



ПОЗИЦИОНИРАНЕ НА ВЛАКОВЕ С ПОМОЩТА НА GPS ТЕХНОЛОГИИ



проф. д-р инж. Неделчо Неделчев

nedelchev@vtu.bg

ВТУ “Т. Каблешков”

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Основна задача, решавана от транспортните системи, превозващи пътници и ценни товари е безопасността на движението. Специфика на железопътния транспорт е голямото тегло на железопътните композиции и породените от това дълги спиращи пътища, съизмерими и надминаващи зоната на естествена видимост. Поради това, от много години, безопасността на влаковото движение не се оставя само на човека (машинист, диспечер, ръководител по движението), а се поверява на технически средства и то такива, които при повреда и грешни действия на човека оператор да водят до спиране на движението, макар експлоатационните условия да не го налагат. За тези технически средства е възприето да се казва, че имат fail-safe поведение.

Постигането на fail-safe поведение е многостранна задача, но най-общо може да се сведе до формиране на достоверна информация за състоянието на включените в системата обекти и тяхното сигурно управление. Позиционирането на влака е основен акцент в първата част на така дефинираната задача.

Стотици години позиционната задача е решавана индиректно – с помощта на релсови вериги и броячи на оси. Тези изпитани средства всъщност осигуряват информация за свободност или заетост на части от железния път, а откриването на определено возило и/или неговото проследяване е правено чрез решаване на логически задачи в инфраструктурните устройства.

Справедливостта налага да се отбележи, че за гаровите централизации важната информация е не кое возило се намира в определена зона от коловозното развитие, а дали тя е заета. Нещо по-вече, същностната информация е дали тази зона е свободна.

Подходът да се следи за свободност и заетост на участъци от железния път е приложим и в междугарията. Така са изградени автоматичните блокировки. Тук обаче съществува неудобството, че междугариято е разделено на фиксирани блок-участъци, всеки със свои средства за контрол на свободността (например релсови вериги). Фиксираните блок-участъци ограничават пакетното движение и в крайна сметка влошават експлоатационните показатели на участъка.

Съществен недостатък на релсовите вериги и броячите на оси, приложени в междугарови условия е, че при тях голямо количество апаратура и кабели са разсредоточени по дължината на железопътната линия. Това означава влошена експлоатация, висока цена и ниска надеждност. Последното е особено актуално за релсовите вериги. Те изискват специални мерки за поддържане на чиста баластова призма и чрез това да се гарантира висока стойност на минималното изолационно съпротивление. Компонентите на релсовите вериги (дросел-трансформатори, съединителни въжета, релсови съединители), всички изнесени апаратни точки (шкафове, кабинни), както и самите кабели понякога са обект на грабителство и вандализъм.

Едновременно с това междугаровите осигурителни системи са силно свързани с вида на използваните релсови вериги. Често преобладаващата част от апаратурата за автоматично регулиране на движението обслужва проблеми на самите релсови вериги (например защита от късо съединение в изолиращите настави) и имат характеристики, които са предопределени от тях. Това не е единствената, но е една от съществените причини за многообразието на системите за автоматично регулиране на движението, за техния национален или регионален характер.

2. РЕШАВАНЕ НА ПОЗИЦИОННАТА ЗАДАЧА В ERTMS/ETCS

Новата европейска система ERTMS/ETCS, наред с другите задачи, основната от които е интероперабилност, търси подходящите решения и за откриването и следенето на влаковете. В нейното първо ниво е предвидено да се съхранят всички инфраструктурни устройства и системи, като във влака се доставя точково изпреварваща информация от тях. В аспекта на настоящото разглеждане това означава, че продължава използването на релсови вериги и/или броячи на оси. Релсовите вериги и броячите на оси се запазват и на второто ниво на ERTMS/ETCS, но вече само като първичен датчик на заетост. Управлението е съсредоточено в радио блок-центрове, които събират информация от гаровите централизации, релсовите вериги и броячите на оси, формират и предават по радиото управляващи команди към всички влакове в зоната на центъра.

Днес болшинството европейски страни са преминали първото ниво на ERTMS/ETCS и работят интензивно по внедряване на второто ниво [1].

Преходът към третото ниво е свързан с нови съществени промени. Фиксираните блок-участъци трябва да бъдат заменени с подвижни и това е съществена причина за отказване от релсовите вериги и броячите на оси. В замяна на последните месторазположението на влаковете се определя с инерциални средства. С влакови сензори се следи изминатия път, скоростта и ускорението. Чрез първия показател се определя разстоянието от фиксирана начална точка, а чрез втория и третия се прогнозира времето след което влакът може да се окаже пред затворен сигнал или друго препятствие. Тази проста логика е всъщност доста трудна и скъпа за реализация, тъй като върху движението на влака оказват влияние и теглото на състава, наклоните, кривите и разбира се не винаги гарантираната адекватност на човешките реакции. Към това следва да се добавят износването на бандажите и буксуването на колоосите, върху които са разположени датчици.

Всички споменати по-горе проблеми се притъпяват с периодични корекции в изминатото разстояние. Това става в предварително фиксирани точки от пътя, в които са разположени приемо-предавателни устройства (бализи), преминаването през които нулира натрупаната грешка. Бализите могат да са пасивни и са практически единственото външно съоръжение. Именно те трябва да са унифицирани в цяла Европа (евробализи) за да се постигне главната задача на ERTMS/ETCS.

Важен момент при проектирането на системи за автоматично регулиране на движението с евробализи е разстоянието между тях. Колкото са по прецизни инерциалните сензори във влака, толкова бализите може да са на по голямо разстояние. Не трябва да се забравя, че позиционната задача се решава в условия на силни механични и електромагнитни смущения и че към нея има fail-safe изисквания. Това може да се реализира успешно със сериозно резервиране и алтернативни средства и разбира се с висока цена.

Бализите не са граници на блок-участъците, а само сверяващи репери за инерциалните системи на влака. Допустимото разстояние между попътно движещите се влакове се изчислява в радио блок-центровете въз основа на получавана по радиото информация за преминалите бализи и резултатите от работата на инерциалните позициониращи средства.

Преходът към третото ниво на ERTMS/ETCS е сериозен технически и икономически проблем. Преодоляването му е по-лесно, когато се проектира нов участък, който не е обременен с конвенционални системи и много по-труден, ако функциониращи системи за автоматично регулиране трябва да бъдат демонтирани, въпреки, че не е изчерпан жизнения им ресурс. По тези причини именно страни като Германия и Франция се оказаха в най-неблагоприятна позиция и „само наличието на силна политическа воля и разбиране на дългосрочните ползи от ETCS ще направи възможно повсеместното ѝ внедряване” [1].

3. ПОЗИЦИОНИРАНЕ С НАВИГАЦИОННИ СПЪТНИЦИ

Днес най-естественият начин за определяне на месторазположение е да се използват възможностите на глобалните позициониращи системи – американската GPS и руската ГЛОНАСС. Предстои стартирането и на трета система – европейската GALILEO. Услугата е безплатна, анонимна, непрекъсната и е достъпно подвижният обект да бъде снабден с навигационен приемник. Приемниците се произвеждат масово от много производители и цената им е съвсем достъпна.

От тези големи възможности се ползват много човешки дейности, предно място сред които заема транспорта. Не прави изключение и железопътния транспорт. Чрез GPS приемници и подходяща комуникация се проследяват влакове и товари. Навлизането на тази нова технология в управление на железопътното движение обаче се бави поради високите изисквания за точност, достъпност, непрекъснатост на обслужването и интегритет на позициониращите системи.

3.1 Точност

Точността на навигационното определение, получено по традиционния кръгов метод е практически еднаква в GPS и ГЛОНАСС. Хоризонталната грешка практически не надхвърля 60 – 100 m. Това се постига чрез едночестотно приемане (в обхвата L1) и обработване на C/A кода в GPS или кода със стандартна точност в ГЛОНАСС. Военните приемници разполагат с по-големи възможности. Те приемат сигналите от спътниците в два честотни обхвата (L1 и L2) и освен споменатите кодове обработват и кодове с висока точност, при което точността се подобрява с около един порядък.

Очевидно точността на цивилните приемници не е достатъчна за еднозначното определяне месторазположението на влака, като най-категоричната причина е, че паралелните пътища в междугарието, както и съседните коловози в гарите са на няколко метра един от друг.

Ефективно средство за подобряване на точността е прилагането на диференциална корекция. Комерсиално достъпните GPS приемници достигат в режим на локална диференциална корекция (с RTCM – 104) точност от ± 1 m, при 2σ , за 95 % от времето. При 3σ , точността е $\pm 1,5$ m за приблизително 99,7 % от случаите, а при 5σ - $\pm 2,5$ m за 99,9999 % от случаите [2]. Тази точност изглежда достатъчна за разграничаването на състави върху съседни коловози, но тя може да се постигне при добра спътникова видимост поне на шест спътника и добре разположено съзвездие над хоризонта ($HDOP < 1,5$).

Постигането на достатъчно голям брой видими спътници може стане чрез комбинирани приемници, които приемат и обработват сигналите, излъчвани както от GPS спътниците, така и от космическия сегмент на ГЛОНАСС. Съвместното използване на двете системи ги превръща в елементи на глобална навигационна спътникова система GNSS, чиято първа реализация е EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System) .

EGNOS функционира от 2004 г. Използва три геостационарни спътника, разположени над определени точки, така че да покриват континента. Трите спътника излъчват GPS-подобни сигнали, и заедно със сигналите от GPS и ГЛОНАСС се приемат с обща антена от EGNOS навигационни приемници и участват в позиционното определение. Земният сегмент на EGNOS определя широкозонова диференциална корекция, която чрез приемо-предавателни станции се зарежда в EGNOS спътниците. Последните от своя страна доставят данните на EGNOS приемниците по цивилния канал на GPS.

Чрез EGNOS точността на позициониране се подобрява до няколко метра [3], но предвид на големите покривани територии не е равностойна на локалната корекция.

Втората реализация на GNSS е бъдещата система GALILEO. Това е независима глобална позиционираща система с 30 следноорбитални спътника, в която цивилните потребители ще имат достъп до пълния ѝ капацитет. Крайните устройства ще приемат диференциална корекция по GSM-R мрежата, което ще позволи точността да достигне 1 m [3].

Много висока точност (от порядъка на сантиметри) се постига с т.н. RTK (Real Time Kinematics) метод, но при него има голяма неопределеност и не е удобен за самостоятелно позициониране. Точни позиционни резултати се полу-

чават и при прилагане на пост-процесни алгоритми, които обаче, трудно се съвместяват с динамичните условия на транспорта.

3.2 Достъпност и непрекъснатост на обслужването

Вече бе казано, че за постигане на достатъчна за управлението в ж.п. транспорта точност при позиционното определение са нужни поне шест спътника. Това изискване не е леко. В [4] е описан експеримент, проведен през 2004 г. на петнадесет километров случайно избран участък в Белгия. При проведени 7800 позиционни измервания, приемникът (PolaRx2) е „виждал“ шест GPS спътника само при 69 % от случаите. Четири видими спътника са били на разположение в 89 % от сеансите. Причините за този песимистичен резултат са основно дървета и други естествени прегради, създаващи каньонен ефект. Тези резултати не бива да се абсолютизират и да се пренасят за всички железопътни линии в света, но едва ли са и изключение.

Възможността да се включат и спътниците ГЛОНАСС не подобрява много картината. Руският оператор, години наред, поддържа в орбита едва 7-9 спътника. Комбинираният приемник е по сложен, тъй като въпреки привидното сходство между GPS и ГЛОНАСС, двете системи се различават по начина на разделяне на каналите, по кодовите комбинации и по бордовите скали на времето.

От своя страна Пентагонът гарантира поддържането в орбита на 24 GPS спътника за 70 % от времето, а на 21 спътника – за 98 % от времето.

EGNOS също не е панацея. За нея, по литературни данни [3], рискът да няма непрекъснато приемане на сигнали, за всеки интервал от 150 s, е $8 \cdot 10^{-5}$, а локалната достъпност е 0,99. В споменатият по горе експеримент е констатирано, че за географските дължини на Белгия, геостационарните EGNOS спътници са видими само за около 30 % от времето [5], поради ниската елевация (около 30°). Все пак EGNOS е развивана за други цели (основно за управление на полетите) и нейната достъпност, навсякъде в Европа, не е достатъчна и константна.

3.3 Интегритет

Интегритетът на една радионавигационна система се характеризира със способността на системата да открива свое неправилно функциониране и да изключва възможността за използването ѝ в случаи, когато работните характеристики излизат извън допустимите граници. Числено интегритетът на системата се оценява с вероятността за оповестяване на потребителите за нарушаване работата в пределите на допустимия интервал от време.

Възможности за оповестяване на нарушен интегритет има както в GPS, така и в ГЛОНАСС, но изпращаната информация, освен че е ограничена, се актуализира рядко – не по често от 6-12 h. Най-общо, в съществуващите глобални позициониращи системи „не се гарантира качество на обслужването и интегритет на системата, поради което за високоотговорни приложения е необходимо да се използват EGNOS и GALILEO” [3]. Рискът за загуба на интегритет в EGNOS е $2 \cdot 10^{-7}$, а времето за издаване на сигнал за оповестяване на отказ е 6 s.

Информация за интегритета на GALILEO е предвидена в службата ѝ SoL (Safety of Life). В нея за приложения, свързани с безопасността на железопътния

транспорт е предвидено отделно ниво – А. Основните параметри на ниво А са [3]:

Точност (2σ)	-	4 m;
Интегритет:		
граница, над която се издава сигнал за оповестяване	-	20 m;
време за издаване на сигнал за оповестяване	-	6 s;
риск за загуба на интегритета (за всеки интервал от 150 s)	-	$3,5 \cdot 10^{-7}$;
Риск за загуба на непрекъснатостта на измерването (за всеки интервал от 15 s)		
-		$8 \cdot 10^{-6}$;
Готовност на функцията за контрол на интегритета	-	99,5 %;
Достъпност при номинална точност	-	99,8 %.

4. ПОЗИЦИОНИРАНЕ НА ВЛАКОВЕ НА ЛИНИИ С МАЛЪК ТРАФИК

Концепцията на ERTMS/ETCS е развита с отчитане на необходимостта за внедряване на всякакви линии, в т.ч. на високоскоростни натоварени магистрала. Вече стана дума, че за позициониране на влаковете в ETCS са нужни много и различни съоръжения – бализи, пътни приемо-предаватели, радиоканал и набор от инерциални сензори на влака. Спътниковата навигация е едно добро допълнение към всичко това, но поради високите изисквания, коментирани по-горе, те като правило могат само да сверяват резултатите от работата на иначе неизбежните инерциални сензори. Прилагането на такава система за управление е икономически нерентабилно за еднопътни линии с малка интензивност на движението. Впрочем, за такива линии трудно се доказва използването и на конвенционални системи за автоматично регулиране. В търсене на подходящото решение е развит проектът LOCOPROL [6].

LOCOPROL не е алтернатива на ETCS, а негов облекчен вариант. Позиционната задача в него се решава само с радионавигационни средства. Предпоставка за това са еднопътните участъци и ниската интензивност на движение. Последното прави подвижните блок-участъци ненужни, а изискванията за точност – доста облекчени. Останалите изисквания, свързани с безопасността – за интегритет, достъпност и непрекъснатост на обслужването – остават такива, каквито са те и за ETCS.

Основната идея при позиционирането в LOCOPROL е съвместното използване на радионавигационен приемник и цифрова карта на линията. Последното позволява едно елементарно позициониране да се извърши с по-малко от четири видими спътника. Влакът не може да не е върху линията, а това прави алгоритъмът за позиционното му определение еднодименсионен.

В LOCOPROL е използван хиперболичин метод на позициониране. Навигационният приемник измерва разликата между отдалечеността си от два спътника. Това определя хиперболоидна повърхнина с фокуси в двата приемани спътника. Местоположението на влака е пресечната точка на хиперболоида и трасето на линията. Всъщност измервателната неточност превръща точката в интервал.

За постигане на сигурност се извършват няколко елементарни позиционирания, като се използват други двойки спътници. Общият доверителен интервал е обединение от интервалите на елементарните определения. В [6] е посочено, че

с три елементарни определения и използване на три независими двойки спътници се достига необходимото ниво на безопасност (вероятност за опасна работа $10^{-11} - 10^{-12}$ 1/h). Съгласно [4] дължината на доверителния интервал е около 300 m, при добра спътникова видимост и около 700 m – при лоша. Последните резултати са постигнати при позициониране само с GPS спътници и без диференциална корекция.

5. ОБОБЩЕНИЕ

От казаното до тук се разбира, че днес няма реализирана универсална система за fail-safe позициониране, която да е базирана само на навигационни спътници. Причините са във високите изисквания, независимо от това, че всяко едно от тях е преодолимо с достъпните ресурси на съществуващите системи за глобално позициониране и цифрови карти на железопътните линии. Точността може да се постигне с локална или широкозонна диференциална корекция, както и с паралелно следене на фазата на сигнала. Сигурността е достижима чрез едновременно провеждане на няколко единични позиционирания и определяне на общ доверителен интервал. Интегритетът на системата може да се гарантира от системата EGNOS. Всичко това би било така, ако в небето има повече спътници, а те както стана ясно са недостатъчни. Лошата спътникова видимост е принудила авторите на LOCOPROL да внесат в процеса на работа корекции в позиционния алгоритъм, като за необходимите три елементарни измервания да не се използват шест спътника, а само четири и разбира се в комбинация [4].

Влизането в експлоатация на GALILEO ще даде нови възможности. В небето, към спътниците на съществуващата GNSS ще се добавят нови 30. При последните, двучестотното приемане на прецизни кодове предполага повишена точност. По важното обаче е друго. Възможността да се избира от около 60 спътника, от които поне 20 видими, гарантира осигуряване на трите (а може и повече) независими двойки, необходими за определяне на fail-safe общ доверителен интервал. Освен това GALILEO решава удовлетворително изискването за интегритет и непрекъснатост на обслужването.

За съжаление, всичко това още не е факт. Програмата GALILEO изпитва трудности и закъснява. Това значи, че по проблема трябва да се работи при днешните реалности, без да се чака стартирането на европейската глобална позиционираща система. По мнение на автора съществуват неизползвани възможности и ако тяхното реализиране не доведе до универсален вариант на влакова позиционираща система, то може да се решат проблемите на линиите с малка интензивност на движението. Това е актуално за България, а и за много други страни.

Първата възможност е да се замени хиперболичния метод на позициониране с кръгов. Тогава за едно елементарно позициониране е достатъчно разстоянието само до един спътник. Позицията на навигационния приемник е в пресечната точка на сфера с център в наблюдавания спътник и трасето на линията. Промяната е свързана само с механизмите на елементарното измерване и не променя начина за определяне на общия доверителен интервал. При това положение достатъчният брой видими спътници е три. Малкият брой необходими спътници влияе благоприятно върху общите надеждност, достъпност и непре-

къснатост на обслужването. Това е предпоставка за достатъчното решаване на позиционната задача с ресурсите само на една глобална система – GPS.

Втората възможност е по пълното използване на Доплеровото измерване на скоростта на навигационния приемник. Ако това се прави едновременно по сигналите на поне три спътника може да се разчита на високоотговорна система, която в голяма степен да покрие функциите на бордова инерциална позиционираща система.

Независимо от това дали горните усъвършенствания ще бъдат разработени и кога, доминиращата роля на системите за глобално радионавигационно позициониране е предопределена. Те ще заместят голяма част от съществуващите днес инфраструктурни съоръжения и ще маркират качествена стъпка в развитието на железопътния транспорт.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Lacot, F., J. Pore. ERTMS/ETCS becomes a reality. *Signal+Draht* (96) №10/2004, p. 6-13
- [2] Filip, A., H. Mocek, L. Bazant. GPS/GNSS Based Train Positioning for Safety Critical Application. *Signal+Draht*, (93) №5/2001, p. 51-55
- [3] Gu, X. Die Machbarkeit von GNSS/Galileo-basierter Zugortung für sicherheitsrelevante Anwendungen. *Signal+Draht* (97) №1-2/2005, p. 6-11
- [4] First LOCOPROL positioning test results on Belgian test track. *LOCOPROL newsletter* Issue №5/August 2004, p. 2-4
- [5] Simsky, A., F. Wilms, J-P. Franckart. GNSS-based failsafe positioning system for low-density traffic line based on one-dimensional positioning algorithm. *NAVITEC'2004, Noordwijk, Netherlands, 8-10 December 2004*
- [6] Mertens, P., J.-P. Franckart, A. Starck. Low-cost signalling on lines. *Railway Gazette International*, August 2003, p. 498-499