

Jacek Januszewski

# Charakterystyka sygnałów systemów satelitarnych i radionawigacyjnych dziś oraz w przyszłości

**Ostatnie lata przyniosły wiele istotnych zmian w statusach operacyjnych i praktycznej eksploatacji nawigacyjnych systemów satelitarnych (NSS) i naziemnych systemów radionawigacyjnych (NSRN), w tym także charakterystyce sygnałów tych systemów. W artykule opisano sygnały transmitowane przez obecne i przyszłe satelity systemów GPS i GLONASS oraz przyszłe satelity systemów Galileo i Compass, urządzenie AIS oraz stacje nadawcze systemu naziemnego Loran C, zwłaszcza odmiany eLoran. Zestawiono też obecne i przyszłe częstotliwości nośne, kody wraz z przyjętą numeracją, struktury sygnałów systemów GPS, GLONASS i Galileo, a dla systemu GPS gęstość mocy odbieranego sygnału.**

Jednym z najważniejszych czynników decydujących o bezpieczeństwie użytkownika transportu jest nieprzerwana znajomość jego pozycji. Informacja o pozycji uzyskiwana jest głównie za pomocą specjalistycznych systemów elektronicznych, w szczególności nawigacyjnych systemów satelitarnych (NSS) i naziemnych systemów radionawigacyjnych (NSRN). Obecnie najczęściej wykorzystywanymi przez użytkownika morskiego systemami, pomijając radar, są – system satelitarny GPS, system naziemny Loran C i Automatyczny System Identyfikacji (AIS).

Emitowanie sygnałów przez satelity na różnych częstotliwościach ma na celu zaspokojenie potrzeb różnych grup użytkowników, zmniejszanie ujemnych skutków interferencji w razie stosowania tylko jednej częstotliwości, umożliwić pomiar opóźnienia jonosferycznego i określanie pozycji z pomiarów fazy fali nośnej. We wszystkich globalnych systemach satelitarnych (GNSS) za-

stosowano dwustanową, fazową technikę modulacyjną, zwaną binarnym kluczowaniem fazy – BPSK (*Binary Phase Shift Keying*). Sygnały satelitarne emitowane są na kilku częstotliwościach z przedziału 1–2 GHz pasma L (według tradycyjnego podziału widma fal radiowych).

## Nawigacyjne systemy satelitarne

W tabeli 1 zestawiono głównych użytkowników dziewięciu pasm częstotliwości wykorzystywanych między innymi w nawigacyjnych systemach satelitarnych, obecnie (systemy GPS i GLONASS) i w przyszłości (systemy GPS, GLONASS, Galileo i Compass). Pasma 1,3–1,35 GHz jest, przynajmniej jak dotąd, jeszcze nie zagospodarowana.

Charakterystykę sygnałów emitowanych przez satelity systemów GPS i GLONASS przedstawiono w tabelach 2 i 3. W tabelach tych uwzględniono plany modernizacyjne obydwu wymienionych systemów, dlatego też pod uwagę zostały również wzięte parametry przyszłościowych sygnałów L1C i L5 systemu GPS oraz L3 systemu GLONASS. W większości sygnałów systemu GPS, a w przypadku systemu GLONASS we wszystkich zarówno obecnie, jak i w przyszłości, stosuje się technikę BPSK.

Tym niemniej w wielu nowo wprowadzanych sygnałach satelitarnych zamiast modulacji BPSK stosowana jest modulacja BOC (*Binary Offset Carrier*). Modulacja ta może być bowiem użyta celem zminimalizowania interferencji sygnałów z modulacją BPSK o tej samej częstotliwości nośnej. Może również ona zapewnić lepsze śledzenie kodu niż modulacja BPSK sygnału o takiej samej prędkości transmisji danych.

W tabelach 4 i 5 scharakteryzowano sygnały satelitarne (łącznie z podaną w chipach długością kodu) budowanych obecnie

Tabela 1

## Wykorzystanie częstotliwości stosowanych w nawigacyjnych systemach satelitarnych i częstotliwości im bliskich obecnie oraz w przyszłości

Pasma [MHz]	Główni użytkownicy	Zastosowanie i uwagi
960–1164	Lotnictwo, radionawigacja	Elektroniczne pomoce dla nawigacji lotniczej w skali światowej
1164–1215	Lotnictwo, radionawigacja, radionawigacja satelitarna	GPS L5 i Galileo E5a na 1176,45 COMPASS i Galileo E5b na 1207,14 GLONASS L3 na 1190,5–1212, kolejne sygnały radionawigacyjne planowane w przyszłości
1215–1240	Badanie Ziemi za pomocą satelitów, radiolokacja,	Stosowane na całym świecie radary kontroli ruchu lotniczego, nadzoru wojskowego i antynarkotykowego
1240–1300	radionawigacja satelitarna badanie kosmosu	GPS L2 na 1227,6 COMPASS E6 na 1268,52 Galileo E6 na 1278,75 GLONASS L2 na 1237,83–1256,36
1300–1350	Lotnictwo, radionawigacja, radiolokacja, radionawigacja satelitarna	
1350–1400	Transport, radiolokacja	Określanie na całym świecie pozycji obiektów ruchomych, w tym lądowych, radiolokacja
1535–1559	Obiekty ruchome, satelity	Sygnały z satelitów na Ziemię w usługach komercyjnych
1559–1610	Radionawigacja lotnicza, radionawigacja satelitarna	GPS L1 i Galileo L1 na 1575,42 COMPASS na 1561,1 (E2) i 1589,74 GLONASS L1 na 1592,95–1613,86
1610–1626,5	Obiekty ruchome, satelity (Ziemia – kosmos), lotnictwo, radionawigacja, radioastronomia	Sygnały z Ziemi do satelitów w usługach komercyjnych; część przedziału zastrzeżona dla astronomicznych sensorów

systemów, odpowiednio Galileo i Compass. Modulacja BOC ma być stosowana jedynie w dwóch sygnałach systemu Galileo – E6–A i L1–A. Sygnały te, o numerach 5 i 8, wykorzystywane będą w serwisie kontrolowanym publicznie PRS.

Parametry kodu i częstotliwości oraz liczbę cykli sygnałów satelitów Galileo i GPS wszystkich bloków zamieszczono w tabeli 6. W tabeli tej nie uwzględniono parametrów sygnałów L1M i L2M systemu GPS, dostępnych jedynie dla użytkowników wojskowych oraz sygnału E6A systemu Galileo, który dostępny będzie wyłącznie dla uprzywilejowanych użytkowników krajów

członkowskich Unii Europejskiej, takich jak służby ratownictwa i bezpieczeństwa. Informacje te, przynajmniej jak dotąd, nie są bowiem znane.

W przypadku systemu GLONASS częstotliwość i liczba cykli/chipów sygnału L1 dla standardowej i dużej dokładności wynosi odpowiednio 0,511 MHz i 3135,03 oraz 5,11 MHz i 313,503, a sygnału L2 dla standardowej i dużej dokładności odpowiednio 0,511 MHz i 2438,36 oraz 5,11 MHz i 243,836.

Tabela 2

## System GPS, charakterystyka sygnałów emitowanych przez satelity, obecnie oraz w przyszłości

Sygnal	Pasmo	Serwis	Modulacja i szybkość (-1,023 Mchip/s)	Prędkość transmisji danych [symbol/s]	Minimalna moc odbieranego sygnału [dBW]	Blok satelitów
C/A	L1	SPS/PPS	BPSK 1	50	-158,5	wszystkie
P (Y)	L1	PPS	BPSK 10	50	-161,5	wszystkie
kod M	L1	PPS	BOC <sub>s</sub> (10,5)	nieznana	nieznana	od IIR–M
L1C–d	L1	PPS	BOC <sub>s</sub> (1,1)	100	-163	od III
L1C–p	L1	PPS	BOCs (1,1)	nie dotyczy	-158,5	od III
L2C	L2	SPS	BPSK 1	50	-160	od IIR–M
P(Y)	L2	PPS	BPSK 10	50	-164,5	wszystkie
kod M	L2	PPS	BOC <sub>s</sub> (10,5)	nieznana	nieznana	od IIR–M
L5I	L5	SPS	BPSK 10	100	-158	od IIF
L5Q	L5	SPS	BPSK 10	nie dotyczy	-158	od IIF

d – sygnał danych, p – sygnał pilotowy

Tabela 3

## System GLONASS, charakterystyka sygnałów emitowanych przez satelity, obecnie oraz w przyszłości

Sygnal	Pasmo	Częstotliwość [MHz]	Modulacja (Mchip/s)	Prędkość transmisji danych [symbol/s]	Minimalna moc odbieranego sygnału [dBW]	Blok satelitów
C/A	L1	1592,95–1613,86	BPSK 0,511	50	-161	wszystkie
kod P	L1	1592,95–1613,86	BPSK 5,11	50	-161	wszystkie
C/A	L2	1237,83–1256,36	BPSK 0,511	50	-167	od M
kod P	L2	1237,83–1256,36	BPSK 5,11	50	-167	wszystkie
nieznany	L3	1190,5–1212	BPSK 4,095	nieznana	nieznana	od K
nieznany	L3	1190,5–1212	BPSK 4,095	nie dotyczy	nieznana	od K

Tabela 4

## System Galileo, zakładana charakterystyka 10 sygnałów

Sygnal	Pasmo	Serwis	Modulacja (-1,023 Mchip/s)	Prędkość transmisji danych [symbol/s]	Minimalna moc odbieranego sygnału [dBW]
E5a–d/E5a–I	E5a	OS, CS	BPSK 10	50	-158
E5a–p/E5a–Q	E5a	OS, CS	BPSK 10	nie dotyczy	-158
E5b–d/E5b–I	E5b	OS, SOL, CS	BPSK 10	250	-158
E5b–p/E5b–Q	E5b	OS, SOL, CS	BPSK 10	nie dotyczy	-158
E6P/E6–A	E6	PRS	BOC <sub>c</sub> (10,5)	nieznana	-155
E6C–d/E6–B	E6	CS	BPSK 5	1000	-158
E6C–p/E6–C	E6	CS	BPSK 5	nie dotyczy	-158
L1P/L1–A	L1	PRS	BOC <sub>c</sub> (15,2,5)	nieznana	-157
L1F–d/L1–B	L1	OS, SOL, CS	BOC <sub>c</sub> (1,1)	250	-160
L1F–p/L1–C	L1	OS, SOL, CS	BOC <sub>c</sub> (1,1)	nie dotyczy	-160

d – data (dane), p – pilot (bez danych), I – inphase (składowa fazowa), Q – quadrature (składowa kwadraturowa)

Tabela 5

## System Compass, zakładana charakterystyka sygnałów emitowanych przez satelity

Pasmo	Modulacja [-1,023 Mchip/s]	Depesza nawigacyjna [symbol/s]	Podstawowa długość kodu	Okres powtarzania	Wtórna długość kodu	Pełny okres powtarzania
E5b	BPSK 10	nie dotyczy	nieznana	>160 ms	–	>160 ms
E5b	BPSK 2	50	2046	1 ms	20	20 ms
E6	BPSK 10	nie dotyczy	nieznana	>160 ms	–	>160 ms
E6	BPSK 10	50	19 230	1 ms	20	20 ms
E2	BPSK 2	nie dotyczy	nieznana	>400 ms	–	>400 ms
E2	BPSK 2	50	2046	1 ms	20	20 ms

Parametry kodu pseudolosowego (PRN) dla systemów Galileo i GPS przedstawiono w tabeli 7. W serwisie standardowym systemu GLONASS parametry kodu C/A to długość 511 chipów i okres 1 ms.

W tabeli 8 podano budżet mocy satelitów systemu GPS bloków IIa i IIR, przy założeniu minimalnej dla użytkownika mocy odbiorczej. Wymagana dla sygnału L1 C/A moc na wejściu anteny nadawczej satelity, równa 21,9 W, jest znacznie większa niż dla sygnału L2P, dla którego wynosi zaledwie 6,6 W.

Sygnał odbierany z satelity systemu GPS ma najmniejszą moc, gdy wysokość topocentryczna satelity wynosi 50 lub gdy satelita ów znajduje się w zenicie. Dla satelity znajdującego się między tymi dwiema wysokościami poziom najmniejszej mocy sygnału odbieranego na częstotliwości L1 i L2 zwiększa się stopniowo odpowiednio do 2 dB i 1 dB.

Zakłada się, że poziom sygnału (dotyczącego składowych kodu C/A i P(Y)) odbieranego z satelity na częstotliwościach nośnych L1 i L2 nie przekroczy odpowiednio -153 dBW i -155,5 dBW. Moce sygnałów są dla satelity od 1 do 5 dB większe niż wymienione minima i zależą między innymi od wysokości topocentrycznej satelity oraz z jakiego bloku jest ów satelita.

## System Loran C

Loran C, Czajka i eLoran to systemy należące do rodziny systemów o nazwie Loran (*L*ong *R*ange *N*avigation) o częstotliwości nośnej 100 kHz (fale długie), paśmie przenoszenia 20 kHz i polaryzacji poziomej. Łańcuch systemu Loran C składa się ze stacji głównej i dwóch, trzech lub czterech stacji podrzędnych. Obecnie wszystkich łańcuchów w Europie, Azji i Ameryce Północnej jest 23.

Niektóre stacje, zwane podwójnymi, wchodzą w skład dwóch łańcuchów. Wszystkie stacje każdego łańcucha emitują sygnały w określonej kolejności, stosując technikę wielokrotnego dostępu z podziałem czasowym (TDMA – *T*ime *D*ivision *M*ultiple *A*ccess). Sygnałem tym jest grupa 8 impulsów, 250  $\mu$ s każdy, przy czym odstępy między dwoma kolejnymi impulsami wynoszą 1 ms. Stacja główna emituje dodatkowo dziewiąty impuls, a odstęp między nim a ósmym jest równy 2 ms. Część stacji podrzędnych emituje również dziewiąty impuls, ale z odstępem mniejszym, bo 1 ms tylko, umożliwiając tym samym stworzenie kanału systemu danych (LDC – *L*oran *D*ata *C*hannel).

Tabela 6

## Kody systemów Galileo i GPS, obecnie i w przyszłości, Fo – 10,23 MHz

Galileo			GPS		
sygnał	częstotliwość	liczba cykli/chipów	sygnał	częstotliwość	liczba cykli / chipów
L1 (kanał A)	Fo/4	616 E1	L1 C/A	Fo/10	1540 L1
L1 (kanał B & C)	Fo/10	1540	L1 C	Fo/10	1540 L1
E5a	Fo	115 E5a	L1 P	Fo	154 L1
E5b	Fo	118 E5b	L2 P	Fo	120 L2
E6 (kanał B & C)	Fo	250 E6	L2-CM i L2-CL		L2-CM (pierwsza) i L2-CL (druga) połowa okresu 11955 $\mu$ s
E6A	nieznane		L5	Fo	115 L5

Tabela 7

## Parametry pseudolosowego kodu (PRN) systemów Galileo i GPS

Kanał	Galileo			GPS		
	Długość kodu [chip]	Pierwotny okres kodu [ms]	Włóżna długość kodu [chips]	Sygnał	Długość [chip]	Okres
L1B	4092 E1B	4	N/A	L1 C/A	1023 C/A	1 ms
L1C	4092 E1C	4	25	L1 P	6,187 · 10 <sup>12</sup>	1 tydzień
E5A I	10230 E5A	1	20	L1Cd (z danymi)	10 230	10 ms
E5A Q	10230 E5A	1	100	L1Cp (bez danych)	10 230	10 ms
E5B I	10230 E5B	1	4	L2P	6,187 · 10 <sup>12</sup>	1 tydzień
E5B Q	10230 E5B	1	100	L2-CM	10 230	20 ms
L1A & E6A	nieznane			L2-CL	767 250	1500 ms
E6B	5115 E6B	1	100	L5-I (for data)	10 230	1 ms
E6C	5115 E6B	1	100	L5-Q (for pilot)	10 230	1 ms

Tabela 8

## System GPS, budżet mocy pasma L1 i L2 satelitów bloków IIa i IIR

Parametr		L1 C/A	L1 P	L2 P
Minimalny poziom mocy odbieranej	[dBW]	-158,5	-161,5	-164,5
Wzmocnienie antenowe	[dB]	3,0	3,0	3,0
Tłumienie swobodnej przestrzeni	[dB]	184,4	184,4	182,3
Tłumienie atmosferyczne	[dB]	0,5	0,5	0,5
Tłumienie wynikające z niezgodności polaryzacji	[dB]	3,4	3,4	4,4
Wymagana efektywna izotropowa moc wypromieniowywana przez satelitę (EIRP)	[dBW]	26,8	23,8	19,7
Wzmocnienie anteny satelitarnej na najmniej korzystnym kierunku 14,30	[dB]	13,4	13,4	11,5
Minimalna moc na wejściu anteny nadawczej satelity	[dBW]	13,4	10,4	8,2
	[W]	21,9	11,1	6,6

Poszczególne impulsy w grupie mogą być emitowane z częstotliwością nośną będącą w fazie lub przeciwfazie w stosunku do fazy pierwszego impulsu danej grupy. Stosowane są dwie przemienne sekwencje kodowania, inne dla stacji głównych, inne dla stacji podrzędnych.

Czas dzielący dwie kolejne emisje każdej stacji to okres powtarzania impulsów GRI (*Group Repetition Interval*). Każdy tańcuch charakteryzuje się niepowtarzalnym okresem GRI, przyjmując wielkości od 40 do 100 ms. Obwiednię impulsu (*env*) opisuje zależność:

$$env = A \left( \frac{t}{t_p} \right)^2 e^{2 \left( 1 - \frac{t}{t_p} \right)} \quad (1)$$

gdzie:

$A$  – amplituda,

$t$  – czas,

$t_p = 65 \mu s$  (maksimum amplitudy).

Nośną natomiast określa zależność:

$$nośna(t) = \cos(\omega t + \varphi c) \quad (2)$$

gdzie:

$\omega = 2\pi \cdot 100 \text{ kHz}$  (częstotliwość nośna),

$\varphi c = 0$  lub  $\pi$  radianów.

Czas trwania jednego cyklu (1/100 kHz) to  $10 \mu s$ .

Rosyjski system Czajka, zbudowany jeszcze przez ZSRR, jest bardzo podobny do systemu Loran C, systemy te różni między innymi odmienny kształt obwiedni sygnału.

Eloran jest programem umożliwiającym udoskonalenie systemu Loran C, będąc z nim w pełni kompatybilnym. Pierwszy etap tego programu, polegający na zastąpieniu przestarzałych urządzeń nadawczych i zsynchronizowaniu ich emisji z czasem UTC został w pełni zakończony w USA, północno-zachodniej Europie (konfiguracja NELS) i Dalekim Wschodzie (traktat FELT). Drugi etap obejmuje transmisję poprawek różnicowych i innych danych używając LDC lub systemu Eurofix. Włączenie LDC do amerykańskich stacji systemu Loran C rozpoczęto w 2005 r.

O tym, że nadawane przez nie sygnały są błędne i nie mogą być wykorzystywane, stacje nadawcze systemu Loran C informują w określony sposób, zwany mruganiem, polegającym na tym, że co 4 s dwa pierwsze impulsy przez 3,75 s są wyłączane. Stacje eLoran przerywają natomiast swoją emisję. Każdy impuls LDC modulowany jest jednym z dwóch możliwych opóźnień i jednym z ośmiu stanów fazy. Takie rozwiązanie zapewnia 5 bitów danych na jeden impuls, w związku z czym prędkość przesyłu danych, w zależności od GRI, wynosi od 50 do 100 bps.

W systemie Eurofix poprawki różnicowe systemu GPS transmitowane są przez 4 stacje europejskie konfiguracji NELS (dwie w Norwegii i po jednej we Francji i Niemczech) oraz kilka stacji w Arabii Saudyjskiej, zmieniając czas każdego impulsu o 0, +1 lub  $-1 \mu s$ , wytwarzając tym samym dane dla poszczególnych kanałów. Eurofix przewidziany jest do współpracy z GNSS, obecnie jedynie systemem GPS, a w szczególności jego poprawkami różnicowymi i innymi danymi, które mogą dotyczyć odmiany różnicowej systemu Loran. Prędkość przesyłu danych wynosi 7 bitów na GRI, czyli 70–140 bps. Niektóre z nich przeznaczone są dla błędów poprawek.

Transmisja danych (z małą prędkością) przez stacje systemu Loran C, a w przyszłości być może również systemu Czajka, odbywa się w ośmiu kanałach, z których pięć przeznaczonych jest dla systemów DGPS, DGLONASS, DLoran C/DChayka, integralności depeszy nawigacyjnej oraz krótkiej depeszy nawigacyjnej. Trzy kanały zarezerwowano do przyszłych zastosowań.

## System automatycznej identyfikacji

System Automatycznej Identyfikacji AIS (*Automatic Identification System*) jest pokładowym systemem radiowym, funkcjonującym jako transponder w morskim paśmie UKF mogącego wystać więcej niż 4500 raportów na minutę uaktualnianych co 2 s. W systemie tym stosowany jest zwielokrotniony czasowy przydział kanałów na żądanie SOTDMA (*Self-Organized Time Division Multiple Access*), by móc zapewnić dużą prędkość transmisji danych i niezawodność relacji statek – statek. Każde urządzenie systemu AIS składa się z jednego nadajnika UKF, dwóch odbiorników UKF TDMA, jednego odbiornika UKF cyfrowego selektywnego wywołania DSC (*Digital Select Call*) oraz interfejsu do pokładowych sensorów i monitorów.

AIS funkcjonuje na częstotliwościach nośnych 161,975 MHz i 162,025 MHz (kanały odpowiednio 87B i 88B). Urządzenie AIS działa w sposób ciągły, autonomiczny zarówno gdy dzieje się to na otwartym morzu, jak i na wodach przybrzeżnych. W transmisji stosowana jest 9,6 kb modulacja GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*) FM z wykorzystaniem wysokopoziomowego sterowania łącza danych HDLC (*High-Level Data Link Control*).

Każde urządzenie AIS definiuje ramy własnej transmisji, opierając się na dotychczasowym sposobie przesyłania danych i znajomości przyszłych zamierzeń innych urządzeń. Informacja o pozycji z jednego urządzenia AIS to jedna z 2250 ramek czasowych generowanych co 60 s.

Urządzenia AIS nieprzerwanie się synchronizują między sobą, by uniknąć wzajemnego nakładania się ramek ich transmisji. Transmisja danego urządzenia definiowana jest przez dobór przerw między ramkami, przy czym przerwy te trwają od 0 do 8 ramek. W przypadku, gdy urządzenie zmienia swoją przydzieloną ramkę, uprzedza o tym, ogłaszając to zarówno w nowej, jak i dotychczasowej sekwencji.

## Wnioski końcowe

- Modernizacja segmentu kosmicznego systemów satelitarnych już funkcjonujących, takich jak GPS i GLONASS, obejmuje między innymi rozbudowanie transmisji satelitarnej poprzez dodanie nowych sygnałów, z których jedne przeznaczone są wyłącznie dla użytkowników cywilnych, a inne tylko dla wojskowych.
- Liczba sygnałów, które będą nadawane przez satelity systemów obecnie budowanych, takich jak Galileo i Compass, wydaje się być wystarczająca dla ich wszystkich potencjalnych użytkowników.
- W nowych sygnałach satelitarnych zamiast modulacji BPSK zastosowano modulację BOC.
- Z uwagi na to, że technika wielodostępu z podziałem częstotliwości FDMA ma miejsce wyłącznie w systemie GLONASS, w niedalekiej przyszłości należy się spodziewać decyzji o zastosowaniu techniki z podziałem kodowym również w satelitach zapowiadanego bloku K tegoż systemu.

Dokończenie na s. 81 ➤