

ДВУКАНАЛНА НАВИГАЦИОННА СПЪТНИКОВА СИСТЕМА

Неделчо Неделчев, Николай Кънев

nedelchev@vtu.bg, nkanev@mail.bg

Висше Транспортно Училище „Тодор Каблешков”

ул. Гео Милев 158 1574 София

БЪЛГАРИЯ

Ключови думи: навигация, спътник, GPS, EGNOS, GALILEO, точност, интегритет

Резюме: Днес локализирането на железопътните състави се осъществява с релсови вериги и броячи на оси, които се характеризират с ниска надеждност, висока цена и трудоемка експлоатация. Бързото развитие на глобалните спътникови навигационни системи предлага нови възможности за решаване на позиционната задача. За да се стигне до такова приложение трябва да се отговори на много въпроси, основните от които са свързани с осигуряване на необходимата безопасност.

Съществуващите глобални позициониращи системи (американската GPS и руската ГЛОНАСС) не удовлетворяват строгите изисквания на железопътната осигурителна техника. Точността им за много от случаите не е достатъчна, не са достигнати необходимите нива на безопасност. Потребителите не получават информация за изправността на системата и до колко могат да се доверят на определената позиция. Последното вече започва да се преодолява с изграждането на Европейската геостационарна служба за навигационно покритие EGNOS и по специално с въведената през 2011 г. услуга SoL (Safety of Life), която следи интегритета на системата. Подобна услуга ще предлага и разработваната в момента Европейска навигационна система GALILEO.

Настоящата статия оценява възможността за удовлетворяване на железопътните изискванията за надеждност и безопасност чрез съвместно използване на EGNOS и GALILEO. Проведените анализи и изчисления показват, че тази възможност е реална.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Глобалните позициониращи системи дадоха силен тласък на развитието в много области на живота, като най-облагодетелстван се оказва транспортът. Възможността за проследяване на подвижни обекти с голяма точност и по цялото земно кълбо доведе до мощна подкрепа за авиацията и мореплаването. Автомобилите се сдобиха с навигационни системи, а големите компании получиха възможността да следят от разстояние подвижен парк и товари. Последното успешно се прилага и за проследяване на вагони и железопътни товари.

Процесът на сливане на позициониращи и управляващи системи като цяло е интензивен, но това не означава, че няма трудности. За да се довери пилотът на навигационната система трябва да е убеден, че тя определя координатите на самолета точно и че

ако са се появили причини за намаляване на точността, той ще бъде предупреден своевременно. Не е възможна замената на релсовите вериги и броячите на оси в железопътния транспорт без да е гарантирано, че влакът се намира на точния коловоз, а не на съседния. При решаване на тези трудни задачи вече е направено много, но към днешна дата постигнатото не удовлетворява всички случаи.

Като основна трудност при внедряване на глобалната навигация в приложения, свързани с безопасността на човека се сочи отсъствието на интегритетна информация в навигационните съобщения, излъчвани от спътниците на основните съзвездия на GPS и ГЛОНАСС [1]. Този проблем се решава в известна степен с въвеждането на спътниково базирани системи за функционално допълване, каквито са американската WAAS, европейската EGNOS и японската MSAS. При тях в навигационния приемник се доставя чрез геостационарни спътници допълнителна информация за подобряване на точността и информация за интегритета на системата. Подобни проекти развиват Индия, Русия, Китай, Канада. Този списък вероятно ще нараства, но това увеличава само покриваната територията, но не и качествено интегритетната услуга. Системите за функционално допълване са развити да удовлетворяват изискванията на авиацията и то при условия, че големите летища разполагат с не малко други електронни системи за осигуряване на безопасност при кацане (GBAS, ILS). Тези изисквания до голяма степен са удовлетворени от нарочни SoL (Safety of Life) услуги, предлагани от системите за функционално допълване. Последните гарантират риск от загуба на интегритет IR от порядъка на 2×10^{-7} за всеки 150 s [2], което е с няколко порядъка по-малко от изискванията на SIL4. Важно е да се отбележи, че зоните на отделните системи за функционално допълване не се припокриват.

Новата европейска навигационна програма Галилео е с по-различна концепция. Тя предвижда, наред с позициониращите спътници да бъдат изведени и собствени геостационарни такива, които да доставят в потребителските приемници интегритетна информация, наред с диференциалните корекции. За съжаление разгръщането на Галилео закъснява чувствително. В орбита са само малък брой навигационни спътници, а до интегритетния контрол вероятно има време.

Независимо от това, че Галилео все още не функционира реално, производителите бързат да включат в номенклатурата си приемници за Галилео. Учени и специалисти търсят мястото на новата глобална система и уточняват взаимната обвързаност с останалите навигационни системи и техните функционални допълнения.

Известно е, че един от най-ефективните пътища за постигане на малка вероятност за опасен отказ в железопътните осигурителни системи е използването на структури с излишък от типа „2 от 2“, а контролирането на свободността на железния път чрез средствата за глобална навигация отъждествява вероятността за опасен отказ с интегритетния риск.

В стремежа си да създадат двуканална система за позициониране, при което интегритетната информация да върви по двата канала, някои страни се опитват да надградят национални и регионални системи за земно базирано функционално допълване с компоненти за интегритетен контрол, като разчитат на сигналите от GPS, а за втория канал чакат Галилео [3].

Отговорът на въпроса какво може да очаква железопътният транспорт от навигационна система с два интегритетни канала не е лесен. За точния отговор са необходими много изследвания с теоретичен и експериментален характер, които да уточнят преди всичко:

- нужен ли е автономен интегритетен контрол в потребителския приемник;
- отказ на спътник да води ли до спиране на навигацията или да реконфигурира работното съзвездие;

- как ще се уеднаквят интегритетните концепции, които за двата канала са различни;
- как безопасно ще се обединят резултатите от работата на двата канала.

Уточняването на тези въпроси върви [4], но на първо време железничарите биха били доволни да знаят, дали след отработването на всички проблемни моменти е възможно с двуканална интегритетна навигационна система да се удовлетворят изискванията на SIL4 за безопасност. Настоящата работа търси именно този предварителен отговор за навигационна система, ползваща космическите сигнали на EGNOS (GPS + ГЛОНАСС+ GEO) и Галилео.

2. ИНТЕНЗИВНОСТ НА ОТКАЗИТЕ В EGNOS КАНАЛА

EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) е сателитно базирана допълваща система (SBAS), развита от Европейската Космическа Агенция (ESA), Европейската Комисия и EUROCONTROL. Предназначена е да допълва космическите сигнали, излъчвани от навигационните спътници на глобалните позициониращи системи GPS и ГЛОНАСС и да повиши качеството на навигационните услуги. Земният сегмент на системата непрекъснато следи навигационните спътници, оценява техническото им състояние и качеството на излъчваните от тях сигнали. В резултат изработва корекции, които чрез геостационарна спътникова връзка достигат до потребителските приемници. Последните използват тези корекции за да определят по-точно псевдоотдалечеността си до спътниците. Наред с коригиращите данни, до приемниците достига и интегритетна информация.

EGNOS предлага различни услуги със свободен или платен достъп и специфични възможности. От 2009 г. е достъпна т.н. отворена услуга (Open Service, OS), предназначена за широк кръг потребители. Тя предоставя на потребителите само диференциални корекции. От 2011 г. е в експлоатация услугата Safety of Life (SoL), която наред с диференциалните корекции предоставя и интегритетна информация. Последното я прави предпочитана в системи, свързани с безопасността на хора, в т.ч. за целите на железопътната осигурителна техника.

SoL услугата е описана подробно в официални документи [2] при изричната уговорка, че всички показани характеристики се отнасят за приложения от гражданската авиация. Това налага отделните показатели да се адаптират към приложенията от други области. Според авторите, железопътната осигурителна техника може да разчита на EGNOS SIS SoL характеристиките, поместени в Табл.1. Основните мотиви за посочените стойности са:

Табл.1 Характеристики на EGNOS SIS за услугата Safety of Life

Характеристика	Параметър	Стойност
Точност	Точност по хоризонтала (HAL)	3 m (95%)
Интегритет	Време за предупреждение (TTA)	< 6 s
	Интегритетен риск (IR)	$4,8 \cdot 10^{-6}/h$
Готовност		99,9 %
Непрекъснатост	Риск от загуба на непрекъснатост (CR)	$5 \cdot 10^{-4}/h$

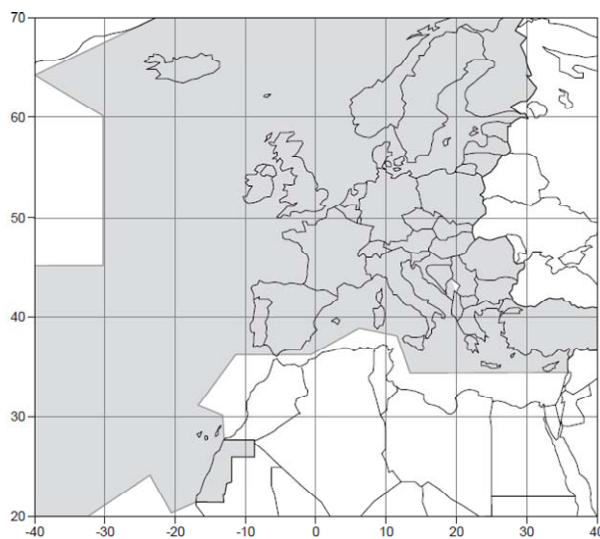
а. Железопътните операции, свързани с човешка безопасност са разделени в три класа – А, В и С [5] в зависимост от възможността да се определи продължителността на критичните операции. Когато се прави изследване, при което резките ускорения и забавяния не представляват интерес и е трудно са се оцени времето за осъществяване на свързаните с безопасността операции се приема, че продължителността на операциите е един час, а класът им е „С”. Това обяснява дименсиите на IR и CR в табл.1.

б. Параметърът „точност по вертикала (HAL)”, както и свързаните с него VAL (Vertical Alert Limit), VPE (Vertical Position Error) и VPL Vertical Protection Level) не представляват интерес за наземния транспорт.

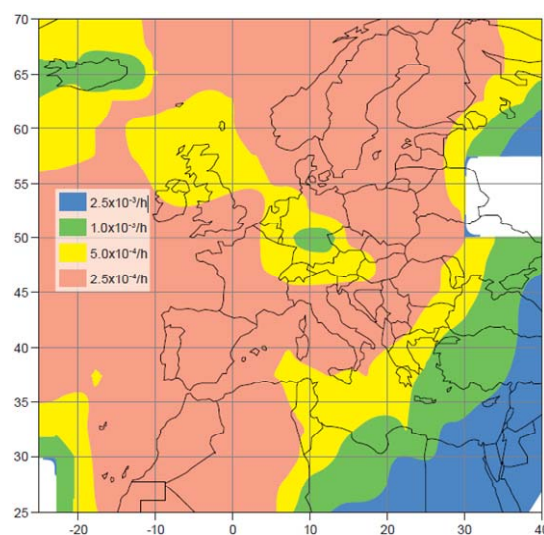
в. Параметрите за готовност и непрекъснатост на EGNOS SoL услугата, посочени в официалните документи на системата [2], са отнесени към две основни авиационни операции NPA - Non-Precision Approaches и APV - Approach Procedures with Vertical guidance. Логично е железопътният транспорт да ползва по-благоприятните показатели – тези за NPA.

г. Стойностите на параметрите за готовност и непрекъснатост в табл.1 са валидни за определен географски район в зоната ECAC (European Civil Aviation Conference, фиг. 1), като в таблицата са отразени техните стойности за България, съгласно фиг.2 [2].

д. Параметрите в табл.1 предполагат, че позиционните определения се правят само с навигационните спътници на GPS. В настоящия момент EGNOS не измерва псевдоотдалечености до навигационните спътници на ГЛОНАСС и до геостационарните спътници, от които получава EGNOS навигационните съобщения, въпреки че такава възможност е предвидена за в бъдеще.



Фиг.1 Зона ECAC



Фиг. 2 Разпределение на непрекъснатостта

Отказите в EGNOS канала могат да се дължат на такива в предоставяните от системата космически сигнали (SIS) или на откази в потребителския приемник.

SIS отказите може да са предизвикани от: повреди в полезния товар на навигационни и комуникационни спътници; откази в управляващите системи на GPS и/или EGNOS; смущения внесени в сигнали, излъчени от навигационни или EGNOS спътници. Всички тези възможности са отчетени в табл.1. Ако EGNOS позиционирането е включено в решаването на задача от железопътната осигурителна техника, някои откази ще се изявяват като опасни. Тяхната интензивност λ_{SISonE} , зависи от стойностите на интегритетния риск IR, риска от загуба на непрекъснатост CR и от времето за предупреждение и може да се изчисли, както следва [3,6]:

$$(1) \quad \lambda_{SISonE} = IR + CR \cdot TTA/3600 = 4,8 \cdot 10^{-6} + 5,0 \cdot 10^{-4} \cdot 6/3600 = 5,63 \cdot 10^{-6}/h$$

Защитните откази се свързват със събития, които водят до прекъсване на позиционната услуга, чрез предупреждение за нарушен интегритет и тяхната интензивност λ_{SIS3E} се отъждествява с риска от загуба на непрекъснатост.

$$(2) \quad \lambda_{SIS3E} = CR = 5,0 \cdot 10^{-4}/h$$

За разлика от посочените по-горе надеждностни характеристики, които са гарантирани от доставчика на услугата, за потребителските приемници не е възможно да

бъдат дадени общовалидни стойности на параметрите. Различните производители, търсейки компромиса между качество и цена предлагат приемници с големи разлики в надеждностните параметри. В опита си да достигнат правдоподобен резултат някои автори [3] залагат в изчисленията надеждностни показатели на обикновени търговски GPS приемници и приемат, че всички откази за опасни. Според авторите на тази разработка използването на надеждностни характеристики на търговски приемници не е подходящо, тъй като се предполага, че в отговорните осигурителни системи цената не е най-важният фактор. Тъй като целите на разработката са да се докаже приложимост, тук е избрана интензивност на отказите в потребителския приемник (според [7])

$$(3) \quad \lambda_{\text{ПопЕ}} = \lambda_{\text{ПзЕ}} = 1,0 \cdot 10^{-7}/\text{h}.$$

Обединението на отказите в двете части на системата (SIS и потребителски приемник) води до:

$$(4) \quad \lambda_{\text{опЕ}} = \lambda_{\text{SISопЕ}} + \lambda_{\text{ПопЕ}} = 5,63 \cdot 10^{-6} + 1,0 \cdot 10^{-7} = 5,73 \cdot 10^{-6}/\text{h}$$

$$(5) \quad \lambda_{\text{зЕ}} = \lambda_{\text{SISзЕ}} + \lambda_{\text{ПзЕ}} = 5,0 \cdot 10^{-4} + 1,0 \cdot 10^{-7} \approx 5,0 \cdot 10^{-4}/\text{h}.$$

3. ИНТЕНЗИВНОСТ НА ОТКАЗИТЕ В GALILEO КАНАЛА И НА ОПАСНИТЕ ОТКАЗИ В ДВУКАНАЛНАТА СИСТЕМА

Вече бе отбелязано, че Европейската спътникова навигационна система е изградена по различен от EGNOS начин. Тя самата включва геостационарни спътници и не се нуждае от функционални допълнения за да се осигурят потребителските приемници с диференциални корекции и интегритетна информация. Самата интегритетна концепция, която е в основата на SoL услугата, също е различна. При EGNOS потребителският приемник изчислява хоризонтално и вертикално защитни нива със зададен риск, след което, ако някое от нивата надхвърля границите за предупреждение, издава предупреждение. Границите за предупреждение са различни за различните операции (например за различни фази от полета на самолет). Приемникът GALILEO изчислява интегритетния риск на границата на предупреждение и ако неговата стойност надвишава предварително зададената допустима стойност, издава предупреждение. Последното обяснява защо в таблицата на основните характеристики (Табл.2) присъства и граница на предупреждение. Данните и цитираната таблица отново са приведени към железопътна осигурителна система от клас „С”. Системата GALILEO е в процес на разгръщане и за част от бъдещите услуги, каквато е SoL, няма публикувани официални документи. Показаните данни са събрани и преработени от авторите, като са ползвани основно [3],[8] и [9].

Табл.2 Характеристики на GALILEO SIS за услугата Safety of Life

Характеристика	Параметър	Стойност
Точност	Точност по хоризонтала	4 m (95%)
Интегритет	Хоризонтална граница за предупреждение (HAL)	12 m
	Време за предупреждение (TTA)	6 s
	Интегритетен риск (IR)	$4,8 \cdot 10^{-6}/\text{h}$
Готовност		99,5 %
Непрекъснатост	Риск от загуба на непрекъснатост (CR)	$1,92 \cdot 10^{-3}/\text{h}$

Структурата на отказите при GALILEO не е много по-различна, така че за изчисляване на съответните отказови интензивности може да се приложат формули (1) - (5). Допуснато е, че надеждността на приемниците за GALILEO и EGNOS е еднаква.

$$(6) \quad \lambda_{\text{SISопG}} = 4,8 \cdot 10^{-6} + 1,92 \cdot 10^{-3} \cdot 6/3600 = 8,0 \cdot 10^{-6}/\text{h}$$

$$(7) \quad \lambda_{\text{SISзG}} = 1,92 \cdot 10^{-3}/\text{h}$$

$$(8) \quad \lambda_{\text{ПопG}} = \lambda_{\text{ПзG}} = 1,0 \cdot 10^{-7}/\text{h}.$$

$$(9) \quad \lambda_{\text{опG}} = \lambda_{\text{SISопG}} + \lambda_{\text{ПопG}} = 8,0 \cdot 10^{-6} + 1,0 \cdot 10^{-7} = 8,1 \cdot 10^{-6}/\text{h}$$

$$(10) \quad \lambda_{3\text{G}} = \lambda_{\text{SIS3G}} + \lambda_{\text{П3G}} = 1,92 \cdot 10^{-3} + 1,0 \cdot 10^{-7} \approx 1,92 \cdot 10^{-3}/\text{h}.$$

Казаното по-горе позволява да се определи интензивността на опасните откази, като произведение от $\lambda_{\text{опE}}$ и $\lambda_{\text{опG}}$, както следва

$$(11) \quad \lambda_{\text{оп}} = \lambda_{\text{опE}} \cdot \lambda_{\text{опG}} = 5,73 \cdot 10^{-6} \cdot 8,1 \cdot 10^{-6} = 4,64 \cdot 10^{-11}/\text{h}.$$

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По важните резултати от разработката са:

1. Събрани са и са приведени към изискванията на железопътния транспорт основните ICAO параметри на глобалната навигационна спътникова система GALILEO и на Европейската геостационарна навигационна система за функционално допълване EGNOS. Предвид на невъзможността в жп транспорта да се разграничат операции с различни безопасностни изисквания, всички параметри са приведени към времеинтервал от един час. Стойностите на параметрите са адаптирани към територията на България, но лесно могат да се приведат към всяка точка от зоната ECAC.

2. Предложено е за нуждите на жп позиционирането да се използват едновременно двете спътникови системи - GALILEO и EGNOS с което да се формират два независими интегритетни канала.

3. Макар и с известно идеализиране по отношение влиянието на околната среда, резултатите показват, че такава двуканална структура отговаря на изискванията за безопасност, съгласно SIL4. Има и други, все още неизползвани възможности за подобряване на безопасността, като включването на навигационните спътници на ГЛОНАСС, използване на геостационарните сигнали като допълнителни източници за измерване на отдалеченост.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Kneissland, F., Stubber, C. Combined integrity of GPS and Galileo. InsideGNSS Working Papers, January/February 2010, pp.52-63
- [2] EGNOS. Safety of Life Service Definition Document. Ref: EGN-SDD SoL, V1.0, February 2011
- [3] Kyung-Ho Shin, Ducko Shin, Eui-Jin Joung, Young-Gyu Kim. The Reliability and Safety Enhancement Method of GNSS for Train Control Application. The 23rd International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2008), pp.1545-1548
- [4] Pecchioni, C.,M. Ciollaro, M. Calamia. Combined Galileo and EGNOS Integrity Signal: a multisystem integrity algorithm. 2nd Workshop on GNSS Signals & Signal Processing - GNSS SIGNALS 2007, ESTEC, 24-25, April 2007
- [5] Flip, A. Railway Safety Certification Requirements for the Galileo Signal-In-Space. CERGAL '2006, Braunschweig, 4-6 April, 2006
- [6] Flip A., Safety Aspect of GNSS Based Train Position Determination for Railway Signaling, UIC GALILEO for Rail Symposium, 2007.
- [7] ESA, Company ANAVS GmbH. Project: A differential Galileo/GPS receiver systems www.esa.int/Our_Activities/Technology/Business_Incubation/Company_ANAVS_GmbH/print
- [8] Maradi, L. GPS, EGNOS, GALILEO Receivers for Safety-of-Life. IIN/CNR - Mar 2008
- [9] Galileo Integrity Concept, ESA document No. ESA-DEUI-NG-TN/01331, (2005).

DUAL-CHANNEL SATELLITE NAVIGATION SYSTEM

Nedelcho Nedelchev, Nikolai Kanev

nedelchev@vtu.bg, nkanev@mail.bg

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

Key words: *navigation, satellite, GPS, EGNOS, GALILEO, accuracy, integrity*

Abstract: *Today localization stock is performed with track circuits, axle counters, which are characterized by low reliability and high cost. The development of global satellite navigation systems offers new opportunities for solving the positioning task. To get to this application must be answered a lot of questions, the main of which are related to the provision of necessary safety.*

Existing global positioning systems (US GPS and Russian GLONASS) does not satisfy the stringent requirements of the insurance of railway equipment. Accuracy in many cases is not reached required safety levels. Users haven't information about good working order of the system and how much they can trust a particular position. The latter is already beginning to be overcome with the construction of the European Geostationary Navigation Overlay Service EGNOS and in particular introduced in 2011 a service SoL (Safety of Life), which monitors the integrity of the system. Such service will offer currently developing a European navigation system GALILEO.

This paper evaluates the capability of meeting the requirements of rail reliability and safety through sharing of EGNOS and GALILEO. Analyzes and calculations show that the possibility is real.