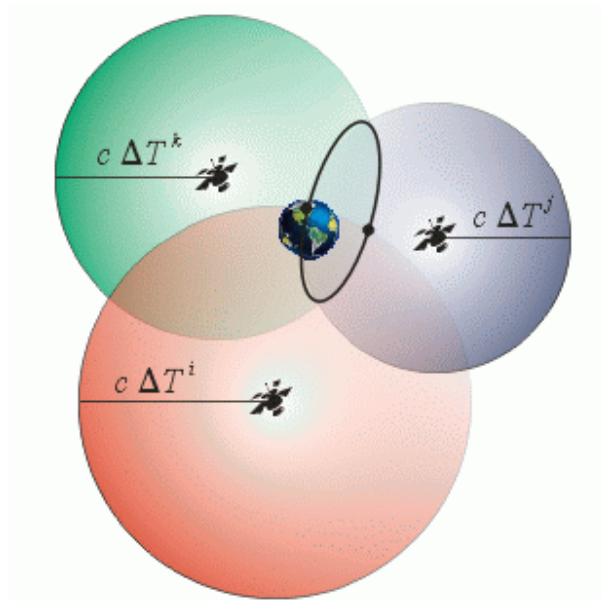
$$(8.1) \quad \tilde{\rho}_A^S = c[T_A(b) - t^S(a)] = c(\tau_A^S + \delta\tau_A) = \rho_A^S + \delta\rho_A.$$

Както се вижда в уравнението фигурира още едно неизвестно – грешката в часовника на приемника. От това следва, че координатите на $(X, Y, Z)_A$ и неизвестната грешка δt на скалата за време на приемника може да се

изчисляват в даден момент ако са налице не три а минимум четири псевдоразстояния, измерени от т. A до различни спътници.

Ако се наблюдават само три спътника, задачата може да се реши в двумерен вариант и височината на точката на стоене няма да се определи, а ако се наблюдават повече от четири спътника ще се получат свръхизмервания и ще бъде възможно неизвестните величини да бъдат оценени по метода на най-малките квадрати.

Така наред с определянето на положението на точката на стоене се постига и синхронизация на скалата за време на приемника спрямо GPST, респ. UTC.



Фиг. 8.2. Трисферация

За решението на задачата по метода на най-малките квадрати, топоцентричните разстояния се изразяват чрез координатите на приемателната апаратура $(X, Y, Z)_A$ и спътниците $(x, y, z)^S$ –

$$(8.2) \quad \rho_A^S = \sqrt{(x^S - X_A)^2 + (y^S - Y_A)^2 + (z^S - Z_A)^2},$$

както $(x, y, z)^S$ за всеки момент на измерване се изчисляват от радиоофемеридите.

Въвеждат се приблизителни стойности за неизвестните координати

$$(8.3) \quad \begin{aligned} X_A &= X_{A0} + \Delta X_A \\ Y_A &= Y_{A0} + \Delta Y_A \\ Z_A &= Z_{A0} + \Delta Z_A \end{aligned}$$

и се развива (8.2) в Тейлоров ред, ограничавайки се само до първите производни. По-този начин за всяко измерено разстояние се съставя по едно уравнение на поправките от вида

$$(8.4) \quad V = AX + F.$$

Свободните членове се получават като разлики между приблизителните и измерените стойности на разстоянията. Векторът на неизвестните параметри X съдържа четири неизвестни величини - ΔX_A , ΔY_A , ΔZ_A и δt_A .

Приемайки, че псевдоразстоянията са измерени с еднаква точност, решението се получава при прилагане на принципите на метода на най-малките квадрати

$$(8.5) \quad X = -(A^T A)^{-1} (A^T F).$$

Матрицата на тежестните коефициенти $Q_x = (A^T A)^{-1}$ се използва за характеризиране на геометричното разположение на спътниците в момента на измерването. Взаимното разположение на спътниците е важен фактор за постигане на висока точност. Характеристиките за това разположение се наричат DOP-фактори (Dilution of Precision).

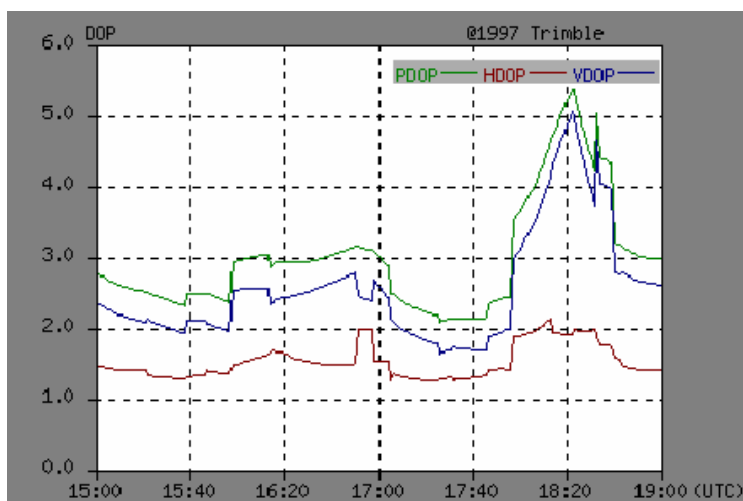
Ако се представи матрицата Q_x по следния начин:

$$(8.6) \quad Q_x = \begin{bmatrix} q_{XX} & q_{XY} & q_{XZ} & q_{X\delta} \\ q_{YX} & q_{YY} & q_{YZ} & q_{Y\delta} \\ q_{ZX} & q_{ZY} & q_{ZZ} & q_{Z\delta} \\ q_{\delta X} & q_{\delta Y} & q_{\delta Z} & q_{\delta\delta} \end{bmatrix}$$

то се дефинират следните DOP-числа:

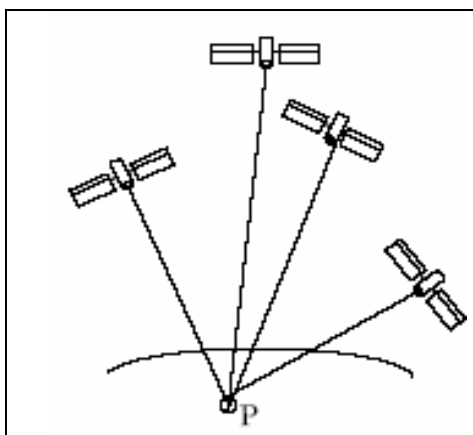
$$(8.7) \quad \begin{aligned} GDOP &= \sqrt{q_{XX} + q_{YY} + q_{ZZ} + q_{\delta\delta}} ; \\ PDOP &= \sqrt{q_{XX} + q_{YY} + q_{ZZ}} \\ TDOP &= \sqrt{q_{\delta\delta}} \end{aligned}$$

Съществуват още HDOP и VDOP, характеризиращи намалянето на точността в планово положение и по височина.

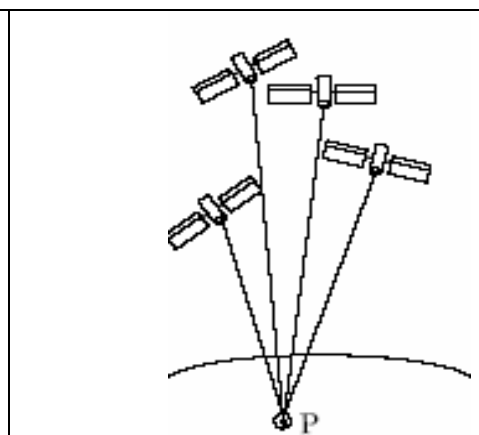


Фиг. 8.3. Промяна на DOP-числата в продължение на няколко часа

По принцип DOP-числата не могат да бъдат по малки от 1 но колкото са по-близки до единица толкова по-добре. От практическа гледна точка е необходимо да се знае, че GPS-измервания трябва да се правят при $GDOP \leq 8$ или $PDOP \leq 6$. Добро и лошо разположение на спътниците е показано на фиг.8.4 и 8.5.

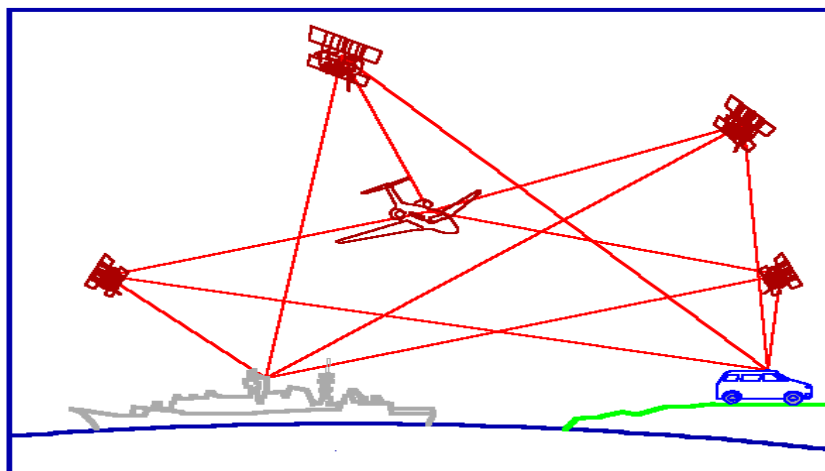


Фиг. 8.4. Добър GDOP



Фиг. 8.5. Лош GDOP

При положение, че спътниковите сигнали не са умишлено натоварени с грешки, за контролиране на потребителския достъп (известни като S/A), може да се постигне точност в реално време около 15 m, а с натрупване на данни за няколко минути – до 2-3 m по положение и 5-6 m по височина.



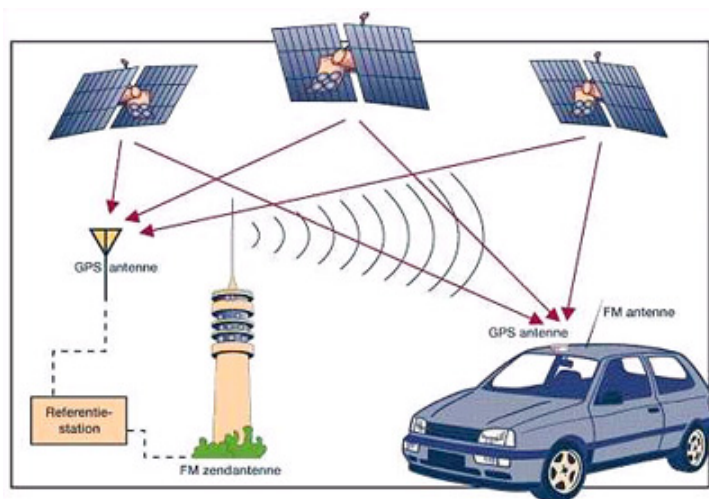
Фиг. 8.6. Различни приложения на единичните GPS определения

Съществуват още два начина за изчисляване координатите на единична точка. Това са фазовите и доплеровите измервания, които тук няма да бъдат разглеждани, поради ограниченото си приложение.

8.2 Диференциално определяне на координати (DGPS)

По-висока точност на кодовите измервания може да се получи ако те се коригират с други подобни измервания, осъществени от допълнителен GPS приемник, разположен на точка с известни координати – *базова станция*. Там може да определят в реално време разликите между измерените псевдоразстояния до всеки наблюдаван спътник и техните теоретични стойности, получени въз основа на радиоелементите и известните координати на базовата станция. Тези разлики се наричат *диференциални поправки* и са валидни в район с радиус 200 – 500 km. Излъчени по радиото, те се приемат от неограничен брой потребители с кодови GPS приемници, които могат да уточнят резултатите от измерванията си до 1- 2 m в реално време, а с натрупване на данни – до 0.6 – 0.7 m. Методът е известен като *DGPS*.

Освен функционалните звена в схемата на кодовите GPS приемници, базовите DGPS приемници имат предавателни *радиомодеми*, а потребителите на диференциални корекции – приемателни радиомодеми (фиг. 8.7).



Фиг. 8.7. Диференциални GPS определения (DGPS)

В уравненията по-горе освен грешката δt заради синхронизацията на приемниковата скала за време може да се обособят и други грешки от подобен тип, получавани в резултат на действието следните фактори:

- грешката при моделирането на йоносферната рефракция;
- неточността на прогнозираните орбитни данни в радиоефемеридата, водеща до грешки в координатите $(x, y, z)^S$;
- въздействието на системата за избиращелен достъп S/A (ако е активирана);
- други източници на грешки като тропосферната рефракция и пр.

Докато синхронизационната грешка δt може да се определи (виж по-горе), а тази заради йоносферната рефракция – да се компенсира чрез измервания на двете носещи честоти, то останалите могат да се елиминират в приемливи граници единствено ако в математическата обработка на измерванията бъдат включени външни данни. Това може да се осъществи ако наред с GPS приемника, с който се определя т. A , на друга точка (R) с предварително известни координати $(X, Y, Z)_R$ се извършват подобни измервания по същото време. В резултат на GPS измерванията на т. R , по метода описан по-горе може да се определят

нейните координати $(X', Y', Z')_R$ и да се съпоставят с известните –

$$(8.8) \quad \begin{aligned} \Delta X_R &= X'_R - X_R \\ \Delta Y_R &= Y'_R - Y_R \\ \Delta Z_R &= Z'_R - Z_R \end{aligned}$$

Възможно е също да се изчислят разстоянията до наблюдаваните спътници, напр. до спътника S:

$$\rho_R^S = \sqrt{(x^S - X_R)^2 + (y^S - Y_R)^2 + (z^S - Z_R)^2}$$

и да се определят разликите между тях и съответните им псевдоразстояния –

$$(8.9) \quad \Delta \rho_R^S = \tilde{\rho}_R^S - \rho_R^S.$$

Установено е, че разликите $\Delta \rho_R^S$ са валидни не само за точката, където са определени, но и в известен радиус – 200 – 500 km около нея, а също и че запазват стойността си в приемливи граници до около 30 s след момента на определянето им. Това дава възможност стойностите им да се използват като диференциални корекции към резултатите от кодовите измервания на други точки (напр. т. A), разположени в споменатата пространствено-временна област на т. R (която обикновено се нарича *базова станция*) по такъв начин, че измерените там псевдоразстояния да бъдат уточнени по (8.9).

След като това бъде осъществено, координатите на т. A се изчисляват по начина посочен в предходната точка, но вече с диференциално коригирани псевдоразстояния, което е предпоставка за постигане на значително по-висока точност – 1-3 m в реално време, а с натрупване на измервания за половин до една минута или повече – дори до точност в границите на 0.5 – 1.0 m. Макар с по-ниска точност, подобен ефект може да се постигне и чрез корекциите към координатите $\Delta X_R, \Delta Y_R, \Delta Z_R$ –

$$(8.10) \quad \begin{aligned} X_A &= X'_A - \Delta X_R \\ Y_A &= Y'_A - \Delta Y_R \\ Z_A &= Z'_A - \Delta Z_R \end{aligned}$$

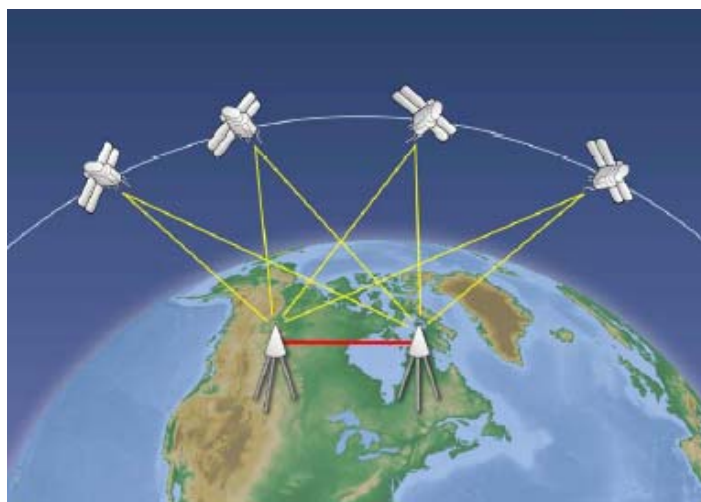
Диференциалните корекции се разпространяват в ефира в подходящ за специфичното предназначение честотен диапазон. По света са изградени множество мрежи от базови станции, предназначени за навигация, управление на транспорта и други приложения.

Диференциални корекции се разпространяват също чрез комуникационни спътници. Тъй като по същество така се разширяват възможностите на GPS, такива методи се наричат “Усилени GPS методи”. Познати са със съкращенията *WAAS* (за Северна Америка), *MSAS* (Япония) и *EGNOS* (Европа).

8.3 Релативно определяне на координати

Тъй като нито методът на единичните определения, нито DGPS удовлетворяват високите изисквания за точност на геодезическите задачи то е разработен специално за тази цел метод на релативно определяне на координати. При него се приема, че разполагаме с точка А с известни WGS84-координати, като задачата се свежда до определяне на координатните разлики между тази точка и коя да е друга точка В т.е.:

$$(8.11) \quad \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X_{AB} \\ \Delta Y_{AB} \\ \Delta Z_{AB} \end{bmatrix}$$



Фиг. 8.8. Релативно определяне на координати

Началните координати на точка А могат да бъдат известни от предишни измервания или да бъдат получени от изчислението и като единична точка от кодовите псевдоразстояния. В първият случай ще

бъдем привързани към дадена координатна система (например EUREF), а във вторият ще работим в локална система.

От казаното е ясно, че за осъществяване на относителни GPS-измервания е необходимо да се разполага поне с два приемника, единият от които да бъде поставен в точка А, а другият в точка В. Като необходими условия при измерването е от двете точки да се наблюдават едни и същи спътници в един и същи момент от време.

Използваните математични модели са свързани с разликите между фазовите измервания, разгледани в т. 7.3. Както беше отбелязано вследствие на тези разлики се елиминират или намалят влиянието си голяма част от грешките съпстващи GPS измерванията.

Принципно, векорът между двете точки може да бъде определен като се използват различни комбинации на честотите, като при дългите хорди особено важна роля играе йоносферно независимата комбинация L3.

В практиката са се наложили две основни групи решения:

1.С използване на единичните фазови разлики

$$(8.12) \quad \Delta\Phi_{AB}^S(T) = \frac{F_A^S}{c} \rho_A^S - \frac{F_B^S}{c} \rho_B^S + F_A^S \delta T_A(b) - F_B^S \delta T_B(b) - 2\pi(n_A^S - n_B^S)$$

2.С използване на двойните фазови разлики.

(8.13)

$$\Delta^2\Phi_{AB}^{RS}(T) = \frac{F_A^R}{c} \rho_A^R - \frac{F_A^S}{c} \rho_A^S + \frac{F_B^R}{c} \rho_B^R - \frac{F_B^S}{c} \rho_B^S - 2\pi(n_A^R - n_A^S + n_B^R - n_B^S)$$

Трябва да отбележим, че тройните фазови разлики не се използват като основа при решението на хордата между двете точки.

На базата на направените по-горе теоретични въведения изчислението на отделните хорди може да бъде представено по следния начин:

При реални измервания най-често се наблюдават от 5 до 7 спътника за определен период от време, съобразен с дължината на хордата. За всички тези измервания могат да се образуват множество единични или двойни фазови разлики. При по-нататъшната обработка се използва една от двете разлики, като най-голямо приложение има двойната фазова разлика. Трябва да се отбележи, че само единичните фазови разлики не са математически корелирани. За двойните и тройните разлики съществува корелация и тя трябва да се вземе предвид при обработката на данните.

Ако се използват например двойните фазови разлики, то за всяка образувана разлика се съставя по едно уравнение на поправките, където като параметри участват координатните разлики ΔX_{AB} , ΔY_{AB} , ΔZ_{AB} и неопределеностите (целите цикли на фазите) n .

Коефициентите в уравненията на поправките пред координатните разлики се получават чрез развитие на функциите за разстоянията ρ в Тейлоров ред и се вземат предвид само производните от първи ред.

Прилагайки изравнението по метода на най-малките квадрати, при условия $[pvv]=\min$ се получават стойностите на желаните параметри. Тъй като при изравнението целите цикли n на фазите ще имат не целочислени, а реални стойности, се налага техният брой да бъде предварително определен или да се приложи повторно изравнение по метода на най-малките квадрати, при фиксирано от първото изравнение n . Предварителното определяне на n е известно като “решаване на неопределеностите” (***Ambiguity Resolution***)

Във връзка с гореизложеното са възможни са два вида решения:

- фиксирани – когато цикличните параметри n се определят като цели числа, каквито са те по природа;
- плаващи – когато не се търси фиксирано решение или не може да се постигне. В тези случаи цикличните параметри се определят като реални числа.

Необходимо е да се отчитат следните особености:

- всяко фиксирано решение се предшества от плаващо, в което неизвестните координати, циклични параметри и други величини се определят като реални числа. Чрез анализ и статистически тестове реалните стойности на цикличните параметри се превръщат в цели числа, и ако това е възможно, решението се повтаря но вече с известни циклични параметри;
- фиксираните решения се отличават с максимална точност, постигана за сметка на условията произтичащи от целочисления характер на цикличните параметри;
- обикновено изчислението на фиксирани решения с радиоефемериди е възможно на разстояния до 30 km – за едночестотни измервания и до 50 km – за двучестотни. Над тази граница се използват единствено двучестотни приемници, при което се препоръчва използването на прецизни ефемериди;
- на разстояния над 200 km може да се окаже че е невъзможно определянето на фиксирано решение

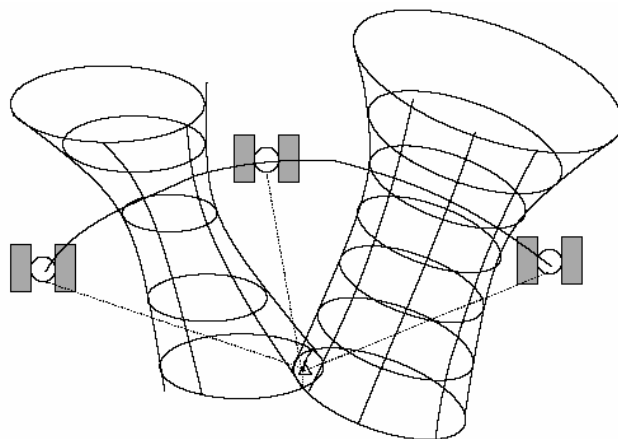
Фиксирането на неопределеностите е една от важните задачи при обработката на фазовите GPS измервания. Задачата е достатъчно сложна поради факта, че разстоянията от спътниците до приемниците е твърде

голямо (около 20 000 km.). Като се има в предвид, че дължината на вълната на L_1 е 19.0 cm. а на L_2 – 24.4 cm. се получават около 10^8 цели дължини на вълните.

Съществуват различни методи за решаване на неопределеностите, като по-важните от тях са :

- геометричният метод;
- методът на търсене на най-вероятната стойност на n ;
- комбиниране на кодови и фазови измервания и др.

Най-лесно решението на неопределеностите се излюстрира при геометричния метод. Да предположим, че сме наблюдавали един спътник в продължение на три епохи. За трите епохи се образуват две разлики, които образуват два хиперboloида, пресечната точка на които определят координатите на наблюдаваната точка (фиг.8.9). Използването на повече епохи води до подобряване на точността на решението, което трябва да бъде по-добро от $\lambda/2$.



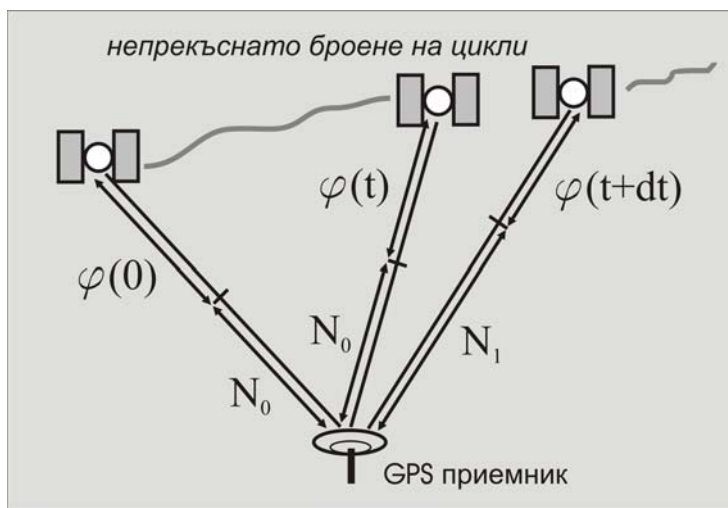
Фиг. 8.9. Геометричният метод за определяне на неопределеностите (Keller W., 2003)

Така полученото решение се замества в уравненията на двойните фазови разлики, които се решават спрямо неопределеностите n . Тъй като те се получават като релни числа (плаващо решение) е необходимо да бъдат закръглени до цели числа, което представлява и окончателното решение.

Независимо кой от методите се използва е необходимо да бъдат спазени някои основни изисквания. Например задължително е предварително да бъдат отстранени всички систематични грешки, които

биха могли да променят броя на n . Също така използваният метод трябва да позволява да се определят разстоянията от приемника до спътника с точност по-висока от половината дължина на вълната и да бъде достатъчно универсален за да може да се използва както при двучестотните така и при едночестотните приемници.

Обикновено неопределеностите се решават за всеки спътник само за началната епоха на наблюдение. Поради факта, че спътниците са в постоянно движение е необходимо да се следи изменението на n с помощта на устройството за измерване на фази на приемника (фиг.8.10).

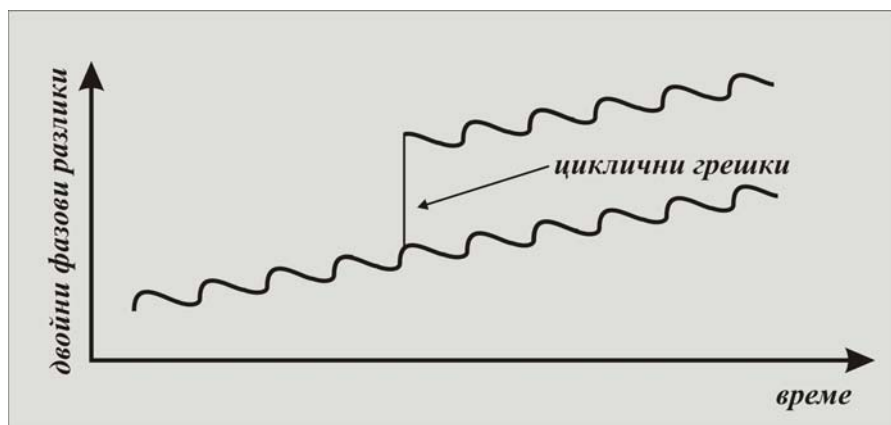


Фиг. 8.10. Непрекъснато следена неопределеностите и появата на циклични грешки

При положение обаче, че се получи прекъсване на сигнала то брояча на приемника се инициализира наново, което води до скок в броя на целите цикли (Хофман-Веленхоф, 2002). Този неприятен ефект е известен като "циклични грешки" (*cycle-slip*). На фиг. 8.11 е показано влиянието на цикличните грешки върху вторите фазови разлики.

По-важните причини за появата на цикличните грешки са прекъсването на сигналите от дървета, сгради, пирамиди на триангулационните точки, отразени сигнали, атмосферни влияния при близки до хоризонта спътници и др.

Очевидно, че наличието на циклични грешки влияе на решението на неопределеностите и затова е необходимо тяхното предварително отстраняване.



Фиг. 8.11. Влияние на цикличните грешки върху вторите фазови разлики

ГЛАВА 9

ИЗТОЧНИЦИ НА ГРЕШКИ

Основните източници на грешки при измерванията и обработката на GPS наблюденията са:

- грешки от синхронизиране на времето на спътниците и приемника;
- спътниковата орбита;
- тропосферната рефракция;
- йоносферната рефракция;
- вариации на фазовите центрове на антените;
- влияние на отразените сигнали.

9.1 Грешки от синхронизиране на времето на спътниците и приемника

9.1.1 Грешки от синхронизиране на времето на спътниците

Въпреки, че всички GPS спътници са снабдени с високоточни осцилатори, скалата за време, която те поддържат се различава от GPS скалата за време, поддържана от основната контролна станция в Колорадо. По тази причина в процеса на изчисляването на навигационните (broadcast) ефемериди се изчисляват и корекции към часовника на всеки GPS спътник, хода на часовника, а също така и изменението на хода. Поведението на всеки осцилатор на борда на GPS спътниците се следи от контролната станция в Колорадо по отношение на GPS скалата за време. Корекцията към часовника и нейното изменение са достъпни на потребителите чрез навигационното съобщение.

Това, което всъщност получава потребителя е предикция на поведението на часовниците на спътниците за някакъв период от време (обикновено 24 часа). Тъй като случайните осцилации на атомните осцилатори на GPS спътниците не могат да бъдат предвидени, такъв детерминистичен модел на поведението на часовниците е точен до около 20 наносекунди, което е еквивалентно на 6 м в разстоянието.

Грешката в синхронизирането на часовниците на GPS

спътниците не може да бъде пренебрегната при нито едно от GPS приложенията и обикновено се отстранява чрез формиране на единични и двойни разлики между наблюденията.

9.1.2 Грешки от синхронизация часовника на приемника

GPS приемниците са снабдени (обикновено) с кварцови осцилатори, които имат предимствата да се малки по обем, с ниска консумация на ток и са сравнително евтини. Те притежават също така сравнително добра стабилност на къси интервали от време.

Скалата за време, дефинирана от часовника на приемника, се синхронизира автоматично с GPS скалата за време в момента, когато приемникът приеме сигнали от достатъчен брой GPS спътници. Стабилността на часовника от тук нататък зависи от качествата на осцилатора на приемника и от това, колко често се извършва синхронизация. Най-удачният начин за отстраняване на грешката от синхронизиране на приемника е чрез формиране на единични и двойни разлики.

9.2 Спътниковата орбита

Съществуват няколко различни източника на информация за орбитите на GPS спътниците, които се различават по точност и закъснението във времето, след което са достъпни за ползване – Таблица 9.1. За сравнение е дадена точността и закъснението на прецизните GLONASS орбити, изчислявани от Международната GNSS служба.

Таблица 9.1. Типове GPS орбити

Тип на орбитата	Точност (m)	Закъснение във времето
Навигационна (broadcast) орбита	3.0 m	реално време
IGS екстраполирана орбита	0.80 m	реално време
IGS предварителна орбита	0.06 m	след 16 часа
IGS окончателна орбита	0.04 m	след 11 дни
GLONASS орбити	0.25 m	след 4 седмици

Отделно от изброените по-горе ефемериди всеки център за анализ изчислява свои собствени прецизни орбити, на чиято база се изчисляват окончателните IGS ефемериди.

Съществува просто правило (Bauersima, 1983), което позволява да се изчислят приблизително грешките в компонентите на базовата линия Δr като функция на грешката в орбитата ΔR :

$$\Delta r = \frac{l}{\rho} \Delta R \approx \frac{l[km]}{25000[km]} \Delta R$$

където ρ е приблизителна стойност на височината на GPS спътниците.

В Таблица 9.2 е дадено влиянието на грешките в орбитите на GPS при различни дължини на базовите линии (Rothacher, 1999).

Таблица 9.2. Влияние на грешките в спътниковите орбити

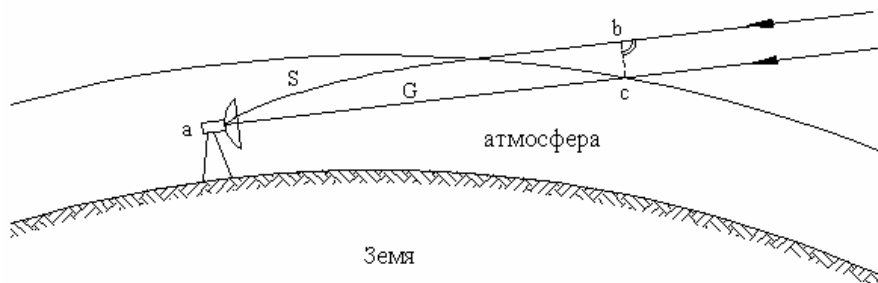
Грешка в орбитата	Дължина на базовата линия	Грешка на базовата линия в ppm	Грешка на базовата линия в mm
25m	1km	1ppm	1mm
25m	10km	1ppm	10mm
25m	100km	1ppm	100mm
25m	1000km	1ppm	1000mm
2.5m	10km	0.1ppm	1mm
2.5m	100km	0.1ppm	10mm
2.5m	1000km	0.1ppm	100mm
0.25m	100km	0.01ppm	1mm
0.25m	1000km	0.01ppm	10mm
0.05m	100km	0.002ppm	-mm
0.05m	1000km	0.002ppm	0.5mm

Две са областите от атмосферата, които оказват влияние върху GPS измерванията – тропосферата, достигаща до височина 10 км и йоносферата, простираща се от 50 до 1500 км.

9.3 Тропосферната рефракция

Рефракцията на GPS сигнала, преминаващ през електрически неутралните слоеве на атмосферата, наречени тропосфера, се нарича тропосферна рефракция. Тропосферата се простира от земната повърхност до височина 10 км. Другият компонент на неутралната атмосфера, т.нар. стратосфера се простира от 10 до 50 км височина. Закъснението на GPS сигнала, тропосферното закъснение, включва и двата неутрални слоя на атмосферата, тъй като тропосферата съдържа

по-голяма част от масата на неутралната атмосфера и на практика цялото парциално налягане (налягането на водните пари).



Фиг. 9.1. Път на сигнала от спътника през земната атмосфера

Общото закъснение на сигнала заради тропосферата достига до 2.3 м (8 наносекунди), (Rothacher, 1999). Обикновено, общото закъснение се разделя на две отделни:

т.нар. “dry” компонента или хидростатична компонента. Тя представлява 90% от общото закъснение и зависи главно от повърхностното налягане и е сравнително лесна за моделиране. Нейните вариации във времето са малки – от порядъка на см/6 часа;

и т.нар. “wet” компонента, чийто максимални стойности достигат 40 см. Тя е бързо изменяща се във времето и пространството и се моделира трудно, заради неизвестното разпределение на налягането на водните пари.

Тропосферната рефракция е основния източник на грешки при GPS измерванията и тяхната обработка. Отчитането на ефекта от тропосферната рефракция се извършва обикновено чрез използване на а-приорен стандартен модел на тропосферата и едновременно с това, чрез оценяване на специфични за всяка станция параметри на закъснението на сигнала

Закъснението на сигнала се описва, като функция на зенитното разстояние, най-общо чрез формула от вида:

$$\Delta\rho(z) = f_{dry}(z)\Delta\rho_{dry}(0) + f_{wet}(z)\Delta\rho_{wet}(0)$$

където :

$f_{dry}(z)$ и $f_{wet}(z)$ са т.нар. “mapping” функции (от вида $1/\cos(z)$),

$\Delta\rho_{dry}(0)$ и $\Delta\rho_{wet}$ закъсненията при зенитно разстояние 0° .

9.4 Йоносферната рефракция

GPS сигналят, преминавайки през йонизираните слоеве на атмосферата, изпитва въздействието на свободните електрони в нея. Броят на свободните електрони в йоносферата зависи от активността на Слънцето, от момента на наблюдение, от ширината на наблюдателната точка и др.

Закъснението на сигнала от йоносферата е приблизително обратно пропорционално на квадрата на излъчваната честота f :

$$\Delta \rho_{ion} = \pm a \frac{E}{f^2} \frac{1}{\cos z'}$$

където E е броят на свободните електрони, измерени в колона с диаметър 1 m^2 (т.нар. общо количество електрони (total electron content TEC) с дименсия TECU – 10^{16} свободни електрони на m^2 ; a е константа, $a=40.3 \cdot 10^{16} \text{ ms}^{-2} \text{ TECU}^{-1}$; z' е зенитния ъгъл към спътника на височината на йоносферата.

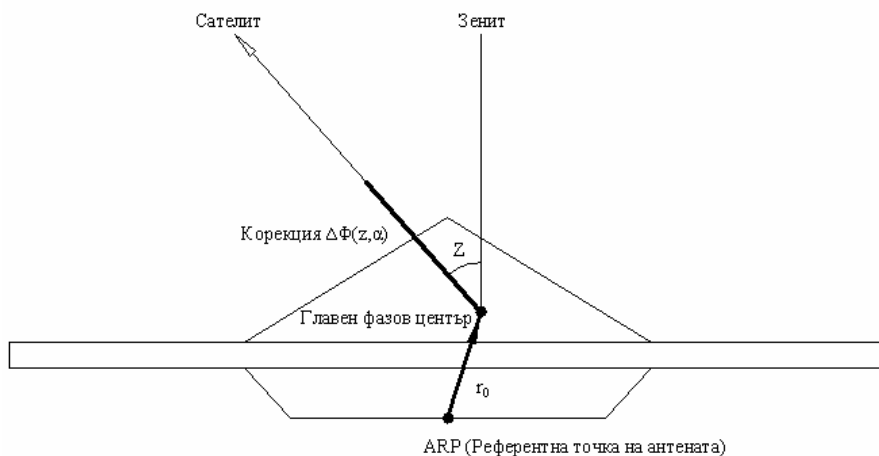
Знакът плюс е валиден за псевдоразстоянията, а негативния знак – за фазовото закъснение. Сумарният ефект на закъснението може да варира между 1 и 20 m.

Отстраняването на ефекта на атмосферата при GPS измерванията се осъществява по няколко начина:

- чрез използване на навигационното съобщение на GPS спътниците, което съдържа оценки за закъснението заради йоносферата;
- чрез използване на регионални и глобални модели на йоносферата. Такива модели се получават на базата на рутинната обработка на наблюденията на перманентните GPS станции от няколко от центровете за анализ на Международната GNSS служба и са достъпни за потребители. Йоносферните модели, освен че елиминират влиянието на рефракцията са важно условие за определяне на нееднозначностите на фазовите измервания;
- при обработката на GPS измерванията се използва и т.нар. свободна от влиянието на атмосферата комбинация на честотите L1 и L2.

9.5 Вариации на фазовите центрове на антените

При GPS измерванията фазовият център на антената не съвпада с геометричния. Нещо повече, фазовият център изпитва флуктоации, главно във вертикално отношение, в зависимост от зенитното разстояние и азимута на приемания сигнал (спътника). Вариациите на фазовия център на антените са принципно показани на Фигура и могат да бъдат описани най-добре със следния математически модел (Rothacher, 1999):



Фиг. 9.2. Схематична илюстрация на вариацията на фазовия център на GPS антена

$$\Delta \vec{r}_{ant} = \vec{r}_0 + \Delta \phi(z, A) \vec{e}(z, A),$$

където

$\vec{r}_0$ е средното разстояние до референтната точка на антената (среден фазов център);

$\Delta \phi(z, A)$ корекция, в зависимост от височината и азимута на спътника, заради вариацията на фазовия център спрямо средния фазов център $\vec{r}_0$;

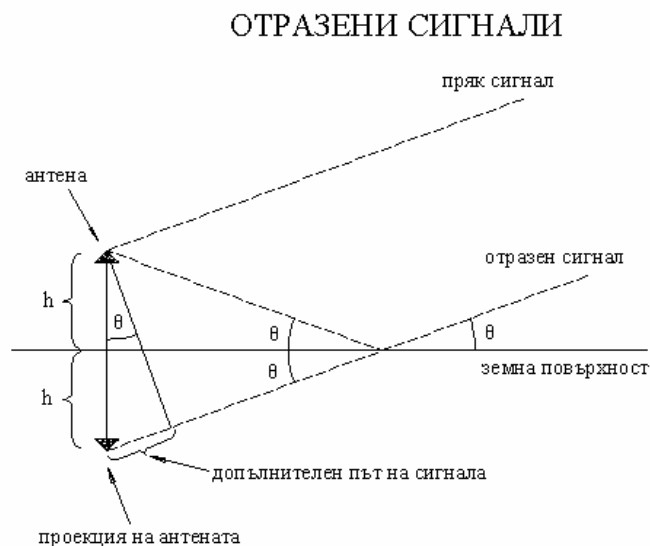
$\vec{e}(z, A)$ е единичния вектор в посока на спътника.

Корекциите заради флуктоациите на фазовите центрове на различните типове антени са определени относно антената от типа Dorne Margoline T и са достъпни за GPS потребителите на сайта на Международната GNSS служба.

9.6 Влияние на отразените сигнали

Ефектът на отразените сигнали при GPS измерванията е предизвикан от приетите от антената отразени (от различни повърхности около антената) сигнали. Антената приема както директните, така и отразените сигнали. Това води до систематична грешка, която може да достигне до 20 м при кодовите и до няколко сантиметра при фазовите измервания за един период от няколко минути (Rothacher, 1999). Ефектът е толкова по-изразен, колкото по-ниско над хоризонта е даден

спътник. Влиянието на отразените сигнали е илюстрирано на Фигура 9.3. Трудностите при неговото моделиране се дължат на факта, че той зависи пряко от условията, при които се провежда измерването.



Фиг. 9.3. Схематична илюстрация на влиянието на отразените сигнали

ГЛАВА 10

РЕЖИМИ И МЕТОДИ НА ИЗМЕРВАНЕ

10.1. Начини за приложение на GPS

В зависимост от спецификата на решаваните задачи, с помощта на GPS могат да се осъществят редица видове измервания, а математическата им обработка да протече по многообразни начини. Получените резултати се различават съществено по своята точност и други основни потребителски характеристики (фиг. 10.1).

Измервания		Точност		
Кодови	SPS+S/A			
	SPS			
	PPS			
DGPS	Класически			
	Усъвършенствани			
Фазови	Кинематични			
	Статични			
Видове измервания и резултати:				
		0 1 2 3 4 5	1 5 20 50	1 2 5 10 20 50 100
		mm	cm	m

Фигура 10.1. Точност на резултатите от GPS измерванията

Единствената възможност за автономно определяне на координати – без да се използват други данни, освен спътниковите GPS сигнали приемани в точката на стоене – може да се осъществи чрез измерване и обработка на кодови псевдоразстояния. Качеството на резултатите зависи изцяло от ползваното ниво на потребителско обслужване – SPS (свободен достъп) или PPS (санкциониран достъп), както и от активираните системи за защита на сигналите (S/A и пр.). Определящи са и техническите характеристики на потребителското

оборудване – GPS приемник и антена, въпреки че възможността за повишаване на точността с усъвършенстването им е ограничена от параметрите на спътниковите сигнали – честоти на кодовете, мощност и др. Голямо значение имат също условията за измерване (брой и разположение на спътниците, наличие на отразени сигнали, смутители и пр.) и тяхната продължителност. При благоприятно съчетаване на тези фактори, с няколкоминутни измервания може да се постигне точност 2-3 m.

За по-нататъшно повишаване на точността измерените псевдоразстояния се коригират с диференциални поправки - DGPS. Това е относителен метод за определяне на местоположение, в който освен условията за измерване и потребителската апаратура, важна роля играят допълнителни извън системни данни, каквито са поправките.

Диференциалните поправки се определят на базови станции откъдето се излъчват в ефир, в международно приетия формат RTCM. Точността им намалява с отдалечаването от базова станция и с времето, изминало от момента на определянето им. Аналогично, диференциалните поправки разпространявани чрез комуникационни спътници са валидни на територията, обслужвана от съответната мрежа от базови станции. Експериментално установено е, че на разстояние до 200 km е възможно постигането на точност 0.5 m (*Минчев М., Андреев А., 2003*). Затова DGPS има широк кръг приложения – топографски снимки, събиране и актуализиране на данни за ГИС, трасиране и пр.

За геодезията първостепенен интерес представляват високоточните относителни фазови GPS измервания. Извършват се едновременно на две точки - базова (референтна) и определяема (подвижна). В зависимост от начина на протичане на измерванията и тяхната обработка се различават следните методи:

- статични и кинематични;
- в реално време и с последваща обработка на данните.

Общото за всички геодезически методи е относителният характер на резултатите – с висока точност се изчисляват не координатите на определяемите точки, а пространствените вектори, които ги свързват с референтните станции.

10.2. Статични методи

Статичните методи позволяват постигането на най-висока точност. Характерни за тях са следните особености:

- GPS приемниците на базовата и определяемата точки са неподвижни по време на измерванията;
- измерванията на базовите вектори са независими, освен ако не са извършени с повече от два GPS приемника едновременно. Тогава

броят на независимите вектори е с един по-малко от броя на приемниците;

- минимален брой едновременно наблюдавани спътници – 4 (препоръчително 5 и повече);

- интервал между регистрациите на измерванията – от 5 до 30 s.

Статичните методи са разпространени в две разновидности:

- статични (същински);

- бързи статични.

Същинските статични определения се прилагат при създаване на геодезически мрежи с висока точност, дълги страни и високи изисквания към надеждността и представителността на резултатите. Времето за измерване на базовите вектори се регламентира с нормативен документ и не зависи от специфичните условия на точките. В зависимост от целта на задачата то варира от половин час до едно или няколко денонощия.

Трябва да се имат предвид следните съображения:

- математическата обработка на базови вектори с дължина над 50 km и особено над 100 km изисква приложението на сложни методи и т.нар. институтски софтуер (т. 10.4);

- на такива и по-дълги разстояния може да се окаже че е единствено възможно постигането на фиксирано решение на широколентовата честотна комбинация F_{L1-L2} с дължина на вълната 86.2 cm (т. 7)

Бързи статични методи се прилагат за създаване на съгъстващи мрежи, изходна и работна геодезическа основа и други подобни задачи, където на преден план излиза ефективността на работата. Прилагат се на разстояния между GPS приемниците до около 10 km, а след тази граница преминават в същински статични определения. Характерно за тях е, че времето за наблюдение се определя на място, в зависимост от условията за измерване – брой и разположение на спътниците, разстояние между GPS приемниците и пр.

В практиката са се утвърдили следните правила:

- на разстояния до 5 km се определя фиксирано решение на честота L1, а над тази -граница – йоносферно независимо решение след като се постигне на фиксирано решение на широколентовата честота;

- минималното време за измерване може да се определи приблизително по различни емпирични формули, сред най-популярните от които е: $T = (p + s)/2$, където p – интервал между регистрациите [sec], s – разстояние между базовата и определяемата точки [km], T се определя в минути.

Точността на статичните методи обикновено се представя по формулата $s = a + bd$, където s – средна квадратична грешка по положение или височина, d – разстояние между референтната станция и

определяемата точка [km]. За същинския статичния метод осъществен със съвременни модели GPS приемници $a = 3 - 5 \text{ mm}$, $b = 0.5 - 1.0 \times 10^{-6}$, а за бързите статични методи – $a = 5 - 10 \text{ mm}$, $b = 1 - 2 \times 10^{-6}$. Посочените цифри се отнасят за точността по положение, а по височина са 30-50 % по-високи.

10.3. Кинематични методи

В кинематичните методи е допустимо определяната точка да се движи спрямо референтната. Докато референтната станция функционира както при статични определения, работата на подвижният GPS приемник е необходимо да се контролира чрез специално устройство за индикация, управление и въвеждане на данни – контролер, терминал и пр. Ако се работи в реално време, референтната станция се оборудва с приемателен, а апаратурата на определяемите точки – с приемателен радиомодем.

За всички методи от тази група е характерно, че измерванията на отделните точки са зависими помежду си и образуват в своята съвкупност *кинематична последователност*, в която задължително няма прекъсване на следенето на спътниците.

В първата разновидност на метода фазовите измервания се регистрират по команда на оператора, след като апаратурата е установена неподвижно на определяемата точка. След приключване на измерванията на текущата точка (няколко секунди до половин минута или повече), автоматично или по команда на оператора регистрацията се прекратява, след което без да се изключва апаратурата и без да се прекъсва следенето на спътници се заема и се измерва по същия начин следващата точка. Тъй като се редуват движение и стоене, в този вариант кинематичният метод е известен като “Stop and Go”.

За втората разновидност на метода е характерно, че измерванията се извършват в движение, през зададени интервали от време или разстояние.

Всяка кинематична последователност се инициализира, т.е. постига се фиксирано решение в нейната начална точка. Целите стойности на цикличните параметри, определени в тази точка от *кинематичната траектория* се разпространяват по всички измервания от последователността. Ако за момент прекъсне следенето на спътниците, кинематичната последователност се преустановява и започва нова, която също се инициализира. В съвременните типове GPS приемници инициализацията може да се извършва на място и във време на движение (“On the fly”, откъдето идва често срещаното “OTF методи”).

Възможно е кинематичните методи да се прилагат с последваща обработка, но това не води до постигане на максималната им ефективност. Затова тя се прилага само в условия в които свързката между двата приемника е неустойчива или невъзможна.

Точността на кинематичните методи се представя съгласно т. 10.2 по формулата $s = a + bd$, при $a = 2 - 5 \text{ cm}$, $b = 1.5-2.0 \times 10^{-6}$.

10.4. Обработка на резултатите във и извън реално време

Обработката извън реално време се осъществява след приключване на измерванията и едва тогава става възможно да се видят резултатите от тях. Извършва се със специализирани програмни продукти, които най-общо могат да бъдат два вида: фирмени и институтски.

Фирменият софтуер се доставя от производителите на GPS апаратура. Доколкото е възможно, работата с него е опростена и са създадени редица удобства за потребителя – в статичен и кинематичен режим. Обикновено не се предвиждат опции за въвеждане измервания с апаратура на други производители в оригиналния им вид, но е възможно преобразуването на собствените измервания в общоприетия формат за обмен на данни RINEX, както и въвеждането за последваща обработка на измервания в същия формат.

Институтският (или научен) софтуер позволява в обработката на измерванията да се прилагат строги математически модели, в които се отчита влиянието на редица фактори в тяхната пълна сложност. Служи за обработка преди всичко на продължителни статични измервания и дава възможност за постигане на максимална точност при определяне на вектори и мрежи с значителен (вкл. континентален) обхват. Измерванията се въвеждат във формат RINEX.

Работата в реално време има следните предимства:

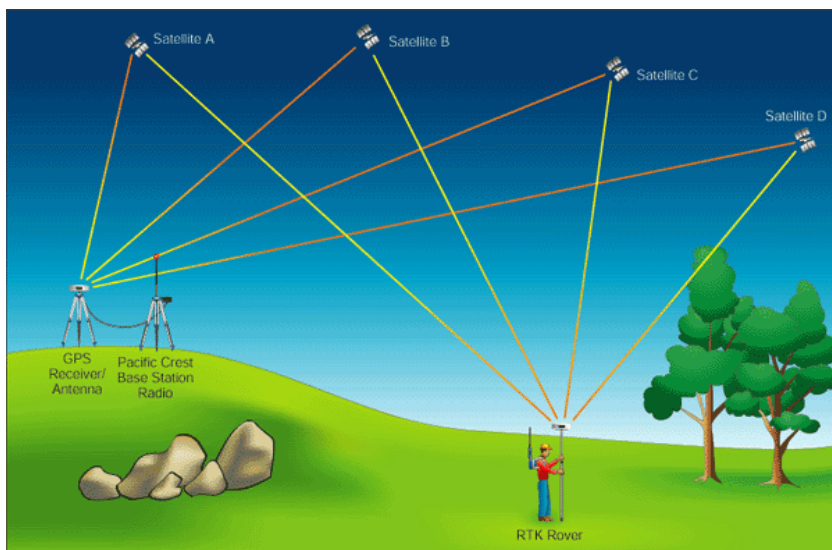
- резултатите от измерванията и тяхната обработка се получават на място, което почти изключва възможността за допускане на некачествени резултати;

- спестява се голяма част от времето за последваща обработка на резултатите.

Приложима в случаите на статични и кинематични определения, работата в реално време е с особено значение за ефективността на последните. Например, чрез кинематичните методи в реално време (“Real Time Kinematic” – RTK) се реализират най-продуктивните възможности за приложение на GPS.

В режим RTK е възможно масовото координиране на снимачни и други подробни точки, заснемането на линейни и площни обекти,

актуализирането на пространствени и атрибутни данни, трасирането на точки, прави линии и криви, и осъществяването на много други рутинни геодезически задачи.



Фиг. 10.2. Кинематични измервания в реално време

Методите в реално време са силно зависими от начина за предаване на данни от базовата станция. Най-често се използват микровълновият радиодиапазон или канали за данни на клетъчните телефонни мрежи. В класическия вариант – с една базова станция приложението на RTK е възможно в радиус до 10 km около нея, а ако се създаде виртуална базова станция (VRS) този обхват може да се разшири 3 -4 пъти. В последния случай е необходимо да функционира референтна мрежа от минимум 3-4 станции на разстояние 50 - 70 km помежду им, а най-добре – да е създадена такава мрежа с национален обхват.

10.5. Приложение на статични GPS измервания за създаване на ГММП и РГО

GPS измервания може успешно да се прилагат за създаване на геодезически мрежи с местно предназначение и работна геодезическа основа. Във всяка от тях се проектират поне две референтни станции, от които се определят векторите към останалите точки – нови и изходни. Всяка точка трябва да бъде свързана с минимум две други точки, с което се създават геометрични условия в мрежата. От друга страна, винаги е

желателно дължината на векторите да е минимална. Така окончателният брой на референтните станции се определя в зависимост от местните условия, най-важни от които са:

- форма и размер на територията обхваната от измерванията;
- физикогеографски условия;
- пътна мрежа и проходимост;
- степен на урбанизация;
- състояние на геодезическите мрежи.

Уместно е измерванията да се проектират в две групи:

1. Вектори свързващи референтните станции помежду им и с изходните точки в мрежата;
2. Вектори свързващи определяемите точки с референтните станции.

По този начин се гарантира независимостта на векторите в мрежата при използване на повече от два приемника едновременно и се дава възможност за оптимизиране на организацията на работата на терена. Препоръчителната минимална продължителност на сеансите за измерване на вектори, свързващи определяемите точки с референтните станции е дадена в табл. 10.1. Сеансите в първата група са двойно по-дълги.

Векторите в ГММП се определят чрез двучестотни GPS или GPS/Глонасс измервания, а в РГО са допустими и едночестотни измервания. В последния случай продължителността на сеансите (табл. 10.1) се удвоява.

Измервания във всеки сеанс се извършват при минимална височина на спътниците 15° над хоризонта и максимална стойност на геометричния фактор DOP 7. Интервалът между регистрациите е 5 или 10 sec.

В началото и края на сеанса на всяка точка се измерва височината на GPS антената. Това е разстоянието от надземния център до марка посочена от производителя. Затова еднакво важни са както измерената височина, така и данните за типа на антената и начина по който е центрирана върху точката (на тринога, щок, стълб и пр.).

Тези и други данни, свързани с протичането на измерванията (идентификатор на точката, дата, начало и край на сеанса, тип и номер на апаратурата, оператор и пр.) се записват в карнет (фиг. 10.2), който е част от измерителната документация.

Таблица 10.1. Продължителност на измерванията в ГММП и РГО

Геодезически мрежи с местно предназначение		Работна геодезическа основа	
Разстояние	Време	Апаратура	Време
0 – 5 km	0:40 ч	Двучестотна	0:15 ч
5 – 10 km	1:30 ч		
над 10 km	2 ч + 1 ч за всеки следващи 10 km	Едночестотна	0:40 ч

Резултатите от измерванията, натрупани в паметта на GPS приемниците се прехвърлят на компютър и се архивират в два формата - в оригиналния им вид и във формат RINEX. В последните е необходимо да се уточнят всички данни за точките, GPS апаратурата и височините на антените.

Математическата обработка на GPS измерванията обхваща следните етапи:

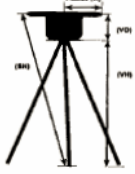
1. Изчисление на вектори
2. Проверка на геометричните условия в мрежата
3. Изравнение на мрежата по МНМК

Изчислението на вектори се извършва чрез последваща обработка на измерванията, записани по време на работата на терена. Използват се радиоефемериди или прецизни орбити, а тропосферните корекции се определят със стандартни метеорологични данни. Допустими са само фиксирани решения.

За проверка на геометричните условия се сумират координатните разлики по осите X, Y и Z по затворените геометрични фигури в мрежата, образувани от независимо определените вектори. Предпочитат се триъгълниковите условия, но е допустимо сключването и на други фигури.

Изравнението на ГММП се извършва като включена мрежа, в която изходни са точките от Държавната GPS-мрежа, а това на РГО – и точките от ГММП, определени с GPS.

В редица случаи може да се наложи координатите на точките от ГММП и РГО да се трансформират в държавна или местна система. Използват се трансформационните модели и стойностите параметрите им, определени за дадения район. Ако трансформацията не е определена, то се прилагат следните процедури (т. 4.6):

Обект Населено място, землище			Оператор
			Дата
Станция	№	Клас	Име
GPS приемник	Измервания		
Тип	Начало	Интервал	Минимална височина
№	Край		
GPS антена		Височина на антената	
Начин на станционирание	Стълб ☐	Вид на височината	Измерена
	Щок ☐	Вертикална ☐	Константа
	Тринога ☐	Наклонена ☐	Общо
Схема на станционирание			
			
			

Фигура 10.2. Карнет за GPS измервания

- определят се параметрите на Хелмертов трансформационен модел (4.18), с помощта на който се извежда връзката между проекциите на точките върху съответните им референтни елипсоиди;
- за изчисление на котите се определят параметрите на полиномиален трансформационен модел (4.21) от 1-ва – 3-та степен в зависимост от големината на района и сложността на релефа.

10.6. Пример

В прил. 1 – 6 са дадени резултатите от основните етапи на математическата обработка на една GPS мрежа.

Измерванията са извършени с цел да се определят координатите и височините на 9 нови точки (ТТ1 – ТТ8 и ТТ10) в системата “1970 г.”, зона “К-3”, и Балтийска височинна система. Използвани са два двучестотни GPS приемника Trimble 4700 с антени Compact L1/L2 на същия производител.

Всички нови точки са определени от две базови станции – ТТ230

и ТТ242, които наред с ТТ232 и ТТ240 са точки от ГММП. Тъй като височината на ТТ232 не е известна, в мрежата е включен нивелачният репер НР34, с което минимумът от трансформационни точки по положение и височина е осигурен (прил. 1). Освен това, ТТ230 и ТТ242 са определни и в БГС2000.

С един вектор в мрежата са свързани само трансформационните точки, като се разчита че контрол за тях ще се осъществи чрез зададените им координати и височини.

Тъй като GPS приемниците са два, всички вектори са независими. Измерванията са извършени при минимална височина над хоризонта 15° и интервал на регистрациите 5 секунди. Тъй като изискванията към точността са сравнително ниски, критериите в табл. 10.1 за продължителността на измерванията не са спазени, а вместо това е приложен бърз статичен метод с минимална дължина на сеанса 8 или 15 минути, съответно при 6 (или повече) и 5 едновременно видими спътника.

Въз основа на записките в карнетите е съставена таблица с обобщени данни за измерванията на всяка точка (прил. 2).

Математическата обработка на измерванията е осъществена с фирмен софтуер, а резултатите от нея са систематизирани както следва:

- изчисление на пространствените вектори в мрежата - 22 бр. (прил. 3);

- проверка на геометричните условия в мрежата – в случая сключване на 9 пространствени триъгълника (прил. 4);

- изравнение на GPS мрежата с изходни точки ТТ230 и ТТ242 (прил. 5). Осреднените оценки на точността – 5, 7 и 12 mm, съответно в северна и източна посока, и по височина, напълно отговарят на възможностите на бързия статичен метод.

Накрая са изведени параметрите на трансформационните модели по положение и височина, съответно Хелмертов и полиномиален от първи ред, и са получени координатите на новите точки в система “1970 г.”, зона “К-3”, и котите им в Балтийска височинна система. (прил. 6). Получените средни квадратични отклонения в идентичните точки, съотв. 62 mm – по положение и 58 mm по височина, са напълно задоволителни.

ГЛАВА 11

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ВИСОЧИНИ С GPS

11.1 Ортометрични и елипсоидни височини

Основната трудност при определяне на височини с GPS се състои във факта, че GPS определените височини са елипсоидни, а почти всички потребители използват ортометрични височини.

Традиционно височините се определят чрез нивелачни измервания, които се базират на факти на Земното гравитационно поле и се отнасят към средното морско ниво. Във всяка точка от земната повърхност гравитацията може да бъде описана със съответната стойност и направление, т.е. с един вектор. Нивелачните измервания са свързани с перпендикуляра към този вектор в съответната точка. Определените чрез нивелация височини се отнасят към средното морско ниво и се наричат ортометрични и в действителност се определят спрямо геоида. Ортометричните височини се използват в ежедневната геодезическа практика и са в основата на топографските карти.

Геоидът е еквипотенциална повърхнина (на повърхността на който гравитационния потенциал е константа), която най-добре апроксимира средното морско ниво. Геоидът е гладка, но нерегулярна, сложна за представяне математически повърхнина. От друга страна, елипсоидът е проста математически повърхнина. Височините, определяни с GPS са отнесени към елипсоида.

Разстоянието, което разделя геоида и елипсоида се нарича геоидна ондулация (също така височина на геоида). Геоидната ондулация може да бъде положителна или отрицателна в зависимост от това, дали геоида е над или под елипсоида в дадена точка. Ако геоидната ондулация N и елипсоидната височина h са известни, ортометричната височина може да бъде определена чрез простата връзка:

$$h = H + N$$

където H е ортометричната височина.

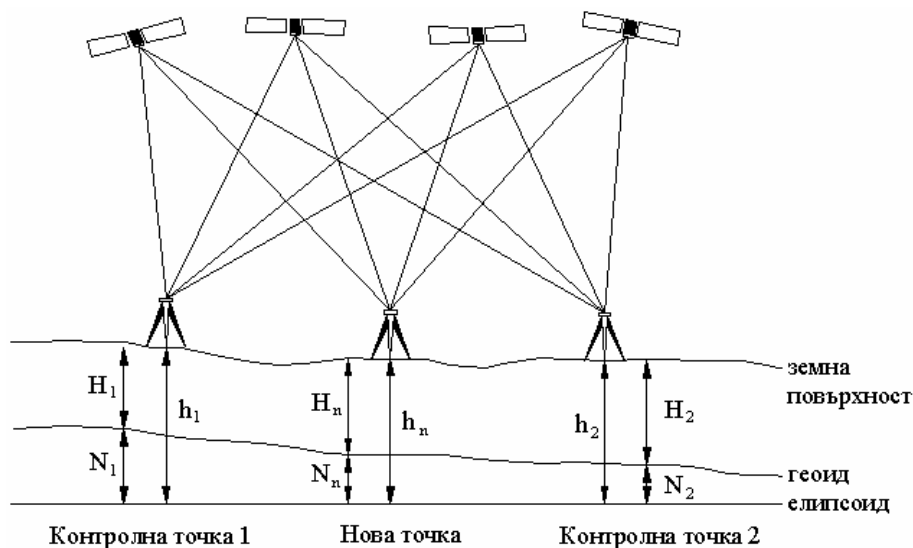
Очевидно е, че за да бъде определена ортометричната височина с помощта на GPS трябва да се познават геоидните ондулации.

Изменението на геоидните ондулации в дадено направление се нарича градиент (на геоида). Градиента е в пряка зависимост от топографията на района и по-малки градиенти се наблюдават в равнинни райони, а по-големи – в планинските.

11.2 Определяна на ортометрични височини с GPS

За определяне на ортометрични височини обикновено се използват две или повече точки с известни височини, разположени в периферията на района на измерване. Ортометричните височини на новите точки могат да бъдат получени чрез интерполация. Тази процедура премахва по-голяма част от грешките, дължащи се на градиента на геоида.

Концепцията е илюстрирана на фигура 11.1. На фигурата две от точките, контролните, имат ортометрични височини H_1 и H_2 , определени чрез нивелация. Търси се ортометричната височина H_n . От даден модел на геоида, за предпочитане регионален, са получени оценки за геоидните ондулации N_1 , N_2 и N_n . От GPS наблюденията се получават елипсоидните височини на трите точки – h_1 , h_2 и h_n .



Фиг. 11.1. Определяна на ортометрични височини с GPS

В контролните точки елипсоидната височина може да бъде получена по два начина: директно от GPS измерванията и чрез сумата на

ортометричните височини и ондулациите – $h_1=H_1+N_1$, $h_2=H_2+N_2$. Определените по двата различни метода елипсоидни височини ще се различават главно заради несъвършенствата на геоидния модел. Де факто, GPS измерванията на точки с известни ортометрични височини е оценка на точността на геоидните ондулации на точките, т.е. на използвания модел на геоида.

За да се определи ортометричната височина на новоопределяемата точка/точки трябва да се получи N_n . Използвайки несвързките между елипсоидните височини на контролните точки, за новоопределяемата може да се получи значително по точна стойност на N_n чрез интерполация.

Тази проста техника стои в основата на определянето на ортометрични височини с GPS. На практика се прилага изравнение по метода на най-малките квадрати като точките с известни от нивелацията височини се фиксират. Броят на тези точки е препоръчително да бъде не по-малък от три.

В Таблица 11.1 са дадени **приблизителни** оценки на точността при определяне на ортометрични височини с GPS в зависимост от дължините на базовите линии и градиента на геоида.

Таблица 11.1

Дължина на базовата линия	Грешка във височината, дължаща се на геоидния модел	
	Равнинен район (малък градиент)	Планински район (висок градиент)
30 – 50 км	$\sigma = \pm 10$ см Max. ± 20 см	$\sigma = \pm 20$ см Max. ± 50 см
5 – 10 км	$\sigma = \pm 5$ см Max. ± 5 см	$\sigma = \pm 10$ см Max. ± 20 см
2 – 3 км	$\sigma = \pm 2$ см Max. ± 5 см	неизвестно
1 км	$\sigma = \pm 2$ см	неизвестно

ГЛАВА 12

ПЕРСПЕКТИВИ ЗА РАЗВИТИЕ НА GPS

GPS е създадена за нуждите на отбраната на САЩ и се поддържа със средства от военния бюджет. Затова перспективите за развитието ѝ зависят изцяло от политиката за сигурност на американското правителство. Глобалните военно-политически процеси през последните две десетилетия на XX век и особено през 90-те години наложиха някои промени в дългосрочните перспективи за развитие на GPS, целящи постигането на по-висока селективност на военните приложения и разширяване на възможностите за използване на системата от граждански потребители.

Предпоставки за промяна

а) Обществено-политически предпоставки

През годините изминали от първоначалното въвеждане на GPS в действие и особено след достигането на пълните ѝ функционални възможности (1995 г.) стана ясно, че тя ще играе първостепенна роля в изключително широк спектър от приложения, далеч извън планираните и очаквани граници. Затварянето на системата единствено за военни потребители би било недалновидно и ограничаващо възможностите ѝ за развитие, защото търсенето на гражданска алтернатива не може да остане дълго без последствия. Остават без отговор въпроси като:

- кой търпи последствията от политиката на налагане на тотални ограничения върху ресурсите на системата – противниците на САЩ и съюзниците им в евентуални военни конфликти, или обикновените граждани – американски данъкоплатци и поданици на други страни;

- трябва ли в широки граждански сфери на приложение, където GPS играе важна роля за сигурността на хората – в гражданската авиация, корабоплаването и др., да се разчита на единствено на добрата воля на Министерството на отбраната на САЩ.

Става ясно, че гражданският контрол върху развитието на GPS е неизбежен.

б) Военни предпоставки

В съвременната военно-политическа обстановка, която се характеризира с конфликти със спорадичен характер, мерки от типа “дърпане на шалтера” не са ефективни срещу несанкционираното използване на GPS. Това се отнася за всички тотални ограничения, наложени за неограничен срок върху цялостното действие на системата, каквито са изборният достъп (S/A) и замяната на P код с Y код, известна като “анти-спуфинг” (A-S). Те въздействат двойко върху потребителите, които не разполагат с военни GPS приемници:

- краткосрочно - осигуряване на превъзходство над противника в зоната на конфликта;

- трайно - ограничаване на възможностите на всички граждански потребители.

Балансът на моментните преки ползи и трайните косвени загуби не свидетелства в полза на ефективността на тоталните ограничителни мерки. Вместо тях, в епохата на управление на кризи, заменила блоковото противопоставяне в съвременните военно-политически отношения е необходим селективен подход, който позволява гъвкаво управление на достъпа до ресурсите на системата по категории потребители, региони и други признаци.

в) Технологични предпоставки

На практика се намериха начини за технологично преодоляване, или поне заобикаляне на последствията от ограниченията наложени за граждански потребители. Показателни затова са следните два примера.

Още в най-ранните образци геодезически GPS приемници - Macrometer (1981 г.) и др., беше приложена техниката на квадриране на спътниковите сигнали, която позволи несанкционирано приемане на честота L2. По-късно бяха създадени по-съвършени начини за обработка, основаващи се на взаимното корелиране на приетите сигнали по двете честоти, които дават равноценни резултати на истинските P(Y) кодови военни приемници.

По отношение на приложенията в навигацията и другите области, освен високоточните геодезически измервания, изключително ефективни се оказаха диференциалните методи (DGPS), с помощта на които в значителна степен се обезсмисли ефектът от действието на системата за изборен достъп (S/A) върху гражданските C/A кодови едночестотни GPS приемници.

Така резултатът от тоталното санкциониране на достъпа до ресурсите на системата доведе до:

- стимулиране на търсенето на високотехнологични решения от страна на производителите;

- оскъпяване на гражданските образци потребителска GPS апаратура и услуги.

Едва ли тези последствия допринасят съществено за икономическия просперитет и националната сигурност на САЩ и техните съюзници.

Очаквани промени в GPS

а) Правителствени документи и решения

С изявления на вицепрезидента на САЩ от 30.03.1998 г. и 25.01.1999 г. бяха обявени най-съществените моменти от предстоящото модернизиране на GPS с оглед осъществяването на правителствената политика, а именно:

- втори граждански сигнал на честота L2;
- трети граждански сигнал на нова честота L5 = 1176.45 MHz;
- ново поколение спътници “Блок ИФ” към 2005 г.

На 2 май 2000 г. системата за избиращен достъп (S/A) беше изключена, с което се преустанови умишленото понижаване на точността на гражданските (SPS) сигнали, излъчвани на честота L1.

Ефективността на последната мярка в подкрепа на гражданските потребители се почувства незабавно в нашата страна. Десетки геодезисти се снабдиха в кратки срокове с евтини любителски GPS приемници и извършиха с тях голяма част от геодезическите работи по възстановяването на собствеността на горите и земите от горския фонд. С няколко минутно натрупване на данни на всяка точка се постига точност от няколко метра на определените координати.

б) Основни функционални параметри и изисквания

С основните *функционални параметри* (KPP) се формулират задължителни изисквания към системата, от постигането на които зависи изпълнението на програмата за модернизацията ѝ. Такива са:

- повишаване на устойчивостта на смущения чрез усилване на военните сигнали с 20 dB;
- осигуряване на приемственост с всички видове съществуваща потребителска (военна и гражданска) апаратура, отговаряща на официалните изисквания [ICD-GPS-200/203];
- осигуряване на точност на предаване на време не по-ниска от 20 ns, а като крайна цел – 10 ns.

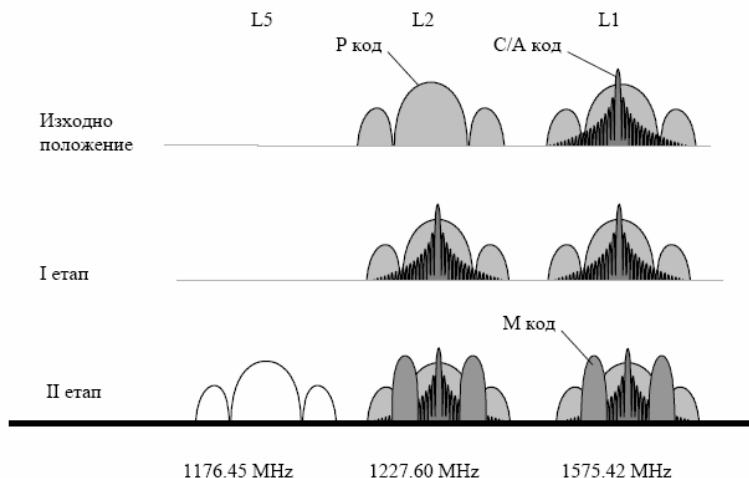
Тези параметри не подлежат на по-нататъшна дискусия и дават основата за разработване на *функционални изисквания*, в които се съдържат насоките за осъществяване на модернизацията. Документите, в

които се формулират функционалните изисквания към системата (ORD) се разработват от министерствата на отбраната (DoD) и транспорта (DoT) на САЩ. Това все още не означава, че системата излиза изпод контрола на военните, но е признак за предстоящо адаптиране към гражданските потребители.

Функционалните изисквания се отнасят до спътниковия комплекс и управлението на GPS, както и до някои важни аспекти на военните ѝ приложения – системи за защита на информацията, устойчивост на смущения и електронни въздействия и пр. В тях се съдържат и основните насоки на националната политика за гражданско използване на системата, с които се цели оптималното ѝ действие през следващите 30 години.

Етапи на модернизацията

Модернизацията на GPS, в резултат на която се очаква да се изгради т.нар “Архитектура 2020” на системата, се предвижда да протече най-общо в две фази. Задачите, които трябва да се постигнат в първата от тях са формулирани в правителствените документи, посочени по-горе, а последващите дейности предстои да се конкретизират в бъдеще.



Фиг. 12.1. Модернизация на структурата на спътниковите сигнали

По отношение на космическия сегмент, първата фаза се свързва с модифициране на наличните, но все още не изведени в орбита, спътници “Блок IIR” (12 бр.), както и на тези от следващо поколение “Блок IIF”. В резултат на това още през следващите две-три години се очаква в ефира да се появят навигационни сигнали с по-голяма мощност, допълнени с нови компоненти както следва (фиг. 12.1):

- двукратно усилен C/A и P(Y) кодове на L1, четирикратно усилен P(Y) код на L2;
- C/A код на L2 с мощност равна на C/A сигнала на L1;
- първоначален военен M код (M_E) на двете честоти, с мощност по-голяма от тази на P(Y) код;
- трети граждански сигнал на честота L5 с ширина на честотната лента близка до тази на P(Y) код – 24 MHz и мощност двойно по-голяма от тази на C/A код.

Таблица 12.1. Етапи на протичане на модернизацията на GPS

Етап на модернизацията	Мощност на приеманите сигнали, dBW							Срокове	
	L1			L2			L5	Начало на осъществ.	Начална готовност
	C/A	P(Y)	M	C/A	P(Y)	M			
Понастоящем									
Блок II/IIA/IIR	- 160	-163	-	-	-166	-	-	-	-
I фаза									
Блок IIR-M	- 157	-160	-158	- 157	-160	-158	-	2002/3	2007/8
Блок IIF							- 154	2004/5	2011/2
II фаза									
Блок III			- 138			- 138		2008/9	2015/6

Втората фаза се свързва с конструирането на спътници от ново поколение – “Блок III”. С тях се очаква постигането в пълен обем на основните функционални параметри и изисквания, заложиени в модернизацията на GPS. Преди всичко следва да се отбележи въвеждането на същинския M код, седем пъти по-мощен от останалите компоненти на спътниковите сигнали и с възможност за управляемо активиране.

Еволюцията на спътниковите сигнали в хода на модернизацията на системата е обобщена по етапи и срокове в табл. 12.1.

Вземането на решение за дългосрочната политика по отношение на развитието на една многофункционална система, каквато е GPS, е сложен процес, в който се фокусират множество разнопосочни интереси. Такова решение се изработва трудно и е компромисно по своя характер, а реализацията му е свързана не само със значителни инвестиции, а и с постигане на конкретни резултати в областта на високите технологии. Затова отклонения от планираните задачи и сроковете за изпълнението им не би трябвало да се смятат за неочаквани, както впрочем протича цялостното изграждане на системата до сега.

Очаквани последствия за гражданските потребители

От гледна точка на потребителите са най-интересни са измененията в структурата на спътниковите сигнали и по-специално онези от тях, които биха имали пряко въздействие върху точността и бързината на работа, устойчивостта на смущения и възможността за използване на наличните GPS приемници.

а) Новите граждански сигнали

В геодезическите приложения новият граждански сигнал на честота L5, с мощност 4 пъти по-голяма от тази на C/A код към дадения момент и два пъти над заплануваната след I фаза на модернизацията, би могла да се използва за:

- получаване на комбинация от честотите L1 и L5 освободена от влиянието на йоносферната рефракция, с 20% по-малък коефициент на усилване на шума в сравнение с аналогичната комбинация на L1 и L2;
- получаване на широколентова комбинация от честотите L1 и L5 с дължина на вълната около 75 cm и 25% по-нисък шум от аналогичната комбинация на L1 и L2 с дължина на вълната 86.2 cm;
- получаване на нова широколентова комбинация с дължина на вълната около 586 cm, вследствие на смесването на L2 и L5.

Изхождайки от уравнението

$$\Phi = a\Phi_{L1} + b\Phi_{L2} + c\Phi_{L5} ,$$

където Φ_{L1} , Φ_{L2} , Φ_{L5} – фази на приетите сигнали, a , b , c – коефициенти, Φ – фаза на комбинирания сигнал, очакваният ефект от честота L5, постиган за сметка на новите фазови комбинации е представен в табл. 12.2. Разчетът е извършен при мощност на сигналите както следва:

- L1 и L2: –160 dBW, съответстваща на състоянието на системата понастоящем;
- L5: –154 dBW, каквато се очаква да бъде постигната чрез

пътниците “Блок IIF”.

С помощта на новите фазови комбинации се очаква постигането на фиксирано решение за по-кратко време, както и известно повишаване на точността благодарение на по-ефективното редуциране на влиянието на йоносферната рефракция.

Таблица 12.2. Фазови комбинации с L5

Тип на фазовите комбинации Ф	Коефициенти			Дължина на вълната [cm]	Усилване на грешката по разстояние (пъти, спрямо L1) вследствие на :		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>		Шум	Много-пътност	Йоно-сфера
Без йоносферна рефракция	2.546	-		19.0	2.98	1.0	0.0
	2.261	1.984	-	19.0	2.35	1.0	0.0
Широколентови	1	-1		86.2	5.74	4.53	1.28
	1		-1	75.1	4.22	3.95	1.34
		1	-1	586.1	25.96	30.80	1.72

б) Точност

Най-чувствителна към промените в структурата на сигналите и усъвършенстването на другите компоненти на системата е точността на координатите на точките на стоене, определяни на място, във време близко до реалното, без помощта на диференциални корекции или други данни, излъчвани от други източници на информация с наземно или космическо базиране, освен спътниците от GPS. Диференциалните и относителните фазови методи са значително по устойчиви по своите характеристики, защото зависят в по-малка степен от параметрите на спътниковите сигнали, отколкото единичните позиционни определения с помощта на кодови псевдоразстояния.

За да се приведат в съпоставими единици, данните в табл. 12.3 за точността на системата понастоящем и очакваното им подобрение вследствие на модернизацията [GPS ORD] се преобразуват както следва:

- тъй като на вероятната сферична грешка SEP съответства доверителна вероятност 50%, или $\Phi(t) = 0.5$, където $\Phi(t)$ – функция на Лаплас, то стойностите на PPS и SPS се преобразуват с коефициент $1/t$, $t = 0.68$, за да се превърнат в средни квадратични грешки – респ. 23.5 и 147 m;

- зададените с доверителна вероятност 95% ($t = 1.96$) хоризонтална и

вертикална точности в модернизационната програма минимум съответстват на средни квадратични грешки 3.2 и 6.9 m, които са равностойни на 7.6 m в 3D. Аналогично, съпоставимата величина, с която се идентифицира целта на модернизацията на GPS е 2.3 m.

Таблица 12.3. Точност на координатните определения

Към настоящия момент			След модернизацията			
Показател	Стойност	Единици	Точност	Минимум	Цел	Единици
PPS	16	m, SEP	Хоризонтална	6.3	2.1	m, 95%
SPS (с S/A)	100	m, SEP	Вертикална	13.6	4.0	m, 95%

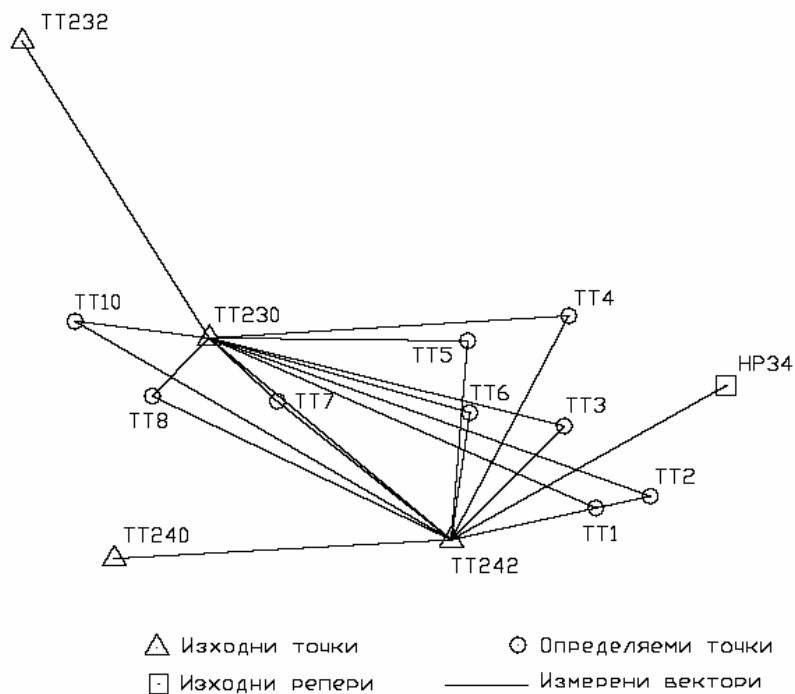
Очевидно стремежът е да се получи радикално (с един порядък) повишаване на точността на определяне на място, в близко до реалното време. Тази цел ще се осъществи за сметка на по-високата мощност на спътниковите сигнали и по-точната им синхронизация, а за гражданските потребители – благодарение на възможността за компенсиране на йоносферната рефракция чрез обработване на сигнали на различни честоти, с каквато понастоящем не разполагат.

Изводи

В най-общи линии, бъдещето на GPS – в светлината на мащабната модернизация, водеща към изграждането на “Архитектура 2020” на системата, може да се прогнозира за срок от 30 и повече години. Усъвършенстването на параметрите на спътниковите сигнали и функционалността на потребителското оборудване дават сериозно основание да се очаква по-широкото навлизане на GPS технологиите в геодезията. Те се интегрират във високотехнологичната геоинформационна среда не само с високата точност на позиционните определения, но и като ефективен източник на пространствени данни за местността, с гъвкави възможности за структуриране, атрибутиране и комуникация с географски бази данни. Разумният подход изисква в България, както в другите страни в Европа и по света, да се създават оптимални условия за ефективното прилагане на GPS в геодезическата практика.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1



Приложение 2

```
#####
#                ИЗМЕРВАНИЯ И ВИСОЧИНИ НА АНТЕНИ                #
#####
```

No	Точки	Начало	Височина на антената
		Край	Вид височина
		Продължителност	Тип антена
1	TT242	15.11.2000 г.	1.465 m
		15.11.2000 г.	Вертикална
		01 ч 28 м 35 с	Trimble Compact L1/L2
2	TT1	15.11.2000 г.	2.000 m
		15.11.2000 г.	Вертикална
		00 ч 15 м 00 с	Trimble Compact L1/L2
3	TT2	15.11.2000 г.	2.000 m
		15.11.2000 г.	Вертикална
		00 ч 09 м 15 с	Trimble Compact L1/L2
4	HP34	15.11.2000 г.	2.000 m
		15.11.2000 г.	Вертикална
		00 ч 08 м 00 с	Trimble Compact L1/L2
5	TT240	15.11.2000 г.	1.990 m
		15.11.2000 г.	Вертикална
		00 ч 08 м 10 с	Trimble Compact L1/L2
6	TT242	16.11.2000 г.	1.465 m
		16.11.2000 г.	Вертикална
		02 ч 28 м 45 с	Trimble Compact L1/L2
7	TT3	16.11.2000 г.	2.000 m
		16.11.2000 г.	Вертикална
		00 ч 07 м 55 с	Trimble Compact L1/L2
8	TT4	16.11.2000 г.	2.000 m
		16.11.2000 г.	Вертикална
		00 ч 08 м 00 с	Trimble Compact L1/L2
9	TT5	16.11.2000 г.	2.000 m
		16.11.2000 г.	Вертикална
		00 ч 08 м 00 с	Trimble Compact L1/L2
10	TT6	16.11.2000 г.	2.000 m
		16.11.2000 г.	Вертикална
		00 ч 08 м 10 с	Trimble Compact L1/L2
11	TT7	16.11.2000 г.	2.000 m
		16.11.2000 г.	Вертикална
		00 ч 08 м 00 с	Trimble Compact L1/L2
12	TT230	16.11.2000 г.	1.980 m
		16.11.2000 г.	Вертикална
		00 ч 07 м 55 с	Trimble Compact L1/L2
13	TT8	16.11.2000 г.	2.000 m
		16.11.2000 г.	Вертикална
		00 ч 08 м 00 с	Trimble Compact L1/L2

Приложение 2 (Продължение)

No	Точки	Начало Край Продължителност	Височина на антената Вид височина Тип антена
14	TT10	16.11.2000 г. 16.11.2000 г. 10 ч 43 м 10 с 10 ч 51 м 10 с 00 ч 08 м 00 с	2.000 m Вертикална Trimble Compact L1/L2
15	TT230	16.11.2000 г. 16.11.2000 г. 11 ч 28 м 45 с 14 ч 22 м 20 с 02 ч 53 м 35 с	1.455 m Вертикална Trimble Compact L1/L2
16	TT8	16.11.2000 г. 16.11.2000 г. 11 ч 34 м 60 с 11 ч 43 м 50 с 00 ч 08 м 50 с	2.000 m Вертикална Trimble Compact L1/L2
17	TT10	16.11.2000 г. 16.11.2000 г. 11 ч 52 м 00 с 12 ч 02 м 05 с 00 ч 10 м 05 с	2.000 m Вертикална Trimble Compact L1/L2
18	TT232	16.11.2000 г. 16.11.2000 г. 12 ч 13 м 35 с 12 ч 21 м 40 с 00 ч 08 м 05 с	1.970 m Вертикална Trimble Compact L1/L2
19	TT1	16.11.2000 г. 16.11.2000 г. 12 ч 37 м 25 с 12 ч 52 м 25 с 00 ч 15 м 00 с	2.000 m Вертикална Trimble Compact L1/L2
20	TT2	16.11.2000 г. 16.11.2000 г. 12 ч 58 м 10 с 13 ч 06 м 05 с 00 ч 07 м 55 с	2.000 m Вертикална Trimble Compact L1/L2
21	TT3	16.11.2000 г. 16.11.2000 г. 13 ч 12 м 20 с 13 ч 20 м 40 с 00 ч 08 м 20 с	2.000 m Вертикална Trimble Compact L1/L2
22	TT4	16.11.2000 г. 16.11.2000 г. 13 ч 28 м 30 с 13 ч 36 м 45 с 00 ч 08 м 15 с	2.000 m Вертикална Trimble Compact L1/L2
23	TT5	16.11.2000 г. 16.11.2000 г. 13 ч 41 м 20 с 13 ч 49 м 20 с 00 ч 08 м 00 с	2.000 m Вертикална Trimble Compact L1/L2
24	TT6	16.11.2000 г. 16.11.2000 г. 13 ч 53 м 15 с 14 ч 01 м 10 с 00 ч 07 м 55 с	2.000 m Вертикална Trimble Compact L1/L2
25	TT7	16.11.2000 г. 16.11.2000 г. 14 ч 09 м 35 с 14 ч 17 м 30 с 00 ч 07 м 55 с	2.000 m Вертикална Trimble Compact L1/L2

Приложение 3

```
#####
#                                ВЕКТОР TT242 - TT1                                #
#####
```

1. Измервания

Време	Дата	Час	
Начало	15.11.2000 г.	14 ч 03 м 20 с	
Край	15.11.2000 г.	14 ч 18 м 20 с	
Продължителност		00 ч 15 м 00 с	

2. Координати на точките

Станция	Референтна	Мобилна	
Система WGS84	TT242	TT1	
Ширина	44°00'28.07830"	44°00'35.48009"	
Дължина	22°55'33.18085"	22°56'20.00114"	
Височина	72.651 m	72.697 m	
X	4231971.121	4231418.577	
Y	1789907.964	1790806.688	
Z	4408765.443	4408929.788	
Височини на антените	1.465 m	2.000 m	

3. Пространствен вектор

Величина	Стойност	Ср.кв. грешка	
dX	-552.544 m	0.001 m	
dY	898.724	0.001	
dZ	164.345	0.001	
Дължина	1067.717 m	0.000 m	

4. Статистики

Брой на спътниците (минимум)	6
Интервал на регистриране [сек]	5
Вид на измерванията използвани в решението	L1
Вид на решението	фиксирано
Дисперсионно съотношение	28.707
Средна квадратична грешка на единица тежест	0.757
Средна квадратична грешка на измерванията [м]	0.003

5. Ковариационна матрица

	X	Y	Z
X	1.77371E-0006		
Y	1.40335E-0006	1.49482E-0006	
Z	1.03541E-0006	7.65225E-0007	1.20819E-0006

Приложение 3 (Продължение)

```
#####
#                                BEKTOP TT242 - TT2                                #
#####
```

1. Измервания

Време	Дата	Час	
Начало	15.11.2000 г.	14 ч 22 м 50 с	
Край	15.11.2000 г.	14 ч 32 м 05 с	
Продължителност		00 ч 09 м 15 с	

2. Координати на точките

Станция	Референтна	Мобилна	
Система WGS84	TT242	TT2	
Ширина	44°00'28.07830"	44°00'38.25639"	
Дължина	22°55'33.18085"	22°56'37.61551"	
Височина	72.651 m	72.552 m	
X	4231971.121	4231210.710	
Y	1789907.964	1791144.782	
Z	4408765.443	4408991.317	
Височини на антените	1.465 m	2.000 m	

3. Пространствен вектор

Величина	Стойност	Ср.кв. грешка	
dX	-760.411 m	0.002 m	
dY	1236.818	0.002	
dZ	225.874	0.002	
Дължина	1469.341 m	0.000 m	

4. Статистики

Брой на спътниците (минимум)	7	
Интервал на регистриране [сек]	5	
Вид на измерванията използвани в решението	L1	
Вид на решението	фиксирано	
Дисперсионно съотношение	23.616	
Средна квадратична грешка на единица тежест	1.572	
Средна квадратична грешка на измерванията [m]	0.005	

5. Ковариационна матрица

	X	Y	Z	
X	3.44599E-0006			
Y	1.92568E-0006	1.90598E-0006		
Z	1.33517E-0006	7.79743E-0007	1.85118E-0006	

Приложение 3 (Продължение)

```
#####
# БЕКТОР TT242 - HP34 #
#####
```

1. Измервания

Време	Дата	Час
Начало	15.11.2000 г.	14 ч 40 м 20 с
Край	15.11.2000 г.	14 ч 48 м 20 с
Продължителност		00 ч 08 м 00 с

2. Координати на точките

Станция	Референтна	Мобилна
Система WGS84	TT242	HP34
Ширина	44°00'28.07830"	44°01'04.06376"
Дължина	22°55'33.18085"	22°57'02.14867"
Височина	72.651 m	74.640 m
X	4231971.121	4230489.368
Y	1789907.964	1791432.798
Z	4408765.443	4409565.615
Височини на антените	1.465 m	2.000 m

3. Пространствен вектор

Величина	Стойност	Ср.кв. грешка
dX	-1481.753 m	0.002 m
dY	1524.834	0.001
dZ	800.172	0.002
Дължина	2271.781 m	0.001 m

4. Статистики

Брой на спътниците (минимум)	7
Интервал на регистриране [сек]	5
Вид на измерванията използвани в решението	L1
Вид на решението	фиксирано
Дисперсионно съотношение	17.486
Средна квадратична грешка на единица тежест	1.356
Средна квадратична грешка на измерванията [m]	0.004

5. Ковариационна матрица

	X	Y	Z
X	1.81534E-0006		
Y	5.80243E-0007	7.87008E-0007	
Z	9.09726E-0007	4.13007E-0007	1.71739E-0006

Приложение 3 (Продължение)

```
#####
#                ВЕКТОР TT242 - TT240                #
#####
```

1. Измервания

Време	Дата	Час	
Начало	15.11.2000 г.	15 ч 03 м 20 с	
Край	15.11.2000 г.	15 ч 11 м 30 с	
Продължителност		00 ч 08 м 10 с	

2. Координати на точките

Станция	Референтна	Мобилна	
Система WGS84	TT242	TT240	
Ширина	44°00'28.07830"	44°00'23.65523"	
Дължина	22°55'33.18085"	22°53'44.13343"	
Височина	72.651 m	80.165 m	
X	4231971.121	4233009.165	
Y	1789907.964	1787709.372	
Z	4408765.443	4408672.473	
Височини на антените	1.465 m	1.990 m	

3. Пространствен вектор

Величина	Стойност	Ср.кв. грешка	
dX	1038.043 m	0.001 m	
dY	-2198.592	0.001	
dZ	-92.970	0.002	
Дължина	2433.102 m	0.001 m	

4. Статистики

Брой на спътниците (минимум)	7	
Интервал на регистриране [сек]	5	
Вид на измерванията използвани в решението	L1	
Вид на решението	фиксирано	
Дисперсионно съотношение	25.240	
Средна квадратична грешка на единица тежест	1.144	
Средна квадратична грешка на измерванията [m]	0.004	

5. Ковариационна матрица

	X	Y	Z
X	1.33805E-0006		
Y	4.28602E-0007	6.34682E-0007	
Z	5.71784E-0007	7.03355E-0007	2.52097E-0006

Приложение 3 (Продължение)

```
#####
#                                БЕКТОР TT242 - TT3                                #
#####
```

1. Измервания

Време	Дата	Час	
Начало	16.11.2000 г.	06 ч 52 м 50 с	
Край	16.11.2000 г.	07 ч 00 м 45 с	
Продължителност		00 ч 07 м 55 с	

2. Координати на точките

Станция	Референтна	Мобилна	
Система WGS84	TT242	TT3	
Ширина	44°00'28.07830"	44°00'54.66724"	
Дължина	22°55'33.18085"	22°56'09.86156"	
Височина	72.651 m	76.035 m	
X	4231971.121	4231129.870	
Y	1789907.964	1790439.259	
Z	4408765.443	4409358.018	
Височини на антените	1.525 m	2.000 m	

3. Пространствен вектор

Величина	Стойност	Ср.кв. грешка	
dX	-841.251 m	0.001 m	
dY	531.295	0.001	
dZ	592.575	0.001	
Дължина	1158.069 m	0.000 m	

4. Статистики

Брой на спътниците (минимум)	9	
Интервал на регистриране [сек]	5	
Вид на измерванията използвани в решението	L1	
Вид на решението	фиксирано	
Дисперсионно съотношение	74.904	
Средна квадратична грешка на единица тежест	0.930	
Средна квадратична грешка на измерванията [м]	0.003	

5. Ковариационна матрица

	X	Y	Z	
X	1.65054E-0006			
Y	5.86103E-0007	5.83125E-0007		
Z	7.67687E-0007	3.52614E-0007	1.10290E-0006	

Приложение 3 (Продължение)

```
#####
#                                БЕКТОР TT242 - TT4                                #
#####
```

1. Измервания

Време	Дата	Час	
Начало	16.11.2000 г.	07 ч 10 м 15 с	
Край	16.11.2000 г.	07 ч 18 м 15 с	
Продължителност		00 ч 08 м 00 с	

2. Координати на точките

Станция	Референтна	Мобилна	
Система WGS84	TT242	TT4	
Ширина	44°00'28.07830"	44°01'20.40417"	
Дължина	22°55'33.18085"	22°56'11.21236"	
Височина	72.651 m	68.531 m	
X	4231971.121	4230604.815	
Y	1789907.964	1790249.745	
Z	4408765.443	4409924.044	
Височини на антените	1.525 m	2.000 m	

3. Пространствен вектор

Величина	Стойност	Ср.кв. грешка	
dX	-1366.306 m	0.002 m	
dY	341.781	0.001	
dZ	1158.601	0.002	
Дължина	1823.722 m	0.000 m	

4. Статистики

Брой на спътниците (минимум)	9	
Интервал на регистриране [сек]	5	
Вид на измерванията използвани в решението	L1	
Вид на решението	фиксирано	
Дисперсионно съотношение	61.451	
Средна квадратична грешка на единица тежест	1.367	
Средна квадратична грешка на измерванията [м]	0.004	

5. Ковариационна матрица

	X	Y	Z
X	2.60833E-0006		
Y	1.11341E-0006	1.01605E-0006	
Z	1.18551E-0006	5.15280E-0007	1.66874E-0006

Приложение 3 (Продължение)

```
#####
# ВЕКТОР TT242 - TT6 #
#####
```

1. Измервания

Време	Дата	Час	
Начало	16.11.2000 г.	07 ч 36 м 45 с	
Край	16.11.2000 г.	07 ч 44 м 55 с	
Продължителност		00 ч 08 м 10 с	

2. Координати на точките

Станция	Референтна	Мобилна	
Система WGS84	TT242	TT6	
Ширина	44°00'28.07830"	44°00'57.73006"	
Дължина	22°55'33.18085"	22°55'39.18064"	
Височина	72.651 m	69.742 m	
X	4231971.121	4231331.476	
Y	1789907.964	1789782.526	
Z	4408765.443	4409421.629	
Височини на антените	1.525 m	2.000 m	

3. Пространствен вектор

Величина	Стойност	Ср.кв. грешка	
dX	-639.645 m	0.001 m	
dY	-125.438	0.001	
dZ	656.186	0.001	
Дължина	924.911 m	0.001 m	

4. Статистики

Брой на спътниците (минимум)	9
Интервал на регистриране [сек]	5
Вид на измерванията използвани в решението	L1
Вид на решението	фиксирано
Дисперсионно съотношение	61.506
Средна квадратична грешка на единица тежест	0.787
Средна квадратична грешка на измерванията [m]	0.003

5. Ковариационна матрица

	X	Y	Z
X	1.03377E-0006		
Y	2.12796E-0007	3.63102E-0007	
Z	8.94454E-0007	-6.85119E-0008	2.07272E-0006

Приложение 3 (Продължение)

```
#####
#                                BEKTOP TT242 - TT5                                #
#####
```

1. Измервания

Време	Дата	Час	
Начало	16.11.2000 г.	07 ч 24 м 00 с	
Край	16.11.2000 г.	07 ч 32 м 00 с	
Продължителност		00 ч 08 м 00 с	

2. Координати на точките

Станция	Референтна	Мобилна	
Система WGS84	TT242	TT5	
Ширина	44°00'28.07830"	44°01'14.54799"	
Дължина	22°55'33.18085"	22°55'38.52378"	
Височина	72.651 m	69.115 m	
X	4231971.121	4231004.551	
Y	1789907.964	1789628.358	
Z	4408765.443	4409794.476	
Височини на антените	1.525 m	2.000 m	

3. Пространствен вектор

Величина	Стойност	Ср.кв. грешка	
dX	-966.570 m	0.001 m	
dY	-279.606	0.001	
dZ	1029.033	0.001	
Дължина	1439.217 m	0.000 m	

4. Статистики

Брой на спътниците (минимум)	9	
Интервал на регистриране [сек]	5	
Вид на измерванията използвани в решението	L1	
Вид на решението	фиксирано	
Дисперсионно съотношение	92.706	
Средна квадратична грешка на единица тежест	0.674	
Средна квадратична грешка на измерванията [м]	0.003	

5. Ковариационна матрица

	X	Y	Z	
X	1.31866E-0006			
Y	6.32272E-0007	5.81039E-0007		
Z	5.48965E-0007	2.11653E-0007	8.37270E-0007	

Приложение 3 (Продължение)

```
#####
# ВЕКТОР TT242 - TT230 #
#####
```

1. Измервания

Време	Дата	Час
Начало	16.11.2000 г.	08 ч 11 м 15 с
Край	16.11.2000 г.	08 ч 19 м 10 с
Продължителност		00 ч 07 м 55 с

2. Координати на точките

Станция	Референтна	Мобилна
Система WGS84	TT242	TT230
Ширина	44°00'28.07830"	44°01'15.20751"
Дължина	22°55'33.18085"	22°54'14.82635"
Височина	72.651 m	74.889 m
X	4231971.121	4231721.186
Y	1789907.964	1787907.478
Z	4408765.443	4409813.126
Височини на антените	1.525 m	1.980 m

3. Пространствен вектор

Величина	Стойност	Ср.кв. грешка
dX	-249.935 m	0.004 m
dY	-2000.486	0.003
dZ	1047.683	0.005
Дължина	2272.015 m	0.004 m

4. Статистики

Брой на спътниците (минимум)	9
Интервал на регистриране [сек]	5
Вид на измерванията използвани в решението	L1
Вид на решението	фиксирано
Дисперсионно съотношение	17.466
Средна квадратична грешка на единица тежест	3.548
Средна квадратична грешка на измерванията [m]	0.006

5. Ковариационна матрица

	X	Y	Z
X	4.65093E-0006		
Y	1.68659E-0006	1.98309E-0006	
Z	2.61867E-0006	1.10375E-0007	5.89600E-0006

Приложение 3 (Продължение)

```
#####
#                                BEKTOP TT242 - TT7                                #
#####
```

1. Измервания

Време	Дата	Час	
Начало	16.11.2000 г.	07 ч 56 м 30 с	
Край	16.11.2000 г.	08 ч 04 м 30 с	
Продължителност		00 ч 08 м 00 с	

2. Координати на точките

Станция	Референтна	Мобилна	
Система WGS84	TT242	TT7	
Ширина	44°00'28.07830"	44°01'00.42778"	
Дължина	22°55'33.18085"	22°54'36.83352"	
Височина	72.651 m	71.298 m	
X	4231971.121	4231820.013	
Y	1789907.964	1788481.363	
Z	4408765.443	4409482.589	
Височини на антените	1.525 m	2.000 m	

3. Пространствен вектор

Величина	Стойност	Ср.кв. грешка	
dX	-151.108 m	0.001 m	
dY	-1426.601	0.001	
dZ	717.146	0.002	
Дължина	1603.846 m	0.001 m	

4. Статистики

Брой на спътниците (минимум)	9
Интервал на регистриране [сек]	5
Вид на измерванията използвани в решението	L1
Вид на решението	фиксирано
Дисперсионно съотношение	50.760
Средна квадратична грешка на единица тежест	1.152
Средна квадратична грешка на измерванията [м]	0.004

5. Ковариационна матрица

	X	Y	Z
X	1.50073E-0006		
Y	4.14288E-0007	5.64020E-0007	
Z	1.12858E-0006	-2.39899E-0008	2.60737E-0006

Приложение 3 (Продължение)

```
#####
#                                BEKTOP TT242 - TT10                                #
#####
```

1. Измервания

Време	Дата	Час	
Начало	16.11.2000 г.	08 ч 43 м 10 с	
Край	16.11.2000 г.	08 ч 51 м 10 с	
Продължителност		00 ч 08 м 00 с	

2. Координати на точките

Станция	Референтна	Мобилна	
Система WGS84	TT242	TT10	
Ширината	44°00'28.07830"	44°01'19.19601"	
Дължината	22°55'33.18085"	22°53'31.21582"	
Височината	72.651 m	72.844 m	
X	4231971.121	4232018.942	
Y	1789907.964	1786978.876	
Z	4408765.443	4409900.227	
Височини на антените	1.525 m	2.000 m	

3. Пространствен вектор

Величина	Стойност	Ср. кв. грешка	
dX	47.821 m	0.009 m	
dY	-2929.088	0.007	
dZ	1134.784	0.008	
Дължина	3141.589 m	0.003 m	

4. Статистики

Брой на спътниците (минимум)	9
Интервал на регистриране [сек]	5
Вид на измерванията използвани в решението	L1
Вид на решението	фиксирано
Дисперсионно съотношение	20.550
Средна квадратична грешка на единица тежест	7.564
Средна квадратична грешка на измерванията [m]	0.009

5. Ковариационна матрица

	X	Y	Z
X	1.05289E-0005		
Y	5.08003E-0006	5.70303E-0006	
Z	4.31018E-0006	1.75765E-0006	7.46367E-0006

Приложение 3 (Продължение)

```
#####
# БЕКТОР TT242 - TT8 #
#####
```

1. Измервания

Време	Дата	Час
Начало	16.11.2000 г.	08 ч 25 м 40 с
Край	16.11.2000 г.	08 ч 33 м 40 с
Продължителност		00 ч 08 м 00 с

2. Координати на точките

Станция	Референтна	Мобилна
Система WGS84	TT242	TT8
Ширина	44°00'28.07830"	44°01'01.66424"
Дължина	22°55'33.18085"	22°53'56.37702"
Височина	72.651 m	70.653 m
X	4231971.121	4232145.866
Y	1789907.964	1787640.806
Z	4408765.443	4409509.586
Височини на антените	1.525 m	2.000 m

3. Пространствен вектор

Величина	Стойност	Ср.кв. грешка
dX	174.745 m	0.006 m
dY	-2267.158	0.004
dZ	744.143	0.006
Дължина	2392.548 m	0.005 m

4. Статистики

Брой на спътниците (минимум)	9
Интервал на регистриране [сек]	5
Вид на измерванията използвани в решението	L1
Вид на решението	фиксирано
Дисперсионно съотношение	12.806
Средна квадратична грешка на единица тежест	5.528
Средна квадратична грешка на измерванията [m]	0.007

5. Ковариационна матрица

	X	Y	Z
X	7.38582E-0006		
Y	3.20577E-0006	3.53832E-0006	
Z	3.05505E-0006	3.18743E-0007	7.21151E-0006

Приложение 3 (Продължение)

```
#####
#                                БЕКТОР TT230 - TT8                                #
#####
```

1. Измервания

Време	Дата	Час	
Начало	16.11.2000 г.	09 ч 34 м 60 с	
Край	16.11.2000 г.	09 ч 43 м 50 с	
Продължителност		00 ч 08 м 50 с	

2. Координати на точките

Станция	Референтна	Мобилна	
Система WGS84	TT230	TT8	
Ширина	44°01'15.20751"	44°01'01.66418"	
Дължина	22°54'14.82635"	22°53'56.37677"	
Височина	74.889 m	70.645 m	
X	4231721.186	4232145.864	
Y	1787907.478	1787640.799	
Z	4409813.126	4409509.579	
Височини на антените	1.455 m	2.000 m	

3. Пространствен вектор

Величина	Стойност	Ср.кв. грешка	
dX	424.678 m	0.002 m	
dY	-266.679	0.002	
dZ	-303.547	0.002	
Дължина	586.183 m	0.000 m	

4. Статистики

Брой на спътниците (минимум)	6	
Интервал на регистриране [сек]	5	
Вид на измерванията използвани в решението	L1	
Вид на решението	фиксирано	
Дисперсионно съотношение	46.391	
Средна квадратична грешка на единица тежест	0.827	
Средна квадратична грешка на измерванията [м]	0.003	

5. Ковариационна матрица

	X	Y	Z	
X	3.86680E-0006			
Y	3.55233E-0006	4.09411E-0006		
Z	2.54704E-0006	2.61468E-0006	2.76392E-0006	

Приложение 3 (Продължение)

```
#####
#                                БЕКТОР TT230 - TT10                                #
#####
```

1. Измервания

Време	Дата	Час	
Начало	16.11.2000 г.	09 ч 52 м 00 с	
Край	16.11.2000 г.	10 ч 02 м 05 с	
Продължителност		00 ч 10 м 05 с	

2. Координати на точките

Станция	Референтна	Мобилна	
Система WGS84	TT230	TT10	
Ширина	44°01'15.20751"	44°01'19.19581"	
Дължина	22°54'14.82635"	22°53'31.21613"	
Височина	74.889 m	72.856 m	
X	4231721.186	4232018.951	
Y	1787907.478	1786978.887	
Z	4409813.126	4409900.231	
Височини на антените	1.455 m	2.000 m	

3. Пространствен вектор

Величина	Стойност	Ср.кв. грешка	
dX	297.766 m	0.003 m	
dY	-928.591	0.002	
dZ	87.105	0.004	
Дължина	979.047 m	0.002 m	

4. Статистики

Брой на спътниците (минимум)	8	
Интервал на регистриране [сек]	5	
Вид на измерванията използвани в решението	L1	
Вид на решението	фиксирано	
Дисперсионно съотношение	20.371	
Средна квадратична грешка на единица тежест	3.051	
Средна квадратична грешка на измерванията [м]	0.007	

5. Ковариационна матрица

	X	Y	Z	
X	2.54162E-0006			
Y	1.18958E-0006	1.80868E-0006		
Z	1.43518E-0006	1.20796E-0006	4.66439E-0006	

Приложение 3 (Продължение)

```
#####
#                ВЕКТОР TT230 - TT232                #
#####
```

1. Измервания

Време	Дата	Час	
Начало	16.11.2000 г.	10 ч 13 м 35 с	
Край	16.11.2000 г.	10 ч 21 м 40 с	
Продължителност		00 ч 08 м 05 с	

2. Координати на точките

Станция	Референтна	Мобилна	
Система WGS84	TT230	TT232	
Ширина	44°01'15.20751"	44°02'24.45955"	
Дължина	22°54'14.82635"	22°53'14.27563"	
Височина	74.889 m	84.500 m	
X	4231721.186	4230883.557	
Y	1787907.478	1786090.042	
Z	4409813.126	4411356.582	
Височини на антените	1.455 m	1.970 m	

3. Пространствен вектор

Величина	Стойност	Ср.кв. грешка	
dX	-837.629 m	0.003 m	
dY	-1817.436	0.002	
dZ	1543.456	0.005	
Дължина	2527.242 m	0.003 m	

4. Статистики

Брой на спътниците (минимум)	6
Интервал на регистриране [сек]	5
Вид на измерванията използвани в решението	L1
Вид на решението	фиксирано
Дисперсионно съотношение	30.398
Средна квадратична грешка на единица тежест	2.148
Средна квадратична грешка на измерванията [м]	0.005

5. Ковариационна матрица

	X	Y	Z
X	3.28077E-0006		
Y	1.11415E-0006	1.69973E-0006	
Z	4.42901E-0006	1.33957E-0006	1.31456E-0005

Приложение 3 (Продължение)

```
#####
#                                БЕКТОР TT230 - TT4                                #
#####
```

1. Измервания

Време	Дата	Час	
Начало	16.11.2000 г.	11 ч 28 м 30 с	
Край	16.11.2000 г.	11 ч 36 м 45 с	
Продължителност		00 ч 08 м 15 с	

2. Координати на точките

Станция	Референтна	Мобилна	
Система WGS84	TT230	TT4	
Ширина	44°01'15.20751"	44°01'20.40417"	
Дължина	22°54'14.82635"	22°56'11.21187"	
Височина	74.889 m	68.525 m	
X	4231721.186	4230604.815	
Y	1787907.478	1790249.733	
Z	4409813.126	4409924.040	
Височини на антените	1.455 m	2.000 m	

3. Пространствен вектор

Величина	Стойност	Ср.кв. грешка	
dX	-1116.371 m	0.004 m	
dY	2342.255	0.002	
dZ	110.914	0.002	
Дължина	2597.064 m	0.000 m	

4. Статистики

Брой на спътниците (минимум)	6	
Интервал на регистриране [сек]	5	
Вид на измерванията използвани в решението	L1	
Вид на решението	фиксирано	
Дисперсионно съотношение	10.835	
Средна квадратична грешка на единица тежест	1.820	
Средна квадратична грешка на измерванията [м]	0.004	

5. Ковариационна матрица

	X	Y	Z
X	8.05059E-0006		
Y	2.91478E-0006	2.22564E-0006	
Z	2.97781E-0006	1.18234E-0006	2.69354E-0006

Приложение 3 (Продължение)

```
#####
#                                БЕКТОР TT230 - TT5                                #
#####
```

1. Измервания

Време	Дата	Час	
Начало	16.11.2000 г.	11 ч 41 м 20 с	
Край	16.11.2000 г.	11 ч 49 м 20 с	
Продължителност		00 ч 08 м 00 с	

2. Координати на точките

Станция	Референтна	Мобилна	
Система WGS84	TT230	TT5	
Ширина	44°01'15.20751"	44°01'14.54779"	
Дължина	22°54'14.82635"	22°55'38.52435"	
Височина	74.889 m	69.110 m	
X	4231721.186	4231004.547	
Y	1787907.478	1789628.369	
Z	4409813.126	4409794.468	
Височини на антените	1.455 m	2.000 m	

3. Пространствен вектор

Величина	Стойност	Ср.кв. грешка	
dX	-716.639 m	0.004 m	
dY	1720.891	0.002	
dZ	-18.658	0.003	
Дължина	1864.239 m	0.003 m	

4. Статистики

Брой на спътниците (минимум)	7	
Интервал на регистриране [сек]	5	
Вид на измерванията използвани в решението	L1	
Вид на решението	фиксирано	
Дисперсионно съотношение	10.826	
Средна квадратична грешка на единица тежест	2.568	
Средна квадратична грешка на измерванията [м]	0.006	

5. Ковариационна матрица

	X	Y	Z	
X	5.29496E-0006			
Y	7.75437E-0007	1.13863E-0006		
Z	2.18466E-0006	5.46923E-0007	3.20173E-0006	

Приложение 3 (Продължение)

```
#####
#                                БЕКТОР TT230 - TT3                                #
#####
```

1. Измервания

Време	Дата	Час	
Начало	16.11.2000 г.	11 ч 12 м 20 с	
Край	16.11.2000 г.	11 ч 20 м 40 с	
Продължителност		00 ч 08 м 20 с	

2. Координати на точките

Станция	Референтна	Мобилна	
Система WGS84	TT230	TT3	
Ширина	44°01'15.20751"	44°00'54.66623"	
Дължина	22°54'14.82635"	22°56'09.86160"	
Височина	74.889 m	76.019 m	
X	4231721.186	4231129.879	
Y	1787907.478	1790439.264	
Z	4409813.126	4409357.984	
Височини на антените	1.455 m	2.000 m	

3. Пространствен вектор

Величина	Стойност	Ср.кв. грешка	
dX	-591.307 m	0.003 m	
dY	2531.786	0.002	
dZ	-455.142	0.002	
Дължина	2639.458 m	0.000 m	

4. Статистики

Брой на спътниците (минимум)	6	
Интервал на регистриране [сек]	5	
Вид на измерванията използвани в решението	L1	
Вид на решението	фиксирано	
Дисперсионно съотношение	13.677	
Средна квадратична грешка на единица тежест	1.272	
Средна квадратична грешка на измерванията [m]	0.004	

5. Ковариационна матрица

	X	Y	Z
X	4.98464E-0006		
Y	2.52796E-0006	2.30821E-0006	
Z	2.26245E-0006	1.34552E-0006	2.20149E-0006

Приложение 3 (Продължение)

```
#####
#                                BEKTOP TT230 - TT6                                #
#####
```

1. Измервания

Време	Дата	Час	
Начало	16.11.2000 г.	11 ч 53 м 15 с	
Край	16.11.2000 г.	12 ч 01 м 10 с	
Продължителност		00 ч 07 м 55 с	

2. Координати на точките

Станция	Референтна	Мобилна	
Система WGS84	TT230	TT6	
Ширина	44°01'15.20751"	44°00'57.72987"	
Дължина	22°54'14.82635"	22°55'39.18111"	
Височина	74.889 m	69.735 m	
X	4231721.186	4231331.471	
Y	1787907.478	1789782.535	
Z	4409813.126	4409421.619	
Височини на антените	1.455 m	2.000 m	

3. Пространствен вектор

Величина	Стойност	Ср.кв. грешка	
dX	-389.714 m	0.002 m	
dY	1875.057	0.001	
dZ	-391.507	0.002	
Дължина	1954.736 m	0.002 m	

4. Статистики

Брой на спътниците (минимум)	7	
Интервал на регистриране [сек]	5	
Вид на измерванията използвани в решението	L1	
Вид на решението	фиксирано	
Дисперсионно съотношение	13.429	
Средна квадратична грешка на единица тежест	1.712	
Средна квадратична грешка на измерванията [m]	0.005	

5. Ковариационна матрица

	X	Y	Z	
X	3.51176E-0006			
Y	5.13321E-0007	7.26967E-0007		
Z	1.26629E-0006	4.01603E-0007	2.24980E-0006	

Приложение 3 (Продължение)

```
#####
#                                БЕКТОР TT230 - TT2                                #
#####
```

1. Измервания

Време	Дата	Час	
Начало	16.11.2000 г.	10 ч 58 м 10 с	
Край	16.11.2000 г.	11 ч 06 м 05 с	
Продължителност		00 ч 07 м 55 с	

2. Координати на точките

Станция	Референтна	Мобилна	
Система WGS84	TT230	TT2	
Ширина	44°01'15.20751"	44°00'38.25583"	
Дължина	22°54'14.82635"	22°56'37.61542"	
Височина	74.889 m	72.547 m	
X	4231721.186	4231210.718	
Y	1787907.478	1791144.783	
Z	4409813.126	4408991.301	
Височини на антените	1.455 m	2.000 m	

3. Пространствен вектор

Величина	Стойност	Ср.кв. грешка	
dX	-510.468 m	0.003 m	
dY	3237.305	0.002	
dZ	-821.825	0.003	
Дължина	3378.775 m	0.000 m	

4. Статистики

Брой на спътниците (минимум)	6	
Интервал на регистриране [сек]	5	
Вид на измерванията използвани в решението	L1	
Вид на решението	фиксирано	
Дисперсионно съотношение	45.915	
Средна квадратична грешка на единица тежест	1.749	
Средна квадратична грешка на измерванията [м]	0.005	

5. Ковариационна матрица

	X	Y	Z
X	4.11481E-0006		
Y	2.26236E-0006	2.53983E-0006	
Z	2.32002E-0006	1.46362E-0006	3.78010E-0006

Приложение 3 (Продължение)

#			
#	ВЕКТОР TT230 - TT1		#
#			
1. Измервания			

Време	Дата	Час	

Начало	16.11.2000 г.	10 ч 37 м 25 с	
Край	16.11.2000 г.	10 ч 52 м 25 с	
Продължителност		00 ч 15 м 00 с	

2. Координати на точките			

Станция	Референтна	Мобилна	

Система WGS84	TT230	TT1	

Ширина	44°01'15.20751"	44°00'35.47944"	
Дължина	22°54'14.82635"	22°56'20.00099"	
Височина	74.889 m	72.683 m	
X	4231721.186	4231418.582	
Y	1787907.478	1790806.687	
Z	4409813.126	4408929.764	

Височини на антените	1.455 m	2.000 m	

3. Пространствен вектор			

Величина	Стойност	Ср.кв. грешка	

dX	-302.604 m	0.001 m	
dY	2899.209	0.001	
dZ	-883.362	0.002	

Дължина	3045.868 m	0.000 m	

4. Статистики			

Брой на спътниците (минимум)			6
Интервал на регистриране [сек]			5
Вид на измерванията използвани в решението			L1
Вид на решението		фиксирано	
Дисперсионно съотношение		42.781	
Средна квадратична грешка на единица тежест		1.022	
Средна квадратична грешка на измерванията [м]		0.004	

5. Ковариационна матрица			

X	Y	Z	

X	1.35635E-0006		
Y	5.60715E-0007	6.16514E-0007	
Z	1.43373E-0006	5.72920E-0007	3.13986E-0006

Приложение 3 (Продължение)

```
#####
#                                BEKTOP TT230 - TT7                                #
#####
```

1. Измервания

Време	Дата	Час	
Начало	16.11.2000 г.	12 ч 09 м 35 с	
Край	16.11.2000 г.	12 ч 17 м 30 с	
Продължителност		00 ч 07 м 55 с	

2. Координати на точките

Станция	Референтна	Мобилна	
Система WGS84	TT230	TT7	
Ширина	44°01'15.20751"	44°01'00.42835"	
Дължина	22°54'14.82635"	22°54'36.83416"	
Височина	74.889 m	71.294 m	
X	4231721.186	4231819.993	
Y	1787907.478	1788481.370	
Z	4409813.126	4409482.599	
Височини на антените	1.455 m	2.000 m	

3. Пространствен вектор

Величина	Стойност	Ср.кв. грешка	
dX	98.808 m	0.001 m	
dY	573.892	0.000	
dZ	-330.527	0.001	
Дължина	669.599 m	0.001 m	

4. Статистики

Брой на спътниците (минимум)	6	
Интервал на регистриране [сек]	5	
Вид на измерванията използвани в решението	L1	
Вид на решението	фиксирано	
Дисперсионно съотношение	30.056	
Средна квадратична грешка на единица тежест	0.573	
Средна квадратична грешка на измерванията [m]	0.003	

5. Ковариационна матрица

	X	Y	Z
X	1.23726E-0006		
Y	1.28766E-0007	2.88569E-0007	
Z	9.95746E-0009	3.73942E-0007	2.04407E-0006

Приложение 4

```
#####
#               АНАЛИЗ НА ГЕОМЕТРИЧНИТЕ УСЛОВИЯ В МРЕЖАТА               #
#####
```

1. Статистически оценки

Несвързки [m]	X	Y	Z
Минимални	-0.019	-0.011	-0.007
Максимални	0.010	0.012	0.034
Ср.квадратични	0.009	0.009	0.017

2. Сключване на триъгълници

No	Триъгълници		dX	dY	dZ
1	TT242	TT1 TT230	-0.005	0.001	0.024
2	TT242	TT2 TT230	-0.008	-0.001	0.016
3	TT242	TT3 TT230	-0.009	-0.005	0.034
4	TT242	TT4 TT230	0.000	0.012	0.004
5	TT242	TT6 TT230	0.004	-0.009	0.010
6	TT242	TT5 TT230	0.004	-0.011	0.008
7	TT242	TT230 TT7	-0.019	0.007	0.010
8	TT242	TT230 TT10	0.010	0.011	0.004
9	TT242	TT230 TT8	-0.002	-0.007	-0.007

Приложение 5

```
#####
# РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗРАВНЕНИЕТО #
#####
```

```
Брой вектори:      22      Координатна система: БГС2000
Брой изходни точки: 2      Референтен елипсоид: GRS80
Брой определяеми точки: 12 Система геодезически височини
```

1. Изходни точки

No	Точки	ШИРИНА	ДЪЛЖИНА	ВИСОЧИНА
1	TT230	44°01'15.20789"	22°54'14.82623"	74.894
2	TT242	44°00'28.07830"	22°55'33.18085"	72.651

2. Определяеми точки

No	Точки	ШИРИНА Ср.кв.гр.	ДЪЛЖИНА Ср.кв.гр.	ВИСОЧИНА Ср.кв.гр.
1	TT1	44°00'35.48003"	22°56'20.00101"	72.695
		0.004	0.005	0.008
2	TT2	44°00'38.25632"	22°56'37.61543"	72.553
		0.006	0.007	0.012
3	TT3	44°00'54.66702"	22°56'09.86152"	76.030
		0.004	0.005	0.009
4	TT4	44°01'20.40432"	22°56'11.21216"	68.531
		0.005	0.006	0.011
5	TT5	44°01'14.54799"	22°55'38.52385"	69.117
		0.004	0.005	0.008
6	TT6	44°00'57.73007"	22°55'39.18070"	69.742
		0.003	0.005	0.008
7	TT7	44°01'00.42803"	22°54'36.83363"	71.295
		0.003	0.005	0.007
8	TT8	44°01'01.66449"	22°53'56.37680"	70.655
		0.006	0.007	0.014
9	TT10	44°01'19.19609"	22°53'31.21593"	72.855
		0.006	0.009	0.014
10	TT232	44°02'24.45993"	22°53'14.27551"	84.505
		0.008	0.015	0.025
11	TT240	44°00'23.65522"	22°53'44.13344"	80.165
		0.006	0.008	0.012
12	HP34	44°01'04.06376"	22°57'02.14866"	74.640
		0.006	0.007	0.012
СРЕДНИ СТОЙНОСТИ		0.005	0.007	0.012

Приложение 6

```
#####
#               ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ТРАНСФОРМАЦИОННИ ПАРАМЕТРИ               #
#####
```

1. Изходни координати на трансформационните точки

Координатна система "1970 г."
Зона: К-3
Балтийска височинна система

No	Точка	x	y	H
1	HP34	-	-	37.913
2	TT230	4787200.470	8473354.510	37.992
3	TT232	4789342.640	8472013.800	-
4	TT240	4785611.720	8472665.220	43.239
5	TT242	4785739.890	8475094.990	35.983

2. Изчислени координати на трансформационните точки

Координатна система BGC2000
Тип: Географски

No	Точка	Ширина	Дължина	Геод.височина
1	HP34	44°01'04.06376"	22°57'02.14866"	74.640
2	TT230	44°01'15.20789"	22°54'14.82623"	74.894
3	TT232	44°02'24.45993"	22°53'14.27551"	84.505
4	TT240	44°00'23.65522"	22°53'44.13344"	80.165
5	TT242	44°00'28.07830"	22°55'33.18085"	72.651

Приложение 6 (Продължение)

3. Изчисление на параметрите за преход в система "1970 г.", зона К-3

Централна точка

X	Y	Z
4231844.551	1787881.868	4409597.672

Трансформационни параметри

Параметър	Стойност	Ср.кв. грешка
Транслация dX	2.396 m	0.031 m
Транслация dY	127.183 m	0.031 m
Транслация dZ	103.788 m	0.031 m
Ротация rX	-4.1136"	4.2567"
Ротация rY	-0.4717"	6.5436"
Ротация rZ	-9.0611"	5.6597"
Машаб m	0.9999613	0.0000163

4. Оценка на точността

Ср.кв. грешка на едно измерване по положение	0.062 m
Ср.кв. грешка на едно измерване по височина	0.058 m

5. Остатъчни отклонения (в метри)

No	Точка	x	y	h
1	HP34	-	-	0.042
2	TT232	0.053	0.030	-
3	TT230	-0.062	-0.004	-0.027
4	TT240	-0.062	0.016	0.053
5	TT242	0.070	-0.041	-0.068

Приложение 6 (Продължение)

#####					
#	КРАЙНИ РЕЗУЛТАТИ				#
#####					
Координатна система "1970 г."					
Зона К-3					
Балтийска височинна система					
No	Точка	x	y	H	
1	HP34	4786844.544	8477080.087	-	
2	TT1	4785965.120	8476138.637	36.012	
3	TT10	4787326.958	8472383.689	35.865	
4	TT2	4786049.621	8476531.271	35.888	
5	TT232	-	-	47.370	
6	TT3	4786558.015	8475914.602	39.297	
7	TT4	4787352.298	8475947.138	31.752	
8	TT5	4787173.831	8475218.551	32.305	
9	TT6	4786654.703	8475231.522	32.963	
10	TT7	4786742.555	8473843.113	34.428	
11	TT8	4786783.844	8472942.142	33.732	

ИЗПОЛЗВАНИ СЪКРАЩЕНИЯ

БА	Българска армия
БАН	Българска академия на науките
Булреф	GPS мрежа от 15 точки на територията на България
ВТС	Военнотопографска служба
ГИС	Географска информационна система
Глонасс	Глобална навигационна спътникова система (Руска федерация)
ГММП	Геодезическа мрежа с местно предназначение
ДГМ	Държавна геодезическа мрежа
ИСЗ	Изкуствен спътник на Земята
МНМК	Метод на най-малките квадрати
РГО	Работна геодезическа основа
УАСГ	Университет по архитектура, строителство и геодезия
ЦЛВГ	Централна лаборатория по висша геодезия
A-S	Anti Spoofing – Система за сигурност в GPS. Състои се в шифриране на P код (виж Y code)
BIH	Bureau International de l'Heure – Международно бюро за време
BKG	Bundesamt fuer Kartographie und Geodaesie – Федерална служба за картография и геодезия
C/A code	Coarse acquisition code – Един от кодовете, които се съдържат в спътниковите сигнали. Виж също <i>P код</i>
CHAMP	Challenging Mini-Satellite Payload – Германска изследователска и приложна спътникова мисия в областта на науките за Земята
CIO	Conventional International Origin – Международно условно начало
CODE	Center for Orbit Determination in Europe – Европейски център за определяне на орбити
CSTG	Commission on International Coordination of Space Techniques – Комисия за международно координиране на космическите технологии
DGPS	Differential GPS – Диференциален метод за

	приложение на GPS
DORIS	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated on Satellite – Система за определяне на спътникови орбити и местоположение на земни обекти чрез доплерови измервания
ECGN	European Combined Geodetic Network – Комбинирана европейска геодезическа мрежа
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay System – Извън системна надстройка за усъвършенстване на навигацията с GPS в Европа
EPN	EUREF Permanent Network
ERS	European Remote Sensing satellite – Спътници на ESA за дистанционно проучване на Земята
ESA	European Space Agency - Европейска космическа агенция
ETRF	European Terrestrial Reference Frame – Координатна система, реализирана в рамките на ETRS
ETRS	European Terrestrial Reference System – Европейска геодезическа референтна система
EUREF	European Reference Frame – Европейска геодезическа референтна система
EuroGeographics	Консорциум на държавните геодезически служби в Европа
EUVN	European Vertical Network – Проект за свързване на височинните системи на европейските страни с GPS измервания
EVRS	European Vertical Reference System – Европейска височинна референтна система
GLONASS	Виж “Глонасс”
GNSS	Global Navigation Satellite System – Глобална навигационна спътникова система
GOCE	Gravity field and steady-state Ocean Current Explorer – Мисия на ESA за измерване на гравитационното поле и високоточно моделиране на геоида
GPS	Global Positioning System – Глобална система за определяне на местоположение (САЩ)
GPST	GPS time - Време измервано по скалата поддържана от GPS
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment – Международна спътникова мисия за изследване на вариациите на гравитационното поле

GRS80	Geodetic Reference System 1980 – Геодезическа референтна система 1980 г.
IAG	International Association of Geodesy – Международна асоциация по геодезия
IAU	International Astronomical Union - Международен астрономически съюз
ICRF	International Celestial Reference Frame – Координатна система, реализирана в рамките на ICRS
ICRS	International Celestial Reference System Международната звездна референтна система
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service – Международна служба за въртенето на земята и референтните системи
IGGOS	Integrated Global Geodetic Observing System – Интеригрирана глобална система за геодезически измервания
IGN	Institut Geographique National – Национален географски институт, Франция
IGS	International GNSS Service – Международна служба за геодинамически изследвания и други граждански приложения на глобалните навигационни спътникови системи
ILRS	International Laser Ranging Service - Международната служба за лазерна локация
ITRF	International Terrestrial Reference Frame – Координатна система, реализирана в рамките на ITRS
ITRS	International Terrestrial Reference System – Международна геодезическа референтна система
IUGG	International Union of Geodesy and Geophysics – Международен съюз по геодезия и геофизика
IVS	International VLBI Service for Geodesy and Astrometry – Международна VLBI служба за геодезия и астрометрия
M code	Military code – Код предназначен за военни потребители, в програмата за модернизация на GPS
MSAS	MTSAT Satellite-based Augmentation System - Извън системна надстройка за усъвършенстване на навигацията с GPS в Япония

Navstar	Другото име на GPS
NUVEL	Northwestern University Velocity Model – Глобален тектонски модел на скоростите
OEM	Original Equipment Manufacturer (modules) – електронни (в случая GPS) модули, предназначени за производителите на потребителско оборудване
P code	Precise code – Един от кодовете, които се съдържат в спътниковите сигнали. Виж също <i>C/A код</i>
PPS	Precise Positioning Service – По-високото (санкционирано) равнище на потребителско обслужване в GPS
PRARE	Precise Range and Range-rate Equipment – Система за високоточно определяне на разстоянието до спътници и скоростта на изменението му
RINEX	Receiver Independent Exchange Format – Формат за обмен на GPS измервания
Rms	Root Mean Square – средна квадратична стойност
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services – Формат за разпространение на данни, необходими за DGPS и RTK
RTK	Real Time Kinematic – Кинематичен метод за приложение на GPS в реално време
S/A	Selective Availability – Система за ограничаване на свободния достъп до данните в GPS сигналите
SEP	Spherical Error Probable – Вероятна сферична грешка (с доверителна вероятност 0.50)
SLR	Satellite Laser Ranging – Измерване на разстоянието до спътници с помощта на лазер
SPS	Standard Positioning Service– По-ниското (със свободен достъп) равнище на потребителско обслужване в GPS
TEC	Total Electron Content - Общо количество електрони в йоносферата
TRF	Terrestrial Reference Frame – Земна (геодезическа) координатна система
TWG	Technical Working Group (of the EUREF) – Техническа работна група на комисията за EUREF
UELN	Unified European Levelling Network – Единна европейска нивелационна мрежа
UTC	Universal Time Coordinated – Световно координирано време

UT1	Universal Time 1 – Световно време 1
VLBI	Very Long Baseline Interferometry – Свръхдългобазисната радиоинтерферометрия
WAAS	Wide Area Augmented System – Извън системна надстройка за усъвършенстване на навигацията с GPS в Северна Америка
W code	W код – Секретен код, с помощта на който се ограничава достъпа до P код (виж Y code)
WGS-84	World Geodetic System 1984 – Световна геодезическа система 1984 г.
Y code	Y код – Шифриран вариант на P код, получен след преобразуването му с W код

ЛИТЕРАТУРА

Генике А., Г. Побединский. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. Москва, Картгеоцентр, 2004

Даскалова М., Ив. Здравчев. Математическа геодезия. София, 2005.

Държавна GPS мрежа. Идеен проект за Държавна GPS мрежа (2002). Министерство на отбраната, Военнотопографска служба, София, 2002.

Държавна GPS мрежа. Проект на мрежата и програма за измерване (2004). Министерство на отбраната, Военнотопографска служба, София, май 2004.

Държавна GPS мрежа. Обработка на наблюденията от основния клас (2005). Централна лаборатория по висша геодезия, Военнотопографска служба, София, септември 2005.

Иванов Н. Първата геодезична мрежа на България. Исторически очерк “Сто години Военнотопографска служба”, София, 1991, 17-33

Йовев Ил. Държавните геодезични мрежи на България и свързаните с тях референтни, координатни и височинни системи. Висша геодезия, 16, София, 2003, 101 – 141

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

Минчев М. Съображения относно геодезическите референтни системи в България. Годишник на УАСГ, XXXIX, св. III, София, 1998, 65 – 77

Стефанов Л., М. Николов. Държавната астрономо-геодезическа мрежа на Р. България. Координатни системи и проекции. Научно-техническа конференция “Координатни системи и геодезически проекции в България”, София, 18.02.2004, 11-20

Хофман-Веленхоф Б., Х. Лихтенегер, Дж. Колинс. Глобалната система за определяне на местоположение. Теория и практика. София, 2002.

Христов Вл. Математическа геодезия. Техника, София, 1964

Altamimi, Z. (2003). Discussion on How to Express a Regional GPS Solution in the ITRF. EUREF Publication No. 12, Proceedings of the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF), Ponta Delgada, 5-8 June, 2002, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, p. 162-167.

Altamimi, Z., C. Boucher (2002). The ITRS and ETRS89 Relationship: New Results from ITRF2000. EUREF Publication No. 11, Proceedings of the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF), Dubrovnik, 16-18 May, 2001, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, p. 49-52.

Altamimi Z., J. Legrand (2005). European Velocity Field and EPN ETRS89 positions and velocities. Paper presented at the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe EUREF in Bratislava, Slovakia, 2-5 June, 2004.

Boucher, C., Z. Altamimi (2001). Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS Campaign. Version 5: 12-04-2001.

DeMets, C., G. Gordon, D.F. Argus, S. Stein (1990). Current plate motion. *Geophys. J. Int.*, 101, p. 425-478.

DeMets, C., G. Gordon, D.F. Argus, S. Stein (1994). Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophys. Res. Lett.* 21, p. 2191-2194.

Department of Defense World Geodetic System 1984: Its definition and relationships with local geodetic systems. NIMA &R8350.2, 3rd edition, 4 July 1997

Erikson C. (ed.) (1994). GPS Positioning Guide. National Resources Canada, Geomatics Canada, Geodetic Survey Division Information Services, p. 111.

Ferland, R., Z. Altamimi, C. Bruyninx, M. Craymer, H. Habrih, J. Kouba (2002). Regional Network Densification. 2002 IGS Workshop „Towards Real-Time, April 8-11, 2002, Ottawa, Canada.

Frizez, P., R. Dach, U. Hugentobler, D. Ineichen, S. Schaer (2002). The Bernese GPS Software – A Processing Tool in EUREF. . EUREF Publication No. 11, Proceedings of the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF), Dubrovnik, 16-18 May, 2001, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, p. 278-280.

Gurtner, W., C. Boucher, C. Bruyninx, H.v.d. Marel (1997). The Use of the IGS/EUREF Permanent Network for EUREF Densification Campaigns. EUREF Publications N 6, Proceedings of the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF), Sofia 4-7 June, 1997, Bayerischen Akademie der Wissenschaften, p. 50-51.

Hugentobler, U., R. Dach, P. Fridez (eds). (2004). Bernese GPS Software Version 5.0 (draft). Printing Office of the University of Bern, September 2004.

Ihde, J., J. Adam, C. Bruyninx, A. Kenyeres, J. Simek (2003). Proposal for the Development of an European Combined Geodetic Network (ECGN). EUREF Publication No. 12, Proceedings of the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF), Ponta Delgada, 5-8 June, 2002, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, p. 49-67.

Keller W. Observation Techniques in Satellite Geodesy, 2003.

Leick A. GPS satellite surveying. Third edition, Wiley, 2004

McCarthy, D.D. (1996). IERS Conventions 1996. IERS Technical Note 21, Observatoire de Paris, 95 pages.

Peter, Y. (2001). Present-day crustal dynamics in the Adriatic-Aegean plate boundary zone inferred from continuous GPS measurements. Dissertation ETH No. 13700, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.

Rothacher, M. (2004). Satellitengeodäsie 1 (Einführung in GPS). München.

Rothacher, M. (1999). Basics of GPS Data Processing. Paper presented at the International Symposium on GPS at Tsukuba, Japan, October 18-22, 1999.

Rothacher, M., T.A. Springer, S. Schaer, G. Beutler (1997). Processing Strategies for Regional Networks. Paper presented at the IAG General Assembly, 1997, Rio, Brazil, September 3-9, 1997.

Soler, T., J. Marshall (2003). A note on frame transformations with applications to geodetic datums. GPS Solutions, 7. p. 23-32.

Zielinski, J. (2001). Unified European Geodetic Reference Frame EUREF Applied for Poland and other Central and East European Countries – Design and Practice. Proceedings of the Regional Workshop on the Use and Application of Global Navigation Satellite Systems, Vienna, 26-30 November 2001.