

Jakie były zasadnicze zmiany w geodezji w końcu XX wieku?

Pomijając ogólny postęp obejmujący szybki rozwój technologii komputerowych i systemów informacyjnych oraz tendencję do miniaturyzacji sensorów i systemów, można by wymienić szereg osiągnięć, a wśród nich cztery poniższe:

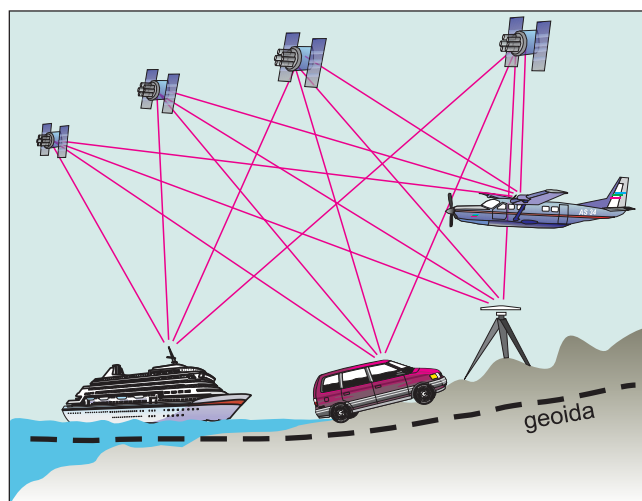
- Zrealizowano układ odniesienia o niespotykanej dotąd w geodezji dokładności, umożliwiający pomiar globalnych i regionalnych zmian Ziemi oraz modelowanie ich w czasie i przestrzeni.
- Powstała możliwość pracy systemów pomiarowych bezpośrednio w układzie odniesienia, poprzez związanie ich z orbitami satelitów. W tej sytuacji klasyczne sieci naziemne straciły sens.
- Po raz pierwszy w historii geodezji pojawiła się możliwość stworzenia globalnego wysokościowego układu odniesienia.
- Ukształtowała się tendencja do tworzenia zintegrowanych systemów pomiarowych charakteryzujących się wysokim stopniem automatyzacji pomiaru i opracowania wyników.

## Czy satelity zastąpią klasyczn

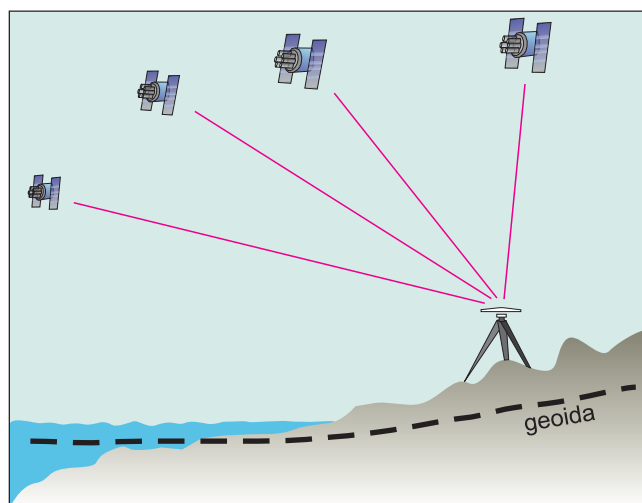
# Świat ge

### ● Klasyczne spojrzenie na geodezję

Ponad 100 lat temu Friedrich Robert Helmert zdefiniował geodezję jako naukę zajmującą się pomiarami i opracowaniem map powierzchni Ziemi. Chociaż od tego czasu metody geodezji zmieniły się znacząco, definicja ta jest wciąż aktualna i wymaga tylko rozszerzenia o problematykę zmian powierzchni Ziemi w czasie.



Rys. 1. Pomiary powierzchni Ziemi statycznymi i kinematycznymi metodami satelitarnymi



Rys. 2. Wyznaczenie pozycji pojedynczego punktu

# e sieci geodezyjne, a mapy będą robiły się same? (część I)

# odety się zmienia

**ADAM ŁYSZKOWICZ**

Metody i techniki pomiarowe uległy w ciągu ostatnich 25 lat przeobrażeniom i proces ten jest ciągle kontynuowany (rys. 1). Widoczny jest wyraźny postęp w kinematycznych metodach tworzenia map i badaniach pola siły ciężkości Ziemi, do czego wrócimy w dalszej części artykułu.

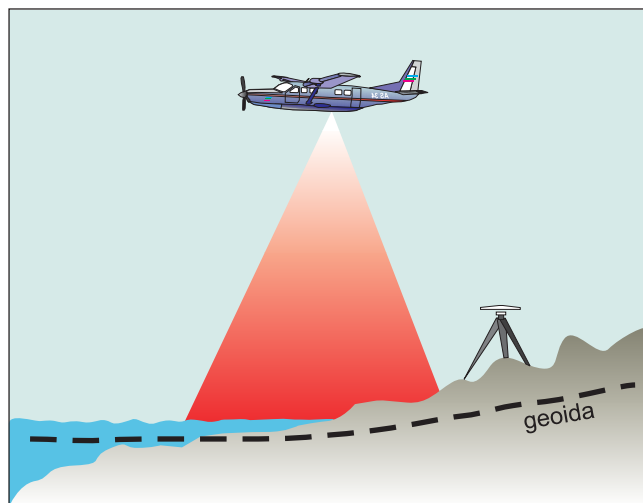
Wspomniana na wstępie, niezwykle prosta, helmertowska definicja geodezji była odmiennie interpretowana przez różne środowiska zajmujące się pomiarami i opracowaniem map powierzchni Ziemi. Wynikało to przede wszystkim z faktu, że powierzchnię Ziemi tworzą nie tylko lądy, ale również morza i oceany (około 70%). Zespoły zajmujące się pomiarami mórz i oceanów stają wobec innych problemów niż te, które zajmują się pomiarami na lądzie, chociaż i wśród tych ostatnich jest duże zróżnicowanie co do koncepcji pomiaru. Spróbujemy wyjaśnić te różnice.

Rysunek 2 ukazuje typowy problem geodezyjny, a mianowicie precyzyjne określenie położenia punktu na powierzchni Ziemi. W takim podejściu na pierwszy plan wysuwa się solidna i trwała stabilizacja punktu i jego precyzyjne wyznaczenie. Do wyznaczenia w jednolitym układzie współrzędnych dużej liczby takich punktów na znacznych obszarach globu ziemskiego konieczne jest utworzenie sieci geodezyjnych. Jeśli zadanie to zostanie zrealizowane, punkty takiej sieci są wykorzystywane do tworzenia sieci lokalnych. W wyniku takich zabiegów powierzchnia Ziemi jest reprezentowana z zadowalającą dokładnością przez mniej lub bardziej regularnie rozłożone grupy punktów. Dopiero wówczas można przystąpić do prac nad pomiarem szczegółów terenowych i opracowaniem map danego regionu. W tym przypadku obowiązuje zasada, że im wyższa dokładność punktu, tym wyższa dokładność mapy.

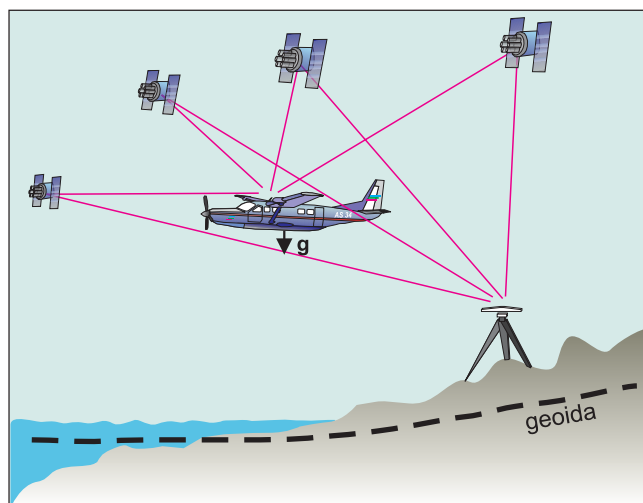
Rysunek 3 ilustruje pogląd fotogrametrów na temat zasad sporządzania map. Wykorzystuje się do tego zdjęcia fotograficzne powierzchni Ziemi i zamiast szczegółów terenowych mierzone są piksele na zdjęciach. Im mniejszy jest wymiar pikseli, a jednocześnie geometria zdjęć bardziej jednolita, tym uzyskane tą metodą mapy są lepsze. Pomiar poszczególnych obiektów topograficznych jest możliwy z wysoką dokładnością, pod warunkiem że zdjęcie zostało właściwie zorientowane. Orientację uzyskuje się poprzez naziemne punkty kontrolne (fotopunkty). Okazuje się, że klasyczne punktowe pomiary geodezyjne są w pełni komplementarne z tym, co mierzą fotogrametry. Geodeci dostarczają dokładnych informacji o położeniu fotopunktów w określonym układzie współrzędnych, które są następnie wykorzystywane przez fotogrametrów do orientacji zdjęć lotniczych.

Na rysunku 4 przedstawiono pogląd geodetów, którzy traktują powierzchnię Ziemi jako rozwiązanie zagadnienia brzegowego z pomiarów grawimetrycznych. Pogląd ten jest bliski definicji

geodezji podanej przez Helmuta Brunsa w 1878 roku: celem geodezji jest wyznaczenie funkcji potencjału siły ciężkości  $W(x, y, z)$ . Potencjał  $W$  jest zdefiniowany jako funkcja pozycji  $(x, y, z)$ . Jeśli zatem  $W(x, y, z)$  jest znane z wystarczającą dokładnością, to wówczas i powierzchnia Ziemi może być wyznaczona z wystarczającą dokładnością, a tym samym można stworzyć mapę. W praktyce konieczne jest wyznaczenie funkcji  $W(x, y, z)$



Rys. 3. Tworzenie map powierzchni Ziemi z pomiarów fotogrametrycznych



Rys. 4. Wyznaczenie powierzchni Ziemi jako rozwiązanie zagadnienia brzegowego z pomiarów grawimetrycznych

z punktowych pomiarów grawimetrycznych (anomalia grawimetryczne, odchylenia pionu itd.). Jakość tych danych, ich gęstość i jednorodność w zasadniczy sposób rzutują na dokładność wyznaczenia powierzchni. Innymi słowy, im bardziej gęste są dane grawimetryczne, tym dokładniej wyznaczana jest powierzchnia Ziemi. Obecnie w skali globalnej najlepsze modele geopotencjalne, np. takie jak EGM96, są co najmniej o dwa rzędy mniej dokładne niż położenie punktów uzyskiwane z pomiarów GPS i innych metod satelitarnych.

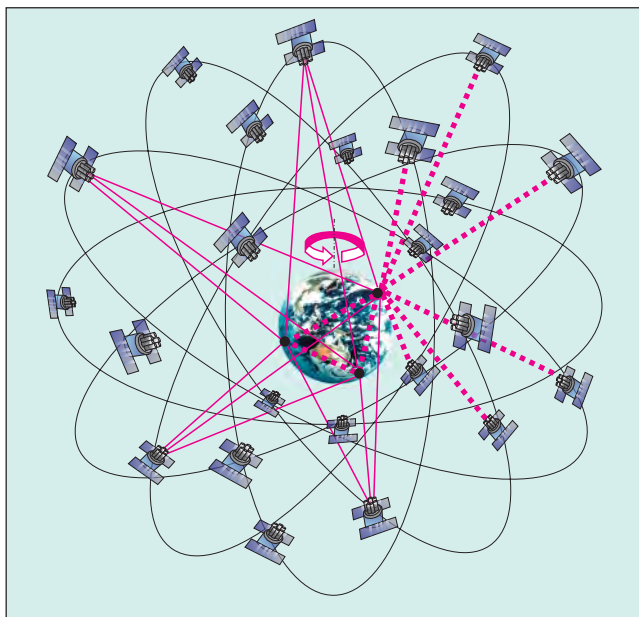
Wszystkie trzy klasyczne metody geodezji mają jedną wspólną wadę, a mianowicie dostarczają informacji o powierzchni Ziemi w skali globalnej poprzez łączenie (łatanie) pomiarów lokalnych wykonywanych w różnych okresach, różnymi technikami i przez różne agencje. W rezultacie znaczne obszary globu ziemskiego nie są w ogóle pomierzone, dotyczy to zwłaszcza mórz i oceanów. Do poprawienia tej sytuacji niezbędny jest jednolity globalny układ współrzędnych, jak również metoda transformacji lokalnych pomiarów powierzchni Ziemi do takiego układu. Czynione obecnie w Europie wysiłki w celu ujednoczenia różnych układów, modeli topograficznych i geoid dają pogląd na skalę trudności i pracochłonności tego procesu na kontynencie, który i tak należy do najlepiej pomierzonych obszarów globu ziemskiego.

## ● Układ odniesienia

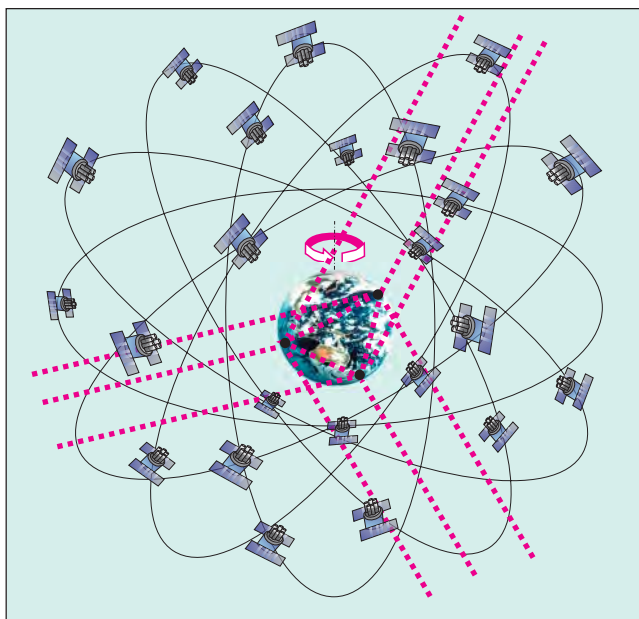
Jedną z zalet wykorzystania metod satelitarnych w geodezji jest możliwość stworzenia bardzo dokładnego układu odniesienia. Środek masy Ziemi, jak i kierunki osi konwencjonalnego ziemskiego układu odniesienia (ang. *Conventional Terrestrial Reference Frame – CTRF*) mogą być wyznaczone z względną dokładnością na poziomie rzędu  $10^{-9}$ , co znacznie przewyższa dokładności współczesnych metod wyznaczania pozycji. Porównując obecną sytuację z tą sprzed ćwierćwiecza, widzimy, że dokładność realizacji układu odniesienia wzrosła o dwa rzędy wielkości.

Konwencjonalny ziemski układ (CTRF) został zrealizowany poprzez dowiązanie go do pozycji takich fundamentalnych stacji, na których prowadzone są ciągle obserwacje. Stacje te mogą obserwować zarówno satelity, jak i pozaziemskie źródła promieniowania radiowego. Wykorzystanie tylko jednej z wymienionych technik obserwacyjnych powoduje niewielkie przesunięcie w realizacji układu. Wzajemne porównanie niezależnie wyznaczonych konwencjonalnych ziemskich układów odniesienia umożliwia ocenę i eliminację tych drobnych przesunięć. Takie porównanie wykonane przez *International Earth Rotation Service (IERS)* wykazało, że różnice między trzema układami odniesienia są na poziomie kilku milisekund łuku (jedna milisekunda łuku jest równa w przybliżeniu 3 cm na powierzchni Ziemi). Tak więc stabilność obecnych globalnych układów odniesienia jest już na takim poziomie, że muszą być uwzględniane zmiany w czasie współrzędnych stacji fundamentalnych. Dlatego też serwis prowadzony przez IERS dotyczący „konserwacji” układu odniesienia ITRF94 uwzględnia model ruchów płyt tektonicznych. Planuje się rozbudowanie tego modelu o informacje nt. regionalnych ruchów skorupy ziemskiej. Dwadzieścia pięć lat temu takie traktowanie układu odniesienia nie było możliwe. Istniejące wówczas układy były zbyt mało dokładne i zbyt mało stabilne, aby na podstawie pomiarów można było wyznaczać tak małe zmiany, jak te spowodowane ruchami skorupy ziemskiej.

Obok ITRF94, który w celu wyznaczenia układu odniesienia wykorzystuje kombinację wszystkich możliwych technik obserwacyjnych, istnieją liczne układy odniesienia, które wyko-



Rys. 5. Stacje śledzące versus satelity GPS na orbitach



Rys. 6. Orientacja układu GPS poprzez pomiary VLBI

rzystują tylko jedną z tych technik. Takim przykładem jest powszechnie znany układ WGS84, który bazuje jedynie na kilku stacjach fundamentalnych obserwujących satelity GPS, albo sieć *International GPS Service (IGS)*, w której obecnie prawie 200 stacji prowadzi tylko obserwacje GPS. IGS została wykorzystana do wyznaczenia, a następnie do opracowania regionalnych modeli ruchów skorupy ziemskiej. Podobne układy odniesienia zostały stworzone dla sieci stacji laserowych i stacji Very Long Baseline Interferometry (VLBI). Każdy z tych układów odniesienia posiada swój własny zestaw definiujących stacji fundamentalnych.

Na rysunku 5 przedstawiono schematycznie słabości układu odniesienia zrealizowanego na podstawie tylko jednego typu obserwacji (w tym przypadku GPS). W tym przykładzie sieć stacji śledzących GPS jest ograniczona tylko do trzech punktów. Położenie każdego z nich może być określone z pomiaru

do co najmniej czterech satelitów, co na rysunku pokazano liniami przerywanymi. W niniejszym przykładzie trzeba było przyjąć, że położenia satelitów w momencie pomiaru są znane z wysoką dokładnością. W rzeczywistości jest nieco inaczej. Do wyliczenia precyzyjnej orbity satelity wymagana jest dobra znajomość położenia stacji śledzącej. Z drugiej strony, do uzyskania precyzyjnych współrzędnych stacji naziemnej wymagana jest precyzyjna orbita satelity. Zagadnienie to jest rozwiązywane na drodze kolejnych iteracji. Wyniki są wspaniałe, gdyż pomiary są prowadzone w sposób ciągły i charakteryzują się wysoką dokładnością. Jednak opisana metoda iteracji posiada pewne minusy. Do układów odniesienia wyznaczonych w ten sposób zakradają się małe błędy skali i orientacji. Dlatego też układy odniesienia uzyskane tylko z jednej techniki obserwacyjnej wymagają dalszego doskonalenia.

W tym celu stacje fundamentalne, na których prowadzi się obserwacje więcej niż jedną techniką, są włączane do określonej sieci, aby w ten sposób wyznaczyć parametry transformacji między tą siecią a siecią ITRF94. Na rysunku 6 w schematyczny sposób pokazano, jak orientacja układu odniesienia uzyskanego z pomiarów GPS może być udoskonalona poprzez pomiary VLBI. Sieć naziemnych stacji śledzących, podobnie jak poprzednio, składa się z trzech punktów, na których są wykonywane jednocześnie obserwacje VLBI i GPS – linia przerywana pomiędzy stacjami a kwazarami\* oznacza obserwacje VLBI. To one dają precyzyjną orientację układu CTRF w ramach inercjalnego układu odniesienia. Metoda ta została z powodzeniem zastosowana do układu WGS84. Dane w tabeli (zaczepnięte z pracy Slater, 1977) pokazują uzyskane wielkości przesunięcia układu WGS84 (w cm) i kąty obrotu osi (w milisekundach łuku) między WGS84 a ITRF94. Zarówno parametry transformacji, jak i ich błędy średnie pokazują, że różnice między obydwoma układami są na poziomie  $10^{-9}$ .

Układ GPS o tak wysokiej dokładności i stabilności umożliwia rozwiązanie wszystkich praktycznych zadań geodezji. Obecnie jedynym problemem jest znalezienie sposobu na transformację klasycznych sieci do stworzonego globalnego układu odniesienia. Jak pokazały ostatnio przeprowadzone w Europie kampanie EUREF i EUVN, zadanie to nie jest łatwe. Podczas gdy globalny układ odniesienia jest spójnym trójwymiarowym ukła-

Przesunięcie układu [cm]	Kąty obrotu osi układu [milisekundy łuku]
$\Delta x = 0,1 \pm 2,9$	$\epsilon = 0,0 \pm 0,3$
$\Delta y = 0,2 \pm 2,3$	$\psi = 0,4 \pm 0,2$
$\Delta z = 0,1 \pm 1,4$	$\omega = 0,6 \pm 0,4$
współczynnik skali $s = -0,5 \times 10^{-9}$	
błąd współczynnika skali $= \pm 0,2 \times 10^{-9}$	

Tabela. Parametry transformacji WGS84 na ITRF94 wskazują na wysoką jakość układu GPS

dem współrzędnych, klasyczne sieci poziome i pionowe są od siebie zupełnie odseparowane. Nie posiadają one wspólnych punktów (lub posiadają ich tylko kilka), bazują na różnych powierzchniach odniesienia i dlatego są niespójne.

W celu przetransformowania wysokości z klasycznej sieci wysokościowej do globalnego układu odniesienia, konieczna jest znajomość geoidy z odpowiednio wysoką dokładnością. Wróćmy jeszcze do tego problemu.

W celu przetransformowania poziomych sieci do globalnego układu odniesienia, w pierwszym kroku konieczne jest usunięcie zniekształcenia (dystorsji) sieci, a następnie dokonanie stosunkowo prostej geometrycznej transformacji. Zniekształcenie sieci spowodowane jest wieloma czynnikami, takimi jak: procedury obserwacyjne, niewystarczająca znajomość geoidy użytej do obliczenia redukcji i geodynamiczne zmiany powierzchni Ziemi, jakie zaszły od chwili utworzenia sieci. Odpowiedzi na pytanie, czy będzie można dokonać (z wystarczającą dokładnością) transformacji klasycznych sieci geodezyjnych do globalnego układu odniesienia, w tej chwili jeszcze nie znamy. Pokażą to prowadzone obecnie studia. Jeśli uzyskamy pozytywną odpowiedź, wówczas ogromne ilości cennych danych obserwacyjnych zostaną zgromadzone i udostępnione do dalszych badań naukowych. Jednak z powodów omówionych poniżej, ich praktyczna przydatność jako osnowy terenowej będzie znacznie ograniczona.

## ● Wyznaczanie pozycji w dobie pomiarów GPS

Chociaż obecnie GPS jest intensywnie wykorzystywany jako narzędzie pomiarowe do rozwiązywania wielu zadań geodezyjnych, to jest postrzegany przede wszystkim jako niezwykle precyzyjna metoda względnego wyznaczania pozycji. Wynikiem

► str. 14

**CHCESZ MIEĆ PROFESJONALNY PROGRAM GEODEZYJNY W TERENIE ?**

**POTRZEBNY CI PRZENOŚNY KOMPUTER W MIEJSCU PRACY ?**

**JEST CI NIEZBĘDNA MAPA NUMERYCZNA ?**

**POTRZEBUJESZ REJESTROWAĆ DANE ?**

**ROZWIĄZANIEM JEST **TerMap****




**MAPTERNET**

tel.: (022) 654-54-47, 0600-365-276  
www.mapternet.com.pl, e-mail: mapternet@mapternet.com.pl

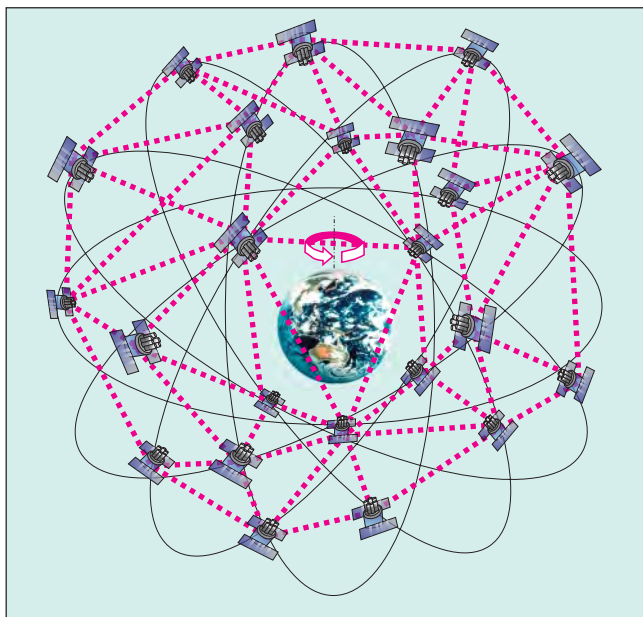
pomiarów GPS są odległości między punktami i z tego powodu system jest traktowany jako wyrafinowany tachimetr elektroniczny na większe odległości. Oznacza to, że klasyczne sieci z solidnie zastabilizowanymi punktami straciły swoje znaczenie, ponieważ za pomocą GPS można wyznaczyć dokładną pozycję punktu w stosunkowo krótkim czasie. Jednak uzyskiwane dokładności nie są wystarczające do wszystkich zadań. Aby GPS mógł stać się standardowym narzędziem dla większości zastosowań, należy zwiększyć dostępność precyzyjnych orbit, znacznie lepiej modelować lub eliminować wpływy atmosferyczne, udoskonalić technologię zegarów i w dalszym ciągu rozwijać algorytmy wyznaczania pozycji w czasie rzeczywistym (ang. *real-time algorithm*). Wiele z tych zagadnień zostało omówionych i przedstawionych w postaci zaleceń w raporcie NAPA/NCR z 1995 roku. Szereg dalszych informacji można znaleźć w fachowej literaturze.

Skupmy się na przewidywanym postępie w wyznaczaniu precyzyjnych orbit satelitów GPS. Podstawową różnicą między GPS a tradycyjnymi metodami wyznaczania pozycji jest zastąpienie osnowy terenowej przez „osnowę satelitarną” (ang. *sky control*). Obecnie zamiast nawiązywać pomiary geodezyjne do punktów osnowy terenowej, można nawiązać je do satelitów, których pozycje orbitalne są wyznaczone z dużą precyzją w układzie odniesienia. Tak się dzieje, gdyż satelity są w sposób ciągły obserwowane poprzez stacje śledzące, które definiują układ odniesienia. Na obliczenie pozycji satelity osrodek obliczeniowy potrzebuje pewnego czasu. Im szybciej zadanie to jest realizowane, tym szybciej dostajemy pozycję satelity. Dokładność informacji o orbicie satelity zależy więc od szybkości obliczeń orbity i od liczby stacji śledzących. Zazwyczaj orbita jest ekstrapolowana na 36 godzin (ang. *broadcast ephemeris*), jej dokładność zmniejsza się w miarę wpływu czasu, co oznacza, że dokładność informacji o układzie przechowywana w pamięci satelitów staje się coraz gorsza, a tym samym coraz gorsze jest wyznaczenie pozycji w czasie rzeczywistym (ang. *real-time*). Wysoką dokładność wyznaczenia pozycji można uzyskać tylko w sytuacji, gdy po pewnym czasie z obserwacji satelitów GPS wyliczane są i publikowane precyzyjne orbity. Dokładność ekstrapolowanej orbity (*broadcast ephemeris*) oceniana jest na 2 m, podczas gdy dokładność precyzyjnej orbity zazwyczaj jest lepsza niż 0,2 m. Dokładność ekstrapolowanej orbity może być znacznie poprawiona poprzez skrócenie interwału czasu z 36 do kilku godzin. Obecnie nie jest to problem dla szybkich komputerów. Natomiast pewna trudność wiąże się z szybką dystrybucją wyników obliczeń. Na szczęście wprowadzanie nowych informacji o orbicie do komputera satelity możliwe jest częściej niż co 12 godzin.

**WYPOŻYCZALNIA**  
Tachimetrów elektronicznych i niwelatorów cyfrowych  
Geodimeter® Elta® DiNi®



**Geodezja Tadeusz Nadowski**  
43-100 Tychy, ul. Rybna 34, Tel. (0 32) 227 11 56, fax (0 32) 327 47 75  
e-mail: info@nadowski.geo.pl http://www.nadowski.geo.pl



Rys. 7. „Osnowa satelitarna” utworzona z pomiarów tylko między satelitami GPS

Innym podejściem umożliwiającym ułożenie orbit jest dodatkowe wykorzystanie wzajemnych pomiarów pomiędzy satelitami GPS (ang. *crosslinks*). Na rys. 7 pokazano w zarysie tę ideę.

Podczas gdy obserwacje z Ziemi do satelitów w istotny sposób zredukują błąd radialny orbity, to obserwacje między satelitami powinny znacznie zredukować błąd podłużny orbity. Z technicznego punktu widzenia realizacja pomiarów między satelitami jest możliwa dla satelitów generacji IIR i zostanie uaktywniona, gdy na orbitach znajdzie się dostateczna ich liczba.

Obecna tendencja w tworzeniu kontynentalnych lub aktywnych sieci GPS jest przejściowa. Od koncepcji względnego wyznaczania pozycji, która wymaga odpowiednio gęstej osnowy terenowej (DGPS), zmierzamy do koncepcji bezwzględnego wyznaczania pozycji, która będzie bazowała tylko na informacjach orbitalnych i nie będzie wymagała żadnej osnowy terenowej.

Oczywiście nie należy spodziewać się, że GPS rozwiąże wszystkie problemy pomiarów geodezyjnych. Jak każda inna technika pomiarowa ma on swoje wady i zalety. Niektóre z zalet zostały już przedstawione. Ograniczeniem jest konieczność „widoczności” pomiędzy satelitą a anteną odbiornika GPS, która zazwyczaj jest bardzo utrudniona na terenach zabudowanych (miasta), terenach leśnych i w górach o stromych zboczach. Tak więc w wielu sytuacjach inne metody pomiarów geodezyjnych będą wciąż niezastąpione ze względu na swą ekonomikę i skuteczność. Zadaniem praktyków będzie wybór metod odpowiednich do rozwiązania konkretnego zadania.

cdn.

**Prof. Adam Łyszkowicz** jest zatrudniony na stanowisku profesora w Katedrze Geodezji Szczegółowej Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie

\*Kwazar – obiekt gwiazdopodobny, astronomiczny charakteryzujący się małymi rozmiarami kątowymi (jak gwiazda) oraz kilkoma (lub wszystkimi) z następujących cech: wyraźnie przesunięty ku czerwieni widmem (jak bardzo odległa galaktyka), nadwyżką promieniowania w ultrafiolecie i silnym promieniowaniem radiowym oraz zmiennością promieniowania. Kwazary są interpretowane jako bardzo odległe jądra aktywnych galaktyk.