

## WYKORZYSTANIE SZTUCZNYCH SATELITÓW ZIEMI W TRANSPORCIE KOLEJOWYM<sup>1</sup>

---

Andrzej Uznański

dr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, e-mail: auznan@agh.edu.pl

---

*Streszczenie. Rozwój techniki i jej interdyscyplinarność spowodował, że aktualnie na kolei w coraz szerszym zakresie wykorzystywane są sztuczne satelity Ziemi. Techniki satelitarne zostały wprowadzone na tereny kolejowe przez geodetów. Pierwotnie wykorzystywane były tylko do pomiarów punktów osnów geodezyjnych. Z czasem zaczęto stosować pomiary satelitarne do zastosowań nie wymagających pośrednictwa geodetów, a związanych ze śledzeniem taboru w ruchu czy też łączności. W pracy scharakteryzowano geodezyjne wykorzystywanie nawigacyjnych sztucznych satelitów Ziemi. Zasadniczą treść opracowania stanowi zwięzła, z racji liczby, charakterystyka wszystkich 29 projektów (stan na jesień 2019) zrealizowanych i realizowanych dzięki zaangażowaniu się w branżę kolejową Europejskiej Agencji Kosmicznej poprzez program Space4Rail.*

**Słowa kluczowe:** ESA, Space4Rail, SatCom, SatNav, wirtualne balisy

### 1. Wprowadzenie

Rozwój techniki i jej tendencje do zastosowań interdyscyplinarnych spowodował, że na kolei w coraz szerszym zakresie zaczęto sięgać do technik satelitarnych. Satelitarne techniki pomiarowe zostały wprowadzone na tereny kolejowe przez geodetów. Pierwotnie wykorzystywane były do pomiarów punktów geodezyjnych w geodezji kolejowej. Z czasem zaczęto stosować pomiary satelitarne do zastosowań nie wymagających pośrednictwa geodetów, a związanych ze śledzeniem taboru w ruchu. Satelity są też kluczowym elementem niezawodnych systemów łączności.

Ziemia posiada tylko jednego naturalnego satelitę, którym jest Księżyc. Natomiast aktualnie umieszczonych jest nad Ziemią ponad 5 tysięcy sztucznych satelitów, w tym 5 polskich (KRAKSAT, SWIATOWID, PW-SAT2, BRITE-PL2 oraz BRITE-PL). Najwięcej satelitów posiadają USA (1835) oraz Rosja (1523). Natomiast Chiny mają 370 satelitów. Sztuczne satelity Ziemi ze względu na cel, któremu mają służyć po umieszczeniu ich na orbitach okołozemskich, mogą się bardzo różnić od siebie budową, jak i rodzajem samej orbity. W transporcie szynowym wykorzystane mogą być **głównie** telekomunikacyjne i nawigacyjne sztuczne satelity Ziemi. **Są też zastosowania dla satelitów meteorologicznych.** Satelity telekomunikacyjne mogą być bierne, które przekazują sygnał nadany z Ziemi i odbity

---

<sup>1</sup> Praca wykonana w ramach subwencji badawczo-rozwojowej nr 16 16.150.545

od nich oraz czynne, które są wyposażone w urządzenia do odbioru, wzmocnienia i retransmisji sygnału radiowego. Satelity nawigacyjne są sztucznymi satelitami Ziemi dedykowanymi wyznaczaniu pozycji obiektów nad i na Ziemi. Ich podstawowe zadania to emisja bardzo stabilnych częstotliwości pomiarowych, transmisja sygnału czasu własnego atomowego wzorca czasu (zegara pokładowego) i retransmisja informacji dotyczących efemeryd i identyfikujących satelitę. Rysunek 1 przedstawia satelity amerykańskiego systemu nawigacji satelitarnej NAVSTAR GPS. Zadaniem satelitów telekomunikacyjnych (rys. 2) jest pośrednictwo w przekazywaniu sygnałów użytkowników nadziemnych i naziemnych. Istnieje też kilka systemów komercyjnych, w których satelity telekomunikacyjne wykorzystywane są w nawigacji, głównie morskiej i lotniczej. Na rys. 3 przedstawiono satelity meteorologiczne. Satelita NASA jest najmniejszym satelitą na świecie do wykrywania huraganów w projekcie CYGNSS.

Aby monitorować pogodę w dużych skalach i z wysoką częstotliwością najkorzystniej jest umieścić satelitę na orbicie geostacjonarnej. Na takiej orbicie satelita jest w stanie stale obserwować prawie całą półkulę. Niestety satelita umieszczony na tej orbicie znajduje się 35 786 km nad Ziemią (nad równikiem), co bardzo utrudnia uzyskanie wysokiej rozdzielczości przestrzennej. Jedynie do *śledzenia* chmur nad kontynentami wysoka rozdzielczość przestrzenna nie jest konieczna. W przypadku aplikacji wymagających wysokiej rozdzielczości konieczne jest umieszczenie satelity na orbicie typu LEO (Low Earth Orbit), generalnie kilkaset kilometrów nad powierzchnią Ziemi. W takim przypadku nie jest możliwy ciągły monitoring danego obszaru, a jedynie okresowy, gdy satelita przelatuje nad nim.

Rozwój techniki i technologii spowodował, że sztuczne satelity Ziemi, być może niespodziewanie dla samych kolejarzy, znalazły praktyczne zastosowania również w transporcie szynowym i na terenach kolejowych.



Rys. 1. Satelity nawigacyjne systemu NAVSTAR GPS

Źródło: [www.lockheedmartin.com](http://www.lockheedmartin.com)

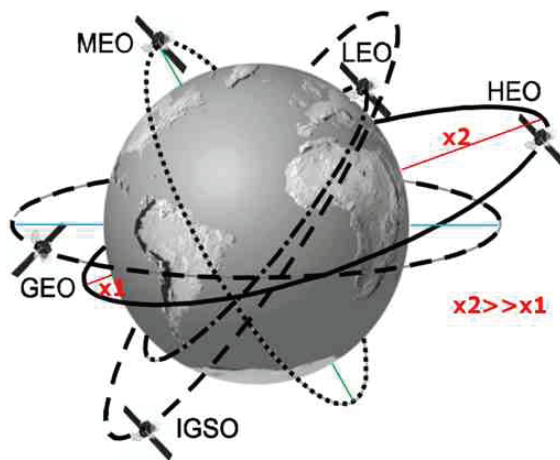


Rys. 2. Satelita telekomunikacyjny Inmarsat, Rozpiętość paneli słonecznych 40.6 m

Źródło: [www.inmarsat.com](http://www.inmarsat.com)



Rys. 3. Satelity meteorologiczne  
 Źródło: [www.meteofrance.fr](http://www.meteofrance.fr), [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)



Rys. 4. Rodzaje orbit sztucznych satelitów Ziemi

## 2. Geodezyjne pomiary satelitarne na terenach kolejowych

Pierwszym powszechnym i komercyjnym wykorzystaniem sztucznych satelitów Ziemi na terenach kolejowych było wyznaczanie współrzędnych punktów osnów geodezyjnych przez geodetów. W przypadku wyznaczania współrzędnych z wykorzystaniem satelitów konieczny jest równoczesny odbiór sygnału z minimum 4 satelitów systemu nawigacji satelitarnej, aby możliwe było rozwiązanie 4 równań z niewiadomymi X, Y, Z, t. Początkowo dostępne były tylko satelity nawigacyjne systemu amerykańskiego NAVSTAR GPS, później rosyjskiego systemu GLONASS, a aktualnie także europejskiego Galileo i chińskiego Beidou-2, zwanego także COMPASS. Pomiary te realizowane były metodą statyczną. Umożliwia ona osiągnięcie najwyższej dokładności spośród wszystkich satelitarnych technik pomiarowych, ale przy dłuższym czasie obserwacji, rzędu od kilkudziesięciu minut do nawet kilku godzin. Nie mniej, o ile sama technika pomiarowa umożliwia osiągnięcie dokładności milimetrych współrzędnych

punktów, o tyle w praktyce nie zawsze wykonawcom udaje się osiągnąć taką jakość wyników pomiarów.

Rozwój satelitarnych technik pomiarowych wprowadził do zastosowań komercyjnych kinematyczne pomiary satelitarne czasu rzeczywistego RTK (Real Time Kinematic GPS) oraz RTN (Real Time Network). Czas pomiaru skrócił się do sekund, współrzędne odbiornik satelitarny oblicza bezpośrednio w terenie, ale kosztem mniejszej dokładności niż w pomiarach statycznych, a przede wszystkim z mniejszą niezawodnością wyników pomiarów. Satelitarne pomiary kinematyczne czasu rzeczywistego umożliwiły wykonywanie geodezyjnych prac realizacyjnych. Technika RTK wymaga ustawienia fizycznej stacji referencyjnej nad punktem osnowy i transmisji przez nią danych referencyjnych dla odbiorników wykonawców pomiarów. W kontekście dalszego rozwoju satelitarnych technik pomiarowych można to uznać za atut, wpływający na lepszą jakość wyników. Nie mniej kluczowym wymogiem jest wysoka dokładność współrzędnych stacji referencyjnych. Błędy pozycji stacji referencyjnej przekładają się bowiem wprost na błędy systematyczne w pozycji punktów mierzonych w nawiązaniu do danej stacji referencyjnej. Specyfika pomiarów na terenach kolejowych, związana z ich liniowym charakterem, może skutkować koniecznością wykorzystania w pomiarach RTK innej stacji referencyjnej. Zmiana stacji referencyjnej w pomiarach obiektu może spowodować skokową zmianę wartości błędów pozycji punktów mierzonych.

Pomiary RTK były limitowane odległością odbiornika wykonawcy od stacji referencyjnej do kilkunastu kilometrów i to w przypadku braku przeszkód terenowych dla propagacji fal elektromagnetycznych. Istotne dla możliwości wyznaczenia pozycji z pomiarów RTK zakłócenia elektromagnetyczne występują w praktyce znacznie rzadziej niż przesłonięcia horyzontu. W warunkach rzeczywistych wpływ przeszkód terenowych i niekorzystnego ukształtowania terenu może skrócić odległość odbiornika ruchomego (odbiornika wykonawcy pomiarów) od stacji referencyjnej do kilkuset metrów lub nawet jeszcze bardziej. Ograniczenia pomiarów RTK były przyczyną badań, a w konsekwencji pojawienia się pomiarów RTN. Ich atutem był brak wymogu ustawiania przez geodetów własnych stacji referencyjnych. Do pomiarów RTN budowę infrastruktury naziemnej przejmowały jednostki administracji geodezyjnej i firmy komercyjne. Było to możliwe, gdyż w pomiarach RTN odległości między stacjami referencyjnymi mogły wynosić kilkadziesiąt, a nawet 100 kilometrów, a nie jak w pomiarach RTK kilkanaście kilometrów. W Polsce powstało i funkcjonuje 5 konkurencyjnych dla siebie sieci stacji referencyjnych umożliwiających realizację pomiarów RTN.

Ostatnią techniką pomiarową umożliwiającą satelitarne wyznaczanie pozycji jest PPP (Precise Point Positioning) w postprocessingu oraz RTK PPP w czasie rzeczywistym. Jej zaletą jest brak dość kosztownej infrastruktury naziemnej, co pociąga za sobą konieczność łączności satelitarnej w celu uzyskania danych serwisów naziemnych poprawiających dokładność wyznaczanych pozycji [1].

### 3. Program Space4Rail

W wykorzystanie sztucznych satelitów Ziemi w transporcie szynowym zaangażowała się bardzo poważna instytucja europejska, którą jest Europejska Agencja Kosmiczna (ESA). Od 2012 roku ESA współpracuje z Europejską Agencją Kolejową (EUAR – European Agency for Railways). Wspólnym polem zainteresowań obydwu Agencji są badania nad wykorzystaniem łączności satelitarnej (SatCom) oraz pozycjonowania satelitarnego (SatNav) w transporcie szynowym. ESA zainicjowała program o nazwie Space4Rail. Jest to inicjatywa bardzo rozbudowana, obejmująca różne aspekty wykorzystania sztucznych satelitów Ziemi na kolei, złożona z wielu różniących się projektów, z których pierwsze rozpoczęły się w 2001 r. Na stronie Agencji [2] wyszczególnionych jest aż 29 projektów, w tym 7 trwających aktualnie, a 1 o charakterze konkursowym dla kolei brytyjskich, w którym oczekuje się na propozycje tematów badawczych.

W programie Space4Rail wyróżnić można główne obszary badawczo-rozwojowe i wdrożeniowe dotyczące:

- Zaawansowanych badań systemów telekomunikacyjnych (ARTES – Advanced Research in Telecommunications Systems);
- Ogólnego programu technologii wsparcia (GSTP – General Support Technology Programme);
- Programu badań technologii (TRP – Technology Research Programme);
- Programu studiów ogólnych (GSP – General Studies Programme).

Najnowszym programem jest program wsparcia nawigacji satelitarnej (NAVISP – Navigation Innovation and Support Programme). Trudno doszukać się w nim bezpośrednich odniesień do tematyki kolejowej, ale istnieje związek pośredni, gdyż efekty programu zostaną wykorzystane także w branży kolejowej.

Do obszarów tematycznych programu należą:

- Internet szerokopasmowy dla pasażerów: umożliwienie korzystania z internetu w pociągu w przypadku braku zasięgu sieci naziemnych GSM, głównie na obszarach wiejskich, uzupełnionego sieciami naziemnymi. Działania podjęte w ramach projektów SAET, EOMST.
- Sygnalizacja: niskokosztowa sygnalizacja poprzez wykorzystanie sztucznych satelitów nawigacyjnych GNSS i łączności satelitarnej SatCom z zastosowaniem wirtualnych balis i niezależnych od operatora rozwiązań telekomunikacyjnych oraz innowacyjnych rozwiązań na przejazdach kolejowych. Podjęto działania w projektach: 3InSat, SBSRailS, SatCom Rail, EMUSER, INLU, RailSafe, LeCross, Saferail.
- Monitorowanie infrastruktury kolejowej: monitoring stabilności i osiadań poddortza oraz osuwisk oraz zapobieganie upadkom kamieni. Podjęto działania w projektach: MATIST, LIVE LAND.
- Śledzenie (tracking): monitorowanie aktywów kolejowych w celu zapewnienia bezpieczeństwa i efektywności operacyjnej. Podjęte działania: SAMOLOSA, IRIS.

Lista projektów składających się na program Space4Rail (jesień 2019) wraz ze stanem realizacji i krajem głównego wykonawcy, kolejność wg ESA, generalnie od projektów najnowszych do najstarszych:

- 1) Iris4Rail – Iris for Railway Communications – zakończony, Włochy
- 2) SBS-RailS – Space Based Services for Railway Signalling – zakończony, Włochy
- 3) SBS RailS Phase 2.1 – Technology Demonstrator for the Certification of a Satellite-based ERTMS L2 Regional Line Solution – w trakcie realizacji, Włochy
- 4) Sim4Rail – w trakcie realizacji, Włochy
- 5) CAPRESE Techniques Supporting Resilience for High Integrity Train Control Applications – w trakcie realizacji, Wielka Brytania
- 6) SAT4TRAIN – w trakcie realizacji, Włochy
- 7) STEMS – System Suitability Study for Train Positioning using GNSS in the European Rail Traffic Management System – w trakcie realizacji, Wielka Brytania
- 8) INLU – Signal Processing Techniques for the Integrity of Navigation for Land Users – zakończony, Niemcy
- 9) RAILS SAFE – Innovative Satellite-based Position, Navigation and Timing Concepts for New Railway Safety of Life Applications – zakończony, Hiszpania
- 10) LiveLand – LiveLand: Predicting, Monitoring and Alerting of Landslides and Subsidence Affecting Transport Infrastructure – zakończony, Wielka Brytania
- 11) RailSAT – zakończony, Holandia
- 12) EOMST – w trakcie realizacji, Belgia
- 13) SatApps Space Technologies for Machine-2-Machine Applications – zakończony, Szwajcaria
- 14) EMUSER – Enhanced Multi-Sensor Data Handler for Railways – zakończony, Włochy
- 15) SaMoLoSa – zakończony, Belgia
- 16) 3INSAT – zakończony, Niemcy
- 17) SafeRail – w trakcie realizacji, Niemcy
- 18) SAET – SATELLITE ACCESS FOR EUROPEAN TRAINS – zakończony, Włochy
- 19) LeCross – zakończony, Finlandia
- 20) MATIST – zakończony, Szwajcaria
- 21) SPACE FOR RAIL PRIZE – konkurs
- 22) SATCOM Rail – zakończony, Hiszpania
- 23) IRISS – zakończony, Wielka Brytania
- 24) BROADBAND TO TRAINS – zakończony, Wielka Brytania
- 25) EGNOS Controlled Railway Equipment (ECORAIL) – zakończony, Francja
- 26) RadioCompass – zakończony, Niemcy
- 27) Railway User Navigation Equipment (RUNE) – zakończony, Włochy

- 28) INTEGRAIL – GNSS-1 Rail User Navigation Equipment – zakończony, Niemcy
- 29) LOCOLOC – zakończony, Francja

#### 4. Charakterystyka projektów programu Space4Rail

Space4Rail nawet pod względem liczby projektów jest bardzo obszernym programem badawczo-rozwojowym. W ramach jednego obszaru tematycznego jest realizowanych kilka zróżnicowanych projektów. O ile nieprzerwany dostęp do szerokopasmowego internetu dla pasażerów poprawia tylko komfort podróży, o tyle większość projektów związanych jest z zapewnieniem bezpieczeństwa transportu szynowego w sposób ekonomiczny i niezawodny. W projektach są podejmowane zarówno nowe wyzwania dla branży kolejowej, jak i dostosowywanie istniejących, sprawdzonych rozwiązań.

Jednym z krytycznych aspektów związanych z bezpieczeństwem w transporcie szynowym jest łączność. W artykule ze stycznia 2019 [9] prezes UTK napisał: „Od 2025 roku podstawowym systemem łączności na kolei będzie GSM-R. Dotychczas używane radio działające w paśmie 150 MHz będzie można wykorzystać jedynie w pracy manewrowej oraz w sieciach wyodrębnionych z systemu kolei. Wdrożenie systemu GSM-R to przełomowy projekt, który umożliwi budowę nowoczesnego i innowacyjnego systemu kolejowego w Polsce. Dlatego trzeba się do niego odpowiednio przygotować, a przedstawiciele rynku kolejowego powinni zacząć działania już w tym roku”. Jest to bardzo drogi element bezpieczeństwa na kolei. Pod koniec marca 2018 r. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. podpisały kontrakt o wartości ok. 2.8 mld PLN na budowę systemu GSM-R dla 13 800 km linii [8]. Natomiast Komisja Europejska zwróciła uwagę na ryzyko starzenia się i nasycenia obecnego naziemnego systemu łączności kolejowej (GSM-R) do 2030 roku. W tym kontekście można zwrócić uwagę na prace podjęte przez UIC nadmienione w charakterystyce pierwszego z opisywanych projektów. Kolejność przedstawianych projektów jest zgodna z kolejnością na stronie ESA, która generalnie odpowiada od najnowszych do najstarszych projektów.

Projekt **IRIS4RAIL** (Iris for Railway Communications) to projekt adaptujący istniejący system Iris typu SatCom do specyfiki i realiów transportu szynowego. Iris to satelitarny system komunikacyjny do zarządzania ruchem lotniczym oparty na technologii zapewniającej zarówno bezpieczeństwo, jak i cyberbezpieczeństwo usług powietrze-ziemia. Opracowany został przez konsorcjum przemysłowe kierowane przez Inmarsat, czyli firmę z 40-letnim doświadczeniem, która jest właścicielem i operatorem 13 satelitów geostacjonarnych. Satelity Inmarsat są wyposażone w BGAN (Broadband Global Area Network), IoT (Internet of Things), M2M (Machine-to-Machine) i usługi głosowe. System Iris charakteryzuje się wysoką pojemnością, szerokim i jednorodnym zasięgiem, modułowością do regionalnego

i globalnego wdrażania systemu, wysokimi standardami bezpieczeństwa i wymaganiami dotyczącymi wydajności (dostępność, integralność, opóźnienie). Iris jest gotową technologią, która zintegrowana z systemami naziemnymi może natychmiast zapewnić wymaganą wydajność, zapewniając jednocześnie wystarczającą pojemność do obsługi prognozowanego średnioterminowego ruchu danych w najbardziej ruchliwych obszarach kontynentalnych.

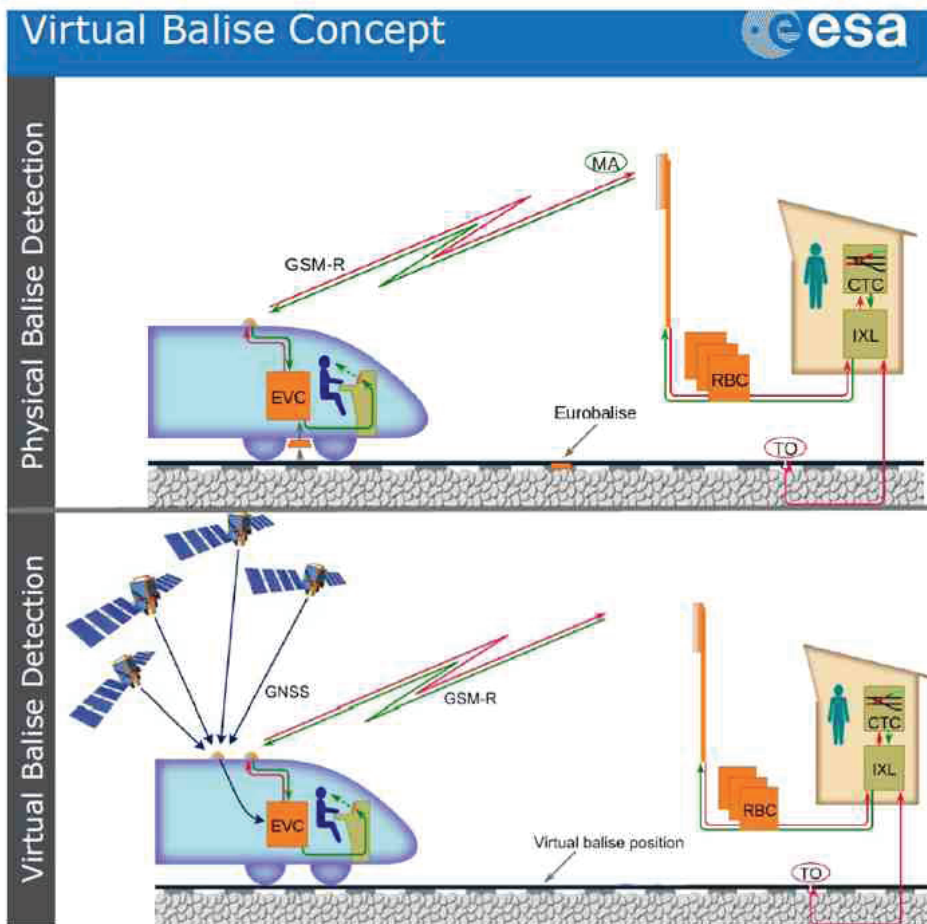
Warto podkreślić, że system Iris4Rail w ramach projektu ESA był badany pod kątem jego wykorzystania w projektowanym przez UIC (International Union of Railways, fr. Union Internationale des Chemins de fer) światowym systemie telekomunikacyjnym FRMCS (Future Rail Mobile Communications System) [3]. Ma on być następcą GSM-R, który z takim trudem i przy dużych kosztach jest wdrażany aktualnie w Polsce. W dniach 13-14.05.2019 odbyła się w siedzibie głównej UIC w Paryżu pierwsza konferencja poświęcona FRMCS.

Projekt SBSRAILS (Space Based Services for Railway Signalling) to w istocie studium wykonalności zastosowania usług kosmicznych dla sygnalizacji kolejowej. Projekt poświęcony był zbadaniu, w jaki sposób zintegrowane rozwiązanie nawigacji satelitarnej i komunikacji satelitarnej może uzupełnić europejski system zarządzania ruchem kolejowym (ERTMS) poziomu 2. Systemy nawigacji satelitarnej można zintegrować z pokładowymi i przytorowymi systemami sygnalizacji tak, aby zagwarantować wymagany poziom bezpieczeństwa (Safety Integrity Level – SIL4), który jest obecnie zapewniany przez istniejące systemy detekcji pociągów. Systemy komunikacji satelitarnej mogą uzupełniać, a nawet zastępować komunikację naziemną. W fazie 2.1 projektu SBS-RAILS ma zostać zaprojektowany, zbudowany i przetestowany na pilotażowej linii Pinerolo-Sangone pierwszy europejski odcinek z systemem sterowania pociągiem oparty na standardzie ERTMS L2 baseline 3, działający z nawigacją satelitarną i satelitarną telekomunikacją. W protokole ustaleń dotyczących ERTMS z 2016 r. zapisano ewoluowanie platformy ERTMS, a jedną z innowacji mają być właśnie technologie satelitarne. Korzyścią z ich zastosowania jest zmniejszenie kosztów dzięki zastąpieniu balis fizycznych balisami wirtualnymi oraz docelowo nawet eliminacja GSM-R. Technologie satelitarne są obsługiwane zupełnie zewnętrznie w stosunku do ERTMS. Oprócz zmniejszenia kosztów samych systemów należy uwzględnić redukcje kosztów eksploatacji i utrzymania całego działającego systemu ERTMS. ESA oszacowała, że system ERTMS oparty na satelitach pozwoli zaoszczędzić do 20% w porównaniu z tradycyjnym rozwiązaniem ERTMS, a nawet ponad 25% w porównaniu z krajowymi systemami sygnalizacyjnymi. Możliwe są także oszczędności w zapotrzebowaniu taboru na energię.

Celem projektu Sim4Rail jest zdefiniowanie funkcjonalności oraz wykonanie stanowiska laboratoryjnego do testów i wsparcia technologii satelitarnych PNT (Positioning, Navigation and Timing). Platforma ma symulować normalne oraz ekstremalne warunki działania technologii satelitarnych, a także różne scenariusze pomiarów. Stanowisko testowe ma uzupełniać testy terenowe, umożliwiając symu-



lację warunków, których wystąpienie w terenie jest bardzo rzadkie, co utrudniałoby możliwość analizy wyników uzyskanych w takich sytuacjach. Projekt skupia się na modelowaniu i symulacji zdarzeń, których wystąpienie budzi największe obawy, a także walidacji symulowanych wyników. Częścią składową stanowiska ma być programowy odbiornik GNSS, czyli de facto oprogramowanie symulujące pracę fizycznego odbiornika satelitarnego, urządzenie generujące sygnały satelitarne, urządzenie umożliwiające nagrywanie i odtwarzanie sygnałów satelitarnych. Efektem projektu będzie de facto narzędzie dedykowane firmom, które w swojej podstawowej działalności opracowują technologie lub aplikacje oparte na GNSS dla kolei.



Rys. 5. Systemy z balisami fizycznymi i wirtualnymi

Projekt **CAPRESE** skupia się na pracach dotyczących technik umożliwiających badanie integralności obserwacji fazowych GNSS do zastosowania w aplikacjach związanych z bezpieczeństwem życia na kolei, zwanych potocznie SoL (Safety of Life), a w szczególności ewolucją europejskiego systemu zarządzania ruchem kole-

jowym (ERTMS) w kierunku wykrywaniem wirtualnych balis za pomocą GNSS. Satelitarne obserwacje fazowe są znacznie bardziej dokładne niż satelitarne obserwacje kodowe. Aktualnie nie mają one certyfikatów integralności umożliwiających ich stosowanie na kolei. W aplikacjach typu SoL zawsze pojawia się pojęcie integralności, gdyż na podstawie ich działania są podejmowane decyzje mające wpływ na życie ludzkie.

Integralność danych to własność wykluczająca wprowadzanie w nieautoryzowany sposób zmian w tych danych. Ochrona integralności w informatyce i telekomunikacji polega na zapobieganiu przypadkowemu zniekształceniu danych podczas ich transmisji, zapisu i odczytu. W przypadku pomiarów satelitarnych definicja pojęcia integralności jest bardziej złożona i ma swoje źródło w dokumencie Organizacji Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (ICAO), która jest wyspecjalizowaną agencją ONZ utworzoną w 1944 r. ICAO współpracuje ze 193 państwami członkowskimi i grupami interesariuszy, mając na celu osiągnięcie porozumienia w sprawie międzynarodowych norm i zalecanych metod postępowania (SARPs – Standards and Recommended Practices) oraz polityk wspierających bezpieczny, wydajny, ekonomicznie zrównoważony i ekologiczny sektor lotnictwa cywilnego. SARPs są wykorzystywane przez państwa członkowskie ICAO w celu zapewnienia zgodności funkcjonowania lokalnego lotnictwa i przepisów z normami globalnymi [10]. Można tu dostrzec analogię do kolejowej interoperacyjności.

Integralność wg definicji ICO jest to miara zaufania, którą można pokładać w poprawności informacji dostarczanych przez cały system. Integralność obejmuje zdolność systemu do dostarczania użytkownikowi aktualnych i ważnych ostrzeżeń (alertów). Definicja obejmuje więc zdolność systemu do ostrzegania użytkownika, gdy system nie powinien być używany do zamierzonej operacji (alert) w z góry zadany czas (czas do ostrzeżenia). Dla lepszego zrozumienia znaczenia pojęcia integralności można podać, że lotnictwo cywilne wymaga informacji o dokładności na poziomie ufności 95%, a w przypadku integralności zakres poziomu ufności zawiera się w przedziale od 99.999% do 99.9999999%.

Pomiary fazowe, będące głównym przedmiotem badań w projekcie CAPRESE ze względu na swój odmienny charakter w stosunku do pomiarów kodowych są wrażliwe na zjawisko nieciągłości obserwacji, wielotorowości sygnałów satelitarnych powodowanych ich odbiciami od elementów infrastruktury kolejowej, które mogą być również źródłem interferencji elektromagnetycznych. W ramach projektu będą prowadzone również badania nad wykorzystaniem techniki PPP (Precise point Positioning).

Zastąpienie balis fizycznych balisami wirtualnymi jest przedmiotem badań niejednego projektu programu Space4Rail. W projekcie CAPRESE detekcja balis wirtualnych ma być realizowana z wykorzystaniem RRAIM (Relative Receiver Autonomous Integrity Monitoring). Są to moduły dedykowane badaniu integralności danych, w które wyposażane są odbiorniki satelitarne.

Celem projektu SAT4TRAIN jest opracowanie platformy do komunikacji, która umożliwi korzystanie ze wszystkich naziemnych i satelitarnych usług ko-

munikacyjnych dostępnych publicznie, tzw. MLCP (Multi Link Communication Platform).

W projekcie **STEMS** (System Suitability Study for Train Positioning using GNSS in the ERTMS) głównym zadaniem badawczym jest zastąpienie balis fizycznych balisami wirtualnymi. Różnica w stosunku do innych projektów z tej tematyki polega na szczegółowej analizie przydatności obecnej generacji satelitów SBAS do zastosowania w aplikacji wykrywania wirtualnych balis ERTMS. Systemy SBAS (Satellite Based Augmentation System) to systemy satelitarne wspomagania pozycjonowania przez globalne systemy GPS. Systemy SBAS mają zasięgi regionalne (kontynentalne). Ich segment kosmiczny zbudowany jest z kilku satelitów geostacjonarnych.

Projekt **INLU** (Signal Processing Techniques for the Integrity of Navigation for Land Users) powstał z myślą dopracowania usług SoL i koncepcji integralności nawigacji satelitarnej GNSS na poziomie odpowiadającym tym opracowanym i zastosowanym dla lotnictwa w systemach SBAS. Różnice między zastosowaniami lotniczymi a lądowymi są istotne, a stanowi o nich np. występowanie na lądzie wielotorowości sygnałów satelitarnych, przesłoneń uniemożliwiających odbiór sygnału satelitarnego i interferencji fal. Projekt obejmuje dość wszechstronne testy algorytmów integralności dla użytkowników lądowych, w tym na kolei. Zasadniczymi komponentami w projekcie INLU są moduł generowania scenariuszy i modułów przetwarzania. Scenariusz uwzględniając: zdefiniowaną przez użytkownika trajektorię przemieszczania się, dane o konstelacji satelitów, modele efektu wielotorowości sygnałów satelitarnych, modele zagrożeń generuje sygnały satelitów. INLU oferuje możliwość generowania danych z czujników bezwładnościowych, danych z magnetometru, danych altimetru ciśnieniowego i danych z odometrów. W module przetwarzania stosowane są różne techniki w celu zbadania integralności sygnałów satelitarnych. Pomiar, które przejdą te testy są przetwarzane w celu uzyskania pozycji i czasu GNSS. W przypadku rozwiązań, które integrują pomiary GNSS z dodatkowymi danymi z czujników również stosowane są odpowiednie algorytmy badania integralności.

Zadaniem projektu **RailSafe** (Innovative Satellite-based Position, Navigation and Timing Concepts for New Railway Safety of Life Applications) było zbadanie koncepcji wykorzystania nawigacji satelitarnej do sterowania pociągami koncentrując się na aspektach bezpieczeństwa. W tym celu analizowano, w jaki sposób różne techniki zwiększania bezpieczeństwa pozycjonowania satelitarnego GNSS, takie jak SBAS, GBAS lub RAIM mogą być wykorzystane lub dostosowane do zastosowania w transporcie szynowym. Celem, który przyświecał projektowi była ocena możliwości rezygnacji z balis fizycznych bez zmniejszenia poziomu bezpieczeństwa w transporcie kolejowym.

Projekt **LiveLand** wspiera monitoring sieci transportowych i ocenę zagrożenia osuwiskami obszarów przez które przebiegają, zapewniając informacje o zagrożeniach geologicznych na poziomie regionalnym, sieciowym i lokalnym. Zaprojektowany system wykorzystuje do tego celu zintegrowane dane z satelitów obserwujących Ziemię meteorologicznych i nawigacyjnych. Do kluczowych zagadnień projektu należą:

- poprawa prognozowania osuwisk na poziomie regionalnym i sieciowym;
- ekonomiczny monitoring nachylenia i niebezpieczeństwa osiadania na obszarze sieci;
- przedstawianie prognoz wskazujących na zwiększone prawdopodobieństwo wystąpienia osuwiska w celu ustalenia priorytetów działań i złagodzenia skutków w przedziale 1-5 dni oraz prognoz średnioterminowych (15 dni – 30 dni);
- zapewnienie możliwości niezawodnego monitorowania określonych, często odległych miejsc, aby ostrzegać przewoźników o wszelkich zagrożeniach geologicznych i osiadaniach.

LiveLand został zastosowany testowo w miejscach zagrożeń w całej Szkocji. Po sprawdzeniu skuteczności działania systemu projekt będzie rozszerzony na całą Wielką Brytanię z możliwością ekspansji na Europę i świat.

Celem projektu **RailSAT** była ocena wykonalności technicznej i opłacalności ekonomicznej usług, które usprawniłyby obecnie stosowane techniki monitorowania geometrii torów kolejowych i otaczającego środowiska za pomocą danych satelitarnych. Do osiągnięcia tego celu wykorzystano obserwacje Ziemi, satelitarną interferometrię radarową InSAR (Synthetic Aperture Radar Interferometry) oraz dane nawigacji satelitarnej. InSAR jest teledetekcyjną metodą stosowaną do badania zmian ukształtowania powierzchni Ziemi. Wykorzystuje wzajemne przesunięcia fazy sygnału dwóch zobrażeń SAR tego samego obiektu wykonanych z nieznacznie różniących się pozycji. W oparciu o różnice fazy odpowiadających sobie sygnałów radarowych z kolejnych zobrażeń SAR uzyskuje się informację o wartościach względnych rzędnej powierzchni terenu lub jej zmianach w czasie. Zakładając znane teoretyczne położenie toru możliwe jest wyznaczenie wysokościowych zmian jego położenia tą techniką. W programie wyszczególniono obszarowo 4 rodzaje analiz:

- regionalna, w celu jakościowego zbadania ogólnych trendów deformacji terenu, takich jak powolne osuwanie się ziemi, osuwanie spowodowane przez wydobywanie, które mogą mieć wpływ na tor;
- korytarz o szerokości 50-100 m z celami j.w.
- korytarz o szerokości 10-25 m w celu zbadania deformacji podtorza i stabilności toru (ocena ryzyka związanego z podłożem, punktów przejściowych, przepustów, wiaduktów, przejazdów kolejowych itp.);
- korytarz 3-5 m w celu zbadania deformacji poszczególnych torów i korelacji z innymi danymi pomiaru geometrii torów.

Projekt **EOMST** typu **SatCom** dotyczy zbadania możliwości wykorzystania usług internetowych w pociągach dużej prędkości. System korzysta z wielu technologii komunikacyjnych w celu uzyskania dostępu do Internetu przez GSM, WiFi i satelity telekomunikacyjne. O wyborze źródła internetu decyduje router dostępu mobilnego, który zarządza łączami w zależności od ich dostępności tak, aby zapewnić ciągłość dostępności usługi.

Z projektem **SatApps** (Space Technologies for Machine-2-Machine Applications) związane są takie określenia, jak Machine to Machine (M2M), Internet of Things (IoT) oraz Industry 4.0 odnoszące się do platform wymiany danych pomiędzy różnymi urządzeniami za pośrednictwem internetu bez udziału człowieka. Składają się na nie inteligentne, autonomiczne oraz wbudowane moduły przesyłania danych, telekomunikacyjne usługi przesyłania danych wraz z dedykowaną infrastrukturą, aplikacje, systemy bezpieczeństwa, usługi projektowe, doradcze i wdrożeniowe.

Wymagania, którym miał sprostać projekt dotyczyły:

- globalnej dostępności i obsługi 24/7, na początku minimum transkontynentalnej;
- bardzo niskiego kosztu komunikacji;
- bardzo małej przepustowości dla poszczególnych sensorów;
- ekstremalnie niskiego zapotrzebowania na energię urządzeń;
- odporności na ciężkie warunki pracy;
- najwyższego poziomu bezpieczeństwa danych.

Bezpieczeństwo przejazdów kolejowych, których liczba na świecie jest szacowana na 600 000, było głównym zadaniem badawczym w projekcie **EMUSER** (Enhanced Multisensor Data Handler for Railways). Projekt ten był rozwinięciem projektu **MUSER**, który jest certyfikowany przez włoskiego zarządcę infrastruktury kolejowej RFI (Italian Railway Infrastructure Manager) oraz CENELEC, czyli Europejski Komitet Normalizacyjny Elektrotechniki (fr. Comité Européen de Normalisation Electrotechnique, na poziomie SIL4 (Safety Integrity Level), który dla pracy ciągłej definiuje współczynnik tolerowanego zagrożenia THR (tolerable hazard rate) w przedziale  $\geq 10^{-9} < 10^{-8}$ . Innowacją w projekcie było zastąpienie konwencjonalnych kanałów komunikacyjnych satelitarnym łączem szerokopasmowym w miejscach, w których komunikacja naziemna nie jest dostępna lub uzupełniać na zasadzie redundancji starsze łącza komunikacyjne tradycyjnie stosowane w infrastrukturze kolejowej. Każda instalacja systemu (węzeł) **EMUSER** składa się z jednej stacji zdalnego sterowania oraz zestawu czujników, którymi ona steruje. Po zamknięciu barier węzeł **EMUSER** odpowiada za: skanowanie obszaru przejazdu kolejowego i wykrywanie przeszkód, włączenie alarmu, rejestrację wideo oraz rejestrację danych diagnostycznych wraz z transmisją tych danych do stacji zdalnego sterowania. Węzły systemu zlokalizowane wzdłuż toru mają budowę modułową. Rozwinięcie systemu **MUSER** od strony technicznej polega m.in. na tym, że szafka węzła komunikuje się z dodatkowym węzłem o nazwie Multi Bearer

Node (MBN), który składa się z dwóch modułów. Jeden z nich (MBN Cabinet) jest odpowiedzialny głównie za zarządzanie siecią, nadmiarowością komunikacji i aspektami łączności naziemnych, a praca drugiego (MBN Dome) związana jest wyłącznie z komunikacją satelitarną. Każdy węzeł jest wyposażony w minimum jeden czujnik radarowy, a maksymalnie w cztery, zależnie od geometrii monitorowanego przejazdu. Z każdym zainstalowanym czujnikiem radarowym współpracuje przypisana do niego kamera.

Projekt **SaMoLoSa** dotyczy monitoringu transportu towarów niebezpiecznych. Technologia satelitarna jest wykorzystywana w celu zmniejszenia ryzyka transportu, poprawy bezpieczeństwa i optymalizacji operacji logistycznych. Realizacja projektu zaowocowała nowym prototypem urządzenia wyprodukowanym przez głównego wykonawcę projektu. Wykorzystuje ono zarówno komunikację satelitarną IoT, jak i LPWAN poprzez kombinację odpowiednio połączeń Globalstar i Sigfox. LPWAN to telekomunikacyjna sieć rozległa małej mocy (ang. Low-Power Wide-Area Network) z przeznaczeniem dla komunikacji na duże odległości przy niskiej przepływności danych i niskim poborze energii. Do urządzenia można aktualnie podłączyć równocześnie w sumie 20 różnych czujników (termopary, temperatury, ciśnienia, innych krytycznych dla transportowanego towaru). Urządzenie jest też wyposażone w odbiornik satelitarny. Wykonywanie pomiarów może być realizowane co kilka minut z transmisją co 2 godziny lub częściej, a baterie wystarczają do zasilania przez co najmniej 4 lata. Urządzenie posiada certyfikat ATEX (fr. Atmosphères Explosibles) dla strefy 1 (przestrzeń, w której atmosfera wybuchowa zawierająca mieszaninę z powietrzem substancji palnych w postaci gazów, par, mgieł, może czasami wystąpić w trakcie normalnego działania), co oznacza, że urządzenie jest odpowiednie do transportu towarów bardzo niebezpiecznych, takich jak CS<sub>2</sub> z niską temperaturą zapłonu (102 °C, klasa temperaturowa T6).

Celem projektu **3INSAT** było opracowanie i przetestowanie nowej platformy do lokalizacji pociągu korzystającej z łączności satelitarnej, bazując na systemie Ansaldo STS. Założeniem projektowym była integracja z systemem ERTMS i spełnianie wymagań SIL4. W ramach projektu powstał symulator odbiornika GNSS. Ogólna architektura symulatora składa się z trzech głównych części reprezentujących cały system GNSS-LDS (Location Determination. System): stacji referencyjnych; serwera obszaru bezpieczeństwa LDS i jednostki pokładowej. Symulator GNSS-LDS pracuje z danymi rzeczywistymi lub danymi symulowanymi. Istotnym zagadnieniem w projekcie była niezależna sieć telekomunikacyjna oparta na protokole IP, łącząca usługi satelitarnej komunikacji ruchomej BGAN (Broadband Global Area Network) z rozwiązaniami naziemnymi 3G/4G i TETRA (TERrestrial Trunked Radio). W projekcie opracowany został prototyp routera dostępu mobilnego do zarządzania wieloma łączami bezprzewodowymi jednocześnie. Faza weryfikacyjna projektu była zrealizowana na 50 kilometrowym odcinku linii kolejowej na Sardynii.

**SafeRail** jest kolejnym projektem związanym z bezpieczeństwem na przejazdach kolejowych. Wdrażana koncepcja usługi będzie zależała od priorytetów sformułowanych przez użytkowników. Rozwiązanie będzie zawierało ostrzeżenia w czasie rzeczywistym kierowane do użytkowników dróg o przejeździe pociągu przez przejazd. W tym celu zarządca infrastruktury będzie zapewniał dokładne tabele czasu rzeczywistego dla przejazdów, które będą obsługiwane przez urządzenia do nawigacji. W projekcie przewidziane jest też wsparcie w utrzymaniu, polegające na inspekcji różnych komponentów przejazdów kolejowych w regularnych odstępach czasu, np. oznaczeń drogowych, obszaru wolnego od roślinności.

Zakończony projekt **LeCross** był kolejnym zrealizowanym pod auspicjami ESA, w którym problematyka bezpieczeństwa przejazdów kolejowych była pierwszoplanowa. Poprawę bezpieczeństwa na przejazdach kolejowych planowano osiągnąć poprzez wsparcie zapobiegania wypadkom i poprawę działań awaryjnych. Działanie systemu wykorzystuje satelitarne usługi M2M.

W projekcie **SAET** (Satellite Access for European Trains) skorzystano z doświadczeń projektu **FIFTH** ze względu na zbieżność tematyki. Głównym celem było inżynierskie i techniczne zdefiniowanie architektury sieci satelitarnej do świadczenia usług multimedialnych w pociągach europejskich. Z technicznego punktu widzenia SAET miał na celu zaprojektowanie i wdrożenie prototypowego terminala pociągu dostosowanego do europejskiej technologii pociągów dużych prędkości. Opracowano specjalnie dla niego architekturę anteny płaskiej nowej generacji oraz zdefiniowano i oceniono odpowiednią architekturę systemu, pozytywnie zweryfikowaną w ramach kampanii testowej. W programie SAET wiele uwagi poświęcono zgodności opracowywanych rozwiązań ze specyfiką i wymogami branży kolejowej.

Usługi zrealizowane w ramach projektu **MATIST** (Monitoring Alpine Transportation Infrastructure using Space Techniques) dostarczają informacji o osuwiskowych ruchach powierzchni terenu na obszarze alpejskim operatorom infrastruktury transportu kolejowego, drogowego i z sektora energetycznego. Wyniki są efektem zintegrowanych obserwacji satelitarnej i naziemnej interferometrii radarowej oraz nawigacji satelitarnej. Projekt ma relatywnie do innych projektów ESA bardzo zawężone grono adresatów. Korzystają z niego Szwajcarskie Koleje Federalne (SFR), Austriackie Koleje Federalne (OeBB), Szwajcarski Federalny Urząd ds. Środowiska (FOEN), austriacki operator autostrad ASFINAG oraz szwajcarskie biuro geologiczne Kellerhals + Häfeli AG.

Projekt **SPACE FOR RAIL PRIZE** dedykowany jest kolejom brytyjskim. Dotyczy integracji dwóch lub więcej systemów satelitarnych (łączności, nawigacji i teledetekcji) z systemami konwencjonalnymi (nie kosmicznymi).

Do zadań zakończonego w 2014 roku projektu **SATCOM Rail** należało:

- określenie, które aplikacje związane z bezpieczeństwem i usługi kolejowe mogą być obsługiwane przez łączność satelitarną,
- ustalenie, w jaki sposób rozwiązania łączności satelitarnej mogłyby poprawić istniejącą komunikację naziemną w transporcie kolejowym,
- zbadanie, w jaki sposób można dostosować komunikację satelitarną do sieci łączności kolejowej,
- określenie wymagań, które powinien spełniać system komunikacji satelitarnej oraz sformułowanie wytycznych dotyczących jego rozwoju i działania w celu uzyskania zatwierdzenia i zezwolenia na stosowanie w aplikacjach związanych z bezpieczeństwem na kolei,
- zaproponowanie alternatywnych architektur komunikacyjnych dla kolei, w tym komunikacji satelitarnej, które spełniają określone wymagania dotyczące rozwiązań komunikacyjnych.
- ocena opłacalności ekonomicznej wprowadzenia łączności satelitarnej w operacjach kolejowych, w tym określenie możliwości rynkowych oraz analiza kosztów i korzyści w odniesieniu do istniejących systemów oraz ich eksploatacji i utrzymania.

**IRISS** (Intelligent Railways via Integrated Satellite Services) był projektem zakończonym w marcu 2012 r. Jego zadaniem było zbadanie wykonalności, zidentyfikowanie zastosowań i wymagań dotyczących zintegrowanej bramki informacyjnej, komunikacyjnej i nawigacyjnej w sektorze transportu kolejowego. Bramka taka jest elementem zapewniającym interoperacyjność między sieciami i zawiera urządzenia takie, jak translatory protokołów, urządzenia dopasowujące impedancję, konwertery szybkości, izolatory uszkodzeń lub translatory sygnałów. Bramka wymaga zdefiniowania wzajemnie akceptowalnych procedur łączności między sieciami korzystającymi z bramki. Projekt wykonano, opracowano rozwiązanie oraz wykonano testy potwierdzające działanie koncepcji. Projekt pozytywnie zweryfikował funkcjonalność systemu i pokazał wartość dodaną łączności satelitarnej pod względem znacznego zwiększenia dostępności komunikacji w sieci.

Do starszych projektów ESA należą poniżej przedstawione.

W ramach projektu **Broadband to Trains** wykonawca zaprojektował, zbudował i przetestował system dostępu Wi-Fi do użytku w pociągach z możliwością wspierania szerokopasmowego dostępu do Internetu i intranetu, a także lokalnych treści multimedialnych, takich jak krótkie filmy, najświeższe wiadomości itp. Projekt rozpoczął się w 2004 roku, a zakończył na początku 2006 r.

Projekt **ECORAIL** (EGNOS Controlled Railway Equipment) z 2001 roku zakończył się w 2006 r. Dotyczył wdrożenia nawigacji satelitarnej na kolei w celu wykazania wykonalności i korzyści płynących z połączenia nawigacji satelitarnej



GNSS z europejskim systemem sterowania pociągiem i zarządzania ruchem kolejowym (ETCS / ERTMS).

**RadioCompass** był projektem zainicjowanym w 2001 r., a zakończonym w 2003 r. Jego głównym celem było opracowanie i przetestowanie innowacyjnego systemu do celów precyzyjnej nawigacji o wysokiej integralności. Koncepcja projektu zakładała modułowość, dzięki której osiągnięto możliwość wymiany poszczególnych elementów na elementy nowszej generacji.

**Railway User Navigation Equipment (RUNE)** był projektem, w którym zintegrowano nawigację satelitarną GPS i EGNOS z innymi czujnikami pozycji oraz informacjami sygnalizacyjnymi i ograniczeniami prędkości z zachowaniem zgodności z wymaganiami ERTMS. Projekt zakończył się w 2006 r.

Projekt **ITEGRAIL** (GNSS-1 Rail User Navigation Equipment) został zainicjowany w 2001 roku w celu zbadania możliwości i opłacalności wykorzystania sygnału satelitów systemu EGNOS w krytycznym dla bezpieczeństwa zarządzaniu i kontroli ruchu kolejowego. Intencją było osiągnięcie obniżenia kosztów, redundancji i poprawy niezawodności w stosunku do istniejących systemów pomiaru prędkości pociągów opartych na odometrach.

Głównym celem projektu **LOCOLOC** było opracowanie i demonstracja kompletnego, taniego, niezawodnego systemu nawigacji i systemu integralności pociągu opartego na globalnym systemie nawigacji satelitarnej GNSS. Skupiono się na algorytmach wyznaczania prędkości i przyspieszenia. Projekt rozpoczął się w 2002 roku i zakończył na jesień 2004 r.

## 5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono zagadnienia związane z wykorzystaniem sztucznych satelitów Ziemi w branży kolejowej. Wyróżnić można dwa główne obszary zainteresowań i wdrażania technik satelitarnych: nawigacja i łączność. W przypadku nawigacji można wskazać dwa różniące się obszary: pozycjonowanie geodezyjne oraz lokalizację. Podstawowa różnica to dokładność wyników. Geodeci wykorzystują technologię satelitarną i pomiarową uzyskując dokładności wyznaczenia współrzędnych obiektu na Ziemi rzędu nawet pojedynczych milimetrów, korzystając z sygnałów satelitarnych nadawanych z odległości ponad 20 000 km. W lokalizacji dokładność określenia położenia obiektu waha się od decymetrów do metrów. Na możliwość wykorzystania technik satelitarnych na kolei zwróciła uwagę Europejska Agencja Kosmiczna uruchamiając program Space4Rail. Pierwsze projekty programu datowane są na 2001 rok. Dotyczyły studiów wykonalności, oceny opłacalności i możliwości technicznych wdrożenia technik satelitarnych na kolei

z zachowaniem wysokich standardów bezpieczeństwa. Kolejne projekty badały coraz bardziej szczegółowe i złożone zagadnienia techniczne. Głównymi powodami sięgnięcia po techniki satelitarne na kolei była chęć zwiększenia bezpieczeństwa oraz zmniejszenia kosztów konwencjonalnych systemów bezpieczeństwa w transporcie szynowym. W 28 projektach ESA główni wykonawcy pochodzą z Włoch (8 projektów), Wielkiej Brytanii i Niemiec (po 5 projektów), co stanowi prawie 65% projektów realizowanych przez wykonawców z zaledwie 3 krajów. Wykonawcy wszystkich projektów rekrutują się z 10 państw europejskich.

## Bibliografia

- [1] Uznański A.: Pozycjonowanie satelitarne techniką PPP RTK. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej. Oddział w Krakowie. Seria: Materiały Konferencyjne, cz. 1, Droga kolejowa z. 1, 2018.
- [2] <http://space4rail.esa.int>
- [3] <https://uic.org>
- [4] <https://www.lockheedmartin.com>
- [5] <https://www.inmarsat.com>
- [6] <https://www.nasa.gov>
- [7] <http://www.meteofrance.fr>
- [8] <https://www.pb.pl/gigantyczny-kontrakt-na-gsm-r-podpisany-909321>
- [9] <https://www.rynek-kolejowy.pl/wiadomosci/gsmr-juz-czas-na-dzialanie-90416.html>
- [10] <https://www.ulc.gov.pl>