

Galileo i GPS: podobieństwa i różnice

TROPEM SYGNAŁÓW

Zarówno satelity GPS, jak i Galileo emitują sygnały, które trafiają do odbiorników na Ziemi bądź statkach kosmicznych na niskich orbitach. Szacuje się, że w 2020 roku liczba odbiorców może sięgnąć 3 miliardów. Przyjrzyjmy się więc bliżej satelitarnym sygnałom nawigacyjnym.

MARTA KRYWANIS

Zagadnienie zasługuje na uwagę, gdyż w marcu 2009 roku w Centrum Badań Kosmicznych w Warszawie stanęła stacja GESS (Galileo Experimental Sensor Station). Placówka ta będzie nieprzerwanie gromadziła sygnały wszystkich satelitów nawigacyjnych i przesyłała je do innych stacji GESS i do centrów kontroli. Współpraca Polski z Europejską Agencją Kosmiczną (ESA) rozpoczęła się już na początku lat 90. Do tej pory nie byliśmy jednak zaangażowani w większe projekty kosmiczne. „Porozumienie o Europejskim Państwie Współpracującym” zawarte w 2007 r. między rządem Rzeczypospolitej Polskiej i ESA otwiera nam drzwi do wykorzystania przestrzeni kosmicznej.

ASPEKTY POLITYCZNE

Galileo i GPS kształtują nowy model współpracy. Unia Europejska i Stany Zjednoczone uznały konieczność współdziałania obydwu systemów nawigacji satelitarnej. Jednak droga do zawarcia porozumienia nie była prosta. Idea powstania konkurencyjnego dla GPS systemu nawigacyjnego wywołała liczne spory między Brukselą i Waszyngtonem. Amerykanie obawiali się, że sygnał Galileo zakłóci funkcjonowanie GPS. Dokładniej mówiąc, chodziło o szyfrowany sygnał GPS stworzony dla potrzeb armii amerykańskiej (M-code), który ma być używany już w 2012 roku.

W 2004 roku spór zażegnało „Porozumienie o promocji, warunkach i wykorzystaniu systemów nawigacji satelitar-

nej Galileo i GPS oraz związanych z nimi zastosowań”. – Nie byliśmy zobowiązani do współpracy z USA, ale posiadanie w pełni kompatybilnego systemu jest korzystne dla obu rynków – powiedział Rene Oosterlinck, szef Departamentu Nawigacji w Europejskiej Agencji Kosmicznej. Ostatecznie ustalono, że 30 satelitów Galileo będzie korzystało z modulacji BOC(1,1) – Binary Offset Carrier. Przedstawiciele ESA, którzy początkowo chcieli zastosować oferującą większą precyzję standard BOC(1.5,1.5), w końcu zdecydowali się na ustępstwa.

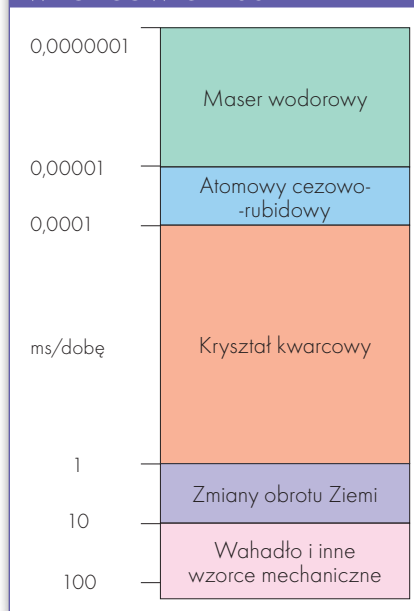
Kwestia modulacji sygnału Galileo nie została jeszcze całkowicie zamknięta. Od momentu podpisania porozumienia w 2004 r. naukowcy wciąż dyskutowali o nowej modulacji, będącej alternatywą BOC(1,1), której powstanie nie naruszyłoby warunków porozumienia z USA. 26 czerwca 2007 roku Stany Zjednoczone i Unia Europejska podpisały porozumienie o wspólnym sygnale dla użytku cywilnego – modulowanym za pomocą MBOC (Multiplexed Binary Offset Carrier). Było ono wynikiem licznych dyskusji na temat modulacji sygnału Galileo w paśmie E1/L1, wykorzystywanym również przez GPS. Efektem tego porozumienia było zatwierdzenie „Planu Sygnału Systemu Galileo dla pierwszej generacji”.

Współdziałanie obydwu systemów daje pewność, że sygnały Galileo nie będą miały negatywnego wpływu na systemy nawigacyjne wykorzystywane przy prowadzeniu operacji wojskowych przez Stany Zjed-

TAB. 1. STABILNOŚĆ WZORCÓW CZASU [S]

Przedział czasu	Wzorec rubidowy	Maser wodorowy
1 doba	$\leq 5 \cdot 10^{-11}$	$\leq 3 \cdot 10^{-12}$
10	$\leq 5 \cdot 10^{-12}$	$\leq 3 \cdot 10^{-12}$
100	$\leq 5 \cdot 10^{-12}$	$\leq 3 \cdot 10^{-13}$
1000	$\leq 5 \cdot 10^{-13}$	$\leq 3 \cdot 10^{-13}$

RYS. 1. DOKŁADNOŚĆ WZORCÓW CZASU



noczone i NATO. Ma to zapewnić ochronę wspólnych interesów, bezpieczeństwo sygnatariuszy, a także otworzyć drogę do powstania podwójnego systemu satelitów,

TAB. 2. SYGNAŁY GPS I GALILEO

GPS			Galileo		
Częstotl. [MHz]	Kod	P _m [dBW]	Częstotl. [MHz]	Numer sygnału	P _m [dBW]
1575,42	C/A	160	1176,45	1, 2	158
			1207,14	3, 4	
1227,60	P	166	1278,75	5	155
				6, 7	158
1575,42	P	163	1575,42	8	155
				9, 10	158

które będą nadawały wspólny sygnał cywilny o zasięgu ogólnosiwiatowym.

● TRANSMISJA SYGNAŁU GPS I GALILEO

Transmisja sygnałów radiowych zarówno GPS, jak i Galileo wymaga stabilnych wzorców częstotliwości. AFS (Atomic Frequency Standard), integrując dwa wzorce rubidowe i dwa cezowe, wytwarza podstawową dla GPS częstotliwość 10,23 MHz. Wzorec taki pozwala na wyznaczenie czasu z dokładnością do 10^{-12} s/dobę. W systemie Galileo innowacją jest zastosowanie pasywnych maserów wodorowych oferujących większą stabilność (tab. 1 i rys. 1). Wytworzenie wzorca odbywa się za pomocą CMCU (Clock Monitoring and Control Unit), integrującego dwa masery wodorowe i dwa wzorce rubidowe.

Przy tworzeniu sygnału w obu systemach bardzo ważną rolę odgrywa CDMA (Code Division Multiple Access), czyli dostęp wielokrotny z podziałem kodowym. Wszystkie satelity danego systemu transmitują sygnał na tej samej częstotliwości. By pozwolić odbiornikowi na ich rozróżnienie i umożliwić pomiar czasu przebiegu sygnału, na dany sygnał nakładany jest kod. Kod jest różny dla każdego satelity, co umożliwia jego identyfikację.

Sygnały systemu GPS transmitowane są w dwóch pasmach częstotliwości nośnych: L1=1575,42 MHz i L2=1227,60 MHz. Z kolei w Galileo dla sygnałów przeznaczone będą następujące pasma częstotliwości: 1164-1215 MHz (E5a i E5b), 1215-1300 MHz (E6), 1559-1592 MHz (E2-L1-E1). Na wymienione wyżej częstotliwości nałożone zostaną kody pseudoprzypadkowe, scharakteryzowane w tabeli 2, gdzie P_m to minimalna moc sygnału docierającego do odbiornika. Po zsumowaniu kodów z depezą nawigacyjną powstaje sygnał odbierany przez użytkownika.

● SYGNAŁY GPS

W systemie GPS wykorzystana jest transmisja z widmem rozproszonym, a istotę jej stanowią dwa kody pseudoprzypadkowe: C/A i P. Są to ciągi binarne, które powtarzają się co jakiś czas. Sygnały na częstotliwości L1 są modulowane przez dwa kody C/A i P, natomiast sygnały na częstotliwości L2 – jedynie kodem P (tab. 3).

C/A jest kodem o długości 1023 bitów. Generowany jest z szybkością 1,023 MHz, a okres jego powtarzania to 1 ms. Kod ten jest wynikiem działania dwóch rejestrów przesuwnych (LFSR – Linear Feedback

TAB. 3. CHARAKTERYSTYKA SYGNAŁÓW GPS

Pasma	Sygnał		Częstotliwość nośna [MHz]	Częstotliwość kodu [Chip/s]	Kod szyfrujący	Szyfrowanie danych	Serwis odniesienia
	Nazwa						
L1	C/A, P		1575,42	M	Rządowy	Tak	PRS
L2	P		1227,60	2	Brak	Niektóre	OS/SoL/CS

PRS (Public Regulated Service), OS (Open Service)/SoL (Safety of Life Service)/CS (Commercial Service)

Shift Register): G1 i G2. LFSR posiada rejestr przesuwany o długości n bitów, który na początku zawiera losowe bity. Niektóre bity rejestru są poddawane operacji xor (sumowane są modulo 2) i wynik zastępuje najstarszy bit rejestru, jednocześnie pozostałe bity przesuwane są o jedną pozycję w prawo i najmłodszy bit staje się kolejnym bitem generowanego ciągu (rys. 2). W GPS przewidzianych jest 37 różnych kodów C/A, z czego 32 będą przyporządkowane satelitom, a pozostałe 5 – pseudosatelitom.

Kod P jest wynikiem użycia dwóch generatorów kodów, z których każdy wykorzystuje po dwa rejestry przesuwne. Możliwe jest otrzymanie 37 różnych kodów P. Okres wynosi 38 tygodni, jednak kod P jest zerowany co tydzień.

● SYGNAŁY GALILEO

W Galileo przewidziano 10 sygnałów nośnych (rys. 3). Dwa sygnały nawigacyjne na E2-L1-E1 transmitowane będą w trzech kanałach (A, B i C) L1 – tab. 4:

● L1F – sygnał otwartego dostępu, zawierający dane nawigacyjne i dane integralne,

● L1P – sygnał ograniczonego dostępu.

Dwa sygnały nawigacyjne na E6 są transmitowane w trzech kanałach w paśmie E6 (tab. 5):

● E6C – sygnał komercyjnego dostępu,

● E6P – sygnał ograniczonego dostępu.

Dwa sygnały nawigacyjne na E5 są transmitowane w czterech kanałach pasma E5 (tab. 6):

● E5a – sygnał otwartego do-

stępu, zawierający podstawowe dane dla nawigacji i wyznaczeń czasu

● E5b – sygnał otwarty, zawierający dane nawigacyjne i integrujące.

● MODULACJA SYGNAŁÓW

Modulacja sygnału jest procesem polegającym na zmianie jednego z parametrów fali nośnej, zgodnie ze zmianami sygnału informacyjnego (nakładanie informacji na falę nośną). W systemie GPS modulacji podlegają dwa ciągi binarne:

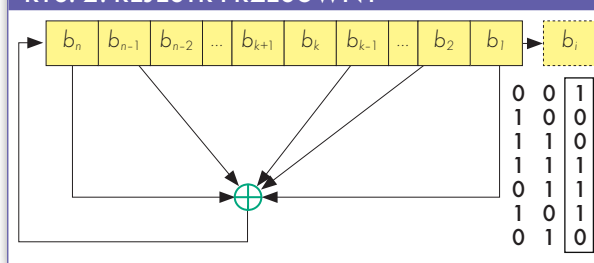
1. suma binarna kodu C/A i depeży nawigacyjnej (D),

2. suma binarna kodu P i depeży nawigacyjnej (D).

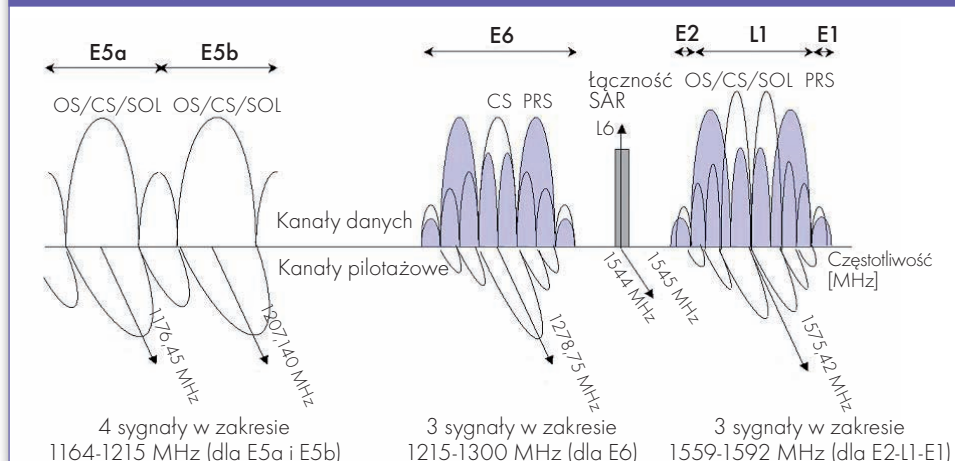
Pierwszy z wymienionych generowany jest z szybkością 10,23 MHz, natomiast drugi – dziesięciokrotnie wolniej: 1,023 MHz. Częstotliwość L1 modulowana jest przez P+D i C/A+D, natomiast L2 – jedynie przez P+D (rys. 4).

Technika zastosowana do modulacji częstotliwości L zarówno w systemie GPS, jak i Galileo to BPSK (Binary Phase Shift Keying). Przebiegi zerojedynkowe (binarne) są w niej reprezentowane przez dwa stany: „1” i „-1”. Cała modulacja polega na przesunięciu fazy o 180 stopni

RYŚ. 2. REJESTR PRZESUWNY



RYŚ. 3. SYGNAŁY GALILEO



TAB. 4. CHARAKTERYSTYKA SYGNAŁU GALILEO NA L1

ID	Sygnal	Częstotliwość nośna [MHz]	Częstotliwość kodu [Chip/s]	Kod szyfrujący	Szyfrowanie danych	Serwis odniesienia
	Nazwa					
1	E2-L1-E1-A	1575,42	M	Rządowy	Tak	PRS
2	E2-L1-E1-B	1575,42	2	Brak	Niektóre	OS/Sol/CS
3	E2-L1-E1-C	1575,42	2	Brak	-	OS/Sol/CS

TAB. 5. CHARAKTERYSTYKA SYGNAŁU GALILEO NA E6

ID	Sygnal	Częstotliwość nośna [MHz]	Częstotliwość kodu [Chip/s]	Kod szyfrujący	Szyfrowanie danych	Serwis odniesienia
	Nazwa					
1	E6-A	1278,75	5	Rządowy	Tak	PRS
2	E6-B	1278,75	5	Komercyjny	Tak	CS
3	E6-C	1278,75	5	Komercyjny	-	CS

TAB. 6. CHARAKTERYSTYKA SYGNAŁU GALILEO NA E5

ID	Sygnal	Częstotliwość nośna [MHz]	Częstotliwość kodu [Chip/s]	Kod szyfrujący	Szyfrowanie danych	Serwis odniesienia
	Nazwa					
1	E5a-1	1176,45	10	Brak	Brak	OS/Sol
2	E5a-Q	1176,45	10	Brak	-	OS/Sol
3	E5b-1	1207,14	10	Brak	Niektóre	OS/Sol/CS
4	E5b-Q	1207,14	10	Brak	-	OS/Sol/CS

w momencie zmiany stanu ciągu informacyjnego. Ogólnie sygnał PSK (Phase Shift Keying – przesunięty fazowo) możemy zapisać jako:

$$s(t) = A \sin(\omega_0 t + \Delta\psi x(t)).$$

Dla BPSK sygnał modulujący $x(t)$ przyjmuje tylko dwie wartości (-1 i 1) reprezentujące odpowiednio symbole binarne 0 i 1. Stąd otrzymujemy:

$$s_1(t) = A \sin(\omega_0 + \Delta\psi) \text{ dla } x(t)=1 \text{ dla } 1,$$

$$s_2(t) = A \sin(\omega_0 - \Delta\psi) \text{ dla } x(t)=-1 \text{ dla } 0.$$

Aby obydwa sygnały maksymalnie różniły się od siebie (co ma zminimalizować prawdopodobieństwo popełnienia błędu przy odbiorze wiadomości), przyjmuje się dewiację fazy (maksymalną bezwzględną odchyłkę kąta chwilowego od liniowej zmiany tego kąta) równą $\pi/2$ (rys. 5).

Technologicznym wyzwaniem przy tworzeniu systemu Galileo jest odpowiedni dobór modulacji sygnału. Owocem prac i analiz przy tworzeniu sygnałów GNSS nowej generacji jest wybór modulacji BOC. Standardowa modulacja BOC jest kwadratem modulacji sygnału nośnego. Modulacja BOC o zadanej częstotliwości nośnej i sekwencji bitowej zapisywana jest w następujący sposób: BOC (f_s , f_c), gdzie f_s to wielokrotność 1,023 MHz, a szybkość generowania f_c to wielokrotność 1,023 Mcps (rys. 6).

Sygnał na L1 jest wykorzystywany przez GPS (na tę częstotliwość nałożono już kod systemu) i GLONASS. Dlatego aby uniknąć całkowitego „zapchania” sygnału, należy dążyć do kompatybilności i interoperacyjności Galileo z GPS. Rozwiązanie to powinno zapewnić:

- optymalne wykorzystanie spektrum,

- tę samą częstotliwość, którą ma GPS przy nadawaniu sygnału C/A,
- zmniejszenie pokrycia z innymi sygnałami.

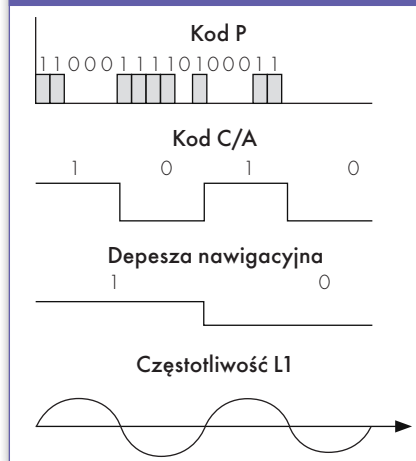
Biorąc pod uwagę powyższe aspekty, przy transmisji sygnału postanowiono zastosować modulację MBOC (rys. 7), która jest rezultatem połączenia BOC(1,1) i BOC(5,1). Idea zrodziła się z potrzeby modulacji, która dałaby sygnał dostępny dla Serwisu Otwartego, jak również spełniający oczekiwania sektora bezpieczeństwa. Ostatecznie eksperci z USA i Europy zoptymalizowali modulację MBOC (6,1) dla L1C i E1 OS sygnału Galileo.

Jeżeli chodzi o modulację na E6, to nie stwarza ona żadnych przeszkód w zakresie operacyjności i kompatybilności, ponieważ pasmo to nie jest używane przez system GPS i GLONASS. Przyjęto więc:

- BPSK(5) dla E6C sygnału komercyjnego,
- BOC cos(10,5) dla E6P sygnału ograniczonego dostępu.

Pasmo sygnału E5 jest bardzo duże, a co za tym idzie – jego wykorzystanie może

RYS. 4. MODULACJA SYGNAŁU GPS



okazać się bardzo szerokie. Składa się z dwóch przystających pasm: E5a i E5b. E5b koresponduje z pasmem L5 GPS.

• PODRAMKI W DEPEZY GALILEO

Oprócz kodowanego sygnału, każdy satelita przesyła na tej samej fali nośnej zbiór informacji, zwany depeszą nawigacyjną. Informacja ta w systemie Galileo ma być wysyłana w zakresie fal radiowych wysokich częstotliwości, w ramach po 150 bitów każda. W zależności od sygnału zastosowane będą różne prędkości przesyłu danych, przyjęto jednak, że czas transmisji pojedynczego sygnału nie powinien przekraczać jednej sekundy. W systemie Galileo na każdą ramkę składać się będzie siedem podramek (rys. 8).

• SYNC – podramka synchronizująca:

- czas trwania 0,04 s,
- długość 6 bitów,
- używana do określenia granic ramki i bitów przesłanych danych,
- raz zidentyfikowana, potwierdza, że synchronizacja nie została przerwana.

• SNF (Satellite Navigation Frame) – wartość indeksu satelitarnej ramki nawigacyjnej:

- czas trwania 0,02 s,
- długość 3 bity,
- skojarzona z każdą ramką danych,
- służy do wyróżnienia przesyłanej informacji nawigacyjnej.

• Frame ID – podramka identyfikująca:

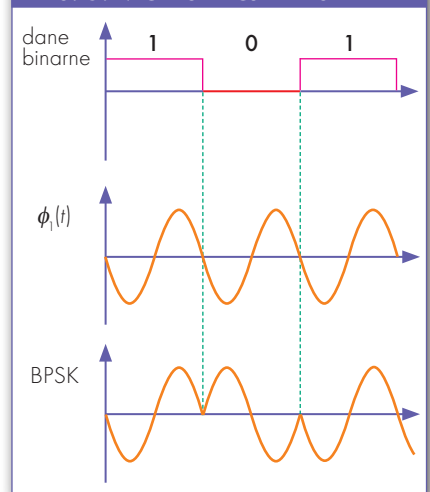
- czas trwania 0,04 s,
- długość 6 bitów,
- określa typ wiadomości przesyłanych w następnej podramce,
- umożliwia przesłanie danych w dowolnej kolejności.

• Data – podramka z danymi nawigacyjnymi.

Integrity – integralność: zawiera dane uruchamiające alarm w sytuacji, gdy sygnały docierające z satelitów nie spełniają określonych wymogów, wówczas odbiornik użytkownika sam może je zablokować, wymogiem jest jak najmniejsze opóźnienie w odbiorze alarmu.

• Checksum (suma kontrolna): podramka służąca do zweryfikowania po-

RYS. 5. MODULACJA BPSK



prawności nadawanej wiadomości,
● długość 27 bitów.

Tail Bits – podramka zamykająca:

● czas trwania 0,04 s; ● sekwencja siedmiu zer.

● PODRAMKI W DEPEZIE GPS

Z kolei w systemie GPS ramka zawiera pięć podramek (rys. 9). W każdej pierwszej dwa słowa są identyczne i zwane są słowami kluczowymi (TLM i HOW). TLM (Telemetry Word) składa się z preambuły przeznaczonej do celów synchronizacji (8 bitów), właściwej wiadomości telemetrycznej (14 bitów), 2 bitów zarezerwowanych oraz 6 bitów kontrolnych (łącznie 30 bitów). HOW (Hand-Over Word) służy do określenia liczby cykli kodu, które minęły od początku tygodnia do rozpoczęcia najbliższej w czasie podramki.

Informacje zawarte w I podramce to:

● WN – (Week Number) numer tygodnia GPS, ● URA – dokładność pomiaru pseudoodległości, ● SV Health – „zdrowie satelity”, ● IODC – numer zestawu danych, korekty zegara satelity, ● T_{GD} – opóźnienie propagacyjne, ● t_{OC} – poprawka czasu zegara satelity, ● α_{f2} , α_{f1} , α_{f0} – współczynniki wielomianu opisujące poprawkę zegara satelity.

W II podramce znajdują się następujące efemerydy orbitalne: ● IODE – parametr odniesienia dla danych efemerydalnych, ● C_{rs} – wyraz poprawkowy sinusoidalny do promienia orbity, ● Δn – przyrost ruchu średniego, ● M_0 – anomalia średnia w chwili odniesienia, ● C_{uc} – wyraz poprawkowy cosinusoidalny do argumentu szerokości,

● $a^{1/2}$ – pierwiastek kwadratowy z dużej półosi elipsy, ● t_{oe} – czas odniesienia efemerydy.

III podramka zawiera efemerydy orbitalne: ● C_{ic} – wyraz poprawkowy cosinusoidalny do kąta inklinacji, ● Ω_c – długość węzła wstępującego orbity w epoce tygodnia, ● C_{is} – wyraz poprawkowy sinusoidalny do kąta inklinacji, ● i_0 – kąt inklinacji w chwili odniesienia, ● C_{rc} – wyraz poprawkowy cosinusoidalny do promienia orbity, ● ω – argument perygeum, ● Ω_e – pochodna Ω_e względem czasu, ● IODE – pierwiastek kwadratowy z dużej półosi orbity, ● i – pochodna kąta „i” względem czasu.

W podramce IV transmitowane są następujące parametry: ● almanach satelitów o numerach PRN większych niż 24, ● dane NMCT, ● dane do poprawki jonosferycznej i UTC, ● stan „zdrowia” satelitów o numerach większych niż 24.

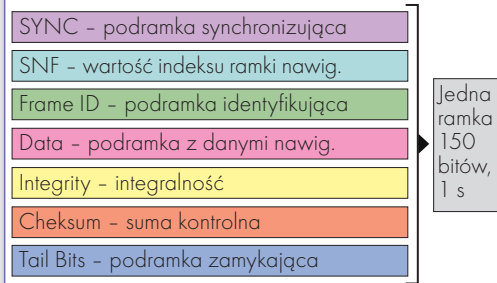
Z kolei podramka V zawiera: ● almanach satelitów o numerach PRN mniejszych niż 25, ● stan „zdrowia” satelitów o numerach PRN mniejszych niż 25, ● czas odniesienia i numer tygodnia dla danych zawartych w almanachu.

● EFEMERYDY I ALMANACH

Depesza nawigacyjna Galileo składać się będzie z dwóch zasadniczych części: danych efemerydalnych i almanachu. Efemerydy każdego satelity systemu (zarówno GPS, jak i Galileo) obejmują 17 parametrów: ● 6 elementów orbity Keplera, ● 6 współczynników harmonicznych ● kąt inklinacji orbity, ● rząd poprawek węzła wstępującego LAN (Longitude of the Ascending Node), ● średnie poprawki ruchu, ● referencyjny czas efemeryd, ● dane na moment rozpoczęcia transmisji depeszy IODE liczące 8 bitów lub parametr IOD (Issue Of Data) liczący 6 bitów.

Almanach systemu Galileo będzie się składał z danych o konfiguracji satelitów, poprawki dla pokładowego wzorca czasowego (16 bitów), poprawki służącej odniesieniu do czasu UTC (104 bity) i korelacji z GPS (72 bity). Dane opisujące konfigurację satelitów zarówno Galileo, jak i GPS to: ● 12 parametrów orbit (po cztery dla każdej z trzech orbit), pierwiastek kwadratowy dużej półosi elipsy błędów, promień mimośrodu, kąt inklinacji oraz długość geograficzna węzła wstępującego, ● 3 parametry zawierające ar-

RYS. 8. BUDOWA DEPEZY NAWIGACYJNEJ GALILEO



RYS. 9. BUDOWA DEPEZY NAWIGACYJNEJ GPS



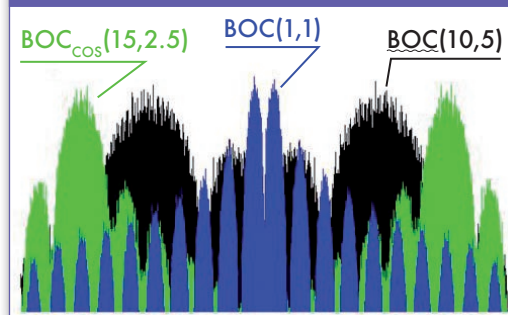
gumenty perygeum pierwszego satelity dla każdej orbity, ● 30 parametrów zawierających średnią anomalię dla każdego z 30 satelitów.

Plan częstotliwości i sygnałów Galileo został ustalony, pozostaje już tylko czekać na jego realizację i ostatecznie wdrożyć teorię w praktykę.

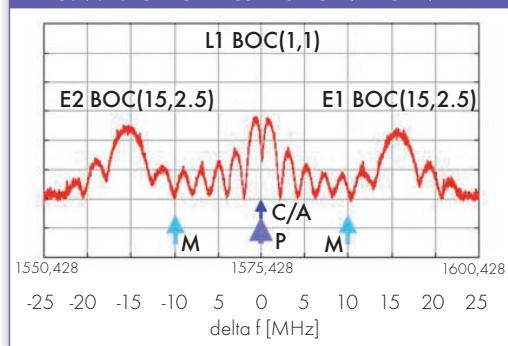
MARTA KRYWANIS

jest pracownikiem Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk

RYS. 6. MODULACJA BOC



RYS. 7. MODULACJA SYGNAŁU NA L1



Źródła:

- [1] Specht C., 2007: System GPS, Wydawnictwo Bernardinum, Pelplin;
- [2] Januszewski J., 2006: Systemy satelitarne GPS, Galileo i inne, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa;
- [3] Hodgart S. M., Blunt P. B., Unwin M., 2008: Double Estimator – a new receiver for tracking BOC signals, „GPS World” (Spring 2008);
- [4] NAWI nr 8 (10) 2005;
- [5] www.esa.int;
- [6] Inside GNSS, The MBOC modulation. A final touch for the Galileo Frequency and Signal Plan (September/October 2007);
- [7] Informacja rządu przygotowana w związku z art. 9 ust. 3 ustawy z 11 marca 2004 r. o współpracy Rady Ministrów z Sejmem i Senatem w sprawach związanych z członkostwem RP w UE (DzU nr 52, poz. 515);
- [8] <http://galileo.kosmos.gov.pl>;
- [9] http://esamultimedia.esa.int/docs/galileo/ESA_Galileo_CMCU.pdf;
- [10] GalileoTech News. Navigation Signal Generation Unit (NSGU), European Space Agency, 2003;
- [11] Narkiewicz J., 2007: GPS i inne satelitarne systemy nawigacyjne. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa;
- [12] Hein G., 2002: Status of Galileo Frequency and Signal Design, ION GPS 2002, Portland, raport;
- [13] Eissfelder B., Hein G. W., Winkel J. i Hartl P., 2000: Galileo Signal Options, „Galileo’s World”;
- [14] Braibanti R., 2004: GPS-Galileo Cooperation Agreement, prezentacja dla USA, Seul, 2 listopada.