



AKADEMIA OBRONY NARODOWEJ

MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA SYSTEMU GLOBALNEJ NAWIGACJI SATELITARNEJ GPS NAVSTAR W WOJSKACH LĄDOWYCH RP

Praca naukowo-badawcza pk. „GPS-1”

Biblioteka Główna
Akademii Obrony Narodowej

S/4130



05-004130-002-0

WARSZAWA

68779



AKADEMIA OBRONY NARODOWEJ

WYDZIAŁ WOJSK LĄDOWYCH



MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA SYSTEMU GLOBALNEJ NAWIGACJI SATELITARNEJ GPS NAVSTAR W WOJSKACH LĄDOWYCH RP

Praca naukowo-badawcza pk. „GPS-1”



Recenzent:

plk dr hab. Leopold CIBOROWSKI

Zespół autorski:

Plk dr inż. Józef JANCZAK – wprowadzenie; rozdział 1; podrozdziały: 2.5, 3.4, 4.4, 4.5, 5.5, 5.6; zakończenie.

Pplk dr inż. Gabriel NOWACKI - rozdział 2 (bez 2.5); rozdział 3 (bez 3.4); rozdział 4 (bez 4.4, 4.5).

Mjr dypl inż. Waldemar SCHEFFS - rozdział 5 (bez 5.5, 5.6).

SPIS TREŚCI

WPROWADZENIE.....	4
1. ZAŁOŻENIA MERYTORYCZNO-METODOLOGICZNE	8
1.1. Cel badań.....	8
1.2. Problemy badawcze.....	8
1.3. Hipotezy robocze.....	9
1.4. Obszar badań	10
1.5. Metody i narzędzia badawcze.....	11
1.6. Przebieg badań.....	12
2. STRUKTURA I DANE TECHNICZNE SYSTEMU	
GPS NAVSTAR	15
2.1. Ogólna charakterystyka systemu	15
2.2. Zastosowanie technik przetwarzania sygnału GPS.....	18
2.3. Struktura systemu	23
2.4. Dane techniczne systemu.....	26
2.5. Wnioski	32
3. ZASADA DZIAŁANIA I PARAMETRY ODBIORNIKA GPS.....	34
3.1. Dokładność odbiornika	37
3.2. Parametry odbiornika	39
3.3. Ograniczenia dokładności odbiornika.....	41
3.4. Wnioski	42

4. RÓŻNICOWY SYSTEM GPS	44
4.1. Ogólna charakterystyka systemu różnicowego	44
4.2. Kodowe systemy różnicowe	48
4.3. Transmisja poprawek.....	53
4.4. Odmiany technologii różnicowych.....	55
4.5. Wnioski	67
 5. MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA SYSTEMU	
GPS NAVSTAR	69
5.1. Wojskowe i cywilne wykorzystanie systemu	73
5.2. Współpraca GPS z systemami radioelektronicznymi o niskiej dynamice zmian położenia.	88
5.3. Współpraca GPS z systemami rozległymi o dużej dynamice zmian położenia.....	96
5.4. Analiza możliwości wykorzystania sprzętu GPS.....	101
5.5. Podatność systemu GPS na zakłócenia.....	110
5.6. Wnioski	119
 ZAKOŃCZENIE	121
 LITERATURA.....	123

WPROWADZENIE

Wraz z wystrzeleniem pierwszego sputnika w przestrzeń kosmiczną, wielu naukowców zrozumiało doniosłość faktu krążenia satelity wokół ziemi po zadanej orbicie i możliwość wykorzystania nadawanych przez niego sygnałów do ustalenia pozycji naziemnych odbiorników. Procedura opierała się na dopplerowskim przesunięciu częstotliwości sygnałów nadawanych z poruszającego się obiektu. Pomysł ten dał podstawę budowy pierwszego satelitarnego systemu lokalizacji Transit.

Zastosowana technika nie była zbyt wygodna. Na powierzchni Ziemi trzeba było umieszczać bardzo kosztowną aparaturę odbiorczą, a ustalenie pozycji możliwe było dopiero po dwukrotnym przelocie satelity w czasie 90 minut. Ponadto system charakteryzował się małą dokładnością określenia miejsca położenia (ok. 200 m) i nie obejmował swoim zasięgiem rejonów polarnych. W Departamencie Obrony USA zaczęto więc zastanawiać się nad nowymi systemami dającymi samolotom natychmiastową informację o swojej pozycji. Lepsze wyniki lokalizacji obiektów uzyskano stosując metodę zwaną dystansową, umożliwiającą pomiar odległości dzielącej obiekt od kilku satelitów.

W 1973 r. połączono wysiłki sił morskich realizujących program „Timation” oraz sił powietrznych pracujących nad systemem 621B. Oba programy dały podstawę do opracowania nowego systemu nawigacyjnego – GPS NAVSTAR¹. Jest to globalny, satelitarny system nawigacyjny,

¹ GPS-NAVSTAR – *ang.* Global Positioning System-Navigation Satellite Providing Time and Range

zapewniający precyzyjne określenie miejsca położenia w przestrzeni trójwymiarowej oraz prędkości i czasu poruszania się wszystkich użytkowników wyposażonych w odbiorniki, w każdym punkcie kuli ziemskiej. Sygnały z satelitów mogą być odbierane przez dowolny odbiornik GPS w sposób ciągły, niezależnie od warunków pogodowych. Liczba użytkowników jest nieograniczona.

Wdrożenie systemu do eksploatacji stworzyło szereg nowych możliwości zarówno przy rozwiązywaniu problemów związanych z nawigacją obiektów jak i w zakresie łączności, a szczególnie radiokomunikacji.

Niezawodność i precyzja działania urządzeń nawigacyjnych systemu zostały potwierdzone w czasie wojny w rejonie Zatoki Perskiej, szczególnie w działaniach lotnictwa sił sprzymierzonych oraz artylerii polowej. Każdy dywizjon amerykańskiej artylerii polowej otrzymał zestaw odbiorczy systemu GPS. Dane z tego systemu wprowadzone do aparatury dowiązania topograficznego PADS², zainstalowanej na samochodzie osobowo – terenowym, umożliwiały dowiązanie topograficzne poszczególnych stanowisk ogniowych i sekcji radiolokacyjnej.

Państwa NATO wprowadzają system GPS jako jednolity system nawigacyjny dla wszystkich rodzajów sił zbrojnych. Powołano szereg międzynarodowych konsorcjów, które mają produkować odbiorniki nawigacyjne o nazwie EURONAV Receiver³, dla użytkowników cywilnych i wojskowych europejskich państw NATO.

W związku z dużym zaawansowaniem prac nad wdrożeniem systemu GPS NAVSTAR, równolegle prowadzi się prace badawczo – rozwojowe nad zapewnieniem kompatybilności różnych systemów nawigacyjnych i wyprodukowaniem urządzeń hybrydowych, umożliwiających jednocześnie wykorzystywanie kilku istniejących już systemów nawigacyjnych.

² PADS – *ang.* Positional Adjustment

³ EURONAV Receiver - *ang.* Europe Navigation Receiver

Dotychczasowe wyniki badań i prób eksploatacyjnych wykazały, że optymalnym rozwiązaniem dla potrzeb sił zbrojnych są zintegrowane odbiorniki nawigacyjne, w których głównym elementem będzie moduł odbiornika systemu GPS NAVSTAR. Po uruchomieniu masowej produkcji odbiorników systemu GPS NAVSTAR, znacznie spadło zainteresowanie dotychczas wykorzystywanymi systemami radionawigacyjnymi typu TACAN⁴, OMEGA⁵ i LORAN-C⁶, dającymi dużo mniejszą dokładność określania położenia i często posiadającymi jedynie zasięg lokalny.

Analizując możliwości operacyjno – techniczne systemu, sprawdzone w ostatnich konfliktach lokalnych⁷, zespół badawczy doszedł do przekonania, że system GPS NAVSTAR jest w stanie zabezpieczyć potrzeby i wymagania w zakresie nawigacji dla sił zbrojnych RP, które powinny być gotowe do prowadzenia wspólnych działań bojowych z siłami zbrojnymi innych państw w ramach NATO lub ONZ. Ponadto system ten będzie mógł zastąpić wszystkie istniejące systemy radionawigacyjne, które będą w pierwszej kolejności niszczone⁸ podczas prowadzenia działań bojowych.

Praca badawcza składa się z wprowadzenia, pięciu rozdziałów merytorycznych oraz zakończenia.

Wprowadzenie obejmuje uzasadnienie podjęcia badań oraz ogólną charakterystykę pracy systemu GPS NAVSTAR.

W rozdziale pierwszym przedstawiono założenia merytoryczno-metodologiczne, niezbędne do przeprowadzenia badań. Ujęto w nim cel badań

⁴ TACAN (Tactical Air Navigation) – system nawigacji taktycznej. Jest połączeniem radiolatarni typu VOR i radiodalmierza DME. Umożliwia pomiar dwóch parametrów nawigacyjnych – azymutu i odległości. Zakres pracy 960 – 1215 MHz. System jest przeznaczony dla lotnictwa wojskowego i cywilnego, a także może wykorzystywać go Marynarka Wojenna.

⁵ OMEGA – system fazowy dalekiego zasięgu. W skład systemu wchodzi osiem stacji brzegowych w różnych rejonach świata, oznaczonych literami A, B, C, D, E, F, G, H. Długość linii bazowych między stacjami 8000 – 10 000 km.

⁶ LORAN - C (Long Range Navigation) – system nawigacyjny dalekiego zasięgu, pracujący w zakresie fal długich: $\lambda = 3000$ m, $f = 100$ kHz. Długość bazy między dwoma stacjami tworzącymi parę wynosi 600 – 800 mil morskich. W skład systemu wchodzi 50 stacji naziemnych. Zasięg działania 4000 – 4300 km.

⁷ Np. Wojna w rejonie Zatoki Perskiej

⁸ Wojna w rejonie Zatoki Perskiej, Konflikt Bałkański.

i problemy badawcze. Ponadto przedstawiono przyjęte hipotezy robocze oraz metody badawcze, których realizacja pozwoliła zweryfikować hipotezy robocze i osiągnąć cel badań.

W rozdziale drugim dokonano ogólnej charakterystyki systemu GPS NAVSTAR, przedstawiono technologie GPS, przeprowadzono analizę struktury systemu i jego podstawowych danych operacyjno – technicznych.

W rozdziale trzecim scharakteryzowano podstawowe elementy odbiornika GPS, zwrócono uwagę na parametry odbiornika mające wpływ na podwyższenie oraz obniżenie jego dokładności. Zaprezentowano funkcje i opcje różnych odbiorników GPS oraz ich możliwości.

W rozdziale czwartym przedstawiono istotę funkcjonowania i możliwości zwiększenia dokładności w wyniku zastosowania systemu różnicowego DGPS.

W rozdziale piątym, który zdaniem zespołu badawczego jest najważniejszy, przedstawiono możliwości wykorzystania systemu GPS NAVSTAR w wojskach lądowych RP. Szczególną uwagę zwrócono na możliwość współpracy GPS z systemami radioelektronicznymi o niskiej dynamice zmian położenia a także z systemami rozległymi o dużej dynamice zmian położenia. Dokonano także oceny odporności systemu GPS na zakłócenia radioelektroniczne oraz zaprezentowano zespół przedsięwzięć ochronnych mających na celu zapewnienie kompatybilności elektromagnetycznej jego elementów.

W zakończeniu podkreślono trafność wyboru i sformułowania celu badań, problemów badawczych, przyjętych założeń oraz hipotez roboczych. Przedstawiono ocenę stopnia realizacji zadań badawczych, propozycje dotyczące zastosowania wyników badań oraz kierunki dalszego pogłębiania i rozszerzania badań.

1. ZAŁOŻENIA MERYTORYCZNO-METODOLOGICZNE

W badaniach *sine ira et studio* przyjęto, że czynnością decydującą o ich powodzeniu było uświadomienie sytuacji problemowej, sformułowanie celów badań naukowych, wysunięcie i sprecyzowanie problemów naukowych oraz wysunięcie hipotez roboczych.

Dla przeprowadzenia badań niezbędnym był również wybór i zastosowanie odpowiednich metod i narzędzi badawczych.

1.1. Cel badań

Treść poznawcza pracy została podporządkowana osiągnięciu *głównego celu*:

Przedstawić możliwości racjonalnego wykorzystania jednolitego systemu nawigacyjnego GPS NAVSTAR w Wojskach Lądowych RP w aspekcie zapewnienia interoperacyjności z siłami zbrojnymi innych państw w ramach NATO lub misji pokojowych ONZ.

1.2. Problemy badawcze

Osiągnięcie głównego celu badań nastąpiło na drodze rozwiązania *głównego problemu badawczego*:

Jakie są możliwości wykorzystania systemu GPS przez Wojska Lądowe RP, które powinny być gotowe do prowadzenia połączonych operacji wspólnie z siłami zbrojnymi innych państw w ramach NATO lub misji pokojowych ONZ?

Z głównego problemu badawczego wynikły następujące *problemy szczegółowe*:

1. *Jaka jest struktura i podstawowe dane operacyjno-techniczne systemu GPS?*

2. *Jakie parametry odbiornika GPS mają wpływ na podwyższenie lub obniżenie jego dokładności?*
3. *Na czym polega istota funkcjonowania systemu różnicowego DGPS oraz jakie są możliwości zwiększenia jego dokładności?*
4. *Jakie są racjonalne możliwości wykorzystania systemu GPS NAVSTAR w wojskach lądowych RP?*
5. *Jaka jest odporność systemu GPS na zakłócenia radioelektroniczne oraz jakie przedsięwzięcia ochronne należy podjąć w celu zapewnienia kompatybilności elektromagnetycznej jego elementów z innymi systemami?*

1.3. Hipotezy robocze

Rozwiązanie głównego problemu badawczego oraz poszczególnych problemów szczegółowych realizowano drogą weryfikacji następujących hipotez roboczych:

1. Współczesne pole walki obejmuje przestrzeń lądową, morską i powietrzną oraz kosmiczną. Występuje na nim wiele współzależności pomiędzy oceną sytuacji (zagrożenie, położenie przeciwnika, systemy informacyjno – sterujące, siły, środki, teren i czas), a planowaniem operacji, stawianiem zadań i wydawaniem rozkazów. Ich łączne przedstawienie w skali jednowymiarowej jest niemożliwe. Ścisłe koordynowanie i uwzględnianie wymienionych czynników w kierowaniu walką zintegrowanych systemów broni wymaga znajomości wielowymiarowych współzależności i interdyscyplinarnego ich traktowania. Z powyższego wynika, że prowadzenie współczesnych operacji wojsk lądowych nie jest możliwe bez dokonania precyzyjnego rozpoznania obiektów przeciwnika, określenia ich położenia przestrzennego oraz sterowania środkami walki.
2. Najlepsze warunki w zakresie lokalizacji stwarza system GPS NAVSTAR, który jest w stanie zabezpieczyć potrzeby i wymagania wojsk lądowych RP

w planowaniu, organizowaniu i prowadzeniu połączonych operacji (*ang.* Combined Operations – operacje, w których biorą udział przynajmniej dwa państwa NATO, Joint Operations – operacje, w których biorą udział przynajmniej dwa rodzaje sił zbrojnych) w ramach NATO lub ONZ.

3. System GPS NAVSTAR jest w stanie zastąpić wszystkie istniejące systemy radionawigacyjne, które mogą być niszczone w pierwszej kolejności podczas prowadzenia działań bojowych.

Tak sformułowane hipotezy określiły zasadniczy kierunek badań, który zespół przyjął podczas realizacji pracy naukowo-badawczej.

1.4. Obszar badań

Przedmiotem badań jest system GPS NAVSTAR w działaniach wojsk lądowych RP w nowych uwarunkowaniach oraz jej bliższe i dalsze otoczenie systemowe. Określenie takie zawiera jednak w sobie duży pierwiastek uogólnienia. Badania były prowadzone bowiem w kilku płaszczyznach, które można opisać jako:

1. Identyfikacja dostępnych metod badawczych i dającego się zastosować aparatu matematycznego.
2. Wpływ systemu GPS NAVSTAR na proces informacyjny w działaniach operacyjnych i taktycznych wojsk lądowych, poprzez stworzenie nowych możliwości zarówno przy rozwiązywaniu problemów związanych z nawigacją obiektów jak i w zakresie rozpoznania oraz dowodzenia i łączności.
3. Wpływ systemu GPS NAVSTAR na proces decyzyjny w działaniach operacyjnych i taktycznych, poprzez dużą niezawodność i precyzję działania urządzeń nawigacyjnych wojsk zmechanizowanych i pancernych, lotnictwa wojsk lądowych, wojsk rakietowych i artylerii oraz jednostek rozpoznawczych i łączności.

1.5. Metody i narzędzia badawcze

Szeroki obszar problemowy pracy badawczej oraz potrzeba przeprowadzenia badań wymagała przyjęcia określonej procedury badawczej, w której budowie kierowano się głównie podejściem systemowym, gdzie badany obiekt traktuje się jako system.

System jest pojęciem desygnującym pewną całość tworzoną przez określony zbiór obiektów (elementów) i powiązań (relacji) między nimi, rozpatrywaną z określonego punktu widzenia (aspektu badań)⁹. Innymi słowy, jest to wszelki skoordynowany wewnętrznie i wykazujący określoną strukturę układ elementów. Rozpatrywany od zewnątrz jest całością, rozpatrywany od wewnątrz stanowi zbiór, do którego przynależność warunkuje związki między wszystkimi jego elementami. Ogół elementów systemu w tym rozumieniu nazywa się składem. Ogół zaś związków (relacji) pomiędzy elementami, które są uwarunkowane przez ich przynależność do systemu, nazywa się strukturą. Przeważnie do tej definicji przyjmuje się dodatkowo dwa aksjomaty:

- 1) istnieje wzajemne oddziaływanie systemu i środowiska; oznacza to, że system ma wejście i wyjście;
- 2) system ma przynajmniej jedną cechę, która wyróżnia go od innych.

Analiza systemowa, rozumiana jako metoda rozwiązywania złożonych problemów naukowych i praktycznych, przewija się w samym formułowaniu zadań, ich rozwiązywaniu, jak również w organizacji procesu badawczego. W metodzie tej w pierwszej kolejności definiuje się badany obiekt, a następnie, uwzględniając relacje systemowe, dokonuje się rozłożenia systemu na podsystemy i podejmuje ich badania.

Problemy badawcze pracy dotyczyły różnych kwestii merytorycznych oraz metodologicznych. Stąd wynikała potrzeba zastosowania różnych metod badawczych odpowiadających charakterowi rozwiązywanych problemów.

⁹P. Sienkiewicz: „Podstawy teorii systemów”, AON, Warszawa 1993, s.16.

W procesie identyfikacji obszaru badań wykorzystano przede wszystkim *metody teoretyczne*: analizę, syntezę, abstrahowanie, indukcję, dedukcję, analogię, porównanie i uogólnienie, a także *metodę empiryczną*: obserwację pośrednią.

Źródłem faktów była dokumentacja techniczna systemu, prospekty reklamowe poszczególnych firm, materiały zamieszczone w Internecie oraz sprawozdania i relacje z użycia GPS w konfliktach i wojnach lokalnych.

Obserwacja pośrednia dotyczyła badania wpływu systemu GPS na procesy decyzyjne i informacyjne w siłach zbrojnych USA i pozostałych państwach NATO.

1.6. Przebieg badań

Analiza sytuacji problemowej oraz konstatacja celów badań pozwoliła na sformułowanie podstaw metodologicznych pracy oraz scenariusza badań. Scenariusz badań został opracowany w oparciu o metody projektowania systemów wspomagania podejmowania decyzji i obejmował:

- sformułowanie celu badań,
- sformułowanie problemów badawczych,
- sformułowanie hipotez roboczych,
- weryfikacja hipotez roboczych,
- opracowanie wyników badań.

Bardzo ważnym etapem w toku badań była weryfikacja hipotez roboczych.

Hipotezę roboczą nr 1 zweryfikowano za pomocą analizy historycznej i uogólnienia. Po dokonaniu analizy faktów historycznych konfliktów i wojen lokalnych ostatnich lat wykazano, że w prowadzonych operacjach wojsk lądowych istotne znaczenie ma określanie położenia przestrzennego w funkcji

przemieszczania (ruchu), dokonywanie precyzyjnego rozpoznania obiektów przeciwnika oraz dokładne sterowanie środkami walki.

Wykorzystano przy tym następujące materiały: opracowania zagraniczne, publikacje specjalistyczne, opracowania studyjne oraz sprawozdania i raporty z użycia systemu GPS NAVSTAR w konfliktach i wojnach lokalnych.

Hipotezę roboczą nr 2, uznaną przez zespół badawczy za najważniejszą zweryfikowano na podstawie indukcji, dedukcji, analogii, analizy (przyczynowej, strukturalnej i systemowej), porównania i uogólnienia oraz obserwacji pośredniej. Pozwoliło to na wykazanie, że system GPS NAVSTAR jest w stanie zabezpieczyć potrzeby i wymagania wojsk lądowych RP w zakresie współczesnej nawigacji, a także może być źródłem jednolitego czasu systemowego i odpowiednich, wysoko stabilnych wzorców częstotliwości, niezbędnych do pracy współczesnych systemów radioelektronicznych. Zaletą tego systemu jest bowiem to, że opiera się on na jednolitym, globalnym (międzynarodowym) układzie współrzędnych i światowym systemie czasu UTC¹⁰, co umożliwia prowadzenie wspólnych działań bojowych przez siły zbrojne różnych państw, funkcjonowanie różnych służb oraz pozwala na podejmowanie licznych międzynarodowych misji (w ramach ONZ lub NATO).

W toku badań wykorzystano materiały teoretyczne dotyczące dokumentacji technicznej systemu, prospekty reklamowe poszczególnych firm, materiały zamieszczone w Internecie oraz weryfikowano je z opiniami ekspertów zamieszczanymi w sprawozdaniach i relacjach z jego użycia w konfliktach i wojnach lokalnych.

Hipotezę roboczą nr 3 zweryfikowano na zasadzie analizy przyczynowej i uogólnienia. Dokonując oceny możliwości wykorzystania systemu GPS NAVSTAR w naszych wojskach lądowych zwrócono uwagę na fakt, że system ten jest w stanie zastąpić wszystkie istniejące systemy radionawigacyjne, które -

¹⁰ UTC – ang. Universal Time Coordinated

jak powszechnie wiadomo - będą w pierwszej kolejności niszczone podczas prowadzenia działań bojowych.

Pozytywna weryfikacja hipotez roboczych umożliwiła wykonanie opracowania zwięzłego, w którym ujęto w formie teorii wyniki badań oraz zamieszczono propozycje przyszłościowych rozwiązań, dotyczące wykorzystania systemu GPS w wojskach lądowych RP.

2. STRUKTURA I DANE TECHNICZNE SYSTEMU GPS NAVSTAR

2.1. Ogólna charakterystyka systemu

Prace konstrukcyjne w zakresie uruchomienia ogólnosiwiatowego operacyjnego systemu nawigacji satelitarnej GPS NAVSTAR rozpoczęto w siłach powietrznych USA (USAF¹¹) już w 1964 roku. Znamiennym wydarzeniem w toku realizacji programu GPS NAVSTAR było powołanie 1 lipca 1973 roku Połączonego Biura Programu GPS (JPO¹²). W grudniu 1973 roku rozpoczęto pierwszą fazę realizacji projektu oraz próby technologiczne. Pierwsze satelity systemu GPS NAVSTAR zostały umieszczone na swoich orbitach w 1981 roku.

W chwili obecnej system GPS NAVSTAR jest utrzymywany przez wiele służb, ale kieruje nim Departament Obrony USA (DOD¹³). Do czuwania nad rozwojem tego systemu oraz do pełnienia służby wykonawczej zostały wyznaczone Siły Powietrzne USA. W związku z tym cały system GPS NAVSTAR jest zarządzany przez Dowództwo Systemów Sił Powietrznych (AFSC¹⁴) poprzez Połączone Biuro Programu GPS (JPO), zlokalizowane w Kwaterze Głównej Oddziału Systemów Kosmicznych¹⁵ w bazie w Los Angeles. W skład Połączonego Biura Programu wchodzi przedstawiciele: sił powietrznych, marynarki wojennej¹⁶, sił lądowych¹⁷, korpusu piechoty morskiej¹⁸, straży wybrzeża¹⁹, agencji kartograficznej departamentu obrony²⁰, państw NATO i Australii.

¹¹ USAF - *ang.* United States Air Force

¹² JPO - *ang.* Joint Program Office

¹³ DOD - *ang.* Department of Defense

¹⁴ AFSC - *ang.* Air Force System Command

¹⁵ USAF, SSD - *ang.* US Air Force, Space Systems Division

¹⁶ *ang.* US Navy

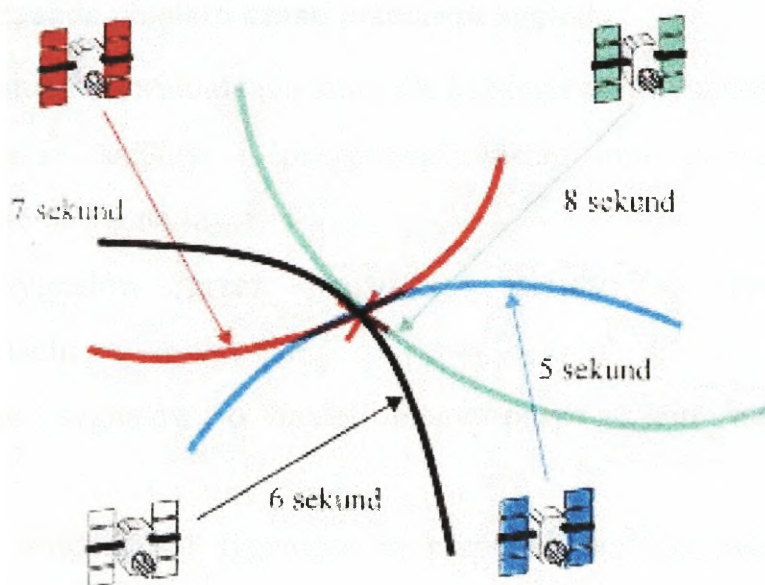
¹⁷ *ang.* US Army

¹⁸ *ang.* US Marine Corps

¹⁹ *ang.* US Coast Guard

²⁰ US DMA - *ang.* US Defence Mapping Agency

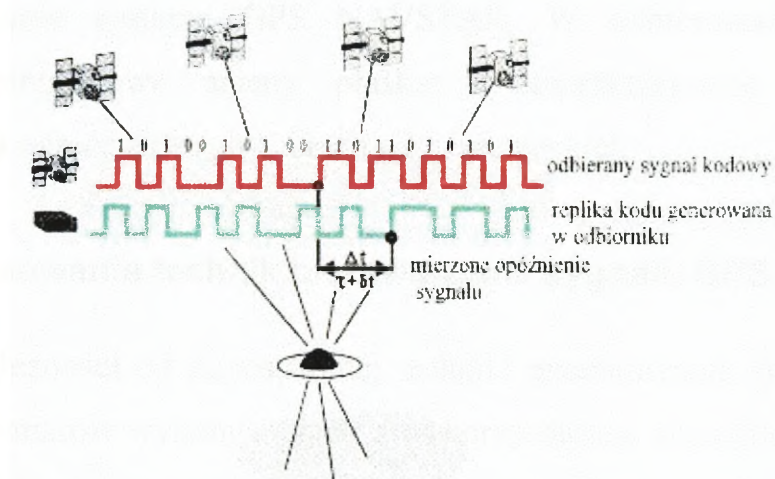
Dla obniżenia dużych kosztów systemu oraz zachowania wysokiej jego niezawodności wybrano kompromis pomiędzy satelitami asynchronicznymi (umieszczonymi na niskich orbitach), a synchronicznymi (nieruchomymi względem Ziemi). Każdy satelita okrąża kulę ziemską dwa razy na dobę co zapewnia iż odbiorca jest zawsze w zasięgu 4 satelitów. System ma charakter pasywny, transmisja sygnału odbywa się jednokierunkowo, z pokładu satelitów do użytkownika. Struktura sygnału satelitarnego umożliwia odbiornikowi wyznaczenie czasu jaki upłynął od momentu wysłania do momentu odbioru i określenie w ten sposób odległości pomiędzy użytkownikiem a satelitą. Dane nawigacyjne służą odbiornikowi do określenia położenia satelity w momencie nadawania sygnału. Odległości do satelitów i ich współrzędne są danymi wystarczającymi do wyznaczenia położenia odbiornika. Dla wyznaczenia trzech współrzędnych miejsca obserwacji konieczne jest jednoczesne obserwowanie minimum czterech satelitów (rys. 2.1).



Rys. 2.1. Zasada wyznaczenia położenia punktu w systemie GPS

Przy wyznaczaniu tylko pozycji poziomej konieczna jest obserwacja trzech satelitów. Dla celów militarnych obserwacje wykonuje się głównie przez pomiar czasu przebiegu sygnału z satelitów do odbiornika. Na podstawie tych

danych oblicza się odległości do satelitów z różnicy czasu pomiędzy wysłaniem sygnału przez satelitę a jego odbiorem przez odbiornik GPS. Do precyzyjnego wyznaczenia różnicy czasu Δt przebiegu sygnału od satelitów do odbiornika wykorzystuje się tworzoną w odbiorniku replikę indywidualnego kodu wysyłanego przez poszczególne satelity (rys. 2.2).



Rys. 2.2. Zasada pomiaru czasu przebiegu sygnału

Zastosowanie indywidualnego kodu dla każdego satelity umożliwia:

- zidentyfikowanie satelity i przyporządkowanie mu pozycji zawartej w komunikacie nawigacyjnym;
- wysyłanie sygnałów przez wszystkie satelity na tych samych częstotliwościach;
- wykorzystanie sygnałów o małej mocy przy użyciu małych anten odbiorczych;
- zmniejszenie wrażliwości sygnałów na przypadkowe i celowe zakłócenia radioelektroniczne;
- obniżenie dokładności określania pozycji przez celowe zniekształcenia kodu.

Innym sposobem obserwacji są pomiary fazy częstotliwości nośnej. Technika ta wymaga zrekonstruowania odbieranej częstotliwości tzn. usunięcia kodów i informacji nawigacyjnej. W punktach odbioru mierzone są kąty fazowe

tak zrekonstruowanych sygnałów. Sposób ten może być stosowany w metodzie różnicowej, gdzie obserwacje wykonywane są przy pomocy minimum dwóch odbiorników GPS. W wyniku tych obserwacji otrzymuje się różnicę współrzędnych stacji obserwacyjnych wyznaczaną z wysoką dokładnością.

Analiza materiałów źródłowych pozwala sądzić, że warunki atmosferyczne oraz pora doby nie mają zasadniczego wpływu na funkcjonowanie systemu GPS NAVSTAR. W odbiornikach zastosowano bowiem miniaturowe anteny płaskie o charakterystyce umożliwiającej jednoczesny odbiór z całego obszaru sfery niebieskiej.

2.2. Zastosowanie technik przetwarzania sygnału GPS

W zależności od zastosowanej techniki przetwarzania sygnału i danych, rezultaty pomiarów wykonywanych z wykorzystaniem sygnałów satelitów GPS charakteryzują się różną dokładnością i dostępnością. Najważniejsze z kategorii cywilnych zastosowań GPS to:

- ✓ Nawigacja w czasie rzeczywistym. Wyznaczanie w czasie rzeczywistym pozycji obiektów lądowych, morskich, lotniczych, kosmicznych. Czas trwania pomiaru jest bardzo krótki, zazwyczaj nie przekracza sekundy. Typowa dokładność jest rzędu kilkudziesięciu metrów, a przy wykorzystaniu technik różnicowych osiąga wielkość kilku metrów. Uzyskane informacje wykorzystywane mogą być między innymi dla potrzeb nawigacyjnych oraz w systemach nadzoru ruchu obiektów.
- ✓ Tworzenie bazy informacji geograficznej oraz dokonywanie szybkich pomiarów kartograficznych w ramach systemu GIS²¹. Odbiorniki, wyposażone w odpowiednie oprogramowanie umożliwiają rejestrację informacji o terenie skojarzonej z aktualną pozycją. Opracowanie informacji z odbiornika GPS ma miejsce zazwyczaj po sesji pomiarowej,

²¹ GIS- ang. Geographic Information System

z wykorzystaniem danych zarejestrowanych przez odbiornik i stację referencyjną. Pojedynczy pomiar trwa od kilku do kilkudziesięciu sekund, a uzyskiwana dokładność wyznaczenia pozycji nie przekraczającej jednego metra.

- ✓ **Pomiary geodezyjne statyczne²².** Na potrzeby geodezyjne wyznacza się wektory o długości do kilkuset kilometrów, przy dokładności pomiaru długości wektora rzędu kilku milimetrów. Takiego pomiaru dokonuje się przy użyciu pary odbiorników. Czas wykonania pomiaru jest zależny od odległości pomiędzy odbiornikami oraz od warunków widoczności satelitów. Pomiary wykonywane techniką GPS stanowią istotną konkurencję dla pomiarów geodezyjnych wykonywanych metodami tradycyjnymi, a przy tworzeniu sieci wyższego rzędu są regułą ze względu na dokładność i niskie koszty.
- ✓ **Pomiary geodezyjne kinematyczne²³.** W pomiarach tego typu wykorzystuje się fakt, iż przemieszczenia anteny odbiornika GPS, nie tracącej kontaktu z sygnałami satelitarnymi mogą być natychmiast obserwowane i wyznaczane z dużą dokładnością. Rozpoczynając pomiar od punktu o znanych współrzędnych, można wyznaczać pozycje kolejnych punktów z dokładnością do jednego centymetra oraz czasem pobytu na punkcie rzędu kilku sekund. Zasadniczą różnicą, istotną dla użytkownika przy wyborze odpowiedniego typu urządzenia, jest sposób inicjalizacji pomiarów kinematycznych. Proces odbioru w odbiornikach dwuczęstotliwościowych może być inicjowany w locie²⁴, co w praktyce oznacza, iż odbiornik może rozpoczynać i kontynuować pracę w trybie kinematycznym bez potrzeby umieszczania anteny na punkcie o znanych współrzędnych. Dla inicjacji odbiornika jednoczęstotliwościowego niezbędne jest umieszczenie anteny na

²² ang. Static, Fast Static.

²³ ang. Kinematic, Stop & Go

²⁴ ang. On-The-Fly.

punkcie o znanych współrzędnych. W przypadku braku takiego punktu niezbędne jest wykonanie pomiaru metodą *ang. Static* lub *Fast Static*. Różnice pomiędzy odbiornikami jedno i dwu-częstotliwościowymi stają się jaskrawsze przy pomiarach wykonywanych na średnich i dużych odległościach. Błąd odbiornika jednoczęstotliwościowego wzrasta szybciej niż błąd odbiornika dwuczęstotliwościowego wraz ze wzrostem odległości od bazy.

- ✓ Transfer czasu i częstotliwości wzorcowej. Typowy odbiornik systemu GPS przeznaczony do dystrybucji czasu podaje aktualny czas UTC(USNO)²⁵ i emituje skojarzony impuls sekundowy, o zgodności ze skalą UTC wyższą od 0,5 mikrosekundy. Technika różnicowa, określana nazwą *ang. "common view"*, umożliwia porównywanie zegarów z dokładnością do kilku nanosekund. Często wykorzystuje się odbiorniki GPS do sterowania pracą dyscyplinowanego wzorca częstotliwości. Uzyskuje się długookresową stabilność częstotliwości lepszą od 10^{-12} .
- ✓ Wyznaczanie orientacji. Odbiornik GPS wykorzystujący sygnały dochodzące z kilku anten umożliwia wyznaczanie orientacji obiektu, np. przechylenia bocznego i wzdłużnego samolotu lub okrętu.
- ✓ Inne technologie. Powyższy przegląd nie wyczerpuje wszystkich możliwości cywilnego wykorzystania systemu GPS. Często, specyficzne warunki wykonania pomiaru umożliwiają uzyskanie dużych dokładności, nietypowych dla danej techniki. Stosunkowo łatwe w realizacji jest np. ciągłe wyznaczanie przemieszczeń budowli, konstrukcji inżynierskich z dokładnością milimetrową, z częstotliwością rzędu kilku lub kilkunastu Hz. GPS znajduje obecnie zastosowanie w prawie wszystkich gałęziach gospodarki, a szczególnie w: transporcie, telekomunikacji, energetyce, budownictwie, gospodarce przestrzennej.

²⁵ UTC- *ang.* Universal Time Coordinated,
USNO - *ang.* US Naval Observatory

Analiza materiałów źródłowych pozwala sądzić, że konstruktorzy systemu GPS dużo uwagi poświęcili strukturze sygnału emitowanego przez satelitę. Ma ona postać fali nośnej, kodowanej fazowo odpowiednimi sygnałami:

- ✓ informacyjnym, z szybkością transmisji 50 bitów na sekundę;
- ✓ pseudolosowym kodem C/A, taktowanym częstotliwością 1,023 MHz;
- ✓ pseudolosowym kodem P, taktowanym częstotliwością 10,23 MHz;
- ✓ pseudolosowym kodem Y, taktowanym częstotliwością około 0,5 Hz.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że wszystkie sygnały taktujące oraz fala nośna tworzone są w oparciu o ten sam sygnał częstotliwości wzorcowej. Częstotliwości fal nośnych oznaczanych symbolami L_1 i L_2 wynoszą odpowiednio 1575,42 i 1227,60 MHz. Sygnał nadawany na częstotliwości L_2 nie jest modulowany kodem C/A. Kod Y jest nadawany przy włączonym systemie zapobiegania intencjonalnym próbom zakłócenia pracy urządzeń GPS, określanym terminem *ang.* " Anti-spoofing". Wydzielając sygnał związany z kodem C/A można zaniedbać składniki związane z modulacją kodami P i Y.

Sygnały satelitarne są sygnałami złożonymi o widmie rozproszonym. Poziom mocy sygnału satelitarnego jest o około 30 dB niższy od poziomu szumów wzmacniacza antenowego. Używane są dwa układy rozpraszające kody. Dla kodu C/A tylko na częstotliwości L_2 a dla kodu P na częstotliwościach L_1 i L_2 . Minimalna moc sygnału odbieranego przez antenę odbiornika, gwarantowana w specyfikacji systemu, wynosi:

- -160 dBW- na częstotliwości L_1 i zastosowanym kodzie C/A,
- -163 dBW na częstotliwości L_1 i zastosowanym kodzie P,
- -166 dBW na częstotliwości L_2 i zastosowanym kodzie P.

W systemie założono, że zarówno kod P jak i C/A pozwalają użytkownikowi na określenie odległości pomiędzy odbiornikiem a satelitą. Nałożona na kod P/Y i C/A depeza nawigacyjna zawiera między innymi dane efemerydalne, informację o parametrach zegara satelity oraz model poprawki jonosferycznej.

Kod P/Y jest pseudoprzypadkowym szumem, indywidualnym dla każdego satelity. Jest on wytwarzany w wyniku modulacji częstotliwości f_0 , czyli 10,23 MHz i ma bardzo długi okres. Jest sekwencją trwającą w przybliżeniu 267 dni. Każdy z satelitów ma przypisany jednotygodniowy segment tego kodu.

Kod C/A jest również pseudoprzypadkowym szumem, indywidualnym dla każdego satelity, o bardzo krótkim czasie powtarzania równym 1 milisekundzie. Jest wytwarzany w wyniku modulacji częstotliwości $f_0/10$, czyli 1,023 MHz. Składa się z 1023 bitów. Bity kodu nazywane są chipami. Sekwencja dobrana jest tak by:

- ✓ kody różnych satelitów nie były skorelowane między sobą;
- ✓ dla każdego satelity współczynnik autokorelacji miał tylko jedno maksimum.

Cechy te umożliwiają akwizycję i niezależny odbiór sygnałów nadawanych w tym samym paśmie częstotliwości.

Kolejnym ważnym problemem wymagającym wnikliwej analizy jest organizacja danych przesyłanych z satelity GPS NAVSTAR w postaci „*depeszy nawigacyjnej*”. Treść sygnału informacyjnego depeszy zawiera między innymi:

- ✓ almanach - dane dotyczące aktualnego stanu systemu, w tym przybliżone elementy orbitalne wszystkich satelitów, których znajomość przyspiesza proces akwizycji;
- ✓ efemerydę - dokładne elementy orbitalne satelity nadającego depeszę, niezbędne do wyznaczania czasu i pozycji.

Depesza nawigacyjna nałożona jest na kod P i kod C/A. Szybkość transmisji wynosi 50 bitów na sekundę. Składa się ona z 25 ramek. Każda ramka składa się z 1500 bitów i podzielona jest na 5 podramek (po 300 bitów). Odebranie jednej ramki danych zajmuje około 30 sekund, a odebranie wszystkich 25 ramek, zawierających 37 500 bitów informacji zajmuje 12,5 minuty. Należy zwrócić uwagę na fakt, że we wszystkich 25 ramkach powtarzane są pierwsze trzy

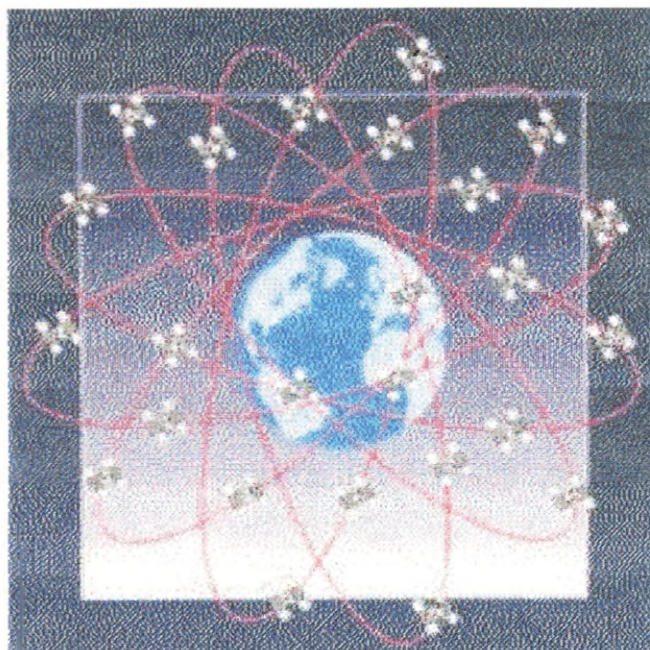
podramki (1,2,3), zawierające 900 tych samych bitów danych do określenia pozycji. Umożliwia to odbiór krytycznych danych w ciągu 30 sekund. Dane depeszy nawigacyjnej uaktualniane są co cztery godziny. Depesza zawiera informację o momencie rozpoczęcia transmisji HOW²⁶, umożliwiającą przejście od śledzenia kodu C/A do śledzenia kodu P/Y, dane efemerydalne i dane o zegarze oraz almanach (czyli zgrubne parametry ruchu i statusy dla wszystkich satelitów w konstelacji). Dodatkowo transmitowane są dane o stanie technicznym satelity (utożsamianym przez konstruktorów ze "zdrowiem" satelitów), współczynniki do modelu opóźnienia jonosferycznego oraz współczynniki umożliwiające obliczenie czasu UTC.

2.3. Struktura systemu

Globalny system nawigacyjny składa się z trzech zasadniczych komponentów: zespołu satelitarnego, zespołu nadzoru oraz zespołu wyposażenia indywidualnego użytkowników.

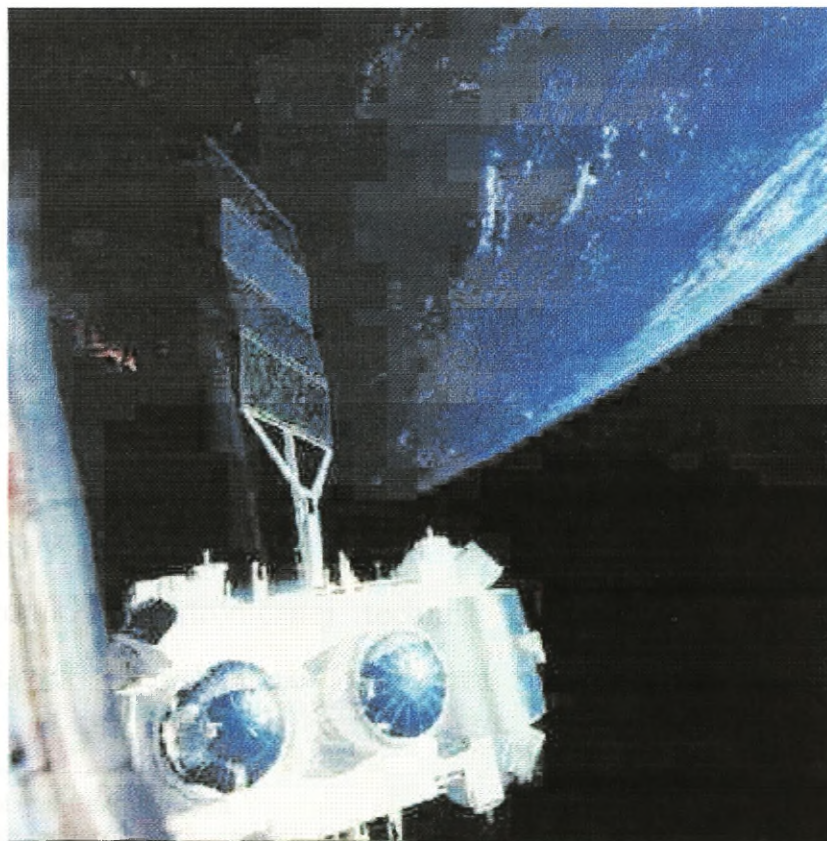
Zespół satelitarny (rys. 2.3) obejmuje 24 satelity (21 czynnych i 3 rezerwowe), umieszczone na kołowych orbitach o wysokości 20183 km nad powierzchnią ziemi, nachylonych pod kątem 63° do płaszczyzny równika. Satelity rozmieszczone są na sześciu orbitach kołowych, po cztery na każdej. Czas obiegu orbity wynosi około 12 godzin. Obserwator na Ziemi zaobserwuje tę samą konstelację satelitów codziennie, o prawie tej samej porze. Każdego dnia konstelacja powtarza się z cztero minutowym wyprzedzeniem z powodu różnicy pomiędzy okresem obiegu satelitów a długością doby słonecznej. Satelity umieszczone są tak, że co najmniej 5 będzie widocznych z każdego punktu Ziemi z prawdopodobieństwem 0,9996. Taka konfiguracja umożliwia, z małymi wyjątkami, wyznaczenie pozycji dowolnego miejsca na powierzchni Ziemi

²⁶ HOW – ang. Hand Over Word



Rys. 2.3. Zespół satelitarny

w dowolnym momencie doby. Na nielicznych i niewielkich obszarach wyznaczenie pozycji trójwymiarowej jest niemożliwe w okresie nie dłuższym niż 20 minut w ciągu doby. Wygląd satelity przedstawiono na rysunku 2.4.



Rys. 2.4. Satelita systemu GPS NAVSTAR

Zespół nadzoru składa się z Głównej Stacji Nadzoru (MCS²⁷) w bazie sił powietrznych Falcon w Colorado Springs i stacji monitorujących na Hawajach, w Kwajalein, Diego Garcia i Ascension. Wszystkie stacje monitorujące wyposażone są w anteny do łączności dwustronnej z satelitami. Stacje monitorujące biernie śledzą wszystkie widoczne satelity. Dane ze stacji monitorujących przesyłane są do MCS, gdzie wyznaczane są efemerydy satelitów i parametry ich zegarów. MCS okresowo przesyła satelitom efemerydy i poprawki zegara w celu ich retransmisji w depeszy nawigacyjnej.

Zespół użytkowników składa się z różnorodnych wojskowych i cywilnych²⁸ odbiorników GPS zaprojektowanych w taki sposób, aby była możliwość odbierania, dekodowania i przetwarzania sygnałów GPS. Są to odbiorniki samodzielnie funkcjonujące lub wbudowane w inne systemy. Zastosowania obejmują nawigację (powietrzną, morską, lądową), wyznaczanie pozycji, transfer czasu, pomiary geodezyjne i wiele innych. Ze względu na wielorakie zastosowania odbiorniki różnią się funkcjami i konstrukcją. Struktura sygnału satelitarnego umożliwia odbiornikowi wyznaczenie czasu jaki upłynął od momentu wysłania do momentu odbioru i określenie w ten sposób odległości pomiędzy użytkownikiem a satelitą. Dane nawigacyjne służą odbiornikowi do określenia położenia satelity w momencie nadawania sygnału. Odległości do satelitów i ich współrzędne są wystarczającymi danymi do wyznaczenia położenia odbiornika. Dla trójwymiarowego określenia położenia odbiornika potrzebne są dane z czterech satelitów, ponieważ oprócz trzech współrzędnych wyznaczyć należy również poprawkę zegara odbiornika.

Burzliwy rozwój techniki GPS stał się możliwy dzięki rozwojowi mikroelektroniki i elektronicznej techniki obliczeniowej. Na początku lat osiemdziesiątych, urządzenia odbiorcze systemu ważyły kilkanaście

²⁷ MCS – ang. Master Control Station

²⁸ Decyzją Kongresu Stanów Zjednoczonych, GPS NAVSTAR został dopuszczony do powszechnego użytku w zastosowaniach cywilnych bez potrzeby uzyskiwania indywidualnych zezwoleń i wnoszenia opłat związanych z korzystaniem z systemu.

kilogramów i zajmowały objętość rzędu kilkuset litrów. Przełom nastąpił w momencie, gdy postęp w wytwarzaniu układów scalonych umożliwił wykorzystanie cyfrowych technik przetwarzania sygnału. We współczesnych odbiornikach układy analogowe wykorzystywane są jedynie w celu wzmocnienia sygnału. Na potrzeby cyfrowego przetwarzania sygnału wykorzystuje się specjalizowane mikroukłady próbujące sygnał z częstotliwością do kilkudziesięciu MHz. Pracę tych mikroukładów nadzorują procesory o bardzo dużej szybkości przetwarzania danych. Regułą jest implementowanie w odbiornikach GPS oprogramowania wielozadaniowego pracującego w czasie rzeczywistym. Przełączanie zadań odbywa się z częstotliwością rzędu 1 kHz. Współczesne najmniejsze i najprostsze odbiorniki, przeznaczone dla potrzeb nawigacyjnych ważą nie więcej niż kilkaset gram i mogą być trzymane w dłoni.

Nastąpił również gwałtowny rozwój urządzeń współpracujących z systemem GPS NAVSTAR. Najtańsze urządzenia współpracujące z systemem, które wykorzystywane są w nawigacji kosztują zaledwie kilkaset dolarów. Natomiast urządzenia przeznaczone dla pomiarów geodezyjnych należą do najdroższych, a ich ceny sięgają kilkudziesięciu tysięcy dolarów. Oprócz samodzielnych urządzeń producenci zaczęli oferować również karty przeznaczone do integracji z komputerem²⁹ (np. IBM PC lub PCMCIA).

2.4. Dane techniczne systemu

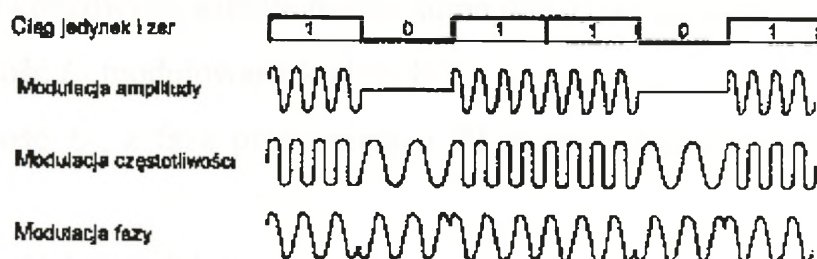
Sygnał z satelity GPS NAVSTAR dostarczany jest do potencjalnego użytkownika na określonych częstotliwościach nośnych, które są odpowiednio modulowane. Stąd też ciąg transmitowanych jedynek i zer jest poddawany odpowiednio modulacji:

— amplitudowej;

²⁹ Frączyk P., Modliński G.: „*Opis systemu GPS*”, NAVI, 1996

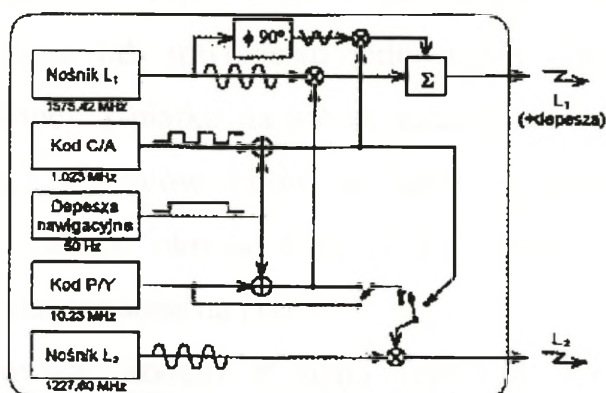
- częstotliwościowej;
- fazowej.

Poszczególne rodzaje modulacji sygnału satelitarnego zilustrowano na rysunku 2.5.



Rys. 2.5. Rodzaje modulacji sygnału satelitarnego

Schemat blokowy pokładowego modulatora satelity GPS NAVSTAR przedstawiono na rys. 2.6.



Rys. 2.6. Schemat blokowy pokładowego modulatora satelity GPS NAVSTAR

Obydwie częstotliwości nośne L_1 i L_2 (rys. 2.6) są modulowane kodami (sygnałami kodowymi) C/A³⁰ oraz P/Y³¹. Przy czym kod C/A jest pseudoprzypadkowym, indywidualnym dla każdego satelity szumem o bardzo krótkim czasie powtarzania, równym 1 milisekundzie. Jest wytwarzany za pomocą modulatora częstotliwości $f_0/10$, czyli 1,023 MHz. Takiej modulacji,

³⁰ C/A – ang. Coar – Clear/Aquisition

³¹ P/Y – ang. Precise – Protected

zwanej kluczowaniem przebiegu fazy, podlegają:

- częstotliwości L_1 i L_2 – kodem P/Y;
- częstotliwość L_1 , której faza została wcześniej przesunięta o 90 stopni – kodem C/A.

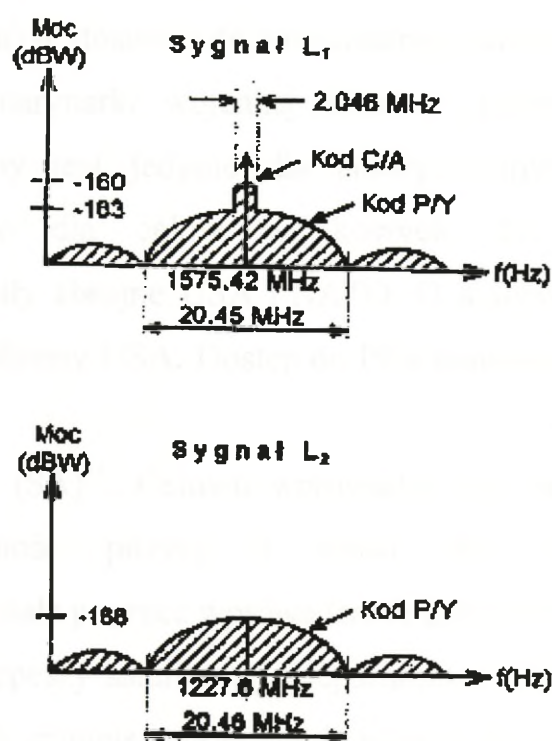
W efekcie końcowym, satelita nadaje sumę trzech składników:

- częstotliwość L_1 modulowana kodem P/Y;
- częstotliwość L_1 , z fazą przesuniętą o 90 stopni i modulowanej kodem C/A;
- częstotliwość L_2 , modulowana kodem P.

Satelita ma możliwość zmiany (przełączenia) modulacji fali L_2 na kod C/A. Natomiast kod P/Y jest również pseudoprzypadkowym szumem, indywidualnym dla każdego satelity, przy czym jest on wytwarzany w wyniku modulacji częstotliwości $f_0 = 10,23$ MHz i ma bardzo długi okres, równy w przybliżeniu 266,4 dnia lub trzydziestu jednostkom tygodniowym, które rozpoczynają się o północy z piątku na sobotę czasu UTC. Ponadto kod P/Y składa się z około 6,2 trylionów bitów, a każdy z satelitów transmituje tygodniowy fragment całego okresu kodu P/Y. Spektrum częstotliwości sygnałów L_1 i L_2 jest przedstawione na rys. 2.7.

Sygnały modulowane kodem P mają szerokość 20,46 MHz i są emitowane na częstotliwościach L_1 i L_2 , natomiast sygnały modulowane kodem C/A mają szerokość 2,046 MHz i są emitowane na częstotliwości L_1 , której faza jest przesunięta o 90 stopni.

Taki wybór spektrum częstotliwościowego satelitarnego systemu GPS NAVSTAR został podyktowany koniecznością zapewnienia wysokiej odporności na zakłócenia zarówno niezamierzone (interferencyjne), jak i zamierzone (celowe). Należy zwrócić uwagę na znamieny fakt, że sygnał satelitarny tworzony za pomocą kodu P jest o 10 dBW silniejszy, niż sygnał tworzony za pomocą kodu C/A. Stąd też sygnał satelitów GPS NAVSTAR jest



Rys. 2.7. Spektrum częstotliwości sygnałów L_1 i L_2

bardzo niskiej mocy i może być aktualnie niższy, niż sygnał pochodzący od powierzchni naszej planety.

Jest wiadomym, że kod typu C/A jest udostępniony wszystkim użytkownikom, ponieważ trwa tak krótko, że odbiornik pokładowy może w minimalnym czasie wytworzyć jego replikę. Ten kod używany jest w wersji standardowej na potrzeby cywilne i niestety jest stosunkowo mało dokładny. Natomiast do wykonywania określonych zadań bojowych służy kod P/Y, używany jedynie w odbiornikach przeznaczonych na potrzeby militarne.

Z analizy materiałów źródłowych wynika, że GPS zapewnia dwa poziomy dokładności: dokładny serwis pozycyjny (PPS)³² oraz standardowy serwis pozycyjny (SPS)³³.

Dokładny serwis pozycyjny (PPS) zapewnia dane o pozycji i o czasie z wysoką dokładnością. Dostarcza informacji o pozycji z dokładnością nie gorszą

³² PPS – ang. Precise Positioning Service

³³ SPS – ang. Standard Positioning Service

niż 16 metrów (50%, 3D) i informacji o czasie z dokładnością nie gorszą niż 100 nanosekund (1 sigma) w stosunku do uniwersalnego czasu koordynowanego przez Obserwatorium marynarki wojennej Stanów Zjednoczonych (UTC - USNO)³⁴. PPS dostępny jest jedynie dla autoryzowanych użytkowników i przeznaczony głównie dla celów wojskowych. Do autoryzowanych użytkowników należą: siły zbrojne USA i NATO. O autoryzacji użytkownika decyduje Departament Obrony USA. Dostęp do PPS kontrolowany jest dwiema metodami:

- ✓ Ograniczony Dostęp (SA)³⁵. Celowo wprowadza się zniekształcenia, aby zmniejszyć dokładność pozycji i czasu dla nieautoryzowanych użytkowników. SA działa poprzez wprowadzanie kontrolowanych błędów do sygnałów satelity i depeszy satelitarnej. Departament Obrony zadeklarował, iż w czasie pokoju SA zmniejszy dokładność pozycji dla użytkowników SPS do 100 metrów (95%, 2D).
- ✓ Zakłócanie (A - S)³⁶ jest włączane bez ostrzeżenia by uniemożliwić imitowanie sygnałów PPS przez przeciwnika. Technika ta zmienia kod P, szyfrując go, w kod oznaczony jako kod Y. Nie ma to wpływu na odbiór kodu C/A. Klucz do szyfru dostępny jest wyłącznie autoryzowanym użytkownikom umożliwiając im usunięcie wpływu SA i A-S. W ten sposób uzyskują maksymalną dostępną dokładność.

W odbiornikach PPS może być wykorzystywany kod P/Y, kod C/A lub obydwa. Największa dokładność uzyskiwana jest przy użyciu kodu P/Y sygnałów o częstotliwościach L_1 i L_2 . Różnica w czasie propagacji sygnałów o różnych częstotliwościach wykorzystywana jest do wyznaczenia poprawki jonosferycznej. Zazwyczaj w odbiornikach PPS wykorzystuje się kod C/A w celu inicjacji śledzenia sygnałów satelitów i wyznaczenia przybliżonej fazy

³⁴ UTC – USNO - *ang.* Universal Coordinated Time, US Naval Observatory

³⁵ SA - *ang.* Selective Availability

³⁶ A-S - *ang.* Anti-spoofing

kodu P/Y.

Standardowy serwis pozycyjny (SPS) jest mniej dokładny i dostępny dla wszystkich użytkowników. Dostarcza informacji o pozycji z dokładnością nie gorszą niż 100 metrów (95%, 2D) w rozwiązaniach dwuwymiarowych i 156 metrów (95%, 3D) w rozwiązaniach trójwymiarowych. Dokładność informacji o czasie określona jest na nie gorszą niż 337 nanosekund (95%) w stosunku do skali UTC (USNO). SPS przeznaczony jest głównie dla użytkowników cywilnych. Wymieniona dokładność zawiera wpływ SA, który jest głównym źródłem błędów SPS. Rozkład błędów wyznaczenia pozycji jest zbliżony do rozkładu normalnego z długookresową średnią równą zeru. A-S uniemożliwia użytkownikom SPS dostęp do kodu Y. Tak więc użytkownicy SPS nie mogą opierać się na bezpośrednim pomiarze kodu P, by zmierzyć dokładnie różnice w propagacji częstotliwości L1 i L2, a zatem określić wielkość poprawki jonosferycznej. Kod C/A nadawany jest tylko na częstotliwości L1.

W typowym odbiorniku SPS do wyznaczenia poprawek jonosferycznych używa się modelu jonosfery transmitowanego w depeszy satelitarnej. Jest to procedura znacznie mniej dokładna niż pomiar na dwóch częstotliwościach. Dokładność pozycji przy użyciu SPS podana na początku tego punktu uwzględnia też błąd modelowania jonosfery.

W specjalistycznych odbiornikach geodezyjnych używa się rozmaitych wyrafinowanych metod do określenia różnicy czasów propagacji, bez jawnej znajomości transformacji kodu P do Y. Niektóre naturalne oraz sztucznie wprowadzane ograniczenia dokładności mogą być w dużym stopniu wyeliminowane przy użyciu technik różnicowych. Techniki te polegają na wykorzystaniu poprawek wyznaczanych przez precyzyjne zlokalizowane odbiorniki, zwane stacjami referencyjnymi. Poprawki różnicowe mogą być wprowadzane po pomiarze, lub w czasie rzeczywistym, w tym ostatnim wypadku do ich transmisji wykorzystuje się łącza radiowe. W najbliższym

czasie przewiduje się upowszechnienie systemów dystrybucji poprawek różnicowych z pokładu satelitów komunikacyjnych.

W wielu publikacjach podaje się różne parametry techniczne (tabela 1) systemu GPS.

Tabela 1

Parametry określane przez system GPS

<i>Parametry</i>	<i>Dokładność określenia współrzędnych</i>	<i>Czas określenia współrz.</i>	<i>Prędkość ruchu obiektu</i>	<i>Kod cywilny</i>	<i>Kod wojskowy</i>
<i>Publikacja</i>					
Wojskowy Przegląd Zagraniczny 3/78 s.137	do 10 m		do 0,06 m/s	---	---
Wojskowy Przegląd Zagraniczny 1-2/93 s. 83	do 30/100m użyt cyw. do 16m.użyt.wojsk.	100 ns	do 0,1 m/s	C/A	P
„Signal” 8/96 s. 31	---	---	---	C/A	P/Y
Allan de Campen: „The First Information War”	do 100 m użyt cyw. do 15 m użyt. woj.	---	---	---	---

Ze względu na wiele rozbieżności, zespół badawczy dokonał wszechstronnej analizy tych parametrów i sformułował odpowiednie wnioski.

2.5. Wnioski

- Globalny satelitarny system nawigacyjny NAVSTAR GPS zapewnia całodobowe określanie trzech podstawowych parametrów o obiekcie (w dowolnym miejscu na kuli ziemskiej) tj.: współrzędnych, wysokości i prędkości ruchu obiektu;

2. Użytkownicy wojskowi mają możliwość określania pozycji z dokładnością do 15 metrów z wykorzystaniem kodu P/Y;
3. Użytkownicy lokalni mają możliwość określenia pozycji z dokładnością do ¹⁵~~30~~ metrów w wyniku odbioru kodu C/A, który pozwala dla odbiorników powszechnego użytku uzyskać dokładność do 100 metrów; C/Y
4. Pomiar prędkości jest możliwy z dokładnością do 0,1 m/s;
5. Pomiar czasu jest możliwy z dokładnością do 100 ns;
6. Każdy z satelitów nadaje sygnały na dwóch częstotliwościach: 1575,42 MHz (kod C/A) i 1227,60 MHz (kod P/Y). Odpowiednie rozmieszczenie satelitów na orbitach zapewnia jednoczesny odbiór sygnałów z czterech satelitów z dowolnego miejsca na kuli ziemskiej. Do określenia własnego położenia oraz prędkości konieczny będzie jednoczesny odbiór sygnałów z trzech różnych satelitów, a do precyzyjnego pomiaru czasu i korekcji zegara synchronizującego odbiornika - z czterech satelitów;
7. Do 2000 roku planowana jest produkcja i wprowadzenie do eksploatacji w siłach zbrojnych Stanów Zjednoczonych ponad 21000 odbiorników nawigacyjnych systemu GPS NAVSTAR.

3. ZASADA DZIAŁANIA I PARAMETRY ODBIORNIKA GPS

Z analizy dokumentów źródłowych wynika, że aktualnie można wyróżnić trzy wersje satelitarnych odbiorników nawigacyjnych GPS NAWSTAR: lotniczą, morską i lądową. W zależności od konstrukcji mogą one odbierać tylko ogólnie dostępny kod cywilny C/A lub kod o ograniczonym dostępie, tj. militarny P(Y)/A. Każdy odbiornik jest urządzeniem pokładowym, który niezależnie od pory doby oraz warunków atmosferycznych pozwala określić położenie przestrzenne, parametry nawigacyjne i zobrazować je na odpowiednim wyświetlaczu. Aby wyznaczać pozycję, odbiornik GPS musi odbierać i śledzić sygnały satelitarne oraz przechowywać kolejne depesze nawigacyjne. W toku jego pracy można wyróżnić następujące umowne etapy: inicjacji, odbioru danych oraz nawigacji.

W procesie inicjacji odbiornika nawigacyjnego SPS³⁷ wykonywane są między innymi następujące czynności:

- ✓ określenie przewidywanej konfiguracji satelitów oraz dopplerowskich przesunięć częstotliwości;
- ✓ wstępne ustawienie częstotliwości generatorów pętli fazowych;
- ✓ przesuwanie serii pseudolosowych kodu C/A odpowiadających wybranym satelitom do momentu uzyskania korelacji z sygnałami satelitarnymi;
- ✓ włączenie automatycznych mechanizmów sterujących pętli fazowych i kodowych (w momencie wykrycia korelacji);
- ✓ synchronizacja bitowa sygnałów;
- ✓ odbiór efemerydy;
- ✓ wyznaczanie pozycji i poprawki czasu zegara odbiornika;
- ✓ odbiór almanachu.

³⁷ SPS- ang. Standard Positioning Service

Dla określenia przewidywanej konfiguracji satelitów niezbędna jest znajomość almanachu, przybliżonej pozycji oraz przybliżonego czasu. Jeśli odbiornik nie posiada tych informacji, wyboru satelitów dokonuje się w sposób dowolny, a częstotliwości generatorów pętli fazowych wybierane są kolejno z całego zakresu częstotliwości dopplerowskich. Serie losowe przesuwane są z ograniczoną prędkością, określoną przez przewidywany stosunek sygnału do szumu. W najbardziej niekorzystnym przypadku wielkość przesunięcia może być prawie równa okresowi kodu C/A. W takim wypadku korelacja zostanie uzyskana dopiero po kilku lub kilkunastu sekundach. Należy też liczyć się z błędną identyfikacją momentu korelacji. Wówczas przeszukiwanie należy kontynuować. Po uzyskaniu synchronizacji kodu i fali nośnej, odbywa się proces synchronizacji bitowej. Wymaga on odbioru określonej sekwencji bitów, pojawiającej się co 6 sekund. Dla potwierdzenia stanu synchronizacji bitowej często oczekuje się na kolejne powtórzenie sekwencji synchronizującej. Okres przesyłania informacji efemerydalnej niezbędnej do wyznaczenia pozycji i poprawki zegara wynosi 18 sekund, powtarza się ona co trzydzieści sekund. Interwał od momentu włączenia odbiornika do momentu uzyskania rozwiązania nawigacyjnego nazywa się czasem akwizycji. Wynosi on kilka lub kilkanaście minut w przypadku braku informacji niezbędnych do określenia aktualnej konfiguracji satelitów i skraca się do kilkudziesięciu sekund jeśli te informacje są znane. Nie może być jednak krótszy od około 30 sekund, gdyż odbiór aktualnej efemerydy jest niezbędny.

Poziom sygnału odbieranego przy powierzchni Ziemi jest niższy od poziomu szumu. Do wydzielenia sygnałów nawigacyjnych odbiornik wykorzystuje technikę uśredniania i korelacji. Typowe postępowanie mające na celu śledzenie sygnału rozpoczyna się od określenia widzialnych satelitów. Widzialność określana jest na podstawie podanych przez użytkownika: przybliżonego położenia i czasu oraz przechowywanego przez odbiornik almanachu. W sytuacji, gdy nie ma uprzednio zachowanego almanachu lub nie dysponuje

się przybliżoną pozycją, odbiornik w sposób systematyczny przeszukuje kosmos próbując odebrać sygnał od jakiegokolwiek satelity. Śledząc danego satelitę odbiornik demoduluje depeszę nawigacyjną i odczytuje dane almanachu o wszystkich satelitach w konstelacji. Pętla śledzenia nośnej używana jest do śledzenia częstotliwości nośnej, a pętla śledzenia kodu używane są do śledzenia kodów C/A i P. Pętla te muszą współdziałać by pozyskać i śledzić sygnał satelity. Pętla śledzenia kodu używana jest do pomiarów odległości³⁸. W pętli generowana jest replika kodu C/A satelity. W celu dopasowania odbieranego sygnału i wewnętrznie generowanej repliki należy wykonać dwie czynności:

- ✓ dopasować częstotliwość środkową repliki do częstotliwości środkowej odbieranego sygnału;
- ✓ dopasować fazę repliki do fazy odbieranego kodu.

W ogólności, zanim zacznie się proces śledzenia, replika kodu nie będzie skorelowana z odbieranym kodem z powodu czasu potrzebnego sygnałowi na dotarcie do odbiornika i różnicę skal czasu zegarów satelity i odbiornika. Odbiornik będzie więc przesuwiał generowaną replikę względem odbieranego kodu C/A by uzyskać maksymalną korelację, i w rezultacie śledzenie kodu.

Pętla śledzenia nośnej odbiornika generuje lokalną replikę nośnej, która różni się od odbieranej nośnej przede wszystkim z powodu występowania zjawiska Dopplera³⁹. Przesunięcie Dopplera proporcjonalne jest do względnej prędkości między odbiornikiem a satelitą. Aby pętla śledzenia nośnej mogła wykonywać swą funkcję, przychodzący sygnał musi być najpierw przemnożony przez zsynchronizowaną replikę kodu. Pętla śledzenia nośnej zmienia generowaną częstotliwość tak długo, aż będzie ona zgodna z częstotliwością odbieranej nośnej i uzyskany zostanie stan synchronizacji fazowej.

³⁸ W rezultacie dokonuje się pomiaru odległości, które nazywane są pseudoodległościami, ze względu na obarczający je, jednakowy dla wszystkich satelitów błąd, spowodowany błędem zegara odbiornika.

³⁹ Zjawisko Dopplera polega na tym, że odbierana częstotliwość drgań akustycznych, świetlnych lub elektromagnetycznych jest większa przy zbliżaniu się źródła drgań do obserwatora, a mniejsza przy jego oddalaniu się.

Proces odbioru danych rozpoczyna się po uzyskaniu synchronizacji nośnej. W pierwszym etapie odbywa się proces synchronizacji ciągu danych. Po uzyskaniu synchronizacji bitowej dane są kolekcjonowane przez odbiornik. Wyrafinowana metoda kontroli poprawności przesyłanej informacji zapobiega możliwości wykorzystania zniekształconych danych.

Odbiornik po odebraniu sygnałów czterech satelitów, osiągnięciu synchronizacji pętli kodowej i fazowej oraz odczytaniu depeszy nawigacyjnej jest gotów do **rozpoczęcia procesu nawigacji**. Zazwyczaj odbiorniki uaktualniają dane o pseudoodległości i prędkościach względnych raz na sekundę. Celem nawigacji jest obliczenie pozycji i prędkości odbiornika oraz czasu w skali GPS. Czas jaki upływa od momentu wysłania do momentu odebrania sygnału jest wprost proporcjonalny do odległości pomiędzy satelitą a odbiornikiem. Jest więc niezbędny, aby zarówno satelita jak i odbiornik używały tego samego czasu odniesienia. Odbiornik używa zrekonstruowanej skali czasu GPS do pomiaru momentu odbioru danych z satelity. W odbiorniku nie musi znajdować się wysokostabilny wzorzec, jak znajdujący się na satelitach wzorzec atomowy. Zamiast tego w odbiorniku znajduje się oscylator kwarcowy. Brak zgodności skali czasu generowanej przez ten oscylator ze skalą GPS jest korygowany w oparciu o rezultat pomiaru czterech pseudoodległości. Odbiornik GPS używa czterech pseudoodległości by rozwiązać układ czterech równań z czterema niewiadomymi: trzema współrzędnymi odbiornika i poprawką skali czasu odbiornika. Prędkość obliczana jest podobnie, lecz z użyciem względnych prędkości zamiast pseudoodległości. Ostateczne rozwiązanie nawigacyjne jest zazwyczaj uzyskiwane po wprowadzeniu rezultatów pomiaru do filtra Kalmana.

3.1. Dokładność odbiornika

Z analizy materiałów źródłowych wynika, że określanie dokładności odbiornika odbywa się przy pomocy następujących parametrów:

- ✓ Estymowanego odchylenia standardowego pomiaru odległości satelita-odbioru (UERE)⁴⁰. parametr ten jest transmitowany przez satelitę;
- ✓ Współczynników wiążących błąd pomiaru odległości do satelity z błędem wyznaczenia pozycji (DOP)⁴¹. Wielkości DOP są pochodną konfiguracji geometrycznej układu satelita-odbioru.

Spośród współczynników DOP konstruktorzy systemu uwzględniają:

- ✓ Geometryczne rozmycie dokładności (GDOP)⁴². Współczynnik ten jest odwrotnie proporcjonalny do objętości bryły, której wierzchołkami są pozycje obserwowanych satelitów i odbioru;
- ✓ Trójwymiarowe rozmycie dokładności (PDOP)⁴³. W pierwszym przybliżeniu wielkość PDOP jest nieco mniejsza od GDOP;
- ✓ Poziome rozmycie dokładności (HDOP)⁴⁴;
- ✓ Pionowe rozmycie dokładności (VDOP)⁴⁵;
- ✓ Rozmycie dokładności czasu (TDOP)⁴⁶.

Wstępną ocenę przewidywanej dokładności uzyskuje się w wyniku pomnożenia odpowiedniego współczynnika DOP przez UERE.

Z kolei określenie błędu pozycji wyznaczonej przez odbioru odbywa się przy pomocy następujących parametrów:

- ✓ prawdopodobnego błędu sferycznego (SEP)⁴⁷. 50% pozycji wyznaczanych trójwymiarowo znajduje się w sferze o promieniu SEP);
- ✓ prawdopodobnego błędu kołowego (CEP)⁴⁸. 50% pozycji wyznaczanych dwuwymiarowo znajduje się wewnątrz okręgu o promieniu CEP.

⁴⁰ UERE – *ang.* User Differential Range Error

⁴¹ DOP – *ang.* Dilution of Precision

⁴² GDOP – *ang.* Geometrical Dilution of Precision

⁴³ PDOP – *ang.* Position Dilution of Precision

⁴⁴ HDOP – *ang.* Horizontal Dilution of Precision

⁴⁵ VDOP – *ang.* Vertical Dilution of Precision

⁴⁶ TDOP – *ang.* Time Dilution of Precision

⁴⁷ SEP – *ang.* Spherical Error Probable

⁴⁸ CEP – *ang.* Circular Error Probable

Błędy związane z segmentem kosmicznym i segmentem nadzoru są poza wpływem użytkownika. Wszystkie błędy traktuje się zazwyczaj jako losowe i opisuje się rozkładem normalnym.

3.2. Parametry odbiornika

Konstruktorzy przewidzieli zestaw podstawowych parametrów pozwalających ocenić jakość działania odbiornika nawigacyjnego. Zestaw ten, w połączeniu z oceną cech użytkowych poszczególnych rozwiązań umożliwia porównywanie odbiorników oraz wybór najwłaściwszego do danego zadania.

Podstawowy zestaw parametrów odbiornika GPS obejmuje:

- ✓ dokładność wyznaczania pozycji;
- ✓ dokładność wyznaczania prędkości;
- ✓ dokładność wyznaczania czasu;
- ✓ ilość śledzonych satelitów. Założono minimum cztery satelity. Jednak w takiej sytuacji utrata sygnału jednego z nich (zajście satelity poza horyzont, przeszkodę terenową) powoduje przerwanie ciągłości nawigacji trójwymiarowej (akwizycja sygnału innego satelity i powrót do nawigacji trójwymiarowej może zająć do 2 minut). Rozwiązanie takie jest stosowane sporadycznie. Praktyczne wykorzystuje się minimum 5 satelitów, dzięki czemu zawsze w „zapasie” pozostaje jeden satelita. Najlepszym rozwiązaniem jest oczywiście śledzenie wszystkich widocznych satelitów⁴⁹, tj. do 12 satelitów;
- ✓ dopuszczalna dynamika (przyśpieszenia, którym poddany może zostać odbiornik bez zerwania śledzenia sygnału przez pętle śledzenia nośnej i kodu). Duża dynamika pożądana jest w aplikacjach lotniczych, w przypadku aplikacji morskich nie ma ona znaczenia;
- ✓ czas akwizycji - do pierwszego wyznaczenia pozycji;

⁴⁹ ang. All-In-View

- ✓ czas reaktywizacji - do wznowienia pomiarów po chwilowym zaniku sygnału satelitarnego;
- ✓ czułość odbiornika. Nie ma ona zasadniczego znaczenia dla właściwego odbioru. Prawie wszystkie typy odbiorników charakteryzują się czułością wystarczającą do odbioru najsłabszych sygnałów. Bardziej reprezentatywnym parametrem w tej sytuacji jest minimalny stosunek sygnału do szumu, przy którym odbiornik może jeszcze prawidłowo śledzić sygnał satelitarny. W przypadku dużego nasilenia ruchu, kryterium to zaostrza się. W przyszłości mogą pojawić się pewne kłopoty związane z możliwością obniżenia mocy nadajników satelitarnych (problem ten nie występuje obecnie). Moc emitowana przez obecnie pracujące satelity bloku II jest czterokrotnie większa od mocy gwarantowanej w specyfikacji systemu. Należy oczekiwać, iż z uwagi na oszczędność energii, nowe satelity bloku IIR będą charakteryzowały się mocą nadajników zbliżoną do gwarantowanej, a więc stosunek sygnału do szumu będzie gorszy o około 6 dB;
- ✓ odporność na sygnały zakłócające.

Wielkościami pomiarowymi uzyskiwanymi z sygnału satelitów GPS są:

- ✓ pseudodległość - wielkość różniąca się o stałą od czasu propagacji sygnału pomnożonego przez prędkość światła. Pseudodległość może być wyznaczana w oparciu o pomiary składowych sygnału związanych z modulacją kodem C/A lub P. Pomiar pseudodległości przy użyciu składowej związanej z kodem P charakteryzuje się większą precyzją. Typowa dokładność pomiaru z użyciem kodu C/A wynosi: 3-30m, z użyciem kodu P: 0,3-3m. Nieoznaczoność związana z pomiarem przy użyciu kodu C/A jest rzędu 300 metrów, kodu P 30 metrów. Nieoznaczoności te są proste do usunięcia. Współczesne odbiorniki korygują pomiar pseudodległości w oparciu o pomiar scałkowanej fazy fali nośnej;

- ✓ faza odtworzonej fali nośnej. Typowa dokładność tego pomiaru jest rzędu 1 mm. Pomiar fazy charakteryzuje się nieoznaczonością o wielkości równej długości fali nośnej - około 19 cm. Gdy zastosowane rozwiązanie techniczne nie pozwala na bezpośrednie wyodrębnienie fali nośnej z uwagi na system "Anti - Spoofing", pomiar fazy na częstotliwości L1 charakteryzować się może nieoznaczonością 1/2 długości fali i zazwyczaj obarczony jest dodatkowymi błędami. Usuwanie nieoznaczoności w pomiarach fazowych jest złożonym procesem obliczeniowym, o komplikacji wzrastającej z odległością pomiędzy współpracującymi odbiornikami;
- ✓ zintegrowana faza odtworzonej fali nośnej. Jest to wielkość analogiczna do pseudoodległości, mierzona jednak ze znacznie większą dokładnością. Ciągłe śledzenie fali nośnej ogranicza ilość wielkości nieoznaczonych do jednej, związanej z wartością fazy w momencie rozpoczęcia pomiaru.

3.3. Ograniczenia dokładności odbiornika

Poza wymienionymi wcześniej, sztucznie wprowadzanymi zniekształceniami sygnału i informacji satelitarnej, najpoważniejszymi źródłami błędów są:

- ✓ zmienne opóźnienie jonosferyczne. Jest ono najpoważniejszym obiektywnym źródłem błędów wyznaczania pozycji. Opóźnienie jonosferyczne zależne jest od gęstości swobodnych elektronów na drodze sygnału a jego wartość mieści się zazwyczaj w granicach 10-50 m. Duża zmienność warunków jonosferycznych, zarówno dobową jak i długookresową, powoduje iż model opóźnienia jonosferycznego transmitowany przez satelitę pozwala na redukcję odpowiedniego błędu co najwyżej w 50 %. Dokładniejszą wartość opóźnienia jonosferycznego obliczyć można w oparciu o rezultaty pomiarów wykonywanych jednocześnie na częstotliwościach L_1 i L_2 . Wymaga to użycia odbiornika dwu-częstotliwościowego;

- ✓ zmienne opóźnienie troposferyczne. Wartość opóźnienia troposferycznego zmienia się zazwyczaj w granicach 2-3 metrów. Modelowanie opóźnienia troposferycznego w oparciu o aktualne pomiary parametrów meteorologicznych stosuje się głównie przy pomiarach geodezyjnych wykonywanych w terenie o zróżnicowanej wysokości, jak również w pomiarach o zasięgu globalnym;
- ✓ odbiór sygnałów odbitych od powierzchni, konstrukcji otaczających antenę może być źródłem błędu pseudoodległości dochodzącego do 10 m. Odpowiedni błąd fazy nośnej może spowodować błąd pomiaru rzędu kilku centymetrów. Jedynymi znanymi sposobami uniknięcia tych błędów są: stosowanie anten o specjalnej konstrukcji, odpowiedni dobór miejsca obserwacji.

3.4. Wnioski

1. Wzrost dokładności otrzymywanej pozycji przez odbiornik GPS może być osiągnięty dzięki tworzeniu sieci stacji nadających sygnały pseudosatelitarne. Dlatego też w rejonach o dużym natężeniu ruchu mogą być wykorzystywane różnicowe stacje odniesienia. Możliwość rozszerzenia konfiguracji odbiornika o aparaturę odbiorczą sygnałów różnicowych lub pseudo satelitarnych jest dość istotnym parametrem technicznym decydującym o jego wykorzystaniu danych warunkach eksploatacyjnych.
2. W celu minimalizacji błędu określonej pozycji satelitarnej wskazany jest dobór satelitów wykorzystywanych w procesie nawigacyjnym w taki sposób, aby ich azymuty przecinały się pod kątem zbliżonym do 90^0 . Po odrzuceniu tych satelitów, które już są, albo wkrótce będą poniżej horyzontu odbiornik musi dokonać wyboru trzech lub czterech z nich do określenia pozycji.
3. Selekcji sygnałów satelitarnych należy dokonywać jak najczęściej w celu zapewnienia optymalnej dokładności otrzymywanej pozycji satelitarnej

stosownie do zmian wzajemnego układu satelitów systemu GPS i użytkownika.

4. W celu zapewnienia ciągłości procesu określenia pozycji, nawet w przypadku określania łączności z wymagana liczbą satelitów systemu GPS, niektóre odbiorniki tego systemu mają możliwość wspomagania procesu nawigacyjnego poprzez pomocnicze wprowadzenie wysokości anteny odbiornika (wspomaganie wysokościowe) lub poprawki na opóźnienie zegara odbiornika użytkownika (wspomaganie czasowe). Wspomaganie wysokościowe jest niezbędne przy dostępie tylko do trzech satelitów, a wspomaganie wysokościowe i czasowe przy dostępie tylko do dwóch satelitów systemu.
5. Istotnym parametrem wpływającym na właściwości eksploatacyjne odbiornika GPS jest liczba torów odbiorczych. Parametr ten decyduje bezpośrednio o sposobie dokonywania pomiarów i ich jakości. Ze względu na swoje szczególne znaczenie jest często ogólnie przyjmowanym kryterium podziału odbiorników GPS.

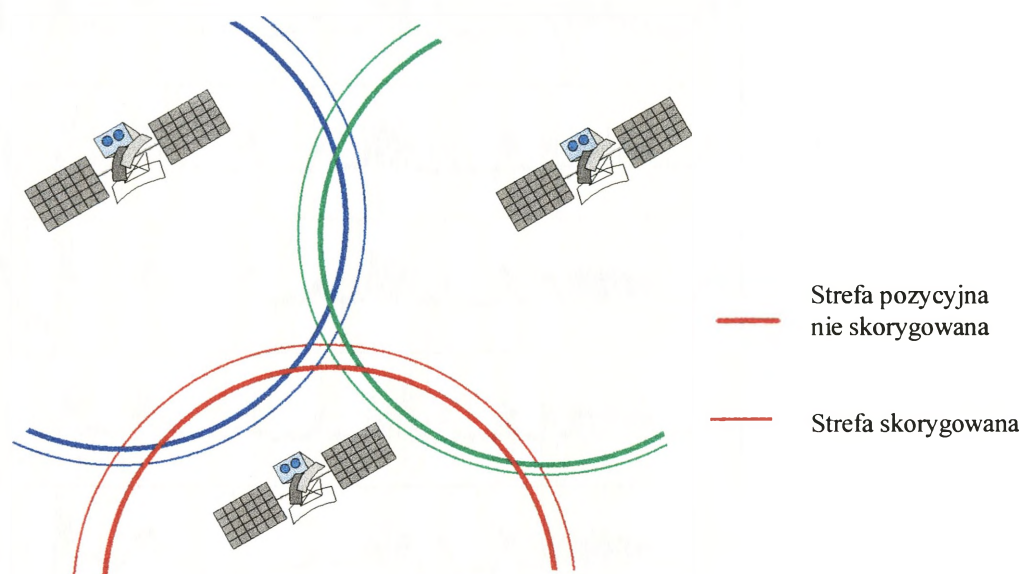
4. ROŻNICOWY SYSTEM GPS

4.1. Ogólna charakterystyka systemu różnicowego

Ciągle nadawanie sygnałów radiowych przez satelity systemu i ich odbiór przez pokładowe (naziemne) urządzenia GPS pozwalają na precyzyjne określenie odległości do satelitów i czasu rejestracji impulsów. Procedura ta wymaga jednak dokładnej synchronizacji zegara odbiornika z zegarami wszystkich urządzeń umieszczonych na orbitach. Dokładna synchronizacja jest dość trudna do spełnienia. Niedokładność wynosząca milionową część sekundy powoduje błąd rzędu 300 m w pomiarze odległości. Problem ten można ominąć stosując super dokładne zegary atomowe na każdym satelicie. Podobnie należało by wyposażać odbiorniki w identyczne zegary co jednak podrażałoby koszty i bardzo komplikowałoby urządzenia. Konstruktorzy systemu zastosowali metodę pośrednią (wybrali drogę na skróty) polegającą na ustalaniu, o ile wskazania niedokładnych zegarów podzędnych różnią się od czasu dokładnego.

Zdaniem konstruktorów systemu zadanie to nie jest szczególnie trudne. Mierzac odległości od czterech satelitów - według wskazań niedokładnych zegarów - wyniki obliczeń (zwane pseudoodległościami) będą obarczone pewnymi błędami. Odpowiadają one czterem teoretycznym sferom, które - dla pomiaru poprawnego - powinny przeciąć się w jednym punkcie odpowiadającym położeniu odbiornika. Nie przetną się jednak z powodu błędów synchronizacji. Cztery sfery będą trochę zbyt obszerne (jeśli zegar się spieszy) lub trochę za małe (jeśli zegar się spóźnia). Istnieje tylko jedna wartość błędu, która powoduje, że cztery sfery spotykają się w jednym punkcie (rys.4.1). Niedokładność zegara w urządzeniu odbiorczym sprawia, że pomiar odległości do satelity GPS nie jest zwykle precyzyjny, bowiem odpowiednie strefy pozycyjne (*pogrubione linie* na rysunku) nie przecinają się

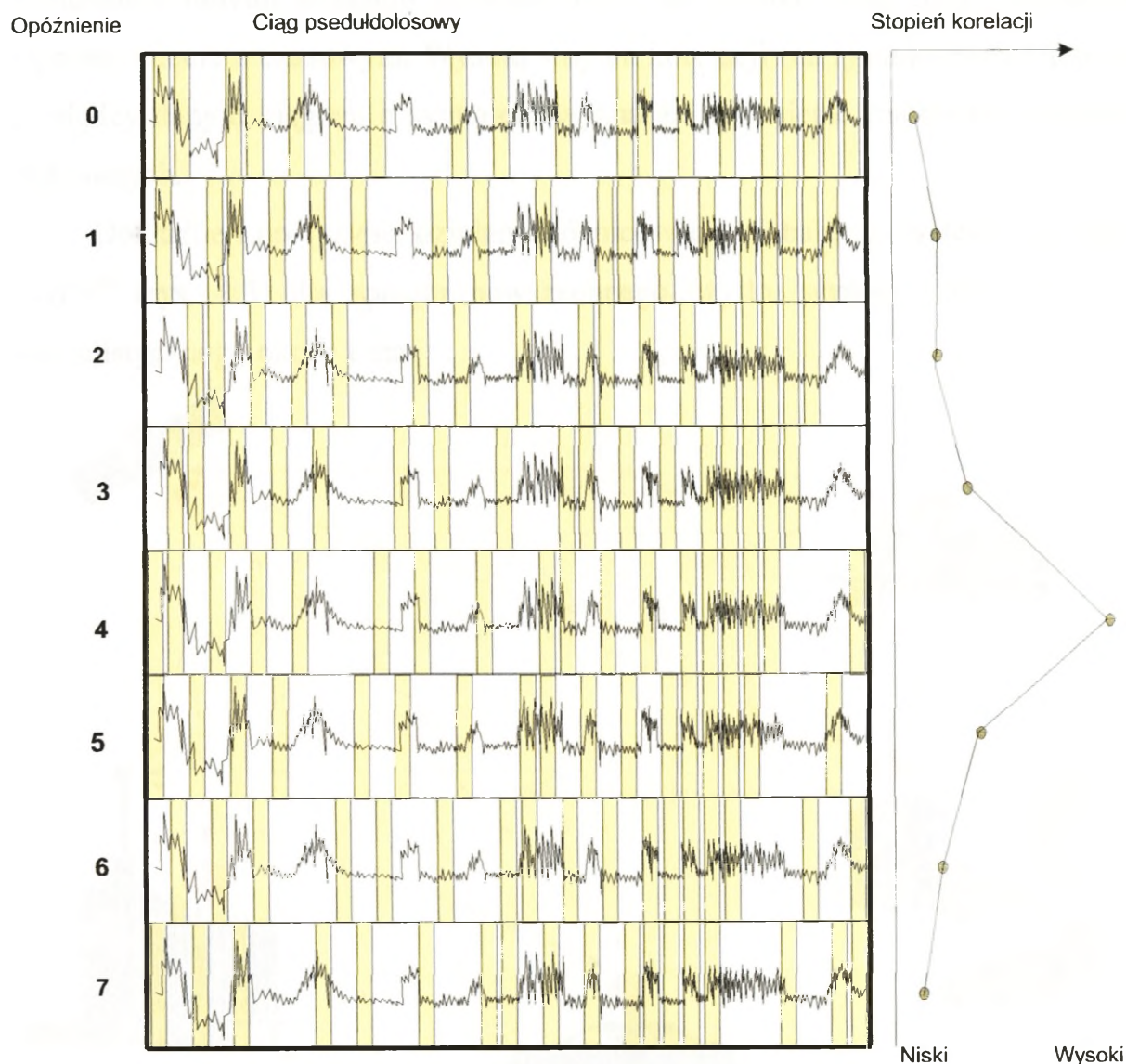
w jednym punkcie. Aby skorygować ten błąd, należy nieco przyspieszyć lub opóźnić chód zegara w odbiorniku. Wówczas uzyska się jeden punkt wspólny. Na rysunku 4.1 przedstawione są trzy satelity, w rzeczywistości w przestrzeni trójwymiarowej należy wykonać cztery pomiary od satelitów.



Rys. 4.1. Sfery pozycyjne z trzech satelitów

Wartość skorygowaną uzyskuje się po kilku prostych obliczeniach algebraicznych. Tak więc nawet prosty odbiornik, z elektronicznym czasomierzem kwarcowym, można zsynchronizować z atomowymi chronometrami satelitarnymi.

Kodowane ciągi impulsów pseudolosowych generowane są w sposób ciągły przez nadajniki satelitów w takt impulsów zegarowych czasu odniesienia (czasu GPS), które generuje również główna stacja kontrolna. Są one inne dla każdego satelity, co pozwala na jego identyfikację przez obserwatora. Stabilność transmisyjna jest bardzo wysoka, rzędu 1×10^{-13} s. Tak duża stabilność decyduje o dokładności systemu. Porównanie odebranych ciągów impulsów z innymi wersjami ciągu nadawanego, różniącego się przesunięciem czasowym pozwala wybrać najwyższą zgodność (korelację) obu sygnałów (rys. 4.2).

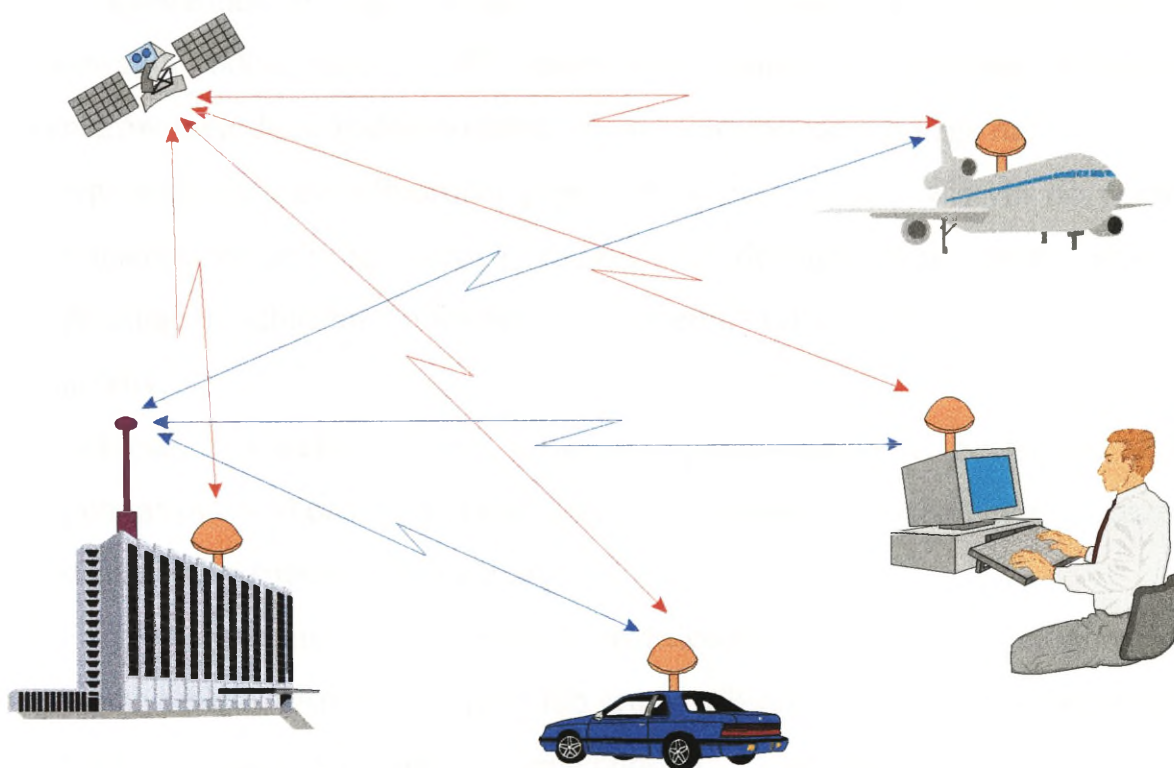


Rys. 4.2. Korelacja ciągów impulsów pseudolosowych z sygnałem

Znając przesunięcie czasowe bez trudu można wybrać drogę przebytą przez sygnał. Mnożąc zmierzoną wartość czasu propagacji przez prędkość rozchodzenia się fal radiowych, otrzymuje się odległość między satelitą a użytkownikiem. Znając odległości do czterech satelitów oraz ich współrzędne, można obliczyć współrzędne użytkownika i dokładny czas systemowy. Ciągi pseudolosowych impulsów nadawane są z satelitów GPS w ściśle określonych momentach. Czas, po którym osiągają punkt na Ziemi mierzony jest dzięki porównaniu sygnału wraz

z szumem z innymi wersjami znanego ciągu (na rysunku kolor żółty) różniącymi się przesunięciem czasowym. Wysoki stopień korelacji (na rysunku linia z prawej) pomiędzy danym ciągiem a sygnałem wyznacza opóźnienie impulsów względem nadawanych.

Dokładne i precyzyjne działanie różnicowego globalnego systemu nawigacji DGPS⁵⁰ (rys. 4.3) dla sprzętu powszechnego użytku wynosi około 1m a dla specjalistycznego około 1 cm.



Rys. 4.3. Schemat funkcjonowania różnicowego DGPS

Różnicowy DGPS zabezpiecza ominięcie wprowadzonych przez twórców systemu zabezpieczeń. Nieruchoma stacja o znanej lokalizacji ustala błędy czasowe sygnałów z kosmosu (na rysunku kolor czerwony) i poprawki (na rysunku kolor niebieski) przekazuje przez radio do znajdujących się w pobliżu odbiorników ruchomych. Metoda ta pozwala zmniejszyć błąd lokalizacji ze 100 m do 1m

⁵⁰ DGPS – *ang.* Differential GPS

a nawet do 1 cm. Szeroka dostępność różnicowego GPS stała się przyczynkiem do dyskusji nad dalszym kodowaniem sygnałów nawigacyjnych. Samo szyfrowanie jest drogie i zmusza rządy różnych państw do nakładów finansowych na wydawanie poprawek i nadawanie ich przez radio.

4.2. Kodowe systemy różnicowe

Konstruktorzy są zdania, że wiele ograniczeń występujących przy stosowaniu odbiorników GPS może być usuniętych poprzez wykonywanie pomiarów metodami kodowo-różnicowymi. Ich realizacja polega na:

- ✓ wprowadzaniu do odbiornika poprawek w czasie rzeczywistym do pomiarów, transmitowanych np. drogą radiową a dostarczanych przez równolegle pracujący odbiornik referencyjny systemu GPS o znanych współrzędnych anteny;
- ✓ dokonaniu korekcji przez program opracowujący *a posteriori* rezultaty pomiarów wykonanych przy użyciu odbiornika ruchomego i bazowego o znanych współrzędnych anteny.

Przy stosowaniu metod kodowo-różnicowych w dużym stopniu można ograniczyć błędy wspólne dla pary lub grupy odbiorników. Są to między innymi:

- ✓ błędy spowodowane zmiennością opóźnień: jonosferycznego i troposferycznego;
- ✓ niedokładności efemeryd, w tym wywołane systemem SA;
- ✓ błędy zegara satelity, błędy efemeryd, w tym wywołane systemem SA.

Serwis różnicowy uzupełniany bywa często o informacje na temat aktualnego stanu systemu.

Podstawowym celem kodowo-różnicowego systemu GPS jest określenie i poprawienie błędów występujących w systemie. Kodowa technika różnicowa

GPS pozwala na osiągnięcie *wysokiej dokładności* od 0,5 do 5 m. W porównaniu z pomiarem autonomicznym jest to bardzo znacząca poprawa.

W technice różnicowo-kodowej DGPS wykorzystuje się odpowiednie odbiorniki referencyjne umieszczane w punktach o znanych współrzędnych. W ten sposób błędy wskazywane przez dwa takie odbiorniki znajdujące się w tym samym obszarze są skorelowane. Dzięki znajomości swego położenia odbiornik bazowy może obliczać i wносить poprawki do swych pomiarów. Poprawki te są różnicą między rzeczywistym wynikiem pomiaru a wynikiem obliczonym na podstawie znanego położenia. Mierzona może być np. pseudoodległość lub zintegrowana faza nośnej. Odbiornik referencyjny jest częścią stacji referencyjnej umieszczonej w obszarze gdzie istnieje zapotrzebowanie na dokładny serwis pozycyjny. Swoistą odmianę kodowej techniki różnicowej stosuje się w geodezji, wykorzystując do obliczeń różnice wielkości pomiarowych, w rezultacie uzyskuje się dokładne współrzędne wzajemne. Korzysta się przy tym z pierwszych, drugich i trzecich różnic wielkości pomiarowych uzyskanych w tym samym czasie lub z tego samego satelity.

W kodowych systemach różnicowych poprawki są formatowane i wysyłane drogą radiową *w czasie rzeczywistym*. Odbiornik bazowy wraz z nadajnikiem poprawek stanowi stację bazową DGPS. Odbiornik użytkownika odbiera poprawki i uwzględnia je w swoich obliczeniach nawigacyjnych. W 1983 Komisja Radiotechniczna Służby Morskiej (RTCM)⁵¹ powołała komitet SC-104 w celu ustanowienia standardu transmisji poprawek różnicowych i formatów przesyłanych danych.

Stacja referencyjna składa się z:

- ✓ odbiornika GPS z anteną;

⁵¹ RTCM – ang. Radio Technical Commission for Maritime Service.

- ✓ procesora danych;
- ✓ nadajnika z anteną.

Odbiornik GPS użyty w stacji powinien być wielokanałowy i śledzić wszystkie satelity znajdujące się nad horyzontem. Przy obecnej konstelacji oznacza to odbiornik 12 kanałowy. Każdy z satelitów powinien być śledzony od momentu wejścia do momentu zejścia za horyzont. Poprawki powinny być transmitowane zaraz po stwierdzeniu odpowiedniego poziomu sygnału do szumu i ustabilizowaniu się filtrów kodu i nośnej. Stacja referencyjna powinna wspomagać śledzenie kodu pomiarami nośnej, które są mniej zaszumione. Stacja referencyjna ma możliwość, poprzez porównanie pomiarów pseudoodległości ze znaną geometryczną odległością do satelity, natychmiastowej detekcji błędnych danych. Powinna ona poinformować o zaistnieniu takiej sytuacji odbiorniki ruchome wysyłając odpowiednią wiadomość. Sytuacja ta jest niezmiernie mało prawdopodobna, lecz możliwe jest, że satelita zacznie nadawać błędne dane zanim stacja kontrolna zdąży przesłać mu nowy status określany przez konstruktorów systemu statusem "zdrowia".

Opóźnienie jonosferyczne nie powinno być modelowane przez stację referencyjną, ponieważ:

- ✓ użytkownicy blisko stacji referencyjnej obserwować będą takie samo opóźnienie jak stacja i poprawki będą je całkowicie kompensować;
- ✓ użytkownicy znajdujący się daleko od stacji, wiedzą o tym (znają własne współrzędne i współrzędne stacji) i mogą sami modelować opóźnienie sygnału obserwowane przez siebie i stację. Rozwiązanie takie jest lepsze niż modelowanie przez stację referencyjną, gdyż umożliwia uzależnienie modelu od odległości stacja-odbiornik, a zatem zwiększenie jego dokładności.

Opóźnienie troposferyczne także nie powinno być modelowane przez stację referencyjną:

- ✓ dla satelitów powyżej 10 stopni elewacji jest ono mniejsze od jednego metra - dla aplikacji nawigacyjnych nie ma ono większego znaczenia;
- ✓ w przypadku użytkowników położonych blisko stacji referencyjnej poprawka wyeliminuje je całkowicie.

Użytkownicy oddaleni od stacji, w szczególności znajdujący się na wysokości znacznie różniącej się od wysokości stacji (więcej niż 1000 m) mogą zastosować swój model troposfery uwzględniający różnicę wysokości, własne warunki atmosferyczne (temperaturę, ciśnienie, wilgotność) i warunki atmosferyczne panujące na stacji referencyjnej dla których przewidziano w standardzie RTCM-104 wiadomość typu 15. Dla zastosowań nawigacyjnych nie ma potrzeby stosowania na stacji zegara atomowego, wystarczy zwykły oscylator kwarcowy. Wynika to z faktu, że błąd zegara spowoduje przesunięcie poprawek o pewną wspólną dla nich wartość, która z kolei nie wywoła błędu wyznaczania pozycji w odbiorniku ruchomym. Jest to prawda, tylko w sytuacji gdy odbiornik ruchomy w danym rozwiązaniu używa tylko poprawek wyznaczonych na tą samą chwilę. Dlatego też ważne jest by odbiornik ruchomy nie szacował poprawek dla pewnych satelitów na podstawie prędkości ich zmian a dla innych używał otrzymanych na dany moment poprawek, gdyż w ten sposób włączy w swe rozwiązanie błąd zegara stacji referencyjnej. W następujących sytuacjach wysokostabilny zegar jest jednak pożądany:

- ✓ transfer czasu;
- ✓ użycie łącz radiowych o małej szybkości transmisji - odbiornik ruchomy będzie mógł używać poprawek wyznaczonych w różnych sytuacjach;
- ✓ odbiorniki ruchome znajdują się w terenie o ograniczonej widoczności sfery niebieskiej - użytkownicy mając odbiorniki z wysokostabilnymi zegarami i posługując się poprawkami będą mogli przez pewien czas uzyskiwać

rozwiązanie trójwymiarowe posługując się tylko trzema satelitami oczekując aż pojawi się czwarty. Nie jest to jednak zalecane.

W wyposażenie użytkownika składa się z następujących elementów:

- ✓ odbiornika GPS z anteną;
- ✓ procesora danych;
- ✓ odbiornika radiowego poprawek z anteną.

Na odbiornik ruchomy nie nakłada się żadnych szczególnych ograniczeń, jego konstrukcja powinna być dostosowana do przeznaczenia i oczekiwanej dokładności. W szczególności mogą to być odbiorniki:

- ✓ wielokanałowe;
- ✓ jedno lub kilku kanałowe używające technik sekwencyjnych, równoległych, multipleksowania kanałów;
- ✓ rozwiązanie może być uzyskiwane na podstawie danych ze wszystkich satelitów lub najlepszego zestawu;
- ✓ użyte mogą zostać dowolne niezależne czujniki.

Dla polepszenie dokładności odbiornik może wykonywać pomiary fali nośnej. Wiadomości typów 18 od 21 wspierają technikę rzeczywistego czasu kinematycznego (*ang.* „real time kinematic”). Stosowana może też być technika w locie (*ang.* „on-the-fly”), umożliwiającą szybkie określenie początkowej nieoznaczoności przy pomiarach fazy.

Łącze transmisyjne może wykorzystywać dowolną częstotliwość i modulację. Istnieje tylko jeden warunek odpowiedniej szybkości transmisji. Z punktu widzenia odbiornika ruchomego rodzaj łącza nie ma znaczenia tak długo jak długo dostarcza ono poprawek. W przypadku DGPS dostępne publicznie łącze powinno być standardowe i jego parametry ogólnie dostępne. W instalacjach prywatnych możliwe jest kodowanie wiadomości a tym samym ograniczenie dostępu tylko do użytkowników autoryzowanych.

4.3. Transmisja poprawek

Dla transmisji poprawek mogą być wykorzystywane następujące częstotliwości:

- ✓ Niskie i średnie częstotliwości. Pasmo niskiej częstotliwości (LF) rozciąga się od 30 do 300 kHz, natomiast pasmo średniej częstotliwości (MF) rozciąga się od 300 kHz do 3 MHz. Na częstotliwościach tych pracują m.in. morskie i lotnicze latarnie kierunkowe. Straż wybrzeża USA używa systemu swych latarni kierunkowych do transmisji poprawek w standardzie RTCM. Podnośna latarni jest modulowana sygnałem MSK, która wymaga minimalnego pasma dla danej prędkości transmisji. Nie powoduje zakłóceń w pracy normalnych odbiorników korzystających z sygnału latarni, oraz odporna jest na zakłócenia atmosferyczne. Zasięg wynosi w praktyce ponad 150 kilometrów na morzu i 20 do 100 kilometrów w głąb lądu. Prędkość transmisji wynosi od 50 do 100 bitów na sekundę. Obecnie na prawie całym wybrzeżu USA dostępne są poprawki różnicowe w tym właśnie systemie. Komercyjne łącza ustanowione zostały w górnym zakresie pasma fal średnich (MF – Medium Frequency) na częstotliwościach bliskich 2 MHz. W systemach tych, wykorzystywanych głównie w marynarce wojennej zastosowano modulację FSK, w której jeden ton przypisany jest zeru a drugi jedynce. Zasięg wynosi 400 kilometrów na morzu i 50 na lądzie.
- ✓ Pasmo fal krótkich rozciąga się od 3 do 30 MHz. Komunikacja w tym paśmie opiera się przede wszystkim na falach odbitych od jonosfery. Osiąga się zasięg transmisji do tysięcy kilometrów. Problem stanowią jednak zaniki sygnału, a także zatłoczenie pasma, które może być przyczyną zakłóceń interferencyjnych. W niektórych rejonach świata dostępne są komercyjne DPGS łącza krótkofalowe podobne do łączy operujących w paśmie 2 MHz.

- ✓ Fale ultrakrótkie (UHF/VHF). Pasmo wysokich częstotliwości rozciąga się od 30 do 300 MHz natomiast pasmo ultrawysokich częstotliwości rozciąga się od 300 MHz do 3 GHz. Komunikacja na tych pasmach przy użyciu nadajników naziemnych w zasadzie ograniczona jest do linii widoczności. W rzeczywistości jednak troposfera przenosi fale nieco poza horyzont optyczny. Dla przykładu, gdy obydwie anteny znajdują się na wysokości 10 metrów maksymalny zasięg transmisji wynosi 26 kilometrów. Zasięg ten może być nieznacznie większy na morzu, natomiast zasięg na lądzie może być mniejszy ze względu na ukształtowanie terenu i budynki. Rozszerzyć zasięg można posługując się siecią retransmiterów. Dane najczęściej przesyłane są z wykorzystaniem kluczowania z przesuwem częstotliwości (FSK - Frequency Shift Keying) przy szybkości 1200, 2400 i 9600 bitów na sekundę. Skorzystać można też z istniejących łącz. Przykładem mogą być sieci telefonii komórkowej. Mają one jednak ograniczenia innych systemów UHF/VHF, takie jak ograniczony zasięg, wrażliwość na przeszkody terenowe, a ponadto koszty ich użytkowania są znaczące. Alternatywą są sieci komercyjnych i publicznych rozgłośni radiowych. Istnieje możliwość transmisji danych na ich podnośnej. System ten jest wykorzystywany w wielu miastach USA i Kanady.
- ✓ Łączność satelitarna. Podstawową zaletą łącz satelitarnych jest pokrycie dużych obszarów. Obecnie dostępny jest komercyjny system oparty o satelity Inmarsat. Opracowywane są także systemy oparte na satelitach niskich orbit (LEO)⁵². Zaletą ich w porównaniu z systemami opartymi na satelitach geostacjonarnych jest mniejszy rozmiar i koszt odbiornika.

⁵² LOE – ang. Low Ephemerides Orbit.

4.4. Odmiany technologii różnicowych

W podrozdziale tym zespół badawczy zaprezentował różne odmiany technologii różnicowych uwarunkowane sposobami obliczania i transmisji poprawek oraz dokonywanymi ich pomiarami.

Poprawki do położenia. Alternatywą jest obliczanie poprawek jako różnicy pomiędzy zmierzoną a znaną pozycją stacji bazowej. Poprawki te są następnie dodawane do pozycji obliczanej przez odbiornik ruchomy. Podejście to jest pozornie prostsze, jednak błąd wyznaczonej pozycji silnie zależy od wykorzystanych do jej wyznaczenia satelitów. Odbiornik referencyjny musiałby więc obliczać i wysyłać poprawki do pozycji obliczonej z każdej możliwej kombinacji satelitów.

Poprawki do pseudoodległości. Najczęściej stosowaną metodą jest obliczanie poprawek do pseudoodległości. Poprawki te są różnicą pomiędzy pseudoodległością obserwowaną przez stację bazową a odległością obliczoną na podstawie efemerydy i położenia stacji bazowej. Odbiornik ruchomy dodaje poprawki do swoich pomiarów pseudoodległości. Stacja bazowa powinna obserwować wszystkie widoczne satelity i obliczać dla nich poprawki różnicowe. Dzięki temu nie dochodzi do sytuacji, gdy odbiornik ruchomy nie może znaleźć rozwiązania różnicowego z powodu zbyt małej liczby satelitów z poprawkami. Błędy obserwowane przez stację bazową i odbiornik ruchomy są skorelowane do odległości około 400-500 km. Poprawki otrzymywane przez odbiornik ruchomy zawsze są opóźnione, chociażby ze względu na czas potrzebny do ich obliczenia i czas transmisji. Wielkość tego opóźnienia nie powoduje znaczącego pogorszenia dokładności. Dynamika zmian SA sięga do 0,2 m/s, więc po 5 sekundach poprawki obarczone będą błędem 1 m. Uznając 1 m za graniczny dopuszczalny błąd poprawki wymagane jest co najmniej jedno uaktualnienie na 5 sekund. Wymaganie

to można złagodzić transmitując oprócz poprawek pseudoodległości także prędkość ich zmian. W tym wypadku błąd poprawki po 30 sekundach narośnie do około 1,5 m. W praktyce, powyższe oszacowanie nie zawsze pozostaje prawdziwe. Kilkumetrowe odchylenia od pozycji nominalnej są zazwyczaj wyraźnie widoczne już po upływie 10 sekund od punktu odniesienia w stosunku do poprawki. Poprawki transmitowane mogą być ze stacji bazowej do odbiornika ruchomego - najczęściej spotykana sytuacja. Odbiornik ruchomy sam oblicza swoją pozycję. Transmituje surowe dane nawigacyjne do stacji bazowej, która oblicza pozycję odbiornika ruchomego. Dzięki takiemu podejściu obliczenia dokonywane przez odbiornik ruchomy ulegają uproszczeniu, prostsza może być więc i jego konstrukcja. Metoda ta wykorzystana jest w systemach automatycznej lokalizacji pojazdów (AVL)⁵³.

Pomiar kodu wygładzony pomiarami fazy. Typowy błąd losowy pomiaru kodu ma wartość średniokwadratową rzędu jednego procenta długości fali. Dla kodu C/A oznacza to około trzech metrów. Natomiast dla kodu P około 30 cm, kod ten dostępny jest jednak tylko użytkownikom autoryzowanym. W przypadku pomiarów fazy nośnika wartość błędu średniokwadratowego jest rzędu dziesiątych milimetra. Problemem jest jednak nieznajomość odległości pomiędzy satelitą a stacją referencyjną w momencie rozpoczęcia pomiaru, związana z nieoznaczonością całkowitej liczby cykli. Pomiary kodu nie posiadają tej niedogodności - odległość do satelity jest znana. Łącząc cechy obydwu typów pomiarów, czyli:

- ✓ absolutną znajomość odległości, lecz duże zaszumienie - w przypadku pomiarów kodu;

⁵³ AVL – ang. Automatic Vehicle Location.

- ✓ znajomość tylko przyrostów odległości, lecz minimalne zaszumienie – w przypadku pomiarów nośnej, otrzymujemy nowy typ pomiaru - pomiar kodu wygładzony pomiarem nośnej.

Przykładem praktycznej realizacji wygładzania jest użycie filtra rekursywnego, w którym waga fazy jest zwiększana a waga kodu zmniejszana.

Pomiary kinematyczne w czasie rzeczywistym. Pomiary fazy nośnej umożliwiają osiągnięcie w trybach różnicowych osiągnięcie precyzji milimetrowej. Pomiary te są rutynowo używane do precyzyjnego określania położenia, z użyciem technik statycznych, kinematycznych i pseudokinematycznych. Wszystkie te metody wymagają zainicjowania pomiarów w punkcie o znanych współrzędnych lub zainicjowania przez kilkuminutowy pomiar w stałym punkcie. Ostatnie postępy zaowocowały powstaniem techniki "on-the-fly" nie wymagającej procesu inicjalizacji i umożliwiającej uzyskanie dokładności centymetrowej, dostępnej w czasie rzeczywistym a występującej pod nazwą RTK⁵⁴. Standard RTCM przewiduje dla pomiarów RTK wiadomości typu 18 do 21. Konieczna jest jednak duża częstotliwość uaktualniania poprawek: 0,5 do 2 sekund. Dekorelacja przestrzenna ogranicza zasięg dokładności decymetrowej do odległości kilku, kilkunastu kilometrów pomiędzy stacją referencyjną a odbiornikiem ruchomym.

Pomiary w czasie rzeczywistym i późniejszym. W przypadku, gdy pomiar w czasie rzeczywistym nie jest konieczny, istnieje możliwość zapisywania danych generowanych przez odbiornik ruchomy i odbiornik referencyjny. Rozwiązanie różnicowe obliczane jest w późniejszym momencie na podstawie zapisanych danych. Zaletą tej metody jest rezygnacja z łącza radiowego.

Zasięg DGPS. DGPS obejmuje sieć stacji referencyjnych. Odbiornik ruchomy używa poprawek z najbliższej stacji. Pojedyncza stacja dostarcza

⁵⁴ RTK - ang. Real -Time Kinematic

poprawki ważne w obszarze o promieniu około 300 km. W praktyce obszar ten jest mniejszy ze względu na ograniczony zasięg środka transmisji.

Lokalny różnicowy GPS (LADGPS)⁵⁵. Tak jak w przypadku rozszerzonego DGPS, LADGPS obejmuje sieć stacji referencyjnych. W tym przypadku jednak odbiornik ruchomy oblicza wartość poprawki jako średnią ważoną poprawek transmitowanych przez różne stacje referencyjne. Umożliwia to zwiększenie odległości między stacjami bez zmniejszenia precyzji.

Różnicowy GPS dla dużego obszaru (WADGPS)⁵⁶. Ideą tego GPS jest zwiększenie obszaru na którym poprawki zachowują ważność, a przez to zmniejszenie liczby stacji bazowych potrzebnych do pokrycia danego regionu świata. Poprawki różnicowe zawierają połączony efekt wielu źródeł błędów. Dokładność ich spada wraz ze wzrostem odległości od stacji bazowej. Podejście stosowane w WADGPS polega na analizie poszczególnych źródeł błędów i modelowaniu ich zmian, a następnie przesłaniu poprawek dla każdego z satelitów do użytkownika. Użytkownik stosuje te poprawki uwzględniając odległość od stacji bazowej. WADGPS wymaga rozszerzenia obecnego standardu RTCM-104. W skład WADGPS wchodziłaby sieć rozrzuconych po świecie stacji kontrolnych, które transmitowałyby swe obserwacje do stacji głównej. Stacja główna obliczałaby poprawki i transmitowała je do użytkowników. Efekt błędu położenia stacji bazowej i błędów efemerydy rośnie ze wzrostem odległości, tak więc w przypadku WADGPS współrzędne stacji kontrolnych powinny być znane wyjątkowo dokładnie, a efemerydy obliczane przez stację główną powinny być dokładniejsze od efemeryd zdegradowanych przez SA. Te nowe efemerydy byłyby częścią wiadomości WADGPS. Ze względu na różne dla różnych punktów opóźnienie jonosferyczne, powinno być ono modelowane, estymowane

⁵⁵ LADGPS – *ang.* Local Differential GPS

⁵⁶ WADGPS – *ang.* Wide Area DGPS

i przesyłane do użytkownika. Biorąc pod uwagę powyższe stacja bazowa wyposażona powinna być w odbiornik dwuczęstotliwościowy by umożliwić pomiar opóźnienia jonosferycznego. Pożądane jest też wykorzystanie częstotliwości pochodzącej ze wzorca atomowego. Znacząco redukuje to zaburzenia zegara odbiornika i umożliwia lepsze estymowanie błędu zegara satelity (SA oprócz degradowania dokładności efemeryd degraduje też stabilność zegara satelity). WADGPS ma potencjał zniesienia wpływu SA na dużym terenie oraz pokonania przestrzennych ograniczeń DGPS. Szczególne duże możliwości daje tu wykorzystanie do transmisji poprawek satelitów geostacjonarnych, takich jak Inmarsat.

Technika pseudosatelitów. Transmisja poprawek DGPS odbywa się zazwyczaj przez specjalnie do tego celu przeznaczone łącze wykorzystujące oddzielną częstotliwość, różną od L_1 czy L_2 . Technika pseudosatelitów opiera się na odmiennym podejściu. Sygnał pseudosatelity używa tej samej częstotliwości, modulacji, sposobu kodowania jak sygnał rzeczywistych satelitów. Kody poszczególnych pseudosatelitów choć mają tą samą długość co kody satelitów są od nich różne i wybrane tak by miały niski współczynnik korelacji z nimi. Transmitowana depesza zawiera między innymi poprawki różnicowe. Transmitując poprawki w ten sposób unika się konieczności stosowania oddzielnej anteny, łącza danych i interfejsu. Ponadto odbiornik uzyskiwać może dodatkowe pomiary pseudoodległości do pseudosatelity. Technika ta ma jednak podstawowe ograniczenie - propagacja sygnału o częstotliwości L_1 ograniczona jest do linii widzialności. W konsekwencji może być ona stosowana z powodzeniem dla aplikacji lotniczych. W przypadku aplikacji morskich, a tym bardziej lądowych ograniczona jest do małego obszaru. Standard RTCM-104 rezerwuje dla pseudosatelitów wiadomości typu 8 i 12 - odpowiednio almanach i parametry

stacji. Szczegóły tych typów nie zostały jednak jeszcze ustalone (w wersji 2.1 standardu).

Standard RTCM SC-104. Najszerzej stosowanym standardem transmisji poprawek jest standard zdefiniowany przez RTMC. Przewiduje on 63 typy wiadomości, zebrane w tabeli 2.

Typ 1 - Poprawki różnicowe DGPS. Jest to podstawowy typ wiadomości. Zawiera poprawkę różnicową i pochodną pseudoodległości. Z każdą poprawką związany jest parametr emisji danych (IOD)⁵⁷ (Issue of Data), określający moment na który wyznaczono efemerydę i parametry zegara satelity, na podstawie których z kolei wyznaczona jest poprawka dla tego satelity. Odbiornik ruchomy może stosować poprawkę tylko do pseudoodległości o tym samym IOD.

Typ 2 - Poprawki delta-różnicowe. Poprawki te przeznaczone są dla odbiorników które nie dekodują nowych efemeryd zaraz po otrzymaniu. Stacja referencyjna dekoduje efemerydy natychmiast, mogą więc zdarzyć się sytuacje gdy IOD danych przez nią użytych i IOD danych używanych przez odbiornik ruchomy różnią się. Rozwiązanie różnicowe będzie wtedy obarczone dodatkowym błędem wynikającym z różnicy użytych danych. Sytuacji takiej zapobiega uwzględnienie poprawki delta-różnicowej będącej różnicą poprawki wyznaczonej na podstawie danych o starym IOD i wyznaczonej na podstawie danych o nowym IOD oraz delta-różnicowej poprawki prędkości zmian pseudoodległości. Wiadomość tego typu ma sens tylko gdy transmitowana jest wraz z wiadomością typu 1. Odbiornik ruchomy oblicza poprawkę do pseudoodległości jako sumę poprawki transmitowanej w wiadomości typu 1 i poprawki delta-różnicowej z typu 2.

Typ 3 - Parametry stacji referencyjnej. Wiadomość ta zawiera współrzędne ECEF anteny stacji referencyjnej z dokładnością decymetrową. Współrzędne

⁵⁷ IOD – ang. Issue of Data

Typy transmisji poprawek

Tabela 2

Nr typu	Aktualny status zawartości	Nazwa depeszy
1	Ustalona	Poprawki różnicowe DGPS
2	Ustalona	Poprawki delta-różnicowe DGPS
3	Ustalona	Parametry stacji referencyjnej
4	Wycofana	Geodezyjna
5	Ustalona	Status konstelacji
6	Ustalona	Ramka zerowa
7	Ustalona	Almanachy latarni morskich
8	Próbna	Almanachy pseudosatelitów
9	Ustalona	Poprawki różnicowe dla indywidualnych satelitów
10	Rezerwowa	Poprawki różnicowe dla indywidualnych satelitów
11	Rezerwowa	Delta poprawki kodu C/A L_1 i L_2
12	Rezerwowa	Parametry pseudosatelitów
13	Próbna	Parametry przekaźników naziemnych
14	Rezerwowa	Depesza pomocnicza geodezyjna
15	Rezerwowa	Depesza jonosferyczna (troposferyczna)
16	Ustalona	Depesza specjalna
17	Próbna	Almanach efemeryd
18	Próbna	Nieskorygowane pomiary fazy nośnej
19	Próbna	Nieskorygowane pomiary pseudoodległości
20	Próbna	Poprawki fazy nośnej RTK
21	Próbna	Poprawki pseudoodległości RTK
22 – 58		Niezdefiniowane
59	Próbna	Depesza prywatna
60 – 63	Rezerwowe	Różno – użytkowe

podane są w układzie WGS-84.

Typ 4 - Parametry geodezyjne. Wiadomość ta przeznaczona była dla pomiarów geodezyjnych z użyciem zintegrowanych pomiarów nośnej. Obecnie

została ona wycofana i w przyszłej wersji standardu wykorzystana może być do zupełnie innych celów. Jej rolę przejęły wiadomości 18 i 21.

Typ 5 – Status konstelacji. Wiadomość ta zawiera dane wspomagające działanie odbiorników ruchomych. Składają się na nie, dla każdego z satelitów: "zdrowie" takie jak transmitowane w depeszy nawigacyjnej; obserwowany przez stację referencyjną stosunek sygnału do szumu dla danego satelity; zezwolenie na użycie do nawigacji danego satelity choć transmituje on informację o braku "zdrowia"; ostrzeżenie o przewidywanej utracie "zdrowia" przez satelitę.

Typ 6 – Ramka zerowa. Wiadomość ta nie zawiera żadnych parametrów. Może ona zostać użyta do wypełnienia transmisji. Transmitowana w momencie, gdy inne wiadomości nie są jeszcze gotowe, lub używana do utrzymania synchronizacji przez odbiorniki ruchome. Pole danych tej wiadomości wypełnione jest sekwencją zer i jedynek.

Typ 7 – Almanach latarni morskich. Wiadomość ta zawiera almanach latarni morskich wyposażonych w stacje różnicowe DGPS. Almanach zawiera dane o położeniu latarni, częstotliwości, pokrywanym obszarze, typie modulacji, sposobie kodowania i „zdrowiu”. Informacje te wykorzystane mogą zostać przez odbiornik ruchomy do wyboru optymalnej stacji referencyjnej.

Typ 8 – Almanach pseudosatelitów. Wiadomość ta wspiera technikę pseudosatelitów. Zawiera ona: współrzędne pseudosatelity; przypisany mu kod Golda; czteroznakowy identyfikator; informację o „zdrowiu”. Cel jej transmisji jest taki sam jak w przypadku wiadomości typu 7.

Typ 9 – Poprawki różnicowe dla podzbioru satelitów. Wiadomość ta zawiera takie same poprawki jak wiadomość typu 1. Nie zawiera ona jednak poprawek dla wszystkich satelitów lecz dowolnego podzbioru. Przeznaczona jest ona dla użytkowników powolnych łączy radiowych w obecności skokowo pojawiających się zakłóceń. Odbiornik może zastosować poprawki nie czekając aż

skompletowana zostanie cała wiadomość typu 1. Ponadto nagły wzrost zakłóceń zaburzy odbiór poprawek tylko dla pewnego podzbioru satelitów, a nie dla wszystkich jak by to miało miejsce w przypadku wiadomości typu 1. Wiadomość tego typu stosowana może być też wraz z wiadomością typu 1 dla zwiększenia częstotliwości przesyłania poprawek dla satelitów o wyjątkowo wysokiej prędkości zmian pseudoodległości. Wykorzystanie tej wiadomości ograniczona jest koniecznością posiadania zegara o dużej stabilności, ponieważ używane poprawki mają różny czas odniesienia.

Typ 10 - Poprawki różnicowe dla kodu P. Wiadomość ta zawierać ma poprawki różnicowe otrzymane dla pomiarów kodu P na częstotliwościach L_1 i L_2 . Jej zawartość w obecnej wersji standardu nie jest ustalona.

Typ 11 - Poprawki różnicowe dla kodu C/A L_2 . Wiadomość ta zarezerwowana jest dla poprawek różnicowych do pomiarów kodu C/A na częstotliwości L_2 , w wypadku gdyby przyszłe satelity taki kod transmitowały. Jej format podobny będzie do formatu wiadomości typu 1.

Typ 12 - Parametry stacji pseudosatelitów. Wiadomość ta zawierać ma offset zegara stacji pseudosatelitów oraz współrzędne środka fazowego jej anteny nadawczej. Jej format w obecnej wersji standardu nie jest ustalony.

Typ 13 - Parametry przekaźnika naziemnego. Wiadomość ta zawiera położenie i szacunkowy zasięg naziemnego przekaźnika poprawek. Zawiera ona też informację o statusie przekaźnika, jeśli jest on równy jeden należy oczekiwać transmisji wiadomości typu 16 zawierającej dalsze szczegóły (np. planowane wyłączenie przekaźnika, nadchodząca zła pogoda mogąca powodować przerwy w transmisji).

Typ 14 – Dodatkowe informacje geodezyjne. Zawartość i format pozostają do ustalenia.

Typ 15 - Wiadomość jonosferyczna (troposferyczna). Ostateczny format tej wiadomości nie został jeszcze ustalony. Zawierać ona będzie parametry modelu jonosfery, być może te same co podane w ICD-GPS-200, lecz oparte na bardziej aktualnych danych. Parametry troposfery obejmować będą: temperaturę, ciśnienie i wilgotność.

Typ 16 – Wiadomość specjalna. Wiadomość ta zawiera dowolny tekst w ośmiobitowym kodzie ASC II⁵⁸, może ona zostać bezpośrednio wyświetlona lub wydrukowana.

Typ 17 - Almanach efemeryd. Wiadomość 17 zawiera efemerydy satelitów. Nadawana jest na wypadek gdyby czas emisji danych (IODC)⁵⁹ nie odpowiadał czasowi efemerydalnemu (IODE)⁶⁰. W takiej sytuacji stacja referencyjna obliczać będzie poprawki na podstawie starych efemeryd. Transmitowane efemerydy umożliwią szybkie skorzystanie z poprawek odbiornikowi zaczynającemu pracę w systemie.

Typy 18 - 21 - Wiadomości RTK. Wiadomości 18 - 21 zawierają informacje przeznaczone przede wszystkim dla wysokodokładnych pomiarów geodezyjnych. Typ 18 zawiera nieskorygowane pomiary fazy nośnej, natomiast typ 19 zawiera nieskorygowane pomiary pseudoodległości. Wiadomości typu 20 i 21 zawierają odpowiednio: poprawki do fazy nośnej i poprawki do pseudoodległości. Wiadomość 21 jest podobna do wiadomości 1, lecz zawiera dodatkowe informacje o jakości danych.

Typy 22 – 58 – Niezdefiniowane. Wiadomości 22 do 58 są obecnie niezdefiniowane.

⁵⁸ ASC II – *ang.* American Standard Code for Information Interchange

⁵⁹ IODC - *ang.* Issue of Data, Clock

⁶⁰ IODE - *ang.* Issue of Data, Ephemeris

Typ 59 - Wiadomość prywatna. Wiadomość 59 zarezerwowana jest dla operatorów stacji referencyjnych, którzy chcieliby przekazywać swym użytkownikom specjalne wiadomości.

Typy 60 - 63 – Zarezerwowane. Wiadomości 60 - 63 zarezerwowane są dla celów testowania nowych typów wiadomości.

Głównymi źródłami błędów w technologii GPS są:

- ✓ ograniczony dostęp – S.A.;
- ✓ błędy efemeryd;
- ✓ błąd zegara satelity;
- ✓ opóźnienie jonosferyczne;
- ✓ opóźnienie troposferyczne;
- ✓ odbiór sygnałów odbitych;
- ✓ szum kodu i nośnej.

Ograniczony dostęp. Zespół nadzoru ma możliwość celowego wywołania błędów w sygnale transmitowanym przez satelity. Wprowadzane zaburzenia mają dwie składowe:

- ✓ proces epsilon: zmieniane są parametry efemerydy by spowodować pozorną zmianę położenia satelity - amplituda do 100 m, okres: godziny;
- ✓ proces delta: zaburzana jest częstotliwość zegara satelity co powoduje błędy w określaniu momenty transmisji sygnału - amplituda do 50 m, okres: minuty.

Klucz pozwalający usunąć powyższe zaburzenia dostępny jest tylko autoryzowanym użytkownikom. Użytkownicy nieautoryzowani posłużyć się mogą techniką różnicową. Obserwowany wpływ SA na pomiar pseudoodległości jest taki sam dla każdego użytkownika. Dzięki temu poprawka różnicowa eliminuje SA całkowicie. Problemem jest duża szybkość zmian SA, co powoduje występowanie

dekorelacji czasowej. Powoduje to konieczność zwiększenia częstotliwości transmisji poprawek.

Opóźnienie jonosferyczne. Opóźnienie w propagacji sygnału zmienia się od 20-30 metrów w dzień do 3-6 metrów w nocy. Stanowi to problem dla odbiorników pracujących na jednej częstotliwości (L1, kod C/A). Odbiorniki pracujące na dwóch częstotliwościach mogą opóźnienie to zmierzyć. Efekt opóźnienia jonosferycznego wykazuje silną dekorelację przestrzenną. Wraz ze wzrostem odległości odbiornika ruchomego od stacji bazowej wzrasta różnica dróg, które muszą pokonać sygnały w jonosferze do każdego z tych odbiorników. Przyjmuje się, że opóźnienie jonosferyczne jest prawidłowo kompensowane do odległości 250 km.

Opóźnienie troposferyczne. Opóźnienie to powstaje w dolnych warstwach atmosfery. Wynosi ono do 3 metrów. Zależy jest od temperatury, ciśnienia i wilgotności. Jest ono prawie całkowicie kompensowane.

Błąd efemeryd. Błąd ten jest różnicą pomiędzy rzeczywistym położeniem satelity a położeniem przewidzianym na podstawie danych orbitalnych satelity. Błąd ten wynika z niedokładności modelu ruchu satelity oraz nieprzewidywalnych perturbacji. W przypadku nieobecności SA jest on mniejszy niż 3 metry. Poprawka różnicowa eliminuje ten błąd prawie całkowicie.

Błąd zegara satelity. Różnica pomiędzy rzeczywistym czasem GPS a wskazaniem zegara satelity. Obserwator ruchomy i stacja referencyjna obserwują taki sam błąd zegara satelity, dzięki czemu jest on całkowicie kompensowany.

Odbiór sygnałów odbitych. Nieskorelowany pomiędzy odbiornikiem ruchomym a stacją referencyjną - nie zostanie wyeliminowany.

Szum kodu i nośnej. Nieskorelowany pomiędzy odbiornikiem ruchomym a stacją referencyjną - nie zostanie wyeliminowany.

4.5. Wnioski

1. Dokładność systemu GPS w ogólnodostępnym kodzie C/A (pogarszanym celowo poprzez wprowadzony SA i A-S) wynosi 80 – 100 m. Możliwe jest jednak usunięcie tej niedogodności, korygowanie obserwacji pseudoodległości w pomiarach satelitarnych GPS, poprzez przesyłanie drogą radiową poprawek do danych ze stacjonarnych stacji pomiarowych systemu GPS. Te stacje wyposażone są w odpowiednie radiostacje, od których zasięgu zależy między innymi obszar działania DGPS.
2. Technika różnicowa przyczynia się do wyeliminowania większości błędów, funkcjonujących poza odbiornikami GPS. Wykorzystywanie tej techniki ma na celu eliminowanie błędów występujących podczas dokonywania pomiarów. Aby błędy te wyeliminować trzeba znać ich strukturę i wielkość, gdyż zasadniczo wpływają one na precyzję przestrzennego wyznaczania położenia.
3. Wymienia się trzy zasadnicze źródła powstawania błędów i przybliżone ich wartości:
 - 1) Błędy satelity związane z:
 - orbitą (jej wyznaczeniem, przemieszczeniem) – od 5 do 10 m;
 - pokładowym zegarem – około 10 m;
 - wprowadzeniem pogorszenie sygnału S.A. – od 5 – 80 m;
 - 2) Błędy propagacji sygnału:
 - jonosferyczne – od 2 do 50 m;
 - troposferyczne – od 2 do 30 m;
 - 3) Błędy formowania sygnału:
 - wielotorowość kodu – od 0,1 do 3 m;
 - szum kodu – od 0,1 do 3 m.
4. Na prowadzenie działań bojowych wpływ mają następujące błędy:

- 1) Błędy wynikające z selektywnej dostępności SA, które są celowo wprowadzane do sygnałów satelitarnych, aby zabezpieczyć system GPS. Błędy pseudoodległości z powodu SA wynoszą średnio około 30 m.
- 2) Opóźnienia jonosferyczne, które są spowodowane opóźnieniem grupowym propagacji sygnału. W ciągu dnia wynoszą one 20 – 30 m, a w ciągu nocy 3 – 6 m.
- 3) Błędy efemeryd – położenia przestrzennego satelity, wynikające z różnicy występującej pomiędzy aktualną pozycją GPS a obliczoną w predykcji – podawaną w depeszy satelitarnej. Są to błędy rzędu 3 m, ale mogą osiągnąć poziom powyżej 30 m, jeżeli włączone zostanie SA.
- 4) Błędy zegara satelity, powstające w wyniku różnicy pomiędzy czasem prezentowanym przez zegar pokładowy satelity a obliczonym na podstawie danych satelitarnych.
5. Zastosowanie techniki różnicowej w systemie DGPS umożliwia uzyskanie przestrzennego położenia dowolnego obiektu w przestrzeni ekosfery ziemskiej z dokładnością od 1 do 10 metrów i to w dynamicznych zastosowaniach nawigacyjnych. Ponadto po odpowiednio dokonanej przeróbce pomiarów fazy fali nośnej możliwe staje się uzyskiwanie przestrzennego położenia z dokładnością do 10 cm.

5. MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA SYSTEMU GPS NAVSTAR

System GPS zapewnia precyzyjne określenie miejsca położenia w przestrzeni trójwymiarowej oraz prędkości i czasu poruszania się wszystkich użytkowników wyposażonych w odpowiednie odbiorniki, w dowolnym punkcie kuli ziemskiej.

Współrzędne wyznaczane przez odbiorniki GPS są podane w konkretnym układzie odniesienia. Podstawowym układem odniesienia dla techniki GPS jest światowy system geodezyjny (WGS 84)⁶¹. Ze względu na to, że każde państwo ma swój lokalny układ współrzędnych geodezyjnych, powstają pewne problemy dotyczące odpowiedniej elipsoidy odniesienia. Względem elipsoidy odniesienia podaje się współrzędne elipsoidalne, czyli szerokość – B , długość – L i wysokość – H .

W Polsce topograficzne mapy wojskowe posiadają siatkę współrzędnych B i L , lecz wysokości odniesione są nie do elipsoidy, tylko do poziomu morza. Taki układ wysokościowy jest bardzo przydatny w praktyce, bowiem układ wysokości elipsoidalnych jest tworem sztucznym, nie mającym bezpośredniego związku z sytuacją terenową.

Zależność pomiędzy układem satelitarnym, mającym swój początek w centrum Ziemi, a układem elipsoidalnym jest określona prostymi formułami, pod jednym jednak warunkiem, a mianowicie – że geometryczny środek elipsoidy pokrywa się ze środkiem ziemi.

System GPS NAVSTAR umożliwia określenie położenia obiektu w postaci współrzędnych kartezjańskich – prostokątnych X , Y , Z . Podyktowane jest to wieloma względami praktycznymi, związanymi z teorią ruchu sztucznych satelitów

⁶¹ WGS 84 – *ang.* World Geodetic System 84

Ziemi. Natomiast transformacja układu satelitarnego X, Y, Z do układu geodezyjnego (elipsoidalnego) wykonywana jest za pomocą następujących zależności:

$$\begin{aligned}X_p &= N \cos B \cos L \\Y_p &= N \cos B \sin L \\Z_p &= N(1 - e^2) \sin B \\N &= \frac{a}{\sqrt{(1 - e^2 \sin^2 B)}}\end{aligned}$$

gdzie: (N – promień krzywizny w przekroju pierwszego wertykału.

Jeżeli punkt Q znajduje się na wysokości H nad elipsą (rys. 5.1) jego współrzędne prostokątne oblicza się za pomocą formuł:

$$\begin{aligned}X_Q &= (N + H) \cos B \cos L \\Y_Q &= (N + H) \cos B \sin L \\Z_Q &= [N(1 - e^2) + H] \sin B\end{aligned}$$

Współrzędne elipsoidalne natomiast można obliczyć, posługując się wzorem:

$$B = \arctg \frac{Z + (e')^2 b \sin^3 \Theta}{p - e^2 a \cos^3 \Theta}$$

gdzie:

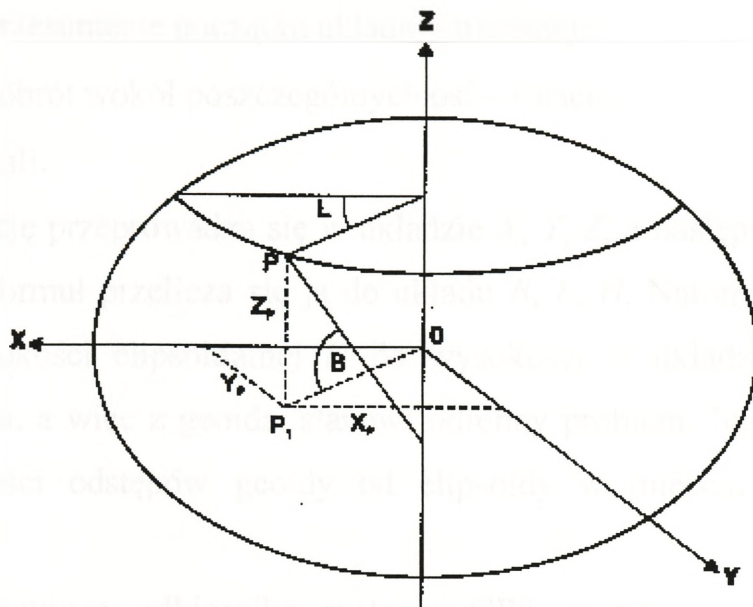
$$p = (X^2 + Y^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\Theta = \arctg \left(\frac{Za}{pb} \right)$$

$$L = \arctg \left(\frac{Y}{X} \right)$$

$$H = \frac{p}{\cos B} - N$$

a, b, p, e – parametry związane z kształtem i rozmiarami przyjętej elipsoidy odniesienia.



Rys. 5.1 Elipsoida

Ważne jest, że lokalne układy geodezyjne są ściśle związane z przyjętą elipsoidą o znanych parametrach, która jest odpowiednio dopasowana do terytorium określonego państwa, tak aby spełnione były warunki związane z redukcjami pomiarów sieci podstawowej oraz funkcjonalnością sieci wysokościowej. Mogą być również określone uwarunkowania, narzucone w ramach współpracy militarnej z sąsiednimi krajami lub uczestnictwa w określonych układach czy sojuszach wojskowych. Właśnie te uwarunkowania są powodem przesunięcia i obrotu elipsoidy odniesienia w lokalnym układzie geodezyjnym względem przyjętej elipsoidy globalnej. Transformacja od układu globalnego do lokalnego wymaga znajomości parametrów przesunięcia i obrotu. Aby podnieść dokładność dokonywania transformacji wprowadza się bardzo często siódmy parametr – parametr skali. Z tego wynika, że w celach militarnych, do przeliczania współrzędnych prostokątnych X , Y , Z od układu satelitarnego do układu lokalnego lub odwrotnie niezbędna jest znajomość siedmiu parametrów transformacji, do których zalicza się:

- $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ – przesunięcie początku układu – translacja;
- $\Omega X, \Omega Y, \Omega Z$ – obrót wokół poszczególnych osi – rotacja;
- Δ - parametr skali.

Transformację przeprowadza się w układzie X, Y, Z , a następnie za pomocą podanych wyżej formuł przelicza się ją do układu B, L, H . Natomiast dokonanie przejścia od wysokości elipsoidalnej H do wysokości w układzie związanym z poziomem morza, a więc z geoidą, stanowi odrębny problem. Jego rozwiązanie wymaga znajomości odstępów geoidy od elipsoidy w miejscu dokonywania pomiarów.

Za pośrednictwem odbiornika systemu GPS można uzyskać dokładną informację o aktualnym momencie skali czasu GPS. Przy użyciu poprawek transmitowanych przez satelitę, możemy określić aktualny moment w skali czasu UTC (USNO). Dokładność modelu skali czasu UTC (USNO) jest zazwyczaj nie gorsza niż kilkanaście nanosekund. Skala czasu UTC (USNO) nie różni się zazwyczaj od skali czasu uniwersalnego UTC o więcej niż kilkadziesiąt nanosekund. Model czasu transmitowanego przez satelitę uwzględnia okresowo wprowadzane sekundy przestępne. Satelita nie transmituje informacji o czasie strefowym i lokalnych czasach urzędowych, takich jak "czas letni", czas "zimowy" etc. Skala czasu udostępniana jest w odbiornikach GPS w różnoraki sposób:

- ✓ Prawie każdy odbiornik GPS jest źródłem informacji o aktualnym momencie czasu i dacie, przedstawionych na wyświetlaczu odbiornika lub transmitowanych za pośrednictwem łącza odbiornika. Dokładność tej informacji, związana z momentem pojawienia się danych jest rzędu 0,5 sekundy;
- ✓ Niektóre z odbiorników, niezależnie od ich głównego przeznaczenia, dostarczają impulsu sekundowego o zgodności ze skalą czasu GPS ograniczonej

głównie efektem SA do około 500 ns. Impulsy odbiorników eliminujących efekt SA charakteryzują się błędem rzędu 30 ns;

- ✓ Niektóre z odbiorników przeznaczonych do dystrybucji czasu posiadają wbudowaną możliwość pomiaru położenia zewnętrznego impulsu względem wewnętrznej skali czasu lub pomiaru częstotliwości. Ta ostatnia własność jest szczególnie cenna, gdyż pomiar częstotliwości w odbiorniku odbywa się ze znacznie większą dokładnością względną niż pomiar czasu. Niestety, efekt SA w poważnym stopniu ogranicza te możliwości;
- ✓ Dla precyzyjnych porównań skal czasu stosuje się odbiorniki pracujące w trybie "common view", zakładającym jednoczesną pracę odbiorników w różnych laboratoriach. Rezultaty uzyskuje się po opracowaniu danych pochodzących z co najmniej dwóch odbiorników. Metoda ta stosowana jest przez BIPM przy tworzeniu skali czasu atomowego TAI. W Polsce pomiary takie wykonywane są przez Główny Urząd Miar i Astronomiczne Obserwatorium Szerokościowe w Borowcu. Jej graniczną dokładność ocenia się na około 10 ns przy porównaniach kontynentalnych. Błąd średniokwadratowy odbiorników jest rzędu 3 ns. Najpoważniejszym ograniczeniem jest długoterminowa niestabilność opóźnień.

5.1. Wojskowe i cywilne wykorzystanie systemu

Założenia sił zbrojnych USA tworzących nowy system nawigacyjny zakładały zdobycie przewagi taktycznej. Dlatego emitowane sygnały są szyfrowane, aby potencjalny przeciwnik nie mógł się nimi posłużyć. Jednak Departament Obrony zakładał od początku udostępnienie systemu w okrojonej formie zwykłym obywatelom. Dostępność cywilna miała być obarczona błędem nie przekraczającym 100 m. Selektywną dostępność realizowano w oparciu

o zmiany czasu emisji sygnałów. Zegary atomowe na satelitach GPS odrobinę przyspieszano lub zwalniano - zgodnie z pewnym szyfrem. Taka zmiana chodu orbitujących chronometrów miała gwarantować zabezpieczenie systemu przed niedozwolonym użyciem przez intruzów. Natomiast wojskowe odbiorniki mają być uzupełnione o urządzenia do interpretacji tajnego kodu, który koryguje sztucznie narzucone błędy zegarów i pozwala w pełni wykorzystać założoną dokładność systemu. Cywilni specjaliści znaleźli sposób obejścia zasady selektywnej dostępności i zdołali zredukować błędy nawet do kilku milimetrów, osiągając poziom dokładniejszy od pierwotnie zakładanych norm technicznych. Znacznie precyzyjniejsze pomiary uzyskano dzięki korekcji błędów zegarów atomowych GPS. Metoda, którą posłużyli się naukowcy z Haystack i MIT, była bardzo prosta. Polegała ona na odbiorze w pewnym dokładnie ustalonym miejscu (o znanych współrzędnych) sygnałów docierających z kilku orbitujących nadajników. Znając ich pozycje, naukowcy mogli z łatwością porównać mierzone pseudoodległości z obliczonymi odległościami rzeczywistymi. Różnica pomiędzy tymi dwiema wielkościami wyznacza błąd chronometru pokładowego powiększony o niedokładność zegara stosowanego w naziemnej stacji odbiorczej. Procedura zakłada jednoczesny pomiar odległości do kilku satelitów, dzięki czemu można było podać z osobna wszystkie potrzebne wartości błędów: zegara naziemnego i poszczególnych zegarów atomowych.

Ten sposób walki z selektywnym dostępem aktualny jest do dzisiaj. Narzucone zegarom atomowym odchyłki można mierzyć w stacjonarnych odbiornikach naziemnych i nadawać do innych urządzeń ruchomych, które wówczas bez trudu ustalą dokładnie swoje położenie. Jest to tzw. różnicowy GPS. Jego precyzja dla sprzętu powszechnego użytku wynosi około 1 m a dla specjalistycznego około 1 cm. Różnicowy GPS zabezpiecza ominięcie wprowadzonych przez twórców systemu zabezpieczeń. Nieruchoma stacja o znanej

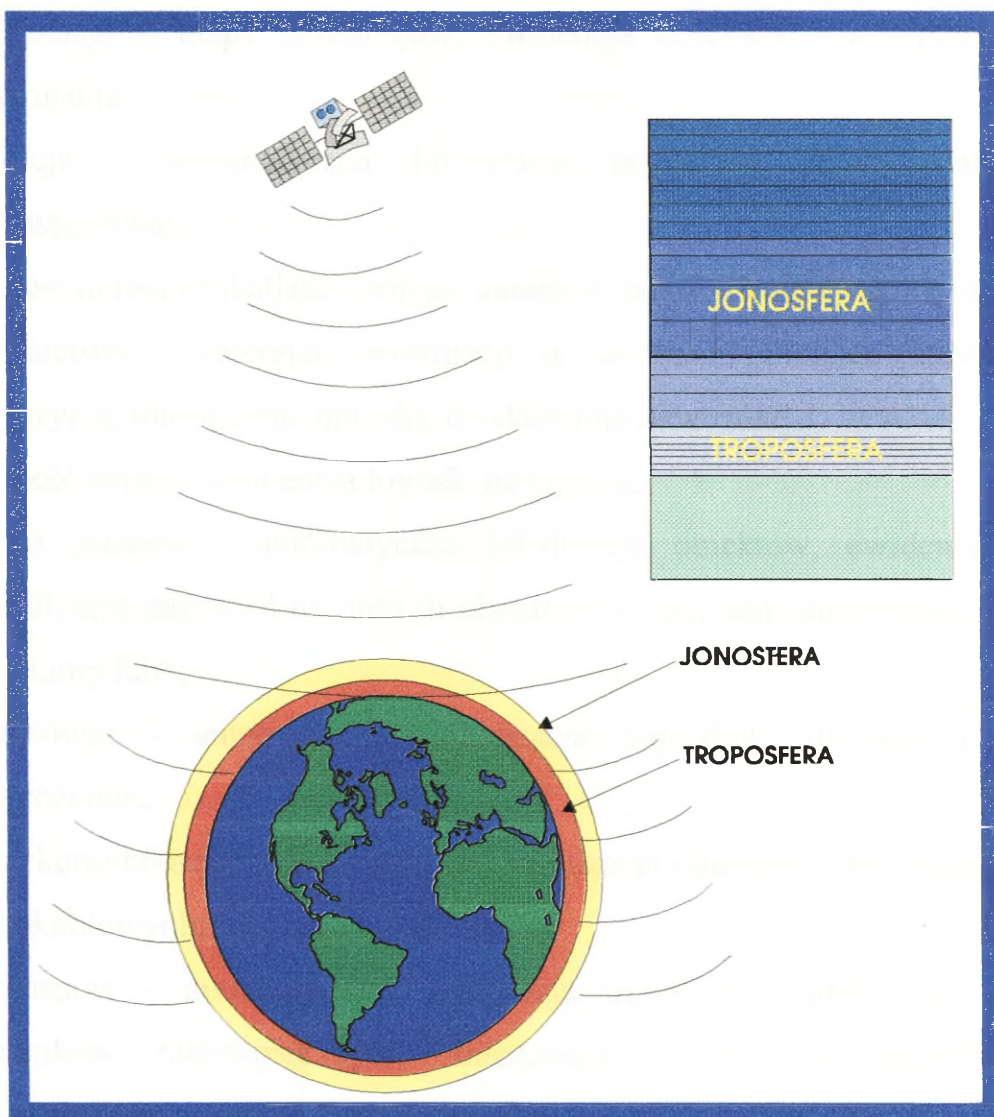
lokalizacji ustala błędy czasowe sygnałów z kosmosu i poprawki przekazuje przez radio do znajdujących się w pobliżu odbiorników ruchomych. Metoda ta pozwala zmniejszyć błąd lokalizacji ze 100 m do 1m a nawet do 1 cm. Szeroka dostępność różnicowego GPS stała się przyczynkiem do dyskusji nad dalszym kodowaniem sygnałów nawigacyjnych. Samo szyfrowanie jest drogie i zmusza rządy różnych państw do nakładów finansowych na wydawanie poprawek i nadawanie ich przez radio. Jak wskazują ostatnie wydarzenia militarne w Zatoce Perskiej i na Haiti Departament Obrony zdecydował się wyłączyć zabezpieczenia systemu GPS. Powodem wyłączenia był brak odpowiedniej liczby „utajnionych” odbiorników, podczas gdy sprzęt cywilny był ogólnodostępny. Co więcej, Rosjanie kończą uruchomienie własnego globalnego nawigacyjnego systemu satelitarnego GLONASS⁶², pracującego na częstotliwościach 1607 i 1250 MGz. Czas obiegu satelitów po orbicie wynosi 11,25 godziny a kąt nachylenia 65°. Idea funkcjonowania systemu jest zbliżona do GPS. Zakłada się, że jego sygnały nie będą kodowane. Zatem, każdy kto zaopatrzy się w odbiornik będzie mógł z niego korzystać w pełni.

Oprócz zastosowań wojskowych i określania miejsca położenia, GPS wykorzystuje się bardzo szeroko w gospodarce cywilnej:

- ✓ Archeologia - ewidencja stanowisk, mapy stanowisk;
- ✓ Banki - dystrybucja dokładnego czasu;
- ✓ Budownictwo Przemysłowe - wytyczanie, nadzór przemieszczeń, przesunięć;
- ✓ Drogownictwo - automatyczna ewidencja uszkodzeń, automatyczna rejestracja stanu nawierzchni;
- ✓ Energetyka - ewidencja obiektów, przebiegu tras, dystrybucja czasu, synchronizacja zegarów;

⁶² GLONASS – *ang.* Global Orbiting Navigation Satellite System.

- ✓ Fotogrametria - rejestracja współrzędnych kamery w momencie wykonywania zdjęcia, wyznaczanie współrzędnych markerów;
- ✓ Geodezja - wyznaczanie współrzędnych i wektorów z dokładnością centymetrową, praca w czasie rzeczywistym, wytyczanie;
- ✓ Geologia - ewidencja zasobów, mapy zasobów, nawigacja;
- ✓ Geodynamika - badania ruchu wirowego Ziemi, analiza ruchu bieguna, śledzenie ruchu kontynentów, definicja układu odniesienia;
- ✓ Górnictwo - rejestracja przemieszczeń gruntu, nawigacja platform wiertniczych;
- ✓ Hydrologia - nadzór przemieszczeń, ewidencja obiektów, szybka aktualizacja map;
- ✓ Inżynieria ruchu drogowego - automatyczna rejestracja przebiegu tras, czasów oczekiwania, natychmiastowa lokalizacja miejsc wypadków, utrudnień w ruchu, automatyczne tworzenie "zielonej fali" dla pojazdów uprzywilejowanych;
- ✓ Kartografia - sporządzanie map;
- ✓ Kolejnictwo - ewidencja tras, obiektów, nadzór nad ruchem pojazdów, automatyczna rejestracja przebiegów, dystrybucja dokładnego czasu;
- ✓ Leśnictwo - ewidencja zasobów, nawigacja w czasie oprysków, inteligentne dozowanie w czasie oprysków;
- ✓ Lotnictwo - nawigacja, badanie zasięgu radarów, precyzyjne lądowania;
- ✓ Melioracja - aktualizacja map, nawigacja;
- ✓ Meteorologia – sondowanie jonosfery i troposfery. Wykorzystywany jest do ustalenia zawartości wody w atmosferze (rys. 5.2). Warstwy atmosfery wpływają na propagację sygnałów GPS i mogą być źródłem istotnych błędów. Najwięcej ich powstaje przy przejściu sygnału przez naładowaną jonosferę i wilgotną troposferę. W jonosferze czoła fal radiowych mają tendencję do „rozrzedzania się”, natomiast w troposferze obserwujemy efekt przeciwny.



Rys. 5.2. Warstwy atmosfery wpływające na GPS

- ✓ Ochrona mienia - automatyczna lokalizacja obiektów;
- ✓ Oświetlenie dróg - ewidencja obiektów, ewidencja uszkodzeń, mapy natężenia oświetlenia;
- ✓ Ochrona Środowiska - automatyczna ewidencja zanieczyszczeń, mapy obszarów skażonych;
- ✓ Radiokomunikacja - mapy zasięgu nadajników, wyznaczanie teoretycznych zasięgów nadajników, projektowanie radiolinii;

- ✓ Rurociągi - mapy przebiegów, ewidencja obiektów, ewidencja uszkodzeń, nawigacja;
- ✓ Policja - automatyczna lokalizacja pojazdów, dokumentacja miejsca przestępstwa;
- ✓ Ratownictwo - lokalizacja miejsc katastrof, odszukiwanie rozbitków;
- ✓ Rolnictwo - zbieranie informacji o zasobach, plonach stowarzyszonych z pozycją, inteligentne opryski, dawkowanie nawozów;
- ✓ Rybołówstwo - ewidencja łowisk, nawigacja;
- ✓ Straż pożarna - automatyczna lokalizacja obiektów, ewidencja zagrożeń, lokalizacja zagrożeń na dużych obszarach - łąki, lasy, automatyczne tworzenie "zielonej fali";
- ✓ Taksówki - automatyczna lokalizacja pojazdów, informacja o miejscu zagrożenia;
- ✓ Telekomunikacja - paszportyzacja, lokalizacja obiektów, aktualizacja przebiegu tras kablowych;
- ✓ Transport - automatyczna lokalizacja obiektów, nadzór nad przewozem ładunków niebezpiecznych, informacja o miejscu zagrożenia. Firmy transportowe mają możliwość lokalizowania swoich pojazdów w ruchu, a przez to efektywnego zarządzania flotą pojazdów oraz szybkiej reakcji w sytuacjach awaryjnych (awaria, napad na samochód). Firmy kurierskie tworzą bazy lokacji, czyli bazy danych zawierające pozycje odbiorców i trasy dojazdów do nich, dzięki czemu za następnym razem dowolny kurier zostanie automatycznie doprowadzony do odbiorcy. Służby ratownicze natychmiast trafiają do wyznaczonych punktów, posiłkując się danymi wprowadzonymi do odbiornika GPS bezpośrednio z systemu GIS.
- ✓ Zieleń Miejska - ewidencja zasobów;
- ✓ Żegluga - nawigacja, monitorowanie przechyłów, pochyłów.

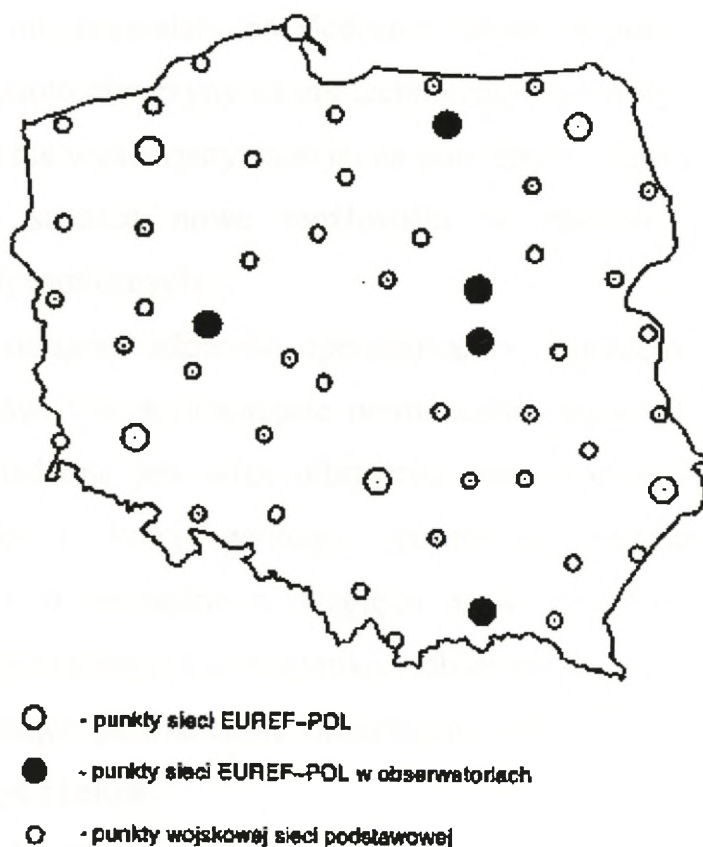
Gwałtownie rośnie liczba odbiorców indywidualnych. Odbiorniki GPS instalowane są fabrycznie w niektórych modelach samochodów. Odbiornik jest tam rozbudowany o moduł mapy cyfrowej. Turystyka górską, tak piesza jak i rowerowa zyskuje nowe możliwości z GPS-em: nie ma problemu powrotu do punktu wyjścia, stracenia orientacji. Nie sprawia kłopotu zapadnięcie zmroku - GPS działa równie dobrze niezależnie od pogody i pory dnia. Łatwo trafić do atrakcyjnego punktu, jeżeli tylko zna się jego współrzędne geograficzne - informacje te pojawiają się w przewodnikach turystycznych.

Producenci odbiorników prześcigają się w oferowaniu coraz wymyślniejszych funkcji i czynieniu odbiorników mniejszymi, tańszymi i prostszymi w obsłudze. Standardem jest możliwość nazywania zapamiętanych punktów i grupowania ich w trasy (*ang.* routes). Po trasie takiej użytkownik zostanie automatycznie przez odbiornik poprowadzony. W czasie poruszania się do wyznaczonego punktu stale będzie otrzymywał informacje o kursie, prędkości, prędkości zbliżania do celu i szacowanego czasu przybycia. Graficzny wyświetlacz pokaże obraz kompasu z zaznaczonym kursem, lub przedstawienie drogi prostej *ang.* "highway view". Lepsze modele same rejestrują przebytą drogę, znacząc ją bezpośrednio na graficznym wyświetlaczu.

Zawsze dostępna jest funkcja MOB - "człowiek za burtą" - rejestruje ona przebytą od momentu włączenia drogę, jednocześnie prowadząc jak najszybciej do punktu początkowego. Nawet najprostsze odbiorniki wyposażane są w możliwość współpracy z komputerem - możliwe jest przesłanie poprzez kabel włączany w port szeregowy danych o zapamiętanych punktach, trasach z GPS-a do komputera, edycja, archiwizacja i wizualizacja danych jak również przesłanie z powrotem do odbiornika.

Przykładów zastosowań cywilnych jest więcej niż wojskowych, z tego względu jest to system perspektywiczny.

W ostatnich latach w Polsce w ramach kampanii EUREF POL'92 wyznaczono w naszym kraju współrzędne punktów sieci „zerowego” rzędu w europejskim układzie odniesienia E – TRF'89, a we wrześniu 1993 roku grupa oficerów z zarządu topograficznego Sztabu Generalnego WP wraz z przedstawicielami DMA (*ang.* Defence Mapping Agency) dokonała wyznaczenia punktów „wojskowej sieci podstawowej Polski” w układzie WGS 84 (rys. 5.3).



Rys. 5.3 Wojskowa sieć podstawowa w Polsce

Prowadzenie połączonych operacji w ramach NATO oraz misji pokojowych ONZ wskazuje na potrzebę wykorzystania systemu GPS w Polsce. Wysoki stopień automatyzacji procesu pomiarowego GPS pozwala na utworzenie sieci permanentnych stacji naziemnych DGPS zarówno o charakterze lokalnym, jak też o zasięgu globalnym. Tworzenie sieci stacji permanentnych należy uznać za przejaw dążenia do praktycznej realizacji sieci geodezyjnych i geodynamicznych,

w których położenie dowolnego punktu (obiektu) w przestrzeni ekosfery ziemskiej określałyby nie tylko wielkości geometryczne, ale także czas. Idea tworzenia tego typu sieci znana jest w geodezji i nawigacji zarówno do prowadzenia badań geodynamicznych, jak też do kontroli deformacji określonych obiektów. Stosowane metody pomiarów takich sieci, oparte na wykorzystaniu tradycyjnych technik do okresowego wyznaczania wielkości geometrycznych, określających położenie punktów nie pozwalały na śledzenie zmian współrzędnych punktów w sposób ciągły. Ponadto przyczyny natury technicznej wpływały ograniczająco na zasięg sieci. Stąd też nie wykorzystywano jej na potrzeby nawigacji.

System GPS stwarza nowe możliwości w zakresie tworzenia sieci geodezyjnych i geodynamicznych.

System GPS osiągnął zdolność operacyjną, co wpłynęło na zwiększenie dokładności pomiarów. Coraz liczniejsze permanentne stacje DGPS dostarczają dużo danych. Gromadzona jest więc olbrzymia ilość wartościowego materiału obserwacyjnego, co z kolei wymaga gruntownej reorganizacji centrów obliczeniowych. Jest to niezbędne ze względu na to, aby były one zdolne do bieżącego przetwarzania przesyłanych wyników obserwacji.

Stacje prowadzące permanentne obserwacje GPS wykorzystywane są do realizacji następujących celów:

— wyznaczania, dokładności i konserwacji światowego układu odniesienia (ITRF⁶³). Zadania te urzeczywistniają dwie globalne służby: Międzynarodowa Służba Geodynamiczna (IGS⁶⁴) oraz Międzynarodowa Służba Monitorowania Ruchu Obrotowego Ziemi (IERS⁶⁵), poprzez wykorzystywanie permanentnych obserwacji GPS do wyznaczania precyzyjnych orbit satelitów, precyzyjnych

⁶³ ITRF – *ang.* International Terrestrial Reference Frame

⁶⁴ IGS – *ang.* International GPS Service for Geodynamics

⁶⁵ IERS – *ang.* International Earth Rotation Service

współrzędnych stacji oraz zmian tych współrzędnych w czasie, a także ciągłego monitorowania ruchu obrotowego Ziemi;

- prowadzenia lokalnych, regionalnych i globalnych badań geodynamicznych. Nowe możliwości prowadzenia badań geodynamicznych polegają w istocie na analizie permanentnych precyzyjnych obserwacji GPS, wykonywanych w obserwatoriach geodynamicznych. Pozwala to na wykrywanie efektów geodynamicznych oraz na wyznaczanie ich częstotliwości i amplitud. Analizowanie zmian wektorów prędkości stacji permanentnych stanowi obecnie podstawę najbardziej wartościowych badań geodynamicznych;
- tworzenie podstawowych punktów odniesienia do nawiązywania i monitorowania krajowych sieci geodezyjnych, a także powstających efektywnych krajowych systemów pozycyjnych i nawigacyjnych. Powszechnie znane są systemy: Dokładny Aktywny System Lokalizacji (PAPS⁶⁶) oraz Standardowy Aktywny System Lokalizacji (SAPS⁶⁷), działające w niektórych państwach, np. krajach skandynawskich, Niemczech, Japonii i innych. Obserwowane jest coraz większe zapotrzebowanie na aktywne systemy, które służyłyby nawigacji lądowej, morskiej i powietrznej. Umożliwiają one wyznaczanie przestrzennego położenia poruszających się obiektów w przestrzeni ekosfery ziemskiej w czasie rzeczywistym;
- tworzenie i aktualizowanie baz danych niezbędnych dla krajowych systemów informacji przestrzennej.

Sieć stacji permanentnych o najwyższym światowym standardzie stanowią stacje Międzynarodowej Służby Geodynamicznej. W wykazie opublikowanym przez Centralne Biuro IGS w lipcu 1995 roku, znalazło się 95 stacji rozmieszczonych na wszystkich kontynentach. Najwięcej stacji permanentnych

⁶⁶ PAPS – *ang.* Precise Active Positioning System

⁶⁷ SAPS – *ang.* Standard Active Positioning System

znajduje się w Europie, duży ich niedobór obserwowany jest w Azji, Afryce i Ameryce Południowej. Przewiduje się, że docelowa liczba stacji sieci globalnej ma wynieść około 200, co będzie odpowiadało wzajemnym odległościom między punktami rzędu 1000 km. Nie oznacza to, że pewna część stacji europejskich zostanie wyeliminowana. Poza udziałem w realizacji programu IGS, te same stacje będą wykorzystywane podczas tworzenia sieci stacji permanentnych w ramach programu EUREF.

W krajach Europy Środkowej działa już 12 stacji permanentnych, zaś w najbliższych dwóch latach planowane jest uruchomienie następnych dwunastu. Sytuację taką należy ocenić jako korzystną, a bardzo dobrze w tym zestawieniu na tle innych państw europejskich wypada nasz kraj. W Polsce funkcjonują aktualnie trzy stacje permanentne, które są umiejscowione w Józefosławiu, Borówcu i LamkóWKu. Uzupełnienie ich kilkoma następnymi (np. morskimi, lotniczymi, lądowymi) może stanowić należytą ośnowę do monitorowania krajowej podstawowej sieci geodezyjno – nawigacyjnej, dowiązania wszystkich lokalnych sieci geodynamicznych i utworzenia w Polsce aktywnych systemów nawigacyjnych.

Ważnymi zagadnieniami, bardzo ściśle związanymi z budowaną siecią EUREF, są funkcje permanentnych stacji GPS w Polsce. Podczas precyzyjnego wyznaczania położenia (pozycji) na potrzeby badań geodynamicznych kluczową rolę spełnia praktyczna realizacja ziemskiego układu współrzędnych ITRF poprzez dostatecznie gęstą sieć punktów, dla których wyznaczone zostały w tym układzie współrzędne i wektory prędkości. Jedną z możliwości owej dostatecznie gęstej sieci punktów jest tworzenie regionalnych sieci IGS, nad czym trwają obecnie prace inicjowane przez Centralne Biuro IGS. Natomiast z układem współrzędnych i związanym z nim modelem opisującym wektory prędkości stacji wiążą się także parametry: ruch obrotowy Ziemi (ERP), orientacja Ziemi (EOP), orbity satelitów

GPS opracowane przez IGS. Stale wzrastająca dokładność precyzyjnej orbity IGS pozwala obecnie wyznaczyć pozycje stacji prowadzących ciągłe obserwacje GPS z dokładnością lepszą niż 1 cm. Wynik taki jest jednak możliwy do osiągnięcia tylko wtedy, gdy zostanie zapewniona pełna kompatybilność wymienionych wcześniej parametrów. Jest to możliwe do uzyskania dzięki wyznaczeniu wszystkich wymienionych wyżej parametrów w jednym procesie opracowywania wyników obserwacji GPS.

W celu opracowywania wszystkich wyników obserwacji – pomiarów w jednym procesie, rozważana jest nowa struktura sieci IGS oraz nowa strategia opracowywania danych. W skład planowanej sieci IGS ma wejść około:

- 50 punktów sieci globalnej, łącznie z punktami fundamentalnymi (core stations);
- 150 punktów sieci regionalnych.

Łączne opracowanie sieci IGS polegać będzie na kombinacji powiązań wzajemnych sieci globalnej z sieciami regionalnymi. Stąd też winno istnieć bardzo ścisłe współdziałanie Centrum Analiz IGS ze Stowarzyszonymi Centrami Analiz IGS. Przedstawione zamierzenia koordynatorów IGS należy brać pod uwagę podczas rozważania udziału Polski w globalnym i regionalnych badaniach geodynamicznych. Należy stwierdzić, że uczestniczące obecnie w programie IGS i współpracujące z IERS trzy polskie permanentne stacje GPS, stanowią wystarczającą liczbę punktów sieci globalnej IGS. Nie można wykluczyć, że z uwagi na rozmieszczenie nie wszystkie one zostaną zaliczone do 50 punktowej sieci globalnej, lecz znajdują się w sieci regionalnej IGS. Niezależnie od ostatecznych rozstrzygnięć dokonanych przez koordynatorów międzynarodowego programu IGS, należy przewidzieć utworzenie kilku dodatkowych permanentnych stacji GPS, zlokalizowanych w różnych częściach Polski. Planuje się, że ich organizacją zajmą się zarówno ośrodki cywilne (np. Politechnika Warszawska,

akademia Górniczo – Hutnicza, Akademia Rolnicza), jak i militarne (np. Dowództwo: Wojsk Lądowych, WLOP, Marynarki Wojennej). Potrzebę utworzenia nowych permanentnych stacji GPS w naszym kraju uzasadniają realizowane aktualnie przez Polskę regionalne projekty geodynamiczne: CERGOP, EXTENDED SAGET, GEODUC. Nowe permanentne stacje mogą stać się punktami regionalnej sieci IGS.

Dość interesujący jest także wątek dotyczący stacji permanentnych GPS w Polsce w świetle potrzeb EUREF oraz krajowego systemu współrzędnych geodezyjnych. Podkomisja Międzynarodowej Asocjacji Geodezji, prowadząc intensywne prace nad rozmieszczeniem jednolitego europejskiego układu współrzędnych, przystąpiła równocześnie do realizacji nowego przedsięwzięcia, jakim jest tworzenie na obszarze Europy sieci aktywnych – permanentnych stacji GPS, związanych pod względem merytorycznym i organizacyjnym z systemem EUREF. Celem utworzenia permanentnej sieci GPS EUREF jest ujednolicenie standardów oraz zaoferowanie infrastruktury, która powstała w ramach działalności EUREF, a także przekazanie doświadczeń. Uwzględniając powyższe warunki, należy stwierdzić, że permanentna sieć powinna się składać ze stacji już pracujących oraz nowych, które będą spełniały następujące zadania:

- międzynarodowa służba geodynamiczna IGS;
- regionalne i lokalne badania geodynamiczne;
- realizacja krajowych układów odniesienia;
- praca techniką różnicową – DGPS w czasie rzeczywistym.

Poza stacjami prowadzącymi obserwacje – pomiary GPS do poprawnego funkcjonowania sieci permanentnych stacji, niezbędne są następujące elementy organizacyjne:

- 1) Centra Operacyjne (OC⁶⁸), których zadaniem jest weryfikacja danych, konwersja do RINEX⁶⁹ – u, kompresja oraz przesyłanie danych przez sieć Internet. Takie centrum może obsługiwać jedną lub więcej stacji.
- 2) Lokalne Centra Danych (LDC⁷⁰), które winny zbierać dane z określonej sieci lokalnej (obszar kraju lub grupy małych krajów) i udostępniać je różnym użytkownikom. Centra te ściśle współpracują z Centrum Europejskim.
- 3) Regionalne (Europejskie) Centrum Danych (RDC⁷¹), gromadzące i udostępniające użytkownikom, a przede wszystkim Europejskim Centrum Analiz, dane, które są niezbędne do opracowań o zasięgu regionalnym.
- 4) Regionalne Centra Analiz (RAC⁷²), opracowujące dane uzyskane z części lub całej sieci europejskiej. Wynikiem takich opracowań są precyzyjne współrzędne stacji, a także inne parametry dotyczące np. troposfery lub jonosfery.
- 5) Koordynator Sieci (NC⁷³), odpowiadający za funkcjonowanie permanentnej sieci GPS EUREF.

Struktura sieci permanentnych stacji GPS EUREF jest bardzo podobna do sieci IGS. Odnosi się to do wymagań technicznych dotyczących stacji, rodzaju stabilizacji punktów, sposobu transmisji danych i itp. W naszym kraju funkcjonują już trzy permanentne stacje, które uczestniczą w międzynarodowej służbie geodynamicznej i w ciągu dotychczasowej pracy zdobyły doświadczenie w prowadzeniu ciągłych pomiarów – obserwacji GSP. Wyniki pomiaru naszych stacji odbierają między innymi amerykańskie ośrodki, natomiast SZ RP nie wykazują zainteresowania nimi.

⁶⁸ OC – *ang.* Operation Centres

⁶⁹ RINEX – *ang.* Receiver Independent Exchange

⁷⁰ LDC – *ang.* Local Data Center

⁷¹ RDC – *ang.* Regional Data Center

⁷² RAC – *ang.* Regional Analysis Centers

⁷³ NC – *ang.* Network Coordinator

W najbliższym czasie punktem sieci stacji permanentnej GPS EUREF stanie się Borowa Góra, gdzie znajduje się punkt polskiej sieci zerowego rzędu EUREF-POL i gdzie spełnione są warunki odpowiadające standardom IGS, czyli zapewniona będzie stabilizacja punktu, aparatura pomiarowa, transmisja danych.

Punktami sieci permanentnych stacji są projektowane dwie stacje lotnicze (Dęblin i Jędrzejów) w Polsce, które realizować będą zadania związane z nawigacją powietrzną. Ponadto planuje się uruchomienie dwóch permanentnych stacji przez Marynarkę Wojenną RP w pobliżu wybranych mareografów. Jednym z nich ma być Władysławowo a stacją prowadzącą permanentne obserwacje Rozewie. Drugi mareograf będzie w Świnoujściu a stacja permanentna w Dziwnowie. Obydwa mareografy będą włączone do europejskiej sieci podstawowej mareografów (EPTGN⁷⁴).

W celu równomiernego rozmieszczenia punktów permanentnej sieci EUREF przewiduje się utworzenie stacji prowadzących permanentne obserwacje w północno-wschodniej Polsce (Augustów – Suwałki). Sieć ta będzie docelowo liczyła 10 punktów (w tym 2 Marynarki Wojennej, 2 WLOP). W pierwszym etapie zostanie utworzonych 6 permanentnych stacji GPS oraz Lokalne Centrum Danych (LDC⁷⁵), które ściśle związane będzie ze stowarzyszeniem Centrum Analiz IGS.

Permanentne stacje będą stanowiły punkty odniesienia zarówno dla użytkowników wykorzystujących technikę GPS NAVSTAR, jak również GLONASS. Dane ze wszystkich stacji permanentnych powinny być gromadzone i analizowane w krajowym centrum danych. Powinno ono znaleźć swoje miejsce w Dowództwie Wojsk Lotniczych i Obrony Kraju, w Dowództwie Marynarki Wojennej oraz w Dowództwie Wojsk Lądowych. Tym samym możliwe byłoby obserwowanie przestrzeni powietrznej, morskiej i lądowej naszego kraju,

⁷⁴ EPTGN – *ang.* European Primary Tide Gauge Network

⁷⁵ LDC – *ang.* Local Data Center

wyznaczanie parametrów i identyfikacja przemieszczających się obiektów. W wypadku prowadzenia nawigacji lądowej należy mieć na uwadze tzw. nawigację automatyczną prowadzoną bez możliwości porównania pozycji z sytuacją terenową (brak lub zniszczone oznakowanie dróg, niekorzystne warunki atmosferyczne). W takim układzie użytkownik powinien otrzymywać poprawkę co jedną sekundę. Może ona być przesyłana na różnych częstotliwościach radiowych:

- Wysokiej (HF), zawartej w granicach od 1,5 do 3,4 MHz, z prędkością transmisji 50 Bd - dokładność poprawianej pozycji wynosi 1 m.
- Bardzo wysokiej (VHF), zawartej w granicach od 120 do 20 MHz – dokładność poprawianej pozycji wynosi 0,7 m.
- Ultra wysokiej (UHF), zawartej w granicach od 400 do 500 MHz, z prędkością transmisji równą 1200 Bd - dokładność poprawianej pozycji wynosi 0,5 m.
- Ultra wysokiej (UHF), zawartej w granicach od 900 do 1000 MHz, z prędkością transmisji równą od 2400 do 3600 Bd - dokładność poprawianej pozycji wynosi 0,1m.

Należy sądzić, że tworzona w naszym kraju sieć permanentnych stacji GPS oprócz potrzeb nawigacji powietrznej, morskiej, lądowej badań geodynamicznych będzie w stanie zaspokajać również potrzeby służb szybkiego reagowania.

5.2. Współpraca GPS z systemami radioelektronicznymi o niskiej dynamice zmian położenia

System GPS tworzy nowe możliwości zarządzania eksploatacją węzłów telekomunikacyjnych zwłaszcza typu polowego. Przyjęcie czasu UTC jako systemowego GPS, czyni go przydatnym w formie wzorca częstotliwości urządzeń

telekomunikacyjnych pracujących w systemach międzynarodowych⁷⁶. W tym celu należy każdy element systemu radioelektronicznego wyposażyć w zegar jednolitego czasu, synchronizowany znacznikami czasu GPS, co znacznie zwiększy jego parametry niezawodnościowe. Takie warunki zapewnia odbiornik znaczników czasu GPS, który umożliwia:

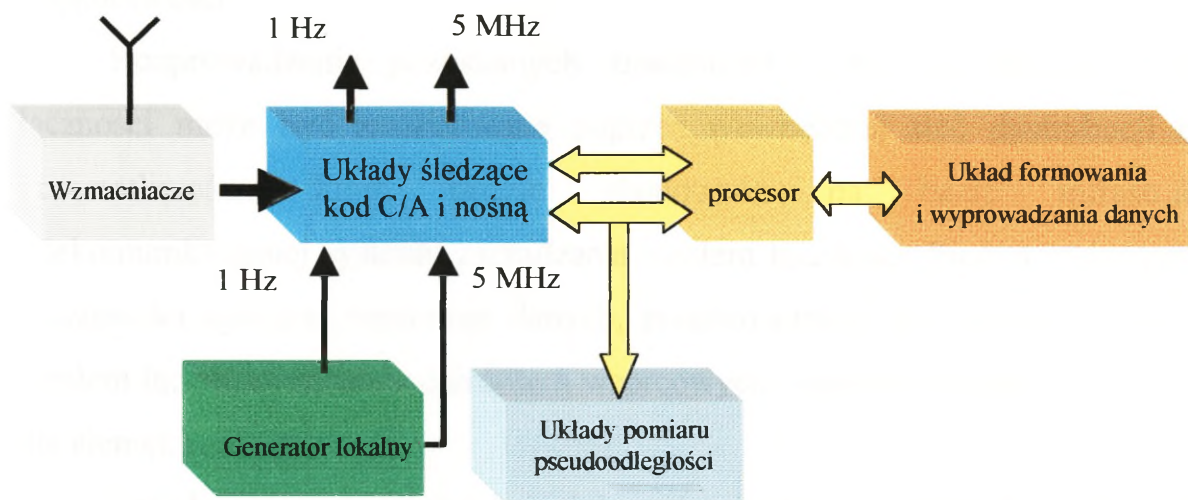
- ✓ odbiór sygnałów czasu;
- ✓ pomiar parametrów nawigacyjnych;
- ✓ jednoczesne określenie położenia i czasu.

Niewielkie rozmiary odbiornika GPS oraz wysokie parametry niezawodnościowe pozwalają na zastosowanie go w warunkach szczególnie trudnych. Ważną zaletą odbiorników GPS jest obligatoryjne wyposażenie ich w styki typu RS-232 lub IEEE-488⁷⁷. Zadaniem odbiornika jest odbiór sygnałów GPS i przetworzenie ich w postać ciągów synchronizujących indywidualne skale czasu oraz sformowanie bloku informacyjnego o czasie bieżącym. Odbiornik (rys. 5.4.) jest urządzeniem jednokanałowym przeznaczonym do odbioru i obróbki tylko sygnałów zmodulowanych kodem C/A. Sygnał po przemianie częstotliwości jest podany na wejście układu śledzenia kodu C/A i nośnej, gdzie następuje wydzielenie informacji służbowej i znaczników czasu. Wyselekcjonowany znacznik czasu jest wykorzystany w układzie pomiaru pseudolosowości, który co 6 sekund mierzy różnicę pomiędzy zboczem impulsu sekundowego generatora lokalnego i GPS z dokładnością do 1ns.

Blok pomiaru pseudoodległości zwykle stanowi seryjnie produkowany układ pomiarowy przedziałów czasu i jednostkę sterującą, łączącą go z procesorem. Blok ten oprócz funkcji sterowania wyznacza:

⁷⁶M. Wrażen: *Dystrybucja jednolitego czasu w systemach radiokomunikacyjnych*. Materiały z VI międzynarodowej konferencji naukowej: „Wojskowa konferencja telekomunikacji i informatyki”, Jabłonna 1997.

⁷⁷NMEA-0183 Standard for interfacing marine electronics navigational devices, version 1.5, December, 1987.



Rys. 5.4. Struktura odbiornika znaczników czasu GPS

- ✓ odległość od anteny odbiornika do satelity na podstawie znanych współrzędnych odbiornika i efemeryd⁷⁸ satelity;
- ✓ wartość opóźnienia grupowego sygnału w jonosferze na podstawie wartości kąta elewacji satelity, odległości do satelity i modelu propagacyjnego jonosfery;
- ✓ uchyb czasu satelity względem systemowej skali czasu GPS obliczany na podstawie treści danych nawigacyjnych.

Wykorzystując powyższe dane oraz obliczoną pseudodosowość procesor wyznacza różnicę między lokalną skalą czasu oraz skalą czasu satelity GPS. Oprogramowanie procesora umożliwia realizację tych operacji w czasie rzeczywistym.

Sygnały wyjściowe z odbiornika znaczników czasu mogą być wykorzystane do formowania bloków informacyjnych o wymaganej przez użytkownika

⁷⁸Efemerydy – obliczone położenia satelity.

strukturze, a także generowania wysoko-stabilnych sygnałów o określonej częstotliwości.

Rozprowadzenie pozyskanych znaczników czasu do elementów węzła łączności może być zrealizowane poprzez wewnętrzną sieć dystrybucji czasu i częstotliwości, która będzie zbudowana na bazie infrastruktury telekomunikacyjnej systemu zarządzania węzłem łączności. Sieć ta wykorzystując możliwości systemu transmisji danych, zrealizowanego dla potrzeb zarządzania węzłem łączności może być źródłem wzorcowych sygnałów czasu i częstotliwości dla elementów węzła.

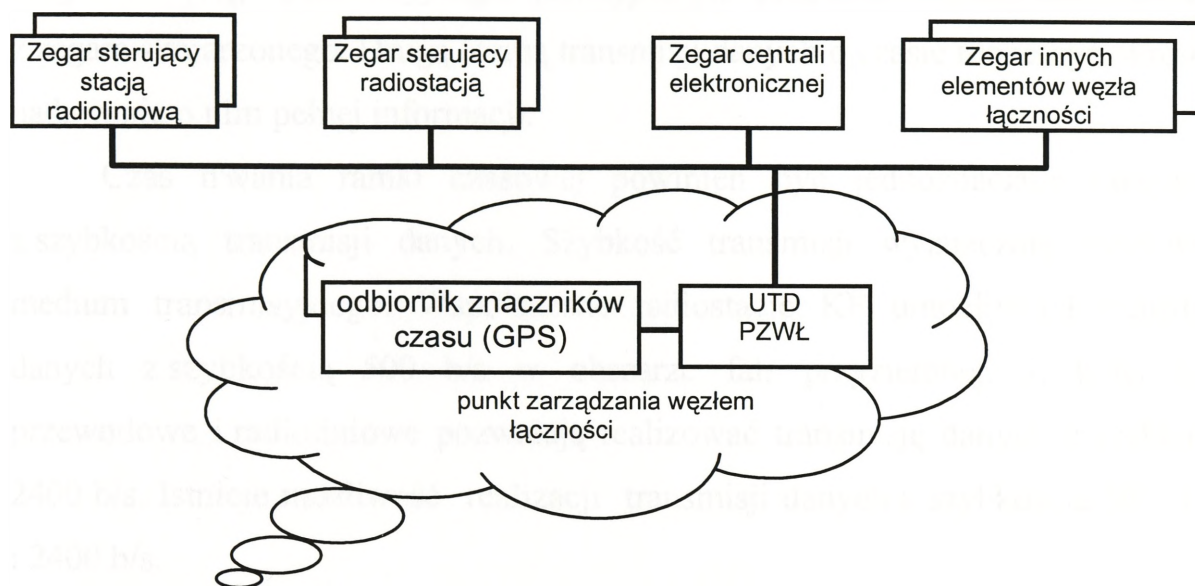
Zasadniczymi elementami sieci dystrybucji czasu powinien być zegar Punktu Zarządzania Węzłem Łączności (PZWŁ), zsynchronizowany ze skalą czasu GPS oraz zegary lokalne sterujące pracą elementów WŁ. Schemat funkcjonalny węzła łączności z jednolitym czasem pozyskiwanym za pomocą odbiornika znaczników czasu przedstawia rys. 5.5.

Realizacja podobnego rozwiązania w ramach wszystkich węzłów łączności systemu (PZWŁ) pozwala na dowiązanie urządzeń węzła oraz całego systemu łączności do wspólnej skali czasu – GPS.

Rozpowszechnienie czasu w ramach węzła łączności powinno polegać na odpowiedniej organizacji transmisji danych pomiędzy punktem zarządzania węzłem łączności a poszczególnymi jego elementami. Zasadniczym elementem systemu transmisji danych PZWŁ powinno być urządzenie transmisji danych tego punktu współpracujące z komputerem IBM PC oraz zegarem jednolitego czasu (odbiornikiem znaczników czasu GPS) poprzez styk RS-232.

Z punktu widzenia rodzajów stosowanych w systemie transmisji danych środków łączności, UTD powinno umożliwić obsługę sieci:

- ✓ przewodowych;
- ✓ radiowych KF/UKF;



Rys. 5.5. Schemat funkcjonalny systemu pozyskiwania i dystrybucji czasu w ramach węzła łączności

✓ radioliniowo – przewodowych.

W organizowanej sieci UTD, PZWŁ musi pełnić rolę nadrzędną w stosunku do pozostałych zamontowanych w poszczególnych elementach WŁ. Jego głównym zadaniem powinno być zarządzanie pracą urządzeń podporządkowanych i dystrybucja czasu. Rozpowszechnianie informacji o czasie powinno bazować na założeniu organizacji ciągłej transmisji danych w sieci PZWŁ. Koncepcja dystrybucji czasu w sieci zarządzania węzłem powinna być oparta na algorytmie działania urządzenia transmisji.

Transmisja danych w sieci PZWŁ może być realizowana na zasadzie zwielokrotnienia czasowego opartego o jednolity czas wyznaczający ramkę czasową dzieloną na szczeliny kanałowe. Założeniem takiej organizacji dystrybucji czasu powinno być, aby każdy z elementów transmisji (elementowa, blokowa, pakietowa skala czasu) mógł pełnić funkcję wzorca dla podrzędnych UTD.

Możliwa do zastosowania metoda rozpowszechniania czasu, polegająca na jego odzysku z ciągu transmisyjnego, jest typowym przykładem pozyskiwania czasu z zegara skojarzonego. Drugą formą transmisji danych o czasie może być okresowe nadawanie o nim pełnej informacji.

Czas trwania ramki czasowej powinien być jednoznacznie powiązany z szybkością transmisji danych. Szybkość transmisji wyznaczają możliwości medium transmisyjnego. Współczesne radiostacje KF umożliwiają transmisję danych z szybkością 500 b/s w obszarze fali przyziemnej. Z kolei łącza przewodowe i radioliniowe pozwalają realizować transmisję danych z szybkością 2400 b/s. Istnieje możliwość realizacji transmisji danych z szybkością 500, 1200 i 2400 b/s.

Zachodzi potrzeba opracowania harmonogramu transmisji danych z uwzględnieniem potrzeb dystrybucji czasu. Jako założenie należy przyjąć podział ogólnego czasu trwania transmisji na ramki o czasie trwania wynikającym z podziału 1 minuty przez liczbę naturalną dającą wynik bez reszty. Ponadto czas trwania ramki powinny wyznaczać potrzeby transmisyjne (szybkość transmisji, ilość informacji, itp.).

Przykładowo dla szybkości transmisji 500, 1200, 2400 b/s należy przyjąć odpowiedni czas trwania ramki 15 s, 12 s, 6 s,. Początek pierwszej ramki powinien być wyznaczany początkiem kolejnej minuty czasu bieżącego. Ramki powinny być następnie dzielone na szczeliny kanałowe o jednakowym czasie trwania. Tak więc ramka o czasie trwania 15 sekund powinna zawierać sześć szczelin kanałowych o czasie trwania 2,5 s. Ramki o innej długości powinny zawierać: ramka 12 s i 6 s – dziesięć szczelin kanałowych o czasie trwania odpowiednio 1,2 s i 0,6 s. Wielkości te powinny wynikać z przyjętych szybkości transmisji danych oraz potrzeby pokrywania się momentów charakterystycznych transmisji ze skalą czasu GPS (UTC).

Koncepcja rozpowszechniania czasu powinna zakładać okresową transmisję pełnej informacji o czasie i ciągłą transmisję elementowej, blokowej, depeszowej i ramkowej skali czasu w formie zegara skojarzonego.

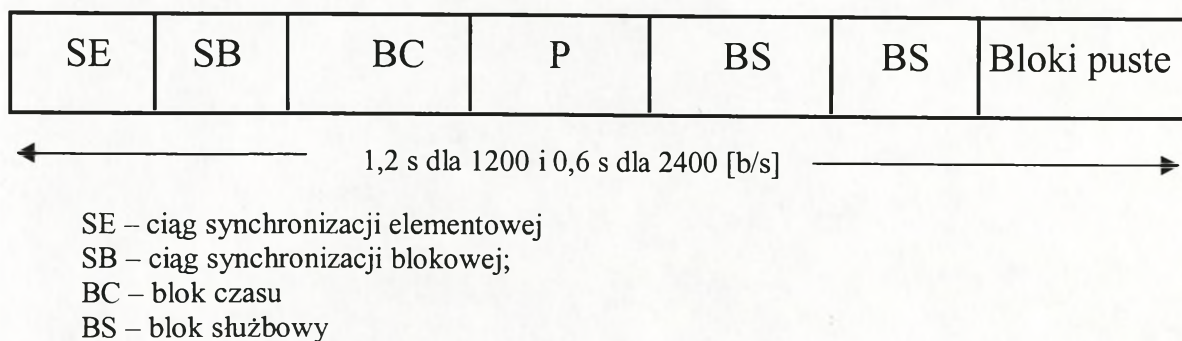
Rozpowszechnianie czasu w ramach węzła łączności może być zrealizowane poprzez transmisję:

- bloków informacyjnych o czasie w okresie synchronizacji sieci;
- bloków informacji o czasie nadawanych w szczelinach zerowych;
- bloków decyzyjnych transmitowanych w szczelinie zerowej;
- elementowej i blokowej skali czasu w ramach zegara skojarzonego.

Transmisja sygnałów pełnych danych o czasie powinna odbywać się w każdej zerowej szczelinie kanałowej (najwyższej w hierarchii), zaczynającej się z początkiem minuty, w ramach której nadawana jest depesza informacyjna lub decyzyjna.

Odbiór sygnałów czasu przez urządzenia podrzędne powinien powodować korekcję jego ramkowej skali czasu oraz fazy zegara teledacyjnego. W procesie synchronizacji sieci PZWŁ, UTD po uruchomieniu go powinna być nadawana automatycznie pełna informacja o czasie (w szczelinie zerowej).

Przykładową strukturę depeszy czasu i bloku czasowego przedstawiono na rysunkach 5.6. i 5.7.



Rys. 5.6. Przykładowa struktura depeszy czasu

Ostatnie zbocze JS w bloku czasu oznacza upływ aktualnej sekundy. Wymienione rodzaje transmisji danych obejmują tylko sieć elementarną (wewnętrzzną WŁ). Inicjatorem transmisji rozsiewczej może być tylko urządzenie transmisji danych punktu zarządzania WŁ.

DG	JG	DM	JM	DS	JS	CK
----	----	----	----	----	----	----

DG – miano dziesiątek godzin;
 JG – miano jednostek godzin;
 DM – miano dziesiątek minut;
 JM – miano jednostek minut;
 DS – miano dziesiątek sekund;
 JS – miano jednostek sekund;
 CK – ciąg kontrolny

Rys. 5.7. Struktura bloku czasu BC

Transmisja czasu w ramach bloków informacyjnych czy decyzyjnych powinna polegać na okresowym włączeniu bloku czasu do depeszy informacyjnej (decyzyjnej). Strukturę depeszy informacyjnej z blokiem czasu przedstawia rysunek 5.8.

SE	SB	BC	P	BS	BS	BD	BD	BI ₁₋₁₂	R
----	----	----	---	----	----	----	----	--------------------	---

BD – blok decyzyjny;
 BS – blok służbowy;
 P – bit przerwy celem ustalenia warunków klucza szyfrującego;
 BI₁₋₁₂ – bloki informacyjne;
 R – blok rezerwy

Rys. 5.8. Struktura depeszy informacyjnej z blokiem danych o czasie

Z powyższego wynika, że dołączenie kolejnego zegara lokalnego wymusza realizowanie przez niego procedur synchronizacyjnych celem osiągnięcia

zgodności elementowej, blokowej, depeszowej i ramkowej skali czasu. Proces regulacji jego systemowej skali czasu powinien odbywać się z chwilą odebrania informacji o czasie, która należy nadawać na początku każdej minuty. Komunikację pomiędzy UTD i urządzeniem odbioru znaczników czasu można oprzeć o styk RS – 232. Przedstawiona koncepcja dotyczy transmisji danych o czasie w ramach węzła łączności, tym niemniej podobne rozwiązanie można wykorzystać do rozpowszechniania informacji o czasie w wybranych elementach systemu rozpoznania i walki elektronicznej np. RCR, GNZ, ośrodkach elektronicznych itp.

5.3 Współpraca z systemami rozległymi o dużej dynamice zmian położenia

W systemach elektronicznych rozległych przestrzennie i charakteryzujących się ponadto dużą dynamiką zmian położenia, wykorzystanie koncepcji przedstawionej w poprzednim podrozdziale może okazać się mało efektywne. Przyczyny tego tkwią zarówno w trudnościach związanych z transmisją informacji o czasie (wówczas wymagany jest kanał radiowy o wysokiej jakości), jak też zjawiska towarzyszące propagacji radiowej w systemach poruszających się z dużymi prędkościami (np. latające obiekty rozpoznawcze).

Systemy te oprócz informacji o czasie wymagają danych o bieżącym położeniu (np. namierniki zamontowane na obiektach latających). Informacji takiej dostarczają odbiorniki GPS. Wyposażając zatem urządzenia (kompleksy elektroniczne) w uniwersalne odbiorniki GPS i wykorzystując informację o czasie jak i położeniu można zorganizować system z jednolitym czasem.

Istotnym założeniem koncepcji systemu radiokomunikacyjnego z jednolitym czasem jest - podobnie jak poprzednio - wykorzystanie indywidualnych zegarów

czasu synchronizowanych znacznikami czasu GPS, które pozyskiwane są poprzez odbiorniki nawigacyjne stanowiące integralne wyposażenie elementów systemu.

Odbiorniki te produkowane są w różnych wersjach, w tym też w formie kart komputerowych umożliwiających ich zamontowanie w komputerze sterującym pracą aparatu lub pojedynczego urządzenia. Spośród różnych typów odbiorników można wyróżnić trzy zasadnicze grupy:

- odbiorniki kodowe i bezkodowe;
- odbiorniki kodowe jednokanałowe i wielokanałowe;
- sekwencyjne odbiorniki jednokanałowe i z multipleksacją.

Odbiorniki bezkodowe mogą być wykorzystywane do śledzenia częstotliwości nośnej L_1 i generowania jego drugiej harmonicznej. Z punktu widzenia jednolitego czasu mogą okazać się mało przydatne.

Odbiorniki, które można wykorzystać w systemach z jednolitym czasem – to odbiorniki jedno lub wielokanałowymi. Każdy odbiornik nawigacyjny GPS posiada dwa podstawowe podsystemy: odbiorczy oraz nawigacyjny.

W podsystemie odbiorczym odbywa się:

- filtracja kodów C/A i P;
- przemiana częstotliwości;
- wzmocnienie mocy sygnału;
- generowanie sygnału lokalnego zsynchronizowanego z odbieranym.

W części nawigacyjnej podsystemu odbiorczego odbywa się:

- generowanie kodu C/A i P;
- pomiar pseudoodległości do satelitów;
- wstępne określenie poprawki dopplerowskiej dla założonej pozycji zliczonej;
- demodulacja danych nawigacyjnych;
- poszukiwanie sygnału satelitarnego.

W części podsystemu nawigacyjnego dokonuje się obróbki sygnałów w zakresie:

- odzyskania utraconego sygnału od satelity;
- doboru optymalnej konstelacji (najmniejszego GDOP);
- obliczania pseudoodległości do satelitów;
- obliczania współrzędnych pozycji obserwowanej;
- estymacji wektora (prędkości, kursu).

Każdy odbiornik jest wyposażony w interfejs spełniający rolę komunikacyjną pomiędzy odbiornikiem a urządzeniem korzystającym z danych nawigacyjnych w tym też zegarami lokalnymi.

Odbiorniki systemu GPS umożliwiają zobrazowanie danych na ekranie oraz sformowanie komunikatów nawigacyjnych w standardzie NMEA 0183 i wyprowadzenie ich na złącze RS 232.

Standard NMEA – 0183 określa postać danych nawigacyjnych. Dane te sformowane są w postaci ośmiobitowych bloków informacyjnych i bloku stanowiącego sumę kontrolną. Standard ten nie jest kompatybilny z standardami typu NMEA – 0180 czy NMEA – 0182 z uwagi na inny zastosowany tam sposób kontroli poprawności transmisji danych oraz inną ich szybkość transmisji.

Łącze transmisyjne przewidywane w standardzie NMEA – 0183 może stanowić linia transmisyjna dwuprzewodowa: sygnałowa – A i powrotna – B oraz ekran połączony tylko z obudową odbiornika. Poziom jedynki logicznej w tym standardzie nie powinien przekraczać wartości 0,5 V, zaś zera logicznego musi przewyższać wartość 4,0 V. Dane transmitowane w ramach tego standardu przesyłane mogą być w kodzie ASCII z szybkością 9600 b/s⁷⁹.

⁷⁹NMEA – 0183 Standard for interfacing marine electronics navigational devices, version 1,5, December 1987.

Dane nawigacyjne w standardzie NMEA – 0183 są zawarte w kilkudziesięciu różnych blokach informacyjnych. Odbiorniki nawigacyjne zwykle posiadają ograniczone możliwości formowania komunikatów. Sprowadzają się one do kilkunastu formatów. Standard NMEA – 0183 zawiera ich kilkadziesiąt. Dane wyprowadzone na złącze RS – 232 są zsynchronizowane z skalą czasu GPS. Każde zatem zbocze impulsu może być wykorzystane do synchronizacji zegara lokalnego. Informacja o czasie w tym standardzie jest podawana w postaci odpowiedniego bloku czasu zawartego w określonym formacie w kodzie ASCII, przy czym ostatnie zbocze końcowego bitu jednostek sekund oznacza upływ tej sekundy.

Podstawowym formatem danych nawigacyjnych emitowanych przez każdy odbiornik nawigacyjny GPS jest format RMC, który obejmuje:

- kombinację startową – S;
- pole adresowe typu alfanumerycznego (A÷Z i 0÷9) – dwa pierwsze znaki identyfikują źródło danych, trzy pozostałe ich zawartość;
- przecinek rozdzielający poszczególne pola;
- znak - * - oznaczający koniec ostatniego pola danych;
- pole sumy kontrolnej.

Znaki charakteryzujące źródło danych stanowią pierwsze dwa znaki. Przykładowo CS oznacza satelitę komunikacyjnego, CM i CC - komputer, GP – system GPS.

Odbiornik w ramach tego standardu umożliwia sformowanie danych o obiekcie obejmujących:

- aktualny czas UTC;
- zajmowaną pozycję w czasie UTC (szerokość i długość geograficzną);
- prędkość w stosunku do Ziemi oraz jej azymut;

— datę (dzień, miesiąc, rok).

Strukturę oraz treść bloku RMC przedstawiono na rys. 5.9.

1	2	3	4	5	6	7
\$GPRMC,	GGMMSS,	A,XXXX,XX,	N,XXXX,XX,	W,XXX,	XXX,	DDMMRR, XX,E*XX

Poszczególne pola oznaczone liczbami 1 ÷ 7 oznaczają;

- 1: czas UTC: GGMMSS (dziesiątki i jedności godzin, minut sekund odpowiednio);
- 2: szerokość geograficzna zajmowana w czasie UTC: (dziesiątki i jedności stopni, dziesiątki jednostki i setne części sekundy);
- 3: długość geograficzna zajmowana w czasie UTC w układzie jak dla szerokości;
- 4: prędkość obiektu w węzłach;
- 5: azymut wektora prędkości w stopniach;
- 6: data: DDMMRR (dzień, miesiąc, rok);
- 7: uchylenie magnetyczne w stopniach i sumę kontrolną.

Rys. 5.9. Struktura oraz treść bloku RMC

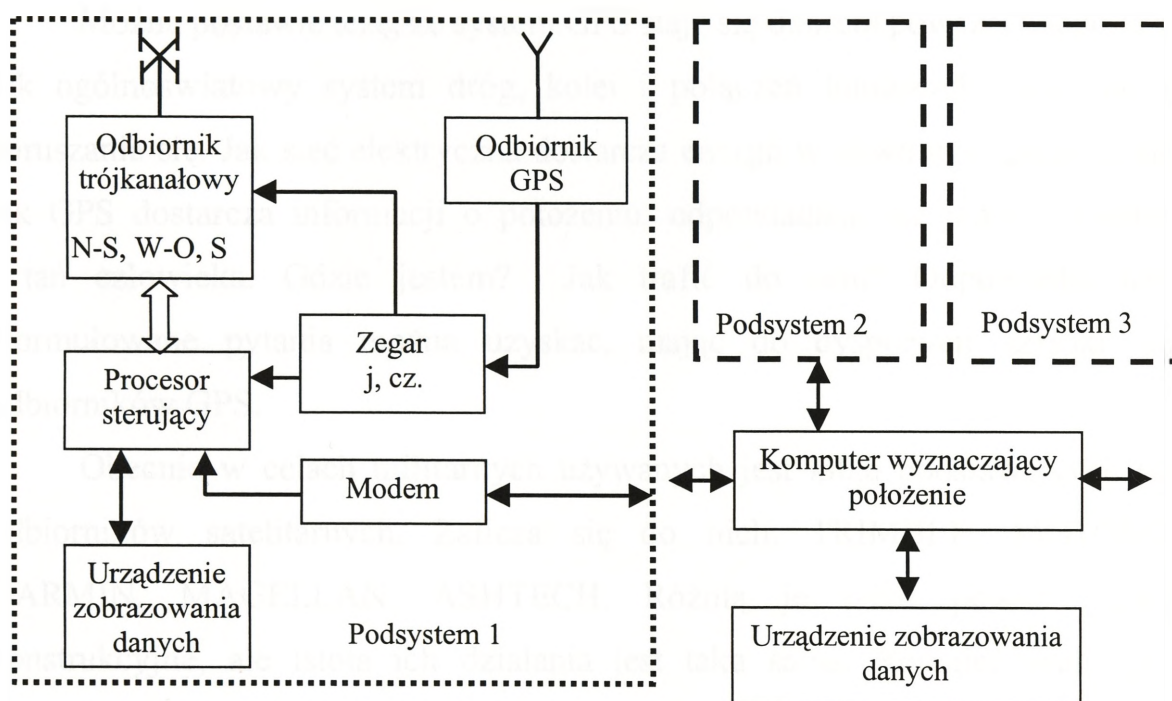
Częstotliwość uaktualniania tych danych jest różna w zależności od typu odbiornika GPS, ale zwykle nie przekracza 0,5 Hz.

Dane te mogą być bezpośrednio podane do komputera sterującego urządzeniami (np. namiernikami, radiostacjami, układami pomiaru parametrów sygnałów itp.), i wykorzystane w procesie formowania meldunków rozpoznawczych jako elementy wektora danych rozpoznawczych (np. dane o położeniu urządzenia pomiarowego i czasie realizacji pomiaru parametrów sygnałów).

Integralnym wyposażeniem odbiornika GPS jest oprogramowanie umożliwiające jego współpracę z komputerem w środowisku DOS lub Windows. Programy te mogą być wykorzystywane zarówno do zobrazowania danych nawigacyjnych w formie wielkości liczbowych, ale też do zobrazowania ich we współpracy z mapą cyfrową terenu w formie dogodnej dla użytkownika. Programy te umożliwiają także wykorzystanie sygnałów czasu GPS, jako źródła czasu dla

komputera. Stwarza to dogodne możliwości wykorzystania tego czasu do sterowania urządzeniami radiokomunikacyjnymi.

Przykładem systemu z jednolitym czasem zbudowanego w oparciu o indywidualne odbiorniki nawigacyjne jest system lokalizacji źródeł promieniowania radioelektronicznego, zilustrowany na rysunku 5.10.



Rys. 5.10. Schemat funkcjonalny systemu namierzania z jednolitym czasem

Podstawowym urządzeniem każdego podsystemu jest namiernik (odbiornik 3 – kanałowy) pracujący w określonym zakresie częstotliwości. Parametry dynamiczne namiernika pozwalają na realizację założonej liczby przestrojeń i pomiarów parametrów sygnałów.

5.4. Analiza możliwości wykorzystania sprzętu GPS

Jakie perspektywy ma przed sobą system GPS? Z pewnością odbiorniki będą coraz mniejsze. Zaprezentowano prototypy mieszczące się w ręcznym zegarku. Agencja Obrony USA opublikowała dokument, w którym zapowiada wyłączenie

zakłócania sygnału czasu - odbiorniki staną się dokładniejsze. W fazie rozruchu znajduje się konkurencyjny do GPS, rosyjski system GLONASS. Nie będzie on zakłócany; jego dokładność będzie lepsza od GPS (3-7 metrów). Producenci odbiorników GPS zapowiadają modele odbierające dane z obu systemów jednocześnie.

Można postawić tezę, że system GPS staje się dobrem powszechnego użytku. Jak ogólnoswiatowy system dróg, kolei i połączeń lotniczych zaspokoił głód poruszania się. Jak sieć elektryczna dostarcza energii w dowolnym punkcie świata tak GPS dostarcza informacji o położeniu, odpowiadając na jedno z częstszych pytań człowieka. Gdzie jestem? Jak trafić do celu? Odpowiedzi na tak sformułowane pytania można uzyskać, mając do dyspozycji szeroki wybór odbiorników GPS.

Obecnie w celach militarnych używanych jest kilka podstawowych typów odbiorników satelitarnych. Zalicza się do nich: TRIMBLE, MOTOROLA, GARMIN, MAGELLAN, ASHTECH. Różnią je tylko pewne szczegóły konstrukcyjne, ale istota ich działania jest taka sama. Również realizują one podobne funkcje, z tym, że w zależności od wielkości odbiornika, czy rozwiązań konstrukcyjnych zwiększają się możliwości i rozszerza baza danych.

Z analizy materiałów źródłowych wynika, że najbardziej reprezentatywne w chwili obecnej są następujące odbiorniki:

- ✓ Garmin GPS 12;
- ✓ Garmin GPS 175;
- ✓ Garmin GPS II plus;
- ✓ GPS 45 XL;
- ✓ Generator wzorcowy czasu i częstotliwości GPS HM8125.

Garmin GPS 12 jest odbiornikiem 12 - kanałowym systemu MultiTrack 12 (rys. 5.11).



Rys. 5.11. Odbiornik GARMIN GPS 12

Umożliwia odbiór sygnałów z maksymalnej liczby 12 satelitów. Średnia dokładność mierzonej pozycji wynosi 45 metrów. Ma możliwość uaktualniania pozycji co 1 sekundę, a funkcja uśredniania pozwala zmniejszyć błąd pomiaru pozycji. Posiada możliwość oznaczenia punktu za pomocą symbolu graficznego – ikony. Umożliwia wprowadzenie do pamięci odbiornika współrzędnych 500 punktów w terenie, lub 20 tras wraz ze słownym opisem, przy czym wprowadzanie punktów można dokonać przez wpisanie współrzędnych geograficznych odczytanych z mapy, bądź będąc w terenie przez naciśnięcie jednego przycisku następuje automatyczne zapamiętanie aktualnej pozycji.

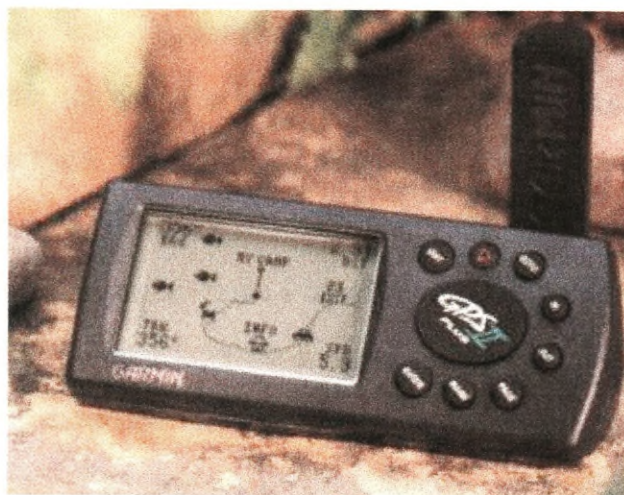
Punkty te mogą być wykorzystane jako punkty docelowe, lub mogą służyć do tworzenia tras. Odbiornik spełnia następujące funkcje:

- ✓ *Funkcja nawigacyjna* - po wybraniu punktu docelowego z listy zapamiętanych punktów, podaje namiar i odległość, szybkość przemieszczania się, przebytą drogę, czas przybycia oraz zboczenie z trasy w metrach;

- ✓ *Funkcja rejestratora przebytej trasy* - w formie graficznej pozwala odtworzyć na ekranie komputera wcześniej przebytą trasę z zaznaczeniem czasu przybycia do poszczególnych miejsc;
- ✓ *Funkcja ruchomej mapy* - w formie graficznej przedstawia na ekranie przebytą drogę na tle punktów wprowadzonych wcześniej do pamięci odbiornika, obliczanie odległości i namiaru między dowolnymi punktami, zmiana skali wyświetlanej mapy od 0,5 do 640 km;
- ✓ *Funkcja Track Back* - pozwala wrócić do punktu wyjścia dokładnie po uprzednio przebytej drodze. Umożliwia ponadto podawanie odległości i namiaru do 10 najbliższych punktów w terenie, współpracę z komputerem, a za pomocą dodatkowo zakupionego programu PCX5 istnieje możliwość opracowania i analizy danych zebranych w terenie.

Odbiornik wyposażony jest w podświetlany ekran, zasilany z czterech baterii alkalicznych AA - umożliwiających 20 godzinną ciągłą pracę. Za pomocą dodatkowo dostarczonego przewodu zasilającego istnieje możliwość zasilania z zewnętrznego źródła napięcia 5 - 8 V DC. Poza tym wewnętrzna bateria litowa - podtrzymuje przez około 10 lat pamięć odbiornika, nawet przy braku zasilania zewnętrznego.

Nowością jest **odbiornik Garmin GPS II PLUS** (rys. 5.12), który posiada wbudowaną bazę danych zawierającą pozycje większych miast Europy (miasta powyżej 5000 mieszkańców). Jest odbiornikiem 12 kanałowym. Umożliwia odbiór sygnałów z maksymalnej liczby 12 satelitów. Średnia dokładność mierzonej pozycji wynosi 45 metrów, uaktualnia pozycję co 1 sekundę. Ma możliwość wprowadzenia do pamięci współrzędnych 500 punktów w terenie lub 20 tras wraz ze słownym opisem. Wprowadzanie punktów można dokonać przez wpisanie współrzędnych geograficznych odczytanych z mapy, bądź będąc



Rys. 5.12. Odbiornik Garmin GPS II plus

w terenie przez naciśnięcie jednego przycisku (następuje automatyczne zapamiętanie aktualnej pozycji). Punkty te mogą być wykorzystane jako punkty docelowe, lub mogą służyć do tworzenia tras. Poza tym ma możliwość oznaczenia punktu za pomocą symbolu graficznego – ikony. Wyposażony jest w następujące funkcji:

- ✓ Funkcja uśredniania - pozwala na zmniejszenie błędu pomiaru pozycji;
- ✓ Funkcja nawigacyjna - po wybraniu punktu docelowego z listy zapamiętanych punktów, podaje namiar i odległość, szybkość przemieszczania się, przebytą drogę, czas przybycia oraz zboczenie z trasy w metrach;
- ✓ Funkcja rejestratora przebytej trasy - w formie graficznej pozwala odtworzyć na ekranie komputera wcześniej przebytą trasę z zaznaczeniem czasu przybycia do poszczególnych miejsc;
- ✓ Funkcja ruchomej mapy - w formie graficznej przedstawia na ekranie przebytą drogę na tle punktów wprowadzonych wcześniej do pamięci odbiornika przy maksymalnej prędkości poruszania się 200 km/godzinę. Umożliwia także obliczanie odległości i namiaru między dowolnymi punktami oraz zmianę skali wyświetlanej mapy od 0,5 do 640 km;

- ✓ Funkcja Track Back - pozwala wrócić do punktu wyjścia dokładnie po uprzednio przebytej drodze. Umożliwia podawanie odległości i namiaru do 10 najbliższych punktów w terenie, a także zapewnia współpracę z komputerem. Za pomocą dodatkowo zakupionego programu PCX5 istnieje możliwość opracowania i analizy danych zebranych w terenie,

Odbiornik posiada podświetlany ekran oraz zmianę orientacji wyświetlanego ekranu. Jest zasilany z czterech baterii alkalicznych AA, umożliwiających 20 godzinną ciągłą pracę. Za pomocą dodatkowo dostarczonego przewodu zasilającego istnieje możliwość zasilania z zewnętrznego źródła napięcia 10 - 36 V DC, a wewnętrzna bateria litowa - podtrzymuje przez około 10 lat pamięć odbiornika, nawet przy braku zasilania zewnętrznego. Wyposażony jest w odłączaną antenę, dzięki czemu istnieje możliwość umieszczania jej w miejscu o najlepszej widoczności kosmosu przy użyciu dodatkowo dostarczonego przedłużacza antenowego. Posiada także dwa typy uchwytów mocujących, które - pozwalają na jego zamocowanie w każdym pojeździe.

Garmin GPS 45XL (rys. 5.13) jest odbiornikiem 8 kanałowym.



Rys. 5.13. Odbiornik GPS 45 XL

Umożliwia odbiór sygnałów z maksymalnej liczby 8 satelitów. Średnia dokładność mierzonej pozycji wynosi 45 metrów. Uaktualnianie pozycji odbywa się co 1 sekundę. Ma możliwość wprowadzenia do pamięci odbiornika współrzędnych 250 punktów w terenie, lub 20 tras wraz ze słownym opisem, przy czym wprowadzanie punktów można dokonać przez wpisanie współrzędnych geograficznych odczytanych z mapy, bądź będąc w terenie przez naciśnięcie jednego przycisku (wówczas następuje automatyczne zapamiętanie aktualnej pozycji). Punkty te mogą być wykorzystane jako punkty docelowe, lub mogą służyć do tworzenia tras. Wyposażony jest w następujące funkcje:

- ✓ Funkcja nawigacyjna - po wybraniu punktu docelowego z listy zapamiętanych punktów, podaje namiar i odległość, szybkość przemieszczania się, przebytą drogę, czas przybycia oraz zboczenie z trasy w metrach;
- ✓ Funkcja rejestratora przebytej trasy - w formie graficznej pozwala odtworzyć na ekranie komputera wcześniej przebytą trasę z zaznaczeniem czasu przybycia do poszczególnych miejsc;
- ✓ Funkcja ruchomej mapy - w formie graficznej przedstawia na ekranie przebytą drogę na tle punktów wprowadzonych wcześniej do pamięci odbiornika przy maksymalnej prędkości poruszania się 200 km/godzinę. Umożliwia także obliczanie odległości i namiaru między dowolnymi punktami, zmianę skali wyświetlanej mapy od 0,5 do 640 km;
- ✓ Funkcja Track Back - pozwala wrócić do punktu wyjścia dokładnie po uprzednio przebytej drodze, a także podawanie odległości i namiaru do 10 najbliższych punktów w terenie.

Odbiornik ma możliwość współpracy z komputerem, a za pomocą dodatkowo zakupionego programu PCX5 istnieje możliwość opracowania i analizy danych zebranych w terenie. Możliwości zasilania są podobne jak w odbiorniku GPS-II. Zewnętrzna antena - zwiększa czułość odbiornika. Odbiornik jest wodoszczelny.

W odbiorniku zapewniona jest synchronizacja sygnałem GPS, co umożliwia precyzyjny odczyt czasu i pozycji geograficznej. Ma możliwość pracy w dowolnym miejscu na ziemi. Posiada wyjście precyzyjnego sygnału 10 MHz. Dokładność częstotliwości wynosi 1×10^{12} przy synchronizacji przez satelitę, natomiast stabilność krótkookresowa jest rzędu 3×10^{10} (w czasie 2s). Posiada wyjście 1-sekundowych znaczników czasu. Seryjnie montowany jest port szeregowy RS-232. Charakteryzuje się niskimi kosztami eksploatacji. Może być montowany na różnych środkach walki.

Najnowocześniejszym odbiornikiem w chwili obecnej z tej grupy jest Garmin GPS 175 (rys. 5.14). Zespołowi badawczemu nie udało się pozyskać danych technicznych tego odbiornika w trakcie opracowywania sprawozdania.



Rys. 5.14. Odbiornik Garmin GPS 175

Przyrząd HM8125 (rys. 5.15) służy do generacji precyzyjnych znaczników czasu i częstotliwości wzorcowych oraz dokładnego odczytu pozycji geograficznej

Bazuje na systemie nawigacji satelitarnej GPS NAVSTAR Ministerstwa Obrony USA. Jak wiadomo, system składa się z 24 satelitów, których zakodowane sygnały pozwalają - w dowolnym miejscu na kuli ziemskiej - wyjątkowo precyzyjnie określać czas i pozycję geograficzną. Dokładność systemu wynika z zastosowania cezowego wzorca czasu.



Rys. 5.15. HM8125 - Generator wzorcowy czasu i częstotliwości GPS

Bazuje na systemie nawigacji satelitarnej GPS NAVSTAR Ministerstwa Obrony USA. Jak wiadomo, system składa się z 24 satelitów, których zakodowane sygnały pozwalają - w dowolnym miejscu na kuli ziemskiej - wyjątkowo precyzyjnie określać czas i pozycję geograficzną. Dokładność systemu wynika z zastosowania cezowego wzorca czasu.

Po włączeniu zasilania HM8125 automatycznie odbiera sygnał satelitarny i w ciągu 2 do 15 minut wylicza swoją aktualną pozycję. Procedura synchronizacji jest sygnalizowana wskaźnikiem diodowym (LED), natomiast wartość aktualnej dewiacji odczytuje się na wyświetlaczu LCD (matryca 2x20 znaków). Na wyjściu urządzenia otrzymuje się ciąg znaczników czasu z dokładnością do 100 ns względem czasu uniwersalnego UTC. Częstotliwości wzorcowe generowane są z dokładnością nie mniejszą niż 1×10^{-12} (w czasie 24 godzin), gdy przyrząd jest synchronizowany przez satelitę. Wyprowadzenie danych czasowych i impulsów

synchronizujących na złącze RS-232 pozwala na pracę urządzenia w trybie kalibracji lub nadzoru.

Na wyjściu generatora HM8125 dostępna jest częstotliwość 2,048MHz, synchronizowana sygnałem GPS, którą wykorzystuje się w zastosowaniach telekomunikacyjnych (transmisja PCM). Przyrząd umożliwia również pomiar częstotliwości sygnałów zewnętrznych z dokładnością do 3×10^{-10} (bramka 2s). HM8125 może pracować jako samodzielny generator lub synchronizować (opcja) oscylator rubidowy. Przyrząd dostarczany jest z anteną, konwerterem antenowym i 15 m kablem BNC.

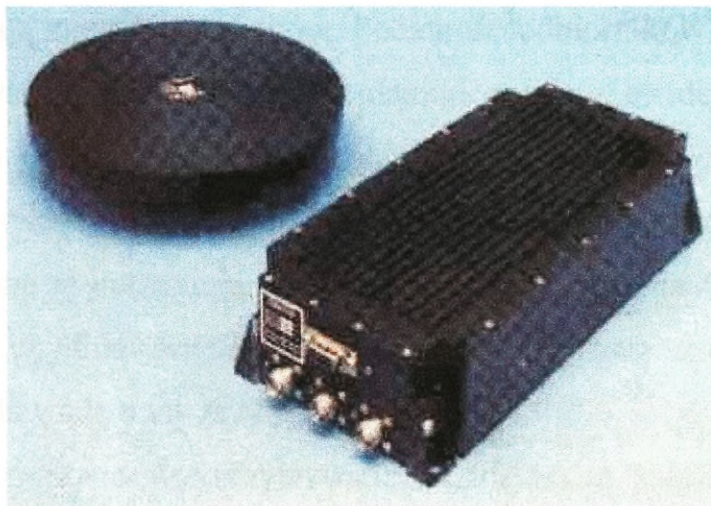
5.5 Podatność systemu GPS na zakłócenia

Ważnym problemem dotyczącym systemu GPS jest jego podatność na zakłócenia radioelektroniczne, które powstają w sposób niezamierzony (przypadkowy) w wyniku niekompatybilności różnych urządzeń radioelektronicznych lub też są to zamierzone sygnały celowo emitowane przez komórki walki elektronicznej.

Zakłóceniami niezamierzonymi są przede wszystkim: harmoniczne, listki boczne, efekty modulacji wzajemnej oraz te, które nie udało się zbadać przy pomocy tradycyjnych metod kontroli częstotliwości. Nadajniki małych mocy potrafią zakłócić odbiorniki GPS w promieniu do 10 km. Nawet telefony komórkowe są niebezpieczne dla odbiorników GPS. Wykorzystują one sygnały radiowe do synchronizacji w pracy multipleksowej i powodują zakłócenia w torze odbiorczym systemu nawigacji. W celu ochrony przed zakłóceniami firma ERI⁸⁰ zaproponowała uzupełnienie odbiorników systemu GPS w urządzenie eliminujące

⁸⁰ERI – ang. Electro-Radiation, Incorporated, Fairfield, New Jersey.

zakłócenia ISU (Interference Suppresion Unit – rys. 5.16). Składa się ono z modułu elektronicznego (6,25 cm x 22,86 x 8,89 cm) i anteny (12,7 cm o średnicy 3,81 cm). Moduł może być rozmieszczony w pewnej odległości od odbiornika lub tworzyć z nim system zintegrowany. Oprócz eliminacji zakłóceń może sam być źródłem zakłóceń dla innych użytkowników systemu nawigacyjnego.



Rys. 5.16. Urządzenie eliminujące zakłócenia (ISU)

Przeprowadzone testy zarówno przy zakłócaniu wąskopasmowym jak i szerokopasmowym wykazały wysoką skuteczność urządzenia przy stosowaniu zakłócających kodów odbiornika PPS i SPS.

Globalny system nawigacyjny (GPS) może być podatny na zakłócenia, emitowane przez przenośne nadajniki zakłóceń (dostępne na rynku, produkowane przez amatorów), co może mieć wpływ na precyzję lokalizacji systemu, a tym samym rozszerzyć się na elementy wojskowe systemu. Podatność odbiorników systemu GPS na zakłócenia stosowane przez podręczne nadajniki, może wpłynąć niekorzystnie na działania wojsk, szczególnie podczas kierowania operacjami w oddalonych obszarach.

Urządzenie eliminujące zakłócenia (ISU) zapewnia ochronę dla podatnych na zakłócenia (nie zabezpieczonych) odbiorników radiowych systemu GPS.

Powszechnie stosowane odbiorniki w systemie GPS są podatne na zakłócenia nadajników zakłóceń małej mocy, które są łatwo dostępne i niedroge. Urządzenie eliminujące zakłócenia (ISU), pracujące w zakresie częstotliwości radiowych (oprócz tego że zapewnia ochronę własnych odbiorników), może zmienić rodzaj pracy i zakłócać odbiorniki przeciwnika w tym samym czasie kiedy własne odbiorniki odbierają sygnały z satelitów. Podatność odbiorników systemu GPS na zakłócenia stosowane przez podręczne nadajniki staje się ewidentna, co wpływa niekorzystnie na działalność wojskową (podczas kierowania operacjami w oddalonych obszarach, zapewnienia precyzji środków kierowanych) ze względu na to, że siły zbrojne wykorzystują ten system do przekazywania danych.

Działalność cywilna (przeloty samolotów) zależą również od systemu GPS, ze względu na podawanie trasy przelotu i pozycji.

Odbiorniki radiowe wykorzystywane w rosyjskim satelitarnym systemie nawigacyjnym (GLONASS), są również dostępne na światowym rynku. Prawie każdy kraj posiada dostęp do satelitarnych systemów nawigacyjnych pracujących na korzyść sił zbrojnych, umożliwiając im lokalizację, przerzuty broni itp. Stosując technologię obrony RE (kontrprzeciwdziałania), odbiorniki systemu GPS zabezpiecza się w urządzenia przeciwzakłócające. Zmiana sposobu pracy w paśmie częstotliwości radiowych w celu zakłócenia odbiorników przeciwnika, odbywa się przez zastosowanie algorytmu kodowania. Dekodowanie pozwala odbiornikom sił własnych na przechwytywanie sygnałów nawigacyjnych w systemie GPS przy równoczesnym stosowaniu zakłóceń. Urządzenie ISU może być wykorzystywane do ochrony przed zakłóceniami zarówno wojskowych jak i cywilnych naziemnych stacji końcowych, pracujących w satelitarnych systemach łączności. Urządzenie ISU systemu GPS jest produkowane przez firmę elektroniczną ERI w Fairfield (New Jersey). Złożony test tego urządzenia obejmował zarówno szerokie jak i wąskie pasmo częstotliwości, przy stosowaniu kodu odbiornika: C/A i P/Y.

Według Donalda W. Hiorth, wicedyrektora firmy ERI, posiadają oni koncesję na przyjmowanie zamówień i produkcję na szeroką skalę. Urządzenie ISU składa się z modułu elektronicznego i anteny, jest całkowicie zastrzeżone, prace nad jego wdrożeniem postępują bardzo szybko. Przeprowadzone testy, zarówno przy zakłócaniu wąskopasmowym, jak i szerokopasmowym wykazały skuteczność urządzenia przy stosowaniu kodów odbiornika C/A i P/Y. Wraz ze światowym rozwojem technologii odbioru danych w systemie GPS, potencjalne siły przeciwnika mogą mieć wpływ na jakość odbioru danych. To staje się tym bardziej poważne dlatego, że użytkownicy kodu cywilnego C/A, który jest poza kontrolą SZ USA, mogą osiągnąć większą precyzję przekazywania danych, niż jest to możliwe przy stosowaniu kodu P/Y. Kod C/A jest ogólnie przeznaczony dla potrzeb cywilnych, pasmo częstotliwości 2MHz jest zawężane do 1MHz - 10 dB wzmocnienia w poziomie zakłóceń (szumów).

Hiorth twierdzi, że sygnały radiowe odbierane przez antenę odbiornika, są podatne na zakłócenia niskiej mocy (listki boczne przy przekazach cywilnych), modulację wzajemną i inne efekty.

Efekty zakłóceń mogą zniweczyć odbiór sygnału przez własne siły, a tym samym przewagę techniczną sił i środków systemu GPS.

Nadajniki zakłócające system GPS, mogą być bardzo małych rozmiarów, przenośne, a ich koszt nie przekracza 100 dolarów. Siły przeciwnika mogą rozmieścić dużą ilość nadajników zakłóceń w różnych rejonach geograficznych, aby zakłócić odbiór sygnałów w systemie GPS.

Urządzenie ISU z montowaną anteną, zabezpiecza pracę systemu (w rodzaju L_1 - lokalizacja) na częstotliwości 1575, 42 MHz i możliwość korekcji częstotliwości (L_2) na częstotliwości 1227,60 MHz. Moduł elektroniczny, który może być rozmieszczony w pewnej odległości od odbiornika systemu GPS, jest zbudowany z gotowych elementów. System będzie udoskonalony w oparciu

o stosowanie kart komputerowych, wykonywanych z elementów mikroelektronicznych, które będą gwarantować bezpieczeństwo (zabezpieczenie).

Hiorth stwierdza, że Sił Zbrojnych USA nie stać na produkcję broni przeciwradiolokacyjnej, która mogłaby niszczyć nadajniki zakłóceń małej mocy (zakłócające system GPS) i aktualnie nie rozważają takiej możliwości. Sytuacja ta może stać się poważnym zagrożeniem dla przyszłości USA i ich sojuszników w trakcie działań wojennych, w toku których masowo wykorzystuje się siły i środki walki elektronicznej do emitowania *zakłóceń zamierzonych (celowych)*. Hiorth podkreśla również, że takie nadajniki zakłóceń pracują w paśmie fal elektromagnetycznych (spektrum) dlatego mogą zakłócać również odbiorniki radiowe systemu GPS. Urządzenie ISU unika skomplikowanych zakłóceń ponieważ nie jest montowane razem z odbiornikiem. Jakkolwiek urządzenie ISU może być połączone szeregowo z odbiornikiem, tworzy wtedy system zintegrowany, który w znacznym stopniu zwiększa ochronę przeciwzakłóceńową.

Możliwości zintegrowanego systemu przeciwzakłóceńowego: wynoszą: 95-100dB tłumienności przy zakłóceniach szerokopasmowych oraz 105-110 dB tłumienności przy zakłóceniu wąskopasmowym. Urządzenie ISU nie musi być kierunkowo sterowane za pomocą dodatkowych urządzeń. To pozwala uniknąć znacznych kosztów i ograniczeń w projektowaniu. Urządzenie testowano przy stosowaniu kodów: C/A i P/Y. Scenariusz testu przewidywał stosowanie od jednego do dwóch nadajników zakłóceń o osiąгах 35-40 dB przy zakłóceniu szerokopasmowym i 45-50 dB przy zakłóceniu wąskopasmowym. Skuteczna tłumienność urządzenia przy dwu rozstawionych oddzielnie nadajnikach zakłóceń wynosi powyżej 45dB i jest zależna od typu nadajnika.

Aby wykluczyć możliwość wykorzystania systemu GPS przez przeciwnika, USA zamieniły urządzenia dzięki którym będą mogły zakłócać niepożądanych odbiorców systemu GPS oraz innych systemów nawigacyjnych. W przypadkach,

w których jest konieczne wykluczenie sił przeciwnika z dostępu do systemu w obszarach, w których nie przewiduje się wykorzystania systemu przez własne siły (np. rejony zapasowe i tyłowe) planuje się rozwinięcie systemów zakłóceń, które będą współpracować z pasmem częstotliwości systemu GPS.

Jakkolwiek stosowane techniki zakłóceń mogą oddziaływać zarówno na własne siły jak i przeciwnika i mogą zapewnić ochronę odbiorników systemu GPS dla własnych sił w celu przeprowadzenia określonych operacji wojskowych.

Firma ERI przeprowadza zaawansowane testy urządzeń zakresu milimetrowego stosując generatory sygnałów i urządzenia kontrolne. Posiada również laboratorium komputerowe, zaawansowany prototyp urządzenia miniaturowego oraz znaczne doświadczenie w tej dziedzinie.

Przy testowaniu czujników i środków walki elektronicznej (WE) firma wykorzystuje urządzenia symulacji komputerowej i elektroniczne mierniki. Modele urządzeń WE (zbudowane przez firmę) są wykorzystywane do ochrony bombowców SP USA, helikopterów wojskowych, jak również w pojazdach naziemnych do ochrony przed kolizją. ERI jest zaangażowana w budowę różnego rodzaju elektronicznych systemów WE. Urządzenia posiadają multispektralny zakres, pracują w temperaturze 77⁰ Kelwina i są wykorzystywane w samolotach taktycznych i strategicznych przez połączenie kablem światłowodowym.

Ważną decyzją rozwojową dla firmy jest zamówienie rządu USA na 800-1000 urządzeń ISU dla systemu GPS, jeszcze w trakcie załatwiania formalności patentowych. Firma w produkcji urządzeń opiera się na własnych badaniach i stosuje swoją technologię. Kontrakt powstał po pomyślnym teście urządzenia ISU, przeprowadzonym przez SZ USA. ERI aktualnie realizuje kontrakt na sprzęt dla CECOM (Dowództwo Elektronicznych Systemów Łączności) w Forth Monmouth (New Jersey). Produkcja firmy integruje swoje wysiłki w zakresie optyki elektronicznej, radiolokacji i podczerwieni. Kontrakt dotyczy urządzeń WE

dla różnego typu helikopterów takich jak: MH-47, AM-60 i samolotów specjalnego przeznaczenia.

Lokalizacja i identyfikacja samolotów określana jest przez triangulację sygnałów ostrzegawczych, które są porównywane z sygnałami w pamięci identyfikatora. System przekazywania danych będzie zintegrowany z systemem wykrywania i przeciwdziałania środkom na podczerwień (ATI RCM) i innymi systemami WE. ERI stosuje technologię komputerową dla sygnałów wczesnego ostrzegania, które określają świadomość sytuacyjną pilota. ERI miała efekty w tym zakresie już dużo wcześniej. Dla Izraela prowadziła ekspertyzę: stacji radiolokacyjnej w systemie wczesnego wykrywania, zakłócania radiolokacyjnych pocisków kierowanych, przeciwwzakłócenia amerykańskich systemów radiolokacyjnych. Ponadto ERI realizuje prace nad systemem przeciwwzakłóceniovym dla Centrum SP i morskich w Warminster (Pensylwania). Przemysł telekomunikacyjny jest areną gdzie stosuje się techniki cyfrowe i systemy oparte o częstotliwości radiowe.

Według Hiorth, GPS jest systemem telekomunikacyjnym, wykorzystującym fale elektromagnetyczne i technologie przetwarzania danych.

Odbiorniki radiowe systemu. GPS nie były ulepszone. Po wielu testach firma stwierdziła, że odbiorniki te podatne są na zakłócenia radiowe.

Firma telefonów komórkowych skontaktowała się z firmą ERI w sprawie dotyczącej przypadkowych zakłóceń stacji telewizyjnych, w paśmie sygnałów radiowych systemu GPS. Okazuje się, że telefon komórkowy wykorzystuje sygnały synchronizacyjne niezbędne do pracy w multipleksie. Fala nośna telefonu komórkowego wykorzystuje sygnał radiowy dla swojej synchronizacji. Sygnały telewizyjne nie są wrażliwe na oddziaływanie sygnałów GPS. Jak się okazuje telefon komórkowy może zakłócić sygnał GPS, a nie odwrotnie.

Oslabienie sygnału odbiornika GPS tyczy się także tego samego problemu przy wykorzystaniu systemu dla celów wojskowych. Sygnały mogą zostać poważnie zakłócone przez listki boczne, harmoniczne, a nawet częstotliwość radiową. Problem osłabienia sygnału leży w amplitudzie odbiornika. Na wolnym rynku można bardzo łatwo kupić części elektroniczne za 30 dolarów i zbudować nadajnik zakłóceń, który skutecznie zakłóca sygnały radiowe odbiorników systemu GPS w promieniu 10 km. Ze względu na szeroki zakres wykorzystywania systemu GPS i jego wrażliwość na zakłócenia, problem czułości odbiornika staje się coraz bardziej zrozumiały. Problemem jest częstotliwość radiowa, czułość odbiornika i jego podatność na zakłócenia.

Firma ERI bada technologię synchronizacji fazowej sygnałów. Polega ona na stosowaniu sygnałów radiowych przesuniętych w fazie o 180° , o tej samej amplitudzie i takich samych charakterystykach. Te sygnały są miksowane z sygnałem oscylatora (heterodyny) odbiornika systemu GPS, w celu wyeliminowania źródła zakłóceń. To daje gwarancję, że sygnał GPS nie będzie zakłócony. Aspektem tej technologii jest sposób rozpoznawania sygnału. Sygnał radiowy w systemie GPS posiada znaną amplitudę. Ustalone wartości sygnału to: wzmocnienie nie większe niż 130dB, moc mniejsza niż 1 miliwat, sygnał jak najmniejszej mocy, tak aby jeden z dyskryminatorów mógł ustalić poziom wykrycia sygnału. Hiorth domaga się aby firma ERI mogła zintegrować wysiłki nad techniką filtrowania kompleksowego i wykorzystać ją w urządzeniu ISU. Filtrowanie kompleksowe może być wykorzystywane przeciwko zakłóceniom wąskopasmowym. Jakkolwiek dotyczy ono sporego zakresu spektrum, włączenie z zakresem częstotliwości nadajnika zakłóceń jak i odbiornika systemu GPS. Kluczem w tym nie jest fizyczne eliminowanie nadajnika zakłóceń ale ulepszenie możliwości selekcji sygnału odbiornika. Firma dysponuje techniką eliminacji zakłóceń wieloczęstotliwościowych, która jest skuteczna przeciwko

wielofunkcyjnym nadajnikom zakłóceń. Technika ta polega na wysokiej czułości odbiornika i ułamkowym czasie reakcji na odbiór sygnału, co umożliwia na odbiór danych. Dość poważne firmy dostarczają do ERI odbiorniki radiowe pracujące w systemie GPS w celu określenia ich możliwości odbiorczych w czasie zakłócania pasmowego. Zakłócenia pasmowe mogą oddziaływać na kompleksową pracę odbiornika, osłabiając jego odbiór, a tym samym dokładność systemu. Firma ERI posiada udokumentowane wysiłki badań, że sprzęt w którym zastosowano technikę kompleksowego filtrowania nie jest podatny na zakłócenie wielopasmowe. Bezkonkurencyjny sprzęt firmy ERI nie wymaga stosowania wzorcowych sygnałów synchronizowanych częstotliwościowo lub amplitudowo.

Ze względu na szerokie wykorzystanie systemów, które zabezpieczają precyzję lądowania różnego rodzaju samolotów, należy zapewnić lepsze warunki odbioru dla urządzeń radiowych, gwarancją tego jest stosowanie nowych urządzeń produkowanych przez firmę ERI. Należy sądzić, że System GPS będzie ulepszany, aby wyjść na przeciw wymaganiom z tym związanych. Nowoczesne Centrum Transportu (Volpe) udokumentowało, że system GPS jest wysoce podatny na niepożądane zakłócenia radiowe pochodzące z różnych źródeł. Są to: harmoniczne, listki boczne, efekty modulacji wzajemnej a przede wszystkim te, których nie udało się zbadać przy pomocy tradycyjnych metod kontroli częstotliwości, prowadzonych przez Federalne Biuro Lotnictwa (FAA).

Z powodu tego, a także częstych przerywanych podejść do lądowania samolotów, istotnym jest uzupełnienie systemu GPS w urządzenia inercyjne (bezwładnościowe), które zagwarantują dostateczną dokładność lądowania dla samolotu, nawet jeśli odbiór danych w systemie GPS zostanie przerwany. Urządzenie przeciwzakłócenkowe ISU (na pokładzie samolotu) może pomóc przezwyciężyć zanik odbioru w systemie GPS i dane zostaną przekazane pomimo

sporadycznych zakłóceń, co pozwoli na zminimalizowanie kosztów nakładczych w celu zwiększenia precyzji systemu nawigacyjnego.

5.6. Wnioski:

1. System GPS NAVSTAR dla SZ RP mógłby być wykorzystywany do:

- prowadzenia połączonych operacji rodzajów sił zbrojnych bez względu na panujące warunki atmosferyczne – w każdych warunkach meteorologicznych;
- wykonywania lotów na wszystkich wysokościach (w tym szczególnie na małych);
- ustawiania lub unieszkodliwiania min;
- dokonywania pomiarów na potrzeby kartograficzno – geodezyjno – nawigacyjne;
- zarządzania eksploatacją systemów rozpoznania i WE oraz węzłów telekomunikacyjnych zwłaszcza typu polowego. Przyjęcie czasu UTC jako systemowego GPS, czyni go przydatnym w formie wzorca częstotliwości urządzeń elektronicznych, pracujących w systemach narodowych, jak i międzynarodowych;
- wyznaczania pozycji różnego rodzaju obiektów powietrznych, nawodnych i naziemnych w tym mobilnych stacji radiolokacyjnych oraz artylerii;
- testowania pocisków rakietowych i statków powietrznych;
- wykorzystywania stacji referencyjnych do testowania lub kalibracji pokładowych odbiorników;
- ostrzegania w razie uszkodzenia satelity;
- zabezpieczania się przed utratą dokładności w czasie degradacji systemu.

2. Aktualnie w systemie wykorzystuje się większość odbiorników naziemnych starszej generacji, które są podatne na zakłócenia. Odbiorniki te można zakłócić wykorzystując specjalne nadajniki zakłócające (dostępne na rynku)⁸¹, co może znacznie pogorszyć precyzję lokalizacji systemu, a tym samym mieć wpływ na wykonawstwo zadań bojowych.
3. Nadajniki te można byłoby niszczyć pociskami samonaprowadzającymi się na źródła promieniowania mikrofalowego, ale ich produkcja jest zbyt kosztowna. Sytuacja może stać się zagrożeniem dla użytkowników systemu GPS będących w zasięgu nadajników zakłócających.
4. W celu ochrony systemu GPS przed zakłóceniami można wyposażyć go również w urządzenia ISU⁸², które zapewniają ochronę własnych odbiorników, a jednocześnie mogą zakłócać odbiorniki przeciwnika.

⁸¹ Key Position, Navigation Signal Demands Jamming Suppression. W: „Signal”, August 1996.

⁸² ISU (Interference Suppression Unit) – urządzenie eliminujące zakłócenia.

ZAKOŃCZENIE

Przyjęte do rozwiązania problemy badawcze oraz uzyskane wyniki badań doprowadziły do osiągnięcia celu głównego, to jest *przedstawienia możliwości racjonalnego wykorzystania jednolitego systemu nawigacyjnego GPS w Wojskach Lądowych RP w aspekcie zapewnienia interoperacyjności z siłami zbrojnymi innych państw w ramach NATO lub misji pokojowych ONZ*. W procedurze poznawczej wykorzystywane były metody badań dostosowane do poznawania zjawisk złożonych. Podejście systemowe pozwoliło na uzyskanie nowych efektów poznawczych, dotyczących:

1. Struktury i podstawowych danych operacyjno-technicznych systemu GPS oraz zastosowanych technologii do jego uruchomienia,
2. Istoty funkcjonowania systemu różnicowego DGPS oraz możliwości zwiększenia jego dokładności,
3. Parametrów odbiornika GPS mających wpływ na podwyższenie oraz obniżenie dokładności jego pomiarów,
4. Racjonalnych możliwości wykorzystania systemu GPS NAVSTAR w wojskach lądowych RP,
5. Uodpornienia systemu GPS na zakłócenia radioelektroniczne.

Przeprowadzone badania, potwierdzają ważność i aktualność wykorzystania systemu nawigacji satelitarnej na współczesnym polu walki, jak również w sferze cywilnej. Dziś, kiedy zarówno w życiu cywilnym, jak i wojskowym na szeroką skalę wykorzystywane są systemy informacyjno — sterujące, problematyka ta nabrała szczególnego znaczenia i wyrazistości.

Dzięki systemowi GPS NAVSTAR możliwa jest między innymi precyzyjna lokalizacja własnych lub sojusznicznych jednostek wojskowych wraz

z wypracowaniem i rozpowszechnianiem określonych decyzji, a realizowanie dowodzenia i kontroli w układzie C⁴I (*ang.* Command, Control, Communications, Computers and Intelligence) może odbywać się w czasie rzeczywistym i jest osadzone w realiach współczesnej doktryny wojny powietrzno-lądowej - ALO⁸³.

Uzyskiwana w tym zakresie przewaga nad potencjalnym przeciwnikiem staje się nie tylko gwarantem, ale wręcz warunkiem bezpiecznej egzystencji i to nie tylko w odniesieniu do państwa ale całego układu czy też koalicji.

Zakres badań i zastosowane metody badawcze pozwoliły na osiągnięcie założonego celu badań, realizację zadań badawczych o charakterze poznawczym i końcową weryfikację hipotez roboczych.

Wnioski zawarte w poszczególnych rozdziałach są odpowiedzią na postawione problemy badawcze, a rozdział czwarty, w którym przedstawiono możliwości racjonalnego wykorzystania systemu GPS NAVSTAR przez nasze wojska lądowe w działaniach koalicyjnych w ramach NATO lub ONZ uznano za priorytetowy.

⁸³ ALO – *ang.* AIR Land Operation

LITERATURA:

- 100 1. Bordon W., Bodziński R., Fellner A., Ligeża S.: „*System GPS NAVSTAR*”. Poznań 1997.
2. Bramski S.: *Biuletyn WOSL* 2(62)93.
3. Campen A. D.: „*The first Information War*”, Virginia 1992.
4. Cydejko J.: „*Odbiorniki systemu satelitarnego GPS NAVSTAR*”. Praca magisterska Instytutu Nawigacji Morskiej, Wydział Nawigacyjny WSM Gdynia 1991.
5. Dixon R. C.: *Global Positioning System*. W: „*Encyclopedia of Earth System Science*”, V. 2.
- 100 6. Fiedczyn S. S.: „*Nawigacja lotnicza*”. WKŁ, 1974.
7. Frączyk P., Modliński G.: „*Opis systemu GPS*”. NAVI, 1996.
- 100 8. Grzelka A., Makowski P.: „*Systemy nawigacyjne*”. AON, Warszawa 1995.
9. Kacprzak M., Kłoczko A.: „*Garmin GPS 95 XL Personal Navigator*”. Rzeszów 1995.
10. Lamparski J.: „*System NAVSTAR GPS*”. Olsztyn 1994. AONS
11. Lamparski J., Oszczak S.: „*Stan obecny i perspektywy rozwoju systemu nawigacyjnego GPS NAVSTAR*”. Materiały II Konferencji Naukowej, Dęblin 1993.
12. Langley R. B.: „*The GPS Receiver, An introduction*”. University of New Brunswick 1978.
13. Leick A.: „*GPS Satellite Surveying*”. John Wiley and Sons, New York/Chichester/Brisbane/Toronto.
- 100 14. Mietelski J.: „*Astronomia w geografii*”. Warszawa 1995. AON

15. Nakamoto F. S., Middelstead R. W., Wolfson C. R.: *Impact of time and frequency errors on processing satellites with MFSK modulation*, „ICC 81”, Conference, Denver 1981.
16. Sharpe R. T.: „*GPS Receivers Configuration*” . Marine Electronics, lipiec/sierpień 1990.
17. Spilker J. J: *GPS signal structure and performance characteristics*. W: „*Navigation*” 1978, V. 25 No 2.
18. Stansell T. A.: „*GPS Perspectives*”. Papers presented at International Navigation Congress. Sydney, Australia 1988.
19. Szymoński M.: „*Nawigacyjne wykorzystanie sztucznych satelitów Ziemi*”. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1989.
20. Toft H.: „*GPS Satellite Navigation – New Perspectives in Accurate Navigation*”. Shipmate, Dania 1987.
21. Urbański J.; Wisła S.: „*Zarys teorii błędów nawigacyjnych*”. Gdynia 1964.

