



## GPS dla początkujących – część I

# Wskazówki prosto z nieba

ADAM ŁYSZKOWICZ

Od stuleci podstawowy problem geodezji sprowadza się do zagadnienia wyznaczania pozycji punktu na powierzchni Ziemi. W tym celu stosowano różne metody, ale żadna z nich nie była w stanie zapewnić precyzyjnego określenia pozycji zarówno w dzień, jak i w nocy, w dowolnych warunkach atmosferycznych i w dowolnym punkcie globu ziemskiego.

Taka sytuacja utrzymywała się do momentu powstania GPS (Global Positioning System). Formalnie nazwa systemu brzmi NAVSTAR GPS (NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System).



Rys. 1. GPS wyznacza pozycję w dowolnych warunkach atmosferycznych i w dowolnym punkcie globu

Wyznaczanie pozycji z gwiazd jest znane ludzkości od tysięcy lat, a ponieważ satelity GPS można przyjąć za sztuczne gwiazdy skonstruowane przez człowieka, tak więc GPS nie jest

zupełnie nową ideą z wyjątkiem tego, że obecnie obserwator zamiast spoglądać na satelity nasłuchuje ich radiowych sygnałów. Dodatkowo należy przypomnieć, że GPS nie jest pierwszym systemem tego rodzaju. Jak wiadomo, pierwszym skutecznie działającym systemem nawigacyjnym był używany przez ponad dwadzieścia lat dopplerowski TRANSIT.

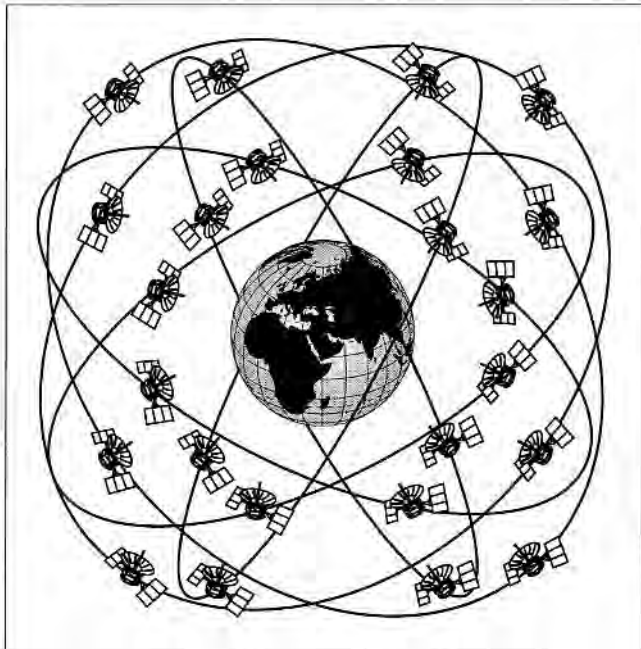
GPS został stworzony i jest używany przez Departament Obrony Stanów Zjednoczonych. Podstawowym zadaniem tego systemu jest dostarczanie pozycji dla potrzeb wojsk, szczególnie w okresie prowadzenia działań wojennych. U uruchomienie tego idealnego systemu nawigacyjnego było kosztownym przedsięwzięciem. Amerykańscy podatnicy wyłożyli kwotę rzędu 10 miliardów dolarów na sfinansowanie prac dotyczących konstrukcji, uruchomienia i utrzymania w ruchu GPS.

### Podstawowe składniki GPS

GPS charakteryzuje się trzema cechami, a mianowicie:

- po pierwsze, oczywistą sprawą jest, że system ten musi składać się z pewnej liczby satelitów. Ten składnik systemu zwany jest *segmentem kosmicznym*,
- następnie powinniśmy mieć pewność, że wszystkie satelity działają zgodnie z naszymi życzeniami. W tym celu są one śledzone i kontrolowane przez kilka stacji obserwacyjnych na Ziemi (Colorado Springs, Wyspy Wniebowstąpienia, Hawaje, wyspa Diego Garcia i stacja na atolu Kwajalein). Ten składnik systemu zwany jest *segmentem kontroli*,
- ostatni składnik systemu jest najprostszy – to *segment użytkowników*, czyli ty czytelniku, ja sam i wszyscy, którzy korzystają z GPS.

Aby cały system działał harmonijnie, wymienione trzy segmenty muszą ze sobą współgrać jak orkiestra symfoniczna. Dyry-



Rys. 2. Konstelacja satelitów GPS

gent orkiestry (segment kontrolny) przekazuje satelitom (segmentowi kosmicznemu), co i jak powinny robić, podczas gdy użytkownicy siedzą na widowni (segment użytkowników) i nasłuchują sygnałów od satelitów.

Satelity systemu GPS to w zasadzie krążące po orbitach stacje radiowe. Na zewnątrz platformy satelity, jak mówi się w żargonie kosmicznym, umieszczone są anteny służące do wysyłania i odbierania sygnałów radiowych oraz dwa duże skrzydła. Skrzydła te pokryte są bateriami słonecznymi dostarczającymi energię elektryczną niezbędną do działania stacji radiowych. Satelita GPS ma rozmiary samochodu terenowego typu „Landrover” i waży około 800 kg.

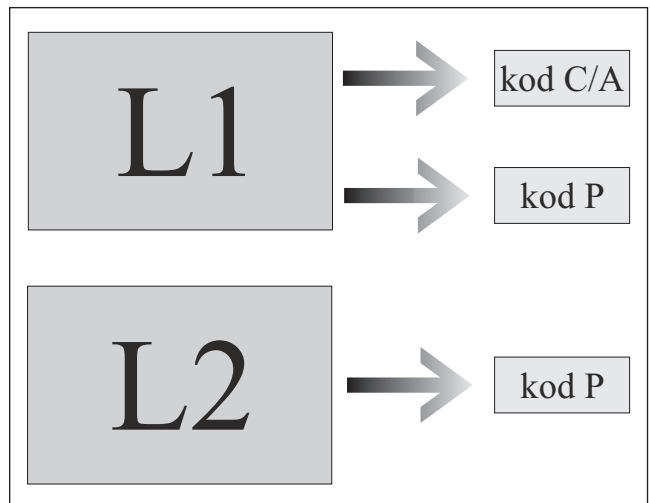
Sercem każdego satelity jest zegar atomowy. Nie oznacza to, że zegar jest zasilany przez energię atomową, ale że do pomiaru czasu wykorzystuje wibracje atomów. Zegar atomowy jest zegarem nieprawdopodobnie dokładnym, gdyż „myli” się o jedną sekundę po upływie trzech milionów lat. Satelity wykorzystują zegary atomowe do generowania kodu podobnego do kodu Morse’a, który jest następnie wysyłany przez satelitę. Aby system mógł funkcjonować poprawnie, satelity GPS muszą krążyć bezustannie po orbitach i emitować, transmitować i retransmitować różnego typu sygnały.

Obecnie system GPS składa się z mieszanki dwóch typów satelitów, a mianowicie eksperymentalnego i operacyjnego. Satelity eksperymentalne umieszczone były na orbitach w latach 1978-1985 i utworzyły tak zwany blok I. Niektóre z nich wciąż jeszcze funkcjonują na orbitach. Satelity bloku II tworzą operacyjny system GPS. Plany obejmują skonstruowanie 28 satelitów operacyjnych, z których 24 zostaną umieszczone na orbitach. Wśród tych ostatnich 3 będą krążyły po orbitach jako zapasowe aktywne satelity, przeznaczone do szybkiego zastąpienia któregośkolwiek ewentualnie uszkodzonego z konstelacji pozostałych 21 satelitów. Pozostałe cztery będą zapasowymi satelitami przechowywanymi na Ziemi. Liczba krążących po orbitach satelitów bloku II ciągle wzrasta. W końcowej fazie zostaną wprowadzone na orbity supersatelity o nazwie

blok IIRs. Ta nowa generacja jest jeszcze ciągle w fazie projektowania. Satelity GPS są umieszczone na prawie kołowych orbitach tak rozmieszczonych względem Ziemi, że tworzą wokół niej rodzaj klatki (rys. 2, obok). Można wierzyć lub nie, ale satelity te krążą po orbitach oddalonych około 20 000 km od powierzchni Ziemi (jest to mniej więcej tak daleko jak z Warszawy do Kapsztadu i z powrotem). Satelity te poruszają się po orbitach z nieprawdopodobnie dużymi prędkościami rzędu 4 km na sekundę, czyli szybciej niż pocisk karabinowy. Od momentu gdy wszystkie zostały umieszczone na orbitach, jesteśmy w stanie „zobaczyć” o dowolnej porze dnia od czterech do dziesięciu satelitów w dowolnym punkcie globu ziemskiego.

### Sygnały emitowane przez satelity GPS

Każdy z satelitów emituje dwa typy kodów: wojskowy i cywilny, a ponadto retransmituje informacje eferymerydalne, czyli dotyczące położenia satelity w przestrzeni, jak również informacje identyfikacyjne satelity i systemu. Satelity GPS emitują sygnały na dwóch różnych częstotliwościach zwanych L1 i L2. Przypomina to dawne radio Wolna Europa, które transmitowało ten sam program na różnych falach. GPS w przeciwieństwie do radia Wolna Europa w tym samym czasie przesyła na jednej częstotliwości kilka różnych informacji (programów radiowych). To z kolei przypomina raczej stację radiową nadającą kilka piosenek jednocześnie, co dla słuchającego może być torturą. Na szczęście odbiorniki GPS są tak skonstruowane, że potrafią rozdzielać poszczególne informacje.



Rys. 3. Sygnały transmitowane przez satelity na częstotliwościach L1 i L2

Emitowane przez satelitę fale radiowe L1 i L2 są z zakresu mikrofal o długościach około 19 i 24 centymetrów. Z zasad fizyki wiadomo, że fale radiowe z tego zakresu nie ulegają ani ugięciu, ani absorpcji w atmosferze ziemskiej i rozchodzą się prostoliniowo. Satelity GPS emitują dwa typy kodu binarnego, a mianowicie: kod C/A (clear access or coarse acquisition) i kod P. Jeśli przyjrzeć się z bliska takiemu kodowi, to zobaczymy ciąg zer i jedynek pojawiających się bez specjalnego porządku. Ponieważ kolejność zer i jedynek wydaje się być przypadkowa, kody te zwane są kodami pseudoprzypadkowymi (pseudo-random codes). Jeśli ktokolwiek słuchałby takich sygnałów przez słuchawki, usłyszałby pseudoszum, który po-

dobny jest do okropnego hałasu, jaki słyszymy, gdy zmieniaemy kanały odbiornika telewizyjnego.

Kod C/A przesyłany jest na częstotliwości L1 poprzez jej modulację<sup>1</sup> i jest dostępny dla wszystkich użytkowników systemu GPS. Jedna sekwencja kodu C/A jest bardzo krótka i trwa tysięczną część sekundy, następnie taka sekwencja kodu C/A jest bezustannie powtarzana. Kod P (precise) moduluje częstotliwości L1 i L2, a długość modulowanej fali jest znacznie krótsza i wynosi 30 m. Jedna sekwencja tego kodu jest bardzo długa i wynosi 267 dni, po tym czasie jest powtarzana. Ze względu na swą długość sekwencja kodu P w praktyce została podzielona na tygodniowe porcje, które zostały przydzielone do poszczególnych satelitów. W rezultacie każdy satelita transmituje inną część kodu P. Kod P nie jest kodem dostępnym dla wszystkich, lecz tylko dla uprawnionych użytkowników.

Dodatkowo każdy z satelitów retransmituje na obydwu częstotliwościach informacje eferemerydalne (dotyczące położenia satelity w przestrzeni) i informacje o satelicie i systemie GPS. W dużym uproszczeniu można powiedzieć, że każdy satelita mówi: – *moje położenie jest bla, bla, bla... i jestem zdrowy, jestem zdrowy...* – co oznacza, że pracuje poprawnie.

### Zasada wyznaczania pozycji w GPS

Zasada wyznaczania pozycji bazuje na elementarnej geometrii. Załóżmy, że czytelnik zgubił się na bezkresnych piaskach Sahary. Na szczęście posiada ze sobą podręczny odbiornik GPS, po włączeniu którego dostaje informacje o położeniu satelity i odległości do niego, np. 22 000 km. Znajomość jednej odległości nie przedstawia zbyt dużej wartości, gdyż jedynym wnioskiem, jaki może wysnuć, jest to, że znajduje się gdzieś na kuli o promieniu 22 000 km (rys. 4a, obok). Jeśli odbiornik GPS domierzył dodatkowo odległość do drugiego satelity, np. 32 000 km, wówczas przypuszczalne położenie zawęzi się do okręgu powstałego z przecięcia się powierzchni dwóch kul (rys. 4b). Jeśli zostanie pomierzona odległość do trzeciego satelity, np. 25 000 km, wówczas prawdopodobne położenie czytelnika będzie w dwóch punktach przecięcia się powierzchni trzech kul (rys. 4c). Oczywiście jeden z tych punktów będzie punktem fałszywym. To, co zostało powyżej opisane, nie jest niczym innym, jak znanym w geodezji przestrzennym wcięciem liniowym.

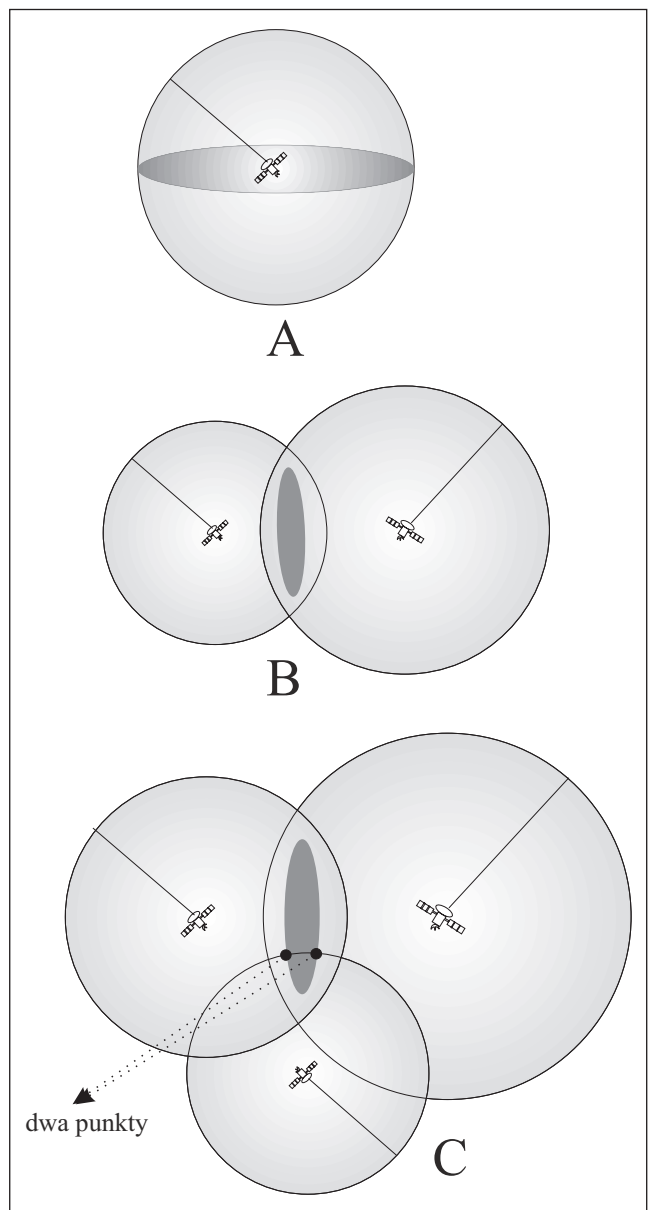
Z matematycznego punktu widzenia w celu wyznaczenia pozycji punktu należy wyznaczyć trzy niewiadome, a mianowicie: szerokość, długość i wysokość. Mamy pomierzone trzy odległości, które traktujemy jako znane obserwacje. Jednocześnie pamiętamy ze szkoły, że jeśli mamy trzy niewiadome i trzy równania, to problem wyznaczenia szerokości, długości i wysokości jest rozwiązywalny. Zagadnienie to komplikuje się, gdy dodamy następną odległość – od czwartego satelity.

### Zasada pomiaru odległości od satelity

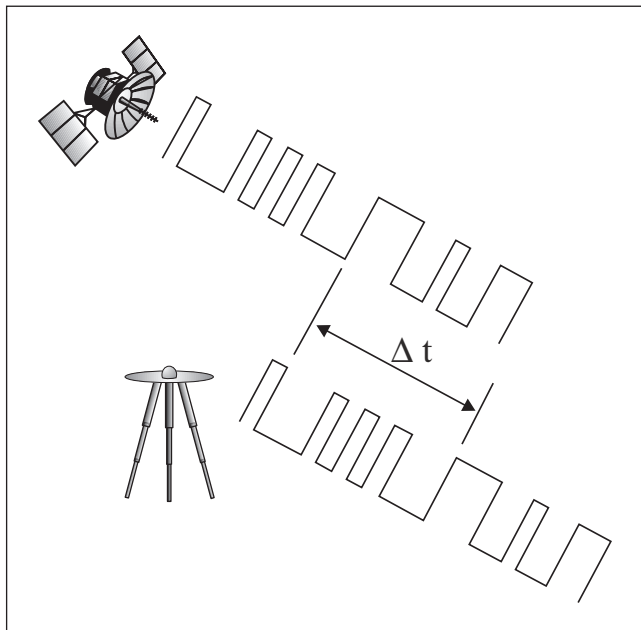
Zapewne każdy z nas pamięta równanie: odległość = prędkość x czas. Oznacza to, że jeśli samochód porusza się z prędkością 80 km/godz., to po trzech godzinach przejedzie drogę 240 km. Odległość między odbiornikiem GPS a satelitą liczona jest również z tego równania. Z tą różnicą, że fale radiowe poruszają się znacznie szybciej niż samochód, a mianowicie z prędkością około 299 274 kilometrów na sekundę. Tak więc jeśli pomnożymy czas, jaki potrzebują fale radiowe na pokonanie drogi od satelity do odbiornika, przez prędkość rozchodzenia się fal, to otrzymamy poszukiwaną odległość.

### Zasada pomiaru czasu

Czas jest mierzony za pomocą bardzo precyzyjnego stopera. Trzeba być obdarzonym dużym refleksem, aby stoperem zmierzyć czas przesyłania sygnału z satelity do odbiornika, gdyż jest on rzędu siedmiu setnych sekundy. Znacznie prościej byłoby zarejestrować moment wysłania sygnału przez satelitę i moment odbioru sygnału przez odbiornik. Różnica momentów daje poszukiwany czas podróży fali. W rzeczywistości problem pomiaru czasu jest rozwiązany nieco inaczej. Satelita i odbiornik generują w tych samych momentach czasu takie same sygnały (rys. 5). Ale sygnał od satelity do odbiornika musi przebyć drogę około 22 000 km, dlatego też nie pokrywa się z sygnałem generowanym przez odbiornik i jest przesunięty względem niego o około 0,07 sekundy. Wielkość przesunięcia jest dokładnie czasem, jakiego potrzebuje fala na przebycie drogi między satelitą a anteną odbiornika.



Rys. 4. Zasada wyznaczania pozycji w GPS



Rys. 5. Zasada pomiaru czasu

Opisana zasada pomiaru czasu jest słuszna, jeśli satelita i odbiornik generują sygnały dokładnie w tych samych momentach czasu. Jak wiadomo, satelity są wyposażone w niezwykle precyzyjne zegary atomowe, które są bezustannie sprawdzane przez segment kontrolny. Odbiorniki GPS są wyposażone w tańsze, a tym samym mniej precyzyjne zegary kwarcowe. Tak więc zegary satelitów nie wskazują dokładnie tego samego czasu co zegary odbiorników GPS. W rezultacie kod w odbiorniku i na satelicie nie jest generowany w tych samych momentach czasu, co powoduje, że przesunięcie (a tym samym i odległość) będzie wyznaczone z pewnym błędem. Tak wyznaczona odległość zwana jest *pseudoodległością*. Ponieważ wszystkie odległości mierzone przez odbiornik są obarczone tym samym błędem zegarowym, to można uznać go za wielkość niewiadomą i wyznaczyć.

Obecnie mamy już cztery niewiadome: trzy współrzędne stacji i nieznaną poprawkę zegara. Dlatego też zamiast pomiaru pseudoodległości do trzech satelitów konieczny jest pomiar pseudoodległości do czterech satelitów, gdyż liczba obserwacji powinna być co najmniej równa liczbie niewiadomych.

### Błędy, jakimi obarczona jest mierzona pseudoodległość

**Błędy zegara.** Wiemy, że satelity są wyposażone w superdokładne zegary atomowe, ale nawet i one nie są idealnymi urządzeniami, dlatego w czasie ich pracy mogą powstać bardzo małe systematyczne błędy. Najmniejszy błąd systematyczny zegara satelity oznacza, że sygnały są emitowane o niewłaściwym czasie. Na szczęście segment kontrolny sprawdza każdy aktywny zegar atomowy satelity (na satelicie znajdują się cztery takie zegary) i jeśli najmniejszy błąd systematyczny zostanie wykryty, to wówczas taki zegar jest „przestawiany” na poprawny czas albo do transmitowanych informacji o satelicie dodawana jest informacja o poprawce do zegara.

**Błędy orbitalne.** Bezpośrednio po odebraniu sygnałów od satelity z przestrzennego wycięcia liniowego otrzymujemy położenie punktu na powierzchni Ziemi (real-time position). W tej

sytuacji wykorzystujemy oczywiście ekstrapolowaną orbitę, która różni się mniej lub więcej od rzeczywistej orbity. Tak więc w naszym liniowym wycięciu współrzędne stałych punktów (satelitów) są obarczone błędami. Dlatego też nasza wyznaczona pozycja też będzie obarczona błędami z tego tytułu.

### Opóźnienia wywołane przez jonosferę i troposferę

Wszyscy zapewne doskonale znają termin atmosfera, ale z terminami takimi jak jonosfera i troposfera nie są zbyt dobrze zaznajomieni. Jonosfera jest to warstwa składająca się z elektrycznie naładowanych cząstek i rozciąga się od około 70 km do 1000 km nad powierzchnią Ziemi.

Sygnał wysłany od satelity znajdującego się na orbicie około 20 000 km nad powierzchnią Ziemi porusza się z prędkością światła na odcinku około 19 000 km, prawie dociera do Ziemi, gdy na swej drodze napotyka jonosferę, przez którą zostaje zmuszony do zwolnienia. Dodatkowo prostoliniowa droga sygnału zostaje zakrzywiona w jonosferze. Korzystając z bardzo zawiłych wzorów matematycznych możliwe jest oszacowanie zmniejszenia prędkości i stopnia zakrzywienia sygnału w jonosferze. Ale takie oszacowania są mało dokładne, gdyż jonosfera jest niezwykle zmienna w czasie.

Znacznie lepszym sposobem eliminacji opóźnień wywołanych jonosferą jest wysłanie sygnału na dwóch różnych częstotliwościach L1 i L2. Stwierdzono, że jonosfera opóźnia znacznie bardziej sygnał wysłany na niższej częstotliwości L2 niż sygnał przenoszony na częstotliwości wyższej, a mianowicie L1. Różnica opóźnień sygnałów na częstotliwości L1 i L2 daje się przeliczyć na opóźnienie wywołane jonosferą.

Po przebyciu jonosfery sygnał napotyka na troposferę, która sięga do 10 km nad powierzchnią Ziemi. W tej to warstwie kształtują się zjawiska atmosferyczne Ziemi. Woda obecna w tej warstwie w postaci chmur i pary wodnej wywołuje zjawisko zwane refrakcją. Na szczęście błąd z tego tytułu w znacznej części może być usunięty na drodze rachunkowej.

### Jaka jest dokładność pozycji wyznaczonej techniką GPS?

Jeśli używamy cywilnego kodu C/A, wówczas pozycja powinna być wyznaczona z dokładnością rzędu 100 m. Kod wojskowy P powinien umożliwić wyznaczenie pozycji z dokładnością około 10 m. W praktyce okazało się, że kod wojskowy zapewnia dokładność wyznaczenia pozycji 10-20 m, podczas gdy kod C/A około 30 m, to jest około cztery razy wyższą niż zaplanowano. Departament Obrony Stanów Zjednoczonych, chociaż zadowolony z osiągniętych rezultatów, nie bardzo był skłonny udostępnić cywilnym użytkownikom tak dokładne narzędzie. Zdecydowano obniżyć dokładność systemu GPS. W pierwszej kolejności planowano obniżyć ją nawet do 500 m, lecz w końcu zdegradowano system do 100 m. Oficjalne obniżenie dokładności systemu nosi nazwę *selective availability* (SA) i zostało wprowadzone w marcu 1990 roku. SA wprowadza zarówno pewien błąd do zegarów znajdujących się na satelitach bloku II, jak i błąd położenia orbity do emitowanych informacji efemerydalnych. Obydwa te błędy zniekształcają wyznaczaną do satelity pseudoodległość. Ostatecznie możemy uważać, że w 95 % cywilny kod C/A daje dokładność rzędu 100 m, a w pozostałych 5 % dokładność ta jest znacznie gorsza.

Dokładność wyznaczenia pozycji zależy również od konfiguracji satelitów, analogicznie jak dokładność wcięcia liniowego zależy od rozmieszczenia punktów stałych w terenie. Jeśli satelity są równomiernie rozłożone na sklepieniu niebieskim, wówczas możemy spodziewać się dokładniejszego wyznaczenia pozycji. W fachowym żargonie rozkład satelitów na firmamencie niebieskim zwany jest *geometric dilution of precision* (GDOP). Jeśli mamy np. dwa satelity korzystnie usytuowane, to wówczas wcięcie liniowe jest korzystne, całkowity błąd wyznaczenia pozycji jest mały i GDOP przyjmuje małą wartość. Natomiast jeśli satelity są bardzo blisko siebie, to wówczas wcięcie liniowe nie jest korzystne, błąd wyznaczenia pozycji jest duży i GDOP przyjmuje dużą wartość. W praktyce dysponujemy całą rodziną DOP, która szczegółowo charakteryzuje dokładność, a mianowicie:

- pozycję trójwymiarową (PDOP),
- pozycję horyzontalną (HDOP),
- pozycję pionową (VDOP),
- a nawet czas (TDOP).

### Podsumowanie

W niniejszej części publikacji „GPS dla początkujących” w ogólnym zarysie przedstawiono koncepcję GPS. Został on stworzony przez Departament Obrony Stanów Zjednoczonych i jest używany przez licznych użytkowników. System ten składa się z trzech segmentów: kosmicznego, kontroli i użytkowników. Sygnały GPS transmitowane przez satelity są kodowane za pomocą kodu C/A i kodu P. Kod P jest przenoszony na częstotliwościach L1 i L2, natomiast kod C/A jest przenoszony tylko na częstotliwości L1. Wyznaczenie pozycji na powierzchni Ziemi realizowane jest za pomocą liniowego wcięcia do czterech satelitów. Pseudoodległość do satelity jest

liczona ze wzoru odległość = prędkość x czas. Jeśli *selective availability* nie jest włączone, wówczas 95 % wyznaczeń pozycji osiąga dokładność rzędu 100 m. Charakterystyka DOP wskazuje na geometrię rozmieszczenia satelitów na sklepieniu niebieskim, a tym samym informuje o dokładności wyznaczania pozycji na powierzchni Ziemi.

**Zakład Geodezji Planetarnej  
Centrum Badań Kosmicznych PAN  
00-716 Warszawa, Bartycka 18A**

<sup>1</sup> modulowana fala ma długość 300 m

**Adam Łyszkowicz** w 1967 r. kończy studia na Wydziale Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej (specjalność pomiary podstawowe). Podejmuje pracę w Instytucie Geodezji i Kartografii, a następnie na Akademii Rolniczo-Technicznej w Olsztynie, gdzie doktoryzuje się w 1975, a następnie habilituje w 1994. W przerwach pracuje w Przedsiębiorstwie Eksportu GEOKART, a także jako wykładowca w University of Zambia w Zambii oraz University of West Indies w Trynidadzie. W 1986 r. podejmuje pracę w Centrum Badań Kosmicznych, gdzie pracuje do dziś. W 1995 r. zostaje laureatem pierwszej po wojnie nagrody naukowej im. Mikołaja Kopernika w dziedzinie geodezji. Wśród swoich doświadczeń naukowych wymienia badanie przebiegu geoidy na obszarze Polski, zakładanie sieci geodezyjnych metodami satelitarnymi (GPS) i modernizację podstawowej sieci wysokościowej w Polsce.

GEOZET

**Sprzęt geodezyjny** firm: NIKON, TOPCON, SOKKIA, BERGER, BHI i innych

GEOZET

**Sprzęt kreślarski** firm: STANDARDGRAPH-MECANORMA, KIN, ROTRING, STAEDTLER

GEOZET

**Światłokopiarki** firm: REGMA, NEOLT

**Materiały eksploatacyjne** firm: REGMA, RENKER

GEOZET

**Materiały do ploterów** — papiery, folie, kalki  
**Folie kserograficzne**

GEOZET

**Pomocniczy sprzęt geodezyjny:** ruletki, piony, węgielnice, łaty, tyczki, lustra, statywy

GEOZET

**GEOZET S.C.**

**01-018 Warszawa, ul. Wolność 2a, tel./faks 38-41-83**