

Przeznaczenie, architektura, sygnały i serwisy satelitarnego systemu GPS



dr hab. inż. Paweł Zalewski
Akademia Morska w Szczecinie

Przeznaczenie i zastosowania GPS:

Pełna nazwa systemu to **NAVSTAR GPS** od słów: **NAV**igation **Sat**ellite **T**iming **A**nd **R**anging **G**lobal **P**ositioning **S**ystem (*nawigacyjny satelitarny czasowo-odległościowy globalny system pozycyjny*).

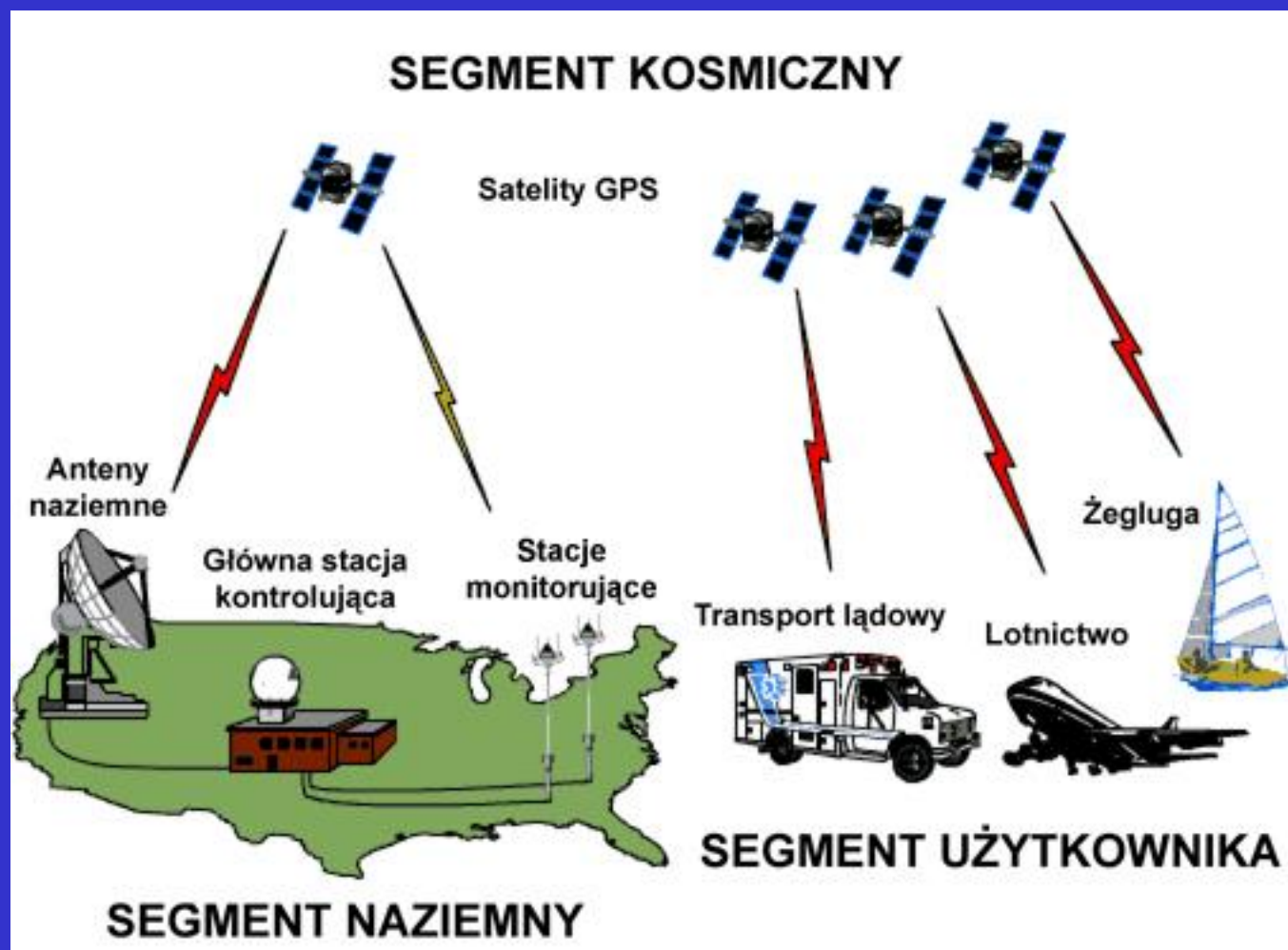


Przeznaczenie i zastosowania GPS:



Architektura systemu GPS:

Zgodnie z oryginalnym projektem amerykańskiego Departamentu Obrony, GPS składa się z trzech głównych komponentów: segmentu kontrolnego, segmentu kosmicznego, segmentu użytkownika.



Segment kontrolny:



Segment kontrolny:



GPS Operational Control Segment (OCS)



Segment kontrolny:

W Głównej Stacji Kontrolnej estymowane są parametry opisujące orbity satelitarne (efemerydy) i jakość pracy zegarów oraz oceniany jest stan sprawności satelitów (ang. **health status**) i ustalana ewentualna konieczność zmiany pozycji orbitalnej satelitów.

Te informacje są następnie poprzez trzy stacje łącza satelitarnego (ang. **uplink stations**), rozmieszczone przy stacjach monitorujących na Ascension Island, Diego Garcia i Kwajalein) transmitowane do satelitów i stamtąd w wiadomości nawigacyjnej do użytkowników.

Ze względu na ogólnoswiatowe rozmieszczenie stacji kontrolnych satelity GPS są przez nie śledzone w 99% czasu.

Segment kosmiczny:



Segment kosmiczny:

Segment kosmiczny GPS stanowi konstelacja satelitów rozmieszczona na prawie kołowych orbitach o nominalnej wysokości 20 183 km nad powierzchnią Ziemi i okresie obiegu około Ziemi równym 11h 58min.

Nominalnie 24 satelity (obecnie jest ich 30 – 6 zapasowych) rozmieszczono na 6 różnych płaszczyznach orbitalnych o inklinacji 55°.

Satelity GPS można zaklasyfikować do pięciu kategorii lub typów w zależności od czasu ich konstrukcji i budowy: satelity bloku I, II, IIA, IIR, IIF. Zakończony jest etap planowania bloku III.

Segment kosmiczny:

Pierwszy **satelita bloku I** został wystrzelony w lutym 1978 z bazy sił powietrznych Vandenberg w Kalifornii. Następnie do 1985 umieszczono na orbicie następnych 10 satelitów tego bloku. Wszystkie one są już aktualnie nieaktywne (**non-operational**). Planowany okres ich życia wynosił 4,5 roku. Zostały one rozmieszczone według pierwotnego projektu konstelacji (inklinacja 63°).

Podstawowa różnica pomiędzy tymi satelitami a satelitami późniejszych generacji polegała na braku zdolności degradacji transmitowanego sygnału, a tym samym niemożności znacznego zmniejszenia dokładności pozycji GPS dla cywilnych użytkowników.

Segment kosmiczny:

Drugą kategorię satelitów GPS stanowi aktualnie działający **blok II**, którego pierwszy satelita został wystrzelony w lutym 1989 r.

Satelity tego bloku mają możliwość degradacji sygnału, projektowany okres ich życia to 7,5 roku i położone są w inklinacji 55° .

Pierwotnie były one umieszczane na orbicie przez prom kosmiczny, ale po katastrofie Challengera w 1986 r. ich konstrukcja została wzmocniona i obecnie są wystrzeliwane przy pomocy rakiet Delta II. Proces ten opóźnił wdrażanie programu GPS.



Segment kosmiczny:



Block II GPS Satellite

- Weight: 930 kg (in orbit)
- Size: 5.1 m
- Travel at 4 km/sec
- Transmit L1 + L2 signals (1575.42 + 1227.60 MHz)
- Receive at 1783.74 MHz
- 2 cesium + 2 rubidium clocks
- Design life of 7.5 years
- Launched by Delta rocket

Satellite bloku IIA są nieznaczną modyfikacją projektu II. Producentem satelitów bloku I i II była firma **Rockwell International**.



Segment kosmiczny:

Satelity bloku IIR (R od ang. **replenishment**) są zaprojektowane na dłuższy okres działania (10 lat) i mają możliwość wzajemnej łączności satelita-satelita.

Na orbicie zaczęły być rozmieszczane od 1997 r. Producentem jest firma **Lockheed-Martin Marietta**.



Segment kosmiczny:



Up to twelve IIR satellites

L1 enhancements

- Possible increases in P(Y) and C/A-code power over current specifications (-163 and -160 dBW)
- New Earth coverage military code (M_E code)



L2 enhancements

- Possible increase in P(Y)-code power over current specifications (-166 dBW)
- Addition of C/A-code
- New Earth coverage military code (M_E code)



Segment kosmiczny:

Satelity bloku IIF rozmieszczane na orbicie od 2009 r. mają możliwość transmisji na trzech częstotliwościach nawigacyjnych L1, L2 i L5. Producentem jest firma **Boeing – North American**, która przejęła dział satelitarny **Rockwell International**.



Segment kosmiczny:



Twelve IIF satellites



L1 enhancements

- New M_E code added
- Complete Picture Undefined (open to Boeing design decisions)

L5 signal

- New robust Civilian Navigation Signal in ARNS band
- Centered at 1176.45 MHz

L2 enhancements

- C/A code
- New M_E code added
- Complete Picture Undefined (open to Boeing design decisions)

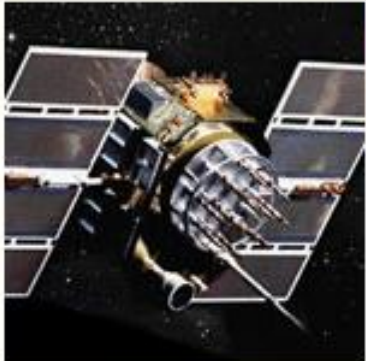
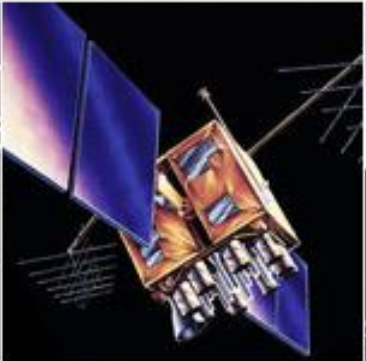
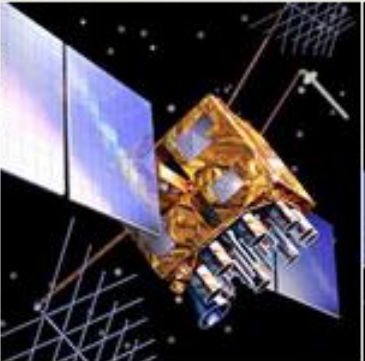
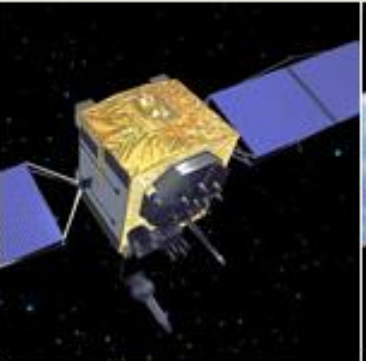
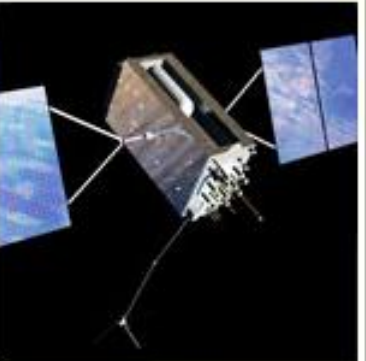


Segment kosmiczny:

Satelity bloku III rozmieszczane na orbicie od 2015 r. mają możliwość transmisji analogicznej jak IIF oraz większą moc nadawczą w celach antyzakłóceńowych. Producentem jest firma **Lockheed Martin**.

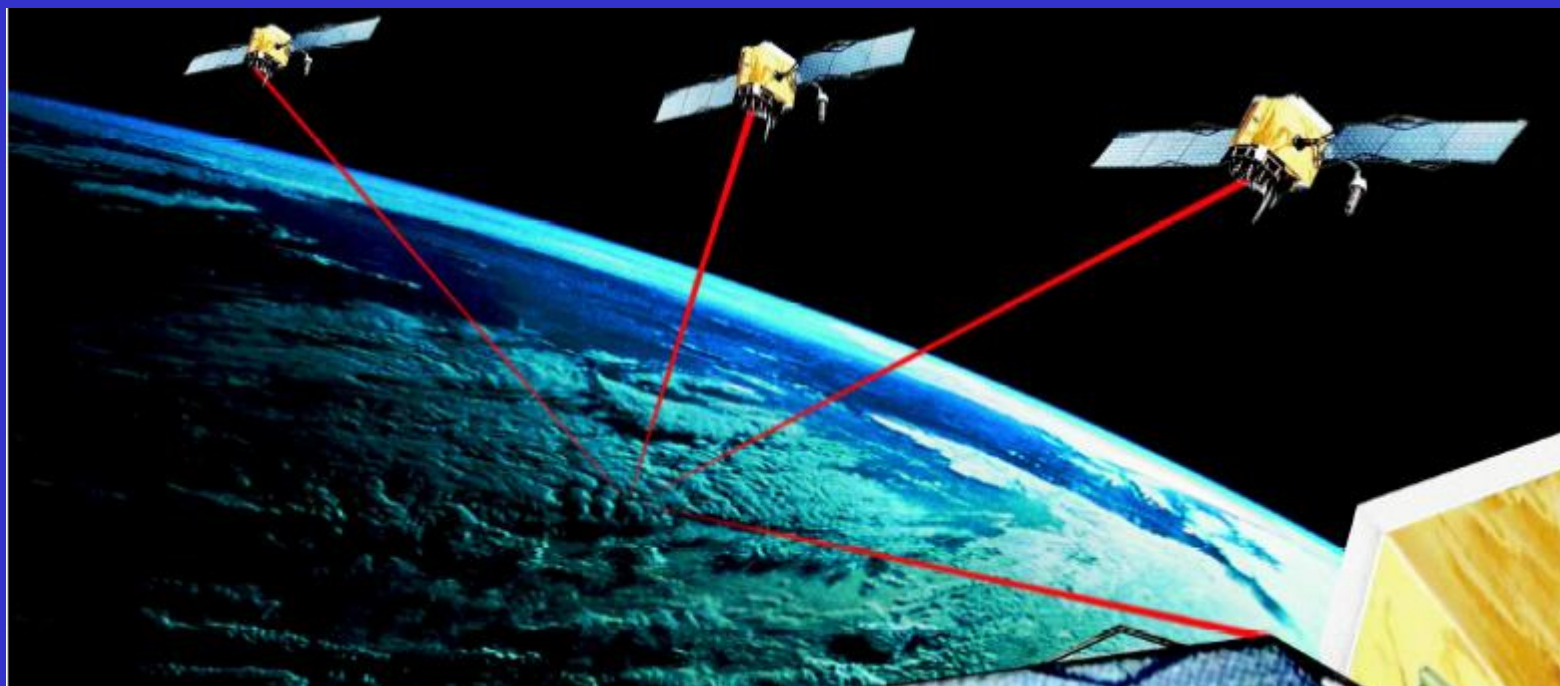


Segment kosmiczny:

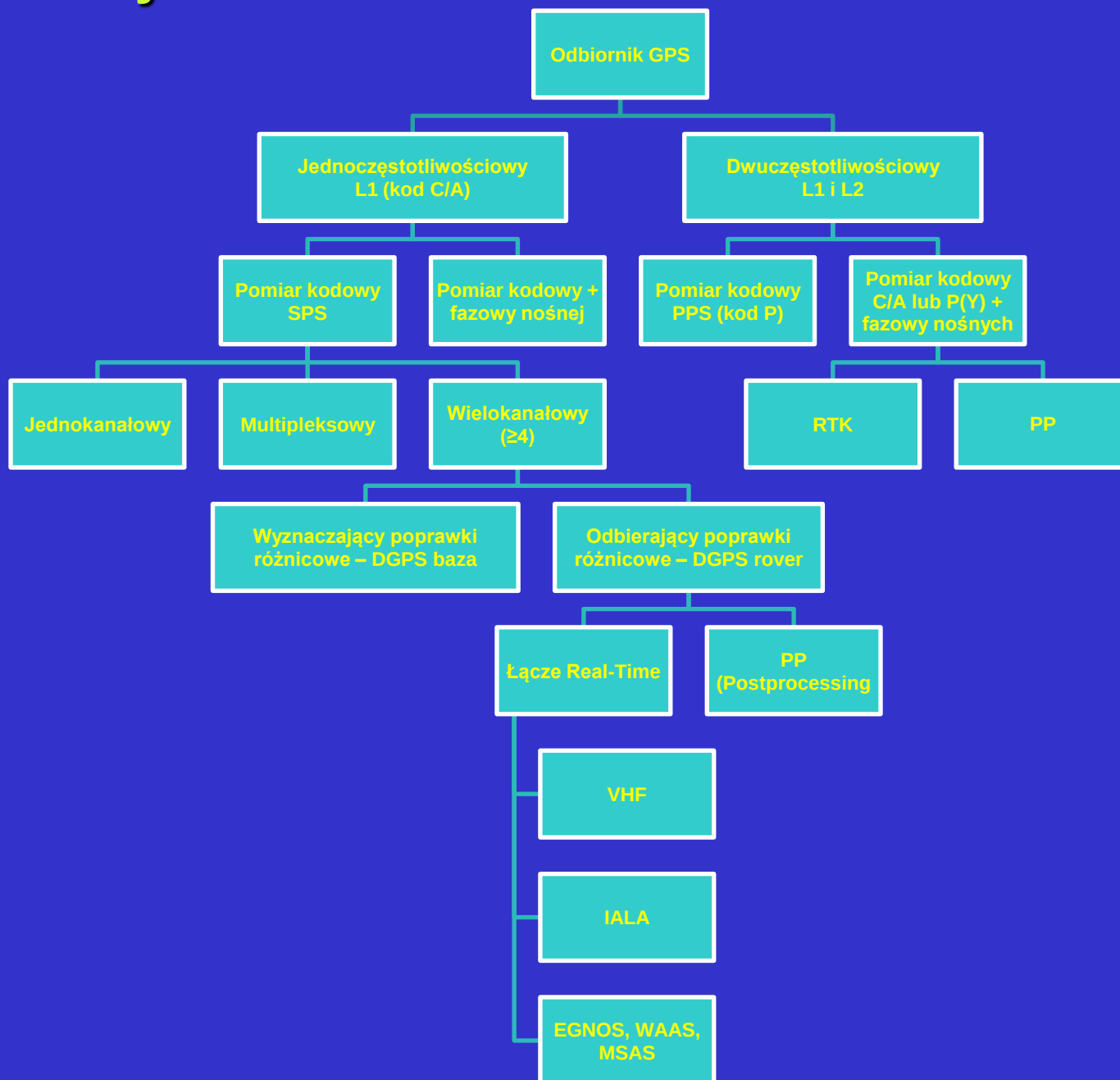
LEGACY SATELLITES		MODERNIZED SATELLITES		
				
BLOCK IIA	BLOCK IIR	BLOCK IIR(M)	BLOCK IIF	GPS III
3 operational	12 operational	7 operational	8 operational	Now in production

Segment kosmiczny:

Rozmieszczenie satelitów GPS na orbicie gwarantuje, że minimum 4 satelity są widoczne powyżej 15° nad widnokręgiem z dowolnego punktu powierzchni Ziemi w dowolnej chwili. Cztery widoczne satelity stanowią minimum dla większości zastosowań GPS. Przy aktualnej konstelacji zwykle mamy 5-7 satelitów widocznych nad widnokręgiem przez większość czasu.



Segment użytkownika:



Serwisy systemu GPS:

Są dwa rodzaje serwisów dostępnych dla użytkowników GPS - **SPS** i **PPS**.

Rząd Stanów Zjednoczonych definiuje te usługi (poziomy dostęp) następująco:

SPS (Standard Positioning Service) jest usługą umożliwiającą uzyskanie informacji o bieżącej pozycji i czasie dostarczaną na częstotliwości GPS **L1**. Częstotliwość GPS **L1**, transmitowana przez wszystkie satelity GPS, zawiera kod **C/A (coarse acquisition)** i wiadomość nawigacyjną (**navigation data message**).

PPS (Precise Positioning Service) jest usługą dostępną dla autoryzowanych użytkowników militarnych. Oferuje ona sygnał SPS plus kod **P(Y) (precise)** na obu częstotliwościach GPS: **L1** i **L2**.

Struktura sygnału w GPS:

Satelity GPS nadają sygnały na dwóch częstotliwościach pasma L. Powodem zastosowania dwóch różnych częstotliwości jest możliwość redukcji błędów spowodowanych refrakcją jonosferyczną oraz zwiększenie niezawodności sygnału

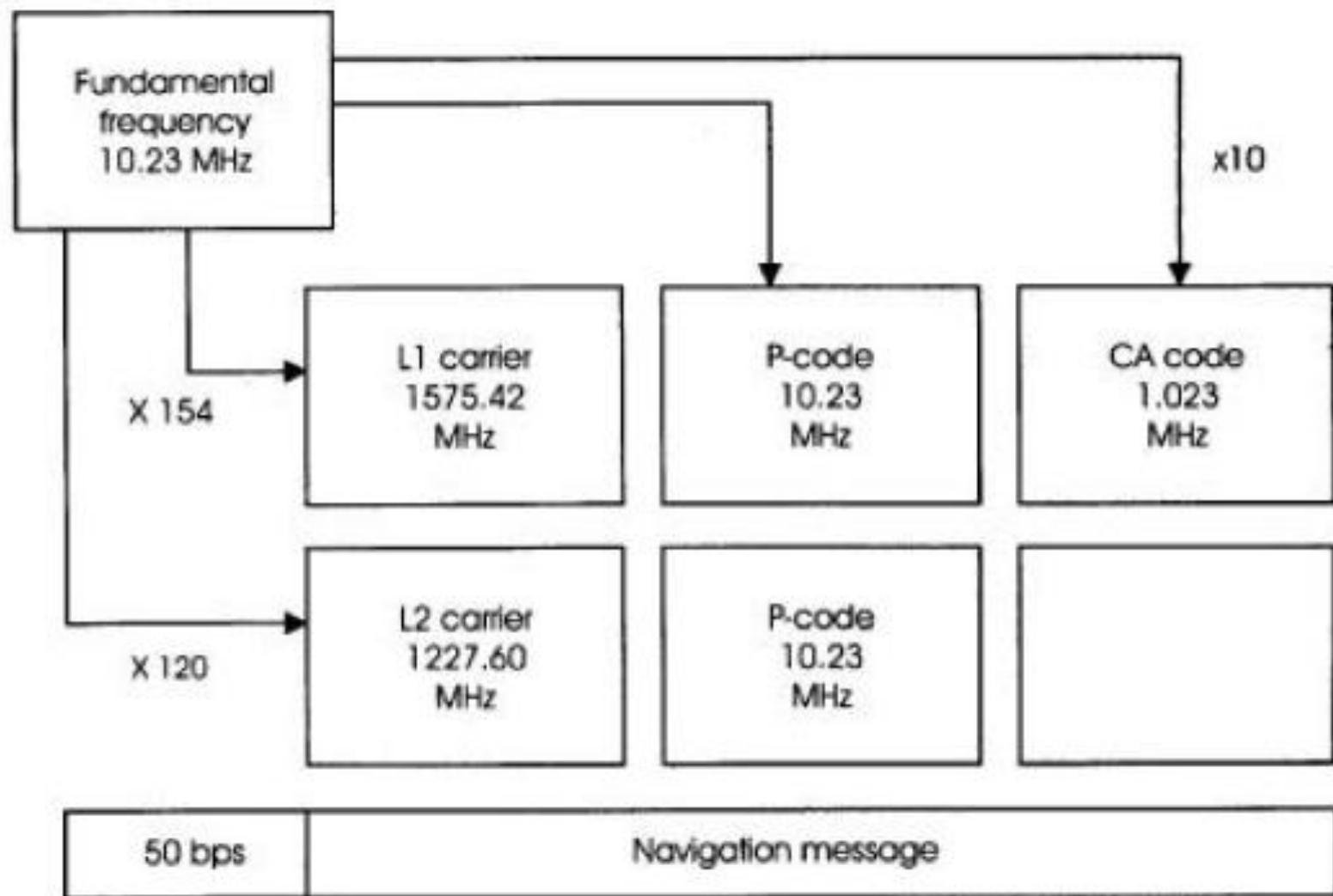
Częstotliwości pracy systemu GPS, zwane **nośnymi (carriers)** wywodzą się z podstawowej częstotliwości $f_0=10.23$ MHz i wynoszą odpowiednio L1: 1575.42 MHz oraz L2: 1227.60 MHz.

$$L1 = 154 \times f_0, \quad \lambda_{L1} = 19\text{cm}$$

$$L2 = 120 \times f_0, \quad \lambda_{L2} = 24\text{cm}$$

Ponieważ fale nośne są czystymi sinusoidami to nie mogą być bezpośrednio użyte do uzyskania pozycji i dlatego zmodulowano je dwoma kodami binarnymi (dwójkowymi: 0,1): **C/A (coarse acquisition)** i **P (precise)**.

Struktura sygnału w GPS:

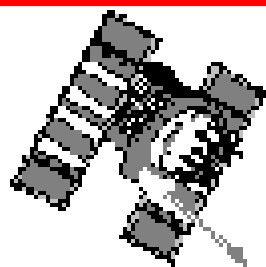


Struktura sygnału w GPS:

Kod C/A jest pseudoprzypadkowym (**pseudorandom – PRN**) kodem składającym się z 1023 bitów, **powtarzającym się co milisekundę**.

Termin pseudoprzypadkowy jest stosowany, gdyż kod jest właściwie losowym ciągiem bitów, ale generowanym według znanego rozkładu (tzw. generator pseudolosowy).

Ponieważ szybkość modulacji bitów w nośną wynosi 1,023Mb/s, to rozmiar jednego bita w przestrzeni odpowiada około 293m. Dla ustalonej ilości bitów kodu C/A daje to w przybliżeniu 300km długości – co taką odległość kod pomiędzy odbiornikiem, a satelitą ulega powtórzeniu.



C/A code repeats every millisecond (approx 300km)

Chip length is 300m



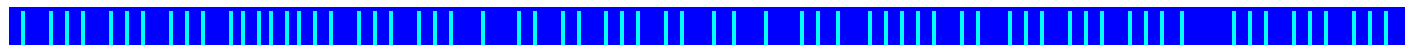
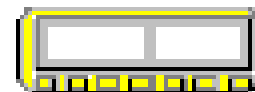
Struktura sygnału w GPS:

Kod P jest długim kodem binarnym powtarzającym się co 38 tygodni. W praktyce powtarzalność kodu skrócono do jednego tygodnia dzieląc jego tygodniowe sekwencje dla każdego z satelitów. Długość, którą taka sekwencja zajmuje w drodze od satelity do odbiornika jest równa tygodniowi przemnożonemu przez prędkość światła, przy czym długość jednego bita dla kodu P wynosi 29,3m (szybkość modulacji 10,23Mb/s).

Szybki dostęp do odpowiedniej części (sekwencji) kodu dla danego satelity możliwy jest przy pomocy 30 bitów tzw. **hand-over-word** otrzymywanych w satelitarnej wiadomości nawigacyjnej (**broadcast / navigation data message**).



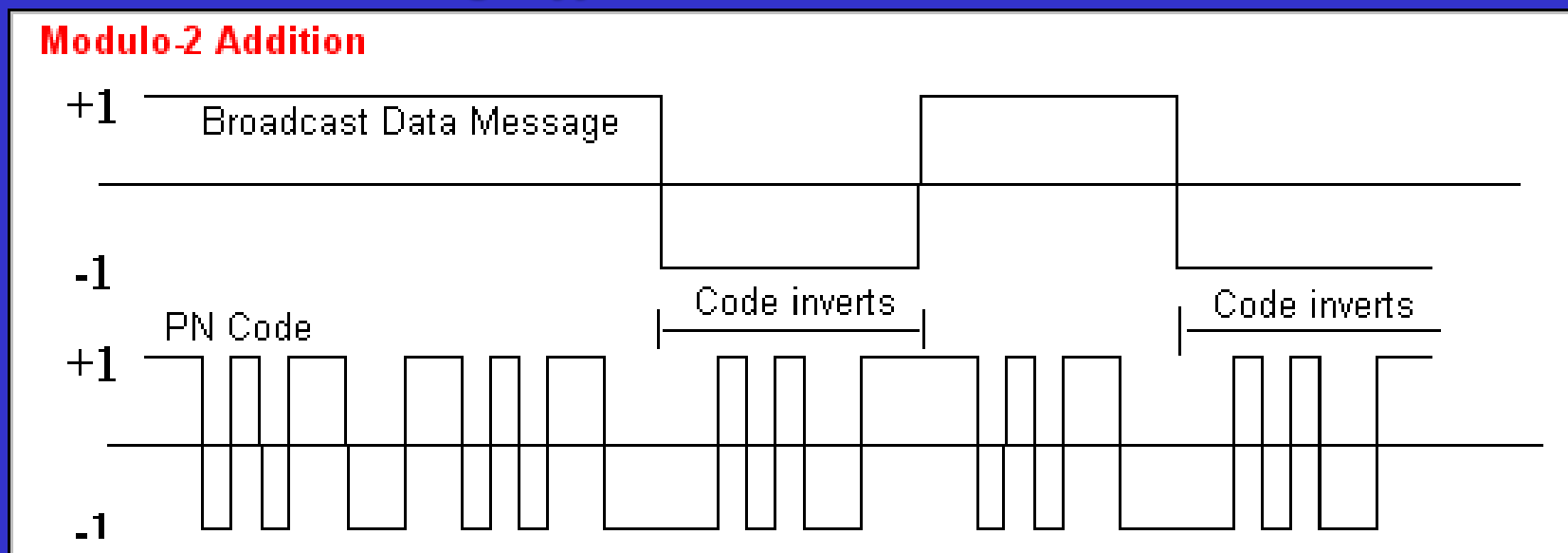
P code is unambiguous
Chip length is 30m



Struktura sygnału w GPS:

Zastosowane w kodach ciągi bitów to tzw. kody Golda. Mają one szczególnie dobre właściwości autokorelacji i niskiej korelacji z innymi kodami (<70%). W ten sposób odbiorniki GPS mogą rozróżnić sygnały pochodzące z różnych satelitów – **każdy satelita nadaje indywidualną sekwencję kodu o określonym numerze PRN.**

W celu nałożenia danych binarnych na fale nośne GPS kody transferowane są z systemu 0,1 na -1,1 i modulo-2 dodawana jest do nich wiadomość nawigacyjna.



Struktura sygnału w GPS:

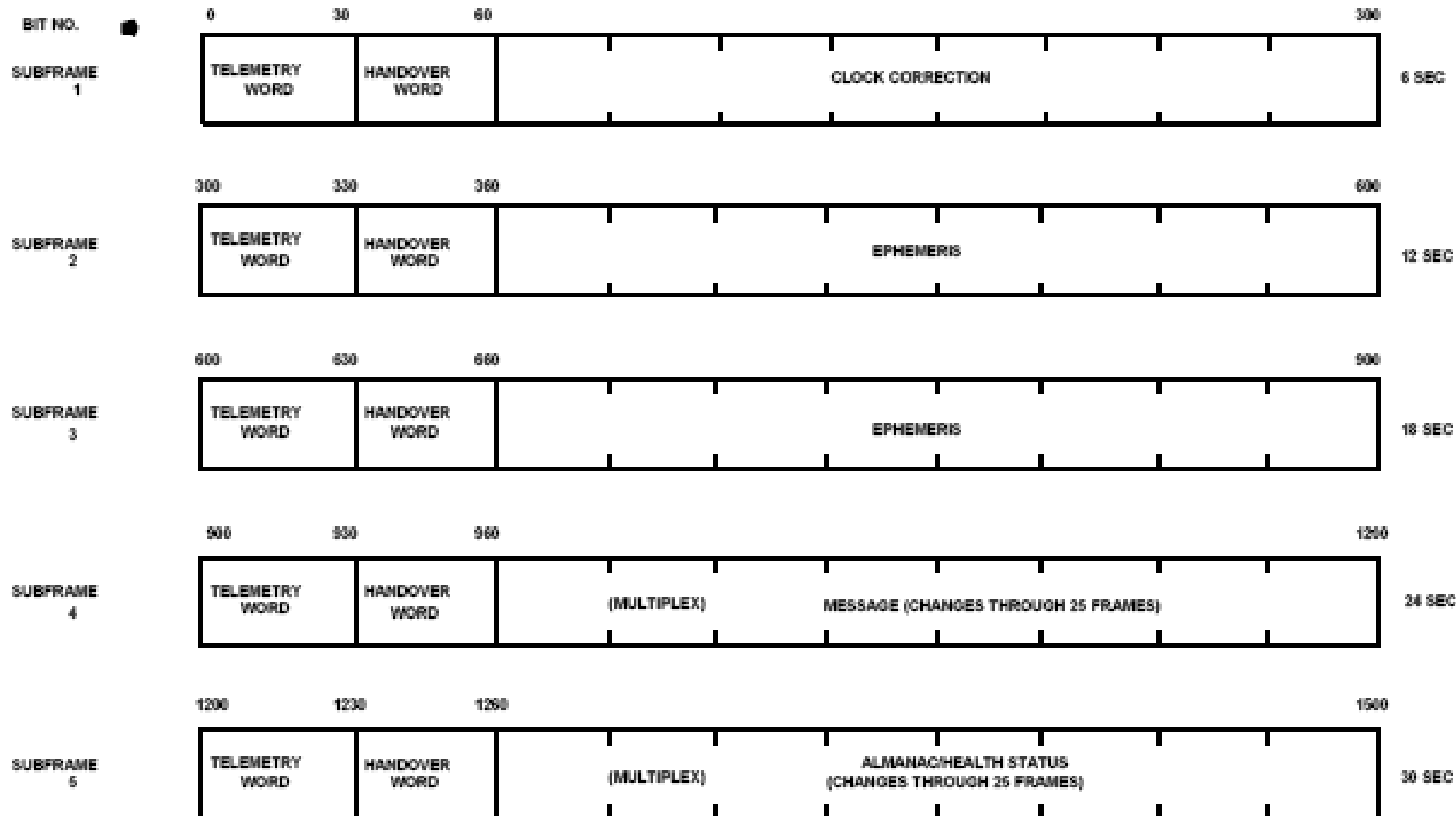
Wiadomość nawigacyjna GPS zawiera między innymi informacje o pozycjach orbitalnych satelitów (almanach), ich sprawności (health status) oraz hand-over-word.

Każdy satelita przesyła pełny zestaw danych opisujących własną orbitę i czas (w ephemeris information) oraz przybliżone informacje o orbitach pozostałych satelitów (w almanac information).

Dane modulowane są z prędkością 50 b/s, transmisja całej wiadomości trwa 12,5 minuty. Aby skrócić czas uzyskania pozycji dane efemerydalne i zegara powtarzane są co 30 sekund.

W wiadomości nawigacyjnej zamieszczane są także parametry opisujące opóźnienie jonosferyczne sygnału GPS.

Struktura sygnału w GPS:

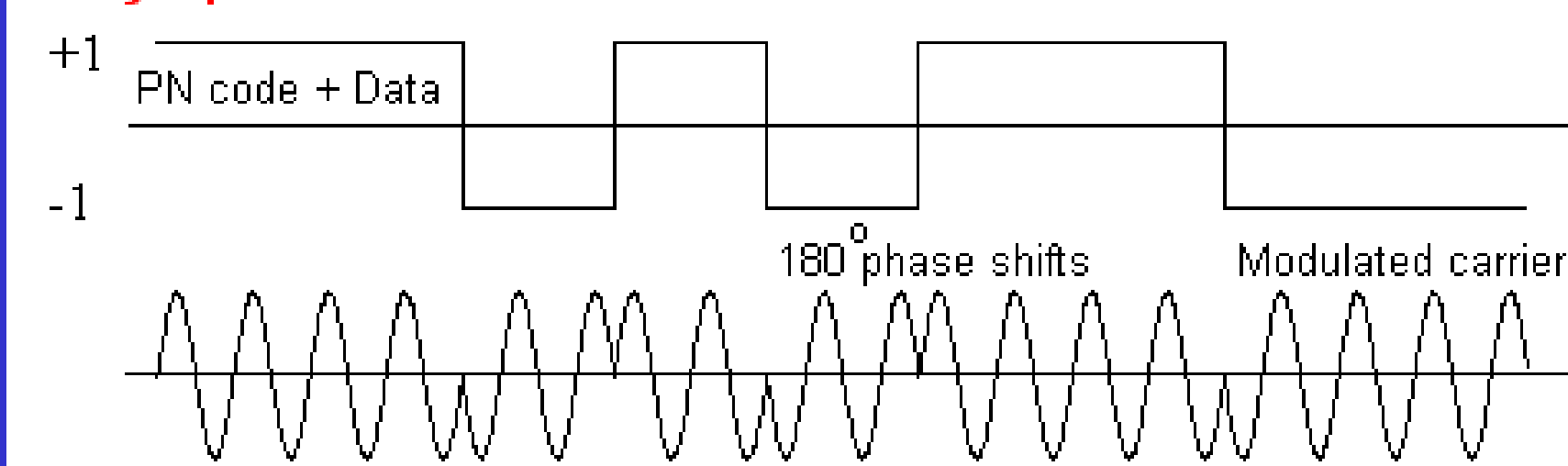


*12.5 MINUTES BEFORE THE ENTIRE MESSAGE REPEATS

Struktura sygnału w GPS:

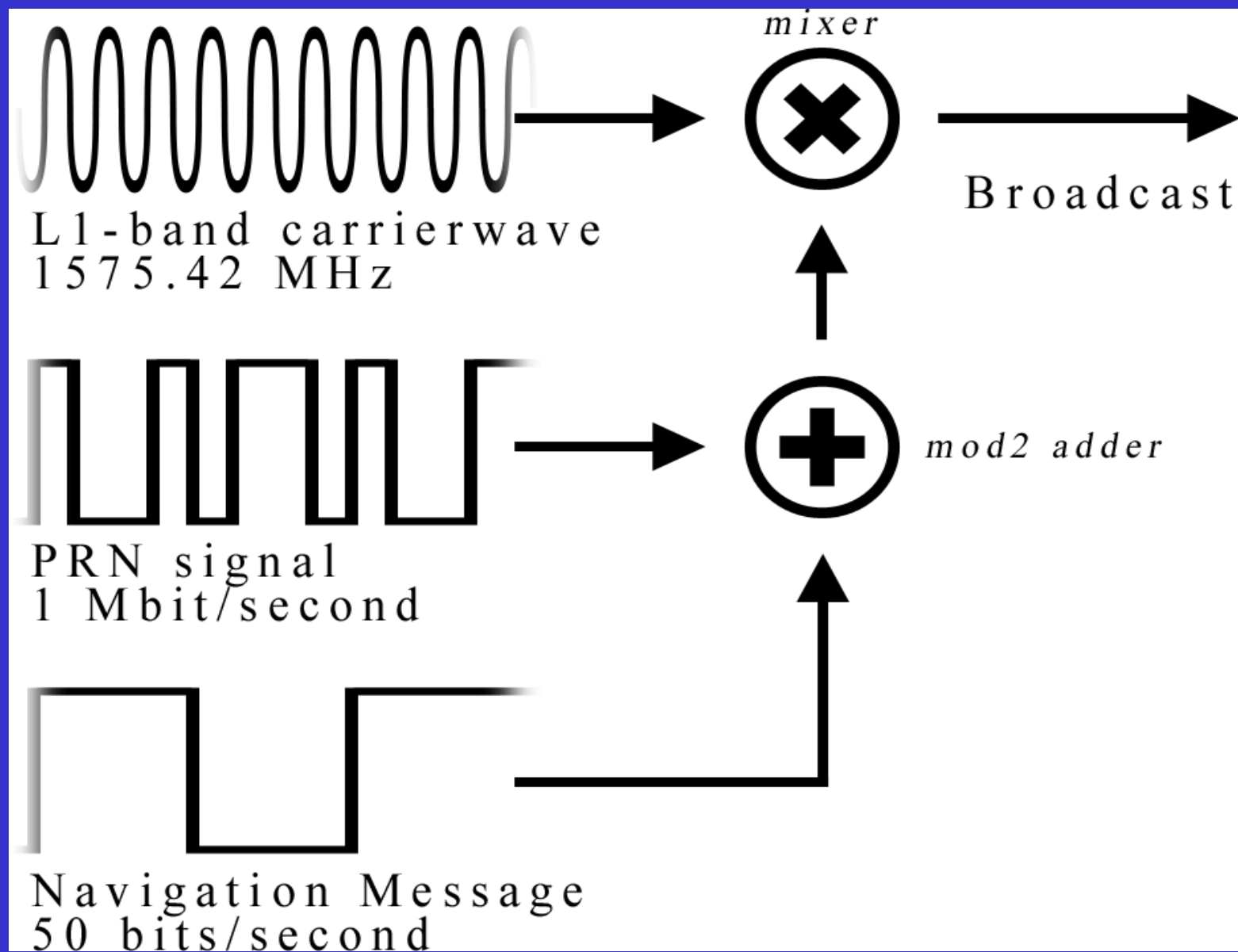
Modulacja **binary biphas** (zwana również **binary phase shift keying [BPSK]**) jest techniką stosowaną do modulacji kodów na fale nośne GPS.

Binary Biphas Modulation

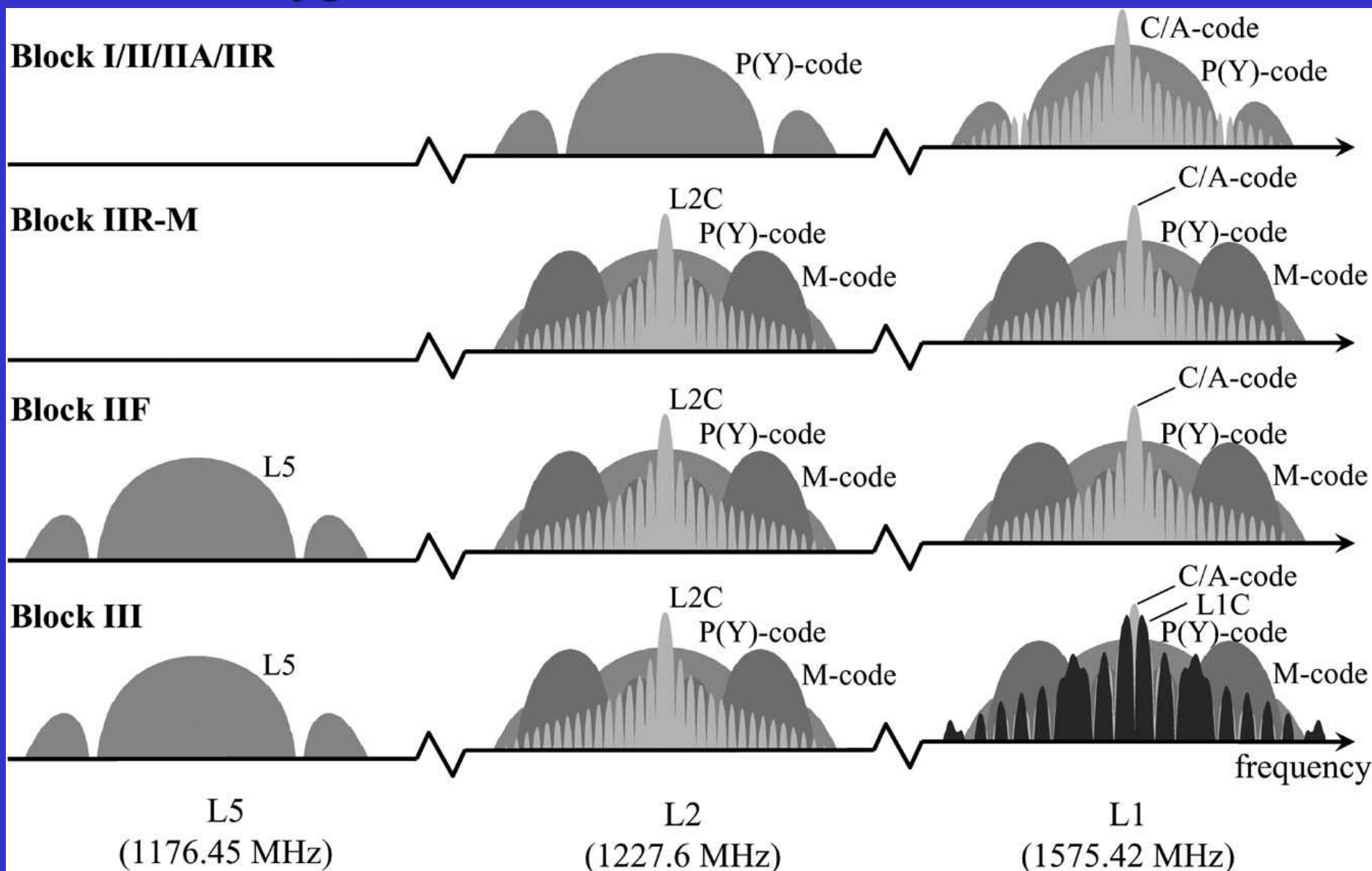


W wyniku BPSK wartości kodów (+1, -1) zostają bezpośrednio przemnożone przez fazę generowanej fali nośnej, co powoduje odwrócenie fazy nośnej o 180° wraz ze zmianą stanu kodu.

Struktura sygnału w GPS:

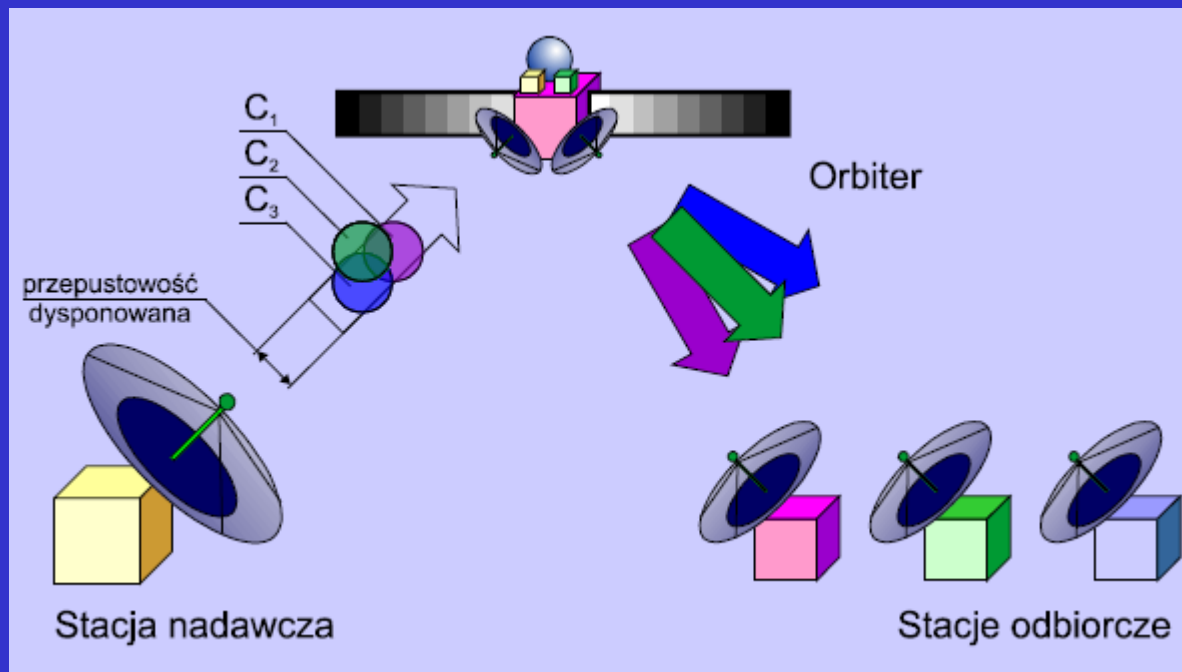


Struktura sygnału w GPS:



Ewolucja spektrum (widma) sygnałów GPS

Struktura sygnału w GPS:

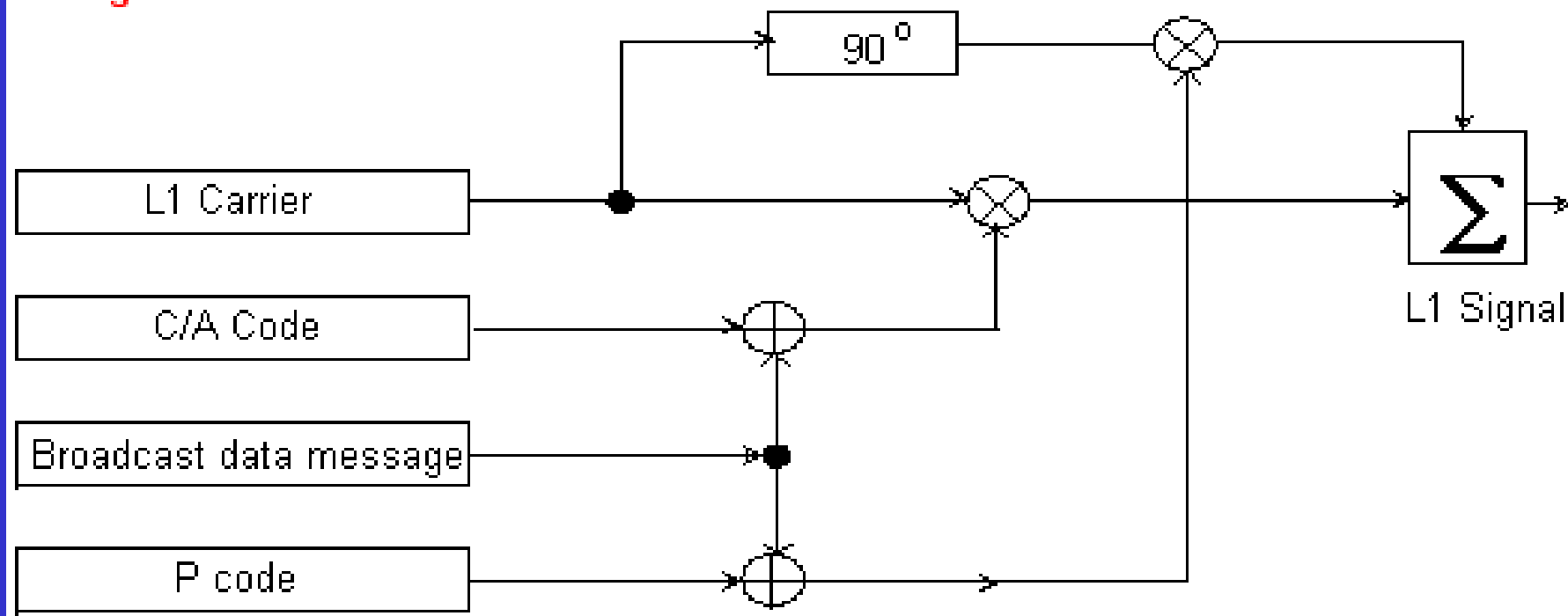


Podział kodowy (**Code-Division Multiple Access - CDMA**) - wykorzystuje rozproszenie energii związanej z każdą aktywną relacją transmisyjną zgodnie z przyjętym schematem kodowania. Wykorzystanie CDMA umożliwia uzyskanie dużej odporności przekazu na pasmowe zakłócenia generowane przez zjawiska naturalne, urządzenia techniczne oraz inne systemy radiowe przy wielodostępowej transmisji na wspólnym paśmie częstotliwości.

Struktura sygnału w GPS:

Sygnał L1 jest modulowany zarówno kodem C/A, P oraz M (a w bloku III także L1C), w taki sposób, że kody wzajemnie ze sobą nie interferują. Jest to możliwe poprzez modulację jednego kodu zgodnie z fazą nośnej i drugiego po przesunięciu w fazie np. o 90° .

L1 Signal Structure



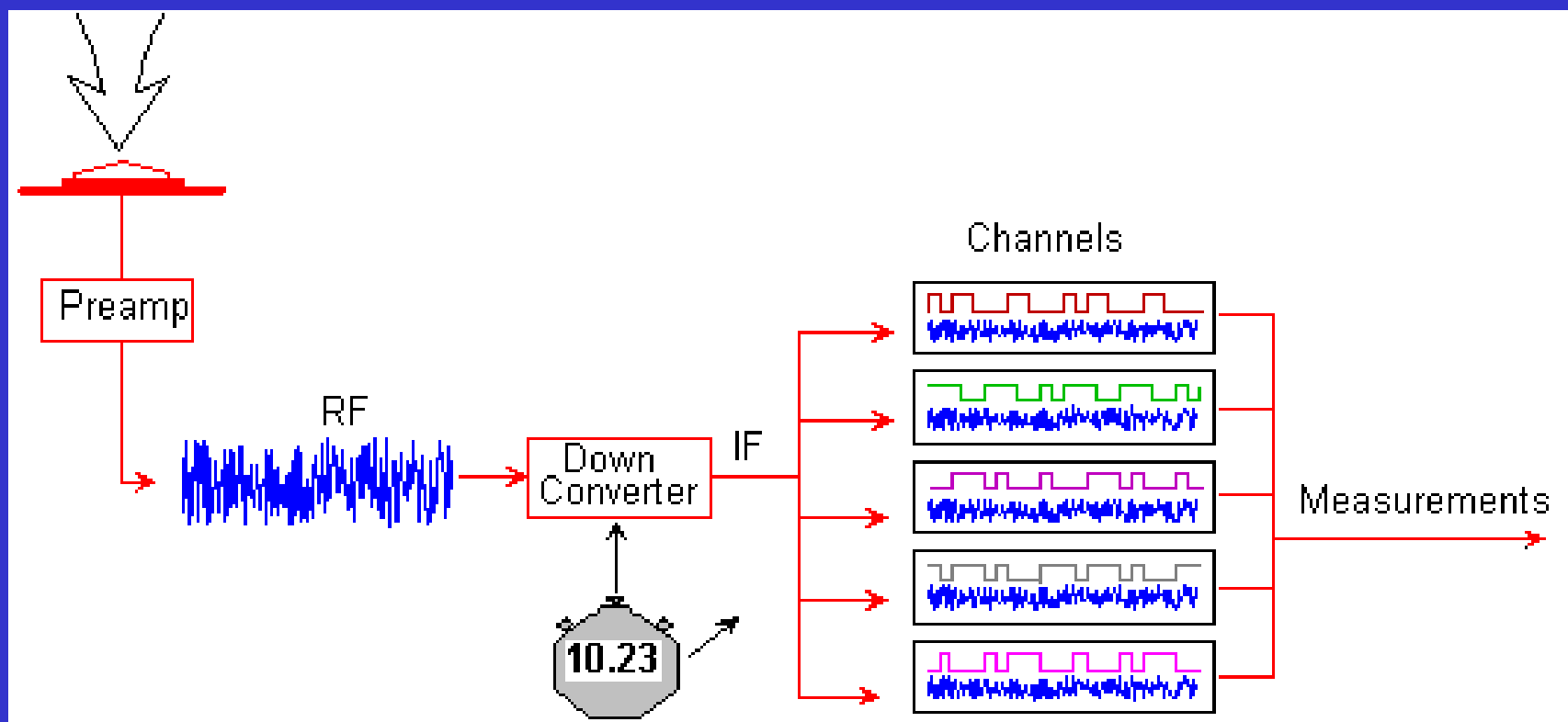
Struktura sygnału w GPS:

Na częstotliwości L2 modulowany jest kod P(Y), M i L2C. Kod P decyzją DoD może być dodatkowo zaszyfrowany kodem W – tzw. **anti-spoofing** (AS) – dając w rezultacie kod Y. Jest to dodatkowym utrudnieniem dla nieautoryzowanych użytkowników chcących skorzystać z kodu P i częstotliwości L2.

Na nowo instalowanych satelitach od 2007 roku na częstotliwości L2 zostały wprowadzone kody L2C i M (modulowane BOC - Binary Offset Carrier), a od 2009 do transmisji sygnału L5 wykorzystano dodatkową częstotliwość transmisji L5.

Zasada pracy odbiornika GPS:

Odbiornik GPS wykrywa i następnie konwertuje sygnały otrzymane z satelitów na pomiary parametrów linii pozycyjnych.



Zasada pracy odbiornika GPS:

Antena:

Antena jednoczęstotliwościowego odbiornika GPS jest anteną bezkierunkową o wzmacnieniu 3 dB z dodaną przeciwwagą (stalową tarczą w podstawie anteny) tak, aby 50% docierających sygnałów było ignorowanych (tych pochodzących z poniżej horyzontu lub podstawy anteny).



Antena jest połączona z odbiornikiem przy pomocy koncentrycznego kabla, którym płynie także zasilanie do antenowego **przedwzmacniacza**. Przedwzmacniacz zwiększa moc wykrytego sygnału i następnie przesyła go po kablu do odbiornika.

Zasada pracy odbiornika GPS:

Konwersja szumu na sygnał użyteczny:

W odbiorniku GPS sygnał najpierw trafia do **układu filtrującego**, który odrzuca wszystkie składowe spoza pasma L1 (przeważnie będzie to filtr o częstotliwości środkowej 1575.42 MHz i szerokości pasma 20 MHz) wyodrębniając sygnał radiowy (**RF**).

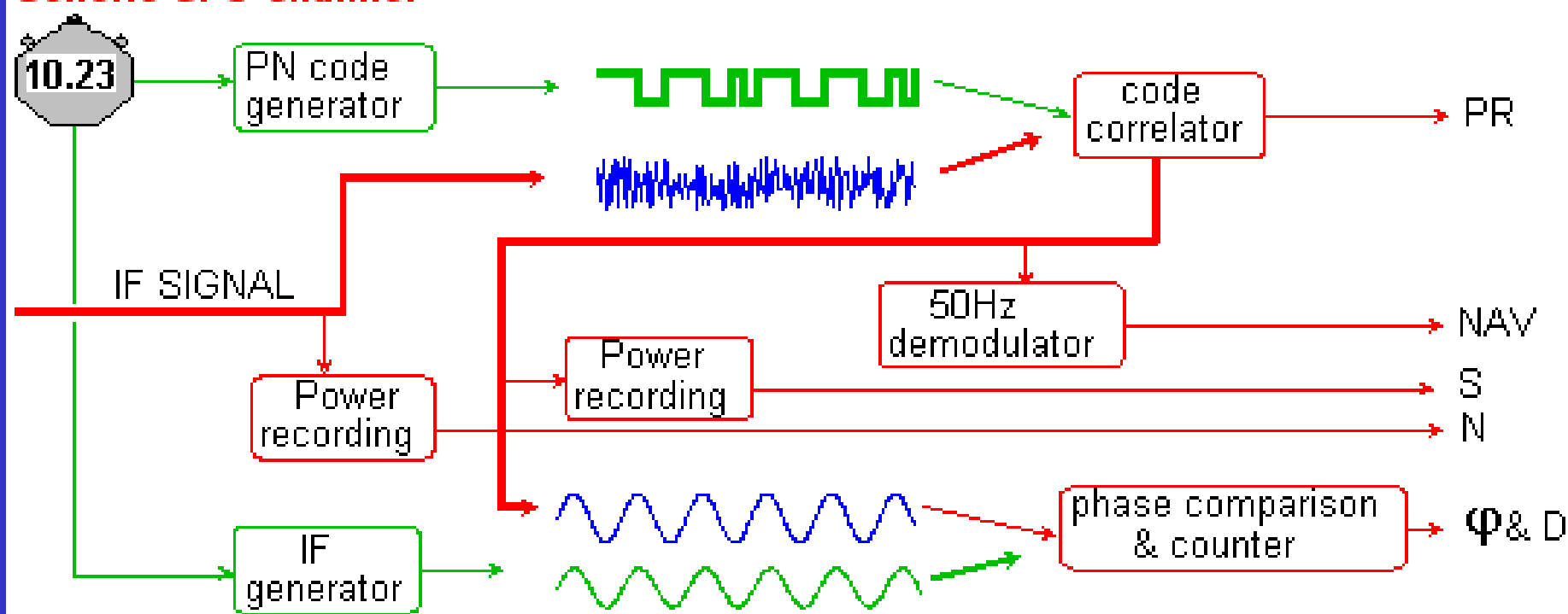
Sygnał ulega następnie zmieszaniu z sinusoidą generowaną przez oscylator lokalny dając w rezultacie częstotliwość pośrednią równą około 40 kHz (**układ oscylatora lokalnego i mieszacza**).

Sygnał na częstotliwości pośredniej (**IF**) po ponownym przefiltrowaniu jest następnie demodulowany na prostokątny sygnał cyfrowy (**układ korelatora kodu i demodulatora wiadomości nawigacyjnej**).

Zasada pracy odbiornika GPS:

Konwersja szumu na sygnał użyteczny:

Generic GPS Channel



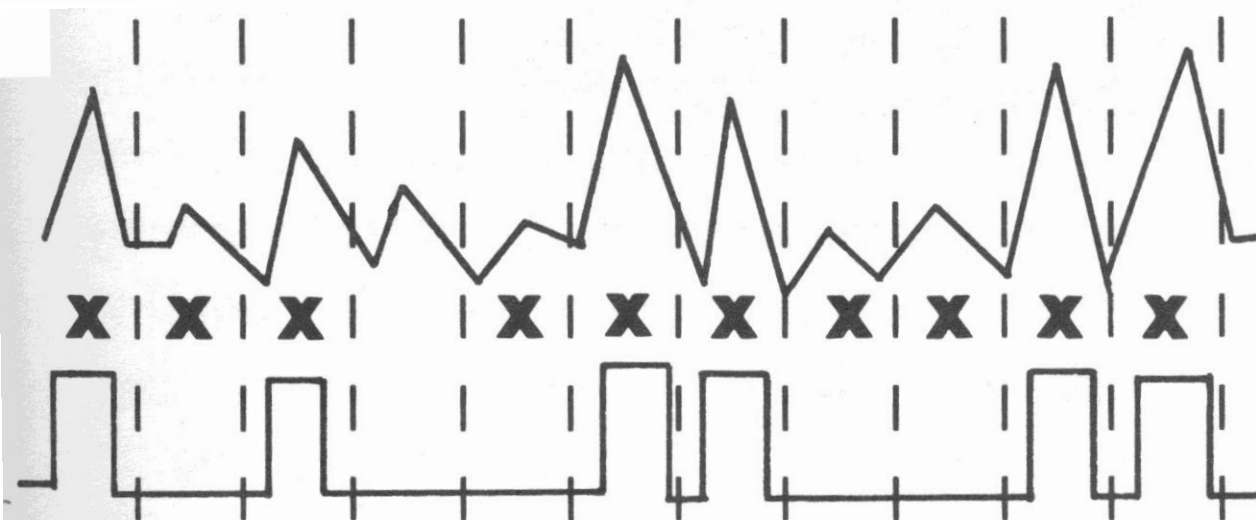
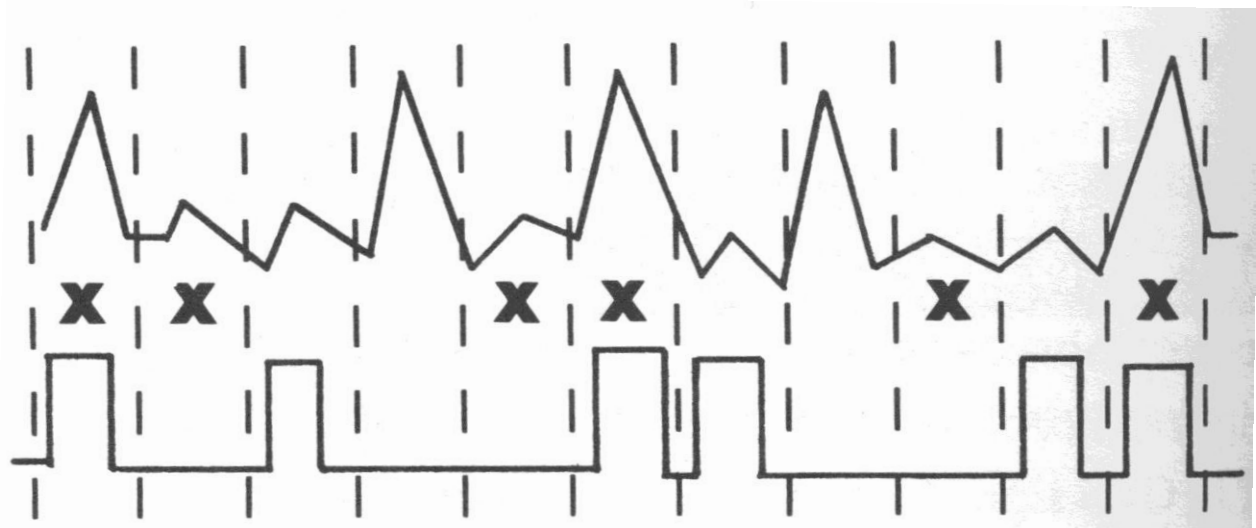
Zasada pracy odbiornika GPS:

Konwersja szumu na sygnał użyteczny:

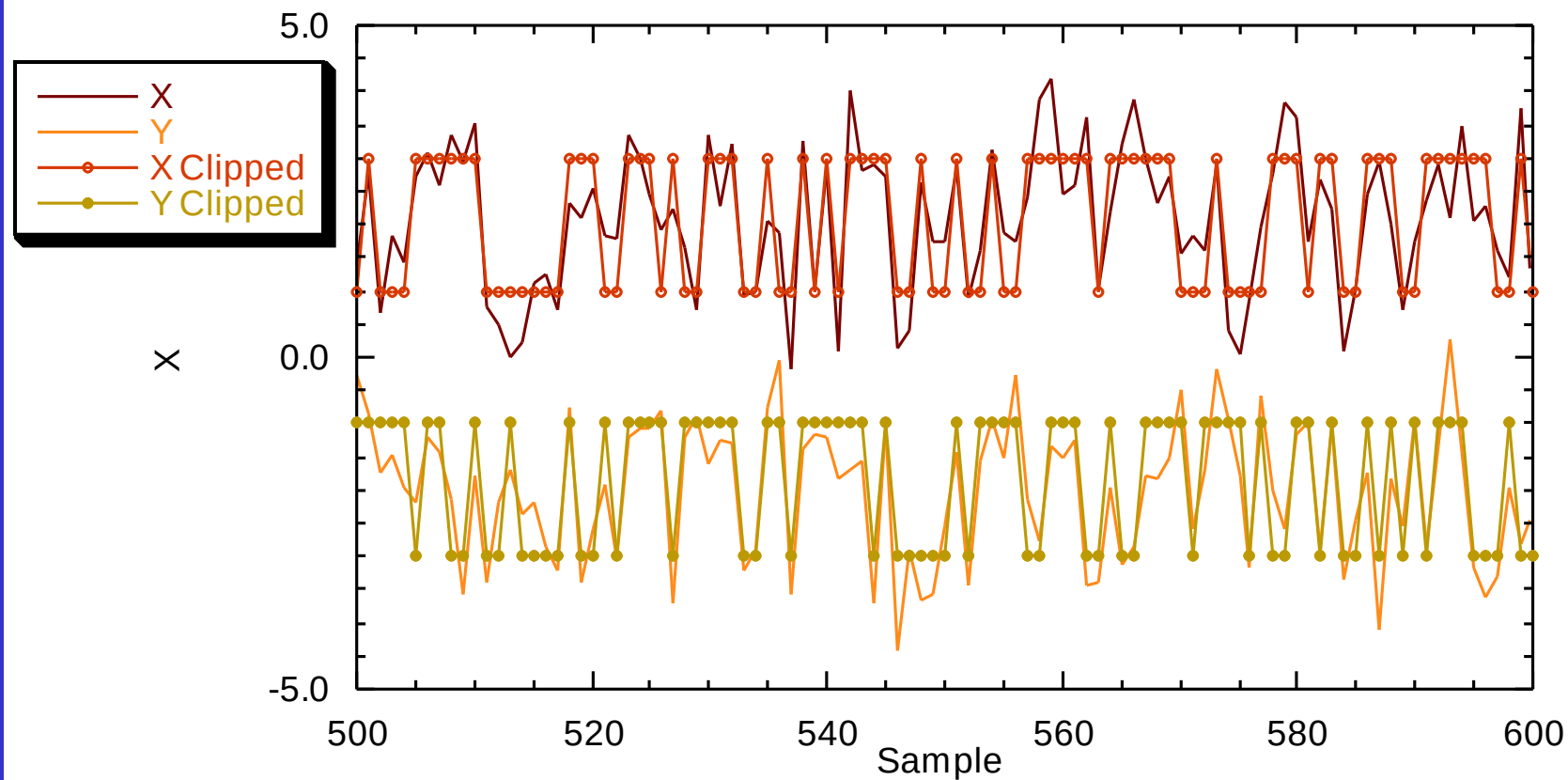
Układ korelatora kodu (**code correlator**) składa się z kolejnego **mieszacza** i **oscylatora cyfrowego**.

Aby zdemodulować sygnał IF w układzie mieszacza sprowadza się go do częstotliwości zerowej i jego kopie przesyła się na poszczególne kanały, w których wyodrębniany jest kod i informacja o nośnej dla kolejnych satelitów (**realizacja CDMA**). W tym celu w oscylatorze cyfrowym NCO (**numerically controlled oscillator**) jest tworzona replika kodu C/A lub P danego satelity i porównywana z sygnałem IF. Proces korelacji (porównania) prowadzi do wzmocnienia sygnału powyżej progu szumów, czyli do jego demodulacji na sygnał dwupoziomowy (0,1).

Zasada pracy odbiornika GPS:



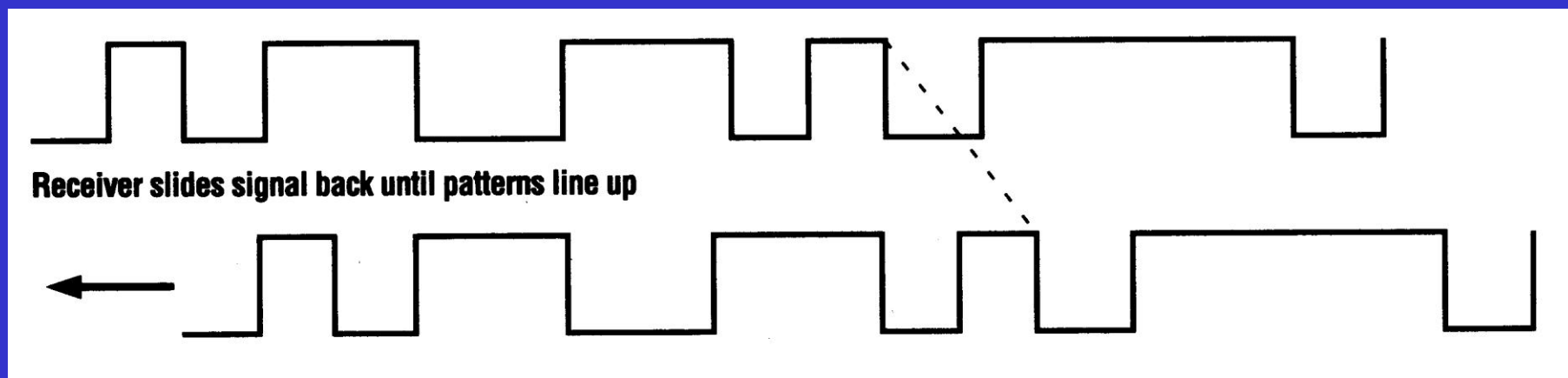
Zasada pracy odbiornika GPS:



Zasada pracy odbiornika GPS:

Konwersja szumu na sygnał użyteczny:

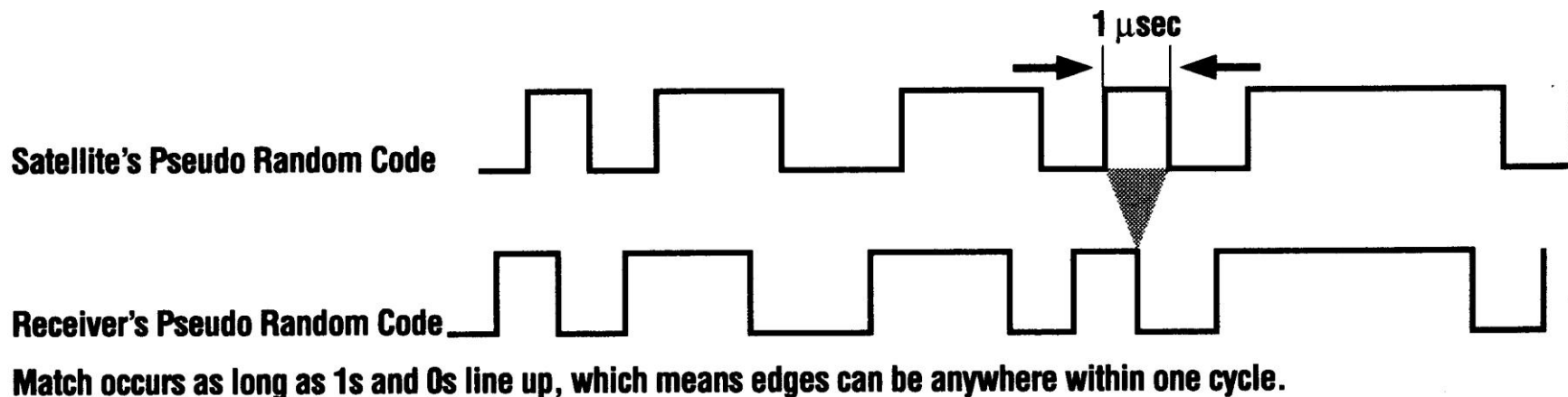
Pseudoodległość (PR, pseudorange) zostaje wyznaczona w wyniku zmierzenia przesunięcia czasowego potrzebnego na wyrównanie sygnału wygenerowanego przez NCO z sygnałem IF i przemnożeniu uzyskanej wartości przez prędkość fali elektromagnetycznej:



Zasada pracy odbiornika GPS:

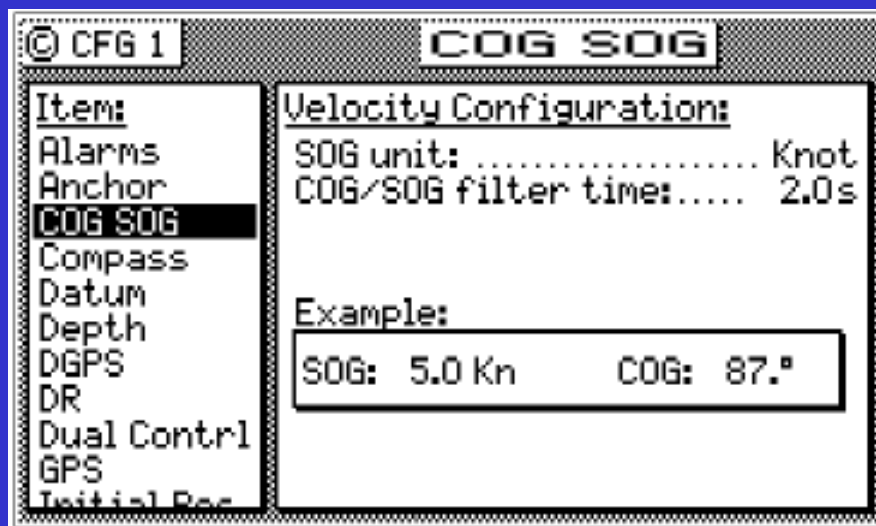
Konwersja szumu na sygnał użyteczny:

W praktyce stosowane są trzy repliki kodu dla celów korelacji – jedna wyrównywana dokładnie z sygnałem IF (**punctual**), jedna opóźniona (**late**) i jedna przyspieszona (**early**). Kody **late** i **early** położone są po i przed ekstremum funkcji korelacyjnej po to, aby umożliwić ciągłość synchronizacji kodu (**continuous tracking**) i żeby zmniejszyć jej błędy.



Zasada pracy odbiornika GPS:

Wektor prędkości w odbiorniku GPS wyznaczany jest na podstawie rejestrowanych zmian pozycji w czasie. Na okres czasu, za jaki wyznaczany jest ten wektor, operator ma przeważnie wpływ poprzez ustawienie stałej czasowej filtru cyfrowego (wartość wpływająca na współczynnik wzmocnienia w filtrze Kalmana) wygładzającego odchyłki wyników od wartości dominujących w przeszłości („uśredniającego” prędkość).



Konfiguracja wektora prędkości w odbiorniku firmy Leica typu MK10, MK420