

# Systemy nawigacji satelitarnej

Krzysztof Kamiński

# Omega



System Omega:

1. rozkład nadajników
2. maszt Woodside, Australia
3. maszt Tsushima, Japonia



# Omega

Pierwszy (?) globalny system nawigacji radiowej.

System działał od 1971 do 1997 na podobnej zasadzie jak brytyjski Gee czy amerykański LORAN (system hiperboliczny).

Zaczęto go tworzyć w roku 1968 gdy zegary atomowe umożliwiły dokładną synchronizację nadajników na różnych częściach globu.

Min 5 nadajników możliwych do odbioru w każdym momencie z każdego miejsca na Ziemi.

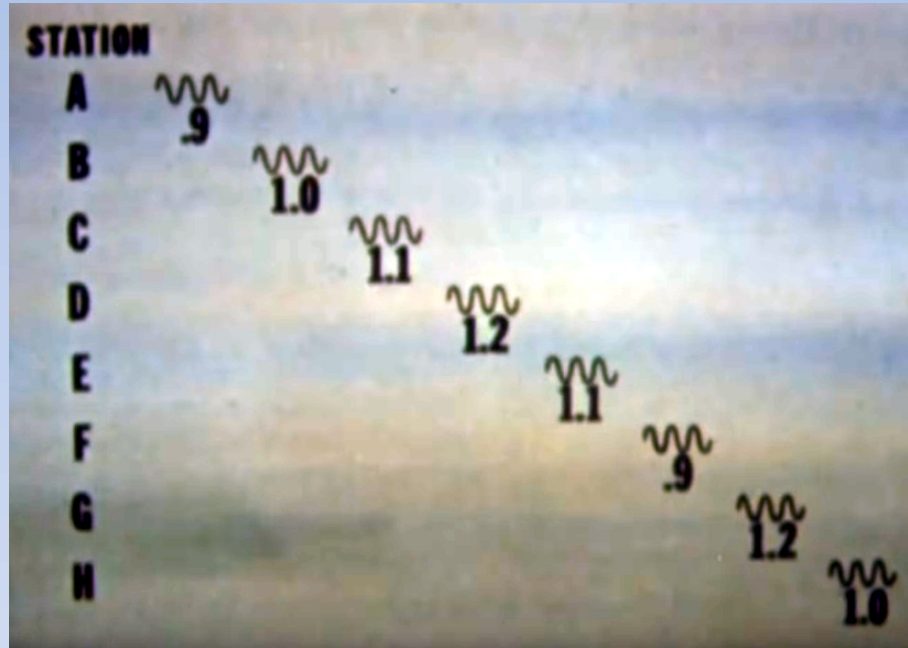
Pracowały na częstotliwości 10.2 kHz (29.4 km), wspomaganej częstotliwościami 11.333 i 13.6 kHz.

Praktyczna dokładność systemu sięgała kilku km.

Rozdzielczość pomiarów to 1/100 długości fali, czyli ok 300m.

# Omega

Wszystkie nadajniki pracowały na tych samych częstotliwościach, ale dzieliły się czasem (TDMA - Time Division Multiple Access):



Odbiornik porównywał fazę sygnału i określał różnicę drogi od nadajników. Robił to jednak niejednoznacznie ( $\pm 14.7$  km) i wymagał zgrubej znajomości pozycji albo zliczania przejść przez linie równych faz.

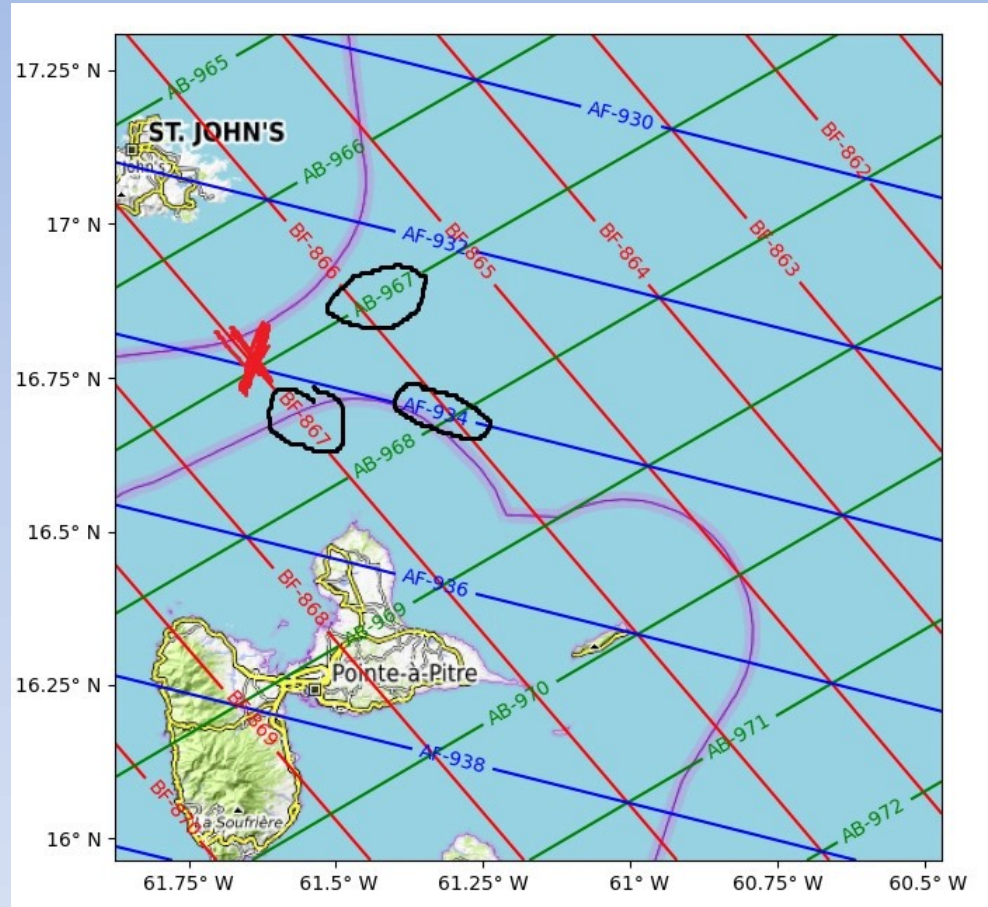
# Omega

W roku 1976 Firma Decca Navigator z Londynu oskarżyła rząd USA o plagiat ich patentu z 1954 o nazwie Decca Long Range Area Coverage (DELRAC).

Sąd uznał, że mają rację. Rząd USA używał nawet początkowo nazwy DELRAC/Omega. Firma otrzymała 44 mln \$ odszkodowania.

# Omega

W roku 2024 powstał dodatek do gry Microsoft Flight Simulator 2020, symulujący nawigację za pomocą systemu Omega.



Linie równych faz: 900 to linia dokładnie pośrodku, >900 bliżej dalszej literki, <900 bliżej mniejszej literki.

# GPS



Pierwszy mobilny geodezyjny odbiornik systemu GPS: Leica WM-101 (1985)

# Segment użytkownika systemu GPS

Segment użytkownika nawigacyjnych systemów satelitarnych stanowią wszelkiego rodzaju odbiorniki, przystosowane do odbioru jednej lub dwóch częstotliwości nośnych i związanych z nimi kodów.

Odbiorniki dzieli się na cywilne lub wojskowe, stacjonarne lub ruchome.

Najczęściej odbiorniki wykorzystuje się do wyznaczenia pozycji użytkownika, transferu czasu i pomiarów geodezyjnych.

Istnieją odbiorniki GNSS różnych typów:

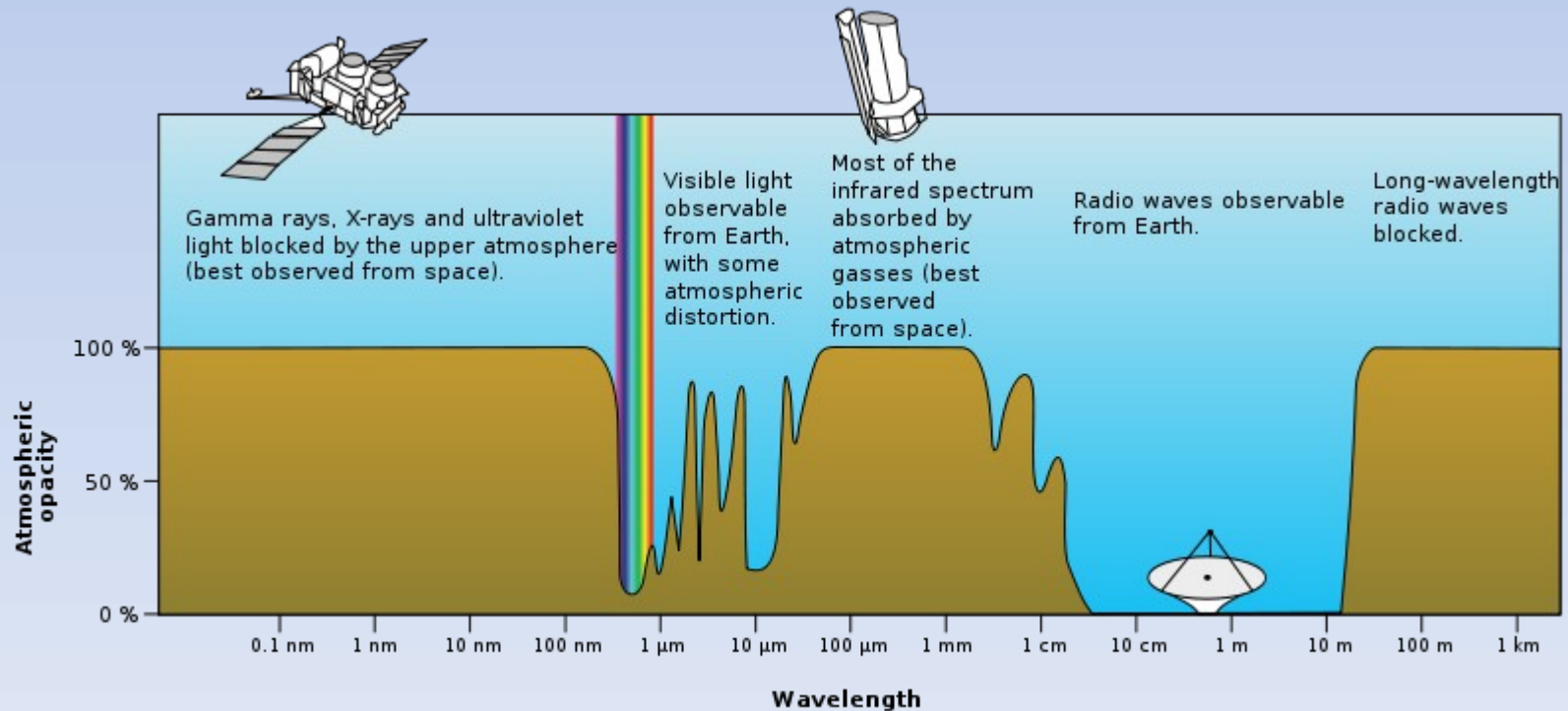
- jedno-zakresowe (L1)
- dwu-zakresowe (L1 i L2)
- jedno lub wiele systemowe
- różnicowe (DGPS)
- wspomagane satelitarnie (SBAS)
- wspomagane przez sieć GSM (A-GPS)
- śledzące fazę fali nośnej (Carrier-phase tracking)
- tzw. „real time kinematic” (RTK)





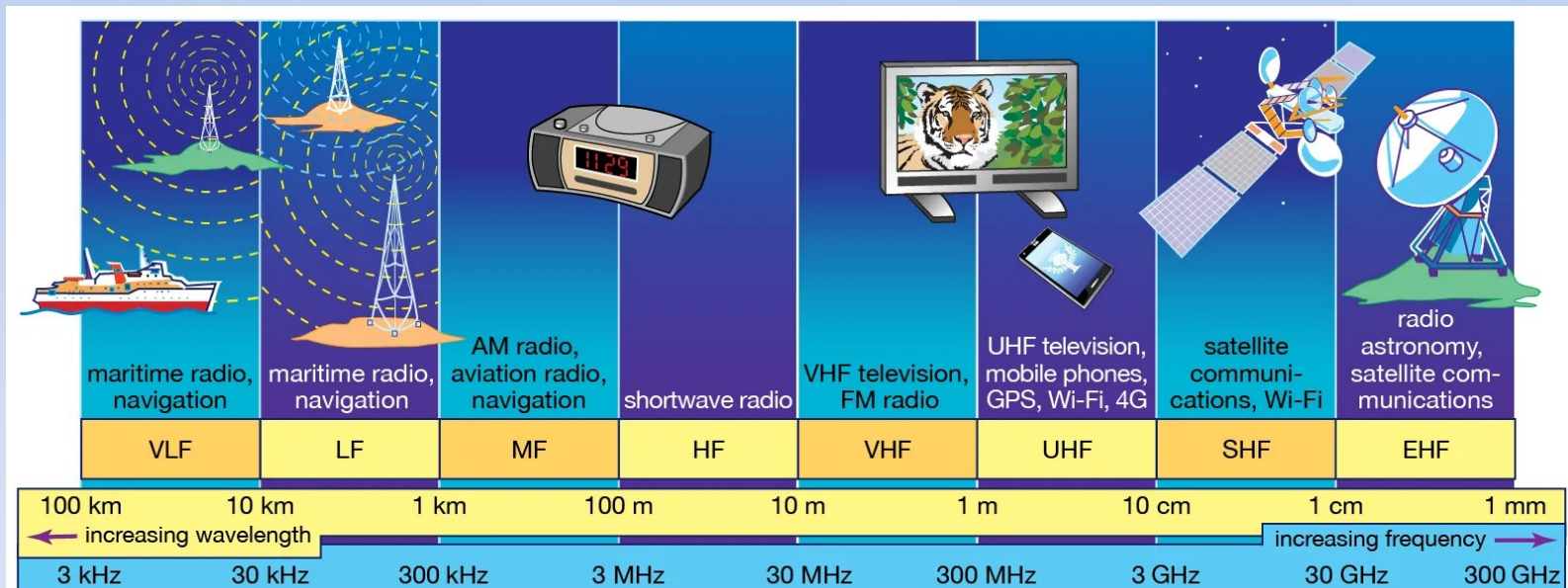
# Częstotliwość fali nośnej

Wykorzystywane w naziemnych systemach nawigacyjnych częstotliwości fali nośnej mniejszej od 100 MHz całkowicie nie nadawały się do łączności satelitarnej. Warunkiem poprawnego działania nawigacyjnego systemu satelitarnego jest zapewnienie łączności na takich falach, które zdołają przejść swobodnie przez wszystkie warstwy atmosfery szczególnie przez jonosferę i troposferę.



# Częstotliwość fali nośnej

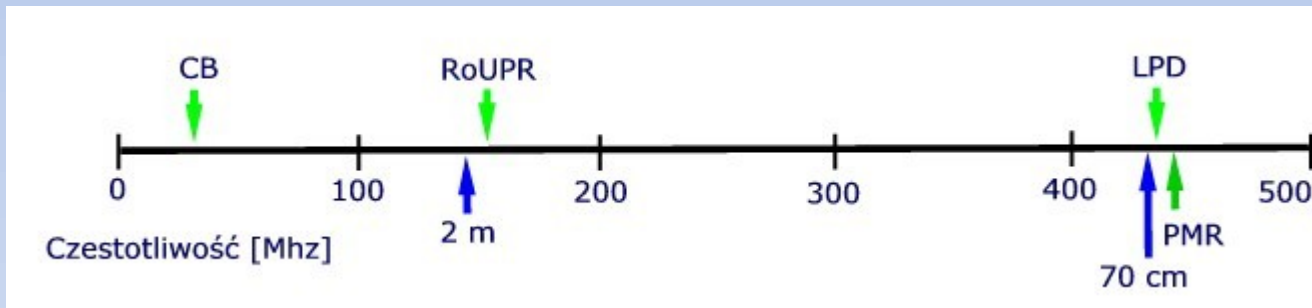
Band	Designation		Frequency limits
4	VLF	very low frequency	3 kHz - 30 kHz
5	LF	low frequency	30 kHz - 300 kHz
6	MF	medium frequency	300 kHz - 3 MHz
7	HF	high frequency	3 MHz - 30 MHz
8	VHF	very high frequency	30 MHz - 300 MHz
9	UHF	ultra high frequency	300 MHz - 3 GHz
10	SHF	super high frequency	3 GHz - 30 GHz
11	EHF	extremely high frequency	30 GHz - 300 GHz



# Częstotliwość fali nośnej

Po licznych badaniach stwierdzono, że dla łączności tej najlepsze są częstotliwości z przedziału 100-500 MHz (pasmo VHF i UHF).

W przypadku fal o wyższych częstotliwościach występowały trudności z zapewnieniem odpowiednich anten odbiorczych odbiorników użytkowników.



Pierwszy system nawigacyjny TRANSIT wykorzystywał częstotliwości:

400 MHz (399 968 kHz)

150 MHz (149 988 kHz)

# Częstotliwość fali nośnej

Podstawowym problemem przy budowie systemu satelitarne­go, a później już samej jego eksploatacji są koszty poniesione przez segment kosmiczny. Ograniczeniem jest zarówno żywotność satelity, ale również konieczność zapewnienia energii dla urządzeń pokładowych.

Bariery konstrukcyjne w czasie budowy pierwszych satelitów zmusiły konstruktorów do minimalizacji mocy ich nadajników.

Dlatego sygnały odbierane na powierzchni Ziemi mają poziom porównywalny z poziomem szumu.

Szumy odbierane przez odbiornik to szumy pochodzenia kosmicznego, szumów atmosfery ziemskiej oraz szumów związanych z promieniowaniem cieplnym Ziemi (termiczne).

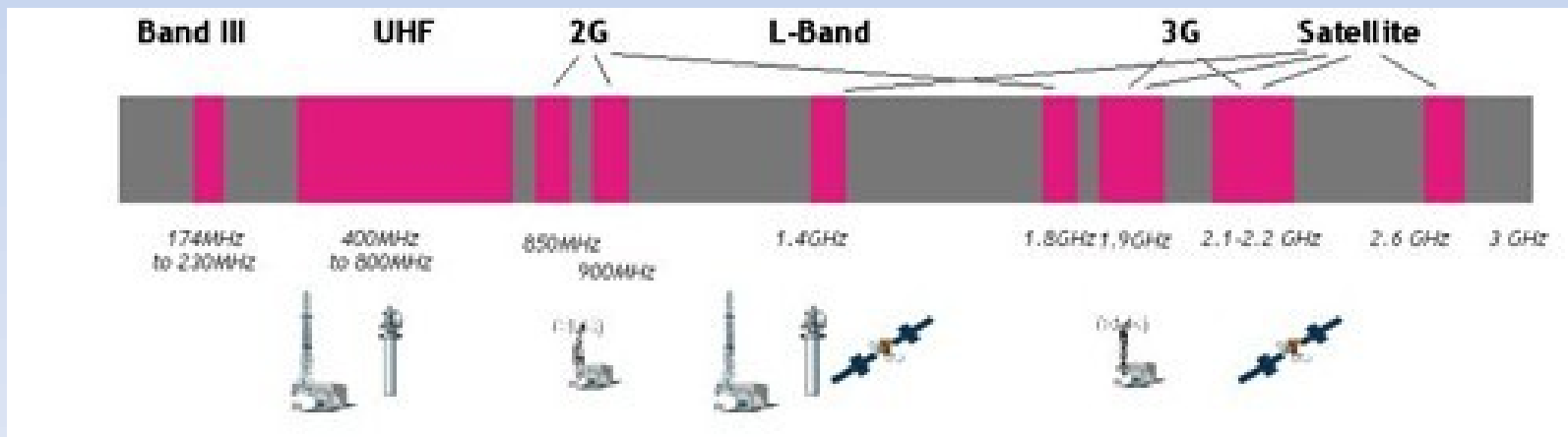
# Częstotliwość fali nośnej

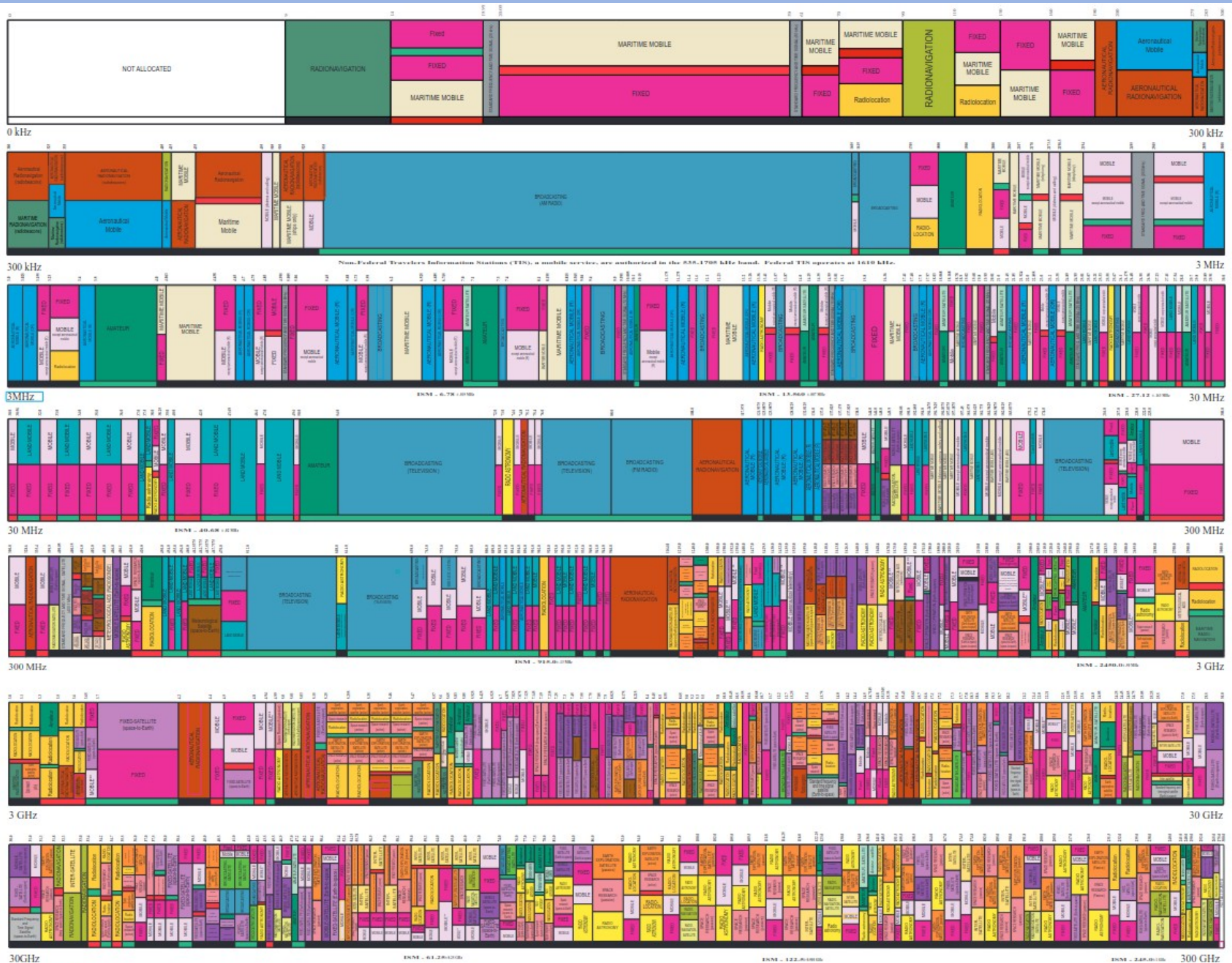
Przy częstotliwościach powyżej 1 GHz poziom szumów własnych odbiornika systemu przewyższa poziom zakłóceń kosmicznych.

Przy częstotliwościach 1,5 GHz zakłócenia pochodzą głównie z galaktyki i od pewnej liczby dyskretnych źródeł o dużym natężeniu.

Dla częstotliwości z przedziału 2-8 GHz poziom tych zakłóceń jest bardzo niewielki.

Obecne systemy satelitarne pracują na częstotliwościach od 1,1-1,6 GHz.





Alokacja pasm radiowych w USA w roku 2016.

# AERONAUTICAL RADIONAVIGATION

RADIO NAVIGATION-SATELLITE (space-to-Earth)(space-to-space)		AERONAUTICAL RADIONAVIGATION		1164.0
EARTH EXPLORATION-SATELLITE (active)	RADIO-LOCATION	RADIONAVIGATION-SATELLITE (space-to-Earth) (space-to-space)	SPACE RESEARCH (active)	1215.0
AERONAUTICAL RADIO-NAVIGATION	EARTH EXPLORATION-SATELLITE (active)	RADIO-LOCATION	Space research (active)	1240.0
AERONAUTICAL RADIONAVIGATION		SPACE RESEARCH (active)	Amateur	1300.0
FIXED	MOBILE	Radiolocation		1350.0
FIXED	MOBILE **	RADIOLOCATION		1390.0
FIXED	MOBILE **	Fixed-satellite (Earth-to-space)		1392.0
LAND MOBILE (medical telemetry and medical telecommand)		MOBILE **		1395.0
EARTH EXPLORATION-SATELLITE (passive)	RADIO ASTRONOMY	SPACE RESEARCH (passive)		1400.0
LAND MOBILE (medical telemetry and medical telecommand)	LAND MOBILE (telemetry and telecommand)	Fixed (telemetry)		1427.0
FIXED (telemetry and telecommand)	LAND MOBILE (telemetry & telecommand)			1429.5
FIXED (telemetry and telecommand)	LAND MOBILE (telemetry & telecommand)	Fixed-satellite (space-to-Earth)		1430.0
FIXED	MOBILE **	MOBILE **		1432.0
MOBILE (aeronautical telemetry)				1435.0
MOBILE SATELLITE (space-to-Earth)				1525.0
RADIO NAVIGATION-SATELLITE (space-to-Earth)(space-to-space)		AERONAUTICAL RADIONAVIGATION		1559.0
RADIO DETERMINATION-SATELLITE (Earth-to-space)	AERONAUTICAL RADIONAVIGATION	MOBILE SATELLITE (Earth-to-space)		1610.0
RADIO ASTRONOMY	RADIO DETERMINATION-SATELLITE (Earth-to-space)	AERONAUTICAL RADIONAVIGATION	MOBILE SATELLITE (Earth-to-space)	1610.6
Mobile-satellite (space-to-Earth)	RADIO DETERMINATION-SATELLITE (Earth-to-space)	AERONAUTICAL RADIONAVIGATION	MOBILE SATELLITE (Earth-to-space)	1613.8
MOBILE SATELLITE(Earth-to-space)				1626.5
RADIO ASTRONOMY	MOBILE SATELLITE (Earth-to-space)			1660.0
RADIO ASTRONOMY	SPACE RESEARCH (passive)			1660.5
				1668.4

Alokacja pasm radiowych w USA w roku 2016.

# Częstotliwość fali nośnej

Wszystkie starsze satelity GPS emitują nieprzerwanie sygnały na dwóch częstotliwościach nośnych L1 i L2 (z pogranicza mikrofalowych fal L i S), które z punktu widzenia naziemnego obserwatora wynoszą:

- L1 = 1575,42 MHz (długość fali 19,029 cm)
- L2 = 1227,60 MHz (długość fali 24,421 cm)

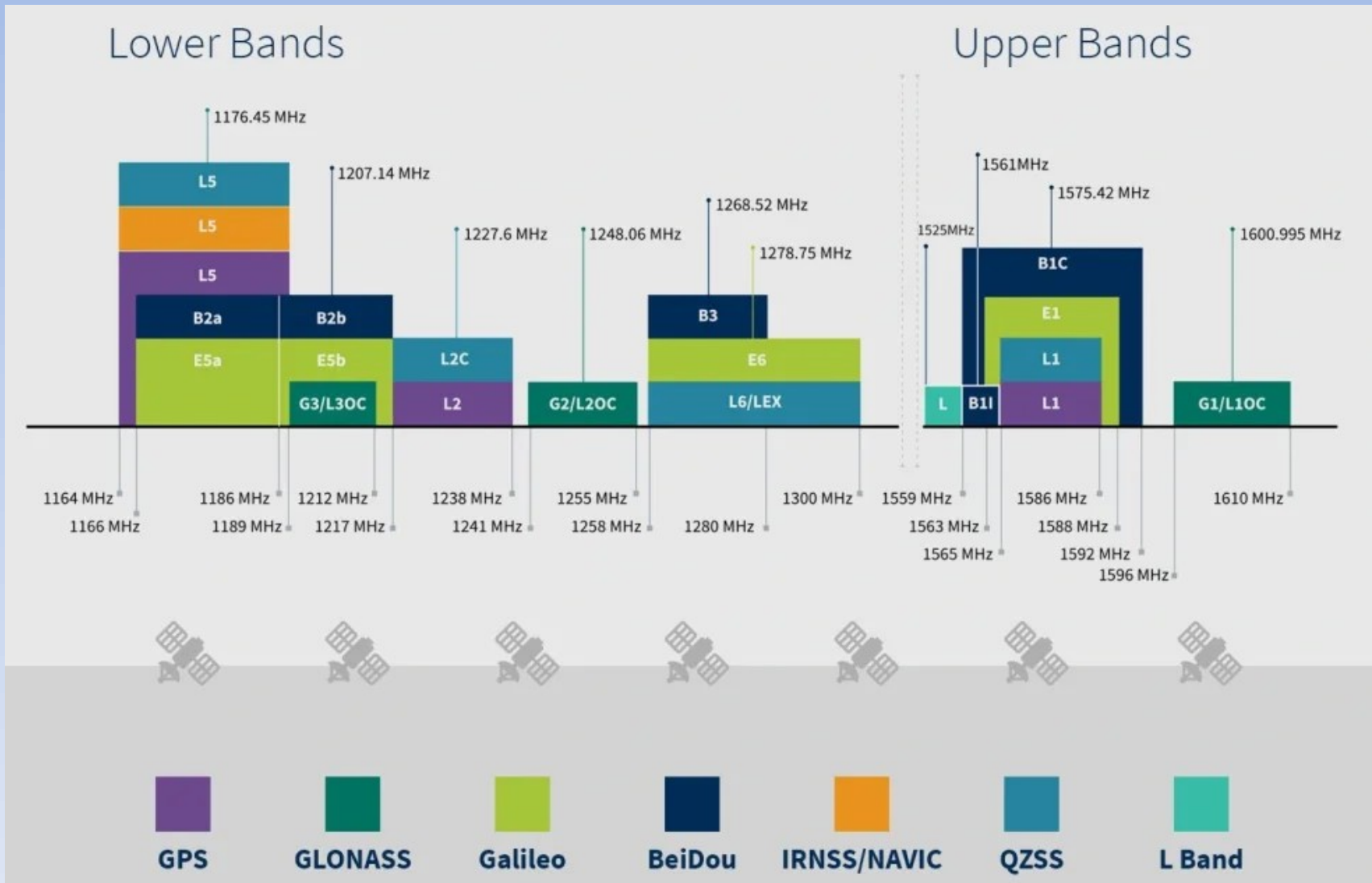
Obie te częstotliwości, zgodne w fazie z sygnałem oscylatora atomowego, powstają w wyniku powielania odpowiednio 154 i 120 razy jednej i tej samej częstotliwości 10,23 MHz.

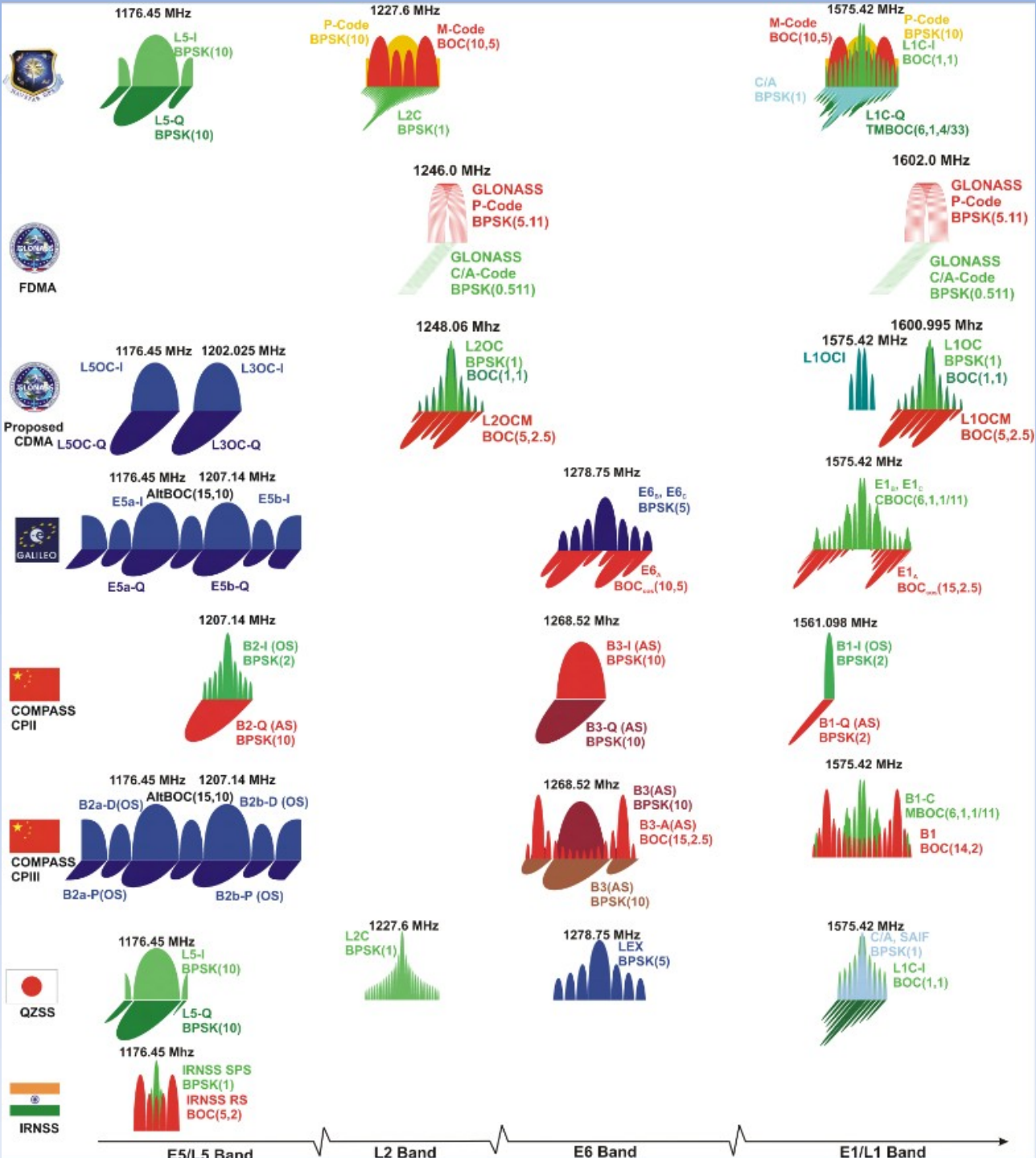
Nowsze satelity nadają również sygnał L5 = 1176.45 MHz, który też jest wielokrotnością częstotliwości bazowej ale 115 razy.



# Częstotliwość fali nośnej

Pasmo L: od 1 do 2 GHz (30-15 cm)





# Częstotliwość fali nośnej

Z uwagi na fakt, że nadajnik i odbiornik są zawsze względem siebie w ruchu, Użytkownik każdego systemu satelitarnego powinien się liczyć z efektem Dopplera.

Dla użytkownika stacjonarnego lub o małej dynamice  $\Delta L2 < \Delta L1 < 5 \text{ kHz}$ ,  
Dla użytkownika o dużej dynamice  $\Delta L2 < \Delta L1 \leq 10 \text{ kHz}$ ,

Tempo zmiany częstotliwości wynosi  $0,936 \text{ Hz/s}$ .

Dodatkowo wszystkie satelity GPS emitują dla innych, niż określenie pozycji celów sygnały na częstotliwości  $1381,05 \text{ MHz}$  (długość fali  $21,7 \text{ cm}$ ).

Z kolei z satelitów GPS do segmentu naziemnego przekazywane są na częstotliwości  $1783,84 \text{ MHz}$  (długość fali  $16,8 \text{ cm}$ )  
a ze stacji to satelitów na częstotliwości  $2227,5 \text{ MHz}$  (długość fali  $13,46 \text{ cm}$ )

# Częstotliwość fali nośnej

Na satelicie oscylator pracuje z częstotliwością 10,22999999545 MHz. Zgodnie ze szczególną teorią względności chód zegara znajdującego się na satelicie krążącym z prędkością ok. 4 km/s, jest szybszy niż takiego samego zegara zlokalizowanego na powierzchni Ziemi o  $v^2/2c^2$ .

Różnica ta wynosi 0,00455 Hz, czyli względna różnica wynosi ok  $10^{-10}$ . A więc czas wskazywany przez zegar pokładowy dryfuje o -7.2  $\mu\text{s}/\text{d}$ .

Zgodnie z ogólną teorią względności zakrzywienie czasoprzestrzeni powoduje dryf 45.8  $\mu\text{s}/\text{d}$ , co w sumie daje 38.6  $\mu\text{s}/\text{d}$ .

Sumaryczny efekt relatywistyczny daje narastający błąd pozycji 11.4 km / dobę.

# Modulacja sygnału

Modulacja sygnału jest procesem fizycznym, w wyniku którego pewna cecha jednego przebiegu (nośnego) zmienia się w zależności od wartości chwilowej innego przebiegu (modulującego).

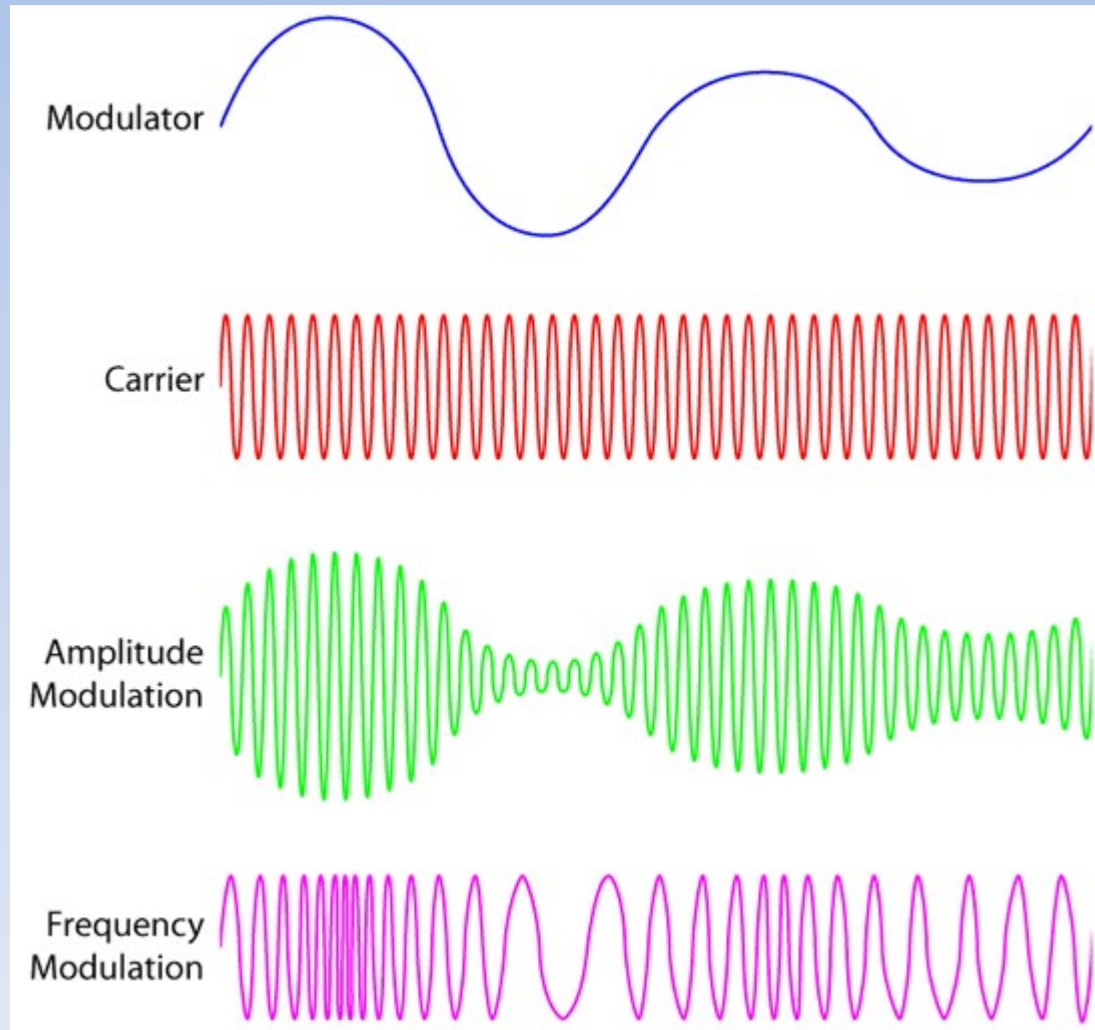
Modulacja sygnału służy przede wszystkim do transmisji informacji.

W nawigacyjnych systemach satelitarnych nadawana fala radiowa modulowana jest w odpowiedni sposób w tym celu,  
by umożliwić pomiar odległości,  
zakodować dodatkowe informacje,  
uodpornić przekazywane informacje na zakłócenia  
i umożliwić współdzielenie pasma przez wiele nadajników.

# Modulacja sygnału

Wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje modulacji fali sinusoidalnej (nośnej):

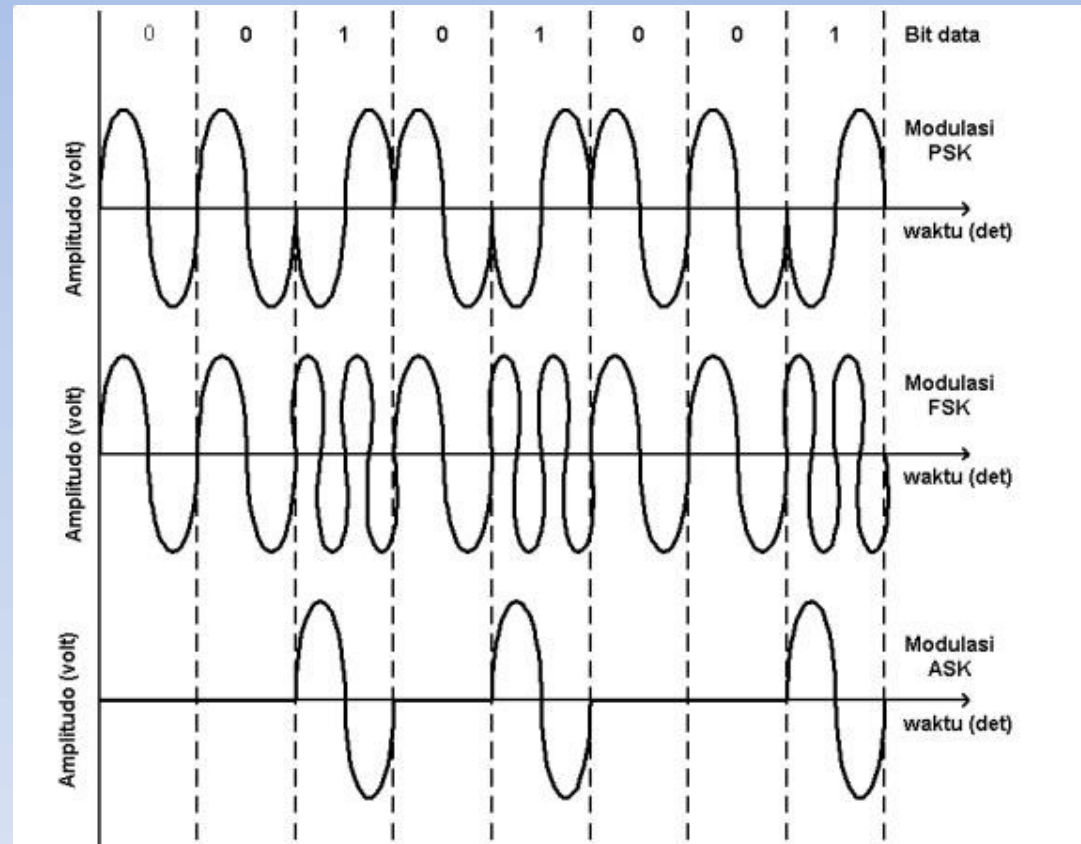
- modulacje amplitudy AM (Amplitude Modulation)
- modulacje kąta (np. FM) (Frequency Modulation)



# Modulacja sygnału

Obecnie w cyfrowych systemach radiokomunikacji stosuje się cyfrowe techniki modulacji:

- z kluczowaniem fazy **PSK** (Phase Shift Keying)
- z kluczowaniem częstotliwości **FSK** (Frequency Shift Keying),
- z kluczowaniem amplitudy **ASK** (Amplitude Shift Keying),



System GPS stosuje kluczowanie fazy.

# Modulacja sygnału

Może się wydawać, że maksymalna częstotliwość przesyłania bitów jest więc taka sama jak częstotliwość fali nośnej:

Dla pasma L1 (1575 MHz) wynosi ok 1,5 Gbps, czyli 187,5 MB/s !!!

W praktyce prędkości transmisji danych są o wiele mniejsze.  
Wynika to m.in. z niewielkiej mocy sygnału.

Twierdzenie o przepustowości Shannona-Hartleya

$$C = W \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right),$$

C – przepustowość w bitach/s

W – szerokość pasma w Hz

S/N – stosunek sygnału do szumu



# Moc sygnału

Nadajnik GPS nadaje z mocą 45W (+46 dBm) na odległości ok 20 kkm.

( dBm = jednostka mówiąca o ile decybeli sygnał jest silniejszy od 1 mW  
 $P[\text{dBm}] = 10 \log_{10}(P[\text{mW}])$  )

Zakładając wzmacnienie (gain) anteny na satelicie na poziomie 12 dBi  
oraz wzmacnienie (gain) anteny odbiornika na poziomie 4 dBi  
oraz straty atmosferyczne i inne na poziomie 5dBm  
odebrany sygnał na Ziemi ma moc -125 dBm ( $3.1 \cdot 10^{-13}$  mW).

Szumy termiczne na Ziemi w pasmie L mają moc ok -110 dBm ( $1 \cdot 10^{-11}$  mW).

Stosunek sygnału do szumu S/N wynosi więc w przybliżeniu  $0.031 = 1/32$ .

A więc zgodnie z twierdzeniem Shannona-Hartleya maksymalna przepustowość w pasmie L wynosi ok. 30 kbps.

Satelity nawigacyjne nie mogą przesyłać danych, wysyłając zera i jedynki z częstotliwością fali nośnej (1575 MHz) bo sygnał jest za słaby a szum za duży.

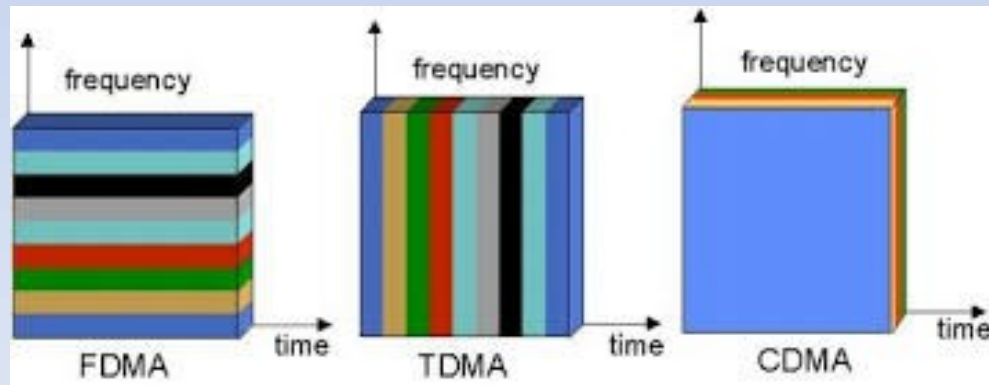
Nie mogą też wysyłać dane z maksymalną przepustowością pasma L (ok. 30 kbps), bo pasmo jest współdzielone pomiędzy wiele satelitów i wiele systemów.

Potrzebny jest sposób na komunikację wielu satelitów za pomocą jednego pasma radiowego.

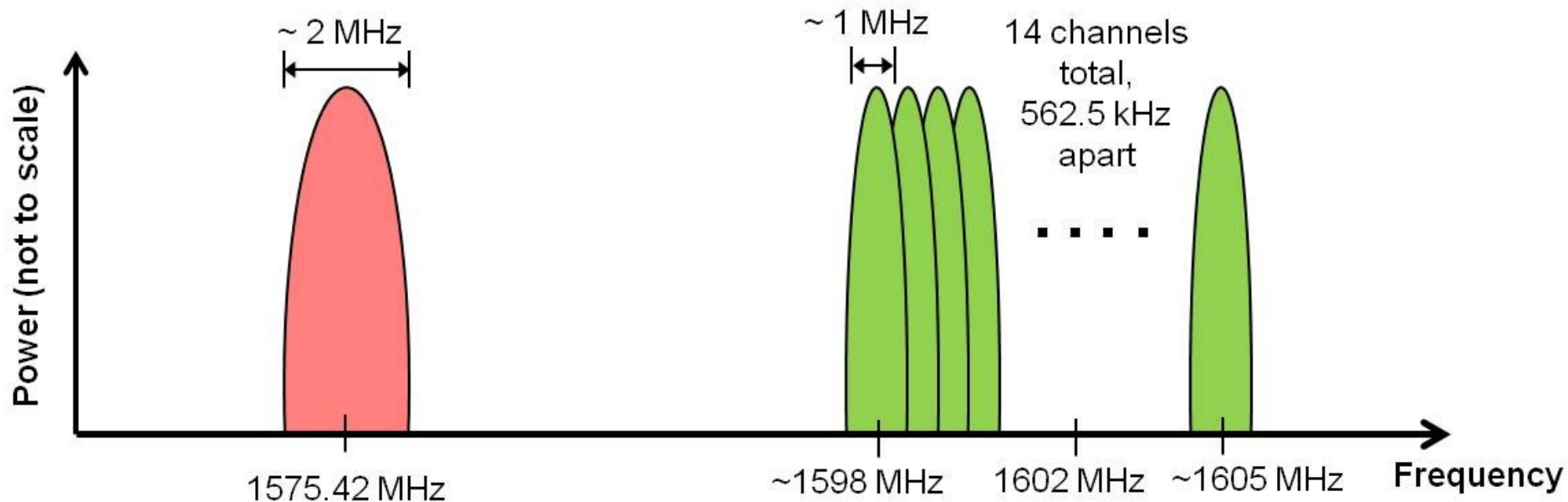
# Współdzielenie pasma

Jednoznaczny dostęp do kanału radiokomunikacyjnego dla wielu nadajników zapewniony jest za pomocą jednej z trzech technik wielokrotności:

- z podziałem częstotliwości FDMA (Frequency Division Multiple Access) (GLONASS) (dzielimy autostradę na wiele pasów, ale każdy pas przepuszcza mniej towaru)
- z podziałem czasu TDMA (Time Division Multiple Access) (ustalamy, że każdy przewoźnik ma 1h na dobę całą autostradę dla siebie)
- z podziałem kodowym CDMA (Code Division Multiple Access) (GPS, Galileo, BeiDou) (ustalamy, że każda ciężarówka wiezie towary wszystkich przewoźników na raz)



# Współdzielenie pasma FDMA



## GPS L1 C/A Signal:

All satellites transmit at same frequency using different PRN codes

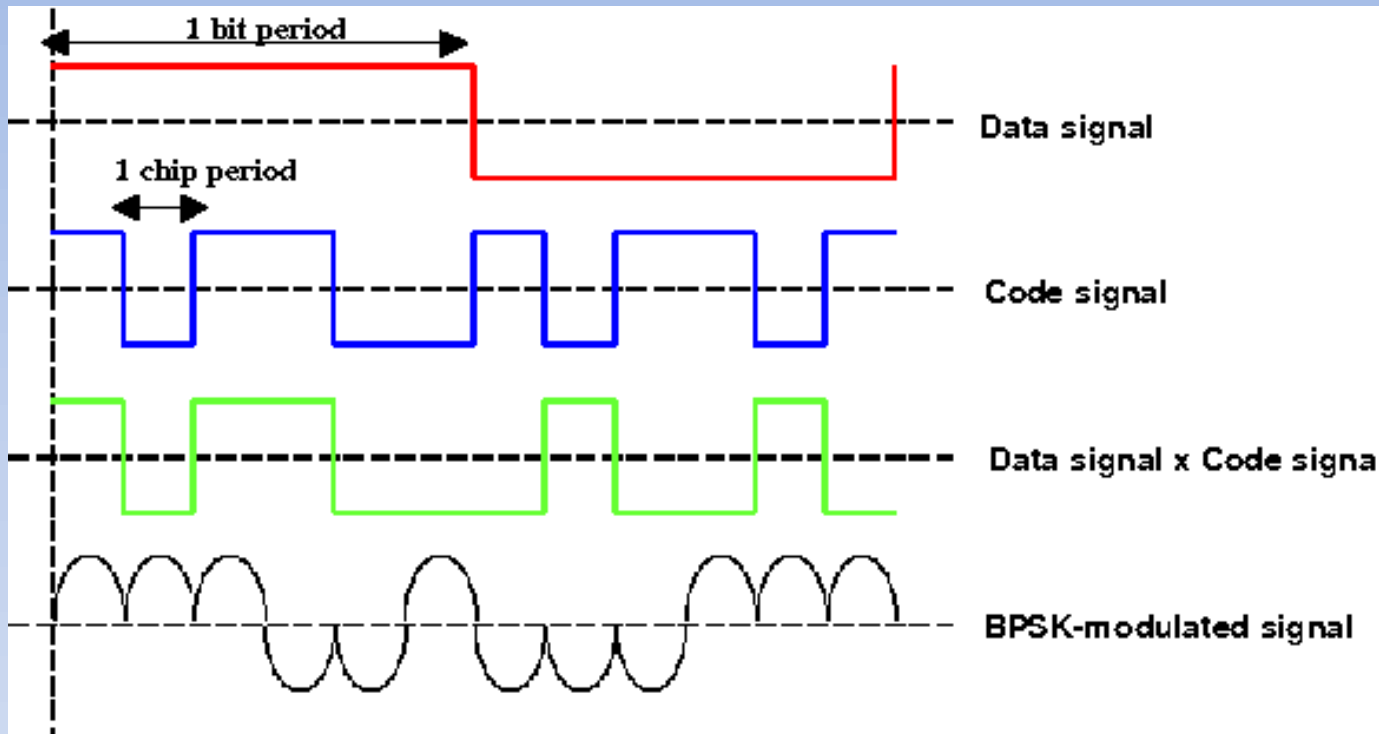
## GLONASS L1 C/A Signal (FDMA):

Satellites transmit at different frequencies around 1602 MHz using same PRN code

CDMA

FDMA - GLONASS używa  
14 kanałów radiowych

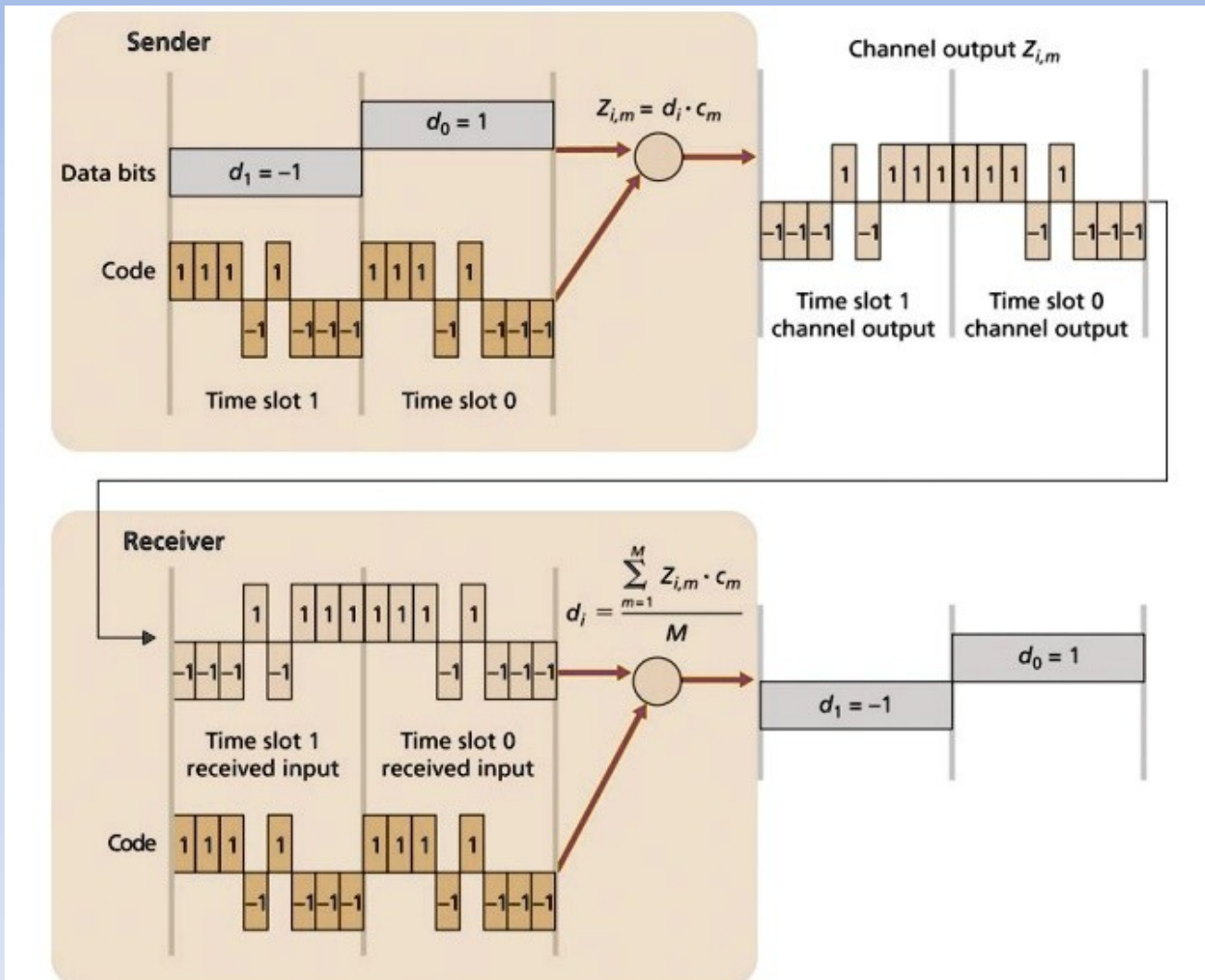
# Współdzielenie pasma CDMA



Każdy nadajnik ma inny ciąg bitów kodujących (tzw. chipów).  
Sygnał ten musi być znany dla odbiornika aby odczytać przesyłane dane.

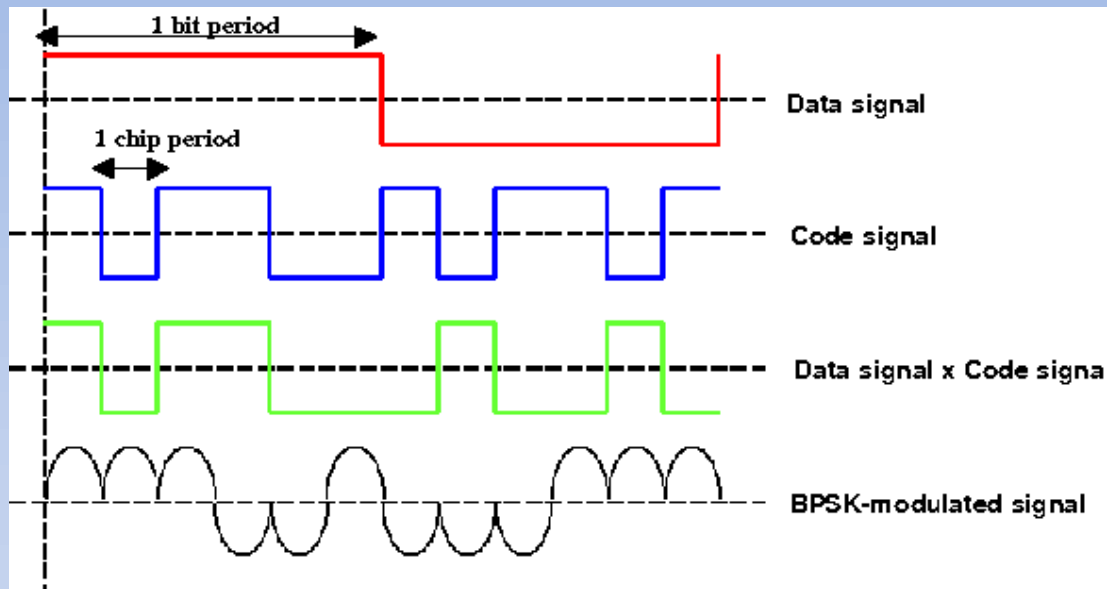
W efekcie 1 bit danych jest transmitowany jako seria wielu bitów danych.  
Taki sam 1 bit danych jest kodowany i transmitowany jako inna seria bitów przez każdy nadajnik – to pozwala odróżnić nadajniki od siebie.

# Współdzielenie pasma CDMA



Nadawanie i odbieranie sygnałów CDMA.

# Współdzielenie pasma CDMA



Ciąg kodujący musi mieć częstotliwość  $<$  częstotliwość transmitowanych danych i  $>$  niż częstotliwość fali nośnej.

Ciąg kodujący jest zwykle pseudolosowy, co pozwala najskuteczniej wykorzystać pasmo radiowe, gdyż najrównomierniej rozkłada bity w czasie.

Zmodyfikowanej metody „wideband CDMA” używa telefonia komórkowa 3G.

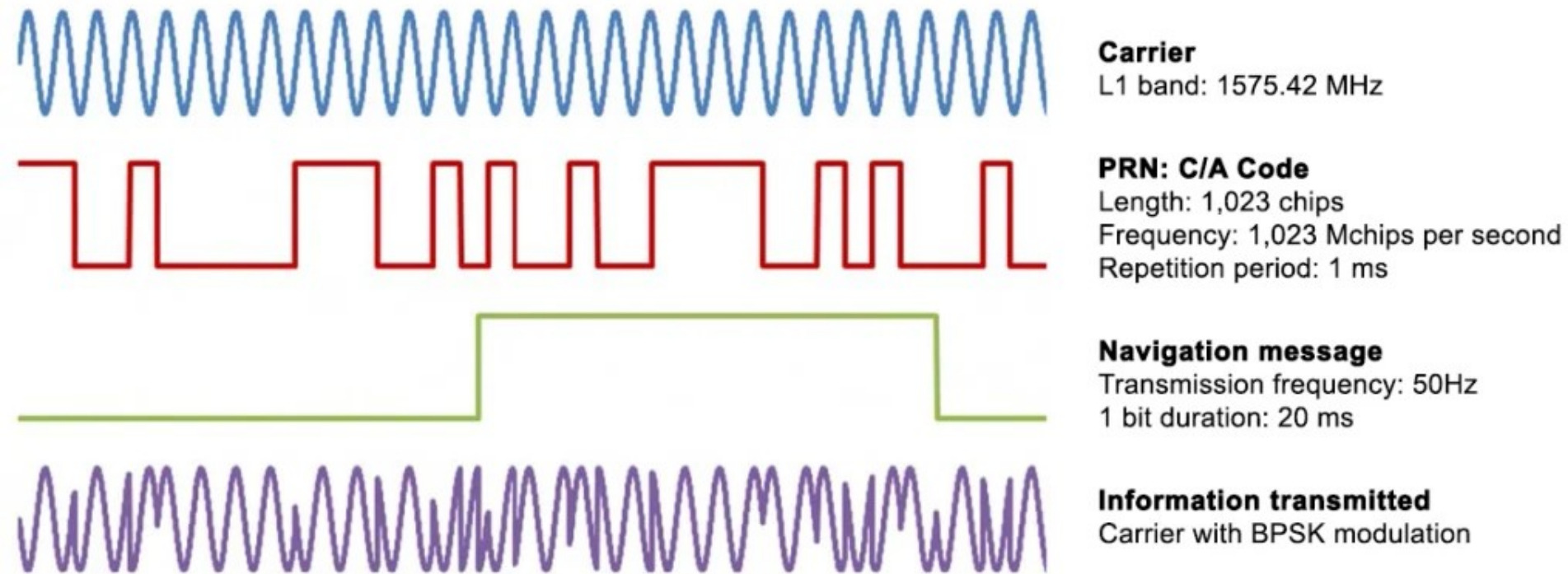
# Modulacja sygnału GPS

W nawigacji satelitarnej modulacja sygnału metodą CDMA jest używana do wielu celów jednocześnie:

- transmisja danych przez wiele satelitów (współdzielenie pasma)
- identyfikacja danego satelity
- ale również **pomiar odległości pomiędzy satelitą a odbiornikiem**



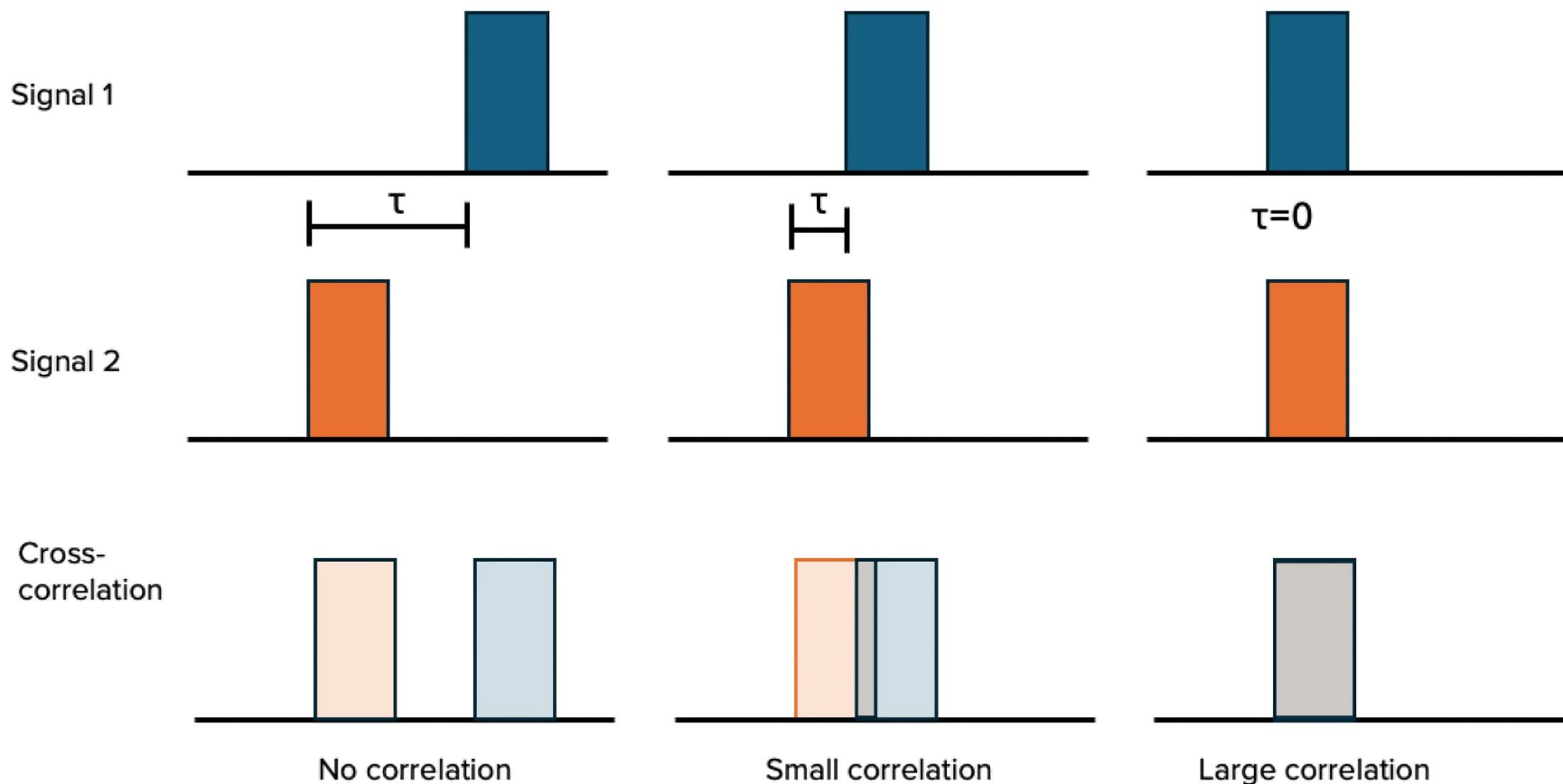
# Modulacja sygnału GPS



Ciąg kodujący nazywa się różnie: ranging code, chipping code, pseudorandom noise, PRN, pseudorandom binary sequences.

Wybrano 32 ciągi kodujące, które przechodzą z satelity na satelitę gdy ten jest wymieniany na nowy.

# Korelacja krzyżowa funkcji (sygnału)



W najprostszym przypadku korelacja dwóch funkcji jest sumą iloczynów tych funkcji.

# Korelacja krzyżowa funkcji (sygnału)

Korelacja krzyżowa  $R(m)$  funkcji dyskretnych  $x(n)$  i  $y(n)$ :

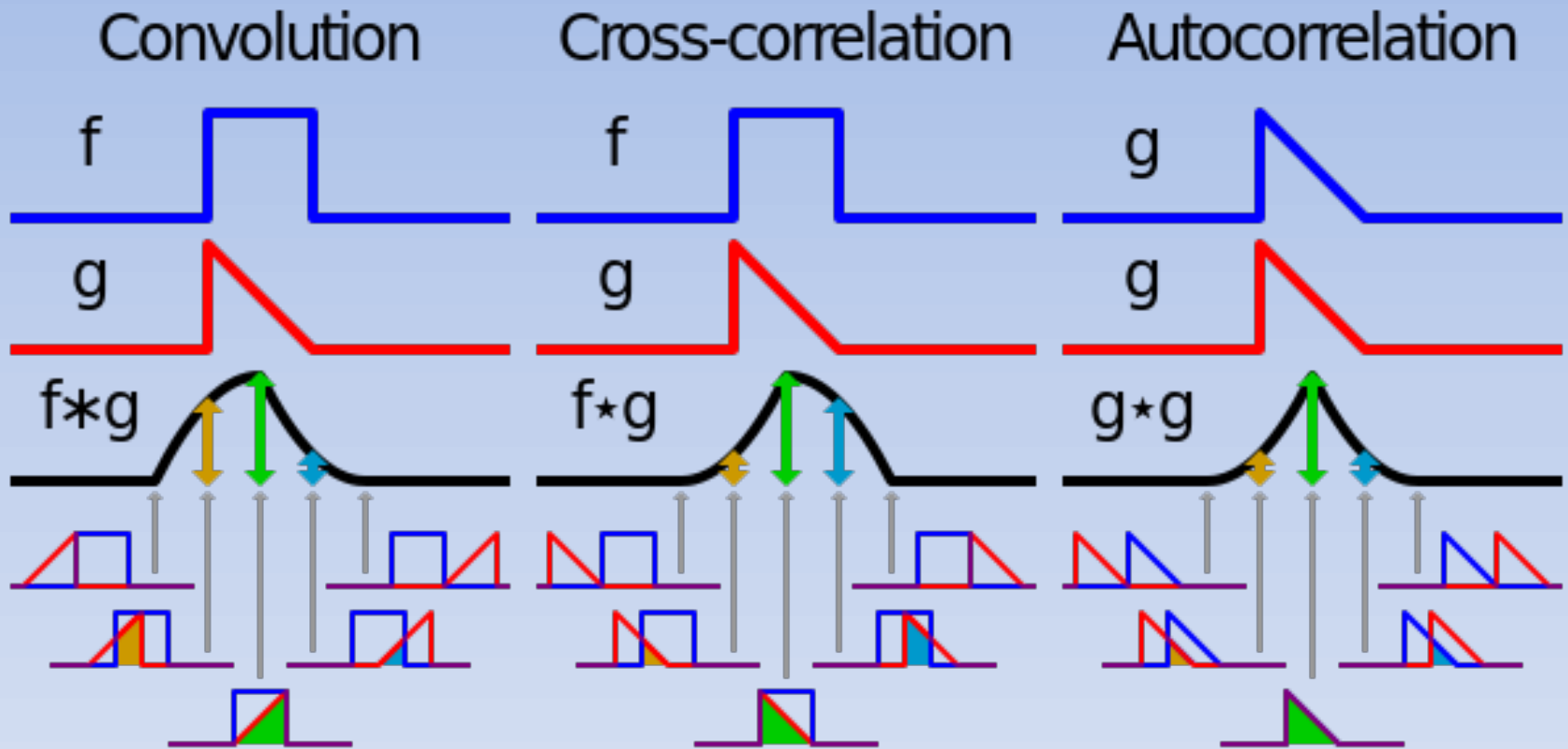
$$R_{xy}[m] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \cdot y^*[n - m]$$

$x^*$  oznacza sprzężenie zespolone liczby  $x$ ,  
które zmienia tylko znak części urojonej

Korelacja krzyżowa  $R(\tau)$  funkcji ciągłych  $x(t)$  i  $y(t)$ :

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot y^*(t - \tau) dt$$

# Korelacja krzyżowa funkcji (sygnału)



Oprócz korelacji krzyżowej wprowadzono również pojęcie splotu (konwolucji) i autokorelacji.

# SNR



SNR: 40 dB



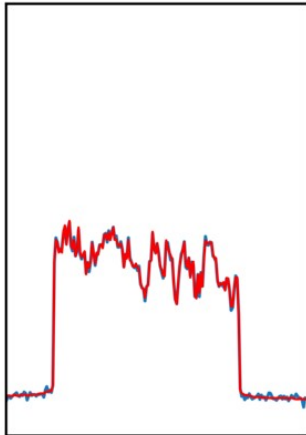
SNR: 20 dB



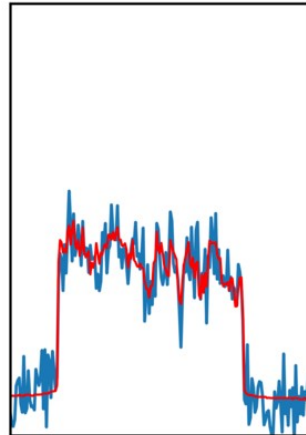
SNR: 10 dB



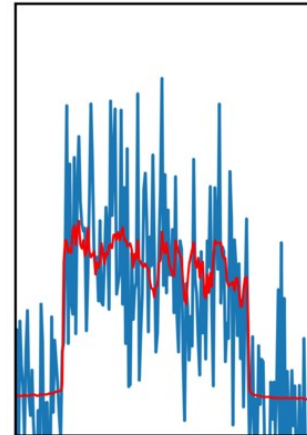
SNR: 0 dB



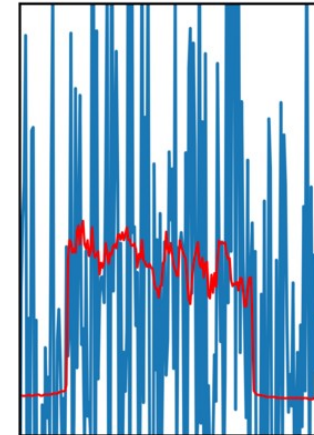
$S/\sigma = 100$



$S/\sigma = 10$



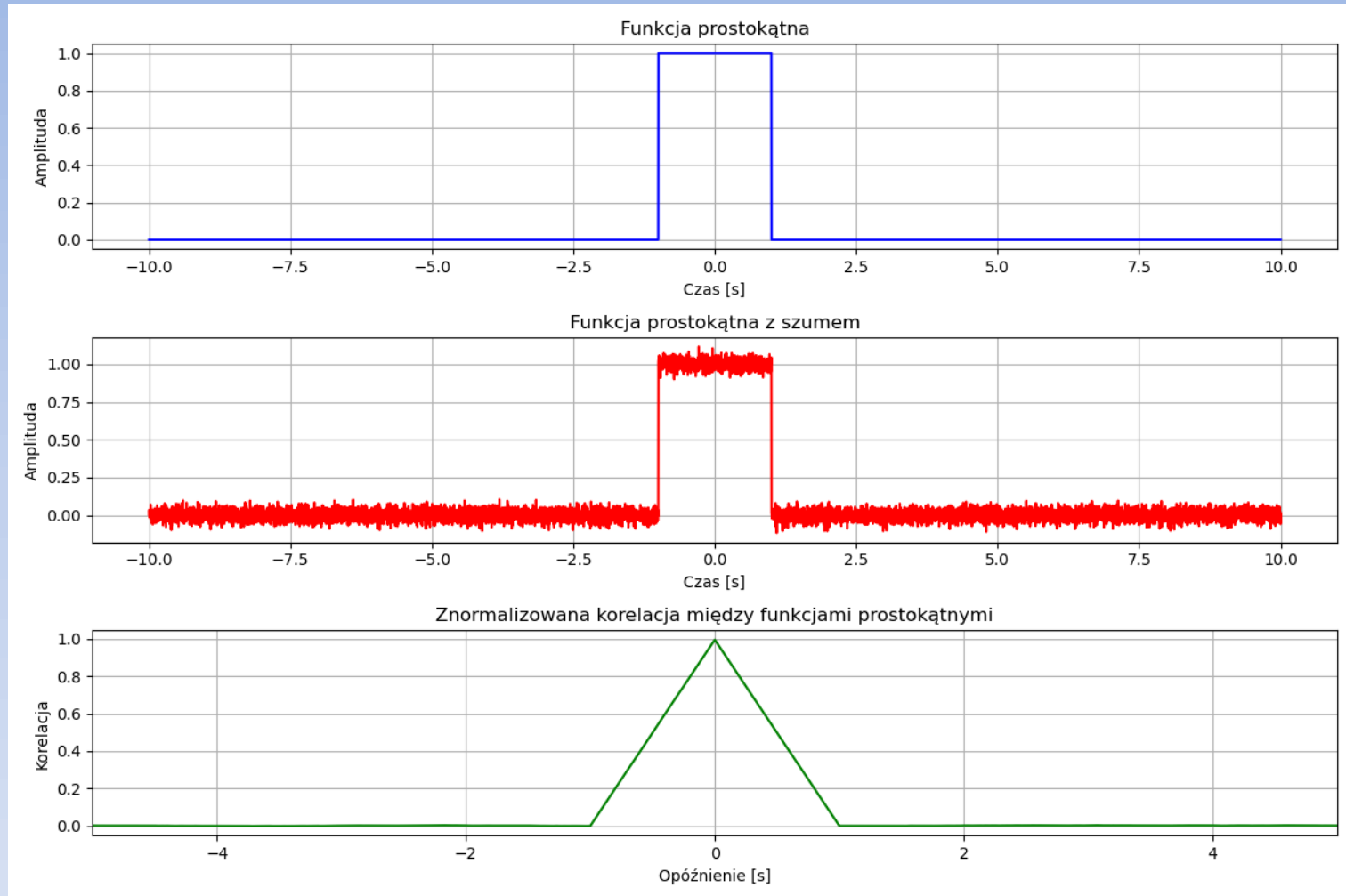
$S/\sigma = 3$



$S/\sigma = 1$

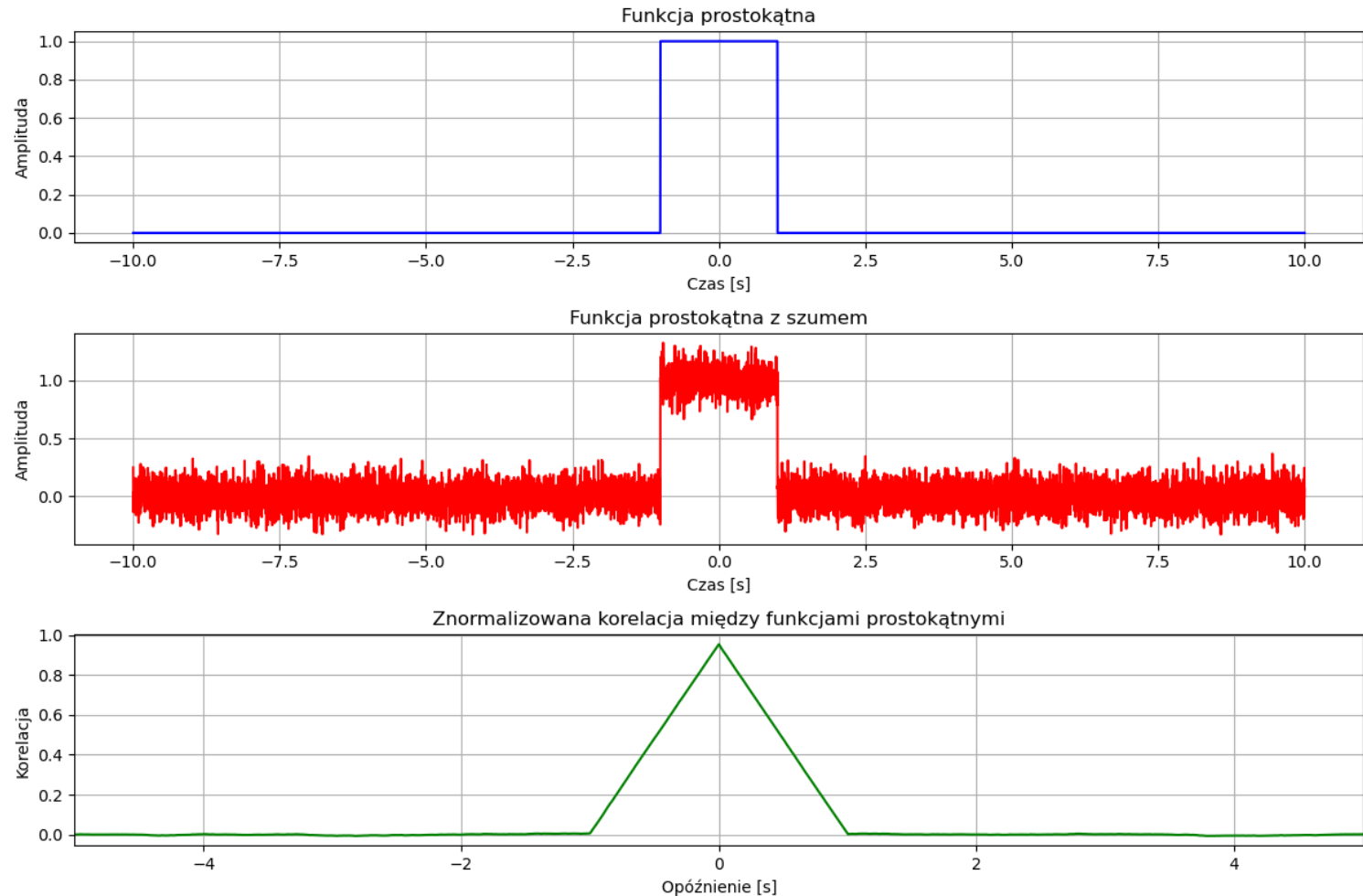
Przykład obrazu i funkcji z różnym SNR.

# Autokorelacja funkcji (sygnału)



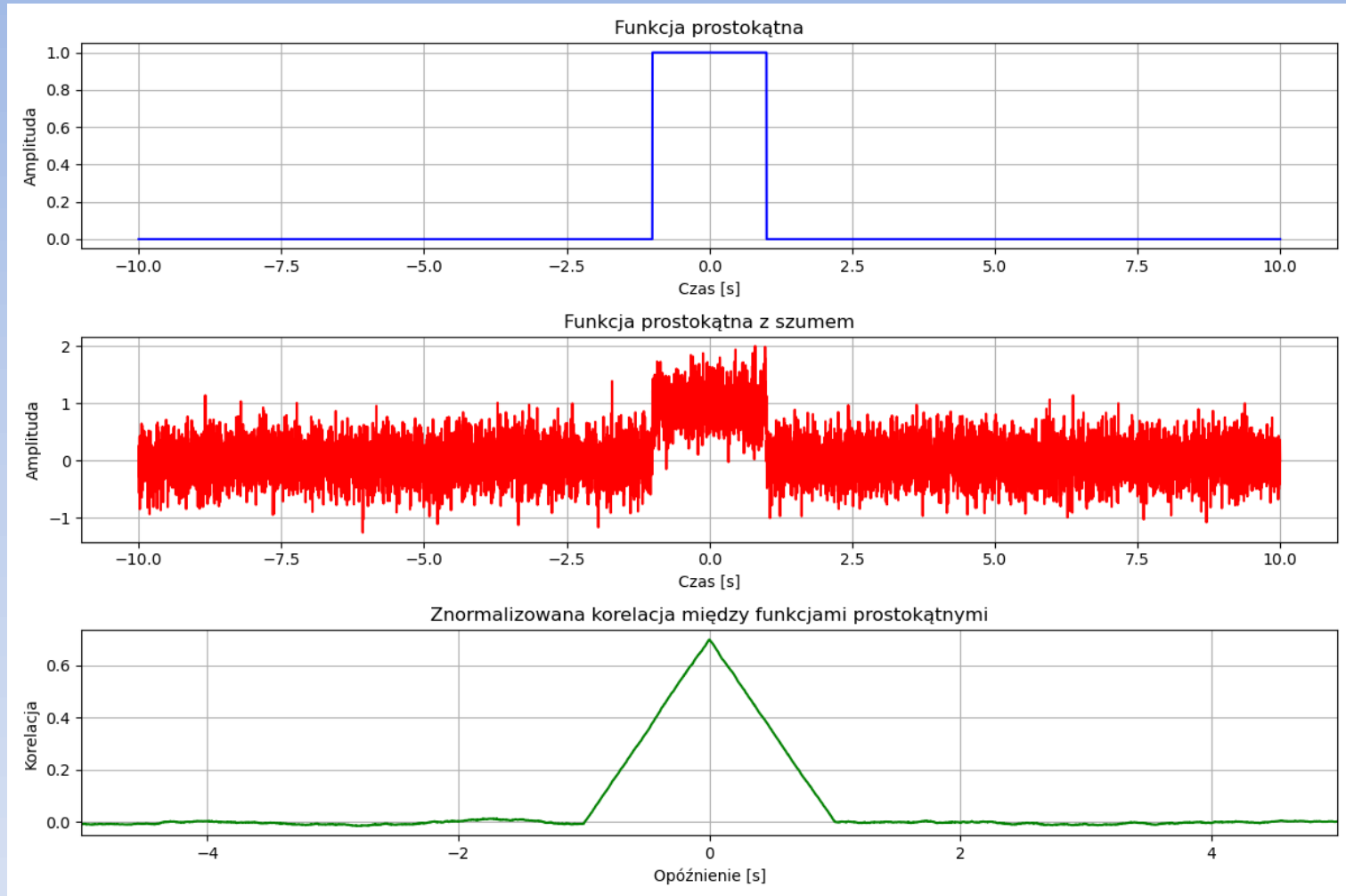
Przykład autokorelacji funkcji (sygnału) zawierającego 10000 punktów z których 10% ma wartość 1. SNR=100

# Autokorelacja funkcji (sygnału)



SNR=10

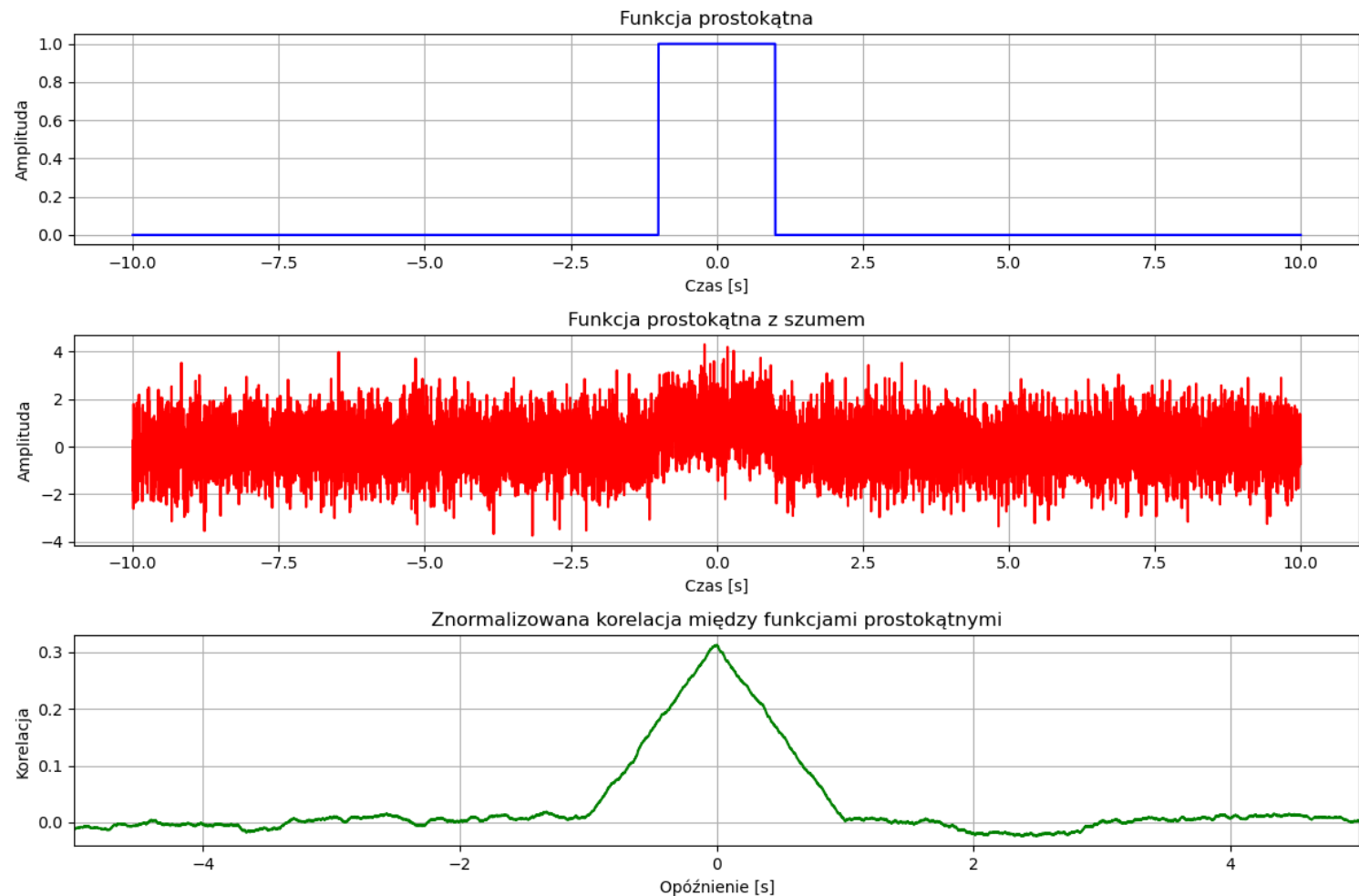
# Autokorelacja funkcji (sygnału)



SNR=1

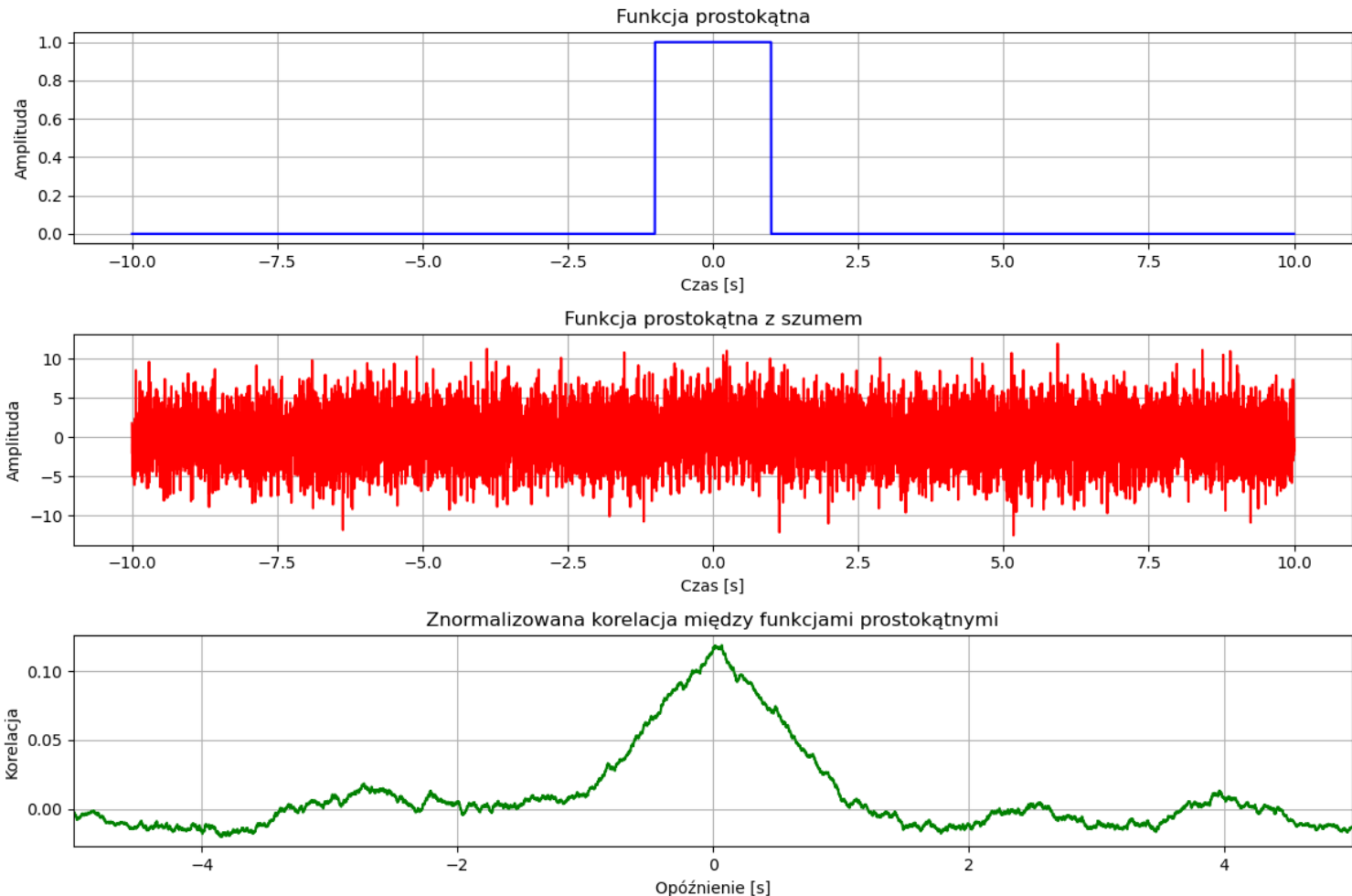


# Autokorelacja funkcji (sygnału)



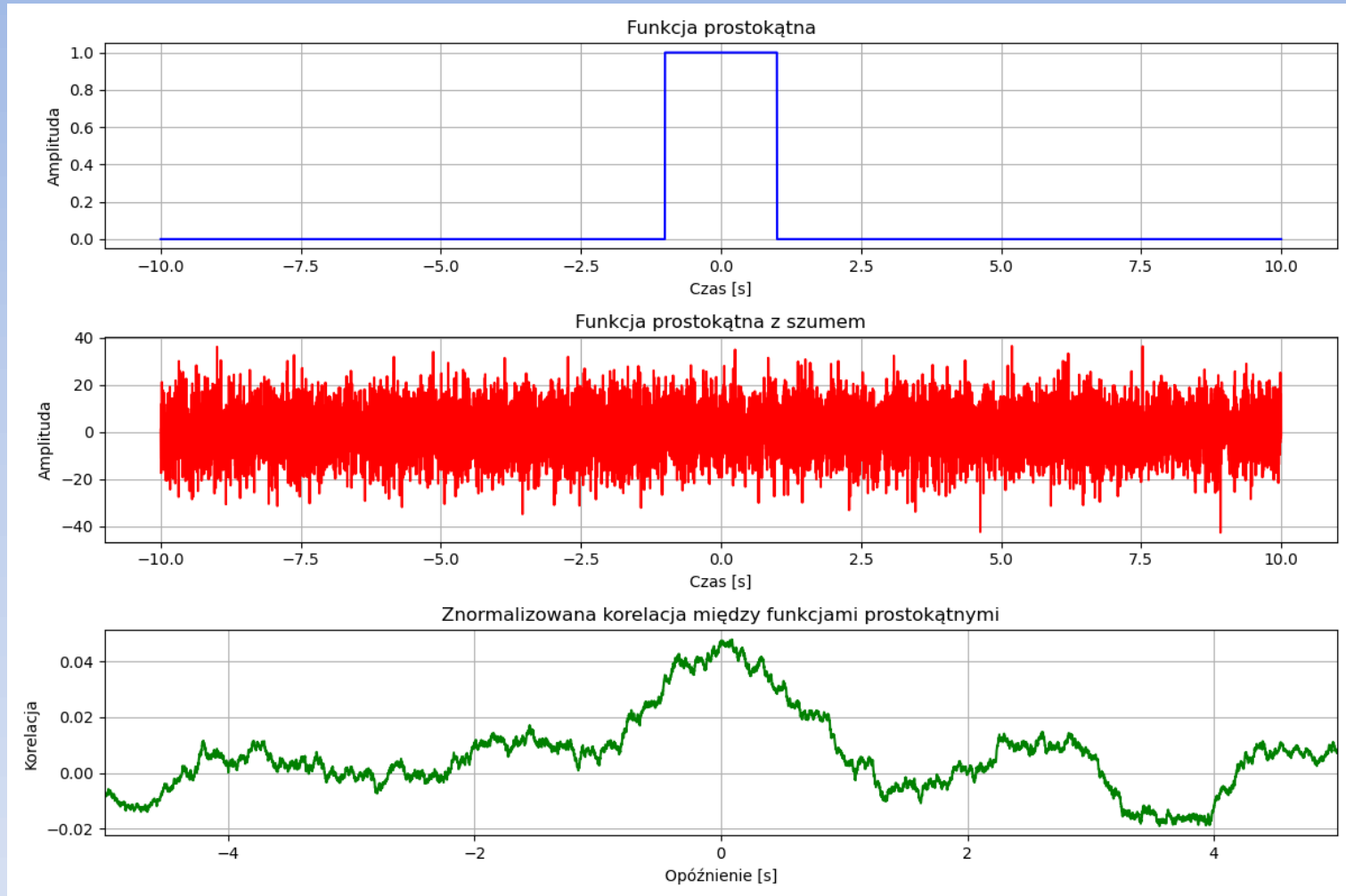
SNR=0.1

# Autokorelacja funkcji (sygnału)



SNR=0.01

# Autokorelacja funkcji (sygnału)



SNR=0.001

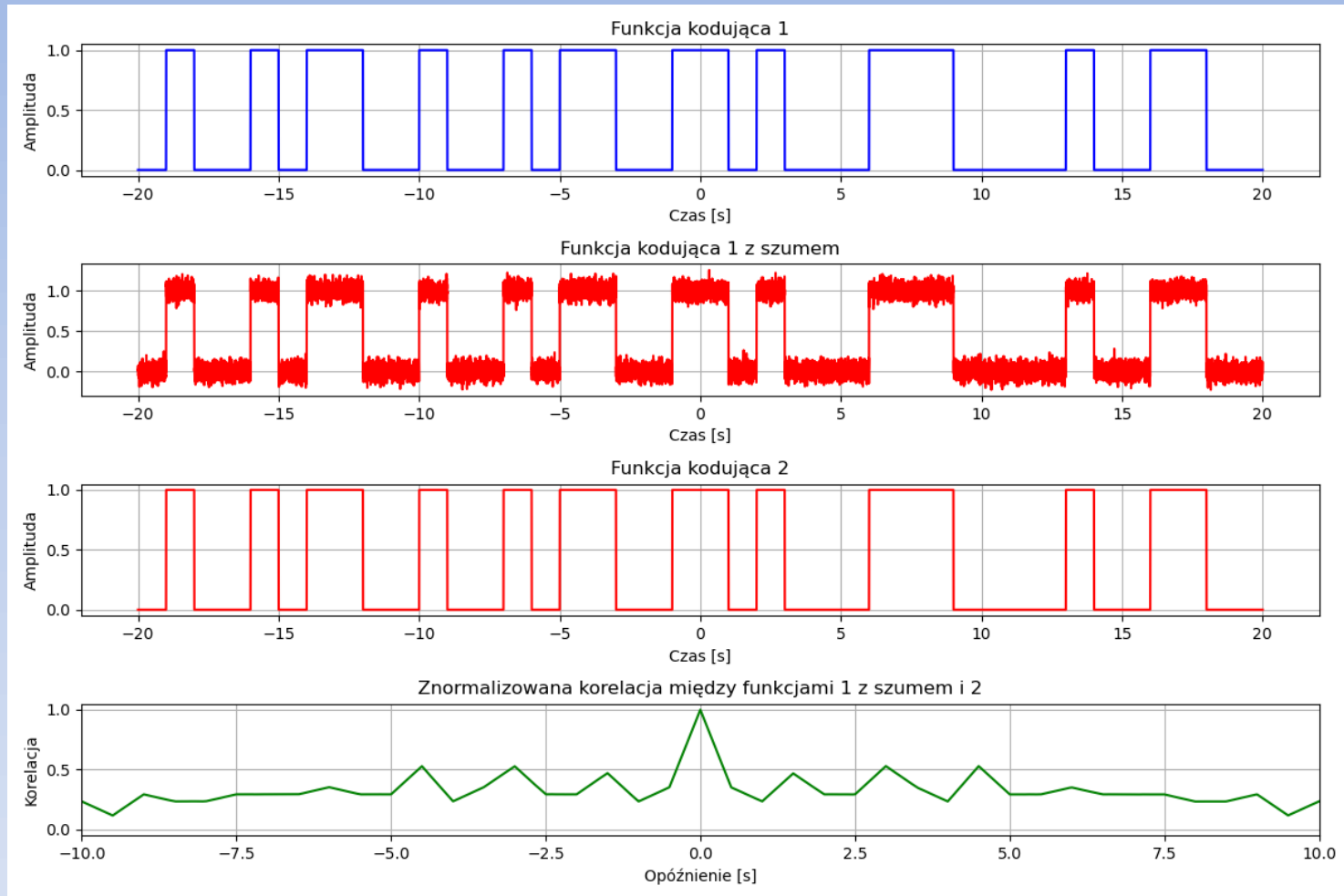
# Autokorelacja funkcji (sygnału)

W przypadku sygnałów z GPS koreluje się z całym ciągiem kodującym (a nie z jednym impulsem jak na przykładzie), co jeszcze zwiększa efektywność tej metody.

Formalnie jest to autokorelacja bo korelowane są te same funkcje.

Korelacja odebranego sygnału GPS ze znanym kodem PRN pozwala odczytać dane binarne pomimo silnego zaszumienia (max SNR  $\sim 1/32$ ).

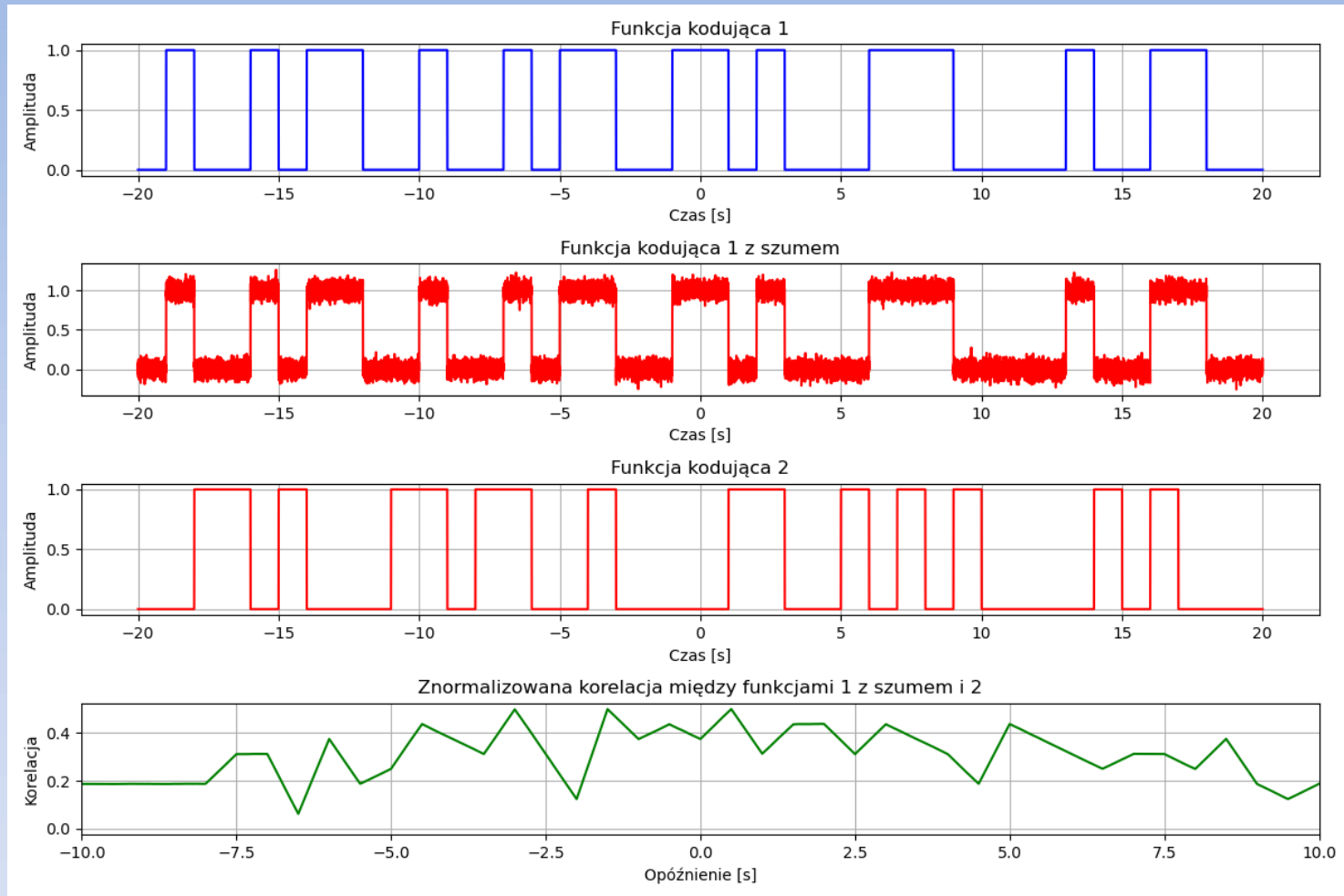
# Korelacja ciągów kodujących



Korelacja pomiędzy zgodnymi ciągami kodującymi.

SNR=100

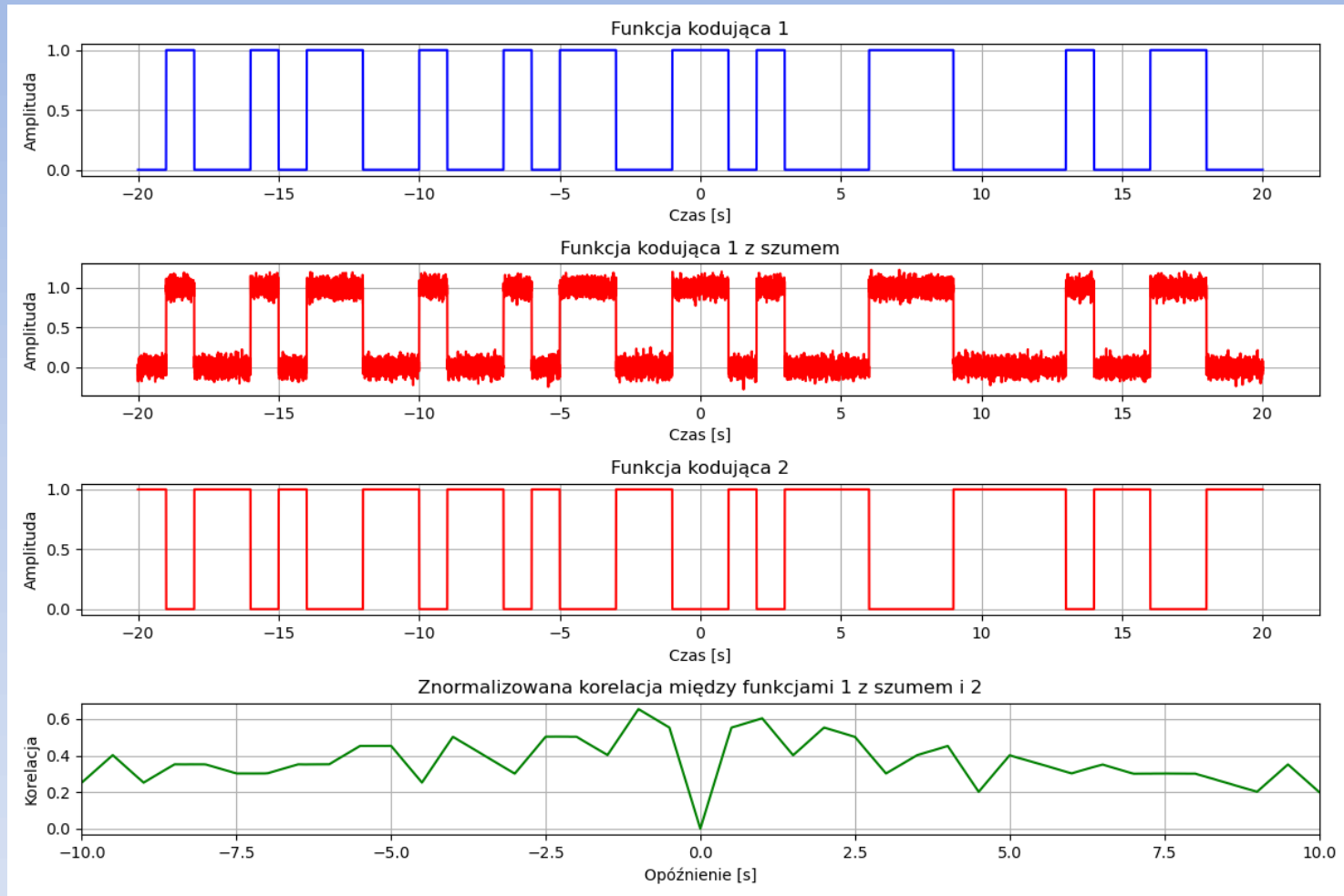
# Korelacja ciągów kodujących



Korelacja pomiędzy niezgodnymi ciągami kodującymi.

SNR=100

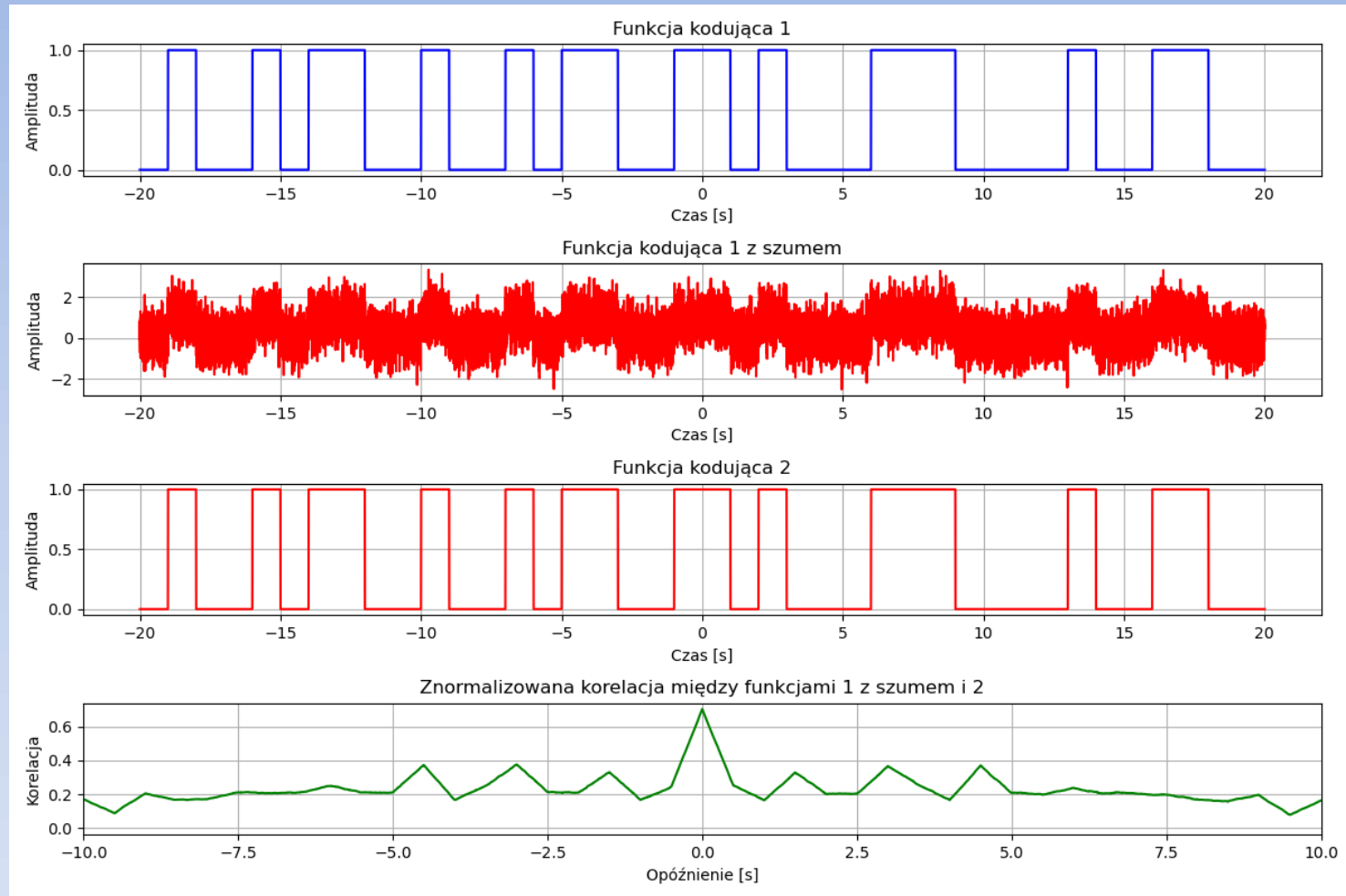
# Korelacja ciągów kodujących



Korelacja pomiędzy odwrotnymi ciągami kodującymi.

SNR=100

# Korelacja ciągów kodujących

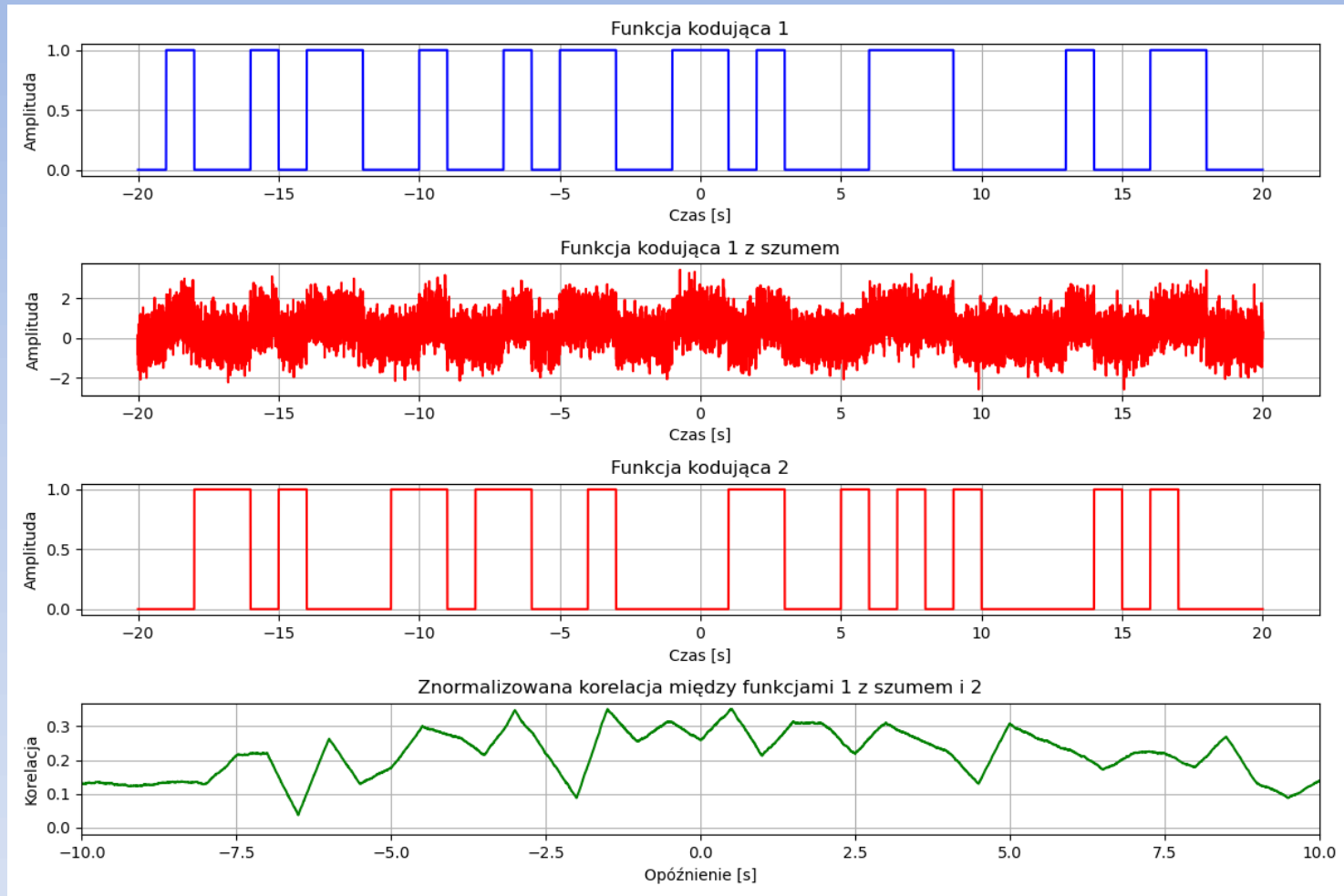


Korelacja pomiędzy zgodnymi ciągami kodującymi.

SNR=1



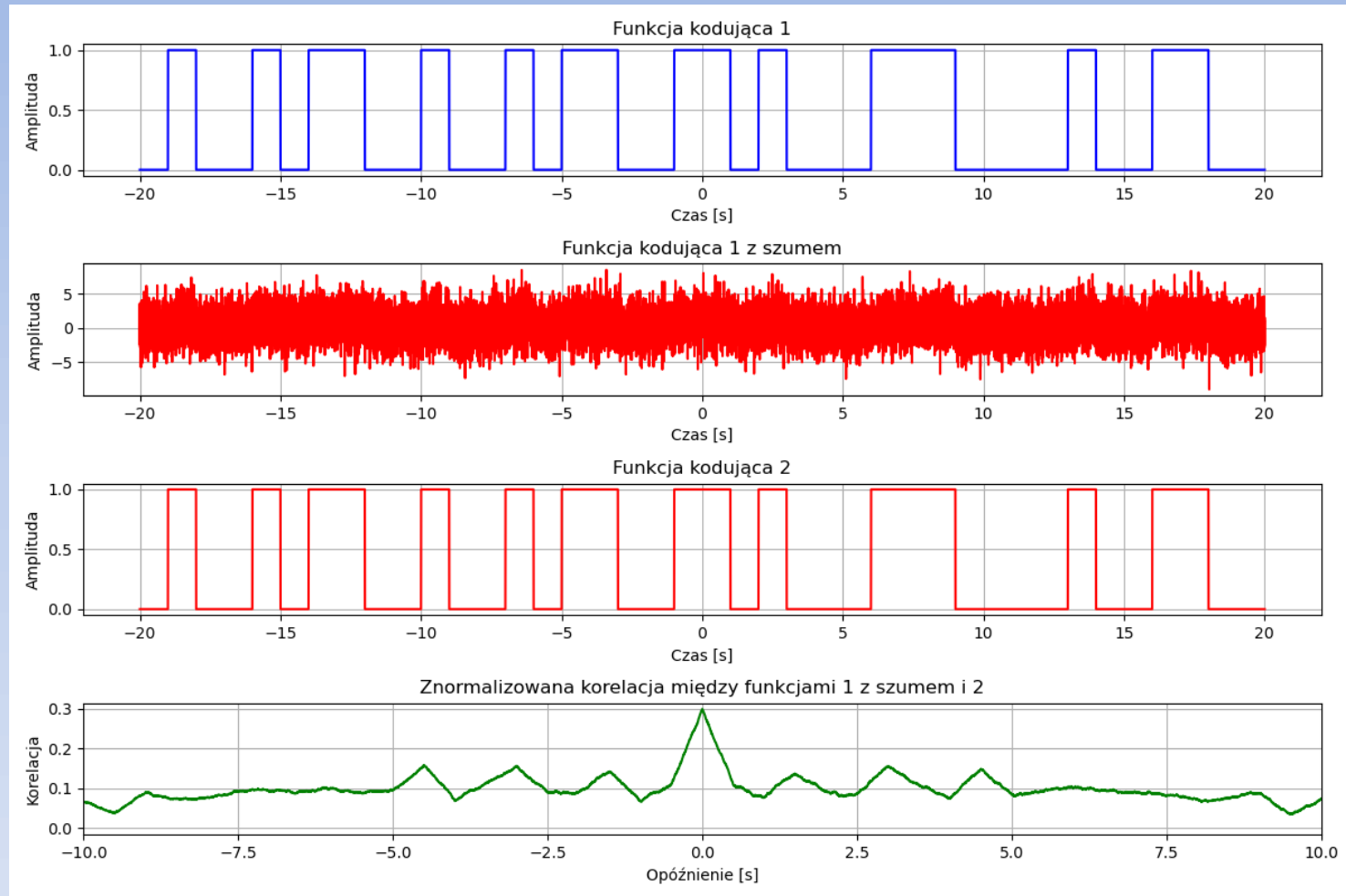
# Korelacja ciągów kodujących



Korelacja pomiędzy niezgodnymi ciągami kodującymi.

SNR=1

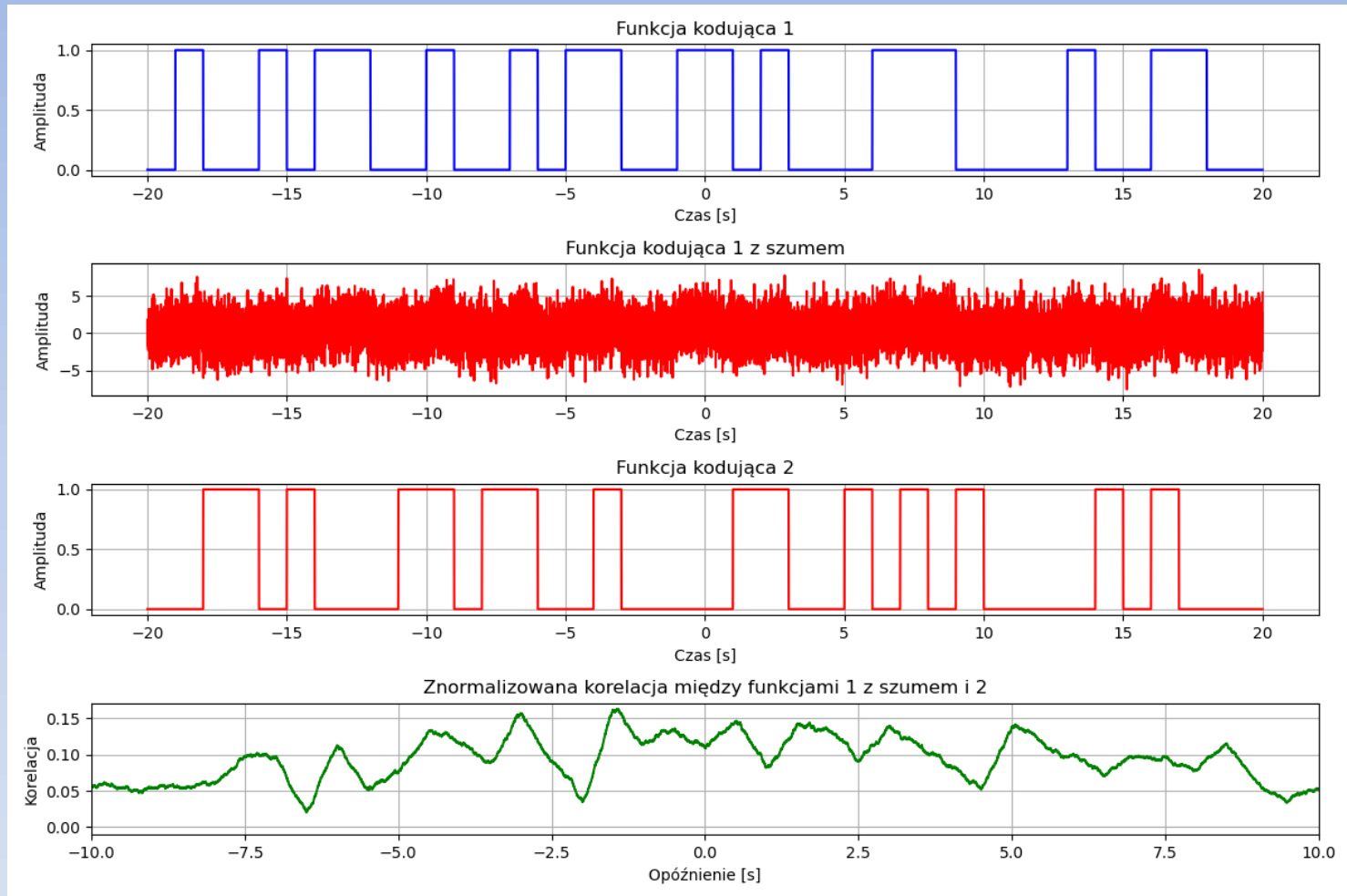
# Korelacja ciągów kodujących



Korelacja pomiędzy zgodnymi ciągami kodującymi.

SNR=0.1

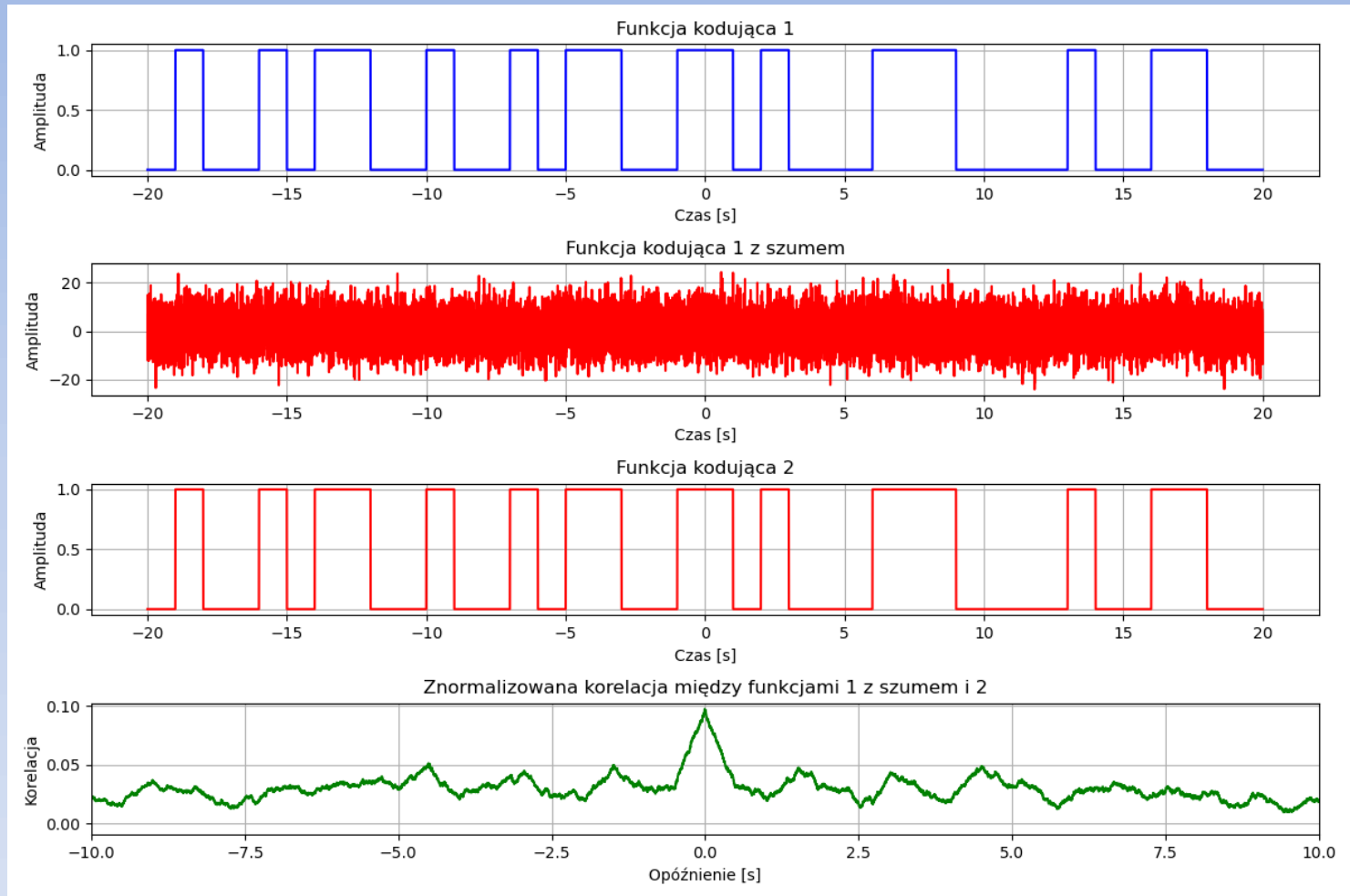
# Korelacja ciągów kodujących



Korelacja pomiędzy niezgodnymi ciągami kodującymi.

SNR=0.1

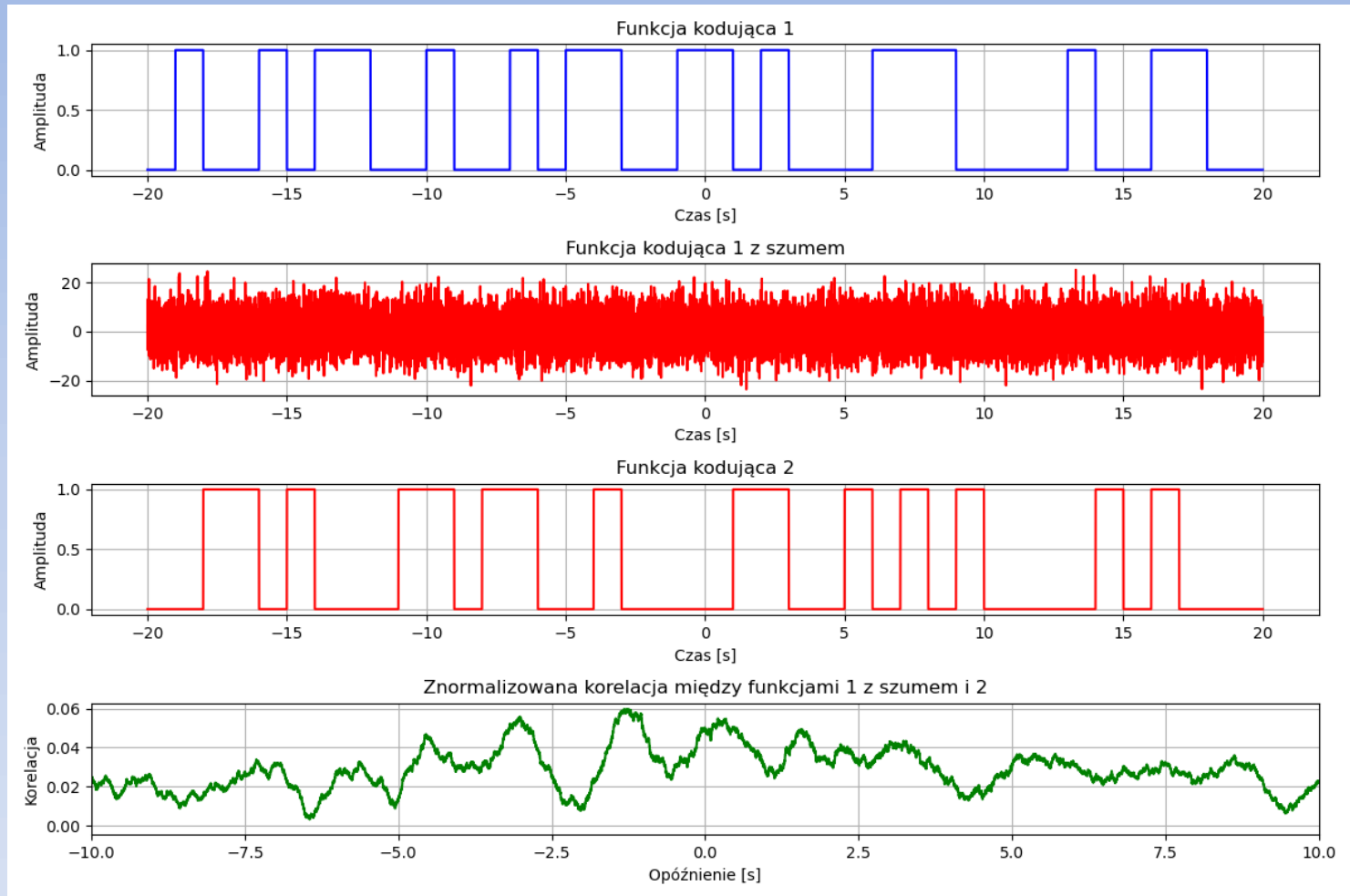
# Korelacja ciągów kodujących



Korelacja pomiędzy zgodnymi ciągami kodującymi.

SNR=0.01

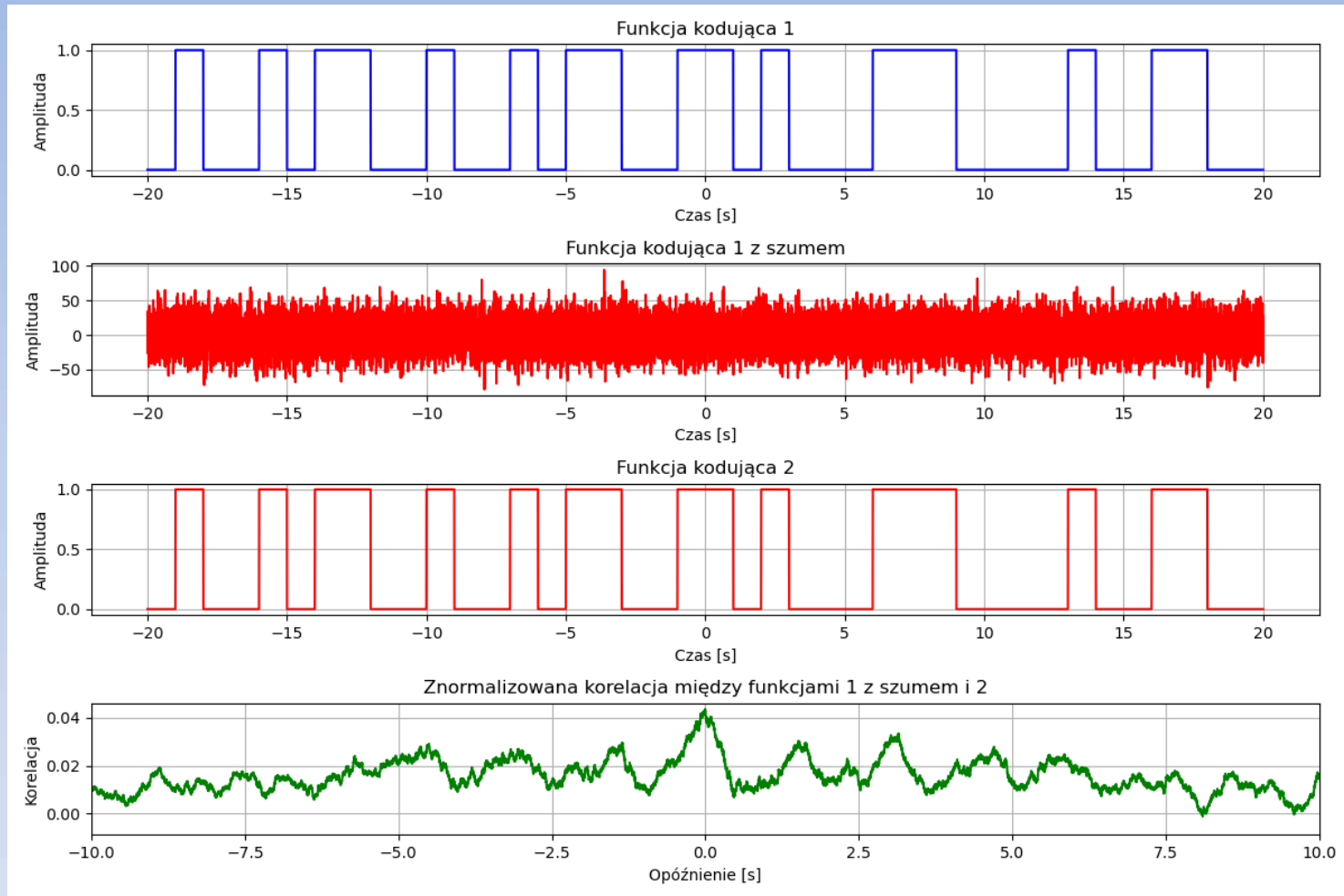
# Korelacja ciągów kodujących



Korelacja pomiędzy niezgodnymi ciągami kodującymi.

SNR=0.01

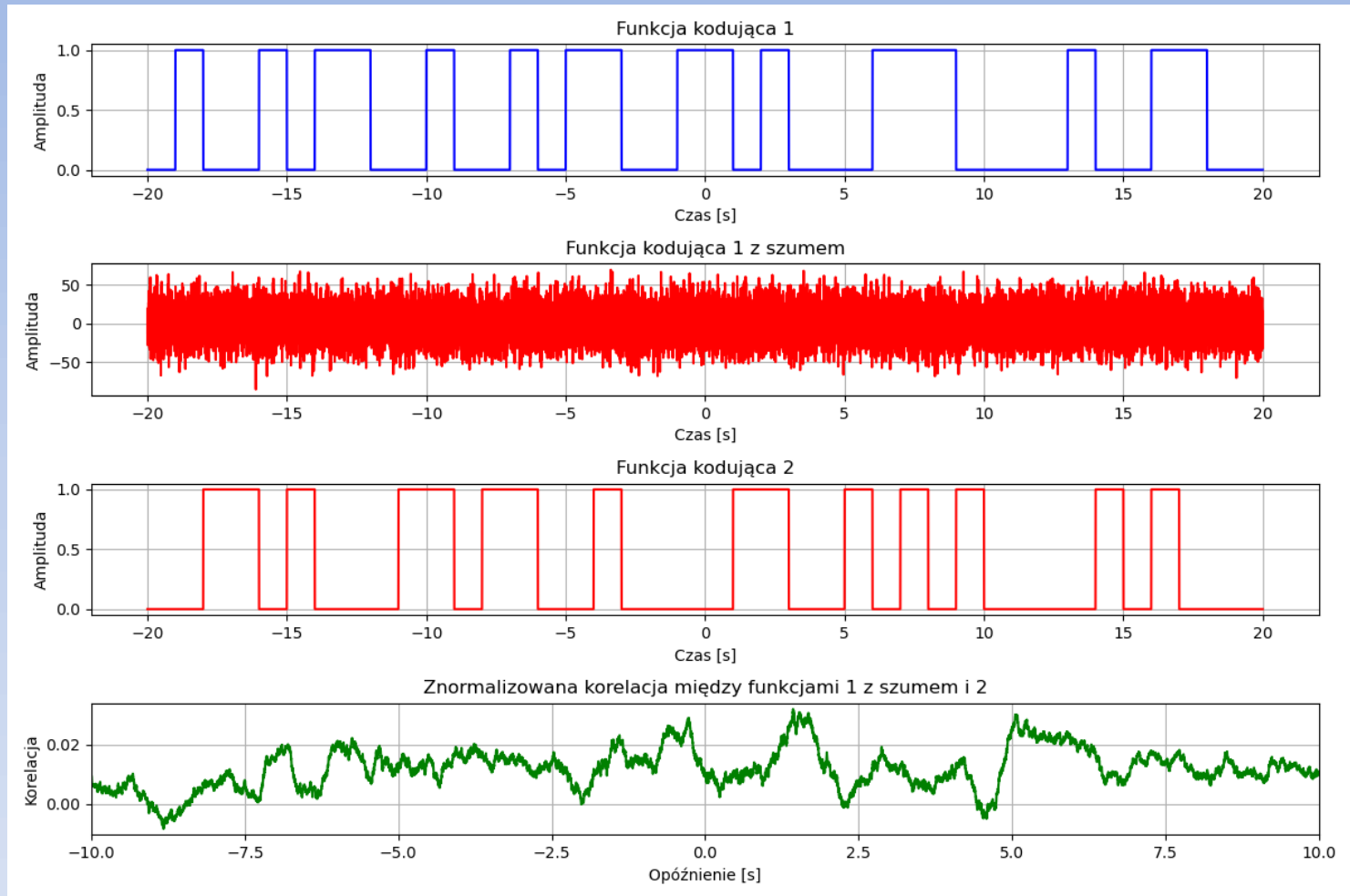
# Korelacja ciągów kodujących



Korelacja pomiędzy zgodnymi ciągami kodującymi.

SNR=0.001

# Korelacja ciągów kodujących



Korelacja pomiędzy niezgodnymi ciągami kodującymi.

SNR=0.001

# Modulacja sygnału GPS

Każdy satelita GPS nadaje równocześnie:

- na dwóch lub trzech kanałach:
  - pasmo L1, L2, nowsze też na paśmie L5
- co najmniej dwa zestawy ciągów kodujących:
  - kod C/A (na L1) i kod P (na L1 i L2)
- co najmniej jeden zestaw danych nawigacyjnych

Kod **P (precise, protected)** jest kodem precyzyjnym, utajnionym, a kod **C/A (clear acquisition)** ogólnodostępny.



# Modulacja sygnału GPS

Obie częstotliwości nośne każdego satelity są modulowane w fazie (czyli z kluczowaniem fazy PSK - Phase Shift Keying) sygnałami binarnymi  **$P(t)$ ,  $C(t)$  i  $D(t)$** .

$P_i(t)$ ,  $C_{C/A,i}(t)$  – modulacje kodu P i C/A (ciągi kodujące),  
 $D_i(t)$  – modulacja informacji nawigacyjnej (depeszy).

Funkcje  $P(t)$ ,  $C(t)$  i  $D(t)$  mają dozwolone tylko wartości -1 lub 1.

Równania sygnałów emitowanych przez i-tego satelitę na częstotliwości **L1** i **L2**, przy założeniu, że faza początkowa jest równa zeru, można przedstawić następująco:

$$S_{i1}(t) = A_p P_i(t) D_i(t) \cos(2\pi f_1 t) + 2A_{C/A} C_{C/A,i}(t) D_i(t) \sin(2\pi f_1 t)$$

$$S_{i2}(t) = A_p P_i(t) D_i(t) \cos(2\pi f_2 t)$$

$A_p$ ,  $A_{C/A}$  – amplitudy sygnału kodu P i C/A,

# Modulacja sygnału GPS

Kody C/A i P (ciągi kodujące, PRN) są wzajemnie obrócone w fazie o  $90^\circ$ , co pozwala nadawać je jednocześnie prawie bez wzajemnego zakłócania.

Generowane są binarnie (ciąg +1 lub -1) w formie tzw. pseudoprzypadkowego szumu, stąd nazwa **(pseudo-random noise) PRN**.

Epoka kodu **C/A** jest zsynchronizowana z epoką kodu **P**.

Kody C/A i P służą do identyfikacji satelitów oraz są bezpośrednio wykorzystywane w pomiarze czasu lotu fali określającej (pseudo)odległość do satelity.

Sygnały częstotliwości **L1** modulowane są dwoma kodami  $P_i(t)$  i  $C_{C/A,i}(t)$  a o częstotliwości **L2** jedynie kodem  $P_i(t)$ .

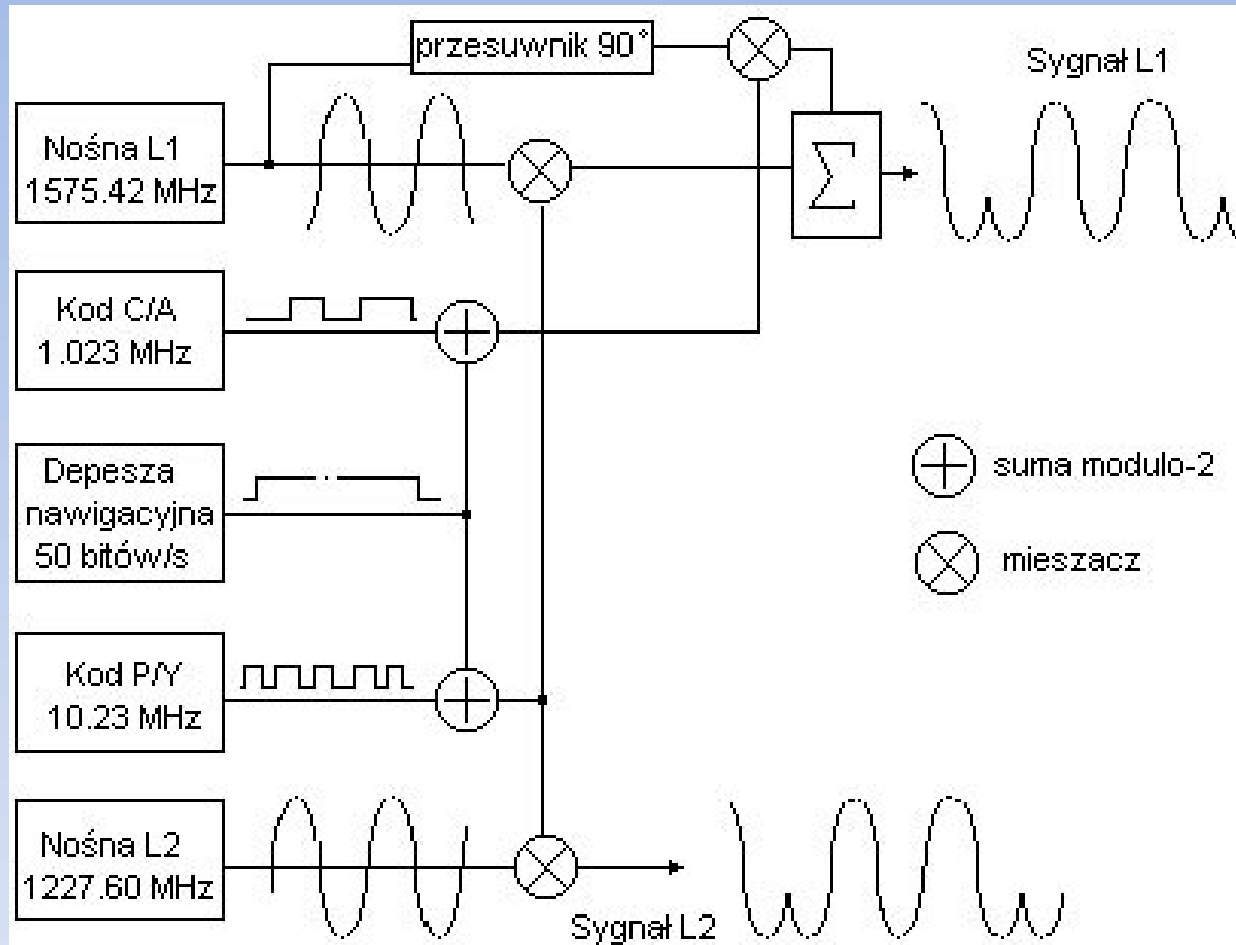
To powoduje, że użytkownik mający dostęp tylko do kodu C/A, nie ma możliwości odbioru sygnału na drugiej częstotliwości L2 i nie może tym samym policzyć poprawki jonosferycznej.

# Modulacja sygnału GPS

Oprócz kodów PRN (ale z ich wykorzystaniem), nadawana jest również informacja nawigacyjna  $D_i(t)$  zawierająca zbiór danych niezbędnych do wyznaczenia pozycji satelitów (parametry orbitalne itp.) i inne przydatne informacje.

Detale za kilka slajdów.

# Modulacja sygnału GPS



# Ciąg kodujący – kod C/A

Kod  $C_i(t)$  charakteryzujący  $i$ -tego satelitę jest ciągiem liczb, iloczynem dwóch kodów liczących maksimum po 1023 sygnały binarne: kodu  $C_1(t)$  i opóźnionego o  $m_i$  elementów kodu  $C_2(t)$ :

$$C_i(t) = C_1(t) \cdot C_2(t + m_i \cdot 10T)$$

Gdzie  $m_i$  jest liczbą z przedziału  $\langle 0, 1022 \rangle$ , charakterystyczną dla  $i$ -tego satelity. Parametr  $T$  jest równy czasowi trwania jednego sygnału kodu  $P$ .

Można wyróżnić **1023** różne kody  $C_i(t)$ , który każdy może zostać przyjęty za kod C/A charakteryzujący danego satelitę, ale dotychczas używano jedynie 32 takie kody.

Częstotliwość kodu C wynosi **1,023 MHz**, co odpowiada długości **293,1 m**.

W takich też odstępstwach, czyli po **1540** cyklach fali nośnej **1575,42 MHz**, (co  $9.77 \cdot 10^{-7}$ s) pojawia się kolejny sygnał binarny kodu C/A, czyli przesunięcie (1) lub brak przesunięcia (0) w fazie fali nośnej.

# Ciąg kodujący – kod C/A

Przedstawiona metoda generowania ciągu kodującego C/A produkuje tzw. ciągi Golda (od Roberta Golda).

Używane są one dlatego, że charakteryzują się niewielką wartością korelacji wzajemnej poszczególnych ciągów.

Przez to korelacja odebranego sygnału z niewłaściwym ciągiem kodującym daje niskie wartości, a z właściwym ciągiem kodującym daje wartości wysokie.

Właśnie ta cecha sprawia, że nazywane są pseudolosowymi, bo ciągi liczb losowych również słabo się korelują.

Duża część kodów Golda posiada również niemal równą liczbę 0 i 1, co również jest korzystne przy sygnałach radiowych.

# Ciąg kodujący – kod C/A

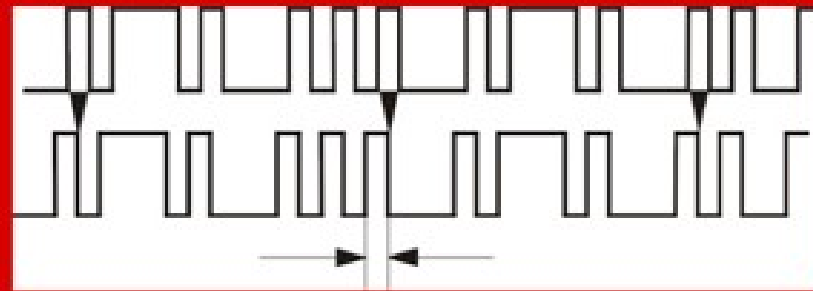
Ponieważ kod C/A powtarza się co 1 ms, to wprowadza niejednoznaczność w pomiarze odległości do satelity wynoszącą  $0.001c = 299.8$  km.

Rozwiązuje się ją używając również bitów depeszy nawigacyjnej, która powtarza się znacznie rzadziej.

Można też użyć przesunięć dopplerowskich równocześnie z pomiarami odległości by określić które rozwiązanie jest właściwe.

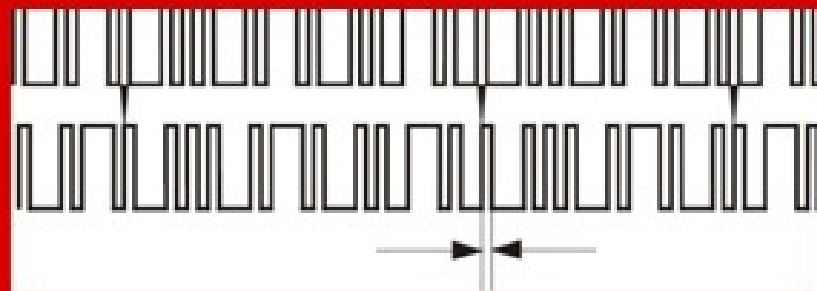
# Ciąg kodujący – kod P

## Pomiary kodowe Kod C/A 1,023 MHz



1 impuls ~ 1 mikrosekunda = 300 m

## Kod P 10,23 MHz



1 impuls ~ 1/10 mikrosekundy = 30 m



# Ciąg kodujący – kod P

Kod P jest również ciągiem Golda, ale w odróżnieniu od kodu C/A jest znacznie dłuższy i stosowany jest tylko jeden.

Pełna sekwencja kodu P składa się z  $2.35 \cdot 10^{14}$  chipów.

Częstotliwość kodu P jest 10x większa niż C/A: 10.23 Mchip/s, co nieco zwiększa odporność na zakłócenia.

1 chip kodu P trwa 0.1ms, co odpowiada 29.9m.

Każdy satelita nadaje tylko swój, unikalny fragment pełnej sekwencji P, o długości  $6.187 \cdot 10^{12}$  chipów.

Fragment kodu P danego satelity jest nadal tak długi, że powtarza się dopiero po tygodniu, co eliminuje niejednoznaczność pomiaru (pseudo)odległości.

# Ciąg kodujący – kod P

W dniu 31 stycznia 1994 roku kod P został dodatkowo zaszyfrowany nieznanym kodem  $W$ , w wyniku czego powstał kod  $Y ( P(Y) )$ .

Jest to kod ściśle tajny Departamentu Obrony USA, o którym w literaturze ogólnodostępnej, w tym również wysoce specjalistycznej, brak jest jakichkolwiek informacji.

Wiadomo jedynie, że w określonych sytuacjach, gdy dostęp do niektórych funkcji systemu GPS przez ogół użytkowników nie jest pożądanym przez właściciela systemu, kod  $P$  zostaje przekształcony w na kod  $Y$ .

# Ciąg kodujący – podsumowanie

	<i>Sinus wave</i>	<i>Cosinus wave</i>
<b>Type of Code</b>	C/A - Code	P- Code
<b>Modulation Code</b>	$f_0/10=1,023$ MHz	$f_0=10,23$ MHz
<b>Period</b>	1 ms	266 days
<b>Number of Elements +/- 1</b>	1023	$235109952 * 10^{-6}$
<b>Ratio of Carrier frequency: modulation rate</b>	1540	154
<b>Wavelength of the code</b>	293 m	29,3 m

# Zmodernizowana modulacja sygnału GPS

Satelity z nowym modułem (IIR-M) nadają sygnały modulowane dodatkowo przez kod wojskowy  $M_i(t)$  i nowym kod cywilny  $C_{RC}$  (*RC - replacement code*).

$$S_{i1}(t) = A_p P_i(t) D_i(t) \cos(2\pi f_1 t) + A_{C/A} C_{C/A,i}(t) D_i(t) \sin(2\pi f_1 t) + M_i(t)$$

$$S_{i2}(t) = A_p P_i(t) D_i(t) \cos(2\pi f_2 t) + A_{CR} C_{RC,i}(t) F\{D_i(t)\} \sin(2\pi f_1 t) + M_i(t)$$

W przypadku każdego satelity kod RC wykorzystuje dwa różne kody PRN.

Pierwszy z nich to kod o średniej długości (10230 chipów) oznaczony symbolem **CM (Civil Moderate)**,

Drugi zaś to kod o dużej długości (767250 chipów) o symbolu **CL (Civil Long)**.

Różnica między C/A a RC dotyczy również liczby bitów mieszczących się w jednej sekundzie depezy nawigacyjnej (**C/A=50 bitów /s, RC=25 bitów/s**).

Ma to na celu umożliwienie odbioru sygnału w pomieszczeniach zamkniętych.

# Depesza nawigacyjna

Obie częstotliwości nośne emitowane przez satelitę  $S_i$  modulowane są depeszą nawigacyjną zawierającą między innymi:

- **efemerydę**, czyli szczegółowe elementy orbitalne satelity  $S_i$  niezbędne do obliczenia na wybrany moment jego współrzędnych, do określenia momentu wysłania sygnału oraz ustalenie czasu GPS
- **almanach**, czyli dane dotyczące aktualnego stanu systemu, w tym między innymi przybliżone elementy orbitalne wszystkich znajdujących się na orbitach satelitów, co przyspiesza proces aktywacji odbiornika.

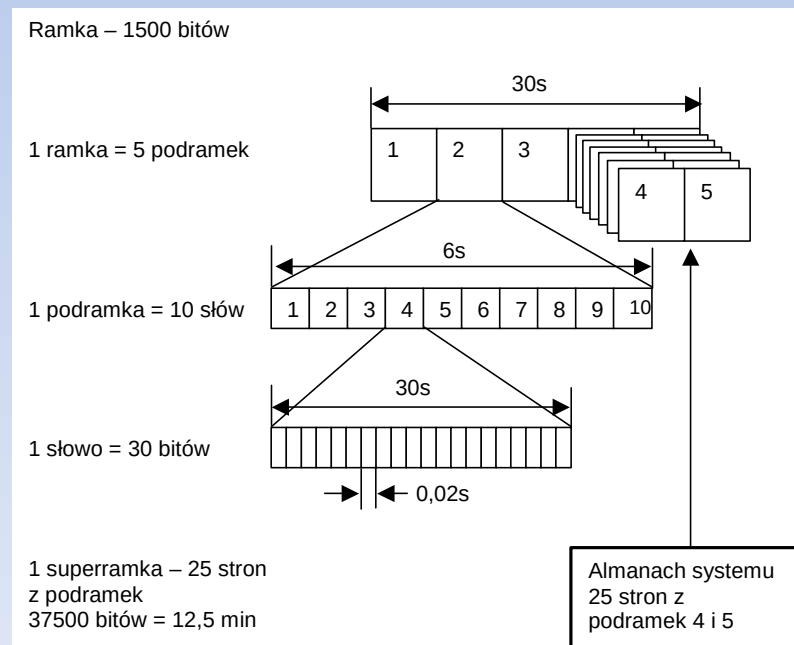
Depesza nawigacyjna jest przekazywana z satelity do odbiornika zgodnie z kodem  $D_i(t)$  z prędkością **50 bitów/s**.

# Depesza nawigacyjna

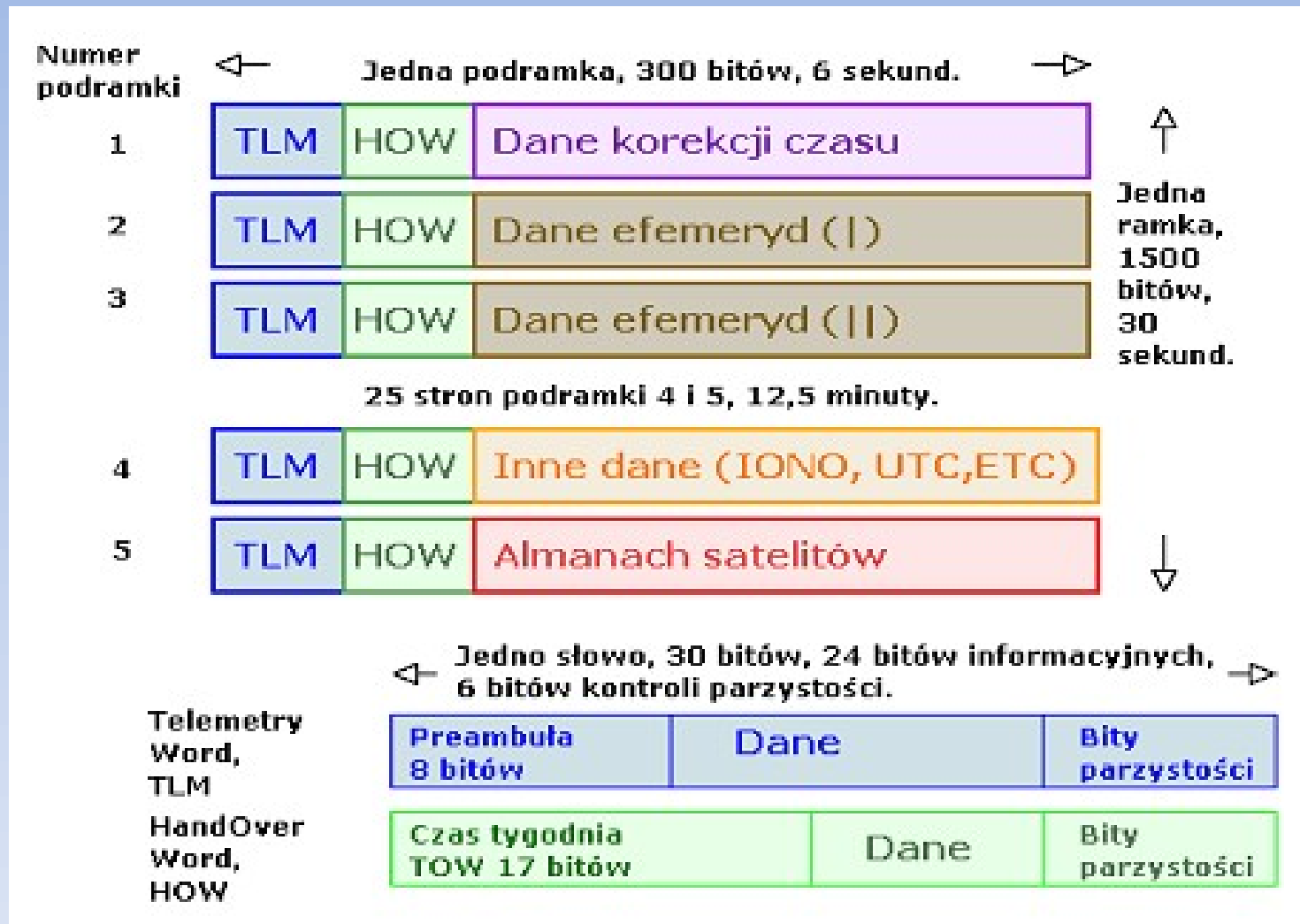
Depesze nawigacyjną tworzy **25 ramek**, każda po **1500 bitów**.  
Czas trwania jednej ramki wynosi **30 s**, a całej depeszy **12,5 min**.

Każda ramka dzieli się na **5 sześciosekundowych podramek**  
(zwanym czasami sekwencjami bądź tablicami),  
których każda liczy **10 słów trzydziestobitowych**.

Transmisja jednego słowa trwa **0,6 sekundy** a jednego bitu **0,02 s**.



# Depesza nawigacyjna



Jedna z 25 ramek depeszy, zajmująca 1500 bitów, składa się z 5 podramek.

# Depesza nawigacyjna

Parametry przesyłane w pierwszej podramce trzydziestosekundowej ramki depeszy nawigacyjnej

Parametr		Słowo	Numery bitów	Liczba bitów	Jednostka
symbol	definicja				
WN	numer tygodnia GPS	3	61–70	10	–
URA	dokładność pomiaru pseudoodległości	3	73–76	4	–
SV Health	„zdrowie” satelity	3	77–82	6	–
IODC	numer zestawu danych	3	83–84	10	–
	korekty zegara satelity	8	211–218		
$T_{GD}$	opóźnienie propagacyjne	7	197–204	8	s
$t_{oc}$	poprawka czasu zegara satelity	8	219–234	16	s
$\alpha_{f2}$	współczynniki wielomianu opisującego poprawkę zegara satelity	9	241–248	8	s/s <sup>2</sup>
$\alpha_{f1}$		9	249–264	16	s/s
$\alpha_{f0}$		10	271–292	22	s



# Depesza nawigacyjna

Efemerydy orbitalne przesyłane w drugiej podramce trzydziestosekundowej ramki depeszy nawigacyjnej

Parametr		Słowo	Numery bitów	Liczba bitów	Jednostka
symbol	definicja				
IODE	parametr odniesienia dla danych efemerydalnych	3	61–68	8	–
$C_{rs}$	wyraz poprawkowy sinusoidalny do promienia orbity	3	69–84	16	m
$\Delta n$	przyrost ruchu średniego	4	91–106	16	rad/s
$M_o$	anomalia średnia w chwili odniesienia	4	107–114	32	rad
		5	121–144		
$C_{uc}$	wyraz poprawkowy cosinusoidalny do argumentu szerokości	6	151–166	16	rad
$e$	mimośród orbity	6	167–174	32	–
		7	181–204		
$C_{us}$	wyraz poprawkowy sinusoidalny do argumentu szerokości	8	211–226	16	rad
$a^{1/2}$	pierwiastek kwadratowy z dużej półosi orbity	8	227–234	32	$m^{1/2}$
		9	241–264		
$t_{oe}$	czas odniesienia efemerydy	10	271–286	16	s

# Depesza nawigacyjna

Efemerydy orbitalne przesyłane w trzeciej podramce trzydziestosekundowej ramki depeszy nawigacyjnej

Parametr		Słowo	Numery bitów	Liczba bitów	Jednostka
symbol	definicja				
$C_{ic}$	wyraz poprawkowy cosinusoidalny do kąta inklinacji	3	61–76	16	rad
$\Omega_e$	długość geograficzna węzła wstępującego orbity w epoce tygodnia	3	77–84	32	rad
		4	91–114		
$C_{is}$	wyraz poprawkowy sinusoidalny do kąta inklinacji	5	121–136	16	rad
$i_o$	kąt inklinacji w chwili odniesienia	5	137–144	32	rad
		6	151–174		
$C_{rc}$	wyraz poprawkowy cosinusoidalny do promienia orbity	7	181–196	16	m
$\omega$	argument perygeum	7	197–204	32	rad
		8	211–234		
$\dot{\Omega}_e$	pochodna $\Omega_e$ względem czasu	9	241–264	24	rad/s
IODE	pierwiastek kwadratowy z dużej półosi orbity	10	271–278	8	–
idot	pochodna kąta $i$ względem czasu	10	279–292	14	rad/s

# Depesza nawigacyjna

## Almanach depeszy nawigacyjnej

Parametr		Słowo	Numery bitów	Liczba bitów	Jednostka
symbol	definicja				
$e$	mimośród orbity	3	69–84	16	–
$t_{oa}$	czas odniesienia almanachu	4	91–98	8	s
$\delta_i$	odchyłka inklinacji od 54°	4	99–114	16	rad
$\dot{\Omega}_o$	pochodna $\Omega_o$ względem czasu	5	121–136	16	rad/s
$a^{1/2}$	pierwiastek kwadratowy z dużej półosi orbity	7	151–174	24	m <sup>1/2</sup>
$\Omega_o$	długość geograficzna węzła wstępującego orbity w epoce tygodnia	7	181–204	24	rad
$\omega$	argument perygeum	8	211–234	24	rad
$M_o$	anomalia średnia w chwili odniesienia	9	241–264	24	rad
$\alpha_{f0}$	współczynniki wielomianu opisującego poprawkę zegara satelity	10	271–278 290–292	11	s
$\alpha_{f1}$		10	279–289	11	s/s

# Depesza nawigacyjna

Parametry UTC przesyłane na 18 stronie w czwartej podramce depeszy nawigacyjnej

Parametr		Słowo	Numery bitów	Liczba bitów	Jednostka
symbol	definicja				
$A_1$	współczynniki wielomianu	6	151–174	24	–
$A_0$		7	181–204	32	s
		9	249–256		
WN	bieżący numer tygodnia	8	211–218	8	tydzień
$t_{ot}$	czas odniesienia danych UTC	8	219–226	8	s
$WN_r$	numer tygodnia UTC	8	227–234	8	tydzień
$\Delta t_{LS}$	poprawka czasowa wynikająca z sekund przestępnych	9	241–248	8	s
DN	numer dnia tygodnia	9	249–256	8	dzień
$\Delta t_{LSF}$	poprawka czasowa	10	271–278	8	s

# Protokół NMEA

## NMEA 0183 (National Marine Electronics Association)

Protokół NMEA określa sposób komunikacji między odbiornikiem GPS, sonarem, kompasem, żyroskopem, autopilotem itp. a innymi urządzeniami elektronicznymi.

Przykładowe zapytanie do odbiornika GPS:

```
$CCGPQ,GGA, [CR][LF]
```

Odpowiedź odbiornika GPS:

```
$GPGGA,031956,2218.2035,N,11410.7595,E,1,04,3,9,005.9,M,-001.3,M,,*51
```

# Protokół NMEA

## Sentence

## Description

\$GPGGA:	Global positioning system fixed data
\$GPGLL:	Geographic position - latitude / longitude
\$GPGSA:	GNSS DOP and active satellites
\$GPGSV:	GNSS satellites in view
\$GPRMC:	Recommended minimum specific GPS data
\$GPVTG:	Course over ground and ground speed

# Protokół NMEA

## Format zdania typu GGA


\$GPGGA,092204.999,4250.5589,S,14718.5084,E,1,04,24.4,19.7,M,,,,0000\*1F

Pole	Przykład	Komentarz
Sentence ID	\$GPGGA	
UTC Time	092204.999	hhmmss.sss
Latitude	4250.5589	ddmm.mmmm
N/S Indicator	S	N = North, S = South
Longitude	14718.5084	dddmm.mmmm
E/W Indicator	E	E = East, W = West
Position Fix	1	0 = Invalid, 1 = Valid SPS, 2 = Valid DGPS, 3 = Valid PPS
Satellites Used	04	Satellites being used (0-12)
HDOP	24.4	Horizontal dilution of precision
Altitude	19.7	Altitude (WGS-84 ellipsoid)
Altitude Units	M	M= Meters
Geoid Separation		Geoid separation (WGS-84 ellipsoid)
Seperation Units		M= Meters
Time since DGPS		in seconds
DGPS Station ID		
Checksum	*1F	always begin with *

# Protokół NMEA

## Format zdania typu GGA

\$GPGGA,092204.999,4250.5589,S,14718.5084,E,1,04,24.4,19.7,M,,,,0000\*1F

- Fix quality: 
  - 0 = invalid
  - 1 = GPS fix (SPS)
  - 2 = DGPS fix
  - 3 = PPS fix
  - 4 = Real Time Kinematic
  - 5 = Float RTK