

## **УЯЗВИМОСТ НА СПЪТНИКОВИТЕ НАВИГАЦИОННИ СИСТЕМИ И МЕТОДИ ЗА ТЯХНОТО ПРЕОДОЛЯВАНЕ ВЪВ ВЛАКОВИЯ ТРАНСПОРТ**

**Петър П. Брънзалов, Румен А. Иванов**

[ppb@vtu.bg](mailto:ppb@vtu.bg), [rang75@hotmail.com](mailto:rang75@hotmail.com)

**ВТУ “Тодор Каблешков”, 1574 София, ул. “Гео Милев” 158  
БЪЛГАРИЯ**

*Ключови думи:* GNSS навигация, интегрална навигация, навигация във влаковия транспорт

*Резюме:* В представената работа е разгледано съвременното състояние на проблема за навигацията на различните цивилни и военни обекти с помощта на спътникови навигационни системи. Спътниковите навигационни системи (GNSS) вече заемат водеща роля при навигацията на обекти във всички сектори на транспорта, военното дело и много други. Широката им употреба, наред с безспорните им предимства, показва съществени недостатъци като, влияние от атмосферни фактори, електромагнитни смущения излъчвани различни устройства, уязвимост на електромагнитно заглушаване на спътниковия сигнал и др. Това състояние на методите за спътникова навигация, доведе понастоящем до бурно развитие на нови комплексни методи за по-надеждна навигация. В работата са разгледани основните методи за по-надеждна навигация на цивилни и военни обекти, които се разработват в различните страни. Предложен е модел на комплексна навигационна система за нуждите на железопътния транспорт, състояща се от датчици за външна навигация и от датчици за вътрешна навигация, отчетени по отношение на навигирания обект.

### **1. ВЪВЕДЕНИЕ.**

**1.1. Уязвимост на спътниковите навигационни системи.** Спътниковите навигационни системи (GNSS, Global Navigation Satellite Systems) вече заемат водеща роля във всички сектори на транспорта, военното дело и много други. Широката им употреба, наред с безспорните им предимства, показва съществени недостатъци като, влияние от атмосферни фактори, електромагнитни смущения излъчвани от различни устройства, уязвимост от електромагнитно заглушаване на спътниковия сигнал, области където е невъзможно да се приема сигнала от спътниците и др. [1-3]. Специалистите и производителите на GPS приемниците указват, че приемниците са уязвими на електромагнитни смущения и препоръчват да се избягва влиянието на TV антени, радарни системи, мобилни телефони, GSM клетки, устройства за мобилни спътникови услуги, телевизионни и компютърни монитори, електронно оборудване имащо микропроцесори и др. Уязвимостта на спътниковите навигационни системи взима и своите реални жертви при хора предоверили се на тези системи в безлюдните територии на Канада, САЩ и други страни, което доведе до появата на термина “смърт от GPS”.

**1.2. Съвременно състояние на разработваните методи за преодоляването на уязвимостта на спътниковите навигационни системи.** Значителната уязвимост на спътниковите навигационни системи е причината за появата на тенденцията да не се разчита само на нея, а да се разработват усилено за цивилни и военни нужди на дублиращи системи за навигация и на комплексни (интегрирани) системи, работещи с произволен брой навигационни методи. В това отношение понастоящем, основните разработвани системи са: (i) Системата ASPN се разработва така, че да може да използва произволен вид датчици, като GPS приемници, лидари, стереокамери, датчици на налягане и температура, инерциални навигационни системи, компаси, прибори за астроориентация и др. Тази система може да обезпечи определяне на местоположението с висока точност, дори при невъзможност да се приема GPS сигнала; (ii) Locata Corporation, SNAP лабораторията в Училището по геодезия и по пространствени информационни системи към Университета на Нов Южен Уелс (UNSW) и SPIN лабораторията към Държавния университет в Охайо, са разработили прототип на хибридна навигационна система работеща на основата на GPS приемник, инерционни навигационни сензори, Locata приемник работещ с мрежа от наземно базирани приемо-предаватели и др., с цел да се обезпечи контролирано движение на превозни средства при открития добив на полезни изкопаеми, мобилни ГИС (географски информационни системи), картографиране, при индустриални приложения и др. [4]; (iii) Компанията Phantom Works на Boeing разработва военна система за навигация в бойни условия Robust Surface Navigation (RSN), която освен GPS може да използва най-различни наземни източници на радиосигнали, като радиостанции, TV предаватели и др.; (iv) Terrain Contour Matching (TERCOM) е навигационна система използвана предимно в крилатите ракети. Тази система има предварително записана карта на релефа на терена, която се сравнява с данните от монтирания на борда радар. Оборудваната с TERCOM ракета лети по-точно по маршрута и на по-малка височина, по-трудно откриваема е за радарите и има повишена точност по сравнение с ракетите с инерциални навигационни системи; (v) Проектът Sferic-based Underground Geolocation в САЩ разработва подземна навигационна система, при която подземен координатен детектор регистрира сферичните електромагнитни вълни със свръхниска честота, генерирани от мощни искрови разряди. Тази система ще се използва за навигация в тунели, шахти и други съоръжения под земната повърхност, където GPS сигналите не се улавят; (vi) Управлението за перспективни изследвания към Министерството на отбраната на САЩ (DARPA) е обявило конкурс за създаването на нова GPS независима свръхточна инерциална система за навигация на свръхточни оръжия, насочени срещу страни разполагащи с мощни средства за радиоелектронна и спътникова защита. Системата съчетава инерциални сензори с различен принцип на работа в едно микроустройство или микросхема, които взаимно си обменят и допълват информация за местоположението на устройството. Устройството трябва да има потребление под 1 W, допустима грешка при определяне на ускорението  $10^{-6}$  g/h и допустима грешка при определяне на ъгловата скорост  $10^{-4}$  degree/h; (vii) Micro-PNT в САЩ отдавна разработва жироскопи на основата на микроядрен магнитен резонанс, използващи въртенето на атомните ядра в магнитно поле. Такъв жироскоп няма въртящи се части и е нечувствителен към вибрации. Такава система би обезпечила на САЩ водещо място в областта на високоточните оръжия за десетилетия напред; (viii) За създаването на GNSS приемници с повишена устойчивост, се разработват методи за увеличаване на усилването на полезния сигнал и неговото ефективно отделяне от други случайни и заглушаващи сигнали. В това отношение се разработват малогабаритни адаптивни цифрови антенни решетки, които увеличават отношението сигнал-шум за сметка на кохерентно натрупване на приемания сигнал и точната ориентация на диаграмата на

насоченост на антената по посока на спътника; (ix) Навигационната технология NAVVIS на Мюнхенския политехнически институт използва вградена 3D карта получена с лазерно сканиране и оптическо заснемане, с която се сравнява оптическо изображение от снимка или камера и така се локализира навигирания обект. Такава навигационна система се ориентира с висока точност във всякакви външни и вътрешни пространства, където не работи спътниковата навигация; (x) За нуждите на военните автономни работи се разработва навигационна система работеща с поляризирана светлина. Вида на поляризацията на възприеманата светлина показва мястото, от което светлината се излъчва. Така в природата се ориентират пчелите и други насекоми; (xi) Ново поколение оптични датчици се предвижда да са в основата на нова навигационна система и на нова разузнавателна система. Това са датчици работещи както във видимия диапазон, така и в ултравиолетовия и инфрачервения такива. Обектите се разпознават според спектралните характеристики на светлината отразена от тях.

Като заключение може да се каже, че понастоящем навигацията на военни обекти основно се обезпечава от две устройства, GNSS приемник и инерциална навигационна система. Но, този подход има своите недостатъци, понеже GNSS сигнала може да се заглуши, а инерциалните навигационни системи засега имат недостатъчна точност. В железопътния транспорт все повече намира приложение система състояща се от съвместното функциониране на локомотивния одометър (тахометър) и системата от евробализи, инерциални сензори и други комплексни системи за навигация. Има отделни опити за използването на GPS навигация във влаковия транспорт.

**1.3. Формулиране на задачата.** За нуждите на железопътния транспорт, една навигационна система трябва да функционира успешно при всякакви условия, ден и нощ, при дъжд и сняг, при мъгла и ярко слънцегреене, на открити трасета и в тунели и клисури и т.н. Съвременните оценки показват, че за прецизно работеща навигационна система в железопътния транспорт е необходима система с точност на позиционирането в рамките на 2 % ( $\pm 1$  %) или по-добра, което представлява диапазон на точност 200 m ( $\pm 100$  m) за пропътувано разстояние от 10 km [5]. Тези оценки са практически приложими, ако на всеки 2÷3 km, показанията на навигационната система се нулират спрямо абсолютен репер или това означава точност на позиционирането под  $\pm 10$  m за 10 km пробег.

Цел на настоящата работа е да се разработи методика и алгоритъм за навигация в железопътния транспорт с помощта на комплексна навигационна система състояща се от локомотивен тахометър, инерциална система за навигация състояща се от акселерометри и/или жирокопи и GNSS приемник, която комплексна система да функционира успешно в условията на частична или пълна загуба на сигнала от GNSS навигационната система, като освен това системата разполага с абсолютни репери на положението по трасето, разположени основно на гарите и други лесни за оборудване места. Възможностите на такава комплексна навигационна система могат рязко да се подобрят ако в нея има данни за геометрията на трасето, като радиуси на кривите, дължините на правите участъци, местата на стрелките и други.

## **2. КОМПЛЕКСНА МНОГОСЕНЗОРНА СИСТЕМА ЗА НАВИГАЦИЯ ЗА НУЖДИТЕ НА ЖЕЛЕЗОПЪТНИЯ ТРАНСПОРТ.**

**2.1. Комплексна многосензорна навигационна система.** Всяка комплексна навигационна система се състои от два вида подсистеми (датчици, информация, данни): (i) подсистеми работещи с външни данни, като навигационни данни се получават от външни устройства намиращи се извън навигираното средство и (ii) подсистеми работещи с вътрешни данни, при които навигационните данни се получават от вътрешни устройства, намиращи се вътре в самото навигирано средство. Характерното

за външните навигационни средства е, че работят с по-голям мащаб на пространството, което облекчава локализирането на навигирания обект, по принцип имат по-висока точност на определяне на местоположението, но по-силно да се влияят от външни смущения и фактори. Характерното за вътрешните навигационни средства е, че работят със съществено по-малък мащаб на пространството и това затруднява локализирането на навигирания обект, имат съществено по-ниска точност на определяне на местоположението, но по-слабо се влияят от външни смущения и фактори.

Характерна особеност на навигацията в железопътния транспорт е това, че трасето, по което се извършва движението е предварително известно и това позволява по него да се изградят абсолютни репери на положението, например на определени гари, тунели, мостове и др. Абсолютните репери на положението могат да са радиобализи, баркодове, сензори от различен вид и др. Нещо повече, железопътното трасе позволява лесно цифроване във вид на електронна карта.

Предлаганата в тази работа комплексна навигационна система се състои от следните датчици: (i) Локомотивен одомеръ (тахометър) за измерване на изминатото разстояние и измерване на скоростта на движение. Показанията на локомотивния одомеръ за разстояние и скорост имат малка точност, от порядъка на  $3\div 4$  %. Тази ниска точност е резултат от износването на колелата на локомотива, приплъзването на колелата при спиране, потегляне, лошо време (дъжд, сняг) и др. (ii) Инерциална система от инерциални датчици и/или жирокопи, чиято точност е около 0,35 %. (iii) GPS навигационна система, чиято точност обикновено е няколко метра ( $3\div 6$  m).

За функционирането на предлаганата комплексна навигационна система за нуждите на железопътния транспорт се предлага следния алгоритъм на работа, при който датчиците са разположени йерархично и се контролират взаимно:

(i) По железопътното трасе, през произволно разстояние  $L$  са изградени абсолютни репери на положението, най-често на гарите и други обекти с добре известна локализация. Тези абсолютни репери могат да определят положението на влака с точност няколко сантиметра.

(ii) В основата на разработения алгоритъм стои идеята за взаимния контрол и логическото взаимодействие между навигационните данни от различните видове сензори и включва следните елементи (Фиг.1А):

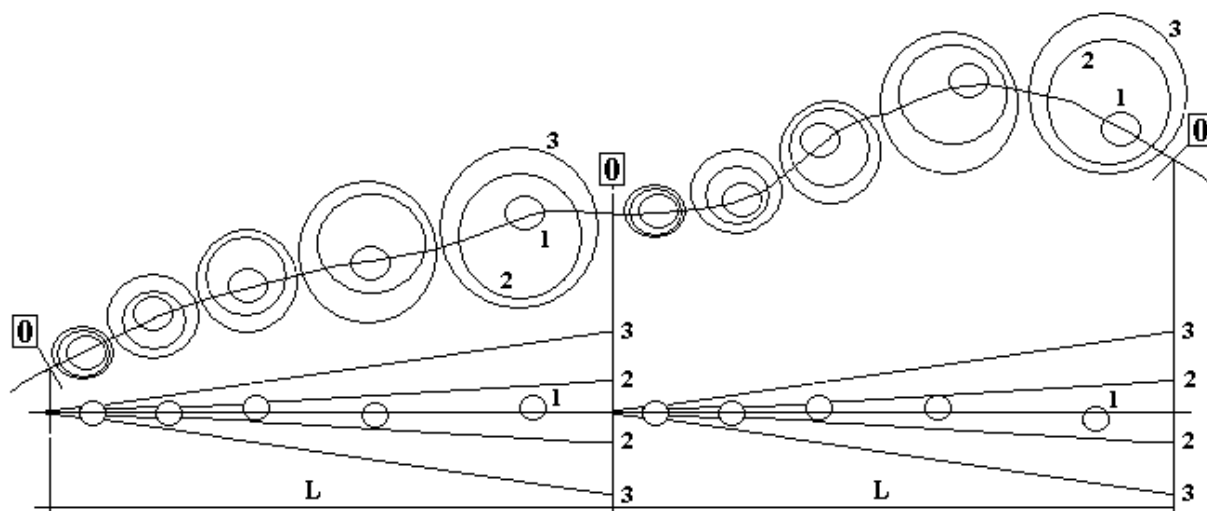
- Показанията на локомотивния одомеръ са надеждни, но с най-ниска точност ( $3\div 4$  %). Тази показания не могат да се използват за точна навигация, но задават границите на една максимална грешка за стойностите за другите два датчика (инерциален и GNSS), извън които граници показанията на другите датчици се считат за случайни и неверни. Така, локомотивния одомеръ играе ролята на контролиращ елемент за верността на показанията на другите два по-точни датчици.

- Ако показанията на инерциалния сензор са в границите одобрени от влаковия одомеръ, то тези показания образуват контролиращи граници за показанията на третия, най-точния GNSS датчик (Фиг.1). Точността на инерциалните датчици във влаковия транспорт, когато се подпомагат от локомотивния одомеръ е около 0,35 %.

- Показанията на третия GNSS датчик са най-точни и при влаковите GNSS датчици точността е в рамките на  $3\div 6$  m в хоризонталната равнина. Алгоритъмът на използване на данните от GNSS приемника включва преценка, дали показанията попадат в диапазона от стойности определен от инерциалния и одомеричния датчик и ако това е така, то всички датчици се нулират спрямо неговите показания (Фиг.2). Това текущо нулиране позволява рязко да се подобри точността на цялата система, понеже започва нов цикъл на отчитане с малък толеранс на грешките.

- Ако показанията на GNSS приемника са извън допустимите граници определени от инерциалния датчик, те не се приемат за вярни и се навигира по

показанията на инерциалния датчик. Ако показанията на GNSS датчика и на инерциалния датчик са извън диапазона от стойности определен от локомотивния одомертър, то влака се навигира по одомертричния датчик и абсолютните гарови репери.

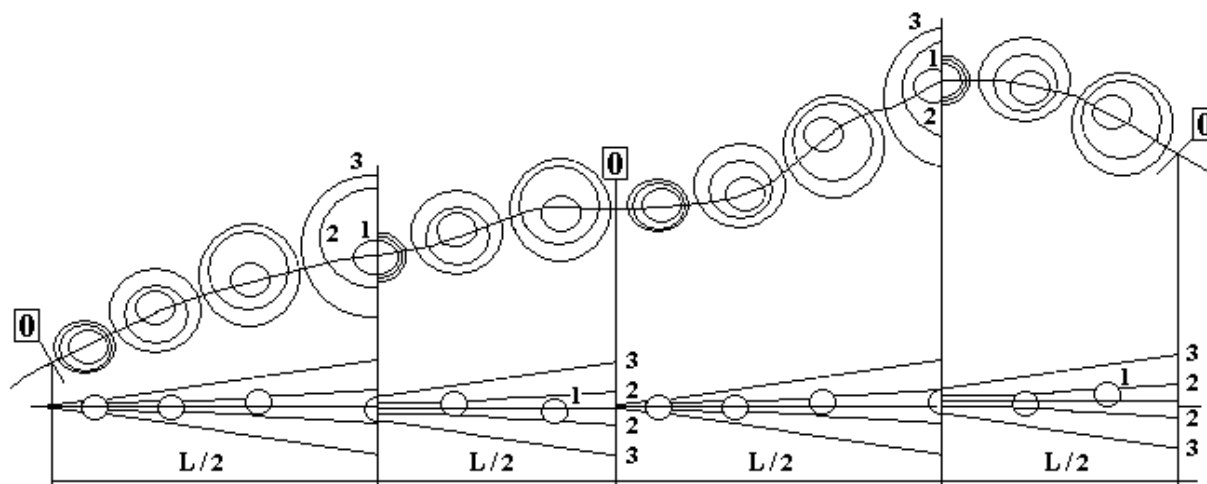


Фиг.1

Фиг.1. Комплексна многосензорна навигационна система за нуждите на влаковия транспорт с йерархичен контрол на показанията на различните сензори: (0) Абсолютни репери на положението на влака по трасето, разположени през разстояние  $L$ ; (1) Диапазон на показанията на GNSS сензора; (2) Диапазон на показанията на инерциалния сензор; (3) Диапазон на показанията на влаковия одомертричен сензор.

**Пример (1):** Ако абсолютните репери са средно през 10 km по железопътното трасе, в края на пробег на всяко едно такова трасе грешките в местоположението на влака според показанията на различните датчици ще са:

- |                                    |                     |
|------------------------------------|---------------------|
| - точност на одомертричния датчик: | $\pm 200$ m         |
| - точност на инерциалния датчик:   | $\pm 20$ m          |
| - точност на GPS датчика:          | $\pm (3 \div 6)$ m. |



Фиг.2.

Фиг.2. Подобряване на точността на комплексната многосензорна навигационна система чрез текущо привеждане на показанията на одомертричния и инерциалния сензори през разстояние  $L/2$ , към показанията на най-точния GNSS сензор, ако показанията му са в границите определени от първите два сензора: (0) Абсолютни

репери на положението на влака по трасето, разположени през разстояние L; (1) Диапазон на показанията на GNSS сензора; (2) Диапазон на показанията на инерциалния сензор; (3) Диапазон на показанията на влаковия одомеричен сензор.

**Пример (2):** Ако по трасето между два абсолютни репера (10 km), многосензорната система се самонулира на петия километър по показанията на GNSS датчика, то точността на различните датчици в края на трасето от 10 km ще са:

- точност на одомеричния датчик:  $\pm 100+6=106$  m
- точност на инерциалния датчик:  $\pm 10+6=16$  m
- точност на GPS датчика:  $\pm(3\div 6)$  m.

Това е задоволителна точност на навигирането на влаковия транспорт. При частична или пълна загуба на сигнала от GNSS, влака се навигира по показанията на инерциалния и одомеричния датчик.

**2.2. Допълнително повишаване точността на многосензорната навигационна система.** Разглежданата многосензорна система позволява допълнително повишаване на точността на навигиране и надеждността чрез статистическа обработка на грешките на всеки датчик, в местата на разположение на абсолютните репери. Тази статистическа обработка на грешката на всеки датчик би позволила да не се работи с максималната грешка, а с конкретно-измерената от статистическата обработка. Грешките обикновено се разполагат в Гаусова крива и от нея може да се определя конкретната грешка в измерванията. Този подход позволява активна корекция на грешката в различните датчици в зависимост от износването на колелата на локомотива, метеорологичните условия, вида на железопътното трасе и други фактори.

**2.3. Надеждност на многосензорната система.** Надеждността на предлаганата многосензорна навигационна система е висока и се определя от активния и динамичен контрол на показанията на различните датчици, чрез разполагането им в йерархична система и чрез взаимния им контрол един над друг. Този подход позволява абсолютен контрол на възможността в навигационната система да се обработват неверни данни за положението на влаковия състав по трасето.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

\* Предложена и анализирана е комплексна многосензорна навигационна система за нуждите на железопътния транспорт, състояща се от разположени по трасето абсолютни репери, локомотивен одомер, инерциален датчик и GNSS приемник.

\* Постигнато е повишаване точността и надеждността на навигационната система чрез разполагането на различните датчици в йерархична структура и логическа обработка на данните.

\* Разработен е метод за динамична корекция на точността на цялата система чрез статистическа обработка на реално-измерените грешки в системата, в местата, където са разположени абсолютните репери на положението.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1]. The Royal Academy of Engineering, Global Navigation Space Systems: reliance and vulnerabilities, The Royal Academy of Engineering, [www.raeng.org.uk](http://www.raeng.org.uk).
- [2]. Last D., GPS Jamming and Interference Sparks UK Concerns, Technical Solution, Inside GNSS, March/April, 2010 ([www.insidegnss.com/node/1979](http://www.insidegnss.com/node/1979))
- [3]. Scott M., Anti-Jam GPS Technology in Weapon Receivers, WSTIAC, v.3, No.4, 2002.
- [4]. Khan F. A., Dempster A., Rizos C., Efficient Algorithms for Locata Navigation Receiver Sensitivity Improvement, Journal of Global Positioning System, v.9, No.2, pp. 131-144, 2011.
- [5]. Clive Kessel reports, The camera never lies, The Rail Engineer, November 2009.

# VULNERABILITY OF SATELLITE NAVIGATION SYSTEM AND METHODS FOR THEIR OVERCOMING IN RAILWAY TRANSPORT

**Peter Branzalov, Roumen Ivanov**  
[ppb@vtu.bg](mailto:ppb@vtu.bg), [rang75@hotmail.com](mailto:rang75@hotmail.com)

*Todor Kableshkov University of Transport,  
158 Geo Milev Street, Sofia 1574,  
BULGARIA*

**Key words:** *GNSS navigation, integrated navigation, navigation in railway transport*

**Abstract:** *This work reviewed the state of the problem of navigating the various civilian and military objects with the help of satellite navigation systems. Global satellite navigation systems (GNSS) already occupy a leading role in the navigation of objects in all sectors of transportation, warfare, and many others. Their extensive use, together with the indisputable advantages, showed significant disadvantages, such as influence of atmospheric factors, electromagnetic disturbance emitted by a variety of devices, vulnerability of electromagnetic jamming of satellite signal, etc. This state of navigation methods now led to the rapid development of new complex methods for reliable navigation. In the work are examined the main methods for reliable navigation of civilian and military objects, which are being developed in different countries. There has been proposed a model of integrated navigation system for the needs of rail transport, consisting of external sensors and navigation sensors for internal navigation accounted with respect to the navigated object.*