

*В.В. Конін, д. т. н., проф., О.С. Савчук, студентка
(Національний авіаційний університет, Україна)*

МОДЕЛЬ СИГНАЛУ СИСТЕМИ GALILEO З НОВИМ ТИПОМ МОДУЛЯЦІЇ ВОС

В програмному середовищі MatLab розроблена модель і виконано моделювання характеристик сигналу супутникової системи GALILEO з новим видом модуляції ВОС.

У роботі використовуватимемо меандрові радіосигнали з ВОС- модуляцією типів ВОС(1/2, 1) і ВОС(1, 1).

У статті під терміном «символ псевдовипадкової послідовності (ПВП)» розуміється відеосигнал меандрової форми. Сама ПВП, як звичайно, складається з деякої кількості цих символів з використанням кодових коефіцієнтів, які відображають як символіку коду (наприклад, приймаючи значення +1 або -1), так його тип і характеристики. Терміни «одиначний символ ПВП» і «одиначна ПВП» означають, що розглядаються вирази, що описують відповідно один символ ПВП і один період ПВП.

ПВП мають одиничні амплітуди, тому отримані вирази характеризують нормовані спектри.

Випромінюваний меандровий ВОС - сигнал середньоорбітальних СРНС у типовому випадку двійкової фазової маніпуляції зовні має форму запису:

$$s(t - t_0) = Ad(t - t_0) \cos[\omega_0(t - t_0) + \varphi(t)], \quad (1)$$

де A – амплітуда сигналу, $d(t)$ – меандрова ПВП далекомірного коду, що представляє собою позитивні або негативні відеоімпульси одиничної амплітуди й однакової тривалості, які чергуються за певним законом, $\omega_0(t)$ – кругова несуча частота, $\varphi(t)$ – фаза сигналу, t_0 – початок відліку.

Меандрова ПВП (МПВП) далекомірного коду $d(t)$ (для інформаційного сигналу) є результатом перемножування, як правило, чотирьох послідовностей: власне ПВП далекомірного коду, додаткового меандрового коливання (специфіка ВОС – сигналів), посилок навігаційного повідомлення й посилок синхрокоду для забезпечення тактової синхронізації при функціонуванні. Далі важатимемо, що МПВП $d(t)$ обумовлена власне ПВП далекомірного коду й меандровим коливанням.

Типова МПВП далекомірного коду (модулююча функція ВОС – сигналу) $d(t)$ може бути записана у вигляді:

$$d(t - t_0) = g(t - t_0)r(t - t_0), \quad (2)$$

де $g(t)$ – власне ПВП далекомірного коду, що також характерна й для традиційних СРНС; $r(t)$ – меандрове коливання, що відбиває специфіку нового класу сигналів СРНС.

Меандрове коливання $r(t)$ визначається виразом виду [2]:

$$r(t) = \text{sign}[\sin \omega_m t], \quad (3)$$

де $\omega_m = 2\pi f_m$ – кругова частота меандрового коливання; $f_m = 1/T_m$ – частота меандрового коливання; $T_m = 2\tau_m$ – період меандрового коливання; τ_m – тривалість імпульсу меандрового коливання (меандрового імпульсу).

Функція «сигнум» з дорівнює:

$$\text{sign } z = \begin{cases} 1, & z > 0; \\ 0, & z = 0; \\ -1, & z < 0. \end{cases}$$

Видно, що

$$f_m = \frac{1}{2\tau_m}. \quad (4)$$

Вираз ПВП далекомірного коду $g(t)$, що описує один її період, має вигляд [2]

$$g(t-t_0) = \sum_{i=0}^{l-1} v_k \text{rect}_c[t-i \cdot \tau_c - t_0], \quad (5)$$

де l – кількість символів на періоді ПВП; $i = 0, 1, 2, \dots, (l-1)$; v_k – кодові коефіцієнти, які утворюють ПВП; rect_c – функція, яка являє собою імпульс одиничної амплітуди тривалістю τ_c ; τ_c – тривалість символу (елементу) ПВП; t_0 – початковий момент часу.

Для реалізації математичної функції rect_c використаємо функцію вбудовану в Matlab: $\text{rect} = \text{rectpuls}(t, i \cdot 2 \cdot \tau_c)$ [1].

Тривалість періоду ПВП дорівнює $T = l \cdot \tau_c$.

Важливі властивості МПВП визначаються двома параметрами: $f_c = 1/\tau_c$ – частота проходження символів ПВП $g(t)$ і $f_m = 1/2\tau_m$ – частота меандрового коливання $r(t)$ [2].

Для порівняльної характеристики типів меандрової модуляції застосовується наступне позначення: ВОС (f_m, f_c). Оскільки на практиці частоти f_m, f_c звичайно кратні опорній частоті f_{on} , (зокрема, для систем GPS і Galileo $f_{on} = 1,023$ МГц), то часто використовується й трохи інша форма запису для позначення типу меандрової модуляції радіосигналів: ВОС(α, β), де $\alpha = f_m / f_{on}$ і $\beta = f_c / f_{on}$ [2].

Для кількісної характеристики різних типів ВОС – сигналів використовують коефіцієнт кратності меандрових імпульсів N_m , що дорівнює кількості імпульсів меандрового коливання $r(t)$, що містяться в меандровому символі $g(t)$, [2]:

$$N_m = \frac{\tau_c}{\tau_m} = \frac{2f_m}{f_c}. \quad (6)$$

На рис. 1 зображені результати моделювання меандрового коливання $r(t)$, 20 символів ПВП далекомірного коду $g(t)$ і МПВП далекомірного коду $d(t)$, що їм відповідають, при коефіцієнті кратності $N_m=2$ (тип меандрової модуляції ВОС (1, 1)).

При розрахунках використовуємо первинний код №1 системи Галілео на частоті E1 (компонент E1-B) – оптимізовану псевдовипадкову послідовність $g(t)$ [3]. Цей сигнал має такі параметри: $T=4$ мс; $l=4092$; $f_c=1,023$ МГц. [3, 4].

Одиночний символ меандрової ПВП далекомірного коду $d(t)$, тобто меандровий символ має тривалість $\tau_c = N_m \cdot \tau_m$ і з урахуванням співвідношень (2), (3) і (5) може бути описаний виразом виду [2]:

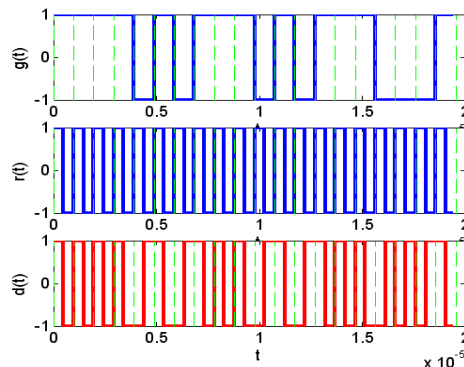


Рис. 1. Меандрове коливання $r(t)$, 20 символів ПВП далекомірного коду $g(t)$, МПВ далекомірного коду $d(t)$

$$\mu_c(t) = \sum_{m=0}^{N_m-1} (-1)^m \text{rect}_m[t - m \cdot \tau_m]. \quad (7)$$

При аналізі виразів (2), (3), (6) і (7) видно, що формула для одиночної МПВП далекомірного коду $d(t)$ різна залежно від того, ціле або неціле число періодів T_m меандрового коливання $r(t)$ укладається на інтервалі τ_c (тобто коефіцієнт N_m – парне або непарне число) [2]

$$d(t-t_0) = \sum_{i=0}^{l-1} v_k \cdot \mu_c(t - i \cdot N_m \cdot \tau_m - t_0), \text{ якщо } N_m - \text{ парне число}, \quad (8)$$

$$d(t-t_0) = \sum_{i=0}^{l-1} (-1)^i v_k \cdot \mu_c(t - i \cdot N_m \cdot \tau_m - t_0), \text{ якщо } N_m - \text{ непарне число}.$$

Енергетичний спектр (спектральна щільність потужності) $S(\omega)$ одиночного символу $\mu_c(t)$ меандрової ПВП далекомірного коду є перетворення Фур'є від відповідної кореляційної функції.

Вираз для енергетичного спектру $S(\omega)$ одиночного символу $\mu_c(t)$ меандрової ПВП далекомірного коду при різних значеннях коефіцієнта кратності N_m має вигляд [2]:

$$S(f) = \frac{1}{f_c} \left[\frac{\sin(\frac{\pi f}{f_c})}{\frac{\pi f}{f_c}} \cdot \text{tg}(\frac{\pi f}{N_m \cdot f_c}) \right] \text{ при } N_m - \text{ парному}, \quad (9)$$

$$S(f) = \frac{1}{f_c} \left[\frac{\cos(\frac{\pi f}{f_c})}{\frac{\pi f}{f_c}} \cdot \text{tg}(\frac{\pi f}{N_m \cdot f_c}) \right] \text{ при } N_m - \text{ непарному}. \quad (10)$$

На рис.2 а зображені результати моделювання енергетичних спектрів $S(f)$, розрахованих за допомогою програми Matlab згідно (9, 10) для 2 значень коефіцієнта кратності: $N_m = 1$ і $N_m = 2$.

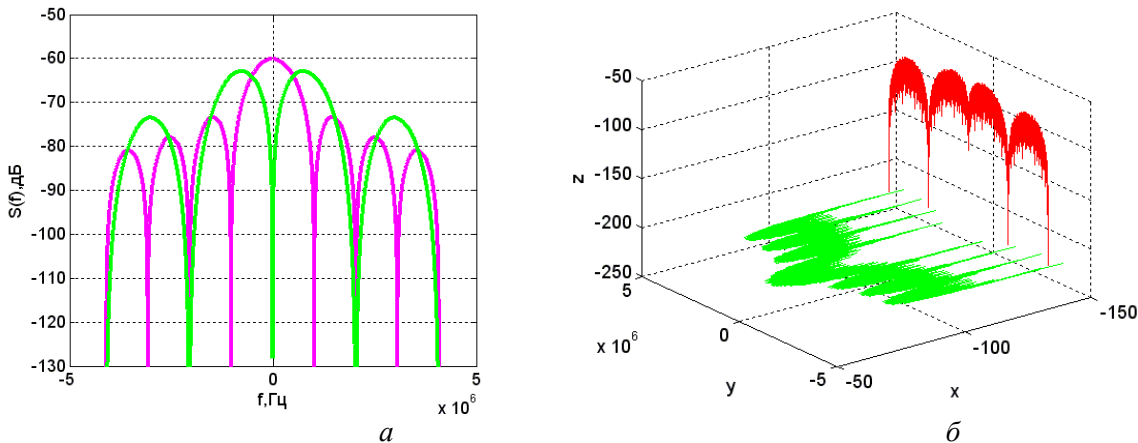


Рис. 2. а – Графіки енергетичних спектрів, розраховані для 2 значень коефіцієнта кратності: $N_m = 1$ і $N_m = 2$.; б – Графіки спектрів двох СРНС – Галілео і GPS

За допомогою функції спектрального аналізу в Matlab $y = \text{fft}(d)$ [1], яка обчислює пряме дискретне перетворення Фур'є, отримаємо графіки спектрів для сигналів, двох СРНС – GPS (площина XOY) і Галілео (площина YOZ), в яких застосовується модуляція BOC(1/2, 1) або (BPSK(1)) і BOC(1, 1) відповідно. При розрахунках було прийнято, що в обох системах $f_c = 1,023$ МГц, для Галілео довжина коду $l = 4092$, а для GPS – $l = 1023$ [3, 4]. На рис. 2 б представлені графіки спектрів двох СРНС – Галілео і GPS.

Проаналізуємо кореляційну функцію для вище згаданих двох систем, тобто для 2 типів модуляції BOC(1/2, 1) або (BPSK(1)) і BOC(1, 1). За допомогою функції Matlab $R = \text{xcorr}(x)$ [1]

обчислимо автокореляційну функцію МПВП системи Галілео (рис. 3 а), системи GPS (рис. 3 б) і взаємну кореляційну функцію для цих двох систем (рис. 4).

Аналізуючи дані графіки, можна побачити, що кореляційна функція при модуляції ВОС(1,1) – багатопелюсткова (кількість піків дорівнює $2 \cdot N_m - 1 = 3$), втричі збільшився кут нахилу прямих, які утворюють основний пік кореляційної функції, порівняно з модуляцією типу ВОС(1/2, 1).

З рис. 4 видно, що графік взаємної кореляційної функції ГАЛІЛЕО і GPS не має добре виражених піків, а це означає, що може ефективніше використовуватись частотний спектр в L діапазоні.

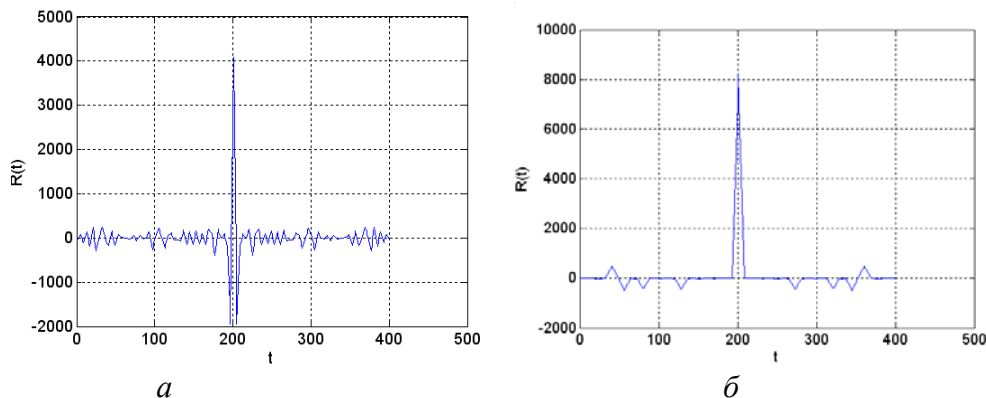


Рис. 3. а – Графік автокореляційної функції МПВП системи Галілео (ВОС(1,1)); б – графік автокореляційної функції ПВП системи GPS (ВОС(1/2, 1)).

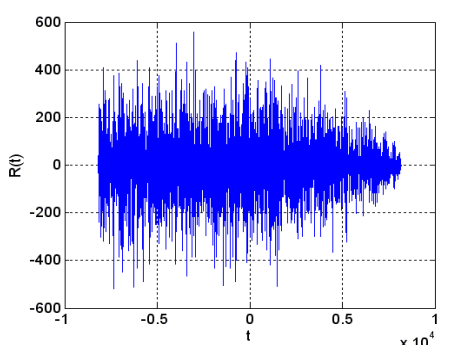


Рис 4. Графік взаємної кореляційної функції сигналів системи Галілео і GPS.

Висновки

Отримана модель сигналу супутникової навігаційної системи GALILEO з новим видом ВОС – модуляції. Модель дозволяє досліджувати характеристики сигналу GALILEO: автокореляційну функцію, спектр для будь-якого коду GALILEO, а також оцінювати взаємний вплив сигналів GALILEO і GPS.

Список літератури

1. Сигриенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: «Питер», 2002. – 608 с.
2. Ярлыков М. С. Меандровые радиосигналы (ВОС – сигналы) в спутниковых радионавигационных системах нового поколения. – М.: Новости навигации, 2007, № 3.
3. Galileo Open Service. Signal In Space. Interface Control Document . OS SIS ICD, Draft 1. «European Space Agency», 2008. – 166 p.
4. Jean-Luc Issler, Gunter W. Hein, Jeremie Godet, Jean-Christophe Martin, Philippe Erhard, Rafael Lucas-Rodriguez, Tony Pratt. Система Galileo. Структура частот и сигналов системы спутникового позиционирования. Пер.: «Невгеоком», 2003.