



Wyznaczanie współrzędnych i prędkości stacji na podstawie obserwacji laserowych niskich satelitów

PAWEŁ LEJBA, STANISŁAW SCHILLAK

Centrum Badań Kosmicznych, Polska Akademia Nauk,
Obserwatorium Astrogeodynamiczne Borowiec, 62-035 Kórnik, ul. Drapalka 4

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki wyznaczania orbit trzech niskich satelitów *Ajisai*, *Starlette* i *Stella* na podstawie obserwacji laserowych 14 stacji SLR wykonanych w latach 2001-2005. Ponadto wyznaczono geocentryczne i topocentryczne współrzędne oraz prędkości w płaszczyźnie horyzontu i przestrzeni 3D czterech stacji Yarragadee (7090), Greenbelt (7105), Graz (7839) i Herstmonceux (7840). Otrzymane wyniki porównano z wynikami otrzymanymi dla satelitów *LAGEOS*, układu ITRF2005 oraz dla modelu geologicznego NNR-NUVEL1A. Wszystkie obliczenia przeprowadzono w oparciu o model pola grawitacyjnego Ziemi EIGEN-GRACE02S. Przedstawione rezultaty pokazują, że wyniki obserwacji laserowych niskich satelitów takich jak *Ajisai*, *Starlette*, *Stella* mogą być z powodzeniem wykorzystane do wyznaczania współrzędnych i prędkości stacji SLR.

Słowa kluczowe: geodezja satelitarna, geodynamika, satelitarny dalmierz laserowy (SLR), wyznaczanie orbit satelitów

Symbole UKD: 528

1. Wstęp

Niniejsza praca jest pierwszą publikacją tak obszernie poświęconą problemowi wyznaczania współrzędnych i prędkości stacji z obserwacji laserowych niskich satelitów. Pierwsze obiecujące wyniki przedstawiono w pracy autorów [7], dotyczyły one jednak tylko współrzędnych stacji wyznaczonych na podstawie rocznego materiału obserwacyjnego *Starlette* i *Stella*.

Podstawowym celem tej pracy była odpowiedź na pytanie, czy obserwacje laserowe niskich satelitów takich jak *Ajisai*, *Starlette*, *Stella* mogą być wykorzystane do wyznaczania współrzędnych stacji obserwacyjnych i ich prędkości, a celem

pośrednim było jak najdokładniejsze obliczenie orbit tych satelitów. Wyznaczenie współrzędnych stacji z obserwacji laserowych innych satelitów niż *LAGEOS* jest bardzo istotne, gdyż:

- 1) w istotny sposób zwiększa liczbę obserwacji wykorzystywanych do wyznaczenia współrzędnych stacji;
- 2) umożliwia weryfikację wyników uzyskanych z obserwacji satelitów *LAGEOS*;
- 3) umożliwia wyznaczenie współrzędnych stacji, które nie mogą obserwować satelitów *LAGEOS*.

Dotychczas współrzędne i prędkości stacji były wyznaczone tylko z orbit satelitów *LAGEOS* [11, 16, 18, 19, 22, 23]. Wyniki prezentowane w niniejszej pracy pokazują, że także niskie satelity laserowe pozwalają na wyznaczenie współrzędnych i prędkości stacji z dobrymi rezultatami. Wśród niskich satelitów, które są najbardziej odpowiednie dla realizacji tego celu, są bliźniacze *Starlette* i *Stella*, obiegające Ziemię po orbitach nachylonych względem siebie pod kątem ok. 50 stopni. Obserwacje laserowe tych satelitów są stosowane głównie do wyznaczenia współczynników pola grawitacyjnego Ziemi, badania pływów skorupy ziemskiej, pływów oceanicznych oraz do wyznaczenia parametrów ruchu obrotowego Ziemi [2, 3, 20]. Mały przekrój poprzeczny, duża masa, dobrze wyznaczona poprawka na centrum masy i duża liczba obserwacji wskazują na przydatność tych satelitów również do wyznaczenia współrzędnych i prędkości stacji obserwacyjnych. Podobieństwo ich parametrów technicznych i orbitalnych korzystnie wpływa na połączenie tych satelitów w obliczeniach. Zwiększa to ilość danych laserowych oraz dokładność wyznaczenia współrzędnych i prędkości stacji laserowych. Jednak stosunkowo niskie orbity tych satelitów (800-1000 km nad Ziemią) są wyznaczone na podstawie obserwacji laserowych z mniejszą dokładnością niż orbity satelitów *LAGEOS*. Także w przypadku *Ajisai* parametry orbitalne i techniczne pozwalają na wyznaczenie współrzędnych stacji i ich prędkości z obserwacji laserowych tego satelity. Dodatkowym atutem misji *Ajisai* w porównaniu ze *Starlette* i *Stella* jest wysokość satelity nad Ziemią (1500 km — nikły wpływ atmosfery) oraz bardzo duża ilość obserwacji i długie ciągi obserwacyjne. W pracy Sengoku [21] podjęto próbę wyznaczenia prędkości stacji laserowych z orbity *Ajisai* w oparciu o dane stacji laserowych z lat 1986-1994. Otrzymane rezultaty znacznie różnią się od wyników prezentowanych w niniejszej pracy. Różnice w wartościach prędkości stacji sięgają kilkunastu milimetrów na rok. Tak duże rozbieżności wyników są efektem znacznej poprawy wyników obserwacji laserowych z lat 2001-2005 w stosunku do lat 80. i 90. minionego stulecia, a także wyraźnego ulepszenia obecnie stosowanych modeli pola grawitacyjnego Ziemi. Prace prezentowane podczas Workshopu Laserowego w Grasse (25-28 września 2007) potwierdzają konieczność włączenia niskich satelitów do wyznaczenia współrzędnych stacji [12, 15]. Wszystkie obliczenia wykonano w oparciu o model pola grawitacyjnego Ziemi EIGEN-GRACE02S [17].

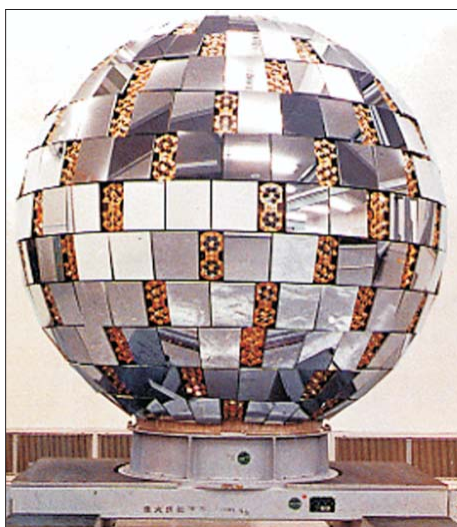
2. Opis satelitów *Ajisai*, *Starlette* i *Stella*

Satelity *Ajisai*, *Starlette* oraz *Stella* należą do grupy tzw. satelitów pasywnych. Wszystkie te obiekty są metalowymi kulami, charakteryzującymi się dużą masą i niewielką średnicą, poza *Ajisai*, którego średnica wynosi ponad 2 metry. Satelity te mogą być obserwowane techniką laserową (*Ajisai* dodatkowo fotometrycznie). Różnią się one parametrami technicznymi i orbitalnymi, ale wszystkie mają duże znaczenie dla badań geodynamicznych. O wyborze *Starlette* i *Stella* zadecydowały dwa czynniki. Przede wszystkim korzystny stosunek powierzchni przekroju poprzecznego satelity do jego masy, który minimalizuje wpływ efektów niegrawitacyjnych, ciśnienia światła słonecznego oraz ciśnienia promieniowania odbitego od powierzchni Ziemi, oraz duża ilość obserwacji i długie ciągi obserwacyjne. Podobnie w przypadku *Ajisai*. O wyborze tego satelity zadecydowały sferyczna konstrukcja oraz duża ilość obserwacji i długie ciągi obserwacyjne. W tabeli 1 zebrano podstawowe parametry techniczne oraz orbitalne *Ajisai*, *Starlette* i *Stella*. Na rysunku 1 przedstawiono *Ajisai*, a na rysunku 2 *Starlette/Stella*.

TABELA 1

Charakterystyka satelitów *Ajisai*, *Starlette* oraz *Stella*

| | AJISAI | STARLETTE | STELLA |
|--------------------------------|------------------|---------------|------------------|
| Sponsor | JAXA (Japan) | CNES (France) | CNES (France) |
| Data wyrzelenia | 12 sierpnia 1986 | 6 lutego 1975 | 26 września 1993 |
| Numer identyfikacyjny | 8606101 | 7501001 | 9306102 |
| PARAMETRY TECHNICZNE | | | |
| Liczba retroreflektorów | 1436 | 60 | 60 |
| Kształt | kula | kula | kula |
| Średnica [cm] | 214 | 24 | 24 |
| Poprawka na centrum masy [mm] | 1010 | 75 | 75 |
| Masa [kg] | 685 | 47,25 | 48 |
| PPPP [m ²] | 3,5968 | 0,0452 | 0,0452 |
| PPPP/Masa [m ² /kg] | 0,00525 | 0,00096 | 0,00094 |
| PARAMETRY ORBITALNE | | | |
| Nachylenie | 50,0° | 49,8° | 98,6° |
| Mimośród | 0,001 | 0,02 | 0,002 |
| Perigeum [km] | 1480 | 810 | 800 |
| Okres [min] | 116 | 104 | 101 |

Rys. 1. Satelita *Ajisai*Rys. 2. Satelita *Starlette (Stella)*

Ajisai należy do japońskiej agencji kosmicznej JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency* — dawniej NASDA). Został wystrzelony 12 sierpnia 1986 roku z Centrum Kosmicznego Tanegashima (TNSC). Głównym zadaniem *Ajisai* było wyznaczenie pozycji wysp archipelagu Wysp Japońskich, obszaru aktywnie sejsmicznego położonego na granicy czterech płyt tektonicznych: euroazjatyckiej, pacyficznej, północnoamerykańskiej i filipińskiej. Na swej powierzchni satelita ma 1436 odbłyśników laserowych i, co go odróżnia od typowych satelitarnych kul geodynamicznych, 318 zwierciadeł pozwalających obserwować tego satelitę także fotometrycznie. Laserowe obserwacje *Ajisai* są wykorzystywane do definiowania i wyznaczania ziemskiego układu odniesienia *ITRF* oraz jego zmian w czasie, a także do wyznaczania współczynników geopotencjału niskiego stopnia [1]. Ponadto, dzięki swoim parametrom technicznym i orbitalnym, satelita pozwala na wyznaczenie

współrzędnych tych stacji laserowych, które dysponują słabszymi dalmierzami laserowymi i nie mogą sięgnąć wysokich *LAGEOS-ów*. Dane laserowe *Ajisai* to także doskonały obiekt do badań ruchu satelity wokół własnej osi [5, 13].

Starlette i *Stella* są własnością francuskiej korporacji CNES (*Centre National d'Études Spatiales*). *Starlette* to pierwsza metalowa kula umieszczona na orbicie i obserwowana przez stacje laserowe. Wystrzelona została 6 lutego 1975 roku z Gujany Francuskiej za pomocą rakiety *Diamant-B-P4*. Konstrukcja *Starlette* to jądro w kształcie ikosaedru skonstruowanego ze stopu uranu 238 z 1,5% domieszką molibdenu. Masa samego jądra wynosi 35,5 kg. Zewnętrzna powierzchnia satelity została tak skonstruowana, by zawierała 20 sferycznych powłok o trójkątnej podstawie zamocowanych na ścianach ikosaedru. Wykorzystano przy tym stop aluminium z 5% domieszką magnezu. Zapewnia to optymalne odbicie dyfuzyjne oraz stabilność temperaturową. Każda z dwudziestu sferycznych powłok ma wmontowane po 3 pryzmaty sześciennie. Wykonane zostały one z materiału *suprasil 1* (stopiony trójścian krzemionkowy) i poddane procesowi metalizacji — ich powierzchnia została pokryta żaroodpornym i odpornym na korozję *inconelem* (jest to stop niklu (45-65%), chromu oraz żelaza). Średnica każdego z pryzmatów wynosi 32,9 mm, a jego wysokość (odległość pomiędzy zewnętrzną powierzchnią pryzmatu a jego wierzchołkiem) 23,3 mm. Ich zdolność odbijająca równa się 0,83.

Wierną kopią *Starlette* jest *Stella*, który umieszczono na orbicie 26 września 1993 roku. Satelita *Starlette* uczestniczył już w obszernym 16-letnim programie badawczym *CDP* (*Crustal Dynamics Project*) agencji NASA z dobrymi rezultatami [20]. Wyniki uzyskane podczas tego projektu pozwoliły na określenie parametrów ruchu bieguna, zaobserwowanie tymczasowych zmian w polu grawitacyjnym Ziemi oraz zbadanie ewolucji układu Ziemia-Księżyc.

3. Wyznaczanie orbit *Ajisai*, *Starlette* i *Stella*

Orbity satelitów *Ajisai*, *Starlette* i *Stella* zostały wyznaczone dla 5-letniego okresu, tj. od 1 stycznia 2001 do 25 grudnia 2005. Wszystkie obliczenia zostały wykonane programem orbitalnym *GEODYN-II* [9]. Szczegółowy opis modelu sił, modelu pomiarowego, użytych układów odniesienia oraz parametryzację programu *GEODYN-II* przedstawia tabela 2. Orbity wszystkich satelitów zostały policzone w oparciu o obserwacje czternastu stacji laserowych na świecie, które charakteryzowały się największą ilością i ciągłością obserwacji satelitów *Ajisai*, *Starlette* i *Stella*. Współrzędne stacji wyznaczone były w układzie *ITRF2005*.

W obliczeniach uwzględniono następujące stacje:

- grupa *EUROLAS*:
 - 7810 *Zimmerwald* (Szwajcaria),
 - 7811 *Borowiec* (Polska),

- 7835 Grasse (Francja),
- 7836 Potsdam (Niemcy),
- 7839 Graz (Austria),
- 7840 Herstmonceux (Anglia),
- 8834 Wettzell (Niemcy);
- grupa NASA:
 - 7080 McDonald (Teksas, USA),
 - 7105 Greenbelt (Maryland, USA),
 - 7110 Monument Peak (Kalifornia, USA),
 - 7210 Haleakala (Hawaje, USA);
- grupa WPLTN:
 - 7090 Yarragadee (Australia),
 - 7849 i 7825 Mount Stromlo (Australia).

TABELA 2

Model sił oraz parametry programu GEODYN-II

| Model sił |
|--|
| Pole grawitacyjne Ziemi: EIGEN-GRACE02S Pływy skorupy ziemskiej i oceanów: EGM96 Oddziaływanie grawitacyjne Słońca i Księżyca Efemeryda planetarna: DE200 Ciśnienie promieniowania słonecznego Albedo Ziemi Dynamiczny ruch bieguna Poprawki relatywistyczne |
| Stałe |
| Parametr grawitacyjny Ziemi (GM): $3,986004415 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$ Szybkość światła: 299 792,458 km/s Wielka półoś Ziemi: 6378,13630 km Odwrotność spłaszczenia Ziemi: 298,2570 |
| Układ odniesienia |
| Inercjalny system odniesienia: układ prawdziwej daty zgodny z epoką odniesienia 0 ^h .0 pierwszego dnia każdego łuku Współrzędne i prędkości stacji laserowych: ITRF2005 dla epoki 2000,0 Precesja: IAU 1976 Nutacja: IAU 1980 Ruch bieguna: C04 IERS Wypiętrzenie pływowe: Model Love'a z liczbami $H_2 = 0,609$, $L_2 = 0,0852$ Pływy bieguna |

cd. tabeli 2

| Wyznaczane parametry |
|---|
| Wektor położenia satelity Geocentryczne współrzędne stacji Współczynniki C_d oporu atmosfery Współczynniki przyspieszeń empirycznych wyznaczone w 3 kierunkach: wzdłuż orbity, prostopadle do orbity oraz wzdłuż promienia wodzącego w interwałach 6- i 12-godzinnych |
| Model pomiarowy |
| Obserwacje: 30-sekundowe okno punktu normalnego dla <i>Ajisai</i> , <i>Starlette</i> i <i>Stella</i> , dane pobrane z EUROLAS Data Center (Monachium) Długość fali impulsu laserowego: 532 nm (Zimmerwald 423 nm) Refrakcja troposferyczna: Model Marini&Murray Kryterium odrzucania residuów: <i>Ajisai</i> $5\sigma \approx \pm 11$ cm, <i>Starlette</i> i <i>Stella</i> $5\sigma \approx \pm 12$ cm, dodatkowo dla wszystkich satelitów: przelot niższy niż 10 stopni nad horyzontem |
| Całkowanie numeryczne |
| Całkowanie: metoda Cowella Krok całkowania: 110 sekund dla <i>Ajisai</i> , 90 sekund dla <i>Starlette</i> i <i>Stella</i> , Długość łuku orbity: 14 dni dla <i>Ajisai</i> , 10 dni dla <i>Starlette</i> i <i>Stella</i> |

3.1. Wyznaczanie orbity *Ajisai*

Orbita *Ajisai* została wyznaczona za okres od 1 stycznia 2001 roku do 25 grudnia 2005 roku. Czas ten został podzielony na 130 łuków orbitalnych, każdy o długości 14 dni. Liczba dodatkowych parametrów do wyznaczenia wynosiła 527, 504 współczynniki przyspieszeń empirycznych oraz 23 współczynniki C_D oporu atmosfery na każdy łuk orbity. Parametry programu GEODYN-II prezentuje tabela 3.

TABELA 3

Parametry programu orbitalnego GEODYN-II dla *Ajisai*

| Parametr | Wartość parametru |
|---------------------------------|-------------------|
| Długość łuku orbitalnego | 14 dni |
| Współcz. $C_{nm} \times S_{nm}$ | 45×45 |
| Współcz. C_D oporu atmosfery | 15 godzin |
| Współcz. przysp. empiryczn. | 6 godzin |
| Krok całkowania | 110 sekund |

Punkty normalne były odrzucane w oparciu o dwa kryteria:

- sigma orbitalnego RMS równe 5 ($5\sigma \approx \pm 11$ cm),
- przelot niższy niż 10 stopni nad horyzontem.

Spośród wszystkich satelitów badanych w niniejszej pracy *Ajisai* wyróżnia największa ilość przelotów oraz największa liczba punktów normalnych. W okresie od 1 stycznia 2001 do 25 grudnia 2005 stacje laserowe uwzględnione w obliczeniach zaobserwowały 38 553 przeloty *Ajisai*, dostarczając 472 259 punktów normalnych zaakceptowanych przez program do obliczeń. Średnio na jeden przelot tego satelity przypada 12 punktów normalnych, a na jeden łuk orbity przypadają 3633 punkty normalne. Z obliczeń usunięto 2335 punktów normalnych, co stanowi około 0,5% wszystkich danych. Najwięcej danych dostarczyła stacja Yarragadee — 106 514, a najmniej stacja Potsdam, tylko 6179 punktów normalnych w całym badanym okresie. Poza tym stacja Yarragadee jest jedyną stacją, której dane pojawiają się we wszystkich 130 liczonych łukach.

Wyniki wyznaczenia orbity *Ajisai* zebrano w tabeli 4. Średnia wartość orbitalnego RMS z wszystkich łuków wynosi 1,61 cm. Dla przypadku ze współczynnikami przyspieszeń empirycznych wyznaczanymi w 12-godzinnym interwale średnia wartość orbitalnego RMS z wszystkich łuków wynosi 1,98 cm.

TABELA 4

Punkty normalne i wartości RMS uzyskane dla wszystkich łuków za okres od 1 stycznia 2001 do 25 grudnia 2005 dla *Ajisai*

| Nr łuku | Liczba PN | RMS [cm] | Nr łuku | Liczba PN | RMS [cm] | Nr łuku | Liczba PN | RMS [cm] |
|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|------------|-----------|----------|
| 1 | 3063 | 1,16 | 45 | 3869 | 1,47 | 89 | 3728 | 1,51 |
| 2 | 2593 | 1,32 | 46 | 4002 | 1,53 | 90 | 2336 | 1,64 |
| 3 | 2885 | 1,57 | 47 | 3105 | 1,56 | 91 | 2388 | 1,37 |
| 4 | 3167 | 1,67 | 48 | 3443 | 1,45 | 92 | 2015 | 1,35 |
| 5 | 2503 | 2,12 | 49 | 3966 | 1,34 | 93 | 2686 | 1,71 |
| 6 | 3313 | 1,77 | 50 | 3723 | 1,80 | 94 | 4386 | 1,67 |
| 7 | 3752 | 1,59 | 51 | 3513 | 1,37 | 95 | 3307 | 1,63 |
| 8 | 2341 | 1,16 | 52 | 2658 | 1,57 | 96 | 3421 | 1,85 |
| 9 | 4070 | 1,49 | 53 | 3297 | 1,81 | 97 | 3156 | 1,52 |
| 10 | 4242 | 1,70 | 54 | 3535 | 1,65 | 98 | 1542 | 1,05 |
| 11 | 4835 | 1,93 | 55 | 3790 | 1,77 | 99 | 2932 | 1,44 |
| 12 | 4858 | 1,68 | 56 | 5325 | 2,16 | 100 | 2916 | 1,35 |
| 13 | 5633 | 1,56 | 57 | 4988 | 1,84 | 101 | 2268 | 1,59 |
| 14 | 3931 | 1,24 | 58 | 5615 | 1,82 | 102 | 3436 | 1,84 |

cd. tabeli 4

| | | | | | | | | |
|----|------|------|----|------|------|-----|------|------|
| 15 | 4222 | 1,69 | 59 | 4667 | 1,80 | 103 | 3025 | 1,66 |
| 16 | 4651 | 1,26 | 60 | 2763 | 2,28 | 104 | 2855 | 1,52 |
| 17 | 5391 | 1,45 | 61 | 3553 | 1,57 | 105 | 2356 | 1,69 |
| 18 | 3841 | 1,51 | 62 | 2912 | 1,69 | 106 | 4171 | 1,64 |
| 19 | 5012 | 1,80 | 63 | 4267 | 1,64 | 107 | 4446 | 1,76 |
| 20 | 4601 | 1,38 | 64 | 4324 | 1,92 | 108 | 3418 | 1,61 |
| 21 | 4065 | 1,34 | 65 | 4606 | 1,68 | 109 | 2775 | 1,69 |
| 22 | 3846 | 1,45 | 66 | 3340 | 1,96 | 110 | 2329 | 1,41 |
| 23 | 3908 | 1,45 | 67 | 4266 | 1,69 | 111 | 3054 | 1,34 |
| 24 | 3146 | 1,24 | 68 | 4594 | 1,77 | 112 | 3742 | 1,56 |
| 25 | 4246 | 1,43 | 69 | 4399 | 1,70 | 113 | 4135 | 1,91 |
| 26 | 3378 | 1,20 | 70 | 3505 | 1,82 | 114 | 3948 | 1,49 |
| 27 | 4540 | 1,72 | 71 | 4091 | 1,85 | 115 | 3993 | 1,75 |
| 28 | 3275 | 1,36 | 72 | 4266 | 1,85 | 116 | 3582 | 1,94 |
| 29 | 4482 | 1,63 | 73 | 3280 | 1,93 | 117 | 3911 | 1,50 |
| 30 | 4994 | 1,67 | 74 | 3481 | 1,81 | 118 | 3665 | 1,50 |
| 31 | 5651 | 1,74 | 75 | 3524 | 1,53 | 119 | 4076 | 1,76 |
| 32 | 4316 | 1,45 | 76 | 3248 | 1,32 | 120 | 4302 | 1,62 |
| 33 | 4877 | 1,69 | 77 | 3143 | 1,32 | 121 | 3757 | 1,78 |
| 34 | 3089 | 1,70 | 78 | 3178 | 1,62 | 122 | 3994 | 1,72 |
| 35 | 3539 | 1,39 | 79 | 2507 | 1,88 | 123 | 3863 | 1,64 |
| 36 | 4163 | 1,60 | 80 | 3537 | 2,02 | 124 | 2755 | 1,60 |
| 37 | 4506 | 1,75 | 81 | 2916 | 1,45 | 125 | 3873 | 1,87 |
| 38 | 3826 | 1,57 | 82 | 2298 | 1,35 | 126 | 3434 | 1,64 |
| 39 | 4472 | 1,72 | 83 | 2229 | 1,28 | 127 | 3446 | 1,64 |
| 40 | 2856 | 1,86 | 84 | 2979 | 1,53 | 128 | 2929 | 1,75 |
| 41 | 3014 | 1,47 | 85 | 3082 | 1,51 | 129 | 2670 | 2,03 |
| 42 | 3704 | 1,45 | 86 | 2375 | 1,51 | 130 | 2829 | 1,40 |
| 43 | 5040 | 1,42 | 87 | 3636 | 1,84 | | | |
| 44 | 3778 | 1,74 | 88 | 3002 | 1,43 | | | |

3.2. Wyznaczanie orbit *Starlette* i *Stella*

Satelity *Starlette* i *Stella* to bliźniacze satelity okrążające Ziemię na niemal prostopadłych względem siebie orbitach. Podobieństwo ich parametrów technicznych i orbitalnych korzystnie wpływa na połączenie satelitów w obliczeniach. Zwiększa to ilość danych laserowych oraz poprawia dokładność wyznaczania ich orbit oraz dokładność wyznaczania współrzędnych stacji laserowych.

Orbity *Starlette/Stella* zostały wyznaczone za okres od 1 stycznia 2001 roku do 25 grudnia 2005 roku. Okres ten został podzielony na 182 łuki orbitalne, każdy o długości 10 dni. Liczba dodatkowych parametrów do wyznaczenia wynosiła 760, 720 współczynników przyspieszeń empirycznych (360 dla *Starlette* i 360 dla *Stella*) oraz 40 współczynników C_D oporu atmosfery (20 dla *Starlette* i 20 dla *Stella*) na każdy łuk orbity. Parametry programu GEODYN-II dla tych satelitów prezentuje tabela 5.

TABELA 5
Parametry programu orbitalnego GEODYN-II dla *Starlette* oraz *Stella*

| Parametr | Wartość parametru |
|---------------------------------|-------------------|
| Długość łuku orbitalnego | 10 dni |
| Współcz. $C_{nm} \times S_{nm}$ | 75×75 |
| Współcz. C_D oporu atmosfery | 12 godzin |
| Współcz. przysp. empiryczn. | 6 godzin |
| Krok całkowania | 90 sekund |

O odrzuceniu punktów normalnych przez program orbitalny decydowały tak samo jak w przypadku *Ajisai* dwa kryteria:

- sigma orbitalnego RMS równe 5 ($5\sigma \approx \pm 12$ cm),
- przelot niższy niż 10 stopni nad horyzontem.

Stacje laserowe uwzględnione w obliczeniach zaobserwowały 28 697 przelotów *Starlette* oraz 16 695 przelotów *Stella* w badanym okresie, dostarczając 265 282 punktów normalnych dla *Starlette* i 133 094 punktów normalnych dla *Stella* zaakceptowanych przez program do obliczeń. Średnio na jeden przelot *Starlette* przypada 9 punktów normalnych, a na jeden przelot *Stella* 8 punktów normalnych. Na jeden 10-dniowy łuk orbitalny *Starlette/Stella* przypada 2201 punktów normalnych. Z wszystkich liczonych łuków *Starlette/Stella* usunięto 3729 punktów normalnych, co stanowi około 1% wszystkich danych.

Wyniki wyznaczenia orbit *Starlette/Stella* przedstawia tabela 6. Średnia wartość orbitalnego RMS z wszystkich łuków wynosi 1,15 cm. Natomiast dla rozwiązania

ze współczynnikami przyspieszeń empirycznych wyznaczanymi co 12 godzin średnia wartość orbitalnego RMS z wszystkich łuków wynosi 1,63 cm.

TABELA 6

Punkty normalne i wartości RMS uzyskane dla wszystkich łuków za okres od 1 stycznia 2001 do 25 grudnia 2005 dla *Starlette* i *Stella*

| Nr łuku | Liczba PN | RMS [cm] | Nr łuku | Liczba PN | RMS [cm] | Nr łuku | Liczba PN | RMS [cm] | Nr łuku | Liczba PN | RMS [cm] |
|---------|-----------|----------|---------|-----------|----------|---------|-----------|----------|---------|-----------|----------|
| 1 | 1832 | 1,08 | 47 | 2056 | 1,12 | 93 | 2670 | 1,37 | 139 | 1518 | 1,23 |
| 2 | 1622 | 1,08 | 48 | 2059 | 1,24 | 94 | 1778 | 0,81 | 140 | 2105 | 1,01 |
| 3 | 1357 | 1,13 | 49 | 1842 | 1,33 | 95 | 2704 | 1,13 | 141 | 1432 | 1,10 |
| 4 | 1737 | 1,01 | 50 | 1825 | 1,19 | 96 | 2784 | 1,21 | 142 | 2343 | 1,21 |
| 5 | 1979 | 0,98 | 51 | 2674 | 1,09 | 97 | 3001 | 1,14 | 143 | 2055 | 1,27 |
| 6 | 1996 | 1,15 | 52 | 2626 | 1,17 | 98 | 1951 | 0,90 | 144 | 1453 | 0,90 |
| 7 | 1287 | 1,08 | 53 | 2687 | 1,02 | 99 | 2698 | 1,01 | 145 | 2098 | 1,22 |
| 8 | 2136 | 1,02 | 54 | 3174 | 1,20 | 100 | 2463 | 1,29 | 146 | 1599 | 0,93 |
| 9 | 2344 | 1,28 | 55 | 2575 | 1,16 | 101 | 2164 | 0,93 | 147 | 1828 | 1,00 |
| 10 | 2258 | 1,34 | 56 | 1991 | 1,23 | 102 | 2000 | 1,51 | 148 | 3645 | 1,28 |
| 11 | 1799 | 1,01 | 57 | 1971 | 0,97 | 103 | 2260 | 1,06 | 149 | 2155 | 1,04 |
| 12 | 2262 | 1,18 | 58 | 2056 | 1,09 | 104 | 2255 | 1,18 | 150 | 2935 | 1,29 |
| 13 | 2071 | 1,70 | 59 | 2067 | 0,91 | 105 | 1827 | 1,09 | 151 | 1317 | 0,97 |
| 14 | 2508 | 1,08 | 60 | 3049 | 1,21 | 106 | 2295 | 1,31 | 152 | 1241 | 1,00 |
| 15 | 2720 | 1,17 | 61 | 2237 | 1,19 | 107 | 1453 | 0,84 | 153 | 1598 | 1,06 |
| 16 | 2630 | 0,99 | 62 | 2477 | 1,41 | 108 | 2883 | 1,12 | 154 | 1549 | 1,01 |
| 17 | 2846 | 1,04 | 63 | 2353 | 0,95 | 109 | 1873 | 1,27 | 155 | 1790 | 1,04 |
| 18 | 3504 | 1,20 | 64 | 2473 | 1,12 | 110 | 912 | 1,14 | 156 | 2377 | 1,25 |
| 19 | 1737 | 0,99 | 65 | 2087 | 1,32 | 111 | 2468 | 1,16 | 157 | 2058 | 1,06 |
| 20 | 2485 | 1,16 | 66 | 2076 | 1,16 | 112 | 2480 | 1,13 | 158 | 1743 | 1,16 |
| 21 | 2382 | 1,37 | 67 | 2270 | 1,18 | 113 | 1991 | 1,08 | 159 | 1861 | 1,54 |
| 22 | 2655 | 1,20 | 68 | 2679 | 1,68 | 114 | 1439 | 0,84 | 160 | 2045 | 1,04 |
| 23 | 2427 | 1,12 | 69 | 2766 | 1,23 | 115 | 1372 | 1,05 | 161 | 3199 | 1,26 |
| 24 | 2535 | 1,19 | 70 | 1882 | 1,16 | 116 | 1378 | 0,77 | 162 | 2449 | 1,07 |
| 25 | 1636 | 1,03 | 71 | 2020 | 1,11 | 117 | 1629 | 1,09 | 163 | 2451 | 0,95 |
| 26 | 2282 | 1,17 | 72 | 1746 | 0,95 | 118 | 2042 | 1,01 | 164 | 2675 | 1,21 |
| 27 | 2205 | 1,26 | 73 | 1136 | 1,04 | 119 | 1929 | 0,99 | 165 | 1754 | 0,89 |
| 28 | 2124 | 1,53 | 74 | 1925 | 1,00 | 120 | 1564 | 0,96 | 166 | 2807 | 1,13 |

cd. tabeli 6

| | | | | | | | | | | | |
|----|------|------|----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|
| 29 | 2527 | 1,38 | 75 | 3428 | 1,36 | 121 | 1495 | 1,09 | 167 | 2146 | 1,31 |
| 30 | 1862 | 1,62 | 76 | 2865 | 1,08 | 122 | 1758 | 1,20 | 168 | 2590 | 0,96 |
| 31 | 2396 | 1,81 | 77 | 3024 | 1,12 | 123 | 1481 | 1,44 | 169 | 2947 | 1,21 |
| 32 | 2323 | 1,39 | 78 | 2298 | 1,47 | 124 | 1872 | 1,18 | 170 | 2183 | 1,16 |
| 33 | 2183 | 1,33 | 79 | 3297 | 1,06 | 125 | 1645 | 0,98 | 171 | 3026 | 1,24 |
| 34 | 1835 | 1,14 | 80 | 2072 | 0,98 | 126 | 1698 | 0,98 | 172 | 2533 | 1,43 |
| 35 | 1886 | 1,10 | 81 | 3428 | 1,23 | 127 | 1719 | 0,82 | 173 | 2007 | 1,04 |
| 36 | 2130 | 1,13 | 82 | 3423 | 1,26 | 128 | 1839 | 0,86 | 174 | 1774 | 1,06 |
| 37 | BRAK | BRAK | 83 | 2574 | 1,15 | 129 | 1015 | 0,99 | 175 | 3163 | 1,27 |
| 38 | 2940 | 1,20 | 84 | 2019 | 1,61 | 130 | 1726 | 1,21 | 176 | 2548 | 1,07 |
| 39 | 2302 | 1,28 | 85 | 1971 | 0,82 | 131 | 2126 | 1,33 | 177 | 2849 | 1,20 |
| 40 | 2973 | 1,78 | 86 | 2095 | 1,03 | 132 | 2362 | 0,98 | 178 | 2599 | 1,34 |
| 41 | 3019 | 1,46 | 87 | 1337 | 1,04 | 133 | 1768 | 1,10 | 179 | 2035 | 1,00 |
| 42 | 2949 | 1,26 | 88 | 2009 | 1,02 | 134 | 2292 | 1,26 | 180 | 1696 | 1,25 |
| 43 | 2515 | 1,39 | 89 | 2687 | 1,17 | 135 | 2740 | 0,95 | 181 | 2091 | 1,30 |
| 44 | 2820 | 1,28 | 90 | 2846 | 1,02 | 136 | 1753 | 1,24 | 182 | 1577 | 0,78 |
| 45 | 2095 | 1,30 | 91 | 2727 | 0,92 | 137 | 953 | 1,34 | | | |
| 46 | 3577 | 1,24 | 92 | 1644 | 1,00 | 138 | 1816 | 1,04 | | | |

3.3. Porównanie z satelitami LAGEOS

Wyniki wyznaczeń orbit *Ajisai* i *Starlette/Stella* prezentowane w niniejszej pracy porównano z wynikami wyznaczeń orbit satelitów *LAGEOS-1* i *LAGEOS-2* prezentowanych w pracach Kuźmich-Cieślak [6], Schillak [19] oraz Schillak [18]. Podobnie jak satelity *Starlette* i *Stella*, satelity *LAGEOS* łączy się w obliczeniach. *LAGEOS-y* to bliźniacze laserowe kule o średnicy 60 cm z 426 odbłyśnikami laserowymi na powierzchni, okrążające Ziemię na wysokości około 6000 km. Istotnym parametrem, który je różni, jest jak w przypadku satelitów *Starlette* i *Stella* nachylenie orbity. Dla *LAGEOS-1* wynosi ono 109,8°, a dla *LAGEOS-2* 52,6°. W tabeli 7 przedstawiono wyniki wyznaczeń orbit *Ajisai*, *Starlette/Stella* oraz *LAGEOS*. W przypadku *Ajisai* oraz *Starlette/Stella* podano dwie wartości średniego orbitalnego RMS policzonego dla przypadku ze współczynnikami przyspieszeń empirycznych wyznaczanymi co 6 i 12 godzin.

TABELA 7

Porównanie wyników wyznaczeń orbit *Ajisai*, *Starlette*, *Stella* oraz *LAGEOS*

| | LAGEOS [KC 2003] | LAGEOS [S 2003] | LAGEOS [S 2008] | STARLETTE/ STELLA | AJISAI |
|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Długość łuku orbity | 1 miesiąc | 1 miesiąc | 1 miesiąc | 10 dni | 14 dni |
| Dane | 1 rok 1999 | 3 lata 1999-2001 | 5 lat 1999-2003 | 5 lat 2001-2005 | 5 lat 2001-2005 |
| Układ odniesienia | ITRF1997 | ITRF2000 | ITRF2005 | ITRF2005 | ITRF2005 |
| Średnia ilość PN | 9236 | 9218 | 7847 | 2201 | 3633 |
| RMS | 1,84 cm | 1,70 cm | 1,47 cm | 1,15 cm (A6H) 1,63 cm (A12H) | 1,61 cm (A6H) 1,98 cm (A12H) |
| ACCEL | 5 dni | 5 dni | 5 dni | 6 godzin 12 godzin | 6 godzin 12 godzin |
| DRAG | brak | brak | brak | 12 godzin | 15 godzin |

4. Wyznaczanie współrzędnych i prędkości stacji

Kolejnym zadaniem było wyznaczenie współrzędnych i prędkości kilku stacji laserowych z orbity *Ajisai* oraz z orbit *Starlette/Stella*. Warunkiem koniecznym do wyznaczania współrzędnych i prędkości stacji jest wystarczająco duża liczba punktów normalnych danej stacji przypadająca na jeden łuk orbity (nie mniejsza niż 50) i jak najdokładniejsze (w sensie wartości orbitalnego RMS) wyznaczenie orbit satelitów. W przypadku satelitów *Starlette/Stella* współrzędne stacji wyznaczono z równań normalnych dla obu satelitów łącznie. Połączenie obserwacji satelitów powoduje, że w obliczeniach jest uwzględniany więcej punktów normalnych, co zwiększa dokładność wyznaczanych współrzędnych stacji. W przypadku wyznaczania prędkości stacji istotna jest także ciągłość obserwacji danej stacji, ponieważ przy wyznaczaniu prędkości istnieje konieczność uwzględnienia kilkuletniego okresu obserwacyjnego, najlepiej nie krótszego niż 5 lat. W tym punkcie przedstawiono wyniki wyznaczenia współrzędnych i prędkości czterech stacji laserowych w układzie ITRF2005 dla 5-letniego okresu. Stacje te charakteryzują się największą ciągłością i ilością obserwacji oraz najlepszą jakością. Są to:

- Yarragadee (70900513),
- Greenbelt (71050725),
- Graz (78393402),
- Herstmonceux (78403501).

Dla każdej z wyżej wymienionych stacji z orbit satelitów *Ajisai*, *Starlette/Stella* wyznaczono współrzędne i prędkości w dwóch wariantach: 1) przyspieszenia

empiryczne wyznaczone co 6 godzin, 2) przyspieszenia empiryczne wyznaczone co 12 godzin. Dwa warianty wyznaczania współczynników przyspieszeń empirycznych miały dać odpowiedź na pytanie: jak liczba współczynników przyspieszeń empirycznych (dodatkowych parametrów do wyznaczenia) wpływa na jakość wyznaczanych współrzędnych i prędkości stacji?

Dla każdej z badanych stacji określono różnice między współrzędnymi geocentrycznymi stacji wyznaczonymi z orbit *Ajisai* oraz *Starlette/Stella* a współrzędnymi stacji w układzie ITRF2005, stabilność poszczególnych składowych współrzędnych i stabilność całkowitą oraz prędkości stacji. Wyniki wyznaczania prędkości stacji porównano z wynikami wyznaczania prędkości tych samych stacji otrzymanych dla modelu geologicznego NNR-NUVEL1A.

4.1. Wyznaczanie współrzędnych stacji

Współrzędne stacji Yarragadee, Greenbelt, Graz oraz Herstmonceux wyznaczono za okres od 1 stycznia 2001 do 25 grudnia 2005, zarówno dla *Ajisai*, jak i *Starlette/Stella* na epokę 2000 w oparciu o wyniki wyznaczania orbit ww. satelitów przedstawione w punkcie 3. Przy wyznaczaniu współrzędnych stacji brano pod uwagę następujące kryterium:

Kryterium o liczbie punktów normalnych stacji — liczba punktów normalnych stacji, dla której wyznaczone są współrzędne, przypadająca na jeden łuk orbity nie może być mniejsza niż 50.

Poprzednie kryterium warunkuje poprawne i dokładne wyznaczenie współrzędnych stacji laserowych. Im większa ilość punktów normalnych, tym mniejsza wartość odchylenia standardowego wyznaczanych współrzędnych, przy czym ilość ta nie powinna być mniejsza niż 50 [8].

Tabele 8 oraz 9 zawierają wartości stabilności współrzędnych stacji wyznaczone dla trzech składowych X , Y , Z oraz wartości całkowitej stabilności współrzędnych stacji, odpowiednio dla *Ajisai* oraz *Starlette/Stella*. Stabilność składowej X dla każdej stacji została policzona według następującej formuły:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (1)$$

gdzie $i = 1, 2, \dots$ oznacza kolejny łuk, a \bar{x} wartość średnią obliczoną dla wszystkich łuków w okresie pięciu lat. W podobny sposób zostały policzone stabilności dla składowych Y oraz Z . Całkowitą stabilność stacji obliczono według wzoru:

$$S_c = \sqrt{\frac{S_x^2 + S_y^2 + S_z^2}{3}}. \quad (2)$$

TABELA 8

Wartości wyznaczonych stabilności współrzędnych stacji z orbity *Ajisai*

| | AJISAI | | | | | | | |
|--------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | ACCEL 6H | | | | ACCEL 12H | | | |
| | S_X [mm] | S_Y [mm] | S_Z [mm] | S_C [mm] | S_X [mm] | S_Y [mm] | S_Z [mm] | S_C [mm] |
| Yarragadee 70900513 | 15,6 | 12,7 | 12,6 | 13,8 | 13,7 | 11,3 | 14,3 | 13,2 |
| Greenbelt 71050725 | 14,2 | 13,9 | 13,3 | 13,8 | 15,8 | 15,2 | 15,8 | 15,6 |
| Graz 78393402 | 10,3 | 8,0 | 12,0 | 10,2 | 11,0 | 8,9 | 14,9 | 11,9 |
| Herstmonceux 78403501 | 13,7 | 7,5 | 17,7 | 13,6 | 13,4 | 8,8 | 17,6 | 13,7 |

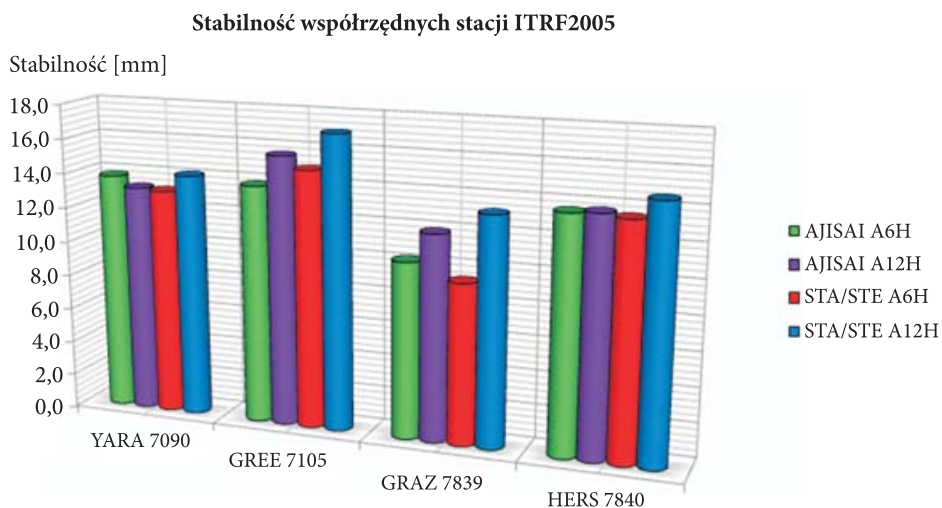
TABELA 9

Wartości wyznaczonych stabilności współrzędnych stacji z orbit *Starlette/Stella*

| | STARLETTE/STELLA | | | | | | | |
|--------------------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | ACCEL 6H | | | | ACCEL 12H | | | |
| | S_X [mm] | S_Y [mm] | S_Z [mm] | S_C [mm] | S_X [mm] | S_Y [mm] | S_Z [mm] | S_C [mm] |
| Yarragadee 70900513 | 14,8 | 11,9 | 12,3 | 13,1 | 15,0 | 12,8 | 14,3 | 14,1 |
| Greenbelt 71050725 | 15,2 | 13,8 | 15,8 | 14,9 | 17,7 | 16,7 | 17,7 | 17,0 |
| Graz 78393402 | 9,0 | 8,6 | 10,3 | 9,3 | 15,9 | 9,1 | 13,8 | 13,2 |
| Herstmonceux 78403501 | 10,5 | 13,9 | 15,5 | 13,5 | 12,9 | 12,5 | 17,7 | 14,6 |

Rysunek 3 przedstawia graficzne porównanie wyznaczonych stabilności.

Dla *Ajisai* stabilności poszczególnych składowych współrzędnych X, Y, Z wahają się od 7,5 do 17,7 mm, a całkowite stabilności współrzędnych stacji wahają się od 10,2 do 15,6 mm. Natomiast w przypadku *Starlette/Stella* stabilności poszczególnych składowych współrzędnych X, Y, Z wahają się od 8,6 do 17,7 mm, a całkowite stabilności współrzędnych stacji wahają się od 9,3 do 17,0 mm. Wartości stabilności współrzędnych stacji zależą od liczby współczynników przyspieszeń



Rys. 3. Porównanie wartości całkowitych stabilności wyznaczanych współrzędnych stacji z orbit *Ajisai* oraz *Starlette/Stella* liczonych ze współczynnikami przyspieszeń empirycznych wyznaczonymi co 6 i 12 godzin

empirycznych. Dwukrotny wzrost liczby dodatkowych parametrów do wyznaczenia przekłada się na kilkumilimetrowy wzrost stabilności współrzędnych wszystkich stacji. Przedstawiono także różnice między współrzędnymi geocentrycznymi stacji wyznaczonymi z orbit *Ajisai* oraz *Starlette/Stella* a tymi samymi współrzędnymi układu ITRF2005. Różnice te prezentują tabele 10 (*Ajisai*) oraz 12 (*Starlette/Stella*). Wyznaczono również wartości błędów policzonych różnic, które prezentują tabele 11 (*Ajisai*) oraz 13 (*Starlette/Stella*). Wielkości ΔX , ΔY , ΔZ oznaczają średnie różnice między wyznaczonymi współrzędnymi a współrzędnymi układu ITRF2005. Wielkości dX , dY , dZ oznaczają odchylenia standardowe wyznaczonych współrzędnych, natomiast dC to średni błąd kwadratowy wyznaczonych współrzędnych liczony według następującej formuły:

$$dC = \sqrt{\frac{dX^2 + dY^2 + dZ^2}{3}}. \quad (3)$$

Jak pokazują wyniki zebrane w tabelach 10-13, znacznie większe różnice wyznaczanych współrzędnych i współrzędnych układu ITRF2005 otrzymano z wyników obserwacji *Ajisai*. Dla każdej stacji (bez względu na zastosowany wariant współczynników przyspieszeń empirycznych) średni błąd kwadratowy wyznaczanych współrzędnych stacji jest większy w przypadku *Ajisai*. Współrzędne stacji wyznaczone na podstawie obserwacji *Starlette/Stella* wykazują większą zgodność ze współrzędnymi układu ITRF2005. Średni błąd kwadratowy wyznaczanych współrzędnych waha się w granicach od 9,3 do 17,1 mm w zależności od przyjętego

TABELA 10

Różnica między współrzędnymi geocentrycznymi stacji wyznaczonymi z orbity *Ajisai* a współrzędnymi układu ITRF2005

| | AJISAI | | | | | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | ACCEL 6H | | | ACCEL 12H | | |
| | ΔX [mm] | ΔY [mm] | ΔZ [mm] | ΔX [mm] | ΔY [mm] | ΔZ [mm] |
| Yarragadee 70900513 | 29,6 | -66,6 | 44,7 | 27,4 | -54,8 | 49,4 |
| Greenbelt 71050725 | -14,5 | 51,9 | -16,0 | -11,8 | 45,3 | -17,2 |
| Graz 78393402 | -8,1 | -2,3 | 12,4 | -11,2 | -0,9 | 11,7 |
| Herstmonceux 78403501 | -45,8 | 10,7 | -21,2 | -46,8 | 9,2 | -21,8 |

TABELA 11

Błąd wyznaczenia różnicy między współrzędnymi geocentrycznymi stacji wyznaczonymi z orbity *Ajisai*, a współrzędnymi układu ITRF2005

| | AJISAI | | | | | | | |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | ACCEL 6H | | | | ACCEL 12H | | | |
| | dX [mm] | dY [mm] | dZ [mm] | dC [mm] | dX [mm] | dY [mm] | dZ [mm] | dC [mm] |
| Yarragadee 70900513 | 19,7 | 15,9 | 18,9 | 18,2 | 17,6 | 13,6 | 19,8 | 17,2 |
| Greenbelt 71050725 | 19,5 | 19,6 | 17,9 | 19,0 | 20,4 | 18,5 | 21,3 | 20,1 |
| Graz 78393402 | 15,2 | 11,0 | 17,1 | 14,7 | 14,5 | 11,5 | 19,5 | 15,5 |
| Herstmonceux 78403501 | 21,0 | 9,7 | 23,8 | 19,2 | 18,6 | 10,2 | 22,0 | 17,6 |

TABELA 12

Różnica między współrzędnymi geocentrycznymi stacji wyznaczonymi z orbit *Starlette/Stella* a współrzędnymi układu ITRF2005

| | STARLETTE/STELLA | | | | | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | ACCEL 6H | | | ACCEL 12H | | |
| | ΔX [mm] | ΔY [mm] | ΔZ [mm] | ΔX [mm] | ΔY [mm] | ΔZ [mm] |
| Yarragadee 70900513 | -9,7 | 0,8 | -4,4 | -8,0 | 0,2 | -6,3 |
| Greenbelt 71050725 | -1,5 | -2,3 | 3,2 | -0,2 | -4,6 | 0,8 |
| Graz 78393402 | 7,4 | 1,2 | 4,6 | 7,4 | 0,9 | 4,3 |
| Herstmonceux 78403501 | 1,8 | -4,0 | 1,3 | 1,7 | -0,8 | 3,7 |

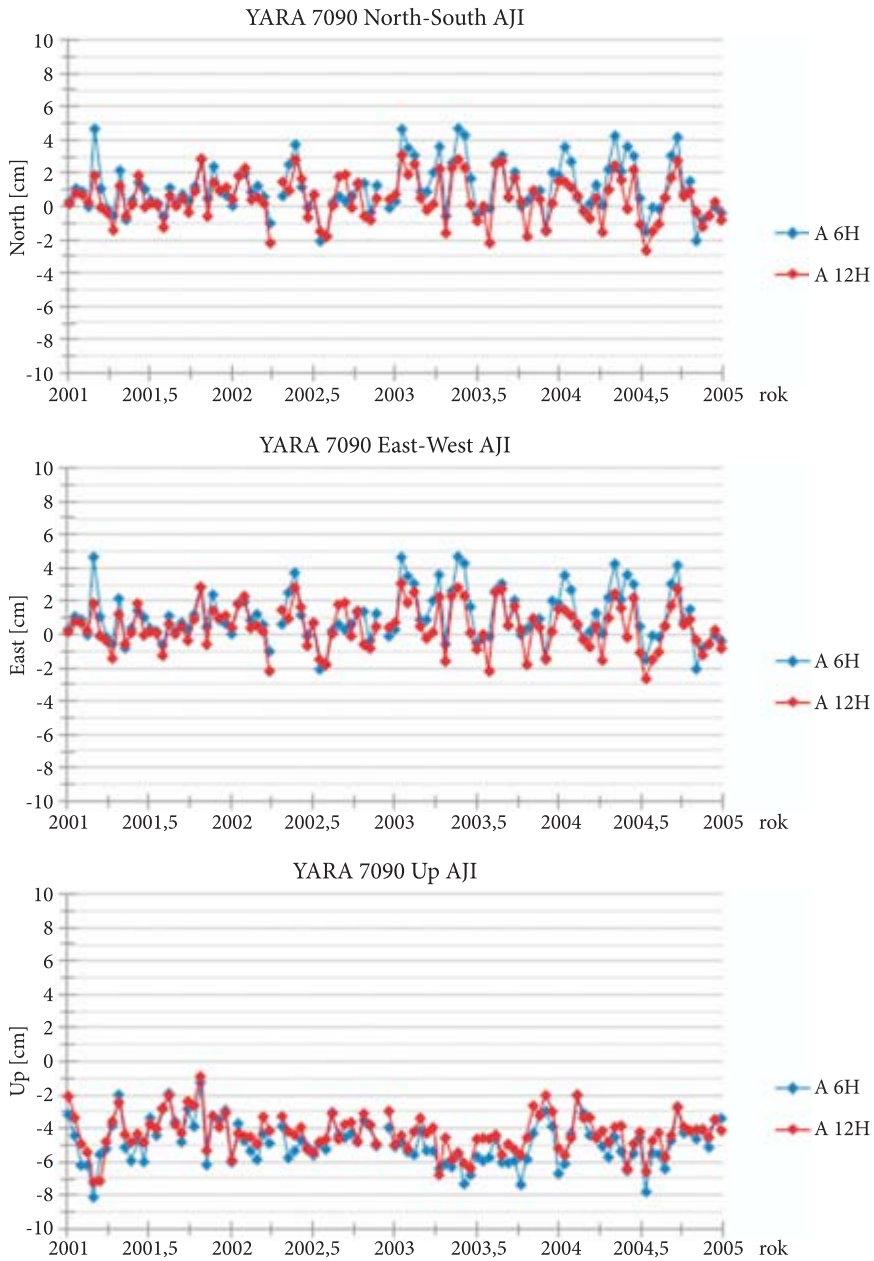
TABELA 13

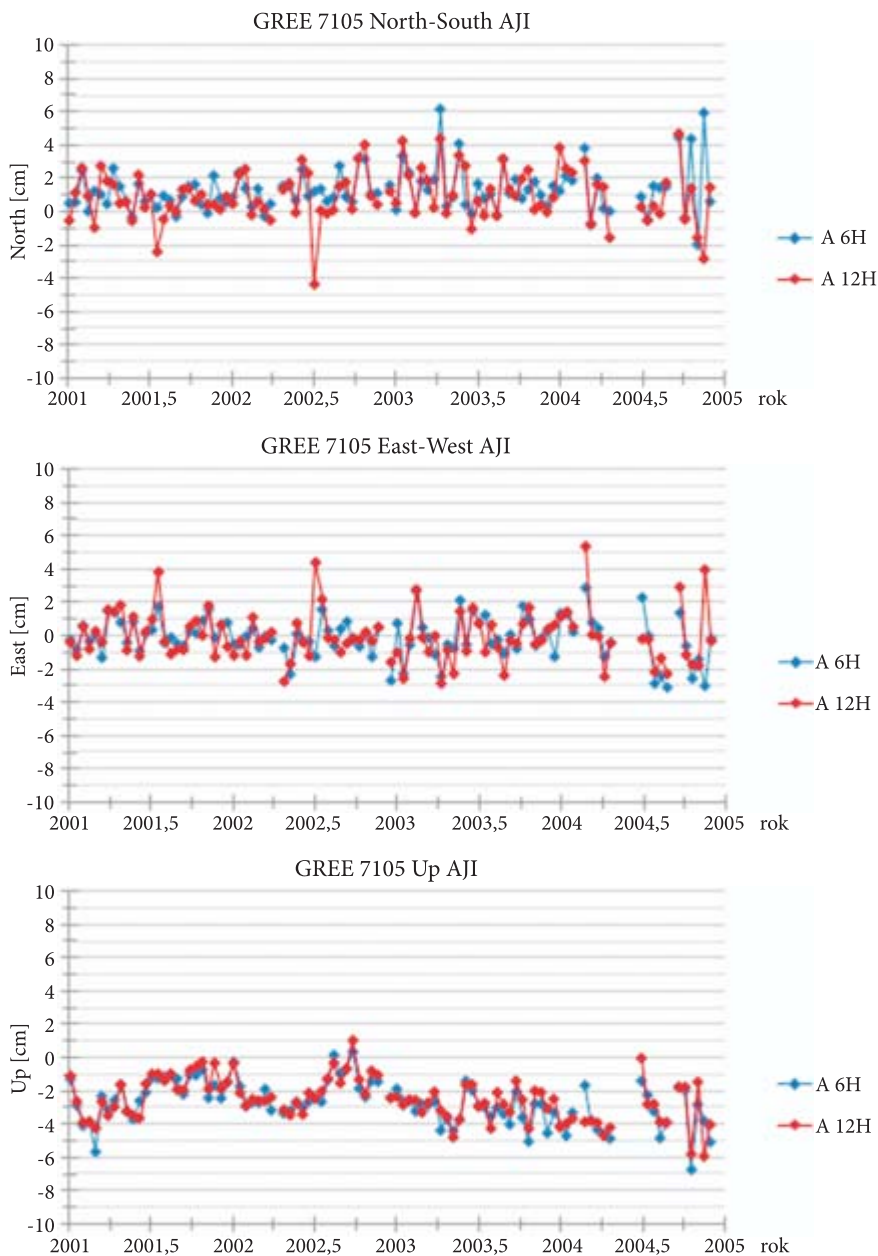
Błąd wyznaczenia różnicy między współrzędnymi geocentrycznymi stacji wyznaczonymi z orbit satelitów *Starlette/Stella*, a współrzędnymi układu ITRF2005

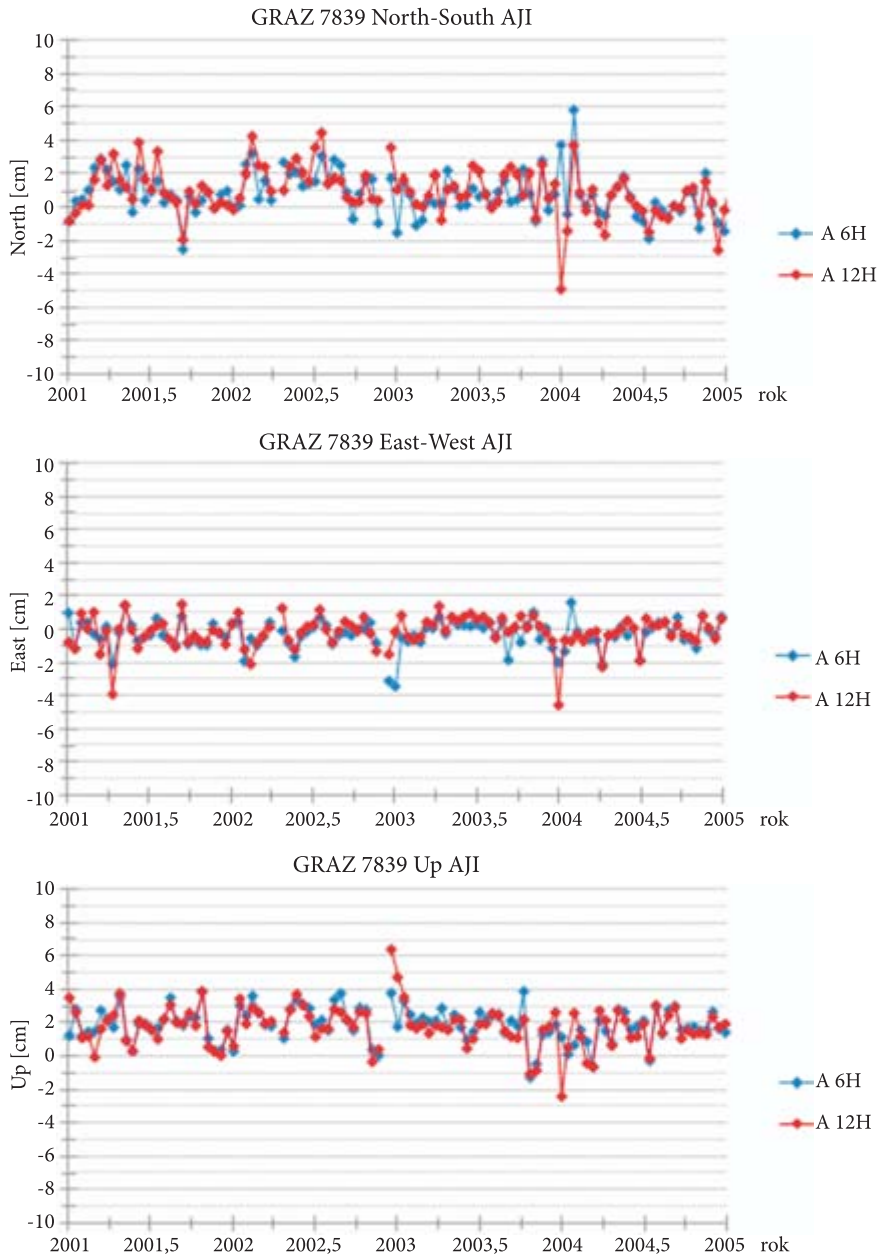
| | STARLETTE/STELLA | | | | | | | |
|-----------------------|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | ACCEL 6H | | | | ACCEL 12H | | | |
| | dX [mm] | dY [mm] | dZ [mm] | dC [mm] | dX [mm] | dY [mm] | dZ [mm] | dC [mm] |
| Yarragadee 70900513 | 14,8 | 11,9 | 12,3 | 13,1 | 15,0 | 12,8 | 14,3 | 14,1 |
| Greenbelt 71050725 | 15,2 | 13,8 | 15,8 | 15,0 | 17,7 | 16,7 | 16,8 | 17,1 |
| Graz 78393402 | 9,0 | 8,6 | 10,3 | 9,3 | 15,9 | 9,1 | 13,8 | 13,2 |
| Herstmonceux 78403501 | 10,6 | 13,9 | 15,5 | 13,5 | 12,9 | 12,5 | 17,7 | 14,6 |

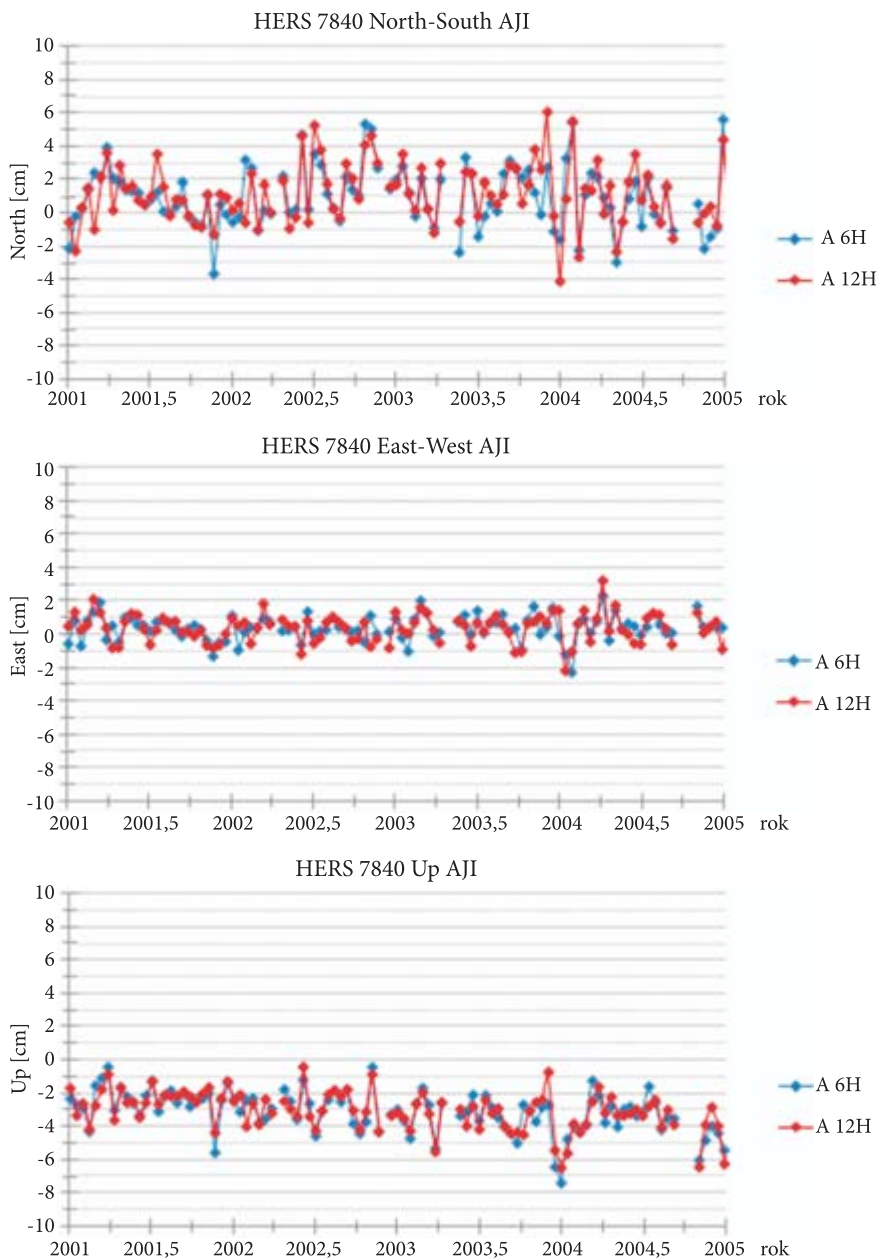
wariantu współczynników przyspieszeń empirycznych. Przy czym należy podkreślić, że dwukrotne zwiększenie interwału wyznaczania współczynników przyspieszeń empirycznych z 6 do 12 godzin powoduje wzrost średniego błędu kwadratowego wyznaczanych współrzędnych stacji od 1,0 do 3,9 mm.

Na rysunkach 4-7 przedstawiono składowe topocentryczne N , E , Up dla stacji Yarragadee, Greenbelt, Graz i Herstmonceux w latach 2001-2005 wyznaczone z orbity *Ajisai* w odniesieniu do układu ITRF2005 na epokę 2000 dla wariantu ze współczynnikami przyspieszeń empirycznych wyznaczanymi w 6-godzinnych (kolor niebieski) i 12-godzinnych (kolor czerwony) interwałach. Na rysunkach 8-11 przedstawiono analogiczne zależności wyznaczone z orbit *Starlette/Stella*. Wartość 0 na rysunkach odpowiada poszczególnej składowej określonej dla układu ITRF2005. Luki na rysunkach oznaczają mniejszą niż 50 liczbę punktów normalnych lub brak punktów normalnych dla danej stacji na jeden łuk orbity w analizowanym okresie. W przypadku współrzędnych stacji otrzymanych dla *Ajisai* widać wyraźne przesunięcie składowej pionowej dla wszystkich stacji. Prawdopodobnie powodowane jest to niedokładnie określoną poprawką na centrum masy tego satelity. W przypadku *Ajisai* parametr ten zmienia się w zakresie ± 5 cm [14]. Tego efektu nie ma dla satelitów *Starlette/Stella*.

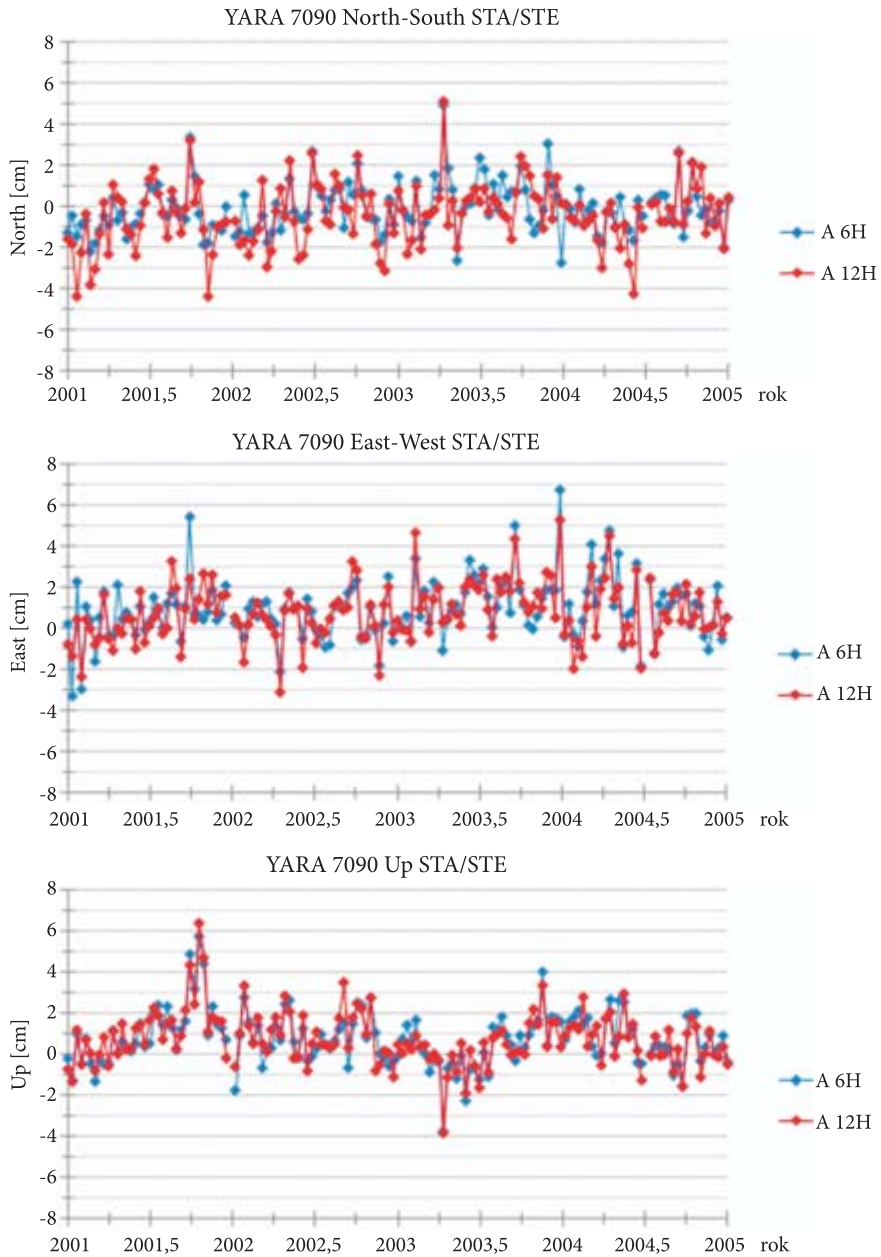
Rys. 4. Składowe N, E, Up stacji Yarragadee policzone za okres 2001-2005 z orbity *Ajisai*

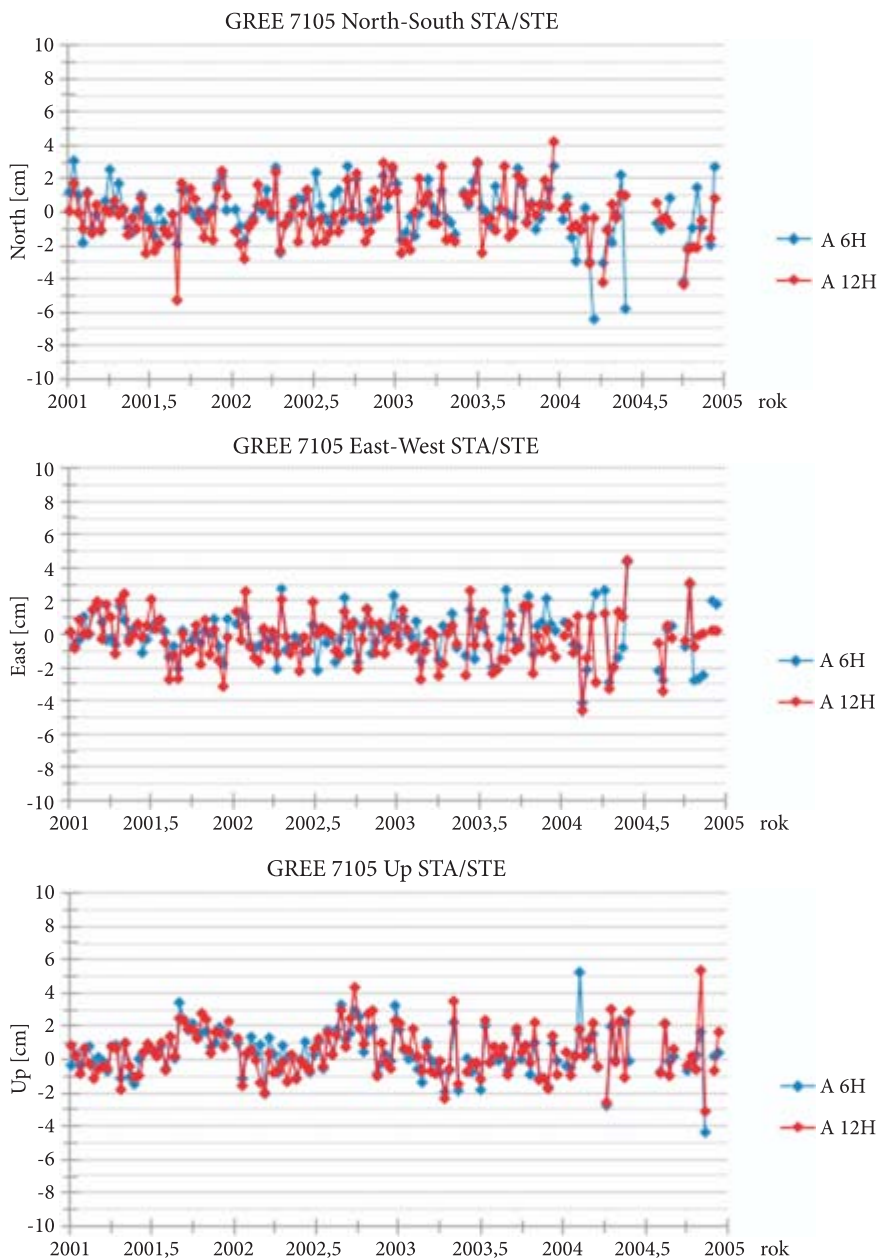
Rys. 5. Składowe N, E, Up stacji Greenbelt policzone za okres 2001-2005 z orbity *Ajisai*

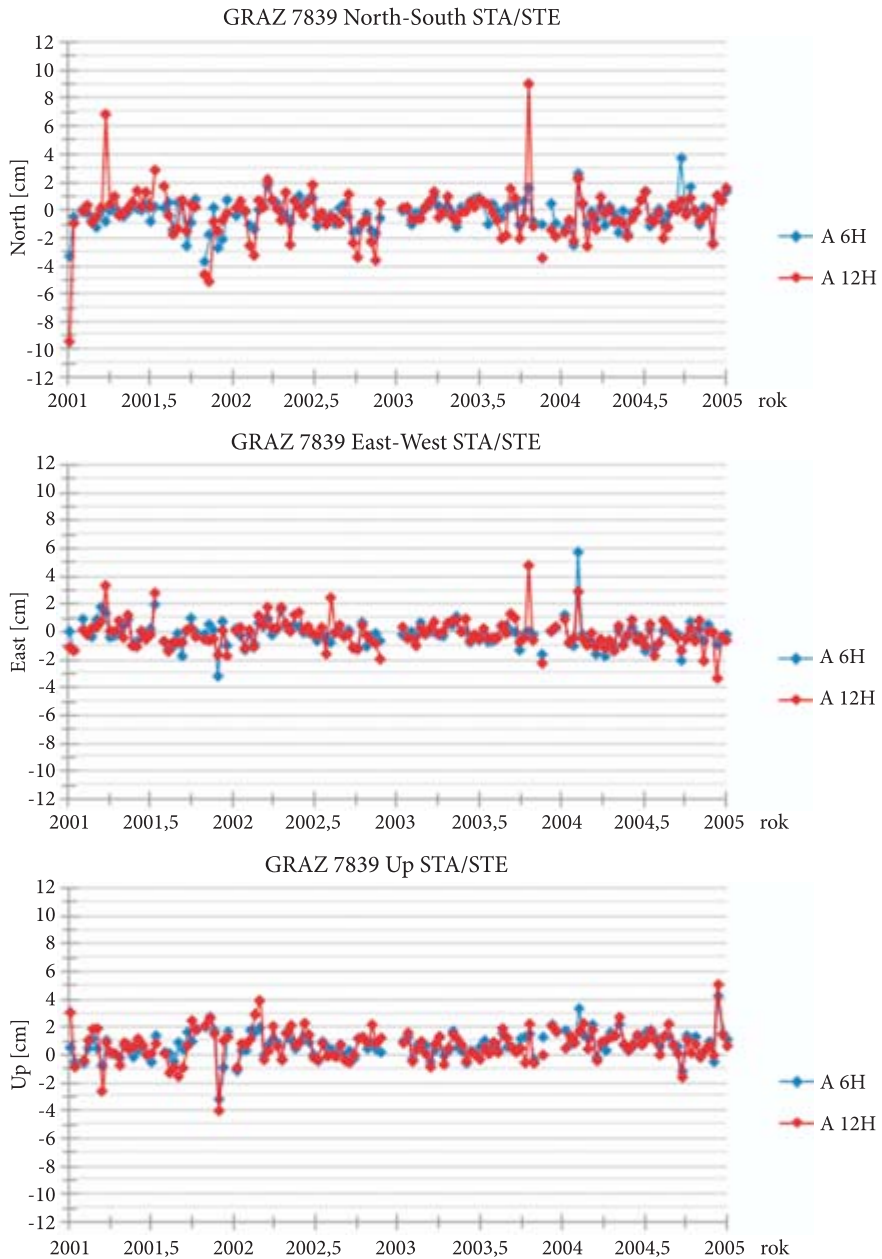
Rys. 6. Składowe N, E, Up stacji Graz policzone za okres 2001-2005 z orbity *Ajisai*

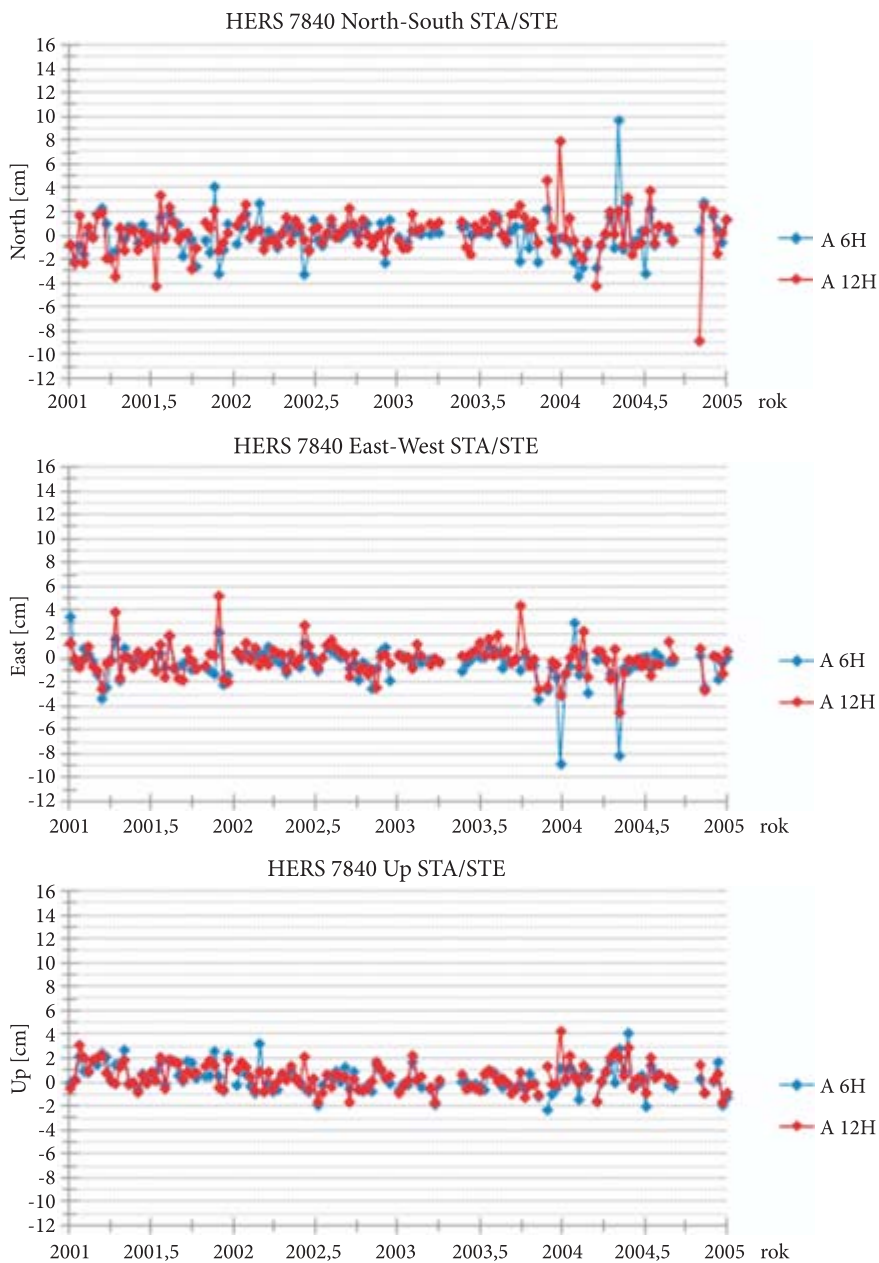


Rys. 7. Składowe N, E, Up stacji Herstmonceux policzone za okres 2001-2005 z orbity *Ajisai*

Rys. 8. Składowe N, E, Up stacji Yarragadee policzone za okres 2001-2005 z orbit *Starlette/Stella*

Rys. 9. Składowe N, E, Up stacji Greenbelt policzone za okres 2001-2005 z orbit *Starlette/Stella*

Rys. 10. Składowe N, E, Up stacji Graz policzone za okres 2001-2005 z orbit *Starlette/Stella*

Rys. 11. Składowe N, E, Up stacji Herstmonceux policzone za okres 2001-2005 z orbit *Starlette/Stella*

4.2. Wyznaczanie prędkości stacji

Prędkości stacji Yarragadee, Greenbelt, Graz oraz Herstmonceux, podobnie jak ich współrzędne, wyznaczono za okres od 1 stycznia 2001 do 25 grudnia 2005 zarówno dla *Ajisai*, jak i *Starlette/Stella* w oparciu o wyniki wyznaczania orbit ww. satelitów przedstawione w punkcie 3. Prędkości stacji także zostały wyznaczone w dwóch wariantach, tzn. ze współczynnikami przyspieszeń empirycznych wyznaczanych w 6- i 12-godzinnych interwałach. Przy wyznaczaniu prędkości stacji brano również pod uwagę kryterium o liczbie punktów normalnych stacji. Otrzymane wyniki porównano z wynikami uzyskanymi dla modelu geologicznego NNR-NUVEL1A opisującego ruchy w płaszczyźnie horyzontalnej i rotację 16 płyt tektonicznych [4, 10].

Prędkości stacji można wyznaczyć, znając ich współrzędne w określonym momencie. Tym momentem jest początek każdego łuku orbit *Ajisai* oraz *Starlette/Stella*, dla którego zostały obliczone współrzędne geocentryczne X , Y , Z stacji. Współrzędne te zostały przetransformatowane do postaci współrzędnych topocentrycznych N , E , Up , odzwierciedlających rzeczywisty ruch stacji w badanym okresie.

Tabele 14 i 15 zawierają wartości prędkości horyzontalnych oraz prędkości w przestrzeni 3D stacji Yarragadee, Greenbelt, Graz i Herstmonceux wyznaczone z obserwacji *Ajisai* oraz *Starlette/Stella*. Z kolei w tabelach 16 i 17 podano wartości błędów wyznaczonych prędkości. Otrzymane wartości prędkości porównano z prędkościami stacji wyznaczonymi na podstawie modelu geologicznego NNR-NUVEL1A zebranymi w tabeli 18. Prędkości te policzono w oparciu o procedurę ABSMO_NUVEL rekomendowaną przez IERS [10].

TABELA 14

Prędkości w płaszczyźnie horyzontalnej oraz w przestrzeni 3D stacji Yarragadee, Greenbelt, Graz i Herstmonceux wyznaczone na podstawie obserwacji laserowych *Ajisai* w latach 2001-2005

| | AJISAI | | | |
|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | ACCEL 6H | | ACCEL 12H | |
| | V3D [mm/rok] | V2D [mm/rok] | V3D [mm/rok] | V2D [mm/rok] |
| Yarragadee 70900513 | 66,5 | 66,5 | 67,0 | 67,0 |
| Greenbelt 71050725 | 17,1 | 16,1 | 15,6 | 15,0 |
| Graz 78393402 | 25,4 | 25,3 | 25,1 | 25,0 |
| Herstmonceux 78403501 | 23,2 | 22,8 | 23,7 | 23,4 |

TABELA 15

Prędkości w płaszczyźnie horyzontalnej oraz w przestrzeni 3D stacji Yarragadee, Greenbelt, Graz i Herstmonceux wyznaczone na podstawie obserwacji laserowych *Starlette/Stella* w latach 2001-2005

| | STARLETTE/STELLA | | | |
|-----------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | ACCEL 6H | | ACCEL 12H | |
| | V3D [mm/rok] | V2D [mm/rok] | V3D [mm/rok] | V2D [mm/rok] |
| Yarragadee 70900513 | 65,8 | 65,7 | 71,5 | 71,5 |
| Greenbelt 71050725 | 16,4 | 16,2 | 14,7 | 14,7 |
| Graz 78393402 | 26,7 | 26,7 | 25,8 | 25,8 |
| Herstmonceux 78403501 | 22,7 | 22,7 | 23,3 | 23,3 |

TABELA 16

Błędy prędkości w płaszczyźnie horyzontalnej oraz w przestrzeni 3D stacji Yarragadee, Greenbelt, Graz i Herstmonceux wyznaczonych na podstawie obserwacji laserowych *Ajisai* w latach 2001-2005

| | AJISAI | | | |
|-----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | ACCEL 6H | | ACCEL 12H | |
| | dV3D [mm/rok] | dV2D [mm/rok] | dV3D [mm/rok] | dV2D [mm/rok] |
| Yarragadee 70900513 | 1,6 | 1,3 | 1,4 | 1,1 |
| Greenbelt 71050725 | 1,5 | 1,3 | 1,7 | 1,4 |
| Graz 78393402 | 1,1 | 0,8 | 1,2 | 0,9 |
| Herstmonceux 78403501 | 1,4 | 0,9 | 1,4 | 1,0 |

TABELA 17

Błędy prędkości w płaszczyźnie horyzontalnej oraz w przestrzeni 3D stacji Yarragadee, Greenbelt, Graz i Herstmonceux wyznaczonych na podstawie obserwacji laserowych *Starlette/Stella* w latach 2001-2005

| | STARLETTE/STELLA | | | |
|-----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | ACCEL 6H | | ACCEL 12H | |
| | dV3D [mm/rok] | dV2D [mm/rok] | dV3D [mm/rok] | dV2D [mm/rok] |
| Yarragadee 70900513 | 1,2 | 0,9 | 1,3 | 1,0 |
| Greenbelt 71050725 | 1,4 | 1,1 | 1,6 | 1,3 |
| Graz 78393402 | 0,8 | 0,7 | 1,2 | 1,0 |
| Herstmonceux 78403501 | 1,3 | 1,0 | 1,3 | 1,0 |

TABELA 18

Prędkości w płaszczyźnie horyzontalnej stacji Graz, Greenbelt, Herstmonceux i Yarragadee wyznaczone na podstawie modelu geologicznego NNR-NUVEL-1A w latach 2001-2005

| | NNR-NUVEL-1A V2D [mm/rok] |
|-----------------------|------------------------------|
| Yarragadee 70900513 | 66,6 |
| Greenbelt 71050725 | 15,4 |
| Graz 78393402 | 24,8 |
| Herstmonceux 78403501 | 23,3 |

Wartości prędkości stacji Yarragadee, Greenbelt, Graz i Herstmonceux wyznaczone z orbity *Ajisai* różnią się od wartości prędkości tych stacji wyznaczonych z orbity *Starlette/Stella*. Różnice te wahają się w granicach od 0,5 do 4,5 mm/rok. Najszybciej poruszającą się stacją jest stacja Yarragadee położona na płycie australijskiej. Średnia prędkość stacji to około 70 mm/rok. Wyraźnie wolniejsze są europejskie stacje Graz oraz Herstmonceux położone na płycie euroazjatyckiej, dla których średnie prędkości wynoszą odpowiednio około 25 mm/rok i około 23 mm/rok. Z kolei stacja Greenbelt położona na płycie północnoamerykańskiej przemieszcza się najwolniej. Średnia prędkość stacji to około 16 mm/rok. W przypadku *Ajisai* prędkości stacji policzone z przyspieszeniami empirycznymi wyznaczanymi co 6 i co 12 godzin wykazują bardzo dobrą zgodność, zarówno dla prędkości w przestrzeni 3D, jak i prędkości w płaszczyźnie horyzontu. Natomiast w przypadku *Starlette/Stella* w zależności od zastosowanego wariantu przyspieszeń empirycznych różnice w prędkościach stacji wahają się w granicach 0,2-2,9 mm/rok. Stacje Yarragadee, Graz, Herstmonceux przemieszczają się w kierunku NE, natomiast ruch stacji Greenbelt odbywa się w kierunku NW.

Stacje laserowe wykazują minimalne ruchy pionowe. Na podstawie obserwacji *Ajisai* minimalne przemieszczenia wykazuje stacja Greenbelt, dla której pionowe przemieszczenia w zależności od zastosowanego wariantu przyspieszeń empirycznych wahają się w granicach 0,6-1,0 mm/rok. Dla stacji Graz i Herstmonceux pionowe przemieszczenia są jeszcze mniejsze i w zależności od zastosowanego wariantu przyspieszeń empirycznych wynoszą od 0,1 do 0,4 mm/rok. Na podstawie obserwacji *Starlette/Stella* pionowe ruchy stacji w zależności od zastosowanego wariantu przyspieszeń empirycznych nie przekraczają 0,2 mm/rok. W tabelach 19 i 20 podano średnie wartości poszczególnych składowych topocentrycznych N, E, Up wraz z odchyleniami standardowymi każdej z analizowanych stacji wyznaczonymi na podstawie obserwacji *Ajisai* oraz *Starlette/Stella*, wykonanymi w latach 2001-2005.

Wyniki prezentowane w tabelach 19 i 20 wyraźnie pokazują, że składowe topocentryczne przemieszczających się stacji są obarczone znacznie większymi niepewnościami w przypadku obserwacji *Ajisai*. W stosunku do wyników otrzymanych

TABELA 19

Średnie wartości składowych topocentrycznych N, E, Up wraz z odchyleniami standardowymi wyznaczone na podstawie obserwacji laserowych satelity *Ajisai* w latach 2001-2005

| | AJISAI | | | | | |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | ACCEL 6H | | | ACCEL 12H | | |
| | N [cm] | E [cm] | Up [cm] | N [cm] | E [cm] | Up [cm] |
| Yarragadee 70900513 | 1,53 ± 0,44 | 1,38 ± 1,24 | 1,98 ± 2,63 | 1,76 ± 1,66 | 3,84 ± 5,02 | 4,99 ± 5,38 |
| Greenbelt 71050725 | 2,10 ± 1,99 | 1,98 ± 1,68 | 2,21 ± 2,24 | 2,54 ± 2,26 | 2,91 ± 2,37 | 3,01 ± 2,66 |
| Graz 78393402 | 1,74 ± 1,52 | 2,39 ± 2,38 | 2,02 ± 1,28 | 2,64 ± 2,94 | 3,29 ± 3,21 | 2,27 ± 1,34 |
| Herstmonceux 78403501 | 1,89 ± 1,05 | 1,97 ± 1,38 | 2,97 ± 1,52 | 2,13 ± 1,10 | 2,25 ± 1,62 | 3,37 ± 1,76 |

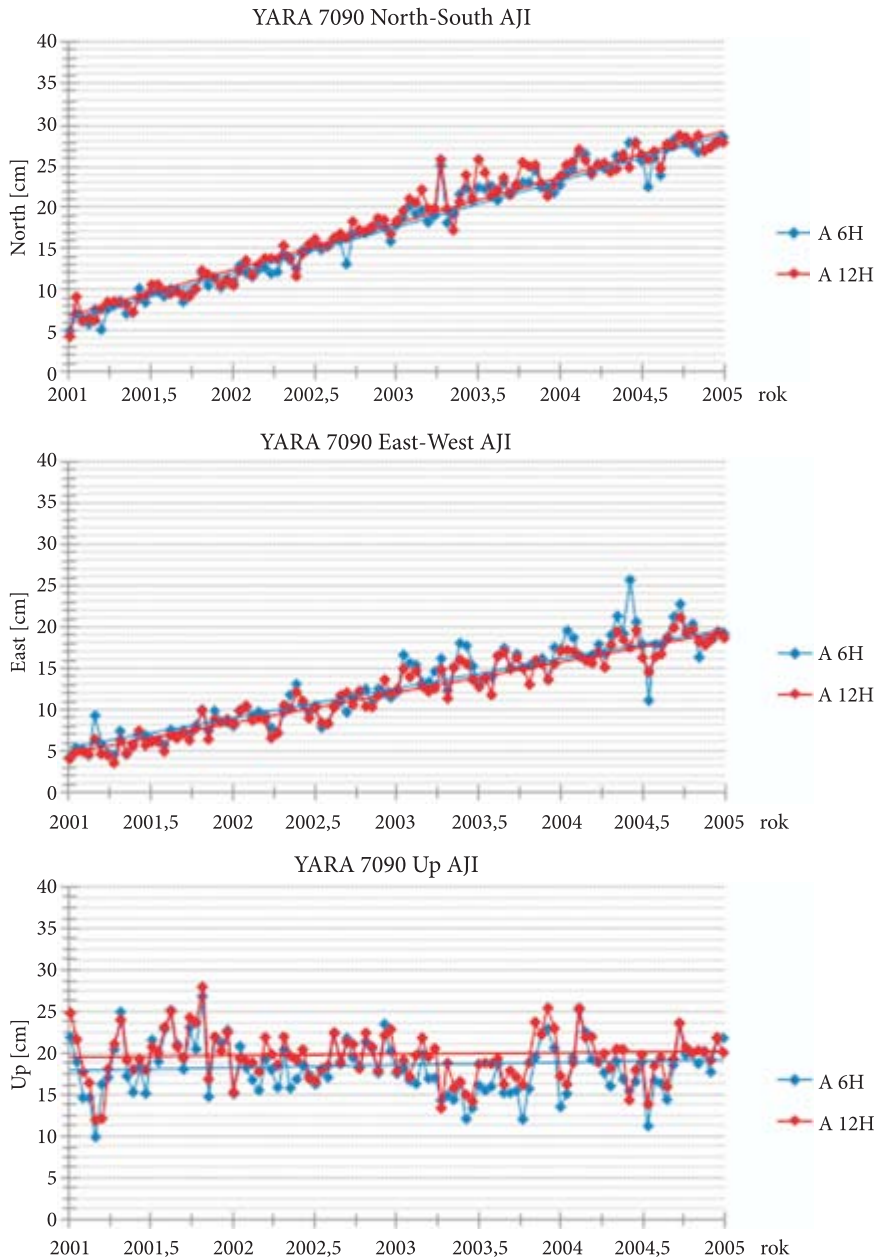
TABELA 20

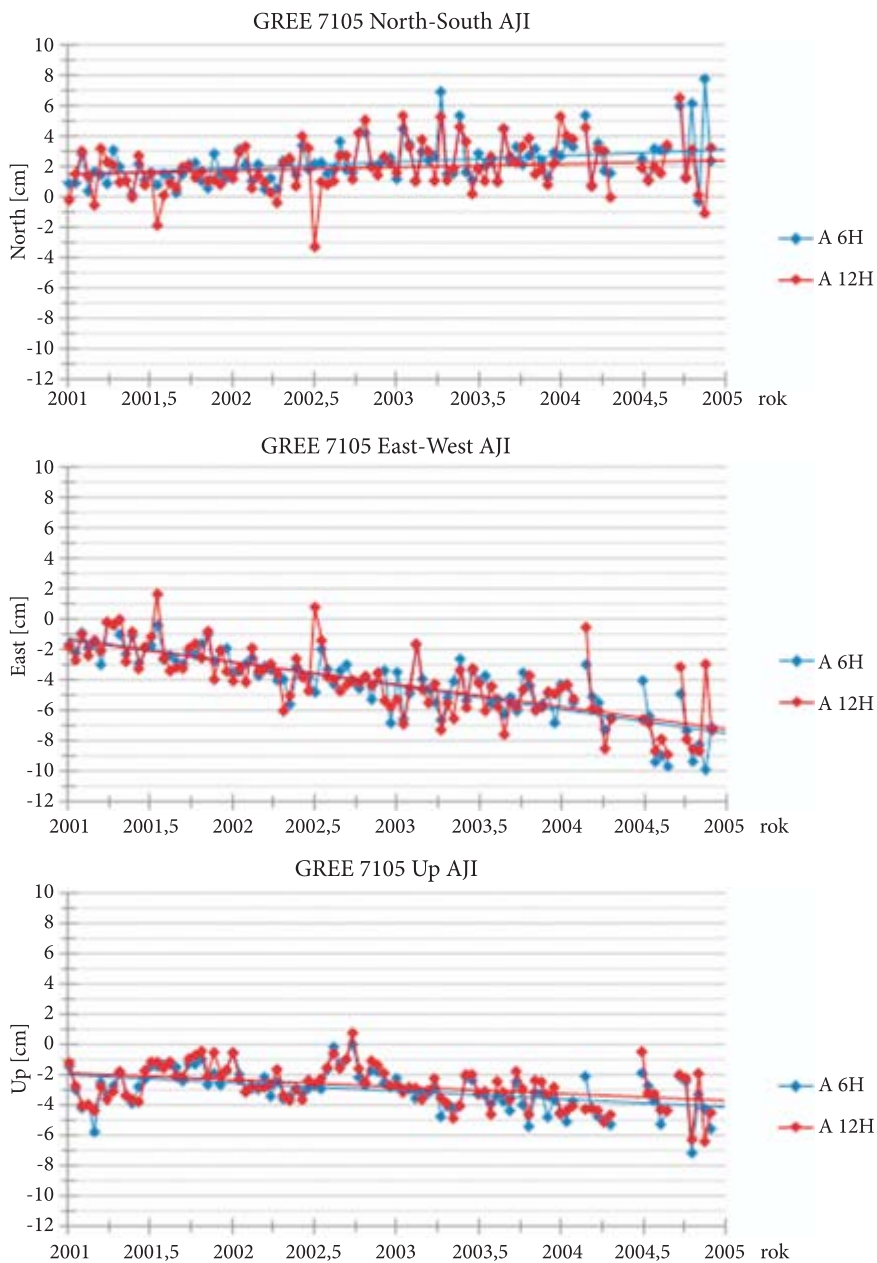
Średnie wartości składowych topocentrycznych N, E, Up wraz z odchyleniami standardowymi wyznaczone na podstawie obserwacji laserowych satelitów *Starlette/Stella* w latach 2001-2005

| | STARLETTE/STELLA | | | | | |
|--------------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | ACCEL 6H | | | ACCEL 12H | | |
| | N [cm] | E [cm] | Up [cm] | N [cm] | E [cm] | Up [cm] |
| Yarragadee 70900513 | 1,12 ± 0,42 | 1,03 ± 0,37 | 1,02 ± 0,39 | 1,17 ± 0,34 | 1,08 ± 0,31 | 1,12 ± 0,78 |
| Greenbelt 71050725 | 1,46 ± 1,01 | 1,30 ± 0,85 | 1,38 ± 0,99 | 1,47 ± 0,78 | 1,35 ± 0,68 | 1,36 ± 0,78 |
| Graz 78393402 | 1,08 ± 0,82 | 1,12 ± 1,00 | 1,12 ± 0,51 | 1,34 ± 1,18 | 1,43 ± 1,41 | 1,28 ± 0,57 |
| Herstmonceux 78403501 | 1,13 ± 0,52 | 1,20 ± 0,50 | 1,60 ± 0,79 | 1,28 ± 0,49 | 1,37 ± 0,48 | 1,75 ± 0,75 |

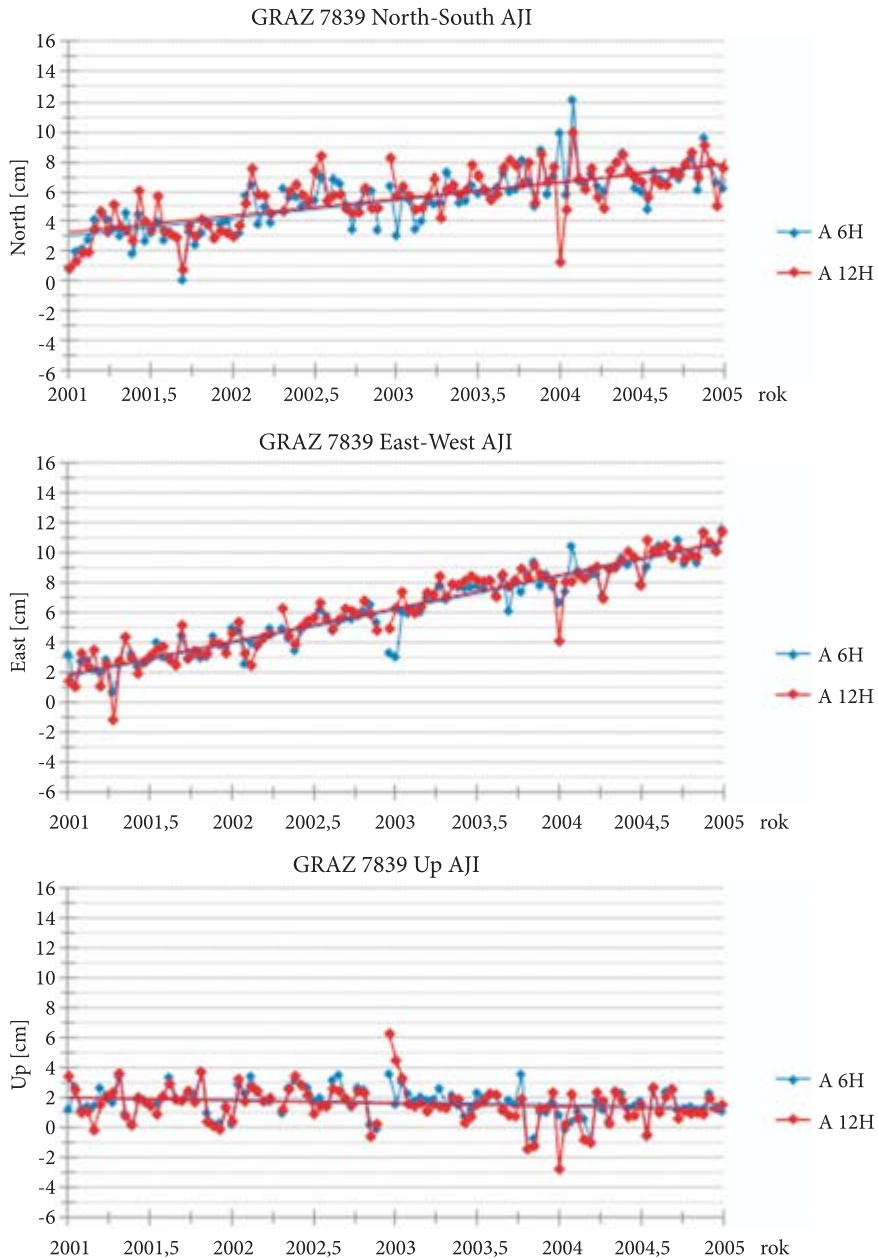
z obserwacji *Starlette/Stella* obserwuje się kilkukrotne pogorszenie poszczególnych składowych N, E, Up. Jest to przede wszystkim konsekwencją gorzej oszacowanej orbity satelity (w sensie wartości orbitalnego RMS), wynikająca głównie z niedokładnie określonej poprawki na centrum masy satelity.

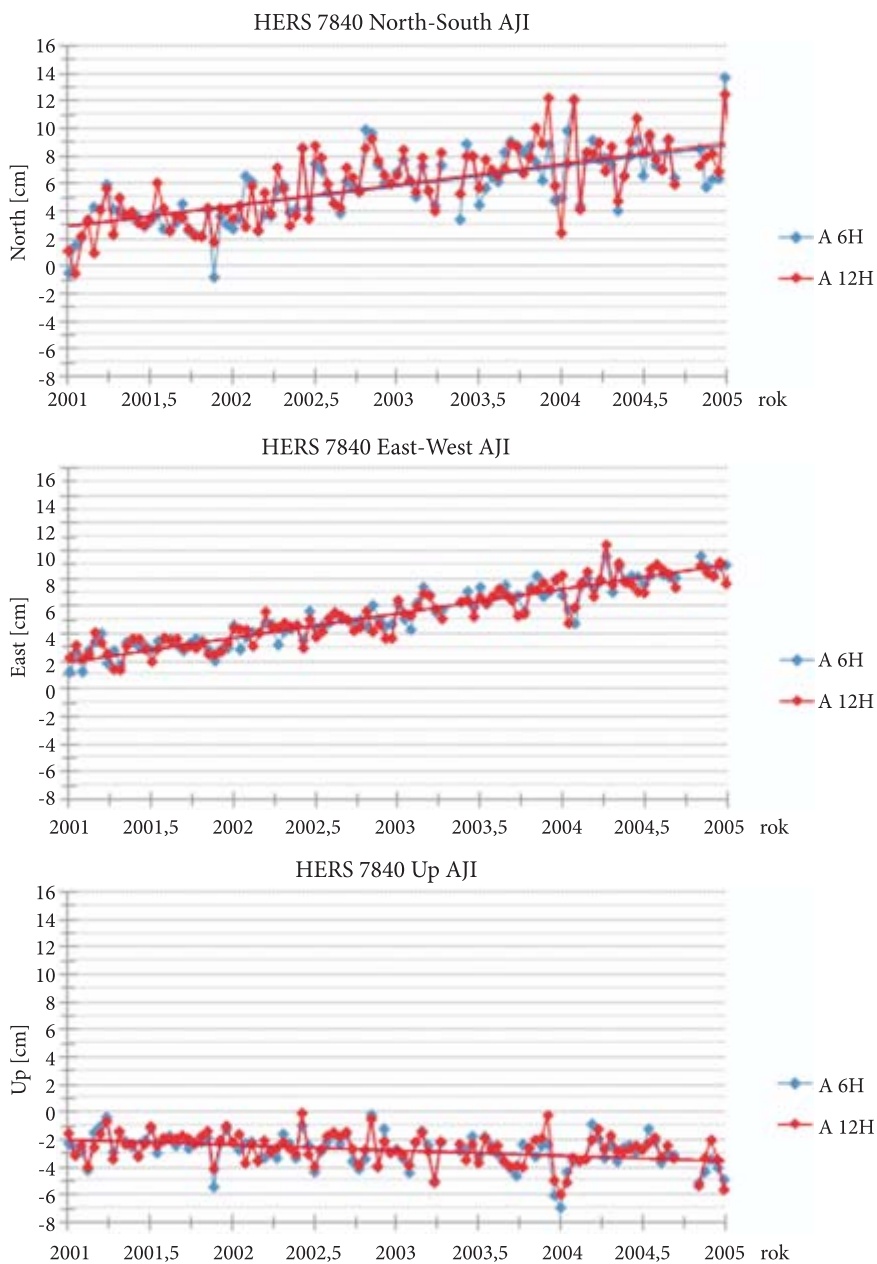
Na rysunkach 12-15 przedstawiono ruch składowych topocentrycznych N, E, Up dla stacji Yarragadee, Greenbelt, Graz i Herstmonceux w latach 2001-2005 wyznaczone z orbity *Ajisai* w odniesieniu do układu ITRF2005 na epokę łuku dla wariantu ze współczynnikami przyspieszeń empirycznych wyznaczanymi w 6-godzinnych (kolor niebieski) i 12-godzinnych (kolor czerwony) interwałach. Na rysunkach 16-19 przedstawiono analogiczne zależności wyznaczone z orbit *Starlette/Stella*. Wartość 0

Rys. 12. Ruch składowych N, E, Up stacji Yarragadee wyznaczone za okres 2001-2005 z orbity *Ajisai*

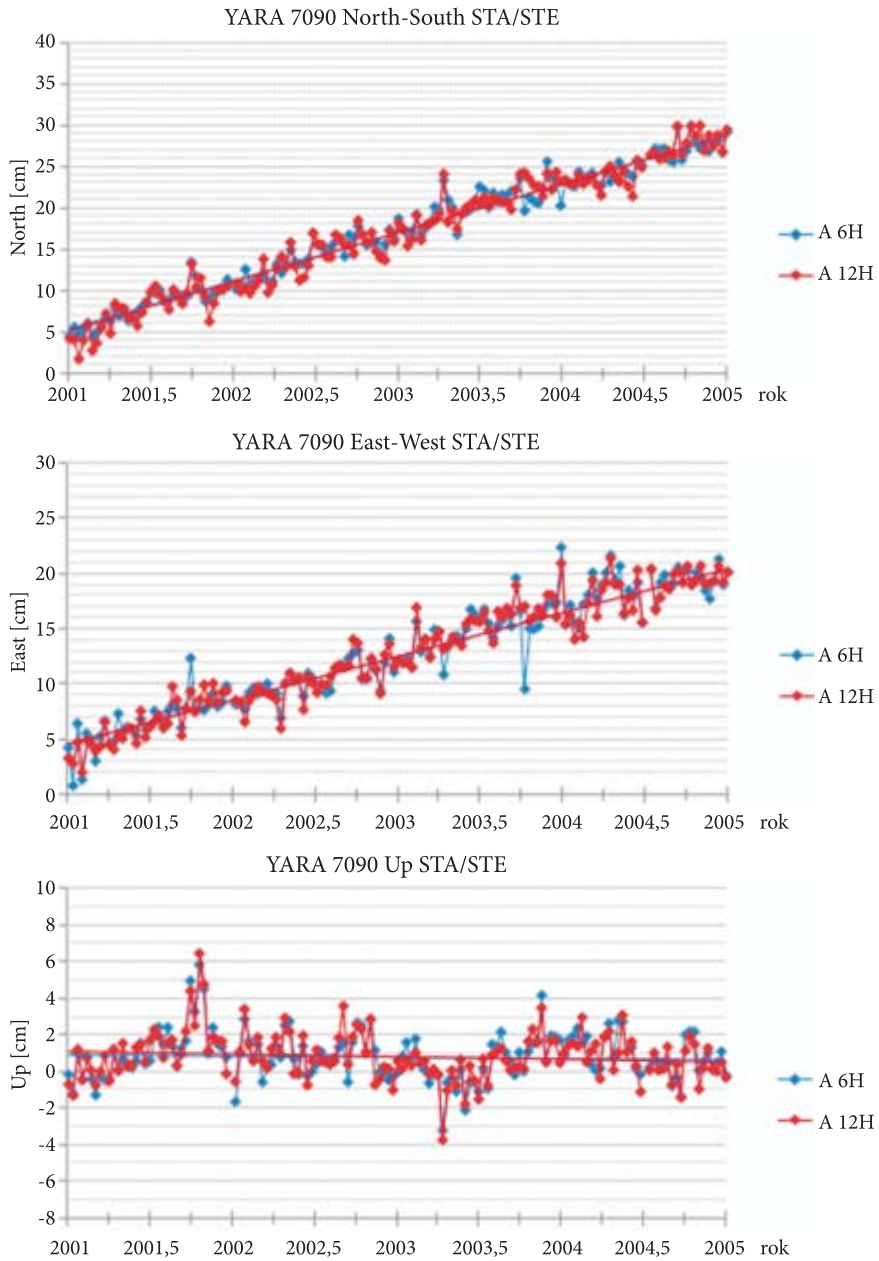


Rys. 13. Ruch składowych N, E, Up stacji Greenbelt wyznaczony za okres 2001-2005 z orbity *Ajisai*

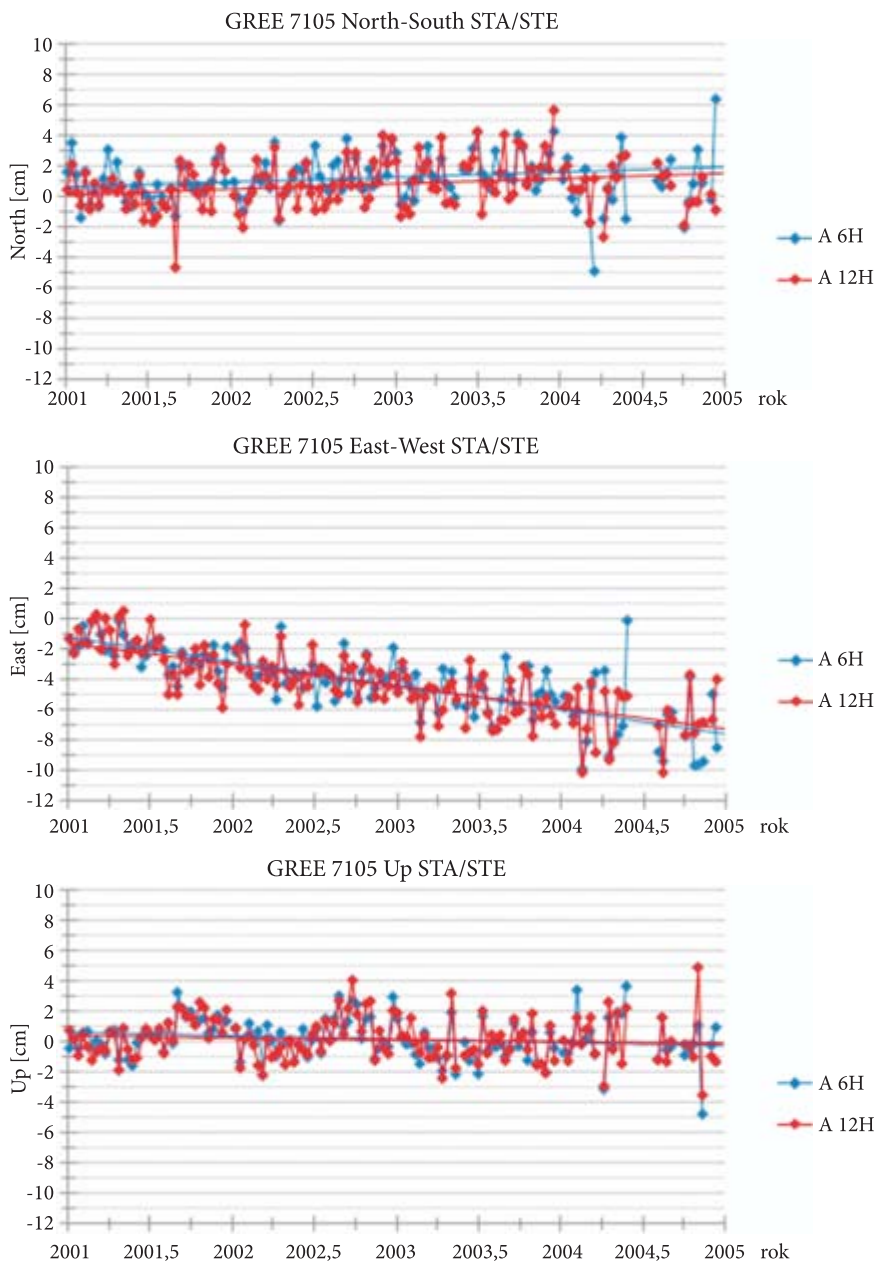
Rys. 14. Ruch składowych N, E, Up stacji Graz wyznaczone za okres 2001-2005 z orbity *Ajisai*



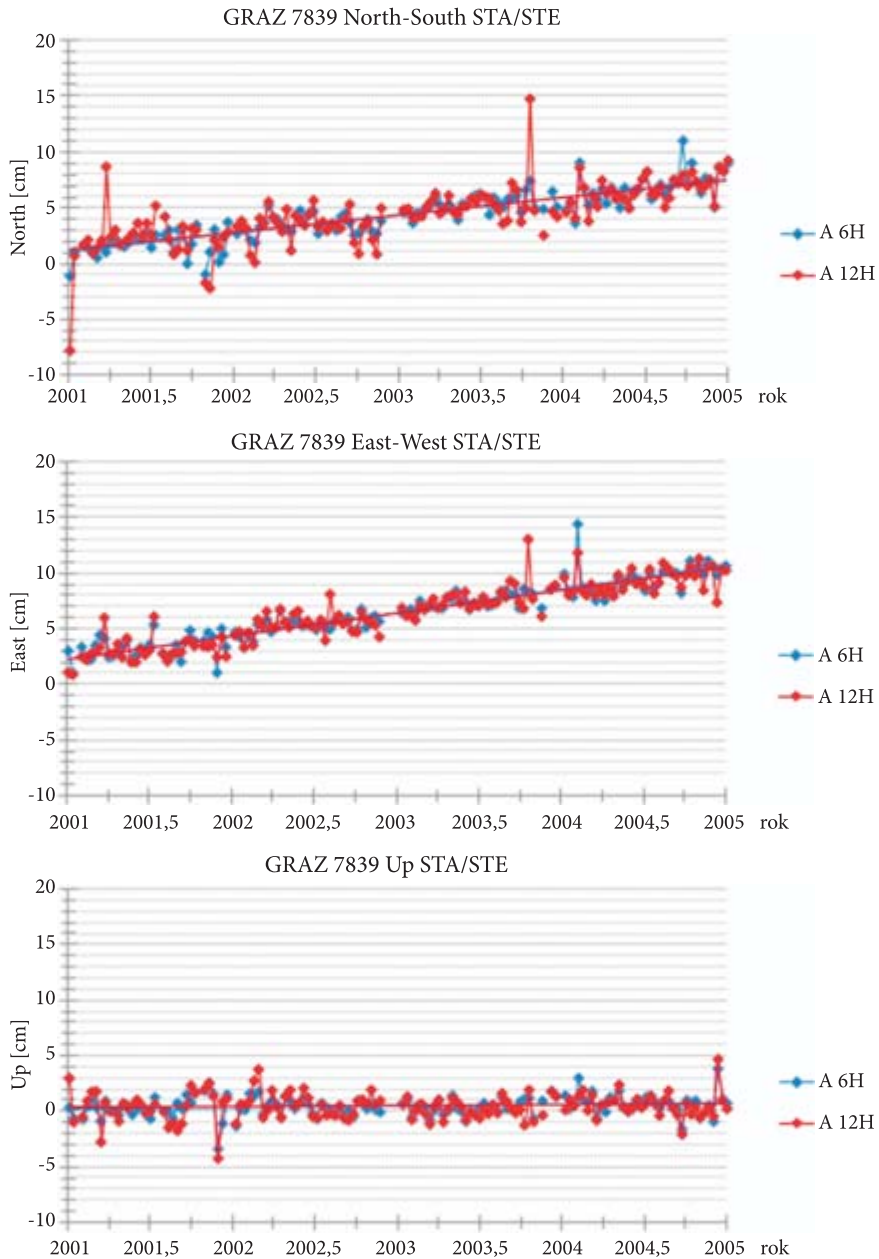
Rys. 15. Ruch składowych N, E, Up stacji Herstmonceux wyznaczony za okres 2001-2005 z orbity *Ajisai*



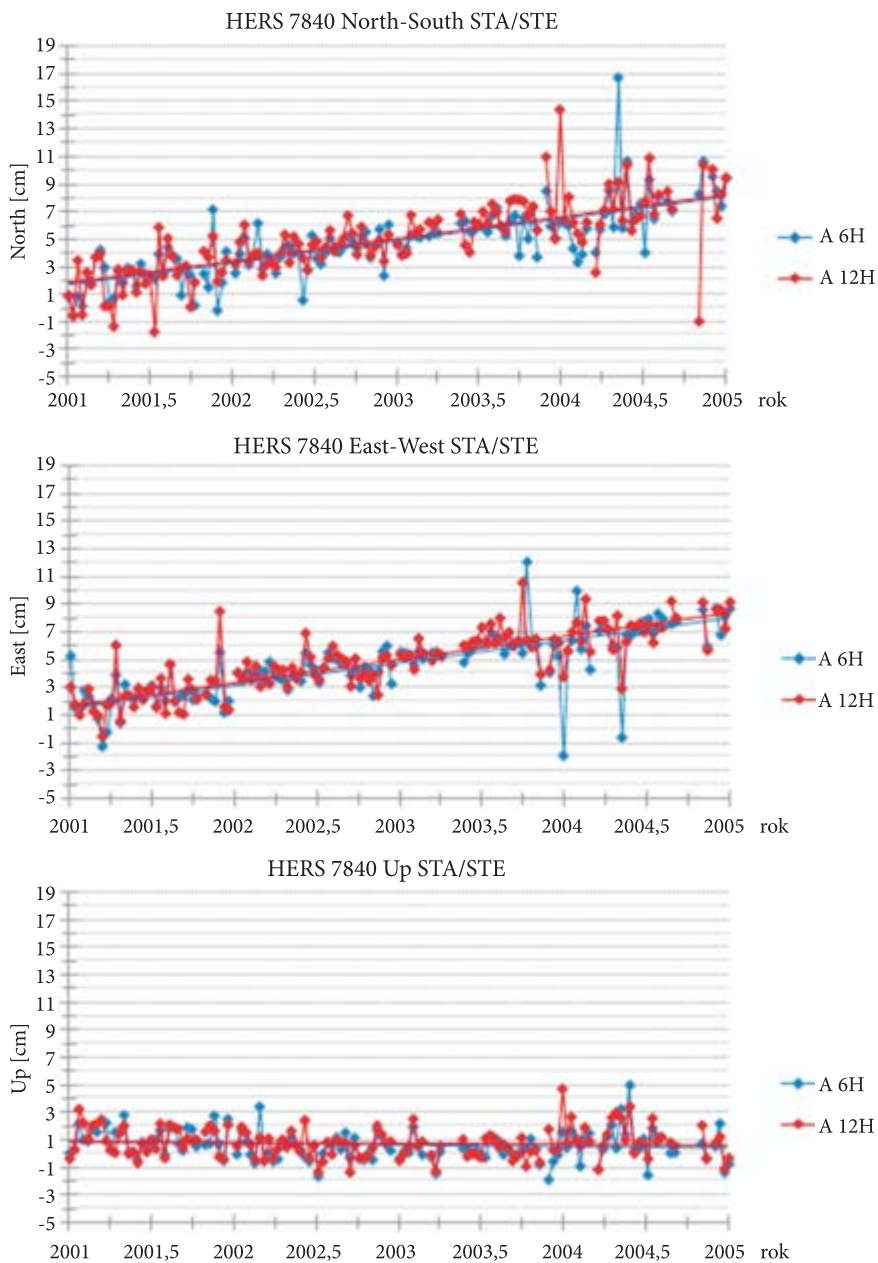
Rys. 16. Ruch składowych N, E, Up stacji Yarragadee wyznaczony za okres 2001-2005 z orbit *Starlette/Stella*



Rys. 17. Ruch składowych N, E, Up stacji Greenbelt wyznaczony za okres 2001-2005 z orbit *Starlette/Stella*



Rys. 18. Ruch składowych N, E, Up stacji Graz wyznaczony za okres 2001-2005 z orbit *Starlette/Stella*



Rys. 19. Ruch składowych N, E, Up stacji Herstmonceux wyznaczony za okres 2001-2005 z orbit *Starlette/Stella*

na rysunkach odpowiada poszczególnej składowej określonej dla układu ITRF2005. Tak jak w przypadku współrzędnych stacji, luki na rysunkach oznaczają mniejszą niż 50 liczbę punktów normalnych lub brak punktów normalnych dla danej stacji na jeden łuk orbity w analizowanym okresie.

4.3. Porównanie z satelitami *LAGEOS*, układem ITRF2005 i modelem NNR-NUVEL1A

Wyniki wyznaczeń prędkości w płaszczyźnie horyzontalnej dla stacji Yarragade, Greenbelt, Graz oraz Herstmonceux otrzymane z orbit *Ajisai* i *Starlette/Stella* porównano z wynikami wyznaczeń tych samych prędkości otrzymanych z orbit satelitów *LAGEOS* [19] oraz dla układu ITRF2005 i modelu geologicznego NNR-NUVEL1A. W przypadku *LAGEOS* prędkości stacji policzono za lata 1999-2003. Wyniki tego porównania zebrano w tabeli 21. W przypadku *Ajisai* oraz *Starlette/Stella* podano dwie wartości prędkości. Górna wartość to prędkość policzona dla wariantu ze współczynnikami przyspieszeń empirycznych wyznaczanymi co 6 godzin, a dolna wartość to prędkość policzona dla wariantu ze współczynnikami przyspieszeń empirycznych wyznaczanymi co 12 godzin. Wszystkie otrzymane rezultaty dla *Ajisai* oraz *Starlette/Stella* są porównywalne z wynikami otrzymanymi dla *LAGEOS* oraz układu ITRF2005 i modelu geologicznego NNR-NUVEL1A. Różnice wartości prędkości dla stacji Yarragade, Greenbelt, Graz oraz Herstmonceux w przypadku rozwiązania ze współczynnikami przyspieszeń empirycznych wyznaczanymi co 6 godzin wynoszą od 0,4 do 1,8 mm/rok dla *Ajisai*, a dla *Starlette/Stella* nie są większe niż 2,6 mm/rok. Natomiast różnice wartości prędkości dla tych stacji w przypadku rozwiązania ze współczynnikami

TABELA 21

Prędkości w płaszczyźnie horyzontalnej otrzymane z orbit *Ajisai*, *Starlette/Stella*, *LAGEOS* oraz dla układu ITRF2005 i modelu geologicznego NNR-NUVEL1A

| | V2D [mm/rok] | | | | |
|--------------------------|--------------|---------------------|--------|----------|----------------|
| | AJISAI | STARLETTE STELLA | LAGEOS | ITRF2005 | NNR NUVEL1A |
| Yarragade 70900513 | 66,5 67,0 | 65,7 71,5 | 68,3 | 68,1 | 66,6 |
| Greenbelt 71050725 | 16,1 15,0 | 16,2 14,7 | 15,6 | 15,7 | 15,4 |
| Graz 78393402 | 25,3 25,0 | 26,7 25,8 | 26,6 | 26,7 | 24,8 |
| Herstmonceux 78403501 | 22,8 23,4 | 22,7 23,3 | 23,3 | 23,4 | 23,3 |

przyspieszeń empirycznych wyznaczanymi co 12 godzin nie przekraczają 1,6 mm/rok dla *Ajisai* i 4,9 mm/rok dla *Starlette/Stella*. Różnice wartości prędkości policzonych z orbit *Ajisai* i *Starlette/Stella* dla tych samych stacji wynoszą od 0,1 do 1,4 mm/rok dla rozwiązania ze współczynnikami przyspieszeń empirycznych wyznaczanymi co 6 godzin i od 0,1 do 4,5 mm/rok dla rozwiązania ze współczynnikami przyspieszeń empirycznych wyznaczanymi co 12 godzin.

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Niniejsza praca poświęcona jest problemowi wyznaczania współrzędnych i prędkości stacji z obserwacji laserowych niskich satelitów. Przedstawione rezultaty weryfikują wyniki uzyskane dla satelitów *LAGEOS* oraz udowadniają tezę o przydatności obserwacji laserowych niskich satelitów, takich jak *Ajisai* czy *Starlette* i *Stella* w procesie wyznaczania współrzędnych i prędkości stacji laserowych.

Orbity satelitów były wyznaczane z różnymi wariantami współczynników przyspieszeń empirycznych. Były to warianty 6- i 12-godzinne. W zależności od zastosowanego wariantu przyspieszeń empirycznych wartości orbitalnego RMS *Ajisai* wynoszą odpowiednio 1,61 i 1,98 cm. Dla *Starlette/Stella* wartości te wynoszą odpowiednio 1,15 i 1,63 cm. Różnice w uzyskanych wartościach orbitalnego RMS między *LAGEOS-ami* a *Ajisai* wynoszą od 0,9 do 2,8 mm, a między *LAGEOS-ami* a *Starlette/Stella* różnice te wahają się w granicach od 0,7 do 6,9 mm.

Do wyznaczenia współrzędnych i prędkości stacji Yarragadee, Greenbelt, Graz oraz Herstmonceux wykorzystano orbity *Ajisai* i *Starlette/Stella* wyznaczone ze współczynnikami przyspieszeń empirycznych szacowanymi co 6 i 12 godzin. Zastosowanie wariantu ze współczynnikami przyspieszeń empirycznych wyznaczanymi co 12 godzin powoduje wzrost wartości całkowitych stabilności współrzędnych stacji od 2 do 6 milimetrów w stosunku do wariantu ze współczynnikami przyspieszeń empirycznych wyznaczanymi co 6 godzin. Zaobserwowano także, że współrzędne stacji wyznaczone z orbit *Starlette/Stella* są w znacznie lepszej zgodności ze współrzędnymi stacji w układzie ITRF2005 niż współrzędne stacji wyznaczone z orbity *Ajisai*. Dwukrotne zwiększenie interwału wyznaczania współczynników przyspieszeń empirycznych z 6 do 12 godzin powoduje wzrost średniego błędu kwadratowego wyznaczanych współrzędnych stacji od 9,3 do 17,1 mm (*Ajisai*) i od 1,0 do 3,9 mm (*Starlette/Stella*). Wartości prędkości stacji Yarragadee, Greenbelt, Graz oraz Herstmonceux wyznaczone z orbity *Ajisai* różnią się od wartości prędkości tych stacji wyznaczonych z orbit *Starlette/Stella*. Różnice te wahają się w granicach od 0,5 do 4,5 mm/rok. W przypadku *Ajisai* 12-godzinny interwał wyznaczania współczynników przyspieszeń empirycznych nie zmienia praktycznie uzyskiwanych rezultatów w stosunku do wyników dla wariantu z przyspieszeniami wyznaczanymi co 6 godzin. W przypadku *Starlette/Stella* różnice te są już widoczne i wahają się

w granicach 0,2-2,9 mm/rok. Wysoka dokładność i precyzja obserwacji laserowych, dokładniejsze modele pola grawitacyjnego Ziemi pozwalają zredukować liczbę współczynników empirycznych o połowę zarówno w przypadku *Ajisai* (z 504 do 252), jak i *Starlette/Stella* (z 720 do 360). Ponadto otrzymane wartości prędkości stacji policzone z orbit *Ajisai* oraz *Starlette/Stella* są porównywalne z wynikami otrzymanymi dla modelu geologicznego NNR-NUVEL1A. Różnice wartości prędkości w płaszczyźnie horyzontalnej stacji Yarragadee, Greenbelt, Graz oraz Herstmonceux, w zależności od częstości wyznaczania współczynników przyspieszeń empirycznych, wynoszą od 0,1 do 0,7 mm/rok dla *Ajisai*, a dla *Starlette/Stella* są o kilka milimetrów większe, ale nie przekraczają 4,9 mm/rok.

Zaprezentowane wyniki udowadniają tezę o przydatności obserwacji laserowych niskich satelitów, takich jak *Ajisai*, *Starlette*, *Stella* w procesie wyznaczania współrzędnych i prędkości stacji obserwacyjnych. W przyszłości powinny powstać nowe kampanie i projekty, wykorzystujące na znacznie szerszą skalę obserwacje niskich satelitów do badań nad zmianami współrzędnych stacji, ich przemieszczaniem się wraz z płytami tektonicznymi, globalnymi i lokalnymi badaniami ruchów skorupy ziemskiej i oceanów.

Artykuł wpłynął do redakcji 29.12.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w kwietniu 2009 r.

LITERATURA

- [1] G. BIANCO, R. DEVOTI, M. FERMI, V. LUCERI, P. RUTIGLIANO, C. SCIARRETTA, *Estimation of low degree geopotential coefficients using SLR data*, Planet Space Sci., 46, 11/12, 1997, 1633-1638.
- [2] M. K. CHENG, C. K. SHUM, R. J. EANES, B. E. SHUTZ, B. D. TAPLEY, *Long-period Perturbations in Starlette Orbit and Tide Solution*, Journal of Geophysical Research, 95, B6, 1990, 8723-8736.
- [3] M. K. CHENG, C. K. SHUM, R. J. EANES, B. E. SCHUTZ, B. D. TAPLEY, *Observed temporal variations in the Earth's gravity field from 16-years of Starlette orbit analysis*, Processing XX General Assembly of the IUGG, IAG Symp., 3, Vienna, Austria, August, 1991.
- [4] C. DEMETS, G. GORDON, D. F. ARGUS, S. STEIN, *Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions*, Geophysical Research Letters, 21, 1994, 2191-2194.
- [5] G. KIRCHNER, D. KUCHARSKI, E. CRISTEA, W. HAUSLEITNER, *Spin Parameters of GP-B and AJISAI with Kilohertz SLR Data*, 15th International Workshop on Laser Ranging, Canberra, Australia, October 15-20, 2006.
- [6] M. KUŹMICZ-CIEŚLAK, *Wyznaczanie parametrów geofizycznych oraz parametrów orbitalnych sztucznych satelitów Ziemi na podstawie pomiarów satelitarnym dalmierzem laserowym*, rozprawa doktorska, Uniwersytet im. A. Mickiewicza, Wydział Fizyki, Poznań, 2003.
- [7] P. LEJBA, S. SCHILLAK, E. WNUK, *Determination of orbits and SLR stations' coordinates on the basis of laser observations of the satellites Starlette and Stella*, Advances in Space Research, 40, Issue 1, 2007, 143-149.
- [8] P. LEJBA, *Wyznaczanie orbit niskich satelitów z obserwacji laserowych dla potrzeb badań geodynamicznych*, rozprawa doktorska, Centrum Badań Kosmicznych PAN, Warszawa, 2008.

- [9] J. J. McCARTHY, D. MOORE, S. LUO, S. B. LUTHCKE, D. E. PAVLIS, S. ROWTON, L. S. TSAOUSI, *GEODYN-II*, vol. 1-5, Hughes STX Systems Corporation, Greenbelt, MD, 1993.
- [10] D. D. McCARTHY, *IERS Conventions 1996*, Paris, 1996.
- [11] H. MONTAG, CH. REIGBER, W. SOMMERFELD, G. DICK, *Station coordinates and earth rotation parameters based on Lageos laser ranging data*, IERS Technical Note, 17, Paris, 1994, L25-L30.
- [12] H. MÜLLER, *The potential of Starlette and Ajisai for station positioning*, ILRS Fall Workshop, Grasse, France, September 25-28, 2007.
- [13] T. OTSUBO, J. AMAGAI, H. KUNIMORI, *Measuring Ajisai's Spin Motion*, Processing of the 11th International Workshop on Laser Ranging, Deggendorf, Germany, September 21-25, 1998, p. 674.
- [14] T. OTSUBO, G. M. APPLEBY, *System-dependent center-of-mass correction for spherical geodetic satellites*, Journal of Geophysical Research, 108(B4), 2201, doi:10.1029/2002JB00-2209, 2003.
- [15] E. C. PAVLIS, *Some ideas about the extension of the ILRS products in the near future*, ILRS Fall Workshop, Grasse, France, September 25-28, 2007.
- [16] CH. REIGBER, CH. FOERSTE, P. SCHWINTZER, F. H. MASSMANN, H. MUELLER, *Earth Orientation and Station Coordinates Computed from 11.7L5 Years of LAGEOS Observations (DGFII 92 L01)*, [in:] P. Charlot (ed.): *Earth orientation, reference frames and atmospheric excitation functions submitted for the 1991 IERS Annual Report*, IERS Technical Note, 11, Central Bureau of IERS, 83-88, Paris, 1992.
- [17] C. REIGBER, R. SCHMIDT, F. FLECHTNER, R. KOENIG, U. MEYER, K. H. NEUMAYER, P. SCHWIATZER, S. Y. ZHU, *An Earth gravity field model complete to degree and order 150 from GRACE: EIGEN-GRACE02S*, Journal of Geodynamics 39, 1, 2005, 1-10.
- [18] S. SCHILLAK, E. WNUK, *The SLR stations coordinates determined from monthly arcs of LAGEOS-1 and LAGEOS-2 laser ranging in 1999-2001*, Advances in Space Research, 31, 2003, 1935-1940.
- [19] S. SCHILLAK, *The comparison of the reference frames ITRF2000 and ITRF2005 in the determination SLR station positions and velocities*, European Geosciences Union, General Assembly 2008, Vienna, Austria, April 13-18, 2008.
- [20] B. E. SCHUTZ, M. K. CHENG, R. J. EANES, C. K. SHUM B. D. TAPLEY, *Geodynamic results from Starlette orbit analysis*, [in:] *Contribution of Space Geodesy to Geodynamics: Earth Dynamics*, Geodynamics, Series 24, AGU, Washington D.C., 1993.
- [21] A. SENGOKU, *A plate motion study using Ajisai SLR data*, Earth, Planets and Space, 50, 8, 1998, 611-627.
- [22] A. T. SINCLAIR, G. M. APPLEBY, J. XIA, *Determination of Earth Rotation and Station Coordinates from LAGEOS Data*, In *The Earth's Rotation and Reference Frames for Geodesy and Geodynamics*, IAU, 1988.
- [23] D. E. SMITH, R. KOLENKIEWICZ, P. J. DUNN, M. H. TORRENCE, *Determination of Station Coordinates from LAGEOS*, *The Use of Artificial Satellites for Geodesy and Geodynamics*, 1979, 162-172.

P. LEJBA, S. SCHILLAK

Determination of SLR station coordinates and velocities based on laser observations of low satellites

Abstract. In this work, the results of satellites orbit determination of three low satellites *Ajisai*, *Starlette*, and *Stella* on the laser observations of 14 SLR stations performed in the years 2001-2005

were presented. The geocentric and topocentric positions and velocities in horizontal plane and in 3-D space of four stations Yarragadee (7090), Greenbelt (7105), Graz (7839), and Herstmonceux (7840) were determined. The received results were compared with the results obtained for *LAGEOS* and with the ITRF2005 and the geological model NNR-NUVEL1A. All calculations have been made assuming the model of the Earth gravity field EIGEN-GRACE02S. The results presented in this work show that the laser data of low satellites such as *Ajisai*, *Starlette* or *Stella* can be successfully applied for determination of the SLR station positions and velocities.

Keywords: satellite geodesy, geodynamics, satellite laser ranging (SLR), orbit determination of satellites

Universal Decimal Classification: 528

