

Analiza dostępności i jakości predykcji orbit satelitów GNSS wraz z optymalizacją strategii rozwiązania

# Aby trafić laserem

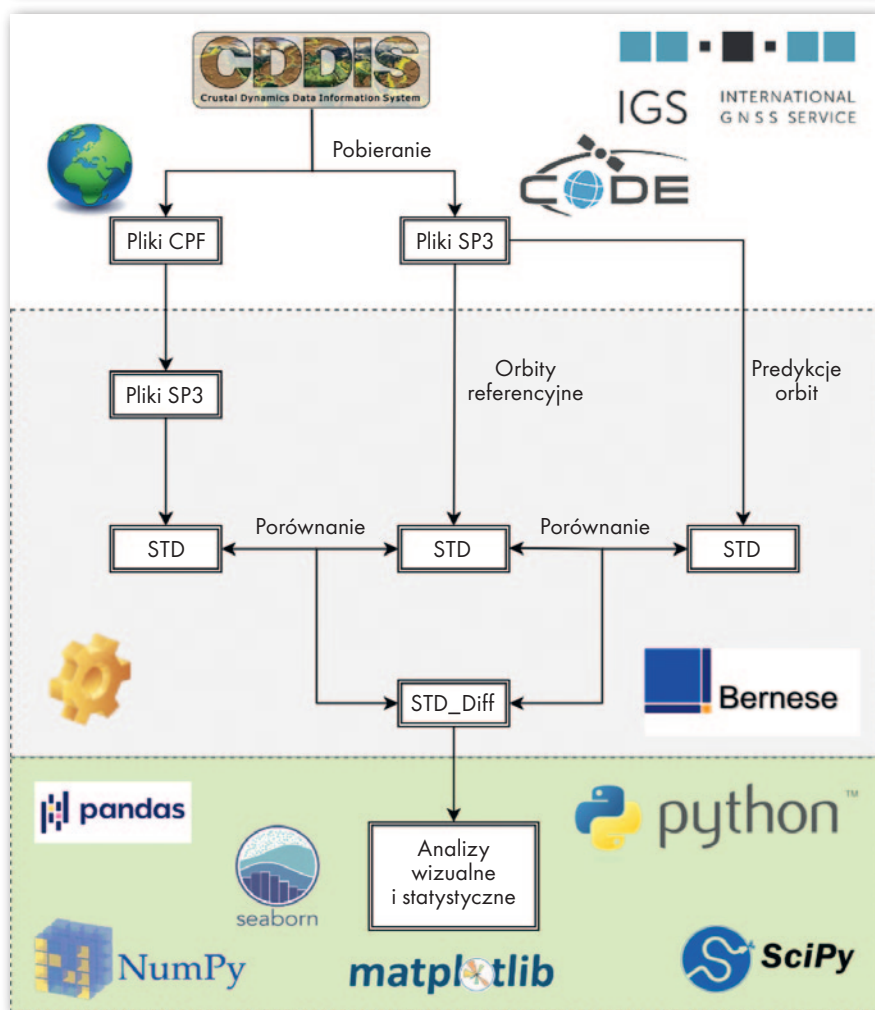
Śledzenie satelitów nawigacyjnych przez stacje Międzynarodowej Służby Pomiarów Laserowych (ILRS) ma duże znaczenie dla środowiska geodezyjnego. Nie byłoby to jednak możliwe bez uprzedniej znajomości położenia satelitów.

**Adrian Nowak,  
Radosław Zajdel,  
Krzysztof Sośnica**

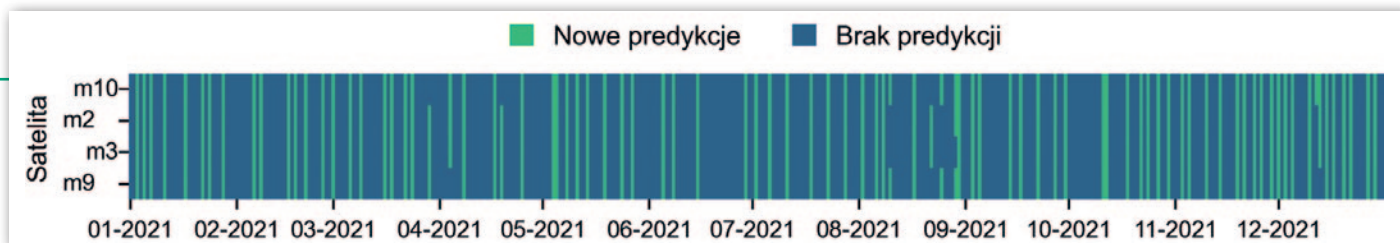
Jakość predykcji pozycji satelitów (orbit) ma bezpośredni wpływ na efektywność pracy stacji ILRS (International Laser Ranging Service). W niniejszym artykule przeanalizowano jakość predykcji orbit dostarczanych dla ILRS oraz Międzynarodowej Służby GNSS (International GNSS Service – IGS) przez różne międzynarodowe centra analiz. Ponadto skupiono się na optymalizacji strategii rozwiązania predykcji orbit dla satelitów globalnych i regionalnych systemów nawigacji satelitarnej (GNSS + RNSS) pod kątem zastosowania różnych podejść do modelowania sił niegrawitacyjnych działających na satelity.

Tab. 1. Lista centrów dostarczających predykcje dla satelitów nawigacyjnych w ramach współpracy z ILRS

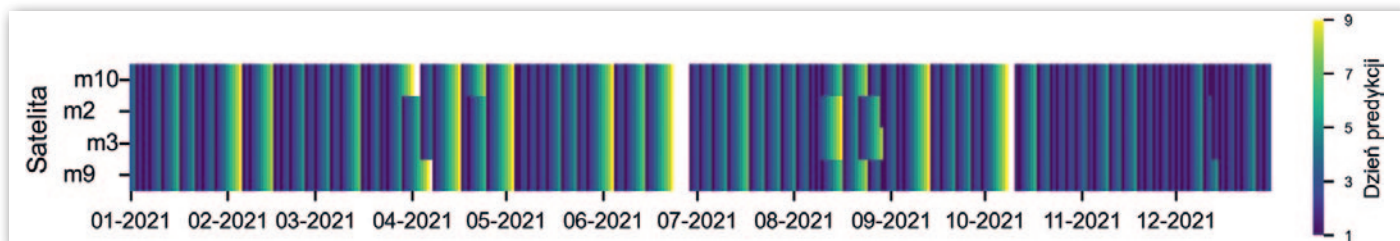
Skrót	Dostawca predykcji	Liczba dni predykcji w pliku CPF
COD	Centrum Wyznaczania Orbit w Europie (CODE), Instytut Astronomiczny Uniwersytetu w Bernie (AIUB), Szwajcaria	5
ESA	Europejskie Centrum Operacji Kosmicznych (ESOC), Darmstadt, Niemcy	5
GAL	Centrum Kontroli Galileo (GAL), Niemieckie Centrum Aeronautyki i Astronautyki (DLR), Niemcy	5
NER	NERC Zakład Geodezji Kosmicznej (NSGF), formalnie Królewskie Obserwatorium Greenwich (RGO), Wielka Brytania	4
SHA	Obserwatorium Astronomiczne w Szanghaju (SHAO), Chińska Akademia Nauk (CAS), Chiny	9
QSS	Biuro Departamentu Rządu Japonii	8



Rys. 1. Schemat przetwarzania danych



Rys. 2. Dostępność nowych predykcji dla BeiDou z centrum SHA na okres 1 stycznia – 31 grudnia 2021 r.



Rys. 3. Ostatni dzień predykcji w pliku dla BeiDou z centrum SHA na okres 1 stycznia – 31 grudnia 2021 r.

## • Dane oraz metodyka badań

Predykcje pozycji satelitów nawigacyjnych są zazwyczaj dostarczane przez centra analiz w formie tabelarycznych wektorów pozycji geocentrycznych w formacie CPF (Consolidated Prediction Format). Predykcje wykorzystują bieżącą informację na temat pozycji satelitów (np. orbity IGS Rapid) oraz przewidywania dotyczące działania sił perturbujących (np. promieniowanie ciśnienia słonecznego). ILRS gromadzi i publikuje dane od wszystkich dostawców predykcji i dla każdej misji satelitarnej w publicznych bazach danych, takich jak CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System). Centra analiz, które dostarczają swoje predykcje dla satelitów nawigacyjnych we współpracy z ILRS, przedstawione są w tabeli 1 (zawiera ona ponadto informacje o tym, ile dni obejmuje plik z predykcją).

Predykowane orbity porównane zostały z orbitami referencyjnymi wyznaczonymi kilka/kilkanaście dni po udostępnieniu wszystkich niezbędnych do obliczeń obserwacji satelitarnych i modeli. Na potrzeby analiz wybrane zostały orbity typu „final” dostarczone przez Centrum Wyznaczania Orbit w Europie (CODE) w ramach inicjatywy MGEX (IGS Multi-GNSS Pilot Project). Efemerydy zebrane do analiz obejmują okres od 7 marca 2021 r. do 31 grudnia 2021 r., co minimalizuje wpływ różnic wynikających ze zmieniającej się geometrii Słońce-Ziemia-Satelita.

Rysunek 1 przedstawia schemat blokowy przetwarzania danych do walidacji predykcji orbit wykonanej w badaniach z wykorzystaniem oprogramowania Bernese GNSS Software oraz własnych skryptów napisanych w języku programowania Python. Zbiór danych niezbędnych do walidacji składa się z plików predykcji w formacie CPF oraz dyskretnych pozycji satelitów z plików zawierających precyzyjne orbity w układzie ziemskim (pliki SP3). Ponadto w obli-

zeniach wykorzystano pliki i modele zgodne z konwencją IERS 2010 (International Earth Rotation and Reference Systems Service).

Konwersja formatu CPF do SP3, transformacja pomiędzy niebieskimi i ziemskimi układami odniesienia, transformacja i ujednoczenie systemu czasu w plikach, wpasowanie orbity w dyskretnie pozycje satelitów z pliku SP3 oraz wygenerowanie orbity ciągłej, a także porównanie orbit wygenerowanych na podstawie trzech strategii przetwarzania wraz z wygenerowaniem plików różnic zostały wykonane w programach Bernese GNSS Software.

Porównanie orbit polega na zestawieniu ich ze sobą i wyznaczeniu różnic pozycji satelity na orbicie w tej samej epoce z próbkowaniem co 15 minut. Różnice pozycji wyrażono w układzie orbity, tj. kierunku radialnym (*radial*), wzdłuż toru ruchu satelity (*along-track*) oraz w kierunku prostopadłym do dwóch poprzednich (*cross-track*). Porównanie orbit nie wskazuje ich bezwzględnej dokładności ani nie rozstrzyga, która z porównywanych orbit jest lepiej wyznaczona. Jednakże gdy wykorzystamy wysokiej jakości orbity referencyjne oparte na danych rzeczywistych, których jakość została potwierdzona we

wcześniejszych badaniach (np. na bazie niezależnych obserwacji laserowych do satelitów SLR), to możemy zwalidować orbity z predykcji w celu oceny wpływu zastosowanego modelowania sił, np. wpływu modelowania ciśnienia promieniowania słonecznego.

## • Dostępność i jakość predykcji

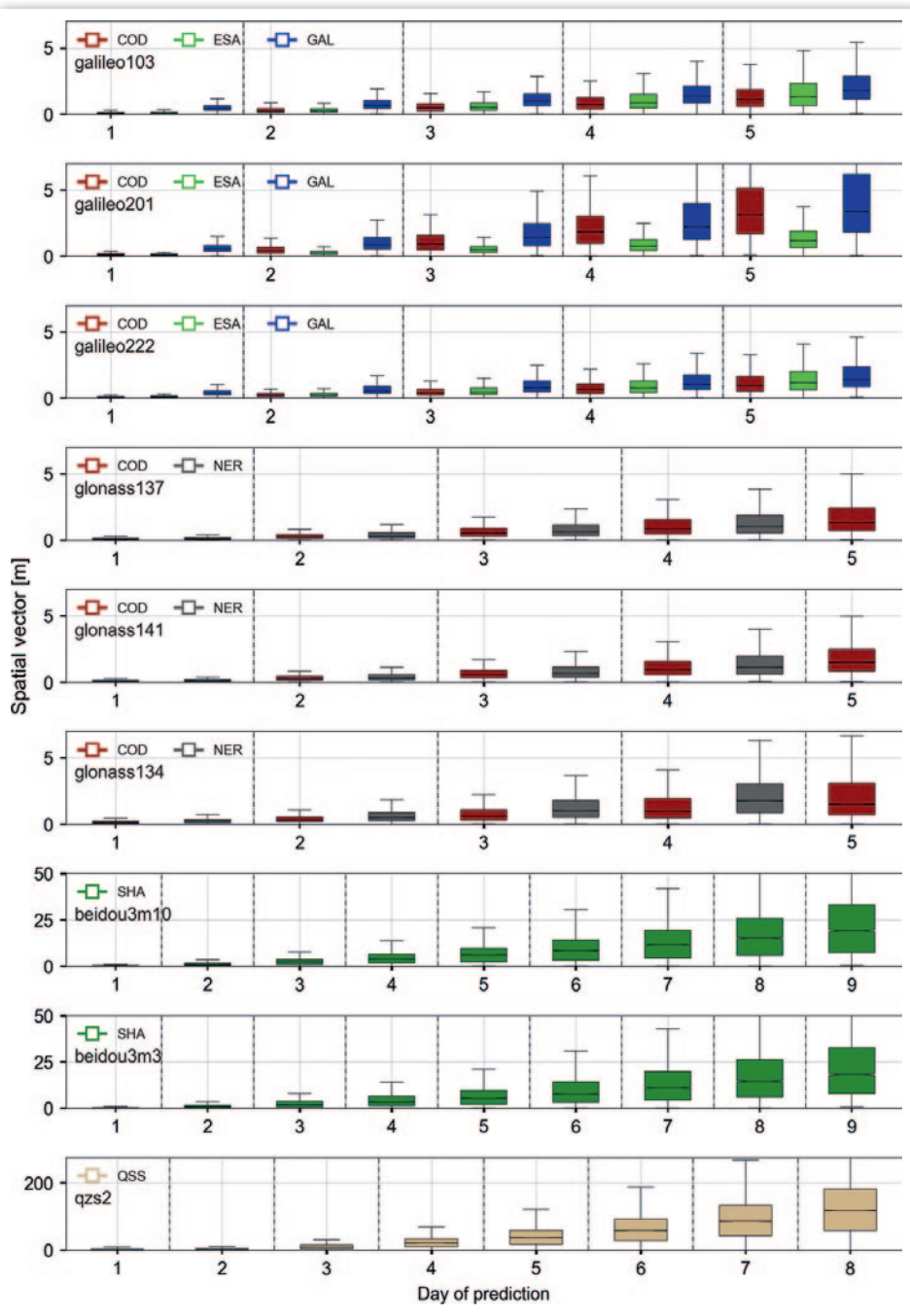
Na szczególną uwagę zasługuje znaczną nieregularność w dostępności plików predykcji z centrum w Szanghaju (SHA) dla satelitów BeiDou-3. Przedstawia to rysunek 2. Centrum SHA dostarcza nowe pliki predykcyjne co 5–6 dni, w porównaniu z 1–2 dniami dla każdego innego satelity GNSS. Wykres uwzględnia dwie możliwości, tj. brak danych (kolor niebieski) oraz dostępność nowych predykcji w danym dniu (kolor zielony). W połączeniu z brakiem publikacji predykcji wykazano, że w okresie objętym analizą pojawiły się dni, w których dla danego satelity BeiDou stacje ILRS nie dysponowały danymi predykcyjnymi, więc nie mogły wykonywać pomiarów laserowych do satelitów.

Pełna kompletność predykcji dla poszczególnych satelitów oznacza, że w danym dniu predykcje mogą pochodzić zarówno z pierwszego dnia, charakteryzującego się potencjalnie najlepszą jako-

Tab. 2. Lista satelitów wybranych do analizy z poszczególnych grup

System	Typ	Satelity			Dostawcy predykcji
		Numer ILRS	Numer SVN	Numer PRN	
Galileo	Galileo-1 IOV	galileo103	E103	E19	COD, ESA, GAL
	Galileo-2 FOC (ecc. orbit)*	galileo201	E201	E18	COD, ESA, GAL
	Galileo-2 FOC	galileo222	E222	E33	COD, ESA, GAL
GLONASS	GLONASS-M	glonass137	R852	R14	COD, NER
	GLONASS-M+	glonass141	R859	R04	COD, NER
	GLONASS-K	glonass134	R802	R09	COD, NER
BeiDou	BDS-3 SECM	beidou3m10	C208	C30	SHA
	BDS-3 CAST	beidou3m3	C206	C21	SHA
QZSS	IGSO	qzs2	J002	J02	QSS

\*ecc. orbit – odnosi się do satelitów Galileo umieszczonych w 2014 r. na nieprawidłowej orbicie mimośrodowej



Rys. 4. Jakość predykcji orbity dla danej grupy satelitów przedstawiona w formie wektora przestrzennego. Zakres osi Y jest taki sam dla Galileo i GLONASS, a odpowiednio przeskalowany dla BeiDou i QZSS

Satelity pogrupowane zostały według typów (zgodnie z tabelą 2), a z każdej grupy wybrano jednego reprezentanta. Założono, że degradacja jakości predykcji w czasie dla satelitów w każdej grupie będzie podobna. W celu dokładnej identyfikacji poszczególnych satelitów każdy z nich opisany jest przez 3 niezależne identyfikatory: ILRS, SVN (Satellite Vehicle Number) i PRN (Pseudo Random Noise).

Wyniki analiz przedstawione zostały na rysunku 4. Poszczególne centra predycyjne dostarczają danych o różnej jakości. W przypadku GNSS najlepszej jakości predykcje dla satelitów Galileo i GLONASS osiągają średni błąd pozycji 1,0 m dla 4. dnia predykcji orbity. Dla satelitów BeiDou dokładność jest nieco niższa i wynosi od 3,0 do 4,0 m dla 4. dnia. W przypadku regionalnego systemu satelitów QZSS charakterystyka orbity nachylonej geosynchronicznej wymaga specjalnego modelowania, powodując szybkie pogarszanie się jakości predykcji w czasie, co daje średni błąd na poziomie 20 m dla 4. dnia.

### • Wpływ SRP na orbity GNSS

W przypadku satelitów nawigacyjnych główne perturbacje orbity, które mogą wpływać na jakość predykcji, to bezpośrednie i pośrednie (np. albedo Ziemi) efekty związane z działaniem ciśnienia promieniowania słonecznego. W przeciwieństwie do satelitów na niskich orbitach okołoziemskich satelity nawigacyjne nie są narażone na znaczne perturbacje wynikające z oporu atmosferycznego.

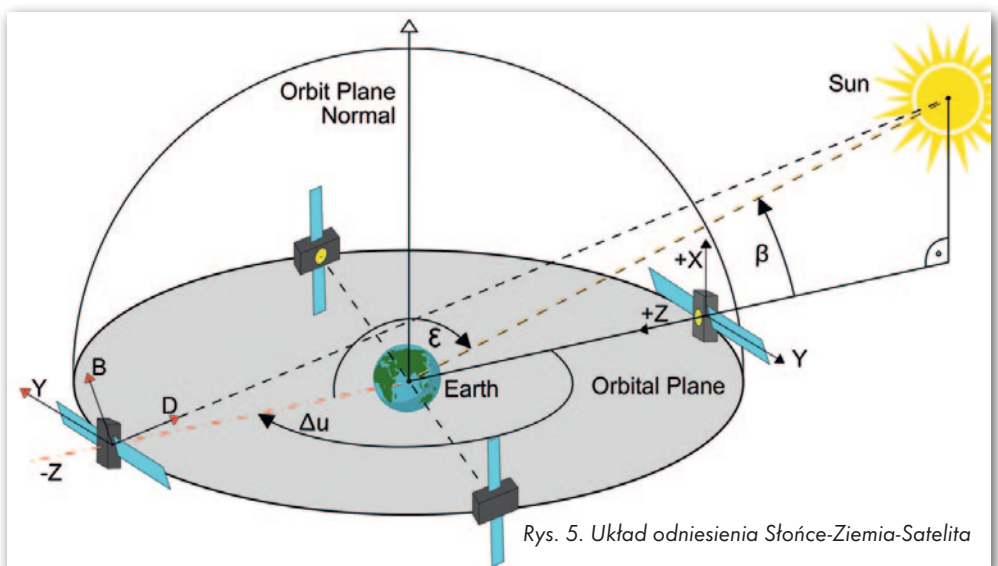
Bezpośrednie SRP polega na przeniesieniu pędu zaabsorbowanych, wymi-

cią, jak i z kolejnych dni, co przedstawia rysunek 3. Najlepszym przykładem takiej sytuacji są właśnie predykcje dla konstelacji satelitów BeiDou. Jakość tych danych niekoniecznie jest tak dobra, jak w pierwszym dniu predykcji, dlatego w dalszej części artykułu przeanalizowano, jak postępuje degradacja jakości w całym okresie użyteczności pliku predycyjnego.

### • Jakość predykcji

W analizach ocena jakości predykcji dla satelitów nawigacyjnych opiera się na całym okresie dostępnym w pliku. Wynika to z faktu, że często automatyczne procesy tworzenia predykcji są przerywane lub dostawcy predykcji podają je w odstępach kilkudnio-

wych. W takim przypadku istotna staje się jakość predykcji w dłuższym okresie, zwłaszcza z punktu widzenia pracy stacji laserowych mierzących odległości do satelitów.



Rys. 5. Układ odniesienia Słońce-Ziemia-Satelita



towanych lub odbitych fotonów przez elementy konstrukcyjne satelity. W analitycznym podejściu do modelowania SRP satelita dzielony jest na poszczególne powierzchnie, z których każda ma swoje właściwości geometryczne, optyczne i orientację. Najczęstszą uproszczoną reprezentacją satelity jest tzw. *box-wing* dzielący satelitę na korpus (*box*) oraz panele słoneczne (*wing*). Teoretyczne przyspieszenie wywołane przez SRP jest obliczane dla każdej z tych powierzchni. Pochłonięte promieniowanie wywołuje siłę działającą na satelitę w kierunku Słońca, co na rysunku 5 pokazano jako kierunek D. Promieniowanie odbite od elementu satelity przyspiesza satelitę wzdłuż wektora normalnego danego elementu. Promieniowanie odbite dyfuzyjnie przyspiesza satelitę w kierunku wektora znajdującego się w płaszczyźnie rozpiętej między wektorem normalnym powierzchni a osią D. Dodatkowo należy uwzględnić wtórne promieniowanie termiczne i albedo Ziemi. Całkowitą wartość SRP uzyskuje się przez zsumowanie składowych wszystkich elementów powierzchni.

## • Różne strategie modelowania perturbacji

Zastosowanie odpowiednich modeli analitycznych pozwala na dokładne modelowanie sił działających na satelity, w tym przede wszystkim SRP. Niestety, modele analityczne możemy wykorzystywać tylko dla satelitów, dla których informacje na temat ich parametrów konstrukcyjnych są dostępne dla użytkownika. Na przestrzeni ostatnich lat informacje takie udostępnione zostały wyłącznie przez operatorów systemów Galileo, BeiDou oraz QZSS. Drugą kwestią wymagającą rozpatrzenia jest dokładność udostępnianych informacji, która często bywa niewystarczająca do precyzyjnego modelowania sił działających na satelity przy wykorzystaniu wyłącznie modeli analitycznych. Z pomocą przychodzą wtedy modele empiryczne, takie jak szwajcarski model ECOM lub modele hybrydowe, łączące w sobie cechy obu tych grup.

Aby ocenić wpływ opisanych perturbacji, przetestowano różne rozwiązania bazujące na modelu ECOM i analitycznym modelu *box-wing*. Szczegółowa charakterystyka wraz z nazewnictwem poszczególnych rozwiązań została

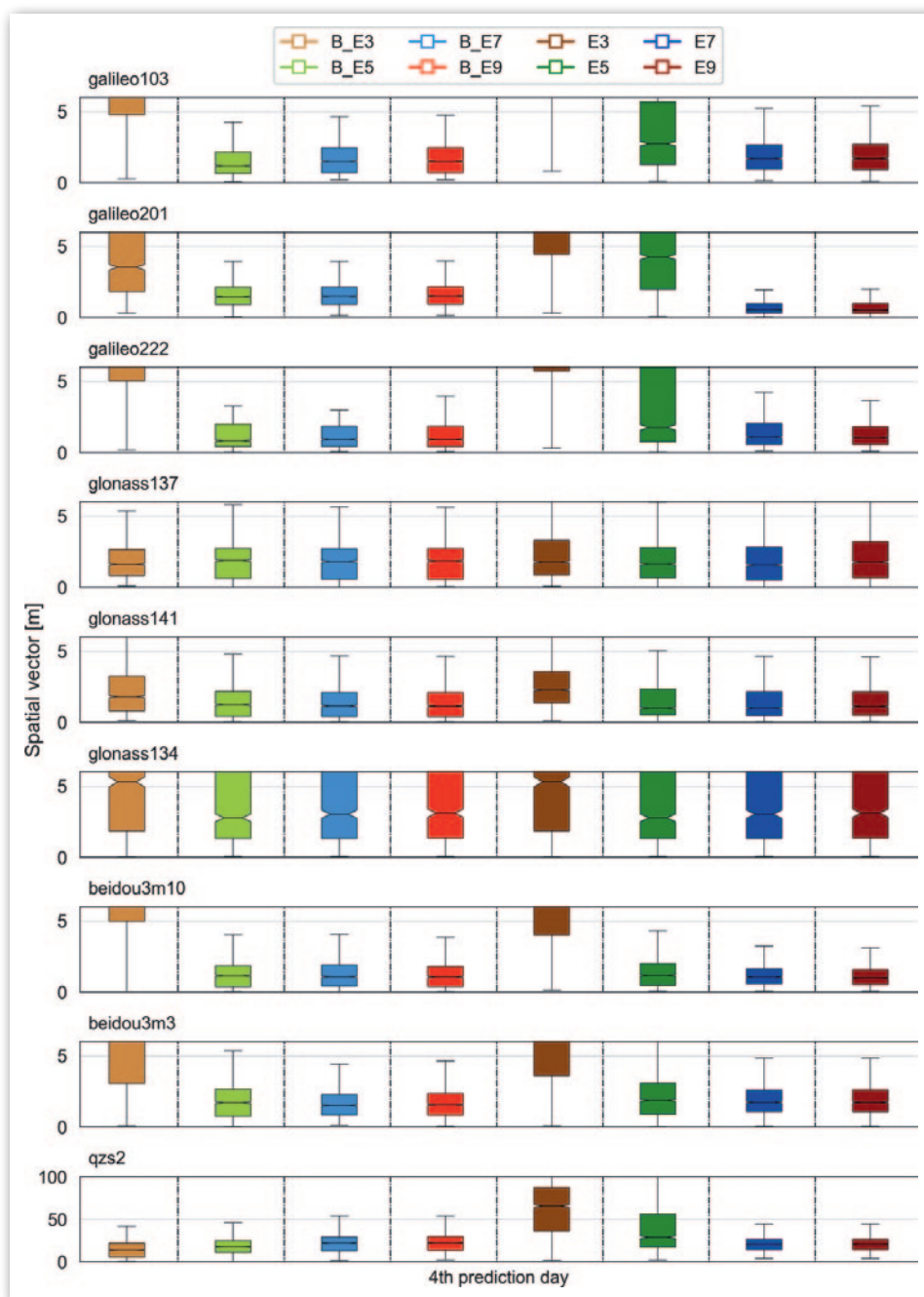
Rys. 6. Jakość predykcji orbity czterodniowej (błąd wektora przestrzennego w postaci wykresów pudełkowych) dla danej strategii przetwarzania

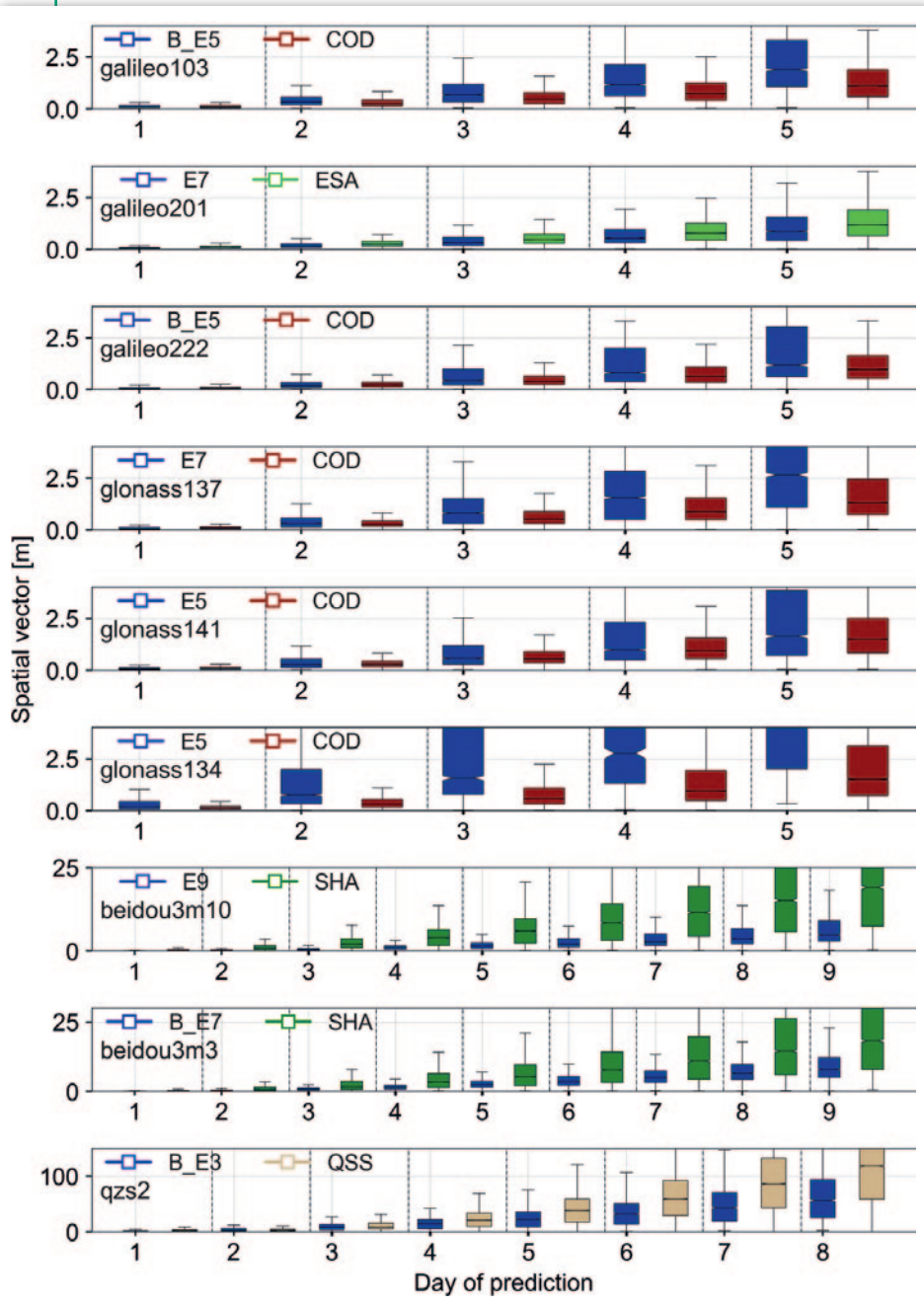
Tab. 3. Charakterystyka poszczególnych rozwiązań do modelowania sił działających na satelity

Rozwiązanie	Box-wing	Parametry modelu empirycznego (ECOM)
E3	Nie	DO, YO, BO
E5	Nie	DO, YO, BO, BS, BC
E7	Nie	DO, YO, BO, BS, BC, D2C, D2S
E9	Nie	DO, YO, BO, BS, BC, D2C, D2S, D4C, D4S
B_E3	Tak	DO, YO, BO
B_E5	Tak	DO, YO, BO, BS, BC
B_E7	Tak	DO, YO, BO, BS, BC, D2C, D2S
B_E9	Tak	DO, YO, BO, BS, BC, D2C, D2S, D4C, D4S

przedstawiona w tabeli 3. Wyniki analiz po zastosowaniu każdego z wymienionych tam rozwiązań pokazano na rysunku 6. Hybrydowa strategia łączenia obu specyficznych koncepcji modeli empirycznych i analitycznych korzystnie wpływa na jakość predykcji orbit dla

grup satelitów Galileo IOV, Galileo FOC, BeiDou CAST oraz QZSS. Dla pozostałych analizowanych grup, tj. Galileo na orbitach mimośrodowych, satelitów GLONASS oraz BeiDou SECM, optymalne okazały się strategie oparte wyłącznie na ECOM.





## • Wyniki badań

Na rysunku 7 przedstawiono porównanie uzyskanych rozwiązań z najlepszymi produktami centrów predykcyjnych dla wszystkich grup satelitów. Dla Galileo FOC ecc. (galileo201, orbita mimośrodowa), BeiDou SECM (beidou3m10), BeiDou CAST (beidou3m3) i QZSS (qzs2) mediana błędów pozycji w czwartym dniu predykcji została zmniejszona odpowiednio o 0,2 m, 3,3 m, 1,4 m i 6,7 m. Poprawa jakości predykcji uzyskana dla BeiDou i QZSS jest najbardziej znacząca. Dla satelity galileo201 poprawa jest nieznaczna, a uzyskane różnice bezwzględne mogą być kwestią różnych warunków początkowych generowania predykcji.

Najbardziej stabilne predykcje dla grup satelitów, odpowiednio: Galileo

IOV (galileo103), Galileo FOC (galileo222), BeiDou CAST (beidou3m3) i QZSS (qzs2), pochodzą z rozwiązań hybrydowych B\_E3, B\_E5 i B\_E7. Sugeruje to, że zastosowanie modelu *box-wing* miało pozytywny wpływ na jakość rozwiązania poprzez odpowiednie modelowanie SRP, szczególnie w okresach, gdy satelity wchodziły w cień Ziemi. W takiej sytuacji empiryczne modele orbit nie absorbują w pełni bezpośredniego i pośredniego SRP.

Ponadto można zauważyć, że im mniej parametrów empirycznych zostało dodatkowo wprowadzonych w rozwiązaniach hybrydowych dla tych grup satelitów, tym lepsze rozwiązanie otrzymujemy. Z drugiej strony wyniki analiz pokazały, że podejścia oparte wyłącz-

Rys. 7. Porównanie własnych predykcji z oficjalnymi predykcjami dostarczonymi przez różne centra analityczne. Wyniki pogorszenia jakości predykcji w czasie dla wektora przestrzennego przedstawione w postaci wykresów pudełkowych. Skala osi Y jest taka sama dla Galileo i GLONASS, a inna dla BeiDou i QZSS

nie na ECOM dla Galileo ecc., BeiDou SECM, GLONASS M, M+ i K dostarczyły optymalnych rozwiązań w analizowanym okresie. W większości przypadków były to rozwiązania E7 i E9. Niewielki efekt zastosowania modelu *box-wing* do satelitów GLONASS może wynikać z braku oficjalnych parametrów fizycznych i optycznych, a parametry wykorzystane do tworzenia tego modelu są tylko przybliżeniem.

Umożliwienie bezproblemowego śledzenia satelitów nawigacyjnych przez stacje SLR ma duże znaczenie dla środowiska geodezyjnego. Dlatego w badaniu zweryfikowano jakość i stabilność predykcji orbit poprzez testy różnych podejść do modelowania wpływu ciśnienia promieniowania słonecznego. Pozwoliły one na wyznaczenie optymalnej strategii przetwarzania dla predykcji orbit poszczególnych grup satelitów nawigacyjnych.

## • Plany na przyszłość

Otrzymane dokładności plików predykcyjnych wskazują, że stacje laserowe nie powinny mieć problemu z ich śledzeniem nawet po 5. dniu bez aktualizacji predykcji. Jednocześnie poprawa jakości predykcji ma na celu zwiększenie możliwości automatyzacji i szybkości pracy stacji laserowych, szczególnie mając na uwadze stale rosnącą liczbę satelitów wspieranych przez ILRS. Poprawa jakości predykcji satelitów nawigacyjnych jest również przydatna dla społeczności wymagającej precyzyjnych orbit satelitów nawigacyjnych w czasie rzeczywistym.

W rezultacie prowadzonych badań planowana jest budowa serwisu operacyjnego dostarczającego predykcje orbit dla satelitów nawigacyjnych i uwzględniającego odpowiednią strategię dla każdej grupy satelitów.

**Inż. Adrian Nowak, dr inż. Radosław Zajdel,**  
**prof. dr hab. inż. Krzysztof Sośnica**

Institut Geodezji i Geoinformatyki,  
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Niniejszy artykuł powstał częściowo na podstawie prezentacji Adriana Nowaka, która zajęła I miejsce w konkursie referatów XVI Ogólnopolskiej Konferencji Studentów Geodezji [GEODETA 6/2022 – red.]