



Мониторинг на околоземното космическо пространство, астроклимат и основни технологии за наблюдение на космически обекти

**АВТОРЕФЕРАТ
за присъждане на образователна и научна степен
ДОКТОР**

**Институт за космически изследвания и технологии - БАН
филиал Стара Загора,
Секция: Атмосферни оптични изследвания и оптична
лаборатория**

Огнян Димитров Огнянов

Научен ръководител:
доц. д-р Алексей Стоев

**София
2025**

Благодарности

Авторът изказва искрени благодарности на своя научен ръководител доц. д-р Алексей Стоев за професионализма, ясните и целенасочени напътствия, както и за търпението, и неocenимата подкрепата през целия период на работа.

Благодарности се поднасят и на д-р Пенка Мъглова за ползотворното сътрудничество и конструктивни съвети, както и на членовете на научното жури за обективните и ценни препоръки, в резултат на които дисертационният труд придоби завършено научно-изследователско съдържание.

Съдържание

Благодарности.....	2
Глава 1. Увод в наблюдението на космическото пространство.....	10
Космическите отпадъци като обект на научни изследвания.....	10
История и текущо състояние на материалната база за космически наблюдения и проследяване в България.....	13
Спътници, типове спътници, траектории и предназначение.....	14
Какво представляват спътниците?.....	14
Типове спътници.....	14
Орбити на спътници.....	15
Космически отпадъци.....	16
Мониторинг на околоземното космическо пространство.....	16
Откриване и наблюдение на космически обекти.....	16
Наблюдателна апаратура.....	17
Въведение в сензорите за проследяване в космоса.....	17
Наземни срещу космически сензори.....	17
Видове наземни сензори.....	18
Базиран в космоса сензори.....	18
Техники за наблюдение.....	18
Базови концепции на орбиталната механика.....	19
Орбитални Елементи.....	19
Каталогизация – космически бази данни.....	20
Симулация и сценарии.....	21
Глава 2. Избор на подходящи региони и терени за наблюдения.....	22
Предварителен подбор на наблюдателни площадки.....	22
Изследване на астроклимата.....	22
Изследване на светлинното замърсяване.....	23
Разработка на пространствен модел.....	24
Първичен подбор на райони за наблюдение.....	26
Метеорологични станции.....	30
Натрупване и визуализация на данни от метеорологичните станции.....	30
Глава 4. Извършване на проучване за оборудването и методиките за проследяване на космически обекти.....	31
Проучване на предимствата и недостатъците на различни оптически уреди за проследяване на космически обекти.....	31
Сравнение на предимствата и недостатъците на различните техники за проследяване на космически обекти.....	32
Запознаване с водещия опит и най-добрите практики за оптично проследяване на космически обекти.....	33
Глава 5. Разработка на оборудване за проследяване на космически обекти...35	35
Оптична подсистема (главен телескоп, водач).....	35

Механична подсистема (моторизирана стойка, статив за мобилна станция).....	36
Контролер и софтуер за управление.....	36
Подсистема на камерата (Главна камера, водеща камера).....	36
Контролен компютър.....	37
Контролен софтуер.....	37
Софтуер за обработка и сериализация.....	37
Софтуер за оценка на траекторията.....	38
Софтуер за каталог.....	38
Софтуер за планиране на наблюденията и диспечер на задачи.....	38
Глава 6. Избор на техники и стратегии за наблюдение.....	39
Разработване на методология на кампания за наблюдение.....	40
Глава 7. Провеждане на наблюдателната кампания.....	40
Първоначални наблюдения.....	40
Списък на наблюдаваните спътници.....	43
Глава 8. Обработка на резултатите от оптични наблюдения.....	44
Специализиран софтуер.....	44
Оценка на грешката между прогнозираната орбита и реалните измервания.....	45
Глава 9. Определяне орбитите на наблюдаваните спътници.....	47
Използвана методика за определяне на орбитата на спътници.....	47
Наблюдения само за ъгли.....	47
Изчислени орбити в резултат на оптичните наблюдения.....	48
Глава 10. Визуализация на изчислените орбити за космическите обекти.....	50
Характеристики на Gpredict.....	51
Глава 11. Изграждане на национални и над национални мрежи за наблюдение	52
Дейности по създаване на инфраструктурата на Национален Център за	
Наблюдение и Проследяване.....	52
Изисквания за Европейската система за космическо наблюдение.....	53
Съществуващи оптични сензори.....	53
Интеграция към съществуващи и проектиране на сензорни мрежи.....	55
Обмен на данни от кооперативни наблюдения.....	56
Изводи.....	57
Приноси.....	58
Статии на автора по темата на дисертационния труд.....	60
Проекти и доклади на автора по темата на дисертационния труд.....	61
Литература.....	62

Въведение

Единствените нации в света с оперативен капацитет за космическо наблюдение и с рутинно актуализиран каталог на космически обекти днес са САЩ и Русия. В много напреднала фаза е Китай и отчасти Европейският съюз. Космически нации като Япония, Канада, Индия, Бразилия и други имат изградени отделни елементи, но са далече от всеобхватна система за наблюдение на околоземното космическо пространство.

В началото на 2019 г. броят на неклассифицираните обекти в каталога на Мрежата за космическо наблюдение на САЩ (SSN) бе от порядъка на 19 590. Тези каталожни обекти обикновено са по-големи от 10 cm в ниска околоземна орбита (LEO, под 2000 km височина), и по-големи от 1 m в геостационарна орбита (GEO, на височини, близки до 35 786 km). Това се дължи на чувствителността на сензора, която намалява с 1/16 при удвояване на разстоянието на целта до радара и с 1/4 при удвояване на разстоянието на целта до телескопа. Следователно радарите се използват предимно за LEO, а оптичните системи се използват главно за GEO наблюдение и проследяване. По-голямата част от каталожните обекти с количество 75,7% от всички обекти, се намират в LEO региона, под 2000 km надморска височина. Други 8,7% от каталожните орбити са в или близо до пръстена на GEO на $35\,786 \pm 2000$ km надморска височина, в рамките на наклон от $\pm 17^\circ$. Останалата част от каталога принадлежи главно към района на средна земна орбита (MEO), който също съдържа почти кръгови, полусинхронни GPS и GLONASS констелационни орбити близо до 20 000 km надморска височина. Пиковите концентрации на каталожни обекти съществуват на височини от 800 km до 1000 km и около 1400 km. Пиковете в разпределението на наклона са разположени между 65° и 82° . В резултат на това електронната бариера на радарното поле, насочена към зенит, разположена в Европа на 50°N , все още е в състояние да наблюдава почти 80% от цялата популация на SSN каталог на САЩ. Поради слабо населените ленти на наклон под 50° , покритието би се подобрило само с около 5% при преместване на оградата с 20° на юг. От друга страна, покритието би намаляло с 20% при преместване на 20° на север. Следователно европейските географски ширини са добър компромис между процента наблюдателно покритие на орбиталните обекти и честите преминавания над станциите.

Актуалност

Бързо растящият брой малки- и микро- сателити и перспективи за развитие на големи флотилии от спътници допълнително увеличават необходимостта от надеждна и навременна информация за космическите обекти. Всъщност, в Европа основната цел на системата за наблюдение на ситуацията в космоса е да подкрепи европейското независимо използване и достъп до научните изследвания чрез осигуряване на навременни и качествени данни, информация, услуги и знания за околната среда (атмосфера и околоземно пространство), заплахите и устойчивата експлоатация на спътниковите системи в космическото пространство. Европейската космическа агенция (ESA), от 2009 г. насам провежда програма за наблюдение на ситуацията в космоса (Space Situational Awareness - SSA) с три сегмента – космическо време (Space Weather - SWE), контрол върху обектите близо до Земята (NEO) и наблюдението и проследяването на космическото пространство - SST. Третата част на програмата е одобрен от ЕКА през декември 2016 г. за тригодишен период, считано от 2017 г.

И тъй като небето и летящите в околоземния космос обекти станаха всеобщ проблем за човечеството, създаващи нова парадигма за по-нататъшното развитие на космическите технологии, това изисква на този етап поне опит за детайлно познаване на изкуствените тела, летящи в близкия Космос. Това е свързано особено с бързо нарастващото количество части от космически апарати и сателити, които нанасят огромни поражения и икономически загуби при сблъсък с действащи сателити. Затова тяхното наблюдение, определянето на орбитите им и каталогизирането им е задача със силно нарастващо значение. Всичко това налага създаване на мрежа за космическите наблюдения и проследяване (SST) и в България.

В началото на 2019 г. броят на неклассифицираните обекти в каталога на Мрежата за космическо наблюдение на САЩ (SSN) бе от порядъка на 19 590. Тези каталожни обекти обикновено са по-големи от 10 cm в ниска околоземна орбита (LEO, под 2000 km височина), и по-големи от 1 m в геостационарна орбита (GEO, на височини, близки до 35 786 km). Това се дължи на чувствителността на сензора, която намалява с 1/16 при удвояване на разстоянието на целта до радара и с 1/4 при удвояване на разстоянието на целта до телескопа. Следователно радарите се използват предимно за LEO, а оптичните системи се използват главно за GEO наблюдение и проследяване.

Цели на изследването

Целта на настоящето изследване е да се изследват технологиите и подходите за контрол на околоземното космическо пространство и факторите, които влияят върху ефективността на наблюденията и възможностите за откриване и проследяване на космически обекти.

Задачата е изключително всеобхватна, изискваща разнородни познание и компетенции от различни научни области. Това поражда необходимостта от многообразни и целенасочено обединени синкретично научни подходи, за да бъде оформена цялостна визия.

Такъв капацитет през 80-те години на 20 век е съществувал в нашата страна, когато активно са се провеждали космически изследвания. Понастоящем този капацитет е изгубен и трябва да се изгражда на практика от начало.

Целта на настоящото изследване е:

Създаване на цялостна концепция за изграждане и развитие на система за наблюдение и контрол на околоземното космическо пространство на територията на Република България.

Тази задача не е самоцел, а е част от усилията на България да стане пълноправен член на Европейската Космическа Агенция.

Плановите за създаване на независим капацитет за контрол на космическото пространство са решения на европейския съюз и се изпълняват в тясно сътрудничество с европейската космическа агенция.

България на този етап не участва в тази дейност поради липса на национален капацитет. Изграждането на такъв е условие за участие в общо европейските наблюдателни и контролни мрежи за космическото пространство.

Задачата е изключително амбициозна. Обхваща аспекти от различен характер - научен, технически, организационен, както и политически. Форматираната в последващите редове структура на работа е съобразена с поставените задачи, за да предложи максимално пълна картина по структурирането на нужния ресурс от специалисти, компетенции, дейности и финансиране.

Задачи

Постигането на поставените цели изискват следните действия:

1. Проучване на местата подходящи за разполагане на наблюдателни станции.
2. Изследване астроклимата на избраните местоположения.
3. Изследване на техниките за наблюдение на близки космически обекти
4. Провеждане на наблюдателна кампания в България и заснемане на близки космически обекти.
5. Изследване на характеристиките на оборудване и софтуер подходящи за наблюдение на близки космически обекти.
6. Обмяна на опит с водещи международни специалисти, обсерватории и организации в областта на наблюдението на космически обекти в близка околоземна орбита.

Глава 1. Увод в наблюдението на космическото пространство

Наблюдението на космически обекти в близка околоземна орбита е необходимо главно от съвсем практически съображения. От започването на космическата ера за управление на изведените в орбита апарати е необходимо да знаем параметрите на орбитата, в която сме ги извели. Без това знание ние нямаме възможност да извършваме корекции в орбитата, когато се налага. Не може да следим кога спътникът преминава над нас, за да може да осъществим сеанс на радиовръзка, нито може да изпратим команда за заснемане на територия, ако не разполагаме с информация за местоположението на спътника. Другият основен клас приложения на наблюдението на космическите обекти има основно военен характер и касае събирането на информация за местоположението на потенциален противник (McCall and Darrah, 2014). Това се налага първо за да имаме възможност евентуално да неутрализираме или унищожим противниковите спътници, или най-малкото да се прикрием когато заснемат наша територия (Baird, 2013). Може би на пръв поглед най-малко значимият клас приложения на космическото наблюдение и проследяване, но един от най-важните е проследяването на космическите отпадъци.

Космическите отпадъци като обект на научни изследвания

Техногенното замърсяване на околоземното космическо пространство (ОКП) е особено актуален проблем на съвременния етап. Той заема първостепенно място в списъка на космическите заплахи, в който са астероидно-кометната опасност, проблемът с екстремумите на „космическото време“, био-риска от въвеждане на планетарна карантина и др. Това дава сериозна значимост на проблема, свързан с тоталната космизация на човешката цивилизация в първата половина на ХХІ век. Понятието „космически отпадък“ (КО) обикновено се отнася за всички неизползвани изкуствени обекти, намиращи се предимно в околоземното космическо пространство (ОКП). Те включват повредени изкуствени спътници на Земята (ИСЗ), изразходвани степени на ракети, както и фрагменти, образувани при тяхното разпадане и сблъсък. Доминиращият източник на космически отпадъци е събития на разпадане, главно поради експлозии и сблъсъци в орбита (Braun et al., 2017). Всички тези обекти са опасен фактор, влияещ върху функционирането на космическите спътници и орбитални групировки. Основната опасност от космически отпадъци е заплахата от сблъсъци с пилотирани космически кораби, в резултат на което последните могат да бъдат разрушени (ESA Space Debris Office, 2024). Друга опасност, причинена от КО е свързана с падането върху нашата планета на големи спътници или части от тях (Newman et al., 2023), (NASA, 2024). Особено резонансни са паданията, придружени със заплахата от химическо замърсяване, създаване на значителни зони, покрити със силно токсично ракетно гориво, както и падания на ИСЗ с ядрени източници на енергия на борда. Проблемът с космическите отпадъци се счита за основен вид космическа опасност. Поради това, този проблем придобива фундаментален характер и на него са посветени голям брой научни работи. Основна задача днес е задълбоченото изследване на факторите и процесите, които съставляват същността на проблема, както и значението му за устойчивото развитие на човечеството. В същото време най-важната задача на приложната наука е навременното идентифициране на преки заплахи, свързани с КО, надеждна оценка на риска и разработване на методи за противодействие (Merz K. et al., 2017). Това превръща

проблемът с КО в един от най-важните научни проблеми, пред които е изправено човечеството днес.

Обща информация за космическите отпадъци: ЕКА предоставя своите количествени оценки на близки до Земята популации на КО, по-големи от 5 cm, (Olmedo and Sánchez-Ortiz, 2010):

<u>Тип орбита</u>	<u>Условия</u>
LEO (21 484)	Apogee <2000 km 1.5 < mean motion
MEO (1392)	<2.5 rev. d-1 Inclination <67°
GEO (7964)	Perigee >34 000 km Apogee <38 000 km
GTO (218)	Perigee <2000 km 30 000 < apogee <45 000 km
Други (12 779)	

Разпределение на КО по размер: I (0,1–1 см), II (1–10 см), III (>10 см)

Брой обекти на всички височини: I (30 млн), II (900 000), III (34 000)

Както се вижда в примера, броят на опасните тела и съоръжения в околоземното пространство вече се измерва в милиони. Приета е сравнителна класификация на КО по размер, възможните последствия от сблъсъци, както и съществуващите методи за защита на космонавтите в космическите кораби. Данните за КО се актуализират в непрекъснат режим (Flohreg and Krag, 2017), (Sibin, 2019). Както се вижда от данните, броят на обектите, потенциално способни да извадят от строя работещ автоматичен космически кораб или пилотиран космически кораб, достига много стотици хиляди. При това, броят на КО непрекъснато се увеличава. Основният принос за това е извеждането от Съединените щати, Китай, Русия и други страни на все повече ИСЗ. Динамиката на нарастване на броя на големите обекти от космически отпадъци, които се проследяват в системата за непрекъснат мониторинг е огромна. Понякога има намаляване на броя на КО, което се дължат на факта, че за по-ниските орбити работи ефективен механизъм за самопочистване. За най-ниските орбити от 200 км времето за напускане на орбитата се измерва в дни или седмици (Emmert et al., 2021). Но за орбити с височина около 400 км, времето за излизане от орбитата на големи обекти е няколко години, а на височини от 800 и повече километри космическия кораб може да съществува десетки и стотици години. Това показва, че механизмът за самопочистване в ОКП има слаб ефект. Освен това, в близко бъдеще се очаква рязко увеличаване на изстрелванията на комуникационни „сътвездия“ от космически кораби (OneWeb, Samsung, Boeing, SpaceX, SPHERE и др.) с общия брой ново изстреляни десетки хиляди спътници и ситуацията с увеличаването на броя на опасните обекти за космическите кораби ще стане още по-сериозна. Невъзможно е да се открият и да се провежда непрекъснат мониторинг на всички малки (но все пак опасни!) обекти от облака на КО (Gruss, 2015). За анализ на тяхната еволюция се използват модели, които описват структурата и динамиката на популацията им (Berger T. E. et al., 2020), (Berger, 2023). Особено важен елемент от такива модели е описанието на процеса на автогенерация на КО поради сблъсъци (Flegel et al., 2009). Най-обсъжданият сценарий на този процес е описан в края на XX век от експертът на НАСА Д. Кеслер (Kessler and Cour-Palais, 1978). Според най-лошия вариант от този сценарий, когато се

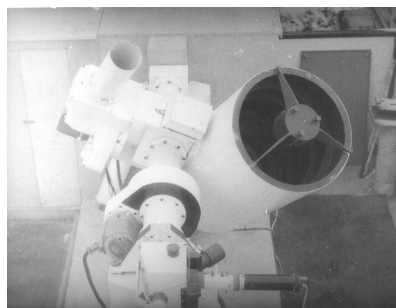
превиши определена критична концентрация от космически отпадъци, процесът на самовъзпроизвеждането им започва да се ускорява. Това заплашва тотално цялата космическа инфраструктура и дейност. Дефиницията на космическите отпадъци, дадена в началото на статията е утвърдена, но тук би било по-правилно да се използва по-точен термин – „техногенни космически отпадъци“. Всъщност, в ОКП постоянно присъстват и естествени отпадъци, които също представляват известна опасност за работещите КА. Обозначавайки техногенният характер на отпадъците в Космоса, терминът „отпадъци“ (на английски *debris*) е бил въведен и все още се използва в структурните изследвания и еволюцията на популацията на малки тела в Слънчевата система. Там терминът „диск от отпадъци“ означава околозвезден диск, съставен от прах и скалисти отпадъци – „строителни отпадъци“, останали от ранните етапи на формиране на планетната система. Този естествен компонент (естествени космически отпадъци) винаги съществува като част от естествената среда около планетите. В ниски орбити, както и в други области на концентрация на ИСЗ (например в зоната на геостационарни спътници), потокът от частици от техногенни космически отпадъци надвишава естествения компонент на средата. Но в други области на околоземното пространство, той може да бъде доминиран от потока от обекти с естествен произход (метеороиди, микрометеороиди, междупланетен прах). Така съотношението на потока изкуствени и естествени отпадъци зависи от мащабите на разглежданата област. Както показва анализът на микрократерите на повърхността на слънчевите панели на телескопа Хъбъл, поток от много малки (микронни) частици, състоящи се главно от алуминиев оксид (резултат от използването на твърдо гориво при космическите полети), в орбитата на телескопа надвишава потока от междупланетен прах. За частици със среден размер, т. н. микрометеороиди броят на ударите почти се изравнява с тези от техногенните отпадъци. Такива сблъсъци, които дори не водят до разрушаване на стените или панелите на космическия кораб, причинявайки щети, подобни на пясъкоструйка.

Това обаче, е особено вредно за слънчевите панели и оптиката на устройства за проследяване на навигационни звезди и научни инструменти. Всички те не могат да бъдат покрити със защитни материали, поради естеството на тяхното предназначение. Естествените космически отпадъци са съществували и ще продължат да съществуват през целия живот на планетата Земя. Техногенните космически отпадъци са се образували, образуват се и ще се образуват в резултат на космическата дейност на човечеството. Проблемът с космическите отпадъци все още е далеч от решение. Ние сме в етап на интензивно изучаване на това, и ролята на науката тук е особено значима и комплексна. Има три основни области на изследване и работа по проблема за КО (Wijnen, 2019): а) откриване и наблюдение на обекти от състава на облака от КО, б) оценка на риска и в) разработване на методи за предотвратяване на свръхконцентрации на КО в околоземното пространство. Тези области са формулирани като типични приложни, но във всяка от тях ролята на фундаменталните изследвания е изключителна, макар и не винаги очевидна (Flohner and Braun, 2015).

Като пространствен обхват, отломките представляват проблем за близката до Земята среда в глобален мащаб и отговорът, може да бъде само глобално поддържано решение. Това създава необходимостта от набор от международно приети мерки за ограничаване на космическите отпадъци. Основен стъпка в тази посока беше направена през 2002 г., когато Междуведомственият комитет за отломки (IADC) публикува първия си доклад, „Насоки за намаляване на космическите отломки“. Този документ и последващите актуализации оттогава

служат, като основа за не-обвързващи политически документи, национално законодателство и като отправна точка за извеждане на технически стандарти (ESA Space Debris Office, 2024).

История и текущо състояние на материалната база за космически наблюдения и проследяване в България



Фиг. 1 (а,б) Фотографска камера АФУ-75 (а) и лазерен далекомер УЛИС (б), монтирани в Наблюдателната станция на ИСЗ на Старозагорските минерални бани

В периода 1958 - 1959, по инициатива на българския астроном академик Никола Бонев - ръководител на катедра "Астрономия" при СУ, който по това време е и председател на Българското астронавтическо дружество, биват създадени три наблюдателни станции - в София, Стара Загора и Варна. Техните номера по регистъра на програмата „Интеркосмос“ са съответно 1101 – София, 1102 – Стара Загора, 1103 – Варна. По-късно, тези станции преминават методично към Централната лаборатория по висша геодезия (ЦЛВГ) при БАН, чиято наблюдателна база е разположена в Плана планина (1101), Народната астрономическа обсерватория „Ю. Гагарин“ (НАО), Стара Загора с наблюдателна станция разположена в Старозагорските минерални бани, Област Стара Загора (1102) и Народната астрономическа обсерватория и планетариум „Н. Коперник“ (НАОП), Варна с наблюдателна база в с. Аврен, област Варна (1103). Първоначално наблюденията се провеждат по метода на визуалните баражи на ИСЗ с помощта на наблюдателни тръби АТ-1 и ТЗК, като точното време е отчитано с морски хронометри. Впоследствие, са закупени кинофототеодолити на Фирмата „Аскания“ и специализирани служби за „Точно време“ с точност на определяне на времето 0,1 сек., което е позволявало да бъдат проведени високоточни наблюдения на ИСЗ с проследяване и на самите спътници. Ефемеридите за наблюдаваните спътници се получават от Астросъвета при АН на СССР, а резултатите от наблюденията се изпращат също там и в Астрономическата обсерватория в Звенигород, Русия. През периода 1979 – 1980 г. от СССР в България са доставени две автоматизирани фотографски камери АФУ – 75 (Автоматическая Фотографическая Камера; D = 210 мм, F = 736 мм) – едната за ЦЛВГ, БАН а другата – за НАО, Стара Загора. Наблюдателната станция на ИСЗ в НАОП, Варна постепенно отпада от списъка на научните наблюдения, поради невъзможност да се оборудва същата със следващо поколение астрономически уреди за наблюдения на ИСЗ.

В перспектива, за нуждите на космическото приборостроене през 1982 г. е създадено Научно производствено предприятие (НПП) „Космос“ към Централната лаборатория за космически изследвания (ЦЛКИ) - БАН. През 1984 – 1986 год. в НПП „Космос“, БАН съвместно с ЛИТМО – Ленинград (дн. Санкт Петербург, Русия) е разработен лазерен далекомер УЛИС-630 за наблюдение на изкуствени спътници на Земята. Изработени са три апарата, инсталирани в

Централната Лаборатория по Висша геодезия, БАН, Астрономическата обсерватория на Държавния университет на Латвия и Астрономическата обсерватория в Звенигород край Москва. Днес в България, за съжаление липсва каквато и да е организация, модерни инструменти и наблюдатели на ИСЗ.

Спътници, типове спътници, траектории и предназначение.

Ще направим кратък обзор за да разгледаме различните типове спътници, техните орбити и критично важната роля, която играят в съвременният свят.

Какво представляват спътниците?

Спътниците са обекти, създадени от човека, обикалящи около небесните тела - най-често около земята. Съществуват и естествени, като луната, но конотацията на темата спътници, обикновено се свързва с обектите, построени от човека. Тези забележителни устройства революционизираха нашият свят, като ни позволиха да създадем глобални комуникации, прецизна навигация, предсказване на времето и различни други приложения за научни изследвания и стопанска дейност.

Космическата ера започва с изстрелването на „Спутник 1“ от Съветският съюз на 4 октомври 1957 г. Тази излъчваща кратки радиосигнали метална сфера, с размер на пляжна топка, прикова вниманието на света и стартира космическата надпревара. САЩ реагираха скоро след това с изстрелването на „Explorer 1“ на 31 януари 1958 г.

Типове спътници

Спътниците се разработват в различни форми и размери, като всеки тип е проектиран за специфични приложения. Нека разгледаме основните категории:

Комуникационни спътници

Този тип спътници са основата на глобалните комуникационни мрежи. Разположени са на големи височини, обикновено на геостационарни орбити. Основната им функция е да приемат и предават радио, телевизия и Интернет на големи разстояния. Когато провеждате международен разговор или гледате телевизионно предаване, има голям шанс то да минава през комуникационен спътник.

Навигационни спътници

Ние използваме услугите на тези спътници без дори да подозираме за това. Навигационните системи GPS (САЩ), GLONASS (Русия), Galileo (Европейски съюз) и BeiDou (Китай), осигуряват прецизна информация за позицията и точното време. Тези групировки от спътници ни осигуряват всичко - от карта на мобилните телефони, до прецизно земеделие и навигация в авиацията.

Спътници за наблюдение на земята

Тези уреди в космоса непрекъснато наблюдават нашата планета, осигурявайки ни безценни данни необходими за прогнози за времето, климатични изследвания и реакция при бедствия. Те могат да проследяват всичко: от нарастването на градовете до обезлесяването, океанските течения и даже движението на ледниците.

Обикновено спътниците за наблюдение на земята се познават по техните слънчево-синхронни орбити, които са с наклон от 98 градуса. Тази орбита им осигурява възможност да преминават над една и съща точка на земята по едно и също време всеки ден.

Научни спътници

От проникване в дълбините на космоса, до изследване на нашата собствена планета, научните спътници са в челните редици на космическите изследвания и технологии. Телескопи като „Хъбъл“ или „Джеймс Уеб“ ни разкриват тайните на отдалечени галактики, докато други спътници изследват явления като слънчевият вятър или земното магнитно поле.

Орбити на спътници

Орбитите на спътниците определят техните възможности и времето им на живот. Нека разгледаме основните типове орбити с които ще се сблъскаме:

Ниска околоземна орбита - Low Earth Orbit (LEO)

Височината на орбитата е от 160 до 2,000 км над земната повърхност. На тези орбити са разположени повечето от спътниците за наблюдение на земята, много комуникационни групировки и международната космическа станция. Спътниците на тези орбити изпълняват една обиколка около земята от 90 мин до 2 часа, поради което изглеждат като бързо движещи се обекти в небето. Например групировката „Стар Линк“ е изградена от такива спътници.

Средна околоземна орбита - Medium Earth Orbit (MEO)

Вземайки регион между 2,000 и 35,786 км, MEO се използват основно за навигационни групировки. Тези орбити осигуряват добър баланс между покривана площ и сила на сигнала, тъй като и двете зависят от разстоянието до земята, но в обратна пропорция. Тук ще намерим GPS спътници, чиято орбита е на приблизително 20,200 км.

Геосинхронна - Geosynchronous Orbit (GSO) и Геостационарна - Geostationary Orbit (GEO)

На височина приблизително 35,786 км, спътниците на GSO имат орбитален период съвпадащ с периода на въртене на земята. Специален случай на GSO е геостационарната орбита, където спътниците остават фиксирани над точка на екватора. Те са идеални за комуникационни спътници и за метеорологични спътници тъй като могат да наблюдават непрекъснато една и съща част от земята.

Геостационарните спътници изглеждат като, че ли висят в определена точка на небето, което облекчава връзката с тях с обикновена фиксирана антена. В симулаторите може да се види, че тези сателити не се движат спрямо земната повърхност.

Силно елиптична орбита (HEO)

Тези яйцевидни орбити имат нисък перигей (най-близък подход до Земята) и висок апогей (най-отдалечена точка от Земята). Те са полезни за комуникация във високи географски ширини и някои видове научни наблюдения. Орбитата на Молния е известен пример, използван от руски комуникационни сателити за осигуряване на покритие на полярните региони.

Космически отпадъци

Като разглеждаме спътниците на орбити около земята, може да забележим, че има значително повече обекти в космоса, отколкото активни сателити. Това ни довежда до критичният въпрос при използването на околоземното пространство: **космическите отпадъци**.

Космическите отпадъци също така известни като „космически боклук“ се състоят от излезли от употреба спътници, части от ракети и фрагменти от сблъсъци или експлозии. Тези отпадъци представляват значителен риск за активните спътници и космическите мисии. Даже много малки парчета от тези отпадъци, движейки се със орбитални скорости, могат да причинят значителни щети по действащите спътници или космически кораби.

Мониторинг на околоземното космическо пространство

Откриване и наблюдение на космически обекти

Основно средство за откриване и наблюдение на космически отпадъци, днес се явява използването на радари и оптични инструменти. За субмилиметрови и микронни размери на частиците от облака на КО, основното средство за регистрацията им са т. н. сензори за сблъсък. В милиметровия диапазон няма средства за наблюдение на космическите отпадъци и дори сензорите за сблъсък са неефективни поради малкия брой такива събития по отношение на ефективната площ на детектора. Обектите на КО могат да бъдат проследявани на ниски орбити със съвременни радари за размери от 1 см и дори по-малки, обаче, те много лесно се губят поради трудността да се проследи тяхната орбитална еволюция. За по-високи орбити са ефективни само оптичните средства за наблюдения (Scott Robert L., 2015). Долният праг на размерите на КО за откриване с такива средства е 5–30 см, в зависимост от височината на орбитите им (Weddell, 2019). Най-изчерпателната гама от технологични възможности за откриване и наблюдение на космически отпадъци имат САЩ. Основната програма за наблюдение КО се осъществява от специално управление на НАСА (NASA Orbital Debris Program Office, Програма за наблюдения на орбитални отпадъци на НАСА) (NASA, 2024), която управлява голям брой специализирани наблюдателни пунктове и инструменти. Сред тях са: Обсерваторията за орбитални отпадъци на НАСА, чийто основен инструмент е живачен телескоп с апертура 3 m (NASA-LMT);

Стратегическото командване на САЩ (USSTRATCOM, United States Strategic Command) и интегрираните към тях центрове за наблюдение на ИСЗ и КО на Европейския съюз обменят информация. Съвместните им наблюдения, използващи наземни радари, телескопи, лазерни далекомири (Flohrer T. et al., 2016), както и космически телескопи генерират актуални данни и поддържат каталог на известните орбитални обекти. Широко разпространено е използването на радар TIRA (Ender, 2012), EISCAT (Европа), Goldstone, Haystack и радар със сфазизирана антенна решетка CobraDane (САЩ). Също така е създадена космическа система за наблюдение на орбитални отпадъци, включително, наблюдения на КО от базирани на сателити SBV, BLOCK 10, ORS5, GSSAP (САЩ), NEOSSAT, SAPHIRE (Канада) (Doubek, 2019), оптични и радарни инструменти (Del Genio G. et al., 2016). Алтернативна мрежа е ISON (Международна научна оптична мрежа) е една от най-големите световни кооперации на обсерватории, специализирани

в наблюдения на сателити, космически отпадъци и малки тела от Слънчевата система (Schmalz S., 2019)

Понятието "космически отломки" (КОтл.) обхваща широк клас космически обекти (КОб.) с изкуствен произход, разположени на различни орбити в околоземното космическо пространство (ОКП). По-нататъшното развитие на космическите полети е невъзможно без познаване на текущата ситуация, анализ на източниците и моделите на еволюция на КОтл. От 90-те години на 20 век повечето от космическите държави започнаха работа за редовно събиране на данни от наблюдения и измервания на КОтл. в рамките на различни международни проекти. На различни етапи от проектите, с повишаването на нивото на знания за КОтл., възникнаха нови задачи и проблеми, които изискваха разработването на нови инструменти и методи за наблюдение им.

На първия етап бяха направени опити за използване на комерсиални телескопи за наблюдение, с чисто астрономическо предназначение (Anheier NC and Chen C., 2014). Но след началото на редовните наблюдения стана очевидно, че технологично остарелите телескопи с малки зрителни полета и недостатъчна проникваща сила на оптиката си не са подходящи за тази цел. Бяха конструирани нови, специално проектирани за тази цел телескопи (Sukhov P., 2007). Тъй като по това време ОКП оставаше неизследвано в този смисъл, основният акцент беше върху създаване на малки инструменти за изследване, способни да наблюдават цялата видима част на ОКП за една нощ (Zhang C., 2019). Особено полезни бяха телескопи със зрително поле 4x4 градуса, като бе разработена техниката на „непрекъснато” (гарантирано за откриване на всички обекти, достъпни по яркост) на небето в почти 20 градуса лента. Тези работи направиха възможно съставянето и поддържането на списък с орбити на ИСЗ с магнитуд до 15 звездна величина.

Във втория етап беше направен опит да се увеличат знанията за слабите спътникови фрагменти на различни орбити, като за целта беше разработена методика с цел откриване на некаталогизирани фрагменти от космически отпадъци, образувани по време на унищожаването на ИСЗ (Virgili B., 2019).

Наблюдателна апаратура

За осигуряване на космическа ситуационна осведоменост (SSA) и сателитно проследяване се провеждат наблюдения на космически обекти, като се използват различни типове сензори с различни възможности и приложения.

Въведение в сензорите за проследяване в космоса

Сензорите са очите и ушите на осъзнаването на ситуацията в космоса. Те откриват, проследяват и характеризират обекти в орбита около Земята, от активни сателити до несъществуващи космически кораби и отломки. Тези сензори се предлагат в различни форми, всяка със своите силни страни и ограничения.

Наземни срещу космически сензори

Сензорите за проследяване на космоса се разделят основно на две категории:

1. Наземни сензори: Разположени на земната повърхност или в земната атмосфера.
2. Базирани в космоса сензори: монтирани на сателити или други космически кораби в орбита.

Видове наземни сензори

Радарни системи (Ender, 2012; Kero J., 2019).

Оптични телескопи (Mokhnatkin, 2017).

Лазерни системи за определяне на разстояние (Kloth, 2019), (Setty et al., 2019).

Радиотелескопи

Базиран в космоса сензори

Космическите сензори стават все по-важни в SSA:

1. Оптични сензори: Камери и телескопи, монтирани на сателити, могат да осигурят непрекъснат мониторинг на зони като GEO пояса, без земни ограничения като времето и циклите ден/нощ.

2. Космически радар: Тези системи могат да осигурят проследяване при всякакви метеорологични условия, ден и нощ на обекти в различни орбити.

3. Космически базирани инфрачервени системи (SBIRS): Тези специализирани сензори откриват инфрачервени емисии, полезни за откриване на изстрелвания на ракети и характеризиране на обекти в орбита.

Типичен представител на Космически базирани системи е канадския проект Neosat (Abbasi, 2019). Друг подобен европейски проект е разгледан в (Utzmann et al., 2014).

Техники за наблюдение

Изчисляване на ъгли на наблюдение

За да се определи кога и къде сателитът ще бъде видим от конкретна наземна станция е необходимо да се изчислят ъглите на видимост между сензора и сателита.

Какво представляват ъглите на наблюдение?

Параметрите на наблюдение се състоят от четири основни компонента:

1. Време: Моментът, в който се изчислява позицията на сателита

2. Азимут (Az): Хоризонталният ъгъл, измерен по посока на часовниковата стрелка от истинския север (0-360 градуса)

3. Надморска височина (El): Вертикалният ъгъл над хоризонта (0-90 градуса)

4. Обхват: Разстоянието между сензора и сателита (обикновено в километри)

Има и един незадължителен компонент:

5. Тип: Типът на въвеждане (например издигане, задаване или максимална надморска височина) В оптичните системи за проследяване често се използват ректасцензия (RA) и деклинация (Dec) вместо азимут и височина.

Базови концепции на орбиталната механика

Уравнението на Кеплер ни позволява да определим връзката между времето и ъгловото изместване в орбита. Ще разгледаме проблема на Кеплер по-късно, защото той се занимава с разпространението на сателит през неговата орбита и изисква да знаем решението на уравнението на Кеплер (Vallado D., 2013), (Hofsteenge R., 2013), (Curtis, 2014).

Нека разгледаме някои от основните концепции на орбиталната механика, които ще трябва да разберем, когато работим с инструменти за астродинамика (софтуер) (Lee S., 2009). Независимо дали проследяваме спътници или анализираме орбити, тези дефиниции ще ни осигурят солидна основа (Wie, 2008), (Weiland C., 2015).

Орбитални Елементи

Всяка орбита се дефинира от шест ключови елемента:

Голяма полуос - Semi-major axis (a)

Дефинира размера на орбитата – измерена в километри

Директно свързана е с орбиталният период

Ексцентрицитет - Eccentricity (e)

Дефинира формата на орбитата

0 = перфектна окръжност

1 = Напускане на орбитата

Типични стойности: 0.0001 - 0.01 (LEO), 0.0 (GEO)

Инклинация – Inclination (i)

Ъгъл между орбиталната равнина и еkvатора – измерва се в градуси

Типични стойности:

0° = екваториална орбита

51.6° = орбита на МКС

98° = слънчево-синхронна орбита

Дължина на възходящият възел - Right Ascension of Ascending Node RAAN (Ω)

Дефинира къде орбитата пресича еkvатора отивайки на север – измерва се в градуси

Промени, дължащи се на сплеснатостта на Земята

Аргумент на перицентъра - Argument of Perigee (ω)

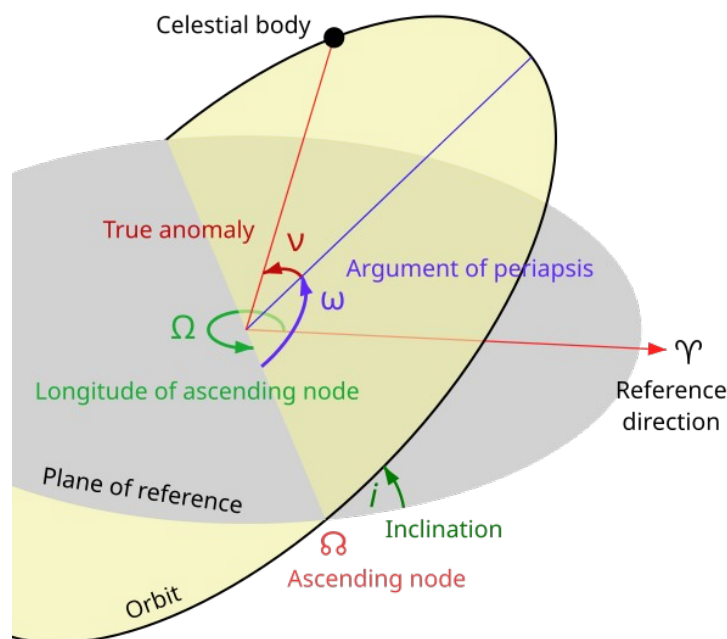
Дефинира ориентацията на орбитата в орбиталната равнина – измерва се в градуси

Важен е за елиптични орбити

Истинска аномалия - True Anomaly (v)

Дефинира позицията на спътника по орбитата – измерва се в градуси

Променя се постоянно с движението на спътника



Фиг. 2, Орбитални елементи

Тези елементи дефинират размера, формата и ориентацията на орбитата в космическото пространство за даден момент. При знанието на тези параметри, може да предвидим бъдещата позиция на тялото по орбитата, използвайки методи за разпространение.

Тези елементи често се наричат Кеплерови елементи, наименувани на Йохан Кеплер, който първи описва законите за движение на небесните тела.

Каталогизация – космически бази данни

Космическите бази данни се поддържат от агенции на съответните държави, разполагащи с капацитет да извършват космически наблюдения. Към днешна дата такива страни са САЩ, Русия и Китай. Европейският съюз изгражда такава система, но с по-скромнен капацитет. С частичен капацитет разполагат и държави като, Япония, Индия, Бразилия и други. На практика единственият обществено достъпен източник за такива данни към момента е Космическите сили S4S (Space Forces – Space) на САЩ. Има и опити за разработка на системи с отворен код (Cefola, 2010).

<https://www.space-track.org> – Уеб сайтът, който предоставя неклассифицирани SSA услуги и информация. Space-Track.org се управлява, поддържа и администрира от S4S.

Съществуват и частни структури които поддържат космически бази данни, като <https://celestrak.org>

Освен изброените източници които предоставят безплатен достъп до данните, съществуват и комерсиални оператори, които разполагат с космически бази данни и предлагат платени услуги за сателитни оператори или за други комерсиални цели.

Един от основните формати чрез който се обменят данни за орбити е TLE. Модел за разчитане на информацията е представена по-долу.

Симулация и сценарии

Визуализацията на орбитите на наблюдаваните обекти и сравнението им с каталожните данни е само началото на процеса за осведоменост в космическото пространство (Space Situation Awareness). Обикновено се изисква решаването на много по-широк кръг от задачи. Най-типичната задача е предотвратяване на сблъсък в космоса. За целта е необходимо да може да проектираме орбитите на всички известни обекти в околоземното космическо пространство за някакъв период напред във времето и да разполагаме с инструмент, който може да измерва разстоянията между обектите във всеки момент от времето. При достигане на някакво критично разстояние (предварително зададено), симулацията трябва да издаде предупреждение. На базата на тези предупреждения, операторите на спътника могат да извършат маневра за избягване на сблъсъка. Например, на Международната Космическа Станция (МКС) сравнително често (няколко пъти годишно) се налага да се извършват маневри за избягване на сблъсък с обекти в космоса. За целта на тази задача сме показали използването на специализирана платформа за 3D визуализация на космическите обекти, която разполага и с инструменти за анализ.

Глава 2. Избор на подходящи региони и терени за наблюдения.

Предварителен подбор на наблюдателни площадки

Основавайки се на концепцията за разпределено наблюдение, проведохме предварителни проучвания на голям брой наблюдателни площадки, сравнявайки техните предимства и недостатъци за избор на най-подходящо място за наблюдение.

Първоначално основните критерии бяха обвързани с необходимостта от ниско светлинно замърсяване и максимално добър астроклимат.

В самото начало не разполагахме с необходимите данни, и за това съставихме списък с предложения, базирани главно на информация от професионалната общност и такива във вече изградени наблюдателни площадки. Стремехът бе да се избегнат съществуващи астрономически обсерватории, поради тяхната заетост с друг вид наблюдения и нежеланието им да отделят наблюдателно време за контрол на близкото околземно пространство.

Друг много важен критерий е сравнително доброто географско разпределение по територията на цялата страна за избягване на облачната покривка.

Последен по ред, но не и по важност критерий бе възможността за осигуряване на наблюдателна база в съответният район. Имайки предвид пълната липса на съдействие от страна на държавните институции, това се превърна в сериозен проблем..

На схемата е представен първоначалният списък с предложения за потенциални наблюдателни площадки.

За да избегнем субективността и прецизираме и обективизираме избора на база измерими параметри, се насочихме към два типа изследвания, играещи решаваща роля в астрономическите наблюдения. Това са:

1. Астроклимат

2. Светлинно замърсяване

Изследване на астроклимата

Астроклиматът е събирателно понятие, което включва обработка и анализ на данни (температура, налягане, влажност, осветеност на небето, динамични процеси в ниска и средна атмосфера) получени *in situ* и от публикувани бази данни.

За наблюдение и описание на астроклимата използваме специализиран софтуерен инструмент, който може да се намери на уеб сайта на проекта на адрес:

<http://weather.acceco.com/>

Интегрираният прозорец за астроклимат използва данни за климатични данни и софтуерният модел на швейцарският оператор Meteoblue. Това е най-добре развитият инструмент за оценка на астроклимата, които ни е известен до момента. Системата е интегрирана с изградената от нас мрежа за метеорологични наблюдения и астроклимат. За момента разполагаме с 3 станции.

На страницата може да се избере съответната измервателна станция и да се провери астроклимата за избраното местоположение.

Облачната покривка

Облачната покривка е дадена за 3 различни надморски височини (0-4 km н.в., 4-8 km н.в., 8-15 km н.в.). Покритието е дадено в проценти за времето на показване. Процентът интегрира обема и плътността на облаците, които се очаква да присъстват. Частичното покритие в два слоя може да доведе до пълно закриване на видимостта на небето, поради припокриване на облаци. При висока облачност частичното покритие може да доведе до пълно прекъсване на видимостта на звездите. В много високи планини на надморска височина над 4000 m (средно за околната среда), прогнозата за долния облачен слой ще бъде празна и трябва да се игнорира, тъй като е приложима само за долината, разположена под 4000 m.

Изследване на светлинното замърсяване

Освен състоянието на атмосферата, друг значим фактор, определящ възможността за провеждане на качествени астрономически наблюдения е светлинното замърсяване.

Това е явление, което се дължи основно на човешката дейност и е свързано с изкуствените източници на светлина, използвани нощно време в населените места.

Тази светлина създава светлинен фон на нощното небе и значително намалява възможността да се наблюдават обекти с ниска яркост.

Степента на светлинното замърсяване зависи основно от два фактора:

- интензивност на нощното осветление
- състояние на атмосферата

Интензивност на нощното осветление

Интензивността на нощното осветление е фактор, който зависи основно от размера и типа на населените места, този фактор е сравнително стационарен и не може да се контролира (освен в случаите на спиране на тока). Затова като се подбира място за наблюдение, е за предпочитане да е отдалечено от големите населени места. Отдалечеността намалява светлинното замърсяване, но значително увеличава логистичните и инфраструктурните проблеми. Обикновено се избира някакъв компромис между изискванията.

Светлинното замърсяване може да се дължи и на естествени източници, като например Луната, която при пълнолуние е изключително ярък обект. Може да се дължи също на природни явления, като полярно сияние, изригване на вулкани, горски пожари и др.

Състоянието на атмосферата

Състоянието на атмосферата оказва влияние върху светлинното замърсяване независимо от източника на светлина (естествен или изкуствен). Обикновено частиците прах, водните капки, водната пара са центровете, които разсейват светлината от различните източници, като част от

тази светлина попада в нашият телескоп и влошава условията за наблюдение на обекти с ниска яркост. На теория, при идеално чиста и суха атмосфера, ефектът на светлинното замърсяване не би бил такъв проблем, освен ако източникът на светлина не излъчва директно в нашия телескоп.

Измервателни единици

Светлинното замърсяване характеризира яркостта на нощното небе и се измерва в магнитуд на квадратна дъгова секунда. За тези измервания се ползват специални сензори като например: SQM, които ще разгледаме по-нататък. Този тип измервания ни позволяват не само да мерим светлинният фон, но и да оценяваме качеството на атмосферните условия за нуждите на наблюдението.

Разработка на пространствен модел

Разгледаните досега подходи за оценка на астроклимата ни дават доста пълна картина на състоянието, но в една точка. За целите на нашата задача е необходимо да разгледаме доста обширни територии, за да може да намерим подходящи места за наблюдение. За тази цел е добре да намерим подход при който да използваме ГИС (Географски Информационни Системи) технологии, най-вече карти на различни параметри, за да осигурим пространствен обхват на нашето изследване. При тези технологии се използват големи симулационни модели на атмосферата за даден регион или за цялото земно кълбо, при които се отразява моментното състояние и има възможност за предсказване на времето за известен период в бъдещето.

За целите на нашето изследване използвахме швейцарския модел на Meteoblue, като един от най-широкообхватните по отношение на наблюдаваните и симулирани параметри.

Идеалното решение би било да съвместим компютърните модели с локални измервания в определени точки за повишаване точността на получените данни.

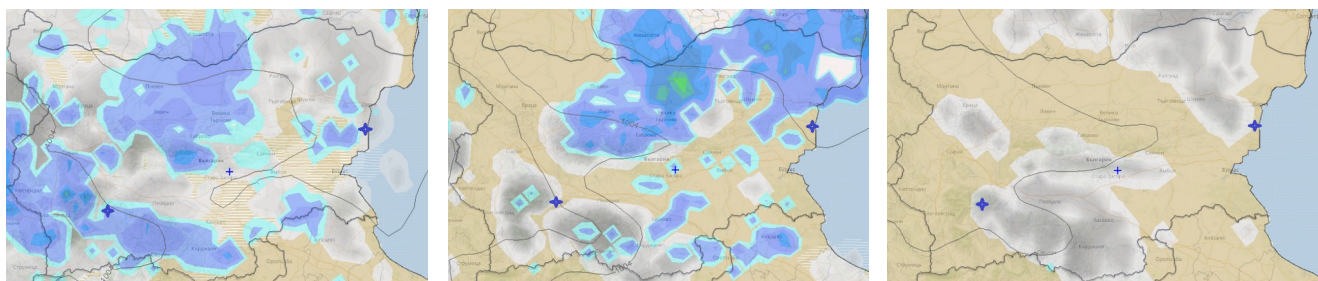
Метеорологията в пространственият модел

За решаване на задачата с пространственото моделиране се спряхме на единствения наличен инструмент с който разполагахме към този момент, а именно компютърно-симулационен модел на атмосферата за нашата страна. След проведено проучване установихме, че за нашите цели най-удачният модел е ECMWF на европейската метеорологична служба с пространствена клетка 22 км. Моделите с по-малка клетка, въпреки, че дават локално по добри данни имат същественият недостатък, като много по къса прогноза, обикновено до 7 дни, а моделът с 22 км. клетка ни предоставя прогноза за 14 дни. Тъй като основният параметър, който ни интересува е облачната покривка, там разстоянията за настъпване на видими промени са по-големи и моделът за 14 дневна прогноза ни устройва напълно.

Основната идея за алгоритъм на работа се състоеше в това да проведем няколко серии от 14 дневни симулации, за да добием обща представа за облачната покривка над нашата страна.

След тази първична груба оценка на състоянието бе решено за 5 конкретни района да се закупят данни за дълги времеви периоди (около 30 години), и да се проведат детайлни количествени, сравнителни анализи. След уточняване на алгоритъма на работа се пристъпи към следващия етап, статистическата обработка на дълги редове от данни с цел получаване и на количествени резултати за обективно сравнение на облачната покривка за дълъг исторически период.

Използвайки информацията от проучването на литературни източници и опита, придобит по време на първичните наблюдения разгледахме различни подходи за осигуряване на висока надеждност на оптичните наблюдения. От всички разгледани варианти установихме, че подходът с разпределена наблюдателна мрежа и централизирано обработване на резултатите дава най-добри резултати. За доказване на това предположение използвахме данни от сателитно наблюдение на облачността над територията на България, през различни периоди от време. На фиг. 3 е представена картина на облачната покривка за 3 последователни дни. С кръст е отбелязано местоположението на наблюдателните станции. Както се вижда от представения пример има висока вероятност поне една от трите наблюдателни станции да е извън облачната покривка, което позволява извършването на оптични наблюдения.



Фиг. 3. Облачната покривка през различни дни

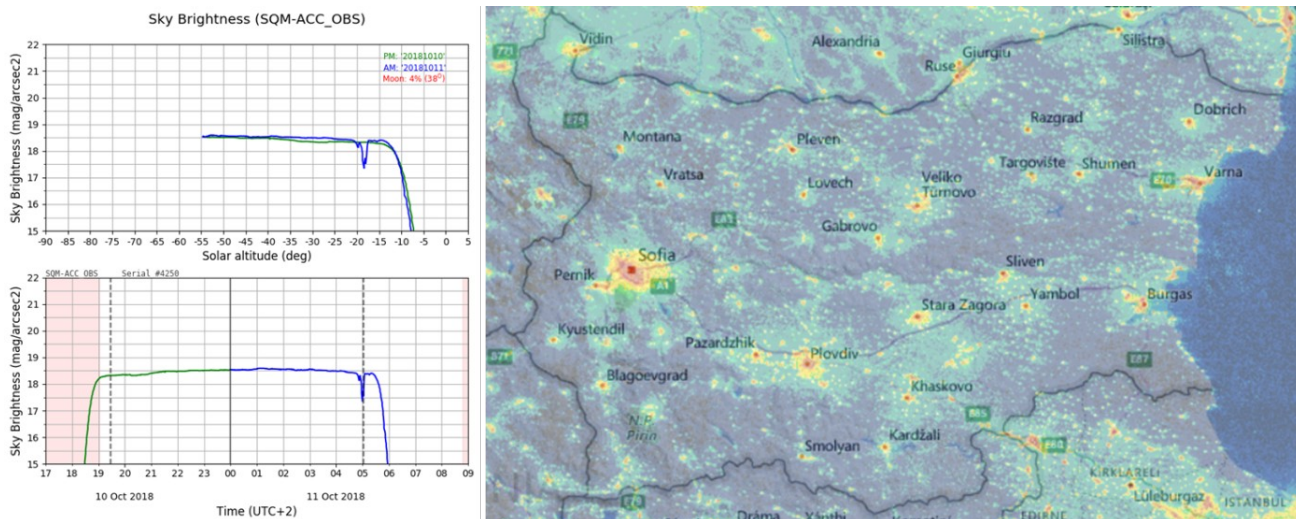
Съответно при по голям брой наблюдателни станции, вероятността поне една да е без облачна покривка нараства значително.

Като второ основно направление на изследванията се фокусирахме върху светлинното замърсяване. За целта използвахме карта на светлинното замърсяване за територията на България.

Светлинно замърсяване в пространственият модел

Видовете карти се използват за наблюдение на светлинното замърсяване по света. Те използват същия вид сензори, като използваните от нас, за да направят карти за светлинното замърсяване около различни места на земята. Тази карта е изготвена от сателитни изображения и показания на сензори. Разбира се от България има само сателитни снимки, което е добър източник на пространствена информация, но с ограничена точност за конкретните стойности.

За да се калибрират стойностите на сателитните снимки е необходимо да се използват данните от наземни сензори. За целта интегрирахме картата на светлинното замърсяване на България с данните от сензорите на светлинното замърсяване на нощното небе, прикрепени към нашите автоматизирани станции за наблюдение.



Фиг. 4. Карта на светлинното замърсяване и показания от SQM сензор

Ограниченият брой наземни сензори, с които разполагаме (към момента Збр.), поставя начало на подобни измервания в нашата страна.

При оценка на районите за наблюдение за светлинно замърсяване трябва да се съобрази с особеностите на терена. Симулацията е прецизна, съобразявайки терена, в резултат на което може да има места, където грешката е голяма.

За тази цел направихме сравнителен анализ на симулираните стойности и реални показания от сензорите за светлинно замърсяване и установихме, че съвпадението е доста добро.

За сравнението сме използвали наблюдение от произволна дата, при което има и период без облаци, т.е. това не е идеален случай, а напълно практически данни. Въпреки това, разликата в стойностите е напълно приемлива. И това е при условие, че симулираната стойност не взема предвид атмосферните ефекти.

Първичен подбор на райони за наблюдение

Извършването на първоначален подбор се оказва съвсем нелека задача поради множество фактори.

По тази причина се ограничихме да направим систематичен преглед на базата на информация от предишни наблюдения и основно от данни от метеорологични карти и карта на светлинното замърсяване.

Друг много важен фактор се оказва възможността или невъзможността за осигуряване на подходящи помещения за провеждане на такива изследвания в съответните райони.

Още повече, като се има предвид и изискването в част от избраните райони да се инсталират измервателни станции, се наложиха много сериозни ограничения на първоначалния списък от обекти.

Едно от много важните изисквания, които си поставихме, беше да обхванем максимално разнообразен климат и височина на терена. Затова се спряхме на максимално широк набор от условия, които са налични в нашата страна. От морски климат и нулева надморска височина, типично равнинен климат с малка надморска височина, планински климат със средна надморска височина, до планински климат с голяма надморска височина.

За всеки от предложените обекти проверихме как може да се осигури достъп и подходящи условия за провеждане на изследването.

От разгледаните 12 предложения избрахме пет като най-перспективни.

1. Аязмото – до Стара Загора
2. Говедарци – Рила планина
3. София
4. Синеморец – южно черноморие
5. Белмекен - Рила планина

След избора на райони за изследване формирахме екипи които да работят в съответните райони и съставихме график за провеждане на изследванията.

Статистическа обработка на дълги редове метеорологични данни

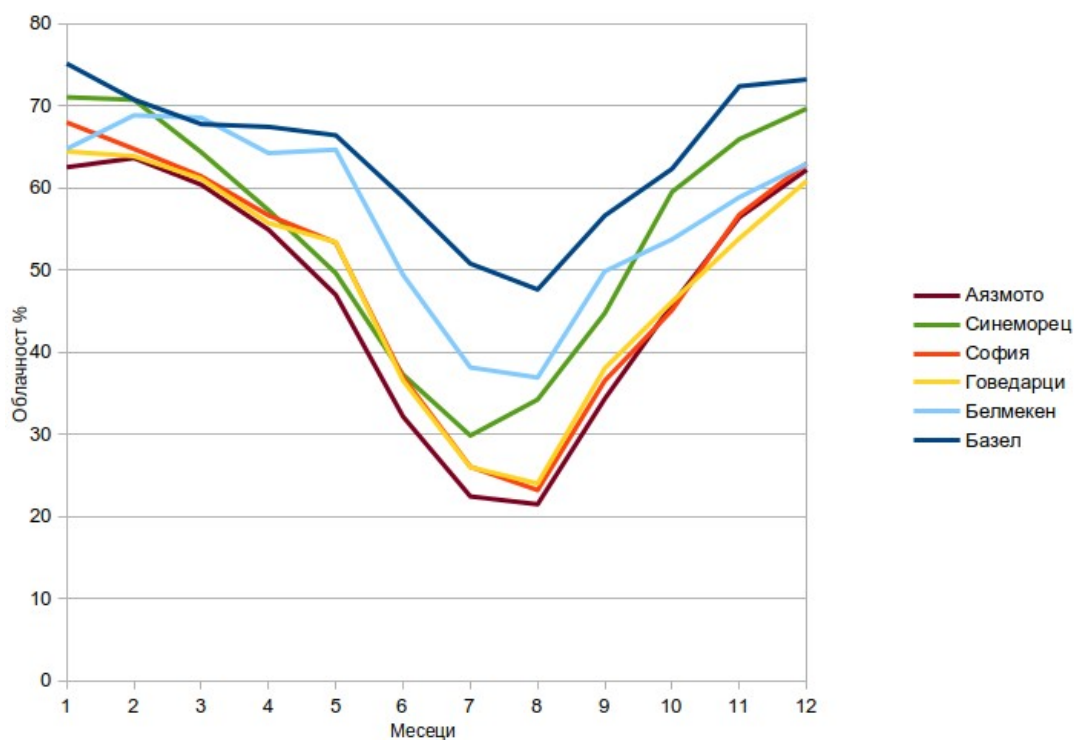
Задачата за обработка и визуализация на данни за дълъг времеви период първоначално не изглеждаше особено предизвикателна. Сложностите започнаха след въпроса за какъв период да се усредняват данните. Очевидно беше, че ако се извърши тотално осредняване за целият период, с цел да се получи едно интегрално число за всеки район, то резултатът ще е доста не информативен. Затова като първи подход, възприехме идеята да се прави осредняване по години.

Тази форма на осредняване е подходяща за визуализация и дава определена представа за броя облачни дни за всеки район, но не ни се стори достатъчно убедителна и липсваха определени детайли, които да ни позволят да я използваме като убедителен критерий за оценка.

Получените данни за % облачност нощем за 35 годишен период (01.01.1985 – 08.03.2019).

Въпреки, че информацията е много детайлна, това я прави трудна за сравнение и оценка.

Налагаше се да намерим друг по-ефективен подход, при които да запазим силните страни на предишните два подхода и същевременно картината да е достатъчно разбираема и да подлежи на оценка. В резултат на тези изводи се разработи нова методика на обработка, при която се запази детайлната информация за месечните норми на облачност, но за да се намали обема на данните за графиката, месечните стойности за целият период са осреднени за всеки месец по отделно. Установихме, че още по-информативно е сравнението на месечната средна нощна облачност за период от 35 години за всичките 5 места:



Фиг.5. Нощна месечна облачност в проценти за период от 35 години.

Стойностите са осреднени за всеки месец от годината за 35 години.

Базел е включен само за референция.

На базата на тези данни е формиран и комплексен процент облачност като сума за целият период. Този коефициент ни позволява да изготвим освен качествена и количествена оценка за процента облачна покривка над всеки от районите.

Таблица 1. Облачната покривка в проценти, осреднена по месеци за период от 33 години.

Месец	Аязмото Облачност %	Базел Облачност %	Белмекен Облачност %	Говедарци Облачност %	Синеморец Облачност %	София Облачност %
1	62.51	75.13	64.74	64.43	71.04	67.97
2	63.62	70.75	68.83	63.86	70.72	64.74
3	60.38	67.76	68.55	61.09	64.34	61.41
4	54.9	67.43	64.23	55.71	57.28	56.64
5	46.97	66.4	64.65	53.39	49.61	53.32
6	32.15	58.85	49.4	36.52	37.25	36.94
7	22.42	50.76	38.13	25.98	29.83	26.03
8	21.47	47.62	36.89	23.99	34.21	23.19
9	34.32	56.62	49.84	38.03	44.73	36.52
10	45.76	62.32	53.73	46.14	59.51	45.11
11	56.41	72.37	58.85	53.84	65.93	56.74
12	62.2	73.19	62.94	60.84	69.65	62.99
сума	46.93	64.10	56.73	48.65	54.51	49.30

Коефициенти за комплексна оценка

Вземайки под внимание всички изброени фактори за избор на най-добро местоположение при избора на площадка за оптично наблюдение на космически обекти, изработихме таблица с критерии.

Таблица 2. Коефициенти на тежест.

Коеф. на тежест	стойност
Облачна покривка - Cb	0.5 x
Светлинно замърсяване - Lp	0.2 y
Съществуваща инфраструктура - Ei	0.1 z
Поддръжка - Sp	0.1 a
Инверсионна мъгла - Ih	0.1 b

Формулата за изчисление на общият резултат:

$$R = (Cb*(100 - x)/100 + Lp*(y-16)/6 + Ei*z + Sp*a/5 + Ih*(100-b)/100)*100$$

Съответно разпределихме теглата на всеки от тези фактори както следва:

Таблица 3. Резултати за коефициента на съответствие

Район	Облачност [%]	Нощна яркост	Инфраструктура [0 - 1]	Поддръжка [от 1 до 5]	Инверсионна мъгла [%]	Общ резултат R	Метеостанция
Аязмото	46.93	20	0.9	4	15	65.37	да
Говедарци	48.65	21.5	0.8	3	10	67.01	да
София	49.3	18.5	1	5	100	61.68	да
Синеморец	54.51	21.5	0.6	3	15	61.58	не
Белмекен	56.73	21.8	0.5	2	10	58.97	не

При така заложените критерии, подреждането на наблюдателните места е следното:

1. Говедарци – Рила планина
2. Аязмото – до Стара Загора
3. София
4. Синеморец – южно черноморие
5. Белмекен - Рила планина

Тъй като първите четири местоположения са на значително разстояние (стотици километри), може да разчитаме на добра триангулация при провеждането на оптични наблюдения на ИСЗ.

Методиката на така проведеното изследване ни дава мощен инструмент за качествена и количествена оценка на потенциални райони, подходящи за астрономически наблюдения.

Въпреки, че нашето изследване беше ограничено по обхват, поради финансови и времеви причини, то доказва, че при правилен научен подход и подходяща методика може да се направи една доста комплексна оценка на множеството често противоречиви фактори за намиране на оптимално решение на задачата за избора на място за наблюдение. Доколкото ни е известно и от разговори с колеги, такова подробно изследване в България досега не е провеждано, даже и при избор на площадки за професионални обсерватории. Целта на изследването е да даде примерна методика на всеки, който в бъдеще ще се занимава с решаването подобни задачи.

Глава 3. Изграждане на мрежа от метеорологични станции и сензори SQM

По време на пазарно проучване за закупуване на метеорологични станции с 2 допълнителни сензора за астроклиматични измервания установихме, че цените са значително по-високи от очакваните, особено за допълнителни сензори. Голямо постижение е, че намерихме начин да решим този проблем, като комбинираме компоненти от различни доставчици, за да се вмести в бюджета на проекта за станции за наблюдение. Предложената конфигурация включва:

1. Интегрирана станция, която измерва: температура, влажност, скорост на вятъра, посока на вятъра, атмосферно налягане, валежи, яркост, слънчева радиация, концентрация на прах.
2. Сензор за прозрачност на въздуха, който работи на принципа на разсейване напред.
3. Sky Quality Meter/небесно светлинно замърсяване/.
4. Регистратор на данни по избор.

Метеорологични станции

За целите на изследването използвахме комбинирани автоматични измервателни станции от последно поколение. Станцията измерва температура, влажност, скорост на вятъра, посока на вятъра, атмосферно налягане, валежи, слънчева яркост, слънчева радиация, концентрация на прах. Данните от станцията се измерват на всяка секунда, след което се натрупват и усредняват и през период от 5 минути се изпращат на централният сървър. Станцията работи напълно автономно и е с резервирано захранване в случай на отпадане на мрежата.

Натрупване и визуализация на данни от метеорологичните станции.

Процесът на събиране на данни ще продължи и след края на проекта. Получените данни са ценен източник на информация за оценка на условията за наблюдение. Тази задача беше завършена по график.

Подготвен е централен сървър за събиране и представяне на данни.

Екипът на проекта подготви уеб сайт на проекта, позволяващ проверка в реално време на събраните метеорологични данни: <http://weather.acceso.com>.

Глава 4. Извършване на проучване за оборудването и методиките за проследяване на космически обекти.

Проучване на предимствата и недостатъците на различни оптически уреди за проследяване на космически обекти.

Проучването се основава и на открити материали за подобни наблюдения, извършени от други екипи и публикуваната литература (Forrest Gasdia, 2016), по въпроса. За оценка на наученото и проверка на теоретичните предположения се наложи да направим някои експерименти с налична апаратура. Въз основа на получените резултати достигнахме до следните изводи:

- Телескопите с голяма апертура са необходими за наблюдения на GEO спътници, защото те са много далеч и слаби.

- Неподвижното насочване на телескопа е необходимо за наблюдения на GEO спътници, тъй като за разлика от звездите и другите спътници те не се движат спрямо Земята с времето. Неподвижното насочване позволява дълго време за получаване на изображението на сателита GEO.

- Телескопите с висока апертура са необходими за наблюдения на MEO спътниците, защото те са доста далеч и доста слаби, но за разлика от GEO спътниците се движат спрямо Земята с времето.

- Моторизираните стойки са подходящи за наблюдения на MEO спътници, тъй като те се движат сравнително бавно спрямо Земята с времето.

- За наблюдения на LEO спътници телелещите с висока апертура изглеждат по-удобни от телескопите, тъй като LEO спътниците се движат много бързо спрямо Земята. В резултат на това те изглеждат много трудни за проследяване с конвенционални телескопи, които имат много тясно поле за наблюдение.

- За наблюдения на LEO сателити най-удобни се оказват телеобективи с фокусно разстояние 180-200 мм. Те имат достатъчно широко поле за наблюдение, за да позволят запис на голям брой изображения по време на едно преминаване на LEO спътник и достатъчно добра разделителна способност, за да позволят прецизно определяне на позицията на LEO спътниците върху небето по време на запис на изображението.

- Моторизираните стойки могат да се използват успешно за наблюдения на LEO спътници с телеобективи с фокусно разстояние 180-200 mm, тъй като LEO спътниците се движат много бързо спрямо Земята. В резултат на това е по-лесно да се проследят с телелещи, отколкото с конвенционалните телескопи, които имат много тясно поле за наблюдение.

- За наблюдения на LEO спътници, обективи с фокусно разстояние 100-200 мм могат да се използват успешно с неподвижен монтаж, тъй като видимото замъгляване на изображенията на звездите е приемливо ниско.

-повечето конвенционални телескопи имат ниска апертура, която не позволява наблюдения на повечето спътници, защото са много слаби и се движат бързо.

-повечето телескопи имат много тясно зрително поле, което прави изключително трудно намирането и проследяването на спътници, за да ги наблюдавате, тъй като те се движат много бързо.

- Използването на фокални редуктори увеличава зрителното поле и апертурата на телескопа. И двете са силно желателни за наблюдения на сателити и космически отпадъци на LEO и MEO орбити. Така че използването на фокални редуктори за телескопи е силно препоръчително за такива наблюдения.

- Използването на бързи CMOS камери с висока чувствителност, дава значителни предимства пред класическите CCD астрономически камери (Żołnowski, 2019).

Сравнение на предимствата и недостатъците на различните техники за проследяване на космически обекти.

След внимателна оценка на най-добрите практики и наличното оборудване за космически наблюдения, решихме да предприемем подход с проследяващ сателит движещ се във времето по траекторията. В този момент сателитното проследяване е спряно и е включено само звездното проследяване. Камерата прави снимка с дълга експозиция, така че сателитът е линия, а звездите са точки на снимката (Yanagisawa, 2019).

Сателитите и космическите отпадъци се движат много бързо в небето, което води до различни техники за техните наблюдения:

I. Проследяване на сателита с телескоп – конвенционалните стойки за телескопи не могат да проследяват сателити с такава скорост, така че, за да се използва тази техника е необходимо да се разработи и изгради специална стойка за телескопи. Ние нямаме финансиране за това и не можем да използваме тази техника.

II. Проследяване на звездите с телескоп. В този случай сателитите се записват като следи, тъй като се движат по-бързо от звездите по небето, така че изглеждат движещи се по отношение на звездите, проследявани от телескопа.

Предимства:

-Тази техника е много удобна за астрометрия на небето и определяне на координатите на сателита.

- позволява наблюдение на много тъмни звезди, което води до по-добра прецизност на астрометрията на небето и определяне на координатите на сателита.

Недостатъци:

-повечето конвенционални телескопи имат ниска апертура, която не позволява наблюдения на повечето спътници, защото са много слаби и се движат бързо.

-повечето телескопи имат много тясно зрително поле, което прави изключително трудно намирането и проследяването на спътници, тъй като те се движат много бързо.

III. Неподвижен телескоп. В този случай GEO спътниците се записват като точки, а звездите като следи, тъй като се движат поради въртенето на Земята.

Предимства:

-Тази техника е много удобна за наблюдения на GEO спътници, тъй като те могат да се наблюдават дълго време с натрупване на светлина. Така че това позволява наблюдения на много слаби GEO сателити.

Недостатъци:

- LEO и MEO спътниците не могат да бъдат наблюдавани с тази техника, защото се движат много бързо.

IV. Неподвижен обектив. Тази техника се оказва много удобна за наблюдение на спътници LEO и MEO

Предимства:

- Обективите имат много широко зрително поле, което улеснява наблюдението на LEO и MEO сателитите, тъй като те се движат много бързо.

- Много обективи имат голяма бленда, която е необходима за наблюдение на сателити.

- Обективите са относително евтини и лесно достъпни.

Недостатъци:

-Тази техника не е много удобна за астрометрия на небето и определяне на координатите на сателитите, защото звездите се появяват като къси следи върху получените изображения. Те са по-дълги за по-голямо фокусно разстояние на лещите.

Повечето от тези недостатъци могат да бъдат преодоленни чрез комбинация от техники II и IV.

Запознаване с водещия опит и най-добрите практики за оптично проследяване на космически обекти.

Нашите посещения в обсерваторията Lustbühel в Грац, Австрия бяха ползотворни. Направихме обмен на опит с водещите международни специалисти и обсерватории в областта на наблюдението на близки космически обекти.



Фиг. 6. Обсерваторията Lustbühel в Грац, Австрия

По време на първото пътуване установихме работни контакти. По-нататъшната кореспонденция с нашите партньори ни даде повече идеи и информация за технологии от най-високо ниво в областта на наблюдението на космическите отпадъци.

Второто ни работно посещение и среща с екипа на Lustbühel Observatory в Грац, Австрия, се проведе в периода 11 – 15 март 2019 г. То ни даде възможност за задълбочени проучвания, учене и дискусии на водещия опит и най-добрите практики за оптично проследяване на космически обекти с нашите партньори от обсерваторията. В резултат на това оформихме ясна визия за необходимото подобрене и актуализации на нашите техники и оборудване за оптично проследяване на космически обекти, за да се присъединим към програмата за информираност за космическата ситуация (SSA) на ESA.

Основната цел на второто посещение в Грац беше да се оцени в детайли текущото ниво на високи постижения в областта на наблюдението на сателити и космически отпадъци. Друга цел беше да се договорят възможни съвместни изследователски дейности в областта на наблюдението на космическите отпадъци, за да се кандидатства за научни проекти.

Сателитното лазерно определяне на разстояние (SLR) е метод за измерване на разстояние до спътници или космически отпадъци с помощта на много къси лазерни импулси. От 1982 г. IWF (Австрийската академия на науките) управлява една от водещите в света SLR станции, обсерваторията Lustbühel (Грац).

SLR станцията в Грац измерва разстоянието до сателитите до орбитална височина от 36 000 километра. За определени цели, използвайки статистически анализ, може да постигне точност под един милиметър. В момента станцията рутинно измерва разстояния до повече от 140 обекта и качва данни в различни центрове за анализ в рамките на Международната лазерна служба (ILRS). Измерванията са отправна точка за определяне на кинематиката и динамиката на сателитите, т.е. параметри на кръгово въртене, гравитационни взаимодействия и др. Поради надеждността и точността на данните, SLR станцията в Грац беше избрана от ILRS, като една от петте референтни станции за целия свят (Kirchner G. and Koidl F., 2015).

Глава 5. Разработка на оборудване за проследяване на космически обекти

С тези първоначални изисквания започнахме да оценяваме кой е най-добрият хардуер и софтуер за изпълнение на такива задачи (Salvador V., 2015). Цялата конфигурация се състои от няколко подсистеми:

- Оптична подсистема (основен телескоп, водач)
- Механична подсистема (моторизирана стойка, статив за мобилна станция)
- Контролер и софтуер за монтаж
- Подсистема на камерата (Основна камера, водеща камера)
- Контролен компютър
- Контролен софтуер
- Обработващ сериализиращ софтуер
- Софтуер за оценка на траекторията
- Софтуер за каталог
- Планировчик за наблюдение и софтуер за диспечер на задачи

След това ще обсъдим всеки от тези елементи от гледна точка на изискванията и опита, натрупан от кампанията за наблюдение на изпитанията.

Оптична подсистема (главен телескоп, водач)

За оптичната подсистема ние фокусираме вниманието си върху системата COTS поради цената и наличността. Резултатът от техническото развитие и пазарните сили е значително разнообразие от съществуващо търговско, готово оборудване (COTS), което може бързо да бъде въведено в експлоатация (Skuljan J. and Kay J., 2016), за произвеждане на наблюдения за космическа ситуационна осведоменост (SSA) (Torres J. et al., 2019), (Kaminski K., 2019).

Персонализираните системи са по-подходящи, но изискват значително по-голямо финансиране. Изборът на най-подходяща оптична система е много сложен компромис между много фактори. Нашият избор се основава на изискването за бърза оптика (f -число < 5), за да може да засича спътници със сравнително ниска осветеност (12 и по-добра звездна величина), при условие на движещ се спътник в кадъра.

Направени са тестове с няколко оптични системи:

Рефлектор на Orion Optics Newton, с диаметър на огледалото $D = 350 \text{ mm}$, фокусно разстояние $1600 \text{ mm} - f/4.6$ с ASA Wynne коректор (0.73x фокален редуктор), който ни позволява да работим с телескопа при $f/3.4$. Тази конфигурация по принцип е добра, но поради много технически трудности не е много използвана.

Celestron C11 Hyperstar с $D=280\text{mm}$, $F 560 f/2$ с хиперзвезден коректор. Тази конфигурация ни дава най-добри резултати и се препоръчва за стационарна станция за наблюдение.

Рефрактор Carl Zeiss F200mm/2.8 – Много добри резултати, отличен е за нашата мобилна станция. Рефрактор на Carl Zeiss F180mm/2.8 – Оптичното качество е по-високо в сравнение с обектив 200/2.8, но механично не е добре монтиран към оборудването.

Няколко обектива с по-късо фокусно разстояние и ниска разделителна способност.

За стационарна наблюдателна станция избрахме Celestron RASA 11. Celestron RASA 14 изглежда по-добре, но е трудно да се намери сензор с голям размер 70 mm и достатъчно бърз, за да заснеме и прехвърли изображение за 1 секунда. С 35 mm сензор зрителното поле ще намалее значително. За мобилна станция избрахме Carl Zeiss Refractor F200/2.8, който е много компактен и отговаря на изискванията за размер, а чувствителността е добра за наблюдение дори на GEO спътници.

Въпреки, че цената на COTS системите е силен аргумент за използването на COTS астрографи, персонализираните оптични системи все още имат своето място в света на SSA. Не всички цели се намират на GEO височини. Сателитите с по-ниска орбита представляват значително по-предизвикателен проблем, изискващ широкообхватни оптични системи с камери, способни да

поддържат висока скорост на кадрите (номинално 1 кадър в секунда) (Ackermann M. et al., 2016).

Механична подсистема (моторизирана стойка, статив за мобилна станция)

Стойките са много важна част от SST оборудването, особено за бързите LEO спътници. Повечето от монтажите на COTS не са подходящи за такава задача, защото не поддържат проследяване на променлива скорост. Разбира се, професионалните стойки като линията Paramount, произведена от Software Bisque или Losmandy стойка, както и G-11, която поддържа проследяване с променлива скорост и се използва успешно в някои проекти, но има някои недостатъци. Първата конфигурация е GEM (German Equatorial Mount), която не е много подходяща за нашите изисквания и има висока цена.

За нашата пробна кампания за наблюдение тествахме няколко конфигурации:

Стандартен Alt/Az COTS монтаж от Celestron. Разбира се, има и недостатъци. Най-важният е хлабината на основната предавка. Разбира се, има софтуерен алгоритъм за компенсация, но е много неудобно да се извършва голяма корекция за малко движение, когато посоката на движение се промени. От механична гледна точка е много подходящ за такива задачи. Ако се използва по-усъвършенстван алгоритъм за компенсиране на хлабината, качеството на движение ще бъде приемливо и такъв монтаж може да се използва за SST.

Моторизираната екваториална монтировка NEQ-6 беше използвана за наблюдения, но има същите недостатъци като първата монтировка и от механична гледна точка не е подходяща за такива задачи.

За мобилна станция използвахме собствено разработена Alt/Az стойка с нулев луфт, което е голямо предимство за наблюдения на LEO SST. Основните недостатъци са по-ниската механична твърдост и системата за вертикално подравняване. Ако недостатъците бъдат коригирани, ще бъде добър кандидат за монтиране на мобилна станция.

Контролер и софтуер за управление

Контролерът и софтуерът за управление на Alt/Az стойка Celestron са добри за процеса на подравняване, могат да поддържат проследяване на скокове, но липсва режим на непрекъснато проследяване за сателити с изчислени данни. Разбира се, може да се използва оптично насочване и това ще подобри проследяването. Алгоритъмът за корекция на обирание на луфтовете не е подходящ за сателитно проследяване.

Необходимо е подобрение на софтуера или смяна на контролер и софтуер.

Контролерът и софтуерът за локално разработен Alt/Az монтаж са по-добри в някои аспекти и поддържат променлива скорост на проследяване. Производителността е много обещаваща, но все още са необходими някои подобрения.

Подсистема на камерата (Главна камера, водеща камера)

Тествани са няколко основни CCD и CMOS камери:

- ST-8300 CCD камера - KAF-8300 CCD с 3326 x 2504 пиксела, 5.4 микрона. • 16-bit A/D, USB2, електронен и механичен затвор.

CCD камерите са стандартни за астрономията, но не са подходящи за SST, тъй като тяхната скорост на предаване е много ниска.

- RisingCam16MP USB3.0 (цветен) – G3-16KPA CMOS с 4640x3506 пиксела, 3,8 микрона. USB3. Много добра камера, широко зрително поле, много нисък шум. Добър за SST.

- ASI174MM (моно) - 1/1,2" Sony CMOS сензор за изображения, с 5,86µm единичен пиксел в 1936 x 1216, 12 бита, USB3, глобален затвор.

Много добра камера, много чувствителна, много нисък шум. Добър за SST.

- Различни потребителски DSLR камери, Canon, Nikon, Olympus – такива камери са подходящи само за пробни SST наблюдения. Недостатъците са цвят, само механичен затвор, трудности с компютърно управление, големи размери.

И няколко водещи камери:

- ASI120MM Mini (моно) - 1MP, нисък шум при четене, висок динамичен диапазон, QE пик <80% .
- ASI290MM Mini (моно) – 2MP, нисък шум при четене, висок динамичен диапазон, QE пик >80% .
- Celestron NexImage5 (цветен) – много висок шум, не е много полезен.

Нашата препоръка е ASI1600MM Pro и ASI174MM за основната камера и ASI120MM или ASI290MM за водещата камера. Общите препоръки за камери са моно, CMOS, глобален затвор, USB3.

Контролен компютър

Контролният компютър за пробната кампания е базиран на компютър. Windows и Linux са тествани като операционни системи. За Windows има повече софтуер за наблюдение и обработка, но има много проблеми с лицензи, актуализации и не я намираме за надеждна операционна система за такива дейности. Linux е много по-добро решение. Тестът за използване на едноплатков компютър с Linux беше извършен успешно. Това е нашата препоръка за окончателна конфигурация.

Контролен софтуер

Контролният софтуер трябва да изпълнява поне няколко задачи:

- Обработка на орбитални данни за спътници и разпространение на орбита. Като се вземе предвид позицията на наблюдателя за изчисляване на времето и координатите на сателита спрямо позицията на наблюдателя.
- Управление на стойката на телескопа за проследяване на сателит в режим на скок или непрекъснато проследяване
- За управление на камерата за правене на снимки при поискване или в програмирано време или координата.
- Да поддържа функцията: график на наблюденията.

Има много контролни програми, търговски и с отворен код като TheSkyX, SkyTechX, CartesDuCiel, Kstars. Повечето от програмите поддържат версии за Windows и Linux. Комуникацията с устройствата е с директен драйвер, ASCOM драйвери или INDI драйвери. ASCOM е само за Windows, а INDI е основно за Linux. Тъй като нашата визия е да използваме Linux контролен компютър, той трябва да изпълнява INDI сървър за контрол на устройството. В тази конфигурация софтуерът за управление може да комуникира с INDI сървъра чрез TCP/IP през интернет. Разбира се, в по-професионалните системи няма нужда от визуален интерфейс или може да се използва само за наблюдение на текущите операции и в случай, че е необходимо ръчно управление.

В проектираната архитектура на производствената система дневният график, произведен от модула за планиране за тази станция, се зарежда в паметта и се изпълнява автоматично.

Произведените файлове от наблюденията се обработват локално или като TDM файл се прехвърлят към централен сървър за обработка. Кое е по-добре ще се реши след тестове, някои от които са извършени по време на кампанията за наблюдение, но това е извън обхвата на проекта.

Софтуер за обработка и сериализация

Файловете се обработват ръчно за нуждите на проекта. Много различни софтуерни пакети бяха тествани за офлайн обработка и astrometry.net за онлайн обработка (Sybilska A., 2019). След внимателно регулиране на параметрите получихме добри резултати. Над 80% от снимките са редуцирани. Разбира се, този подход не е подходящ за производствена система и извън проекта

бяха извършени някои тестове за сериализация за автоматична обработка. Резултатите са обещаващи, но това е голям обем работа и е необходим нов проект за изпълнение на тази задача.

Софтуер за оценка на траекторията

Позицията на ESA е, че тази задача ще бъде изпълнена от ESA със специализиран софтуер, който не е достъпен за екипа на проекта. За бъдещата производствена система нашата визия е, че такъв модул е задължителен и трябва да бъде внедрен. В настоящето изследване сме използвали софтуера Gpredict, който е представен по долу.

Софтуер за каталог

Има няколко каталожни системи за номериране на космически обекти. В момента съществуват сериозни разлики между конвенциите за именуване и издаване на идентификационен номер на космическите обекти. За правилно боравене с номерата на космически обекти има 2 подхода. В случай на самостоятелна система е необходима собствена идентификационна база данни с подобрени атрибути въз основа на съществуващи идентификационни номера. В случай на тясно сътрудничество с бъдещата европейска SST система можем да използваме техните идентификационни номера и каталози.

Софтуер за планиране на наблюденията и диспечер на задачи

Този модул е задължителен и е една от най-важните части на SST мрежата. Поради изискванията за висока готовност, този софтуер трябва да отчита голям брой параметри не само за космически обекти, но главно за метеорологичните условия за всяко местоположение на станцията за наблюдение. Това е много предизвикателна задача за динамично разпределяне на задачите за наблюдение между станциите в тежки метеорологични условия. Нашата визия е да инсталираме сферични камери „Allsky“ на всяко място и снимките да се предават на централен сървър редовно (30s – 1min). Сложните алгоритми трябва да сравняват наблюдаваните спътникови координати върху картината на цялото небе и да решат кое местоположение е най-добро за такова наблюдение. Разбира се, това ще бъде последният етап от комплексната задача за планиране.

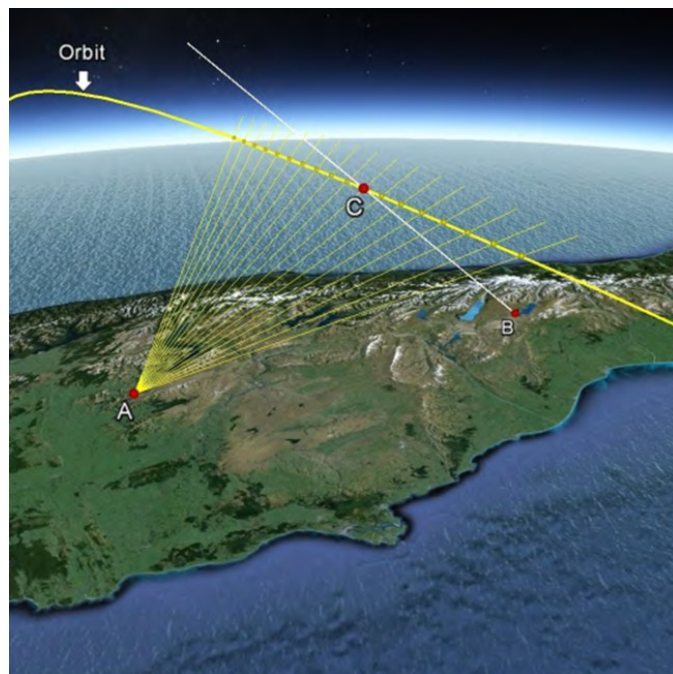
В настоящето изследване за провеждане на наблюдателната кампания сме използвали софтуера SkyX.

Глава 6. Избор на техники и стратегии за наблюдение

Въпреки че очевидно са правени опити за експерименти с измервания на паралакс, техниката не е широко разпространена при използване на оптични сензорни системи. Проблемите включват получаване на едновременни измервания от две места на разположени на подходящо разстояние телескопи. Като трудностите идват от големите ъгли скорости на обектите и ограниченото време, когато фазовият ъгъл на обекта позволява подходящо слънчево осветление, така, че да се наблюдава от две площадки. В духа на внимателно изследване на полезни техники за поддържане на SSA като цяло, ние избираме да преразгледаме полезността на измерванията на паралакса в различни модификации, като концептуално проста техника за извличане на точен обхват до орбитални обекти (Firago, 1969).

Избрахме няколко метода за наблюдение:

1. Наблюдение от едно място – позволява само астрометрия и дава ограничена информация
2. Едновременно наблюдение от 2 или повече места – изисква прецизна синхронизация на часовника
3. Едновременно наблюдение от 2 места – само едно място поддържа точно време



Фиг. 7. Наблюдение на сателит от две места.

Сателитът (C) се намира в пресечната точка между линията на видимост, започваща от точка B и коничната повърхност, изградена в точка A.

При наблюдение от две места, от набора от данни, събрани на двата сайта за няколко последователни моменти от време, ние извличаме 3D траектория с високо ниво на шум (но доста точна) на обекта заедно с неговото отношение, запазваме модела с тези данни и на глобално ниво намираме параметрите, минимизиращи функцията на разходите, която взема предвид грешката между оценените и измерените позиции. Преодолявайки неяснотите в обхвата на обектите поради използването на оптимални инструменти и подобрявайки оценката на позицията и ориентацията на обектите, ние подобряваме качеството на първоначалното състояние, използвано в глобалния метод, и следователно произвеждаме по-надеждно решение. Основната полза от използването на подход с множество обекти за наблюдение, е точното определяне на първоначалното условие за глобалния метод, който след това може успешно да се приложи към вече каталогизирани отломки на стабилни орбити (Acernese, 2019).

Разработване на методология на кампания за наблюдение.

Разработихме технология за прилагане на метод 1, ако метеорологичните условия не позволяват едновременно наблюдение.

Разработихме технология за прилагане на метод 3 за едновременни наблюдения с помощта на телекомуникация между наблюдателните екипи.

Глава 7. Провеждане на наблюдателната кампания

Първоначални наблюдения

Наблюдателната кампания трябваше да стане практическата проверка на цялото изследване по литературни източници и да валидира направените изводи и заключения за точността на прогнозата на астроклимата за периода на наблюденията, приложимостта на определените техники за наблюдение, удачността на използваната оптична и фотографска апаратура, и качеството на астроснимките.

Първоначалните наблюдения за тестване на всички стъпки от процеса на заснемане са проведени в района на гр. София. Опитите преминаха през няколко итерации с използване на различна оптична апаратура и техники на заснемане, докато се установи кое работи и кое не.

Задачата, въпреки привидната ѝ простота и отзивите от колеги астрономи, че непрекъснато виждат следи от спътници на астроснимките, се оказва значително по сложна от първоначалните очаквания. Първото препятствие се оказва проблема с определянето на координатите и времето за наблюдение на точно определен спътник, който ни интересува. Това, за разлика от проблема на астрономите със случайно попаднали спътници на снимките се оказва от много по-високо ниво на сложност. Обикновено, при астрофотографията на звезди и планети се заснемат статични обекти на небето, като единственото движение на телескопа е евентуално движението за компенсиране въртенето на земята. При тази компенсация може да се правят снимки с дълги експозиции без да се размазва изображението. При заснемането на спътници ситуацията е принципно различна. Спътниците, особено тези на ниска орбита се движат изключително бързо. Скоростта може да се сравни с тази на високо летящ самолет. Това изисква или много бързо следене на спътника или много точно предсказване на времето и небесните координатите където ще се появи спътника, като телескопът е в режим на изчакване и при точна синхронизация по време и координати има шанс да заснемем спътника. Тъй като повечето телескопи имат много тясно зрително поле (обикновено под 1 градус), което поставя много високи изисквания към точното насочване на телескопа към определена точка в небето. Всичко това изисква да имаме много точна информация за орбитата на спътника по координати и време, която не винаги е налична.

Това изисква много точно механично насочване, точна ориентация по звездни координати, много точен часовник и широк зрителен ъгъл и накрая много чувствителна камера която да може да заснеме за кратка експозиция даже и най-слабо забележимите спътници.

Като трябва да имаме предвид че, всичко изброено дотук изиска компютърно управляван телескоп с бързо движеща се стойка, GPS коригиран часовник и компютърно управлявана камера. При ръчно насочване и ръчно заснемане задачата изисква от оператора изключителни умения и тренировка.

В резултат на проведените експерименти бяха отработени техниките както на ръчното заснемане, така и процедурата по компютъризирано заснемане. При първите опити бяха направени снимки на спътници както с художествена стойност, така и такива които подлежат на астрометрия, т.е. могат да се определят координати на обекти от снимката.

Преди пробната кампания за наблюдение се направиха голям брой предварителни тестове на наблюдения на спътници с различни видове оборудване за наблюдение, за да се избере подходящо оборудване и да се избегнат всякакви клопки по време на реалните наблюдения. Някои примери от тестовото наблюдения са дадени по-долу:



Фиг. 8. Художествена снимка с 3 спътника и 2 самолета на фона на млечния път

Същинската наблюдателната кампания

За провеждането на същинската наблюдателната кампания бяха сформирани 4 екипа:

1. Екип „Белмекен“
2. Екип „Говедарци“
3. Екип „Стара Загора“
4. Екип „Синеморец“

Всички екипи за наблюдение, след като се разположиха на своите наблюдателни площадки установиха конферентна връзка за координиране на наблюденията. Целта беше, ако е възможно да се проведат синхронни наблюдения на даден спътник.

Наблюденията на терен бяха извършени с 8 различни вида оборудване:

1. Телескоп с фокусен редутор с фокусно разстояние 560mm/F2.0 и CCD камера G3CMOS16000KPA, от Говедарци.
2. Телеобективи с фокусно разстояние 200mm/F2.8 и CCD камера на ZWO ASI174, от Синеморец и град Стара Загора.
3. Телеобективи с фокусно разстояние 180mm/F2.8 и SBIG - ST-8300 CCD камера, гр. София.
4. Телеобективи с фокусно разстояние 180mm/F2.8 и фотоапарат Olympus OM-D EM-5, от Белмекен и град София.
5. Обективи 50mm/F1.8 и фотоапарат Olympus OM-D EM-5, от Белмекен и град София.
6. Телеобективи 180mm/F2.8 и фотоапарат Canon 350D, от Белмекен и град София.
7. Телеобективи 180mm/F2.8 и Nikon5300 от Говедарци и София град.
8. Обективи 18mm/F3.5 и Nikon5300, от Говедарци.

Основната кампания за наблюдение беше проведена в периода 06 – 08 септември 2018 г. с 4 екипа, които се опитваха да наблюдават спътниците едновременно. Поради нестабилните метеорологични условия наблюденията бяха много трудни. Но дори и в тежка среда 3 екипа извършиха няколко едновременни наблюдения. Единични екипи извършваха наблюдения в края на август и в първите дни на октомври. Общият резултат е отличен с огромно количество изображения на сателити.

Две от обсерваториите извършиха синхронни тестови наблюдения на сателити:

Говедарци	Синеморец
Globastar M032	2018.09.08 21:43
Globastar M052	2018.09.08 22:45
Globastar M071	2018.09.08 21:55
Globastar M075	2018.09.08 21:52

Списък на наблюдаваните спътници:

По време на наблюдателната кампания бяха заснети стотици космически обекти. За целите на изследването сме извадили само най-качествените, които позволяват надеждна обработка.

В представената таблица, заснетите обекти са групирани по обсерватории, от които са заснети.

С еднакви цветове са маркирани съвпадащи спътници от различните наблюдения.

Таблица 7, Наблюдавани спътници по време на кампанията.
С еднакъв цвят са маркирани еднакви спътници, наблюдавани от различни бази.

Sinemorec 06/09/18	Govedarci 06/09/18	St Zagora 04/10/18
GLOBALSTAR M068 [-] #25907U	MOLNIYA 3-20#13875U	GLOBALSTAR M068 [-] #32266U
BADR-7 (ARABSAT-6B)#41209U	GPS BIIF-7 (PRN 09)#40105U	ARIANE 40+ R/B #23561U
BADR-4 #29526U	IRNSS-1B #39635U	IRIDIUM 2 [-] #25527U
BADR-5 #36592U	COSMOS 2458 (734)#36113U	SL-14 R/B #20262U
BADR-6 #33154U	MOLNIYA 1-S#07392U	OSCAR 32 [?] #19071U
EUTELSAT 25B #39233U	GSAT0103 (PRN E19)#38857U	ODIN #26702U
SKYNET 5B #32294U	COSMOS 2457 (733)#36112U	ORBCOMM FM28 [-] #25482U
ARABSAT-5C #37810U	GLOBALSTAR M002 [-] #25164U	COSMOS 2428 #31792
ASTRA 1KR #29055U	AJISAI(EGS) #16908U	GLOBALSTAR M097 [+] #39072U
ASTRA 1L #31306U	07/09/18	SL-14 R/B #16496U
ASTRA 1M #33436U	GLOBALSTAR M075 [+] #37192U	SL-14 R/B #17567U
ASTRA 1N #37775U	FORMOSAT 2(ROCSAT 2)#28254U	COSMO-SKYMED 1 #31598U
EUTELSAT 3B #39773U	STARLETTE#07646U	KORONAS-FOTON #33504U
RASCOM-QAF 1R #36831U	THOR AGENA D R/B #00733U	COSMOS 2429 [-] #32052U
BULGARIASAT-1 #42801U	GLOBALSTAR M063 [+] #26081U	ORBCOMM FM18 [+] #25414U
YAMAL 202 #28089U	GLOBALSTAR M006 [-] #25307U	IRIDIUM 97 [B] #27450U
EUTELSAT 48D #33460U	GLOBALSTAR M035 [-] #25851U	COSMOS 1953 #19210U
GSAT-19 #42747U	H-2A R/B#27601U	ORBCOMM FM13 #25420U
YAHSAT 1B #38245U	GLOBALSTAR M022 [-] #25649	SARSAT 7 (NOAA 15 [B]) #25338U
INSAT-4CR #32050U	SARSAT 13 (METOP B)#38771U	NOAA 11 [-] #19531U
GSAT0103 (PRN E19)	GLOBALSTAR M064[-]#26084U	IRIDIUM 61 [B] #25263U
COSMOS 2457 (733)	AKEBONO (EXOS-D)#19822U	IRIDIUM 7 [-] #24793U
07/09/18	SL-14 R/B#20262U	GLOBALSTAR M015 [-] #25308U
INTERCOSMOS 25#21819U	GLOBALSTAR M045 [-] #25676U	GPS BIIF-7 (PRN 009) #40105U
08/09/18	METEOSAT-8 (MSG-1) #27509U	SIRACUSE 3A #28885U
ORBCOMM FM36 [+] #25984U	O3B FM15 #43231U	YAHSAT 1B #38245U
GLOBALSTAR M068 [-] #25907U	MOLNIYA 3-20#13875U	GSAT-19 #42747U
NOAA 13 [-] #22739U	GORIZONT 2[-] #11440	INSAT-4CR #32050U
ENVISAT #27386U	RADUGA 1[-] #08513U	EUTALSAT 48D #33460U
IRIDIUM 55 [B] #25272	INTELSAT 33E (IS-33E)#41748U	ATHENA-FIDUS #39509U
GLOBALSTAR M097 [+] #39072U	ABS-4 (MOBISAT-1)#28184U	PAKSAT-1R #37779U
IRIDIUM 58 [B] #25274U	TURKSAT 4A#39522U	ASIASAT 4 #27718U
+IRIDIUM 59[+]#25275U	NIGCOMSAT 1R#38014U	HELLAS-SAT 3 #42814U
SL-8 R/B #11574U	TURKSAT 3A#33056U	HELLAS-SAT 2 #27811U
FORMOSAT-3 FM1 #29048U	HELLAS-SAT 3#42814	EXPRESS-AM7 #40505U
IRIDIUM 60 [+] #25276U	HELLAS-SAT 2#27811U	GLOBALSTAR M09 [+] #37741U
ORBCOMM-X [-] #21576U	ASIASAT 4#27718U	
IRIDIUM 28 [-] #24948U	PAKSAT-1R#37779U	
IRIDIUM 29 [-] #24944	ATHENA-FIDUS#39509U	
SL-16 R/B #23343U	BADR-7(ARABSAT-6B)#41029U	
SCATSAT 1 #41790U	BADR-5#36592U	
GSAT209 (PRN E09) #41174	BADR-4#29526U	
TIROS N [P] #11060U	BADR-6#33154U	
GLOBALSTAR M032 [-] #25852U	EUTELSAT 25B#39233U	
GLOBALSTAR M031 [-] #25946U	SKYNET 5B#32294U	
GLOBALSTAR M075 [+] #37192U	GPS BIIR-5 (PRN-28)#26407	
GLOBALSTAR M071 [P] #31576U	COSMOS 2457 (733)#36112U	
SARSAT 11 (METOP-A) #29499U	GSAT08(PRN E08)#41175U	
CALSPHERE 4(A)#01520U	GORIZONT 1[-] #11158U	
POLAR BEAR [?] #17070U	MOLNIYA 3-8#10455U	
GLOBALSTAR M052 [-] #25773U	08/09/18	
	GLOBALSTAR M035 [-] #25851U	
	GLOBALSTAR M057 [-] #25943U	
	GLOBALSTAR M032 [-] #25852U	
	GLOBALSTAR M075 [+] #37192U	
	GLOBALSTAR M071 [P] #31576U	
	GLOBALSTAR M052[-] #25773U	

Глава 8. Обработка на резултатите от оптични наблюдения

За получаване на резултати от оптичните наблюдения е необходимо получените снимки на спътници да бъдат така обработени, че да могат да се определят координатите на космическите обекти. За целите се използва астрометрия и съответните софтуери за определяне на координати. Разгледали сме няколко възможности, като всяка има предимства и недостатъци.

Астрометрия на изображения от нашите наблюдения на спътници с оптични уреди.

1. Първата стъпка беше да прегледаме и проверим двойно всички изображения от нашите наблюдения на сателити с оптични уреди, за да открием на кои изображения са записани сателити. Този етап беше извършен ръчно от двама независими изследователи, за да се гарантира идентифицирането на всички записани спътници дори при трудни условия на наблюдение (облаци, мъгла и др.).

2. След това откритите сателити бяха идентифицирани с помощта на записи от наблюдения и времеви записи на всяко сателитно изображение.

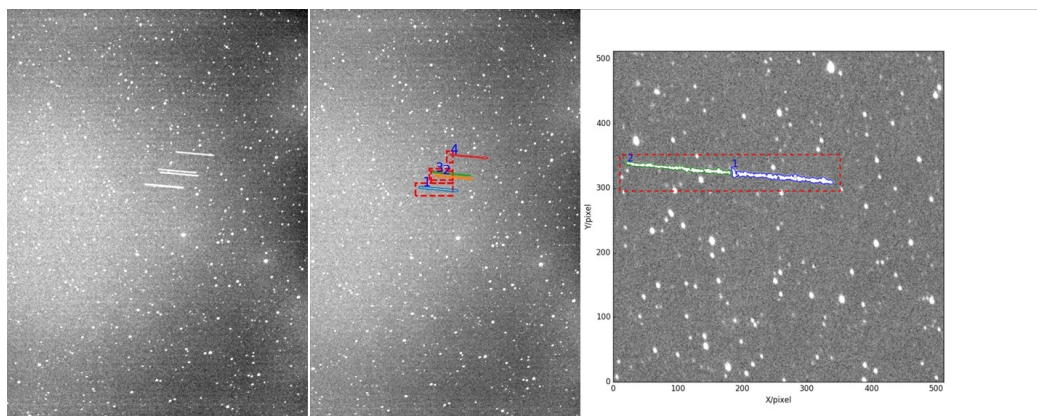
3. След това получените сателитни изображения, които бяха в RAW формат, бяха подложени на астрометрия със софтуер MaximDL, за да се получат .FIT файлове с координати и величини на всички наблюдавани обекти.

Специализиран софтуер

След като астрометрираме снимката, по нея вече може да измерваме координати.

Следващата задача е да открием следата от спътника на снимката и да измерим координатите на началната точка и на крайната точка на следата (Johnson T., 2019). Тази задача може да се извършва ръчно, но това е препоръчително само при малък брой снимки. Обикновено телескоп за наблюдение на спътници за една вечер генерира няколко хиляди снимки, което прави задачата за ръчна обработка на практика невъзможна. Алгоритмите, представени в този документ, са първа стъпка към напълно автоматизирана система за анализ на данни. Те автоматично обработват и премахват артефактите на сензора, намаляват съдържанието на изображението чрез премахване на неподходящи обекти и накрая извличат сателитните ивици. Тази последна стъпка е възможна, тъй като обработката на данни е интегрирана със системата за задачи и получаване на изображения, която предоставя априорна информация за движението на целта и насочването на сензора. (Lévesque M. P. et al., 2007), (Lévesque M., 2012).

За целта е разработен специализиран софтуер, с който автоматизирано се откриват следите на спътници и се определят координатите им. На фигурата е даден резултата от обработка със софтуера. Използват се алгоритми за разпознаване на образи. Като цел на разпознаване се дефинира следа от спътник (Vananti, 2015), (Vaubaillon J., 2019). Добре се вижда колко надеждно се детектират следите и се очертават границите им. Съответно координатите на началото и края се записват в текстов файл. Софтуера може да работи и в пакетен режим т.е. да обработва всички снимки в дадена директория, без да е необходимо да се отварят една по една.



Фиг. 9. Автоматично намиране на следи от спътници

в изображения и определяне на техните координати.

Оценка на грешката между прогнозираната орбита и реалните измервания.

В нашия експеримент ние използваме техника за сравнение, за да оценим разликата в грешката между прогнозирането на орбитата и реалните астрометрични измервания.

От нашите наблюдения избрахме сателит с известни точни параметри на орбитата. Като добър кандидат намираме GPS BIIF-7 (PRN09). Използваме TLE файл от celestrack.org. Изчисленията на орбитата се основават на SGP4 пропагатор. Изчислената орбита се изчертава върху астрометрично намалена рамка, като по този начин може да се види и да се направи визуално сравнение между изчислената и измерената орбита.

Компютърното време беше синхронизирано с NTP сървър и очакваната точност беше около 1ms.

За оптични наблюдения използвахме система телескоп/камера с ъглова разделителна способност 6,17 дъгови секунди/пиксел.

Изображенията се получават във формат .FIT с начални координати за център на рамката и произволна ориентация. Кадрите преминаха астрометрична редукция за точни координати на всички наблюдавани обекти.

При заснемане на наблюдавания спътник, времевият маркер на снимката от камерата се записва с точност до 1ms. Продължителността на експозицията за тази сесия е 5 сек.

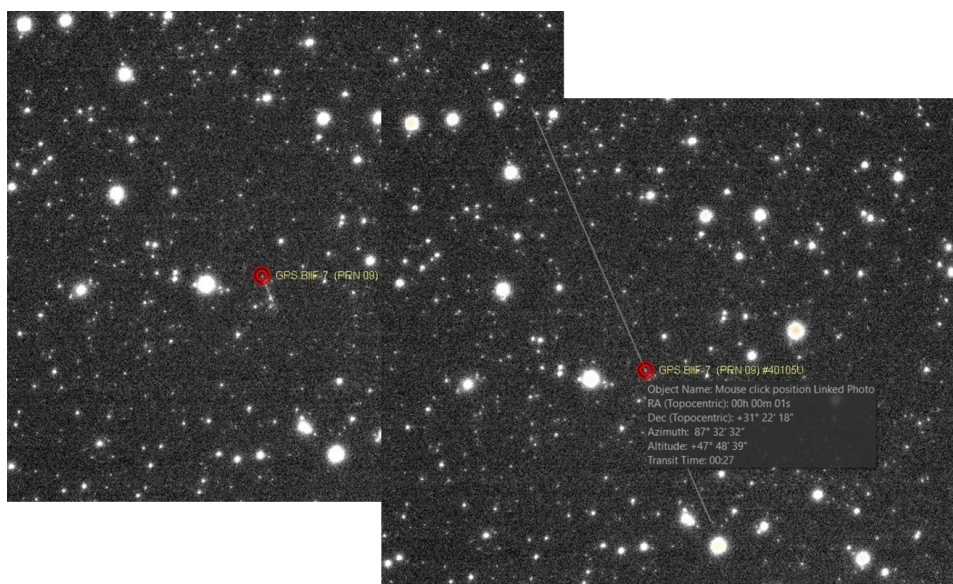
Първата ни задача е да оценим визуално разликата между изчислената и наблюдаваната орбита.

Оценката на ъгловата грешка се основава на размера на пиксела, в нашия случай 6,17 arcsecs.

Тъй като изчислената траектория и оптичната следата на спътника са почти идентични, приемаме, че тази ъглова грешка е < 6 arcsecs.

За грешка във времето откриваме, че за всички изображения има една и съща разлика от 1 секунда между изчислената орбита и наблюдаваната позиция. С голяма вероятност това е някаква системна грешка.

След корекция на системната грешка очакваме, че реалната грешка ще бъде под 0,1 секунда, получена въз основа на размера на пиксела и скоростта на сателита.



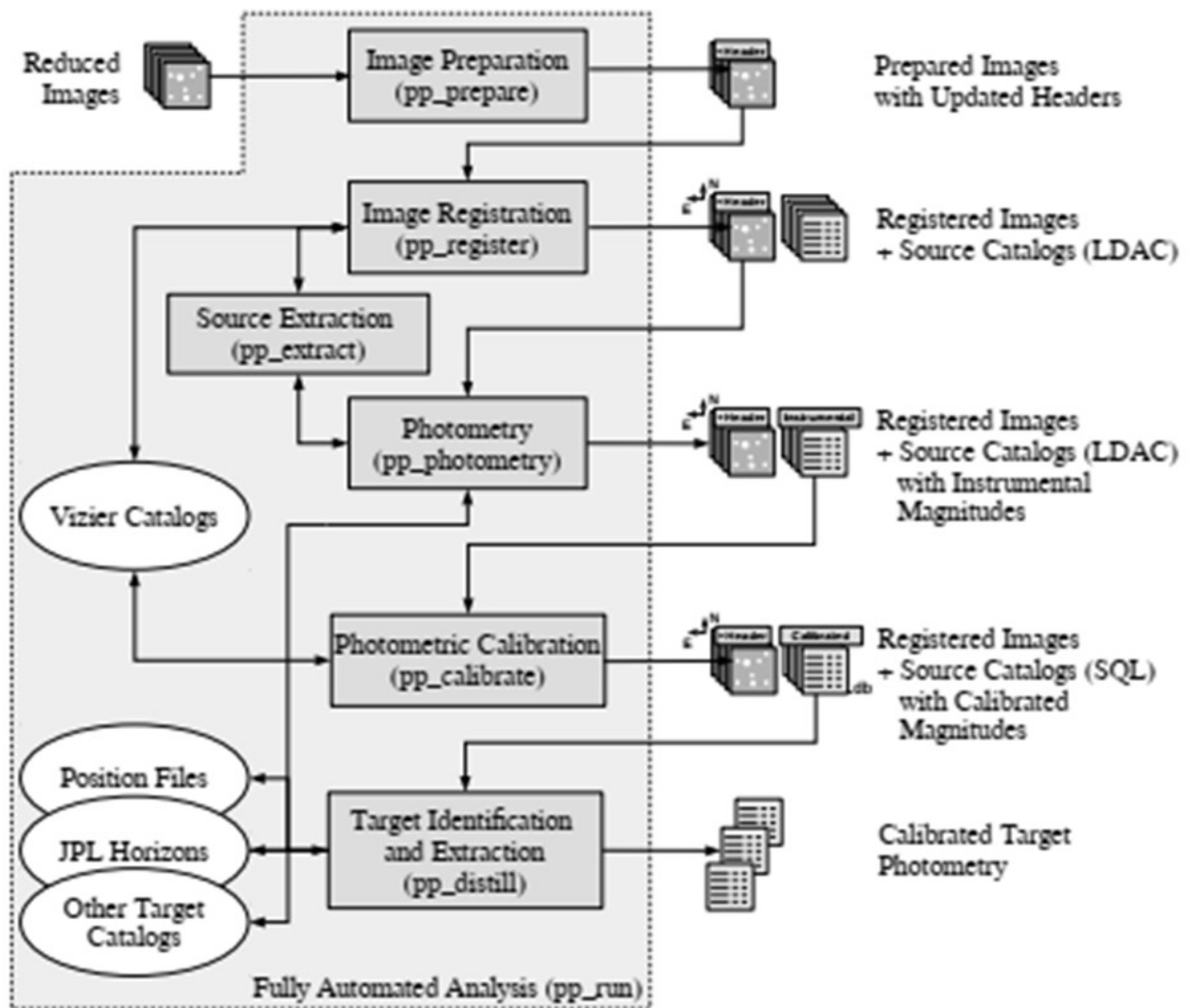
Фиг. 10. GPS BIIF-7 (PRN09),
Измерено: 2018-10-04T17:56:41.159, RA 00h00m01s, DEC 31°22'18\"/>
time error $dT=1s$, angular error < 6 arcsecs (6.17 arcsecs/pixel).

Изчисляване и запис на TDM файлове от нашите наблюдения на сателити.

Получените .FIT файлове с координати и магнитуди на всички наблюдавани обекти бяха използвани за получаване на координати и магнитуд на наблюдавания спътник в определен момент от време.

Получените координати и магнитуд на наблюдавания сателит в определен момент от време бяха използвани за записване на TDM файлове от нашите наблюдения на спътници.

Открихме, че ръчното писане на TDM файлове от нашите наблюдения на спътници е изключително неефективно, така че трябва да напишем някои софтуерни кодове, за да автоматизираме този процес. Има необходимост от автоматизация на обработката на изображения. Надолу съм дал примерна схема за автоматизирана обработка:



Фиг. 11. Диаграма на процесите по обработка на изображения за получаване на орбитите.

Глава 9. Определяне орбитите на наблюдаваните спътници

Използвана методика за определяне на орбитата на спътници

Определянето на орбита се отнася до оценката на орбитите на малки обекти спрямо първичните небесни тела, като се имат предвид приложимите измервания. Всички полезни методи за определяне на орбита произвеждат орбитални оценки, които имат грешки (Vallado and Agapov, 2010), (Fruh C., 2011), (Wright, 2013), (Wilson B., 2016).

Процесът, означен като SITE-TRACK, е често срещан начин за определяне на позицията и вектора на скоростта на сателит от сензорни данни. Данните обикновено се състоят от обхват, азимут, надморска височина, скорости на всяка променлива, времена на всяко наблюдение и местоположение на обекта. Понякога може да са налични само подмножества от тези данни, така че се използват други техники за определяне на орбитата за тези случаи (Tartakovsky A. G., 2019), (Sánchez M., 2019).

Наблюдения само за ъгли

Решенията за орбита, които не използват данни за разстоянието до обекта, се наричат общо методи само за ъгли. Те са най-старият клас решения, родени от необходимостта да се оценят ранните астрономически наблюдения, базирани само на относителните ъглови позиции на скитащи планети спрямо непроменливо звездно поле. Д-р Педро Рамон Ескобал дава въведение в такива методи в своя текст от 1965 г. Методи за определяне на орбитата (Schmunk M., 2008).

Модификациите на процедурата SITE-TRACK, които обсъдихме, извършват голяма част от обработката за днешните системи, но някои измервания се нуждаят от различни техники. Методите само за ъгли работят за ъглови данни; но те са фундаментално ограничени, защото им липсва информация за разстоянието до обекта. Итерация или повече обработка преодолява този проблем, но не без допълнителна сложност и изчисления. Техниките само за ъгли се използват за оптични сензори.

Проблемът все още се състои в определянето на вектора на състоянието на сателита, което изисква шест независими величини. Както видяхме досега, това може да са класическите орбитални елементи и техните вариации - обхватът, азимутът, надморската височина и информацията за скоростта, на проблема SITE-TRACK; или позиционните вектори - в този случай геоцентрична или топоцентрична ректасцезия и деклинация.

Съществуват няколко техники: на Лаплас, на Гаус, итерация с двойно g и Гудинг. Всеки решава един аспект на проблема. Първите две обикновено са най-добри за междупланетни операции, докато последните две са по-добри за сателити в околосемна орбита. Методът на Лаплас се вписва само в средната точка, но обикновено е близо до другите точки от данни. Включен е само поради историческото си значение; работи зле за сателити близо до Земята. Методът на Гаус приспособява данните към трите точки и е валиден за всички данни. Този подход е по-подходящ за близки до Земята спътници, но формулировката ограничава разпространението на данни (обикновено по-малко от 60° един от друг). Итерацията Double- g е ефективна за големи спредове в данните, както в случая на множество места за наблюдение. Този метод от Escobal (1965) е добър подход за общи приложения. Gooding (1993 и 1997) представя друг стабилен подход, който се радва на употреба в търговски операции. И накрая, Der (2012) има някои интересни подходи за намиране на истинските решения на задачата, които може да изискват по-нататъшно изследване.

Изчислени орбити в резултат на оптичните наблюдения

Две от обсерваториите (Синеморец и Говедарци) проведеха синхронни наблюдения на спътника GLOBALSTAR M071, за да се провери хипотезата за повишаване на точността на измерванията при синхронни наблюдения. В следващата таблица сме дали данните от оптичните наблюдения:

Таблица: 4. данни от наблюденията на спътници от две обсерватории.

Синеморец	Говедарци
CCSDS_TDM_VERS = 2.0 COMMENT Point location: (Lat/Lon: 42° 03' 14" N, 27° 58' 13" E) Alt 55m CREATION_DATE = 2019-02-12T10:00 ORIGINATOR = PASSA META_START TIME_SYSTEM = UTC TIMETAG_REF = RECEIVE START_TIME = 2018-09-08T17:56 STOP_TIME = 2018-09-08T17:58 PARTICIPANT_1 = SMNC03 PARTICIPANT_2 = GLOBALSTAR M071 [P] #31576U MODE = SEQUENTIAL PATH = 2,1 ANGLE_TYPE = RADEC REFERENCE_FRAME = EME2000 META_STOP DATA_START ANGLE_1 = 2018-09-08T18:56:30.699 310.68460549883747 ANGLE_2 = 2018-09-08T18:56:30.699 7.880581052949022 ANGLE_1 = 2018-09-08T18:56:33.350 311.08736316861615 ANGLE_2 = 2018-09-08T18:56:33.350 7.508134062316444 ANGLE_1 = 2018-09-08T18:56:35.820 311.4675305453258 ANGLE_2 = 2018-09-08T18:56:35.820 7.154152958686333 ANGLE_1 = 2018-09-08T18:56:38.210 311.85608245334225 ANGLE_2 = 2018-09-08T18:56:38.210 6.795594842138003 ANGLE_1 = 2018-09-08T18:57:02.090 315.399599783309 ANGLE_2 = 2018-09-08T18:57:02.090 3.4292991930667713 ANGLE_1 = 2018-09-08T18:57:04.820 315.7509647787616 ANGLE_2 = 2018-09-08T18:57:04.820 3.090714762124187 ANGLE_1 = 2018-09-08T18:57:07.089 316.1000098208983 ANGLE_2 = 2018-09-08T18:57:07.089 2.753259896586379 ANGLE_1 = 2018-09-08T18:57:09.500 316.4404950369584 ANGLE_2 = 2018-09-08T18:57:09.500 2.4244411689825367 ANGLE_1 = 2018-09-08T18:57:12.599 316.85417106361785 ANGLE_2 = 2018-09-08T18:57:12.599 2.0231693778393676	CCSDS_TDM_VERS = 2.0 COMMENT Point location: (Lat/Lon: 42° 15' 48" N, 23° 28' 27" E) Alt 1146m CREATION_DATE = 2019-02-12T10:00 ORIGINATOR = PASSA META_START TIME_SYSTEM = UTC TIMETAG_REF = RECEIVE START_TIME = 2018-09-08T18:56 STOP_TIME = 2018-09-08T18:57 PARTICIPANT_1 = GVDI01 PARTICIPANT_2 = GLOBALSTAR M071 [P] #31576U MODE = SEQUENTIAL PATH = 2,1 ANGLE_TYPE = RADEC REFERENCE_FRAME = EME2000 META_STOP DATA_START ANGLE_1 = 2018-09-08T18:56:08.509 317.00490918413465 ANGLE_2 = 2018-09-08T18:56:08.509 12.427237162262962 ANGLE_1 = 2018-09-08T18:56:10.500 317.31143348050483 ANGLE_2 = 2018-09-08T18:56:10.500 12.102726748873648 ANGLE_1 = 2018-09-08T18:56:12.570 317.58202401985744 ANGLE_2 = 2018-09-08T18:56:12.570 11.815354979487552

Две от обсерваториите проведеха последователни във времето наблюдения на спътника GPS B1IF-7 (PRN 09). Данните от наблюденията са дадени в таблицата по долу.

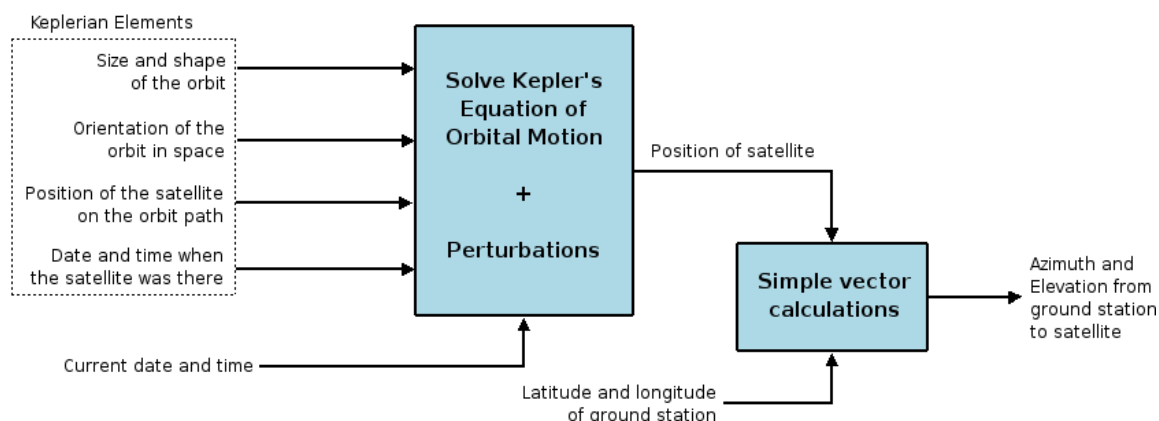
Говедарци: GPS B1IF-7 (PRN 09) - 2018-09-06 20:33:24 UTC

Стара Загора: GPS B1IF-7 (PRN 09) - 2018-10-04 17:55:26 UTC

Глава 10. Визуализация на изчислените орбити за космическите обекти

За да можем да оценим качеството на получените данни от наблюденията на космически обекти е необходимо да разполагаме с подходящ софтуер за моделиране орбитите на наблюдаваните от нас тела. За целта избрахме Gpredict, като подходящ за поставената задача за визуална оценка на изчислената от нас орбита спрямо орбитата дадена от космическото командване на САЩ.

Gpredict е програма за сателитно проследяване и прогнозиране на орбита в реално време. Програмата за сателитно проследяване е компютърна програма, която прогнозира позицията и скоростта на сателит в даден момент, използвайки математически модел на орбитата. След като са известни позицията и скоростта на спътника, могат да се изчислят други данни, т.е. пеленг, разстояние, отпечатък и видимост. Фигура 1.1 показва диаграма на основната функционалност на програмата за сателитно проследяване.



Фиг. 12. Функционален преглед на програмата за сателитно проследяване.

Gpredict, като всяка друга програма за сателитно проследяване, приема три вида входни данни:

1. Кеплерови елементи, описващи спътниковата орбита, както и позицията и скоростта на спътника в даден момент t_0 .
2. Местоположение на наземната станция на Земята.
3. Датата и часът, за които трябва да се изчислят позицията и скоростта на сателита.

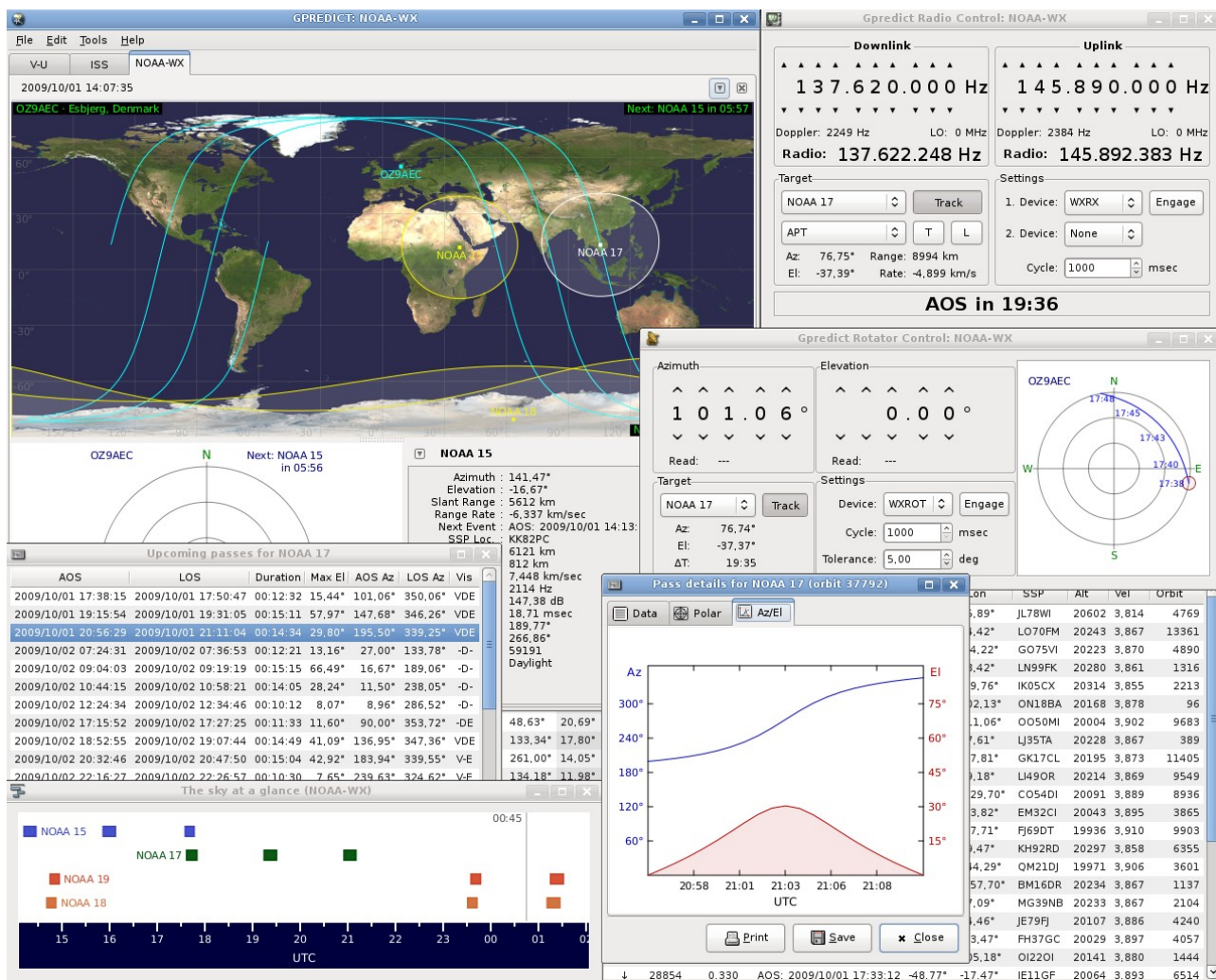
Предвид данните по-горе, Gpredict изчислява позицията и скоростта на всеки спътник в околоземна орбита, използвайки алгоритмите NORAD SGP4/SDP4. Тези алгоритми решават уравнението на Кеплер за орбитално движение и прилагат различни корекции, за да компенсират нередовни ефекти като формата на Земята и гравитационно влияние от други небесни тела.

Gpredict има няколко начина за представяне на изчислените сателитни данни на потребителя. Може да показва позицията, отпечатъка (т.е. зоната на покритие) и земната следа на сателитите върху карти, може да показва подробни сателитни данни в таблици и може също така да показва сателитите в обхват на полярна графика (радарен екран).

Следващият раздел дава преглед на характеристиките и функционалността на Gpredict.

Характеристики на Gpredict:

- Бързо и точно сателитно проследяване в реално време с помощта на алгоритмите NORAD SGP4/SDP4.
- Без софтуерно ограничение за броя на сателитите или наземните станции.
- Приятно представяне на сателитните данни с помощта на карти, таблици и полярни графики (радарни изгледи).
- Позволява групиране на сателити в модули, като всеки модул има собствено визуално оформление и може да се персонализира самостоятелно. Разбира се, могат да се използват и няколко модула едновременно.
- Ефективни и подробни прогнози за бъдещи сателитни преминавания. Параметрите и условията за прогнозиране могат да бъдат фино настроени от потребителя, за да позволят както общи, така и много специализирани прогнози.
- Позволява да се проследят сателити в реално време, симулирано реално време или ръчен контрол на времето.



Фиг. 13. Общ изглед на Gpredict.

Глава 11. Изграждане на национални и над национални мрежи за наблюдение

Дейности по създаване на инфраструктурата на Национален Център за Наблюдение и Проследяване

Към настоящия момент НЦНП осъществява дейността си чрез споразумения за ползване на материална база и оборудване с институти на БАН, Софийския университет и частни фирми които разполагат със съответният ресурс.

1. Подготовка на наблюдателни бази

Екипът от специалисти, включен в проекта работи по подготовката на три основни наблюдателни бази (Плана планина, Стара Загора и Черноморското крайбрежие), както и на 2 спомагателни такива.

2. Подготовка на специализирано оборудване за наблюденията

Оборудването, използвано по време на наблюдателната кампания м. септември – октомври 2018 г. ще се усъвършенства до ниво „автоматизиран режим“ с автономна работа и дистанционно управление. Планират се съответните ремонти за възстановяване и модернизирани на съществуващ сателитен лазерен далекомер УЛИС. Планира се и значително разширение на мрежата от метеорологични наблюдателни станции, като към тях се добавят астрономически широкоъгълни камери за обзор на небето.

3. Подготовка на център за управление и обработка на резултатите

Функционалността, която ще постигне НЦНП ще зависи основно от изграждането на компютърен център за управление и обработка на резултатите. Поради големия брой обекти в космоса, които трябва да се наблюдават и каталогизират, се предполага използването на максимално автоматизирани процеси за наблюдение и обработка. Задачите по избор на целите за наблюдение, разпределението им към съответният телескоп на основата на неговите апаратни възможности и метеорологична обстановка, автоматично получаване резултатите от наблюденията, тяхната астрометрична обработка, изчисляване орбитите на обектите и тяхното каталогизиране се предвижда да става автоматично. Разбира се, всичко това ще става постепенно, като се има предвид обема и сложността на задачата. За момента се разполага със съвършен ресурс, които ще се разширява според наблюдателните задачи и необходимото качество на обработката на наблюденията и крайните резултати. Обмисля се структурата и архитектурата на софтуера.

4. Присъединяване на асоциирани партньори в България

Световна практика в областта на наблюденията е да се работи с партньори, с които се обменя информация. Предвижда се сътрудничество с партньори в България които имат интерес да се включат в наблюдателната мрежа, като сътрудничеството се осъществява на база двустранни и тристранни договори. Вече има заявен интерес към такова партньорство.

5. Споразумения с международни партньори за обмен на информация

Напоследък значително се увеличи броя на фирмите и научни институти занимаващи се с тази дейност. Дейността варира от държавно финансирана до изцяло комерсиална. Данните които се

получават може да са със свободен достъп или чрез заплащане. Вече има установени контакти с различни организации и възможни форми на двустранно сътрудничество по отделните етапи на наблюденията, обработката и получаването на крайните резултати с актуална информация за динамичните параметри на наблюдаваните ИСЗ. Това позволява получаване на информация, която е невъзможно да бъде получена само от собствената мрежа, а е от съществено значение за процеса на наблюденията.

6. Кандидатстване за приемане в европейската мрежа за наблюдения

Европейската мрежа за наблюдения представлява развитие на идеята за двустранното и многостранно сътрудничество при обмен на информация до нещо по-голямо. По замисъл трябва да се въведе стандарт за определени дейности и общи правила за всички участници в SST наблюденията, което значително ще облекчи работата и необходимостта от подписване на двустранни споразумения. Разбира се идеален вариант не съществува и определени данни ще се споделят между участниците, а определена информация която е с повишена важност ще се споделя само при преценка на страната която я е получила.

Това още веднъж показва нуждата от изграждането на национален капацитет в SST наблюденията, което всъщност и е задължителното условие за желаещите да участват в европейската мрежа за наблюдение и проследяване на обекти в космическото пространство.

Изисквания за Европейската система за космическо наблюдение

„Космическо наблюдение“ може да се дефинира като рутинна, оперативна услуга за откриване, корелация, характеризиране и определяне на орбита на космически обекти. Някои необходими основни функции и свързаните с тях критерии за ефективност на бъдещата Европейска система за космическо наблюдение (ESSS) бяха определени от работна група за космическо наблюдение. Тези функции на ESSS се състоят от следните елементи:

- Пълно покритие на LEO, GEO и 12-часови, почти кръгови MEO орбити; ограничено покритие на орбити извън тези региони
- Автономно изграждане и поддържане на каталог на всички наблюдаеми космически обекти
- Откриване, проследяване, определяне на орбита, целева корелация и физическа характеристика за обекти в LEO, MEO и GEO с надеждност и чувствителност, съответстващи на тази на Мрежата за космическо наблюдение на САЩ ($d > 10$ cm в LEO и $d > 1$ m в GEO)
- Оценка на орбиталните маневри
- Откриване на събития на разпадане в орбита и корелация с обекта(ите) източник(и)

Тези изисквания бяха използвани в работните декларации за договори на ESA с европейската индустрия за дефиниране на сензори и за разработване на схеми за обработка на данни на Европейска система за космическо наблюдение, която отговаря на тези критерии.

Съществуващи оптични сензори

Оптичните сензори се използват най-вече за наблюдение на обекти отвъд височини на LEO, особено близо до важния GEO пръстен. Това се дължи на по-високата чувствителност на телескопите на големи разстояния, за разлика от радарите. Въпреки това, като недостатък

спрямо радарите, оптичните наблюдения са ограничени в тяхното полезно време за наблюдение по отношение на осветеността на целта, местоположението на наблюдателя и метеорологичните условия. Европа разполага с няколко оптични системи, които биха могли да допринесат за мрежата за наблюдение и проследяване.

ESA управлява телескоп за космически отломки с 1 m апертура и $0,7^\circ$ зрително поле (FoV), който се намира на Тенерифе. Той използва 2×2 мозайка от CCD с 2048×2048 пиксела всеки, с праг на откриване от +19 до +21 визуална величина (съответстващо на 15 cm обекти на GEO височини). Телескопът покрива сектор от 120° от пръстена GEO. От единични наблюдения могат да се изведат първоначални орбити, които обикновено са подходящи за повторно улавяне на обекта в рамките на същата нощ и които след това могат последователно да се подобряват.

CNES използва времето за наблюдение на телескопа TAROT (Télescope à Action Rapide pour les Objets Transitoires), за да изследва пръстена GEO. Основната мисия на TAROT е да открива оптичното последно сияние на изблиците на гама лъчи. Телескопът има 25 cm апертура и зрително поле $2^\circ \times 2^\circ$. Той е оборудван с CCD от 2048×2048 пиксела за откриване и последващи измервания на обекти до визуална величина +17 в и близо до GEO пръстена. Придружаващ телескоп TAROT-S е разположен в Чили.

От 2006 г. Британският национален космически център (BNSC) спонсорира широкообхватния телескоп Starbrook като експериментален сензор за изследване. Телескопът се намира в Троодос/Кипър, има апертура от 10 cm, зрително поле от $10^\circ \times 6^\circ$ и CCD от 4008×2672 пиксела. Може да открива GEO обекти с размери до 1,5 m (визуална величина +14).

Астрономическият институт на университета в Берн (AIUB) управлява телескопа ZIMLAT с апертура от 1 m и зрително поле от $0,5^\circ$. От местоположението си в Zimmerwald той покрива сектор от 100° от GEO пръстена. CCD от 2048×2048 пиксела позволява откриване на обекти до визуална величина +19. Основните приложения на ZIMLAT са астрометрия и лазерно измерване. Въпреки това, до 40% от неговите нощни наблюдения се използват за проследяване на GEO обекти, открити от телескопа на ESA. ZIMLAT беше допълнен през 2006 г. от 20 cm телескоп ZimSMART (роботизиран телескоп Zimmerwald с малка апертура). Той е посветен на GEO проучване, използвайки CCD от 3056×3056 пиксела със зрително поле от $4,2^\circ$ (Вениаминов and Червонов, 2012).

Както виждаме от европейската концепция, оптичните наблюдения са насочени главно към GEO и MEO орбити, където има много телескопи за това наблюдение и броят на обектите в GEO и MEO орбитите е относително постоянен. Основната промяна в парадигмата в днешната сателитна индустрия е големият брой нано и микро сателити в LEO орбита, нашето внимание е насочено главно към тези видове наблюдения. За наблюденията на LEO в европейската концепция основна роля имат радарните наблюдения. Но точността на радарните наблюдения е добра по разстояние, но ниска в ъгловото положение. При оптичното наблюдение ситуацията е обратна. Така ,само комбинирането на тези 2 типа наблюдения може да помогне за увеличаване на точността на измерванията на траекторията на LEO обекти.

Друга важна причина за необходимостта от LEO оптични наблюдения е поради високото натоварване на радарите NORAD и системата за обработка на данни от много бързо нарастващия брой микро и нано сателити в LEO орбита, информация може да бъде намерена в

(GAO-23-105565, 2023). Поради тази причина решихме да насочим вниманието си основно към LEO обекти и потърсихме подобна концепция. Добър кандидат е концепцията на Военновъздушните сили на САЩ.

Разбира се изискванията за глобално покритие на мрежата за наблюдение и брой станции не са подходящи за нуждите на България. Нашата визия за национална SST система се основава на 3 стационарни станции за наблюдение и 1 мобилна станция. Мобилната станция ще може да пътува до всяка точка на страната в същия ден, когато е изготвен график за наблюдение, и да извършва наблюдения през същата нощ. Изисква се при тежки метеорологични условия, когато не са възможни наблюдения от стационарни станции.

Нашите констатации от експерименталната кампания за наблюдение доказват, че почти всички технически изисквания е възможно да бъдат постигнати с оборудване, подобно на нашето съществуващо. Разбира се, трябва да се свърши много работа за създаване на наблюдателни станции и особено за разработване на софтуерна система за контрол и обработка на данни.

Интеграция към съществуващи и проектиране на сензорни мрежи

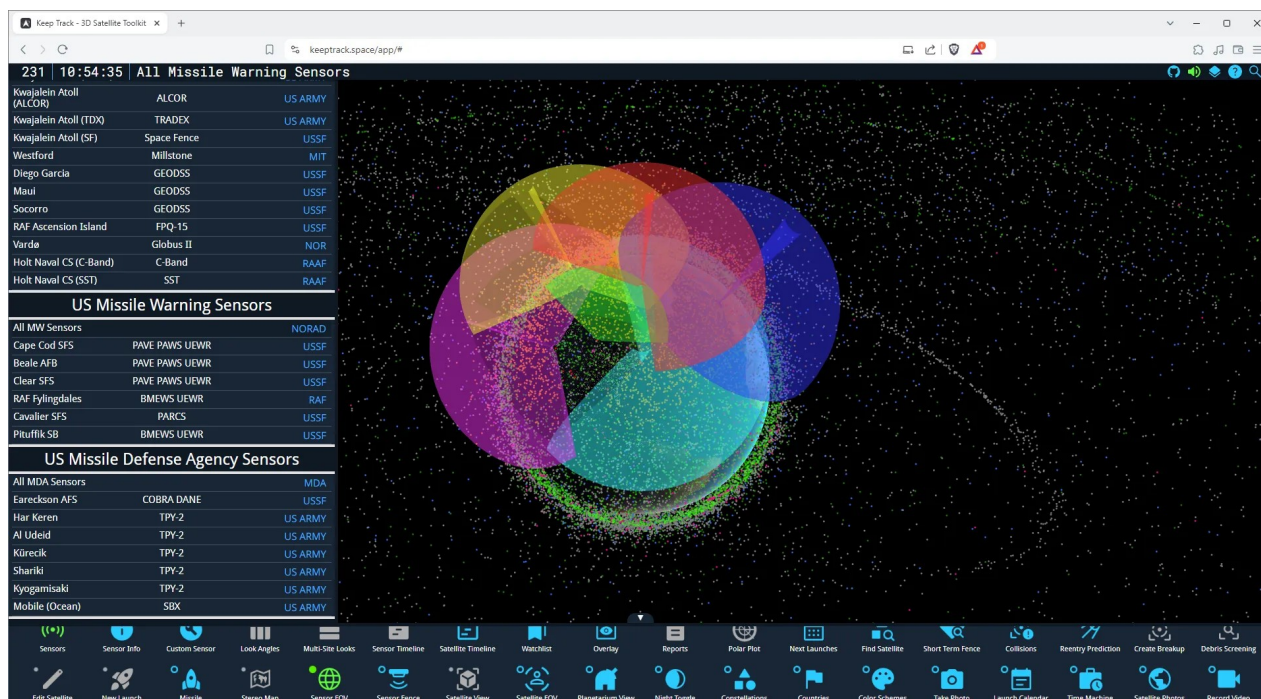
За да изпълним задачата за интегриране на България в Европейската наблюдателна мрежа първо бе направен преглед на съществуващите наблюдателни мрежи и технологията на обмен на данни (Kozłowski, 2019).

Космическото проследяване често разчита на мрежи от сензори, за да осигури пълно покритие. Някои забележителни мрежи включват:

1. Мрежа за космическо наблюдение (SSN): Управлявана се от американската армия, тази мрежа включва както радарни, така и оптични сензори, разпространени в световен мащаб.
2. Мрежа за предупреждение за ракети: Подгрупа от SSN, фокусирана върху откриване на изстрелвания на ракети и проследяване на балистични ракети.
3. Европейски център за космически операции (ESOC): Мрежата от сензори на Европейската космическа агенция за проследяване на сателити и отломки.
4. LeoLabs: Частна компания, специализирана в проследяване на обекти в ниска околоземна орбита с помощта на радари с фазирана решетка.
5. Сензори MDA: Мрежа от сензори, управлявана от Агенцията за противоракетна отбрана за проследяване на обекти в космоса.
6. Руски сензори: Русия използва различни радарни и оптични сензори за проследяване в космоса.

Като следваща част от задачата беше проектирането и симулацията на нови сензори за наблюдение и интегрирането им в съществуващите мрежи за наблюдение.

За целта се използва специализиран продукт за симулации KeepTrack.



Фиг. 14. Области на покритие от наземните радары.

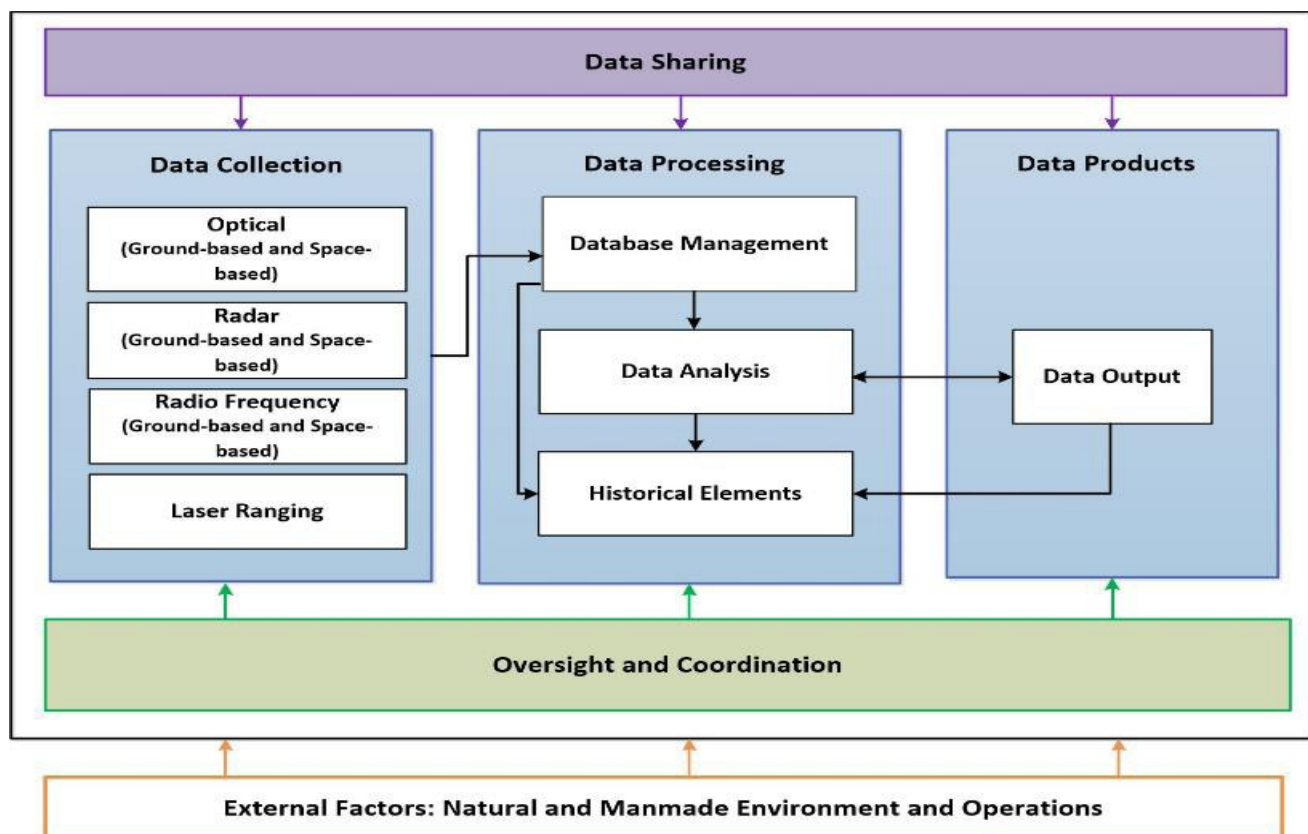
Обмен на данни от кооперативни наблюдения

Предложената рамка разделя системата за космически трафик на приблизително шест компонента (фигура по-долу). Първият е събирането на данни, което се отнася до граждански, военни и търговски сензори, независимо дали са наземни или космически. Второто е обработката на данни, която се отнася до управлението на наблюденията за създаване на база данни от резидентни космически обекти, анализиране на данните за създаване на продукти като предупреждения за връзка и поддържане на архив с данни. Третият е създаването на продукти с данни като предупреждения за връзка или сблъсък, които водят до действия като тези, предприети от операторите за избягване на сблъсъци. Четвъртият е набор от дейности, които осигуряват надзор и координация на средата и включват разпоредби, политики, насоки, стандарти и най-добри практики. Петият е споделянето на данни, което, както при надзора и координацията, обхваща целия континуум на системата за космически трафик. Не на последно място са външните фактори – комбинацията от екологични и оперативни реалности, които водят до промени както от техническа, така и от координационна страна (Lal B. and Buenconsejo R., 2018).

При създаване на концепцията за обща Европейска система за наблюдение на космическото пространство са разработени стандарти за обмен на данни от наблюденията на космически обекти. За наблюдения от оптични сензори формата на данните е TDM, което е стандартен формат за обмен на данни от наблюдения в Европейската Космическа Агенция.

Всички данни от проведените наблюдения са форматиращи в TDM формат и са предоставени на ЕКА с цел валидация на използваемостта на получените от нас данни.

Получената обратна връзка потвърди валидността на данните и високото качеството на получените резултати от проведените наблюдения



Фиг. 15. Диаграма на събиране и споделяне на данни.

Изводи

Проведеното изследване показва как може да бъде изградена наблюдателна мрежа на територията на България. Наличните астроклиматични условия у нас са сравнително благоприятни за оптични наблюдения в сравнение с някои от страните в Европа, които извършват такива наблюдения. Конкретен пример е даден с Базел, Швейцария.

При подходящо разположение на наблюдателните станции, може да се постигне сравнително висок процент наблюдателно време през голяма част от годината.

Проведените наблюдения показват, че даже и разполагайки само с оптични уреди за наблюдение, може да се осигури един сравнително добър обхват и контрол на орбитите на обектите в околоземното пространство. Ефективността в голяма степен зависи от броя на наблюдателните станции, степента на автоматизация на оптичните уреди и съвършенството на компютърната и софтуерна система за обработка на резултатите.

При изграждане на пълноценна система за наблюдение може да се постигне сравнителна независимост от информацията от външни системи, а при една добра интеграция с външни системи, може да се постигне актуална информация за обекти с повишен интерес и променлива орбита, което става особено актуално на фона на повишеното международно напрежение и засилена конкуренция в космоса.

Приноси

Проведеното изследване на астроклимата е първото задълбочено такова за България. Събраните организационни, технологични, научни и практически знания са много ценен материал, на базата на който, може да се пристъпи към изграждане на наблюдателна мрежа у нас.

Определени са местоположенията, удачни за разполагане на наблюдателни станции.

Направено е предпроектно проучване на различни инфраструктури за позициониране на оборудване за проследяване на спътници и космически обекти.

Поради стремежа ни да дадем на изследването приложен характер сме оформили получените резултати така, че да могат да се използват като ръководство за работа на специалистите, които евентуално ще продължат да развиват тази дейност. Постарали сме се да обхванем процеса на наблюдение на космически обекти в пълнота, което е голяма рядкост за научно изследване, но е от огромна полза при осъществяване на реални дейности по изграждане на наблюдателна мрежа.

Въз основа на опита, натрупан по време на кампанията за наблюдение са разработени два вида оптични станции за практическа употреба - мобилна и стационарна:

- Мобилна наблюдателна станция - В този случай обсъждаме само лека мобилна станция. Съществуващата станция е много компактна, може да се транспортира с микробус или комби, времето за настройка е около 30 минути и може да се управлява от един човек.

По време на пробната кампания за наблюдение нашият опит от мобилната станция е много положителен. В много облачни дни доказахме, че е възможно да се преместим на 400 км от стационарната обсерватория до място, където условията за наблюдение са добри, и да извършваме наблюдения от това място същата нощ. Резултатите от такива наблюдения са с добро качество, подобни на тези от стационарната наблюдателна станция.

- Стационарна наблюдателна станция - За такъв вид станция е много важен бързо движещ се купол със скорост на проследяване, равна на скоростта на проследяване на стойката на телескопа, в този случай поне 2°/сек.

За такъв тип задачи ИТ инфраструктурата (хардуер и софтуер) е много важна част от основната функционалност. Количеството данни, генерирани по време на една нощна сесия за наблюдение на една обсерватория, е в диапазона от 2 до 10 GB. Това изисква бързо намаляване на изображението и определяне на координатите, което изисква мощни изчислителни ресурси.

В най-често срещания режим на работа изображенията се правят на всеки 3 секунди. Това е причината за високите изисквания, ако искаме да обработваме изображения в реално време. В случай само на астрометрия и ясно небе обработката е сравнително бърза и модерна работна станция е добро решение. В случай на облаци върху снимката, обработката е по-трудна и изолирането на сателитната следа и определянето на координатите значително забавят процеса. Обсъдени са няколко опции, включително персонален сървър във всяка обсерватория за предварителна обработка на изображения и само предаване на TDM файлове към централен

сървър. И двете концепции имат предимства и недостатъци, така че крайното решение е компромис, който изисква допълнително тестване и разработка на софтуер.

Разработена е организационна и функционална структура на бъдеща система за наблюдение на космически обекти на територията на България.

Започнати са експерименти по създаване на единен център за данни за архивиране и обработка на резултатите от всички наблюдателни станции. Това ще намали разходите и ще подобри качеството на поддръжката.

Най-важната част на централния сървър е способността да планира и пренасрочва задачи за наблюдение между разпределени станции в зависимост от възможностите на сензора и атмосферните условия. При ясно небе тази задача е тривиална, но ако има изискване за висока наличност на наблюдения, диспечерът трябва да работи максимално, за да се справи с динамичните облаци в небето. Опитът, натрупан по време на кампанията за наблюдение, за координиране на 4 наблюдателни станции с динамично състояние на облачността, ни показва важността на централното управление и динамичното пренареждане на наблюденията. Най-доброто за тази роля е автоматизирана система, която може да анализира атмосферните условия и качеството на снимките, за да преизчисли най-доброто местоположение за наблюдение и да генерира нов график при всяка промяна на атмосферните условия.

Направено е сериозно проучване на възможността България да участва в европейската наблюдателна мрежа. Проведена е серия от консултации с представители на Европейската Космическа Агенция и е осъществен практически експеримент по обмен на данни от наши наблюдения. При изграждане на съответния капацитет от българска страна има възможност България да бъде приета за равноправен член на тази общност, с всички произтичащи от това позитиви.

Статии на автора по темата на дисертационния труд

1. Stoev, A.; Shopov, Y.; Maglova, P.; Ognyanov, O.; Raykova, L. Prehistoric Astronomical Observatories and Paleoclimatic Records in Bulgaria Estimate Astroclimate during 4000–4500 BCE: A Critical Assessment., *Quaternary* 2023, 6, 6. <https://doi.org/10.3390/quat6010006> Academic Editors: Ioannis Liritzis and James B., Published: 5 January 2023

2. Алексей Стоев, Огнян Огнянов, Пенка Стоева, Любомира Райкова., Мониторинг на катастрофични процеси с космически и земен произход., *SocioBrains* ISSN 2367-5721 (online), Publisher: SMART IDEAS – WISE DECISIONS, Ltd., Sofia, Bulgaria ISSUE 90, FEBRUARY 2022, стр. 96 – 100.

http://sociobrain.com/bg/top/issues/Issue+90%2C+February+2022/2._Alexey_Stoev_Ognyan_Ognyanov_Penka_Maglova.pdf
(sociobrain.com)

3. Огнян Огнянов, Пенка Стоева, Алексей Стоев, Явор Шопов., Наземни оптични наблюдения на космически отпадъци: актуален преглед и перспективи., В Сборник с доклади от научна конференция „Близкия космос – обща цел“, 10-11 май 2022 г., ИКна НВУ „Васил Левски“, 2022, стр. 7 – 17. ISSN 2815-3529 CD

4. Мирослав Костов, Огнян Огнянов, Пенка Стоева, Алексей Стоев., Разработване на структурно-логическа схема за геоинформационно моделиране на околоземното космическо пространство., *SocioBrains* ISSN 2367-5721 (online), JOURNAL HOMEPAGE: WWW.SOCIOBRAINS.COM Publisher: SMART IDEAS – WISE DECISIONS, Ltd., Sofia, Bulgaria ISSUE 90, FEBRUARY 2022

5. Огнянов О., Изследване на астроклимата в определени географски локации за подбор на оптимални места за космически наблюдения., В Сборник с доклади: NINETEENTH INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE SPACE, ECOLOGY, SAFETY - S E S'2023, PROCEEDINGS, BAS, 2023 стр. 226 - 234, p-ISSN 2603 – 3313, e-ISSN 2603 – 3321.

http://www.space.bas.bg/SES/archive/SES%202023_DOKLADI/PROCEEDINGS%20SES%202023.pdf

6. Огнянов О., Спасова М., Мъглова П., Стоев А., Онтологична архитектура на данните за орбитални отпадъци в околоземното космическо пространство., НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „БЛИЗКИЯТ КОСМОС – ОБЩА ЦЕЛ“ 11-12 май 2023 г., Велико Търново 2023 г., Издателски комплекс на НВУ „Васил Левски“, Велико Търново, стр. 38-48, ISSN 2815-3510 Print, ISSN 2815-3529 CD, DOI: 10.34660/INF.2023.82.45.004

7. Паров П., Стоев А., Огнянов О., Мъглова П., Наноспътник за наблюдения на физически параметри на Слънцето: еволюция на фотосферния диаметър, пулсации, слънчева активност., В СБ. ДОКЛАДИ ОТ НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „БЛИЗКИЯТ КОСМОС – ОБЩА ЦЕЛ“ 11-12 май 2023 г., Велико Търново 2023 г., Издателски комплекс на НВУ „Васил Левски“, Велико Търново, стр. 65-72, ISSN 2815-3510 Print, ISSN 2815-3529 CD, DOI: 10.34660/INF.2023.54.31.006

8. Стоев А., Мъглова П., Огнянов О., Спасова М., Фундаментални изследвания на разпределението и еволюцията на „космическите отпадъци“ около Земята., 51-ва НАЦИОНАЛНА КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ВЪПРОСИТЕ НА ОБУЧЕНИЕТО ПО ФИЗИКА на тема: ОБРАЗОВАНИЕТО И НАУЧНИТЕ ИЗСЛЕДВАНИЯ ПО ФИЗИКА – ФАКТОР ЗА

УСТОЙЧИВО РАЗВИТИЕ 10 – 13 април 2023 г., София, Издание: СФБ, София, стр. 147-151, ISBN978-954-91841-8-1, ISBN978-954-91841-9-8 (e-book PDF), https://upb.phys.uni-sofia.bg/conference/NK/51NK_Dokladi.pdf

Проекти и доклади на автора по темата на дисертационния труд

1. Shopov Y., Stoev A., Dankov P., Ognyanov O., 2018, Preparatory activities to join SSA (Space Situation Awareness) program of ESA (European Space Agency) (PASSA), Project of ESA No. AO/1-8785/16/NL/SC.
2. Penka Stoeva, Alexey Stoev, Ognyan Ognyanov, Miroslav Kostov., History, present and perspectives of space observation and tracking (SST) in Bulgaria and the application of STEM based technologies to achieve current models and catalogs, Първа национална конференция STEM ОБРАЗОВАНИЕ И ИНОВАЦИИ - Симбиоза и синергия в съвременните образователни практики: НАУКА, ТЕХНОЛОГИИ, ИНЖЕНЕРИНГ И МАТЕМАТИКА, ИЗКУСТВА И СПОРТ (STEAMS), 09 - 11 Април 2021, Sofia, <https://edutechflag.eu/1st-stem-conference-2021>, стр. 27.
3. Мирослав Костов, Пенка Мъглова, Огнян Огнянов, Алексей Стоев, Космическите наблюдения и проследяване (SST) на ИСЗ като синтез на предизвикателства за STEM ориентирано образование на студенти и докторанти., 49-та НАЦИОНАЛНА КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ВЪПРОСИТЕ НА ОБУЧЕНИЕТО ПО ФИЗИКА на тема: „ФИЗИКАТА В STEM ОБРАЗОВАНИЕТО В СРЕДНИТЕ И ВЪВ ВИСШИТЕ УЧИЛИЩА“ 4 – 6 юни 2021 г. Видин, http://upb.phys.uni-sofia.bg/conference/NK/Programa_49NK.pdf.

Литература

- Abbasi, V., 2019. THE NEOSSAT EXPERIENCE: 5 YEARS IN THE LIFE OF CANADA'S SPACE SURVEILLANCE TELESCOPE.
- Acernese, M., 2019. USE OF MULTI-SITE OPTICAL MEASUREMENT FOR JOINT PHOTOMETRIC AND ASTROMETRIC OBSERVATIONS.
- Ackermann M., Zimmer, P., McGraw, J.T., McGraw, J., McGraw, J.T., Kopit, E., 2016. COTS Options for Low-Cost SSA.
- Anheier NC, Chen C., 2014. A New Approach to Space Situational Awareness using Small Ground-Based Telescopes. U.S. Department of State.
- Baird, M.A., 2013. Maintaining Space Situational Awareness and Taking It to the Next Level. Air & Space Power Journal.
- Berger T. E., M. J. Holzinger, E. K. Sutton, J. P. Thayer, 2020. Flying Through Uncertainty.
- Berger, T.E., 2023. The Thermosphere Is a Drag: The 2022 Starlink Incident and the Threat of Geomagnetic Storms to Low Earth Orbit Space Operations.
- Braun, V., Lemmens, S., Reihls, B., Krag, H., Horstmann, A., 2017. ANALYSIS OF BREAKUP EVENTS.
- Cefola, P.J., 2010. OPEN SOURCE SOFTWARE SUITE FOR SPACE SITUATIONAL AWARENESS AND SPACE OBJECT CATALOG WORK.
- Cibin, L., 2019. The Fly-Eye Telescope, Development and First Factory Tests Results.
- Curtis, H.D., 2014. Orbital Mechanics for Engineering Students.
- Del Genio G., Jacopo Paoli, Enrico Del Grande, Ferdinando Dolce, Walter Villadei, Marco Reali, Andrea Aquilini, 2016. Italian_Air_Force_Radar_and_Optical_Sens.

- Doubek, J., 2019. NEOSTEL DATA PROCESSING CHAIN.
- Emmert, J.T., Drob, D.P., Picone, J.M., Siskind, D.E., Jones, M., Mlynczak, M.G., Bernath, P.F., Chu, X., Doornbos, E., Funke, B., Goncharenko, L.P., Hervig, M.E., Schwartz, M.J., Sheese, P.E., Vargas, F., Williams, B.P., Yuan, T., 2021. NRLMSIS 2.0: A Whole-Atmosphere Empirical Model of Temperature and Neutral Species Densities. *Earth Space Sci.* 8, e2020EA001321. <https://doi.org/10.1029/2020EA001321>
- Ender, J., 2012. Use of the FGAN Tracking and Imaging Radar for Satellite Imaging.
- ESA Space Debris Office, 2024. Space_Environment_Report.
- Firago, B.A., 1969. Space triangulation by means of satellite astrometry.
- Flegel, S., Gelhaus, J., Wiedemann, C., Vörsmann, P., Oswald, M., Stabroth, S., Klinkrad, H., Krag, H., 2009. THE MASTER-2009 SPACE DEBRIS ENVIRONMENT MODEL.
- Flohner T., Beatriz Jilete, Alexandru Mancas, Holger Krag, 2016. Conceptual Design for Expert Centres Supporting Optical and Laser Observations.
- Flohner, T., Braun, V., 2015. Operational Collision Avoidance at ESOC.
- Flohner, T., Krag, H., 2017. SPACE SURVEILLANCE AND TRACKING IN ESA'S SSA PROGRAMME.
- Fruh C., 2011. Identification_of_Space_Debris.
- GAO-23-105565, 2023. SPACE SITUATIONAL AWARENESS DOD Should Evaluate How It Can Use Commercial Data [WWW Document]. URL <https://www.gao.gov/assets/gao-23-105565.pdf> (accessed 2.4.25).
- Gasdia, F., 2016. OPTICAL TRACKING AND SPECTRAL CHARACTERIZATION OF CUBESATS FOR OPERATIONAL MISSIONS.
- Gruss, M., 2015. US Air Force Seeks New Space Situational Awareness Data to Track Threats [WWW Document]. Space.com. URL <https://www.space.com/31159-air-force-space-situational-awareness.html> (accessed 2.4.25).
- Hofsteenge R., 2013. Computational Methods for the Long-Term Propagation of Space Debris Orbits.
- Johnson T., 2019. COMBINING SHORT ARC OPTICAL TRACKS FOR IMPROVED SSA.
- Kaminski K., 2019. LOW LEO OPTICAL TRACKING OBSERVATIONS WITH SMALL TELESCOPES.
- Kessler, D.J., Cour-Palais, B.G., 1978. Collision frequency of artificial satellites: The creation of a debris belt. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 83, 2637–2646. <https://doi.org/10.1029/JA083iA06p02637>
- Kirchner G., Koidl F., 2015. Laser Ranging to Space Debris from Graz Laser Station.
- Kloth, A., 2019. On the Horizon: New ESA Laser Ranging Station (ELRS) with Debris Tracking Capabilities.
- Kozłowski, S.K., 2019. OMNISKY: WIDE ANGLE MULTI-CAMERA STATION NETWORK CONCEPT FOR RE-ENTRY DETECTION.
- Lal B., Buenconsejo R., 2018. Global Trends in Space Situational Awareness (SSA) and Space Traffic Management (STM).
- Lee S., 2009. Dynamics and Control of Satellite Relative Motion: Designs and Applications.
- Lévesque M., 2012. Detection of Artificial Satellites in Images Acquired in Track Rate Mode.
- Lévesque M. P., Buteau S., DRDCValcartier, 2007. Image processing technique for automatic detection of satellite streaks.
- McCall, G.H., Darrah, J.H., 2014. Space Situational Awareness. *Air & Space Power Journal.*
- Merz K., Virgili, B.B., Braun, V., Flohner, T., Funke, Q., Krag, H., Lemmens, S., 2017. Current Collision Avoidance service by ESA's Space Debris Office.
- Mokhnatkin, A., 2017. PERFORMANCE ANALYSIS OF THE LARGE SPACE DEBRIS TRACKING TELESCOPE IN THE NORTH CAUCASUS AFTER THE SECOND FIRST LIGHT.
- NASA, 2024. Orbital Debris Management & Risk Mitigation.

- Newman, C.P., Chiappina, F., Reid, C., 2023. MACHINE LEARNED ATMOSPHERIC FORCE MODEL TRAINED WITH TWO LINE ELEMENTS.
- Olmedo, E., Sánchez-Ortiz, N., 2010. Space debris cataloguing capabilities of some proposed architectures for the future European Space Situational Awareness System. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 403, 253–268. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15749.x>
- Salvador V., 2015. LOW EARTH ORBIT SATELLITE TRACKING TELESCOPE NETWORK.
- Sánchez M., 2019. EMPLOYING FAST ORBIT PREDICTION FOR OPTIMISATION OF SATELLITE VISIBILITY COMPUTATION.
- Schmalz S., 2019. ISON'S SUB-NETWORK OF SMALL APERTURE TELESCOPES FOR OBSERVATIONS OF NEOS, SPACE DEBRIS AND METEORS.
- Schmunk M., 2008. Initial Determination of Low Earth Orbits Using Commercial Telescopes.
- Scott Robert L., 2015. A Method for Optical Tracking of On-Orbit Servicing Operations in Geostationary Orbit Using Speckle Interferometry.
- Setty, S.J., Flohrer, T., Krag, H., 2019. SLR FOR SPACE DEBRIS MONITORING: AN ANALYSIS ON REQUIREMENTS AND ACHIEVABLE ORBIT IMPROVEMENT.
- Skuljan J., Kay J., 2016. Automated astrometric analysis of satellite observations using wide-field imaging.
- Sukhov P., 2007. About using wide field lens optics for Space Surveillance Systems in Odessa Astronomical observatory.
- Sybilska A., 2019. Astrometry24.NET – precise astrometry for SST and NEO.
- Tartakovsky A. G., 2019. EFFICIENT ESTIMATION AND DECISION-MAKING METHODS FOR SHORT TRACK IDENTIFICATION AND ORBIT DETERMINATION.
- Torres J., Noelia Sánchez-Ortiz, Raúl Domínguez-González, 2019. From NEO to LEO optical observations and back: Sensors features and observing strategies.
- Utzmann, J., Wagner, A., Silha, J., Schildknecht, T., Willemsen, P., Teston, F., Flohrer, T., 2014. SPACE-BASED SPACE SURVEILLANCE AND TRACKING DEMONSTRATOR: MISSION AND SYSTEM DESIGN. *Th Int. Astronaut. Congr.*
- Vallado D., 2013. *Fundamentals_of_astrodynamics_and_applications.*
- Vallado, D.A., Agapov, V., 2010. Orbit Determination Results From Optical Measurements.
- Vananti, A., 2015. STREAK DETECTION ALGORITHM FOR SPACE DEBRIS DETECTION ON OPTICAL IMAGES.
- Vaubailion J., 2019. DETECTION OF LOW EARTH ORBIT ARTIFICIAL SATELLITES WITH ASTRONOMY CAMERA.
- Virgili B., 2019. COMBINING OBSERVATIONS FOR RE-ENTRY PURPOSES.
- Weddell, S.J., 2019. NEAR EARTH OBJECT IMAGE RESTORATION WITH MULTI-OBJECT ADAPTIVE OPTICS.
- Weiland C., 2015. *Computational Space Flight Mechanics.*
- Wie, B., 2008. *Space Vehicle Dynamics and Control.*
- Wijnen, T.P.G., 2019. USING ALL-SKY OPTICAL OBSERVATIONS FOR AUTOMATED ORBIT DETERMINATION AND PREDICTION FOR SATELLITES IN LOW EARTH ORBIT.
- Wilson B., 2016. INITIAL ORBIT DETERMINATION THROUGH OPTICAL OBSERVATIONS.
- Wright, J.R., 2013. *Orbit Determination Tool Kit.*
- Yanagisawa, T., 2019. SMALL NEO SEARCH TECHNOLOGIES USING SMALL TELESCOPES AND FPGA.
- Zhang C., 2019. CHES: A RAPID ALL-SKY TIME DOMAIN SURVEY.
- Żołnowski, M., 2019. OBSERVATIONAL EVALUATION OF EVENT CAMERAS PERFORMANCE IN OPTICAL SPACE SURVEILLANCE.
- Вениаминов, С.С., Червонов, А.М., 2012. Космический мусор угроза человечеству.