

# SATELLITE BASED AUGMENTATION SYSTEM AND IT'S APPLICATION IN THE TRANSPORT

## ИЗПОЛЗВАНЕ НА КОСМИЧЕСКИ ДОПЪЛНЕНИ СПЪТНИКОВИ НАВИГАЦИОННИ СИСТЕМИ В ТРАНСПОРТА

Assoc. Prof. Dr. Eng. B. Vassilev, Eng. S. Trendafilov, Eng. T. Atanassov  
Technical University of Sofia - Bulgaria

**Abstract:** Augmentation signals provided by geostationary satellites of European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) are intended to improve the accuracy and more important - the reliability of the calculated user coordinates. The main reason for this paper was to test the performances of the EGNOS corrections in position determination of light aircrafts and land vehicles. The aim of the research was to show the advantages of Satellite Based Augmentation Systems in different kinds of transport.

**KEYWORDS:** NAVIGATION, GNSS, EGNOS

### 1. Увод

Глобалните спътникови навигационни системи са продукт на развитието на няколко технологии: стабилните космически платформи, атомните стандарти за честота, широкоспектърните сигнали и микроелектрониката стоят в основата на реализацията на една от най – старите идеи в навигацията – триангулацията или определянето на местоположението по отдалечението от точки с известни координати.

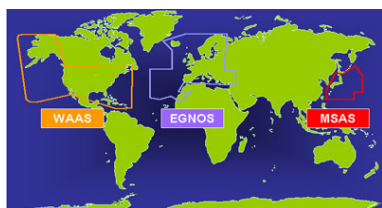
**Проблемите пред спътниковите навигационни системи** с времето са се променяли, но актуални са:

- уязвимостта от външна или вътрешна интерференция;
- изкуствени и естествени смущения;
- временната липса на сигнал, поради маскиране или липсата на покритие над дадената местност (нарушена видимост на наблюдаваните спътници).

За подобряването характеристиките на спътниковите навигационни системи (включително и точността), е необходимо „допълване” или „разширяване” (augmentation) възможностите ип с допълнителни средства – геостационарни спътници (*Satellite Based Augmentation System*), еталонни станции (*Ground Based Augmentation System*), псевдо-спътници (наземни станции, работещи като спътници, *pseudolites*).

Допълващите системи подобряват точността при определяне местоположението, чрез изпращането на корекции до потребителя. Най-често използваната класификация на допълващите системи е в зависимост от района на покритие, начина на подобряване на спътниковата геометрия и метода на предаване на диференциалните корекции към потребителя – биват наземни и космически (*“ground-based” GBAS* и *“space-based” SBAS*).

Спътниковите допълващи имат покритие в обширни зони - до континентален размер. Мрежа от наземни приемници с прецизно известни местоположения непрекъснато обновяват оценката на грешките за всеки наблюдаван спътник. Тази система използва геостационарни спътници, които излъчват коригиращо съобщение към съответния район. На долната фигура са показани развиваните в момента космически допълнени системи.

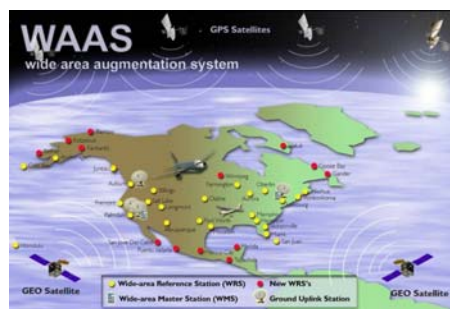


Фиг. 1 Покритие на съществуващите SBAS към 2007 г.

Това са: Wide area augmentation system (WAAS) от Министерството на Отбраната на САЩ, European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) от Европейската космическа агенция, MTSAT (Multi-functional Satellite-based) Augmentation System (MSAS) развивана от Японското бюро по гражданска авиация (JCAB), агенцията по метеорология (JMA) и Министерството на земята, инфраструктурата и транспорта, GPS Aided Geo Augmented Navigation (GAGAN) от Индийското правителство, SNAS – проект на Китай.

### WAAS

На фиг. 2 е показана американската допълнена спътникова навигационна система WAAS.



Фиг.2 Архитектура на континентална допълваща система – WAAS, USA

Следващата фаза от развитието на WAAS е т. нар. Глобална навигационна спътникова система за кацане или GLS (*GNSS Landing System*). Очаква се тази система да стане оперативна до 2013 г.

### MSAS

Тази азиатска допълваща система съответства на MOPS (Minimum Operational Performance Standard – SBAS стандарт за бордовото навигационно оборудване използван от EGNOS и WAAS). Тя излъчва най-вече метеорологична и навигационна информация – на ниска и висока разрешаваща способност.

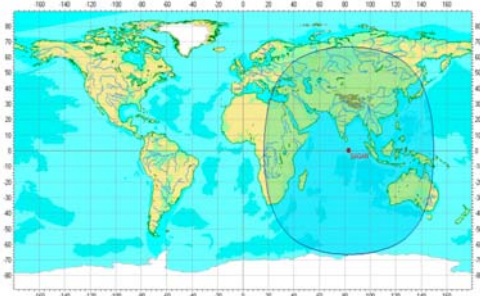
Космическият сегмент на MSAS засега се състои от два геостационарни спътника – MTSAT-1R и MTSAT-2. Тези спътници осигуряват покритие над източната част на Азия, западните тихоокеански райони и части от Австралия. В плана на развитието на MSAS следва откриването на японската Квази-Зенитна спътникова система (Quasi-Zenith Satellite system, QZSS) през 2009. Тази система е проектирана така, че от три GPS съвместими спътника следващи орбита с формата на осморка с център в Екваториалната равнина, поне един (но обикновено ще са два) спътник да бъде над територията на Япония в зенит. Системата ще бъде допълваща (подобно на програмата Galileo), като цели основно да оптимизира мобилните наземни приложения (навигацията на колите в градовете, където сигналите от спътниците при ниски ъгли на елевация често са блокирани). Това е особено важно за Япония, тъй като в тази държава годишно се произвеждат между 4 и 5 милиона коли и идеята е GPS навигатора да е от стандартното

им оборудване. Планирано е с разширяването на QZSS да се създаде JRANS (Japan's regional advanced navigation satellites), която да обхваща по-голямата част от Източна и Югоизточна Азия, включително и Китай, двете Кореи и части от Сибيريا, и чрез GPS съвместими сигнали да се разшири над Австралия и Нова Зеландия, към Антарктика.

За разлика обаче от другите спътникови системи, чиито спътници се движат с постоянна скорост по кръгови орбити около земята, JRANS спътниците ще имат яйцевидна орбита, което ще води до ускоряване на тяхното движение в южна посока и бавното им движение в северното полукукло. Това ще осигури максимално добро определяне на местоположението на потребителите за този район.

#### GAGAN

Развиваният в момента SBAS ,планиран да стане оперативен през 2008, е за нуждите най-вече на Гражданската авиация в Индия, като космическият сегмент (геостационарния спътник GSAT-4, местоположение: 82°E) ще бъде съвместим с GPS и Galileo и ще работи на две честоти – L1 и L5. Земният сегмент се състои от осем Индийски еталонни станции, управляващ контролен център в Бангалор, земна станция за предаване на информацията към геостационарния спътник и съответния навигационен софтуер и канали за връзка. В момента GAGAN е в тестови период или т. нар. Technology Demonstration System (TDS). Използвайки GPS сигнали, системата излъчва корекции до потребителите. Засега резултатите надминават очакванията – постигната е точност от порядъка на метър по хоризонтала и малко повече от метър за вертикала, т. е. изпълнява изискванията за прецизно кацане. Редица от подсистемите в GAGAN са производство на американската фирма Raytheon.



Фиг.3 Планирано покритие на геостационарния спътник на GSAT-4

#### SNAS

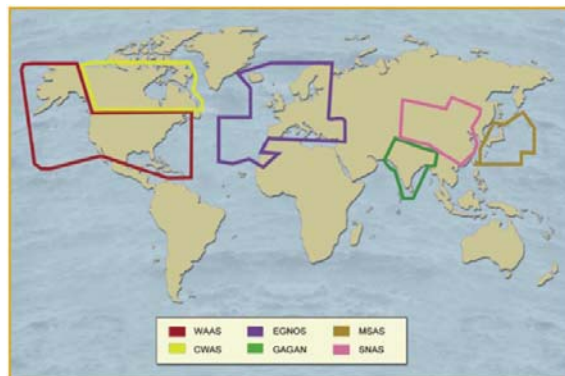
Китайската народна република разработва спътникова допълваща система за навигация - Satellite Navigation Augmentation System (SNAS) - първа крачка към по-големия проект на Китай да развие независима спътникова навигационна система - Beidou Satellite Navigation and Positioning System.

#### CWAAS

Канадската SBAS (известна като CWAAS) се основава на разширяване покритието на американската WAAS чрез вграждането на мрежа от еталонни станции и свързването им с американските централни контролни станции.

Взаимодействието между отделните SBAS винаги е било необходимо за осигуряването на глобално непрекъснато безопасно навигационно обслужване. Затова от самото начало разработчиците на SBAS и службите поддържащи въздушното движение, работят съвместно за координиране на дейностите си в рамките на ИКАО и в Работната група за взаимодействие - Interoperability Working Group (IWG). Една от основните дейности е да се подпомага ИКАО и RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics), организация с идеална цел за развиването на стандарти свързани с FAA, за напредък в

науката и техниката в областта на авиацията и авиационните електронни системи в полза на потребителя) в развиването на стандарти: SARPS (Standards and Recommended Practices) и MOPS (Minimum Operational Performance Standards) за производителите на приемници.



Фиг.4 Покритие на разработваните SBAS

Друга разновидност на допълнените системи е **ABAS** – (Aircraft Based AS) система, намираща се на борда на ВС, чиито функции са комбинирани с един или повече други елементи на GNSS. При това приемника на GNSS сигнали и използваната бордова система при действието на ABAS трябва да отговарят на изискванията на ИКАО за точност, интегритет, продължителност и наличност.

ИКАО и FAA регламентират (съответно в Анекс 10 -Наредба 10, Том 1, Глава 3 и във Федерални Радионавигационни системи 2001, навигационни изисквания за работа (Required Navigation Performance – RNP)), които са непостижими за GPS използван самостоятелно. Тези навигационни изисквания гарантират сигурността и безопасността при използването на системата GNSS в различните етапи от полета на ВС и са свързани със следните ключови величини: точност, интегритет, наличност и продължителност (*accuracy, integrity, availability, u continuity*).

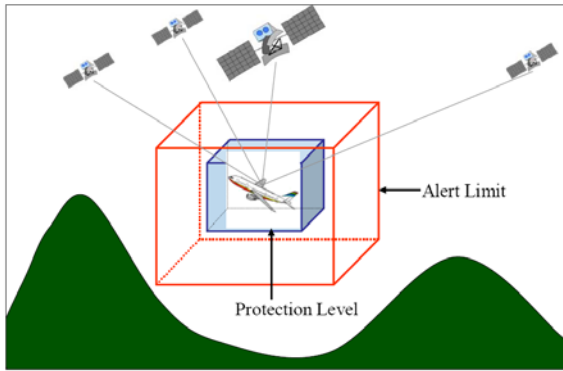
**Точност** – Мярка за разликата между изчислените и истинските координати при номинални условия без грешки. Обикновено точността се изразява чрез 1σ (68 %) или 2σ (95 %) граница на грешката на местоположението, като хоризонталната и вертикалната компонента се разглеждат по отделно.

**Интегритет на системата**– способността на навигационната система да открива аномалии и да осигурява навременни предупредителни сигнали към потребителите, когато системата не трябва да бъде използвана за навигация. За да бъде качествена навигационната система, тя трябва да предоставя информация за това в какви граници варират грешките в реално време, при всякакви условия.

**Продължителност на обслужването** – Това е вероятността системата да осигурява изискванията за Точност и Интегритет по време на цялата полетна задача без прекъсване. Може да се каже, че продължителността и интегритета са противоречащи си термини. Ако алгоритмите за интегритета са изключително чувствителни, прекалено много фалшиви тревоги (аларми) ще бъдат изпратени до потребителя и продължителността на системата ще намалее.

**Наличност на услугата** – Вероятността, че функциите свързани с навигация и откриване на грешки на системата работят и че изискванията за точност, интегритет и продължителност са спазени. Този параметър зависи от поддържаната връзка между потребителя и поне един геостационарен спътник .

Концепцията за наличността в тримерното пространство е илюстрирана на фиг.5.



Фиг. 5 Тримерно представяне на предупредителните граници (VAL, HAL) и защитните равнини (VPL, HPL).

Независимо, че GPS е конструирана да бъде значително устойчива, засега използвана самостоятелно тази система не може да удовлетвори навигационните изисквания на авиацията, посочени по-горе (хоризонталната и вертикалната ѝ точност са съответно около 13 и 22 метра, наличността ѝ около 99 %, а данни за интегритета и продължителността на операциите за сега не са точно установени.)

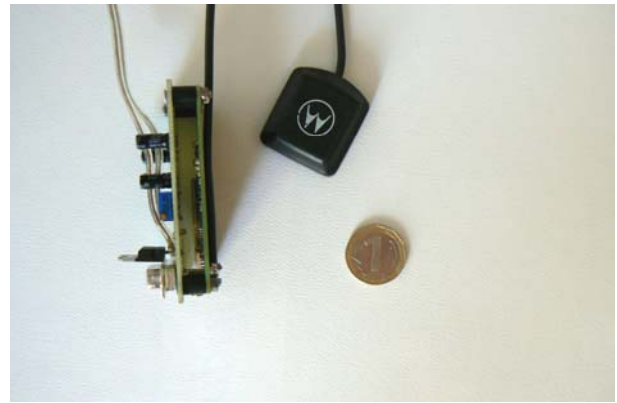
Точността на Глобалната Система за Позициониране (GPS) днес е около 15 метра, но потребителите не могат да бъдат сигурни колко достоверно е изчисленото им местоположение с тази система, тъй като на обикновените GPS приемници не се получават съобщения за интегритета на системата. Това е проблем за GPS като система, тъй като не може да се използва за осигуряване на безопасността на човешкия живот (*Safety of Life - SoL*) без допълваща система – например не е подходяща за осигуряване на воденето на кораб през тесен проток, на кацачи ВС. За по-точно и сигурно определяне на положението трябва да има помощна система.

### Galileo

Самостоятелната спътникова навигационна система Galileo ще включва 30 спътника на височина 23 222 км. С опита придобит от наземните изследвания, Европейската космическа агенция и GJU успешно изведоха в орбита първия тестови спътник GIOVE-A (*Galileo In-Orbit Validation Element*, както и Юпитер на италиански, чиито първи 4 спътника е открил именно Галилей). Така втората версия на проекта Galileo GSTB-2A, бе реализирана на 28 Декември 2005 г. Ракетата носител Съюз бе изстреляна в 05:19 UTC от космодрума Байконур. Вторият тестови спътник има по-сложен полезен товар от GIOVE-A, включващ два рубидиеви атомни часовника (стабилност 10 ns за ден) и първият в света водороден мазерен атомен часовник (стабилност 1 ns за ден!) – най-точния часовник, който някога е изстрелван в открития космос.

## 2. Експериментални изследвания

На базата на натрупан опит, в катедра “Въздушен транспорт” на ТУ-София беше конструиран приемник за спътникова навигация, като част от дипломната работа на инженерите Ст. Трендафилов и Т. Атанасов. На долната снимка е показан реализираният приемник за спътникова навигация.



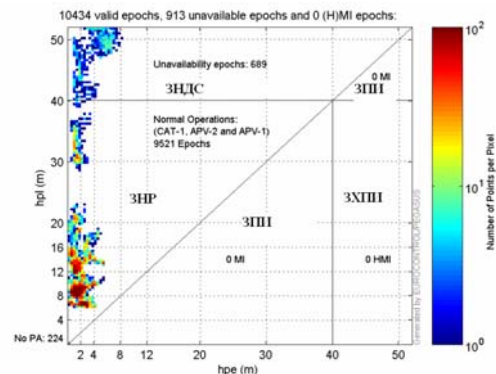
Фиг. 6 Реализираният приемник.

Бяха направени статични и динамични изпитания на приемника, като последният беше конфигуриран за работа с европейската допълнена система EGNOS. Статичните изпитания се извършиха на територията на катедрата, а динамичният експериментът е извършен с полет с полетен номер SCU 4101 на 10.04.2008 г. в района на летище Горна Оряховица (LBGO), между 06:30 и 07:45 UTC.

### Резултати от експеримента

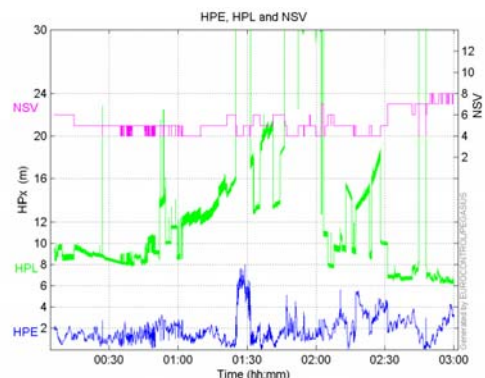
#### • Резултати от статичния експеримент

На фиг.7 е показана станфордската диаграма за грешката по хоризонтала. Експериментът обхваща 3 часов запис.



Фиг. 7 Грешка по хоризонтала.

На фиг.8 е показана хоризонталната грешка, защитното ниво и броя на използваните при навигацията спътници. Това е доста показна фигура, от която могат да се направят много съществени изводи.



Фиг. 8 HPE, HPL и NSV.

- Грешката по хоризонтала е в много прилични граници – за голям участък от време под 2 метра.

- В определени интервали от време грешката скача “значително”. Това изменение се обяснява с броя на използваните за навигация спътници – той е на нивото на минимума – 4 спътника. В момента когато и тяхната геометрия е лоша, то грешката отива на нивото на 6 – 8 метра.
- Поведението на PL е подобно на това на грешката с тази разлика, че имаме много висок коефициент на инфлация.

#### • Резултати от динамичния експеримент

Поради невъзможността антената да бъде монтирана на горната външна повърхност на тялото на самолета и вземайки предвид, че предното стъкло на самолета няма вградени метални нагреватели (предното стъкло на този самолет се подгрява с топъл въздух), антената на приемника е поставена в предната част на пилотската кабина над дъската с пилотажно – навигационното оборудване. Компановката на самолета и големият фанар от радиопрозрачен материал осигуряват добра видимост на спътниците от антената.



**Фиг. 9** Положение на антената.



**Фиг. 10** Видимост на антената.

Бяха записани 4 файла с обща продължителност 25 min. Записите включват периоди от запуска на двигателите до края на полета и установяването на стоянката.

По-долу е показана спътникова снимка на района на летище Горна Оряховица с нанесена траектория на движение на самолета от стоянката до изпълнителния старт на полосоa RWY09.

В записа се наблюдава дрейф на координатите при стационарно положение на самолета на стоянка.



**Фиг. 11** Траекторията на рулирането нанесена върху спътникова снимка..



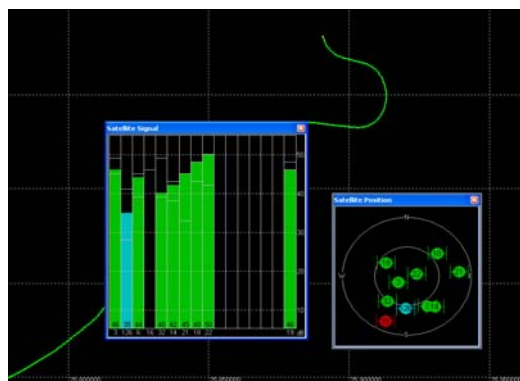
**Фиг. 12** Траекторията на рулирането.

Интересен момент е изпълнението на два виража с наклон от  $45^\circ$ . При изпълнението на тези елементи, на четири пъти се наблюдава пропадане на сигнала. Това се вижда от долните фигури. В началото на виража приемникът получава сигнал от 10 спътника, един от които геостационарен (PRN 126), като сигналът от 8 от тези спътници е на ниво над 40dB.

В резултат от зададения голям напречен наклон и повдигането на носа на самолета, силата на сигнала от спътниците от страната на повдигнатото полукрило значително намалява, а сигналът на тези от страната на спуснатото полукрило се увеличава. При това най-значително изменение на силата на сигнала се наблюдава при спътниците разположени по-близо до хоризонта.

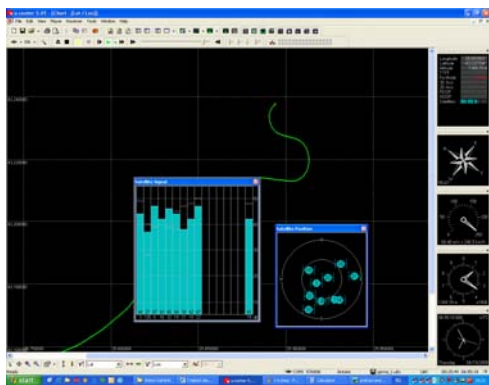
Подобно изменение на приеманите сигнали се наблюдава и при завои на самолета с напречен наклон от  $30^\circ$ , което за такъв клас самолети не е голяма величина.

На фиг.13 е показано, че дори е възможна загуба на сигнал от спътниците които са най-близо до хоризонта. Червеният цвят на спътника показва, че от този спътник не се получава сигнал, а спътниците със светло син цвят не се използват за навигация.



**Фиг. 13** Загуба на сигнал от спътник, който е близо до хоризонта.

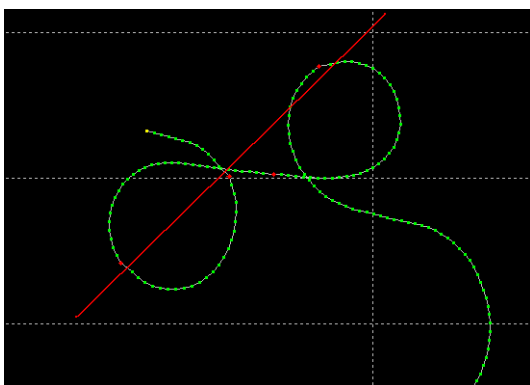
Фиг. 14 показва и първия момент, в който приемникът не дава решение на навигационното уравнение.



Фиг. 14 Момент без решение на навигационното уравнение.

Веднага след това наблюдението на спътниците се възстановява, а с това и навигацията.

На фиг. 15 са показани моментите, в които няма стабилен сигнал от навигационните спътници и отсъства решение на навигационните уравнения.



Фиг.15 Моменти без решения на навигационното уравнение.

### 3. Обобщение, изводи и заключения

- При статичните изпитания отсъстват случаи на подвеждаща и особено опасно подвеждаща информация, т.е. измервания в зоните ЗПИ и ЗХПИ на станфордската диаграма. През основното време на навигация удовлетворяваме условията за навигация по категория APV – I. Това е категория за самолетоводене при крайния етап на полета – кацането с прецизен заход за кацане (Approach with Vertical Guidance), т.е. имаме управление и по вертикала, като грешката на системата не трябва да надвишава 50 метра.

- При динамичните изпитания се наблюдават голям брой наблюдавани спътници и високо ниво на сигнала от тези спътници, което е много добре. Проблемите тук възникват при маневри на самолета съпътствани с напречен наклон над 20°, при което броят на наблюдаваните спътници и нивото на приемания сигнал намаляват, а с това се влошават и характеристиките на системата (Точност - Accuracy, Продължителност на обслужването - Continuity и Наличността на услугата - Availability).

- Целесъобразно е да се изследват възможностите за допълнително натоварване на процесора на модула с нови алгоритми за повишаване точността на приемника с предлагания фирмен софтуерен пакет CSKit.

- Можем да кажем, че използването на приемника като основен навигационен прибор не е приемливо. Този приемник и съставената от екипа програма могат да намерят приложение, като средство за визуализация на полета при следполетния разбор за по-лесно отстраняване на грешките. Възможно е използването на приемника в сухопътния транспорт, където изискванията към тези системи не са толкова високи.

Би могло да се експериментира с положението на антената, или поставянето на два приемника с две антени на самолета и обработка на получаваните данни, с цел намаляването на влиянието на напречния наклон на самолета върху получаваните резултати.

Направените експерименти водят до интересни приложения на евтини приемници за спътникова навигация, работещи със системата EGNOS, т.е. притежаващи висока точност и интегритет, в останалите видове транспорт. Като такива приложения могат да се посочат:

1. Задължително оборудване на всички автомобили с приемници за спътникова навигация, като всеки от тях има преносима памет. Това ще даде възможност за тотална обективност при изпълнението на задълженията от страна на контролните органи. Съвременните приемници за спътникова навигация определят скоростта с точност от порядъка на няколко мм/сек. В грубия вариант говорим за грешка от порядъка на 0.1 см/сек. Другото предимство е доказуемостта на траекторията на автомобила при нарушаване на ограничителната линия на лентата за автобуси например.
2. Възможности за обективност при анализа на транспортни произшествия за всички видове транспорт.
3. Възможност, при наличието на клетъчна мрежа, за оптимизация управлението на различните транспортни потоци.
4. Възможност за автоматизиране процеса на управление на превозното средство и предотвратяване на транспортни произшествия при големи транспортни потоци. За целта е необходимо наличието на транспондери на всяко транспортно средство, подобно на тези в авиацията.

### 4. Литература

1. Соловьев, Ю. А., *Спутниковая навигация и ее приложения*, Еко – Трендс, Москва, 2003 г.
2. Kaplan, E., *Understanding GPS – Principles and Applications*, Artech House Inc., London, 1996 г.
3. Parkinson, B., Spilker, J., *GPS – Theory and applications, Vol. 1, Vol. 2*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington DC, 1998 г.
4. Kayton, M., Fried, W., *Avionics Navigation systems*, Wiley-Interscience, New York, 1998 г.
5. ICAO, *Annex 10 – Aeronautical telecommunications, Vol. 1*, 1996 г.
6. High Performance GPS Pinwheel Antenna. Waldemar Kunysz, NovAtel Inc.