

УДК 629.735.05:621.396.962(045)

**А.О. Юрчук**  
**В.М. Шутко, д.т.н.****ПРИНЦИП ФОРМУВАННЯ МЕАНДРОВИХ ШУМОПОДІБНИХ РАДІОСИГНАЛІВ  
(ВОС-СИГНАЛІВ) І ЇХ КЛАСИФІКАЦІЯ**Національний авіаційний університет, м. Київ, [alindim@mail.ru](mailto:alindim@mail.ru)

*Проаналізовано властивості і характеристики меандрових (ВОС-модульованих) шумоподібних сигналів (ШПС) для нового покоління супутникових радіонавігаційних систем, Galileo і модернізованої GPS. Розглядається принцип формування меандрових шумоподібних сигналів та їх класифікація.*

**Ключові слова:** меандровий шумоподібний сигнал, ВОС-сигнал, супутникова навігаційна система, GPS, Galileo.

**Вступ**

Традиційні шумоподібні сигнали знайшли широке застосування в різноманітних радіотехнічних системах, в тому числі в супутникових радіонавігаційних системах. Аналіз стану та шляхів розвитку супутникових навігаційних систем вказує на перспективи застосування нового виду сигналів – меандрових шумоподібних сигналів (МШПС). Такі сигнали дозволяють більш ефективно використовувати обмежений частотний ресурс, в якому розміщені сигнали різних систем з різними характеристиками і методами модуляції. Нові сигнали забезпечують більш високі точнісні характеристики і завадозахищеність. Такі сигнали, що використовують бінарні меандри, в англomовній літературі називаються ВОС-сигнали (binary offset carrier signals).

Меандрові шумоподібні сигнали (ВОС-сигнали) будуть застосовуватись на супутниках нового покоління (GPS-III) системи GPS і в системі Galileo.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Перші згадки в літературі використання ВОС-сигналів для супутникових радіонавігаційних систем з'явились в 1999 році. [1]. Формування і характеристики ВОС-сигналів наведені в англomовній літературі, присвяченій модернізації системи GPS і системі, що знаходиться в процесі розробки, Galileo [2, 3]. В російськомовній літературі опис і характеристики ВОС-сигналів наводяться в працях [4, 5, 6].

**Постановка завдання**

Основне завдання полягає в розгляді принципу формування меандрових шумоподібних радіосигналів (ВОС-сигналів), обговоренні їх властивостей та класифікації.

Відмінність МШПС від традиційних, що використовуються сьогодні в системах ГЛОНАСС і GPS (немодернізованих), полягає в наступному: у традиційних ШПС кожен символ (елемент), що розширює спектр, псевдовипадкової послідовності (ПВП) далекомірного коду являє собою одиничний прямокутний відеоімпульс певної тривалості, тоді як у меандрових ШПС кожен символ, що розширює спектр, ПВП має складну форму і являє собою деякий відрізок меандрового коливання тієї ж тривалості, який містить певне однакове число меандрових відеоімпульсів (меандровий символ).

У статті під терміном “символ (елемент) ПВП” розуміється відеосигнал певної (як правило, меандрової або іншої складної) форми. Сама ПВП, звичай, складається з деякої кількості цих символів з використанням кодових коефіцієнтів, які відображають як символіку коду (наприклад, приймаючи значення +1 або -1), так і його тип та характеристики.

Терміни “одиничний символ ПВП” і “одинична ПВП” (або “одиничний ШПС”) означають, що розглядаються вирази, що описують відповідно один символ (елемент) ПВП і один період ПВП (або один період ШПС). Обговорювані в роботі ПВП мають одиничні амплітуди, тому отримані вирази характеризують нормовані спектри.

**Вирішення поставленого завдання**

Меандрові ШПС (ВОС-сигнали) модернізованих і нових СРНС утворюються в результаті двійкової фазової маніпуляції радіосигналів меандрової ПВП (МПВП) далекомірного коду. В

свою чергу МПВП формується в результаті перемноження (при певній взаємній синхронізації) традиційної ПВП далекомірного коду, в якій символ являє собою прямокутний відеоімпульс тривалістю  $\tau_c$ , з меандровим коливанням, що складається з більш коротких в порівнянні з інтервалом  $\tau_c$  відеоімпульсів. Типи і властивості самих ПВП далекомірного коду визначаються на основі певних вимог. В тому випадку, коли на інтервалі  $\tau_c$  вкладається лише один імпульс меандрового коливання, меандрова ПВП трансформується, по суті, в традиційну. При цьому мають місце звичайні фазоманіпульовані ШПС.

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

$$s(t-t_0) = A d(t-t_0) \cos[\omega_0(t-t_0) + \phi(t)], \quad (1)$$

де  $A$  – амплітуда сигналу,  $\omega_0 = 2\pi f_0$  – кругова несуча частота,  $f_0$  – несуча частота,  $\phi(t)$  – фаза сигналу,  $t_0$  – початок відліку,  $d(t)$  – меандрова ПВП далекомірного коду, що представляє собою позитивні або негативні відеоімпульси одиничної амплітуди і однаковою тривалості, що чергуються за певним законом.

Меандрова ПВП далекомірного коду  $d(t)$  (для інформаційного сигналу) є результатом перемноження, як правило, чотирьох послідовностей: власне ПВП далекомірного коду, додаткового меандрового коливання (специфіка ВОС-сигналів), посилення навігаційного повідомлення та посилення синхрокоду для забезпечення тактової синхронізації при функціонуванні [2]. Далі для стислості вважаємо, що МПВП  $d(t)$  зумовлена власне ПВП далекомірного коду і меандровим коливанням.

Зауважимо, що саме використання меандрових коливань у радіосигналах СРНС не нове, тому що вони і раніше використовувалися і використовуються в синхрокоді (манчестерський код), що використовується для скорочення часу встановлення тактової синхронізації в приймачі.

Типова МПВП далекомірного коду (модуюча 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, яка також характерна і для традиційних СРНС;  $r(t)$  – меандрове коливання, що відображує специфіку нового класу сигналів СРНС.

Таким чином, меандрова ПВП  $d(t)$  утворюється шляхом перемноження взаємно синхронізованих двійкових послідовностей  $g(t)$  і  $r(t)$ , кожна з яких складається з одиничних відеоімпульсів відповідної тривалості, що чергуються та міняють свою полярність за певними законами згідно кодовим коефіцієнтам, значення яких дорівнюють +1 або -1.

Якщо функції  $d(t)$ ,  $g(t)$ ,  $r(t)$  розглядати як кодові послідовності символів 1 і 0, що чергуються за своїми законами, то, звичайно, операція множення у виразі (2) замінюється на операцію додавання за модулем 2.

Меандрове коливання  $r(t)$  визначається виразом виду [4, 6]:

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

де функція “сігнум” з рівня

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

$\omega_M = 2\pi f_M$  – кругова частота меандрового коливання,  $f_M = 1/T_M$  – частота меандрового коливання,  $T_M = 2\tau_M$  – період меандрового коливання,  $\tau_M$  – тривалість імпульсу меандрового коливання (меандрового імпульсу). Звідси  $f_M = 1/2\tau_M$ .

Вираз ПВП далекомірного коду  $g(t)$ , що описує один її період, має вигляд [5]:

$$g(t-t_0) = \sum_{k=0}^{L-1} v_k \text{rect}_c[t - k\tau_c - t_0], \quad (4)$$

де  $\tau_c$  – тривалість символу (елемента) ПВП;  $L$  – кількість символів на періоді ПВП;  $t_0$  – початкова умова;  $k=0, 1, 2, \dots, (L-1)$ . Функція  $rect_c[\cdot]$  являє собою імпульс одиничної амплітуди і тривалістю  $\tau_c$ :

$$rect_c[t - k\tau_c] = \begin{cases} 1 & \text{якщо } k\tau_c \leq t < (k+1)\tau_c; \\ 0 & \text{якщо } t \geq (k+1)\tau_c. \end{cases}$$

Кодові коефіцієнти  $\nu_k$ , що утворюють ПВП (4), приймають на кожному інтервалі  $\tau_c$  значення +1 чи -1 відповідно до закону чергування символів на її періоді. Тривалість періоду ПВП дорівнює  $T_L = L\tau_c$ .

Важливі властивості МПВП  $d(t)$  і відповідних їм меандрових радіосигналів (ВОС-сигналів) в СРНС багато в чому визначаються двома параметрами:  $f_c = 1/\tau_c$  – частота слідування символів ПВП  $g(t)$  і  $f_M = 1/2\tau_M$  – частота меандрового коливання  $r(t)$ . Відповідно до цього, як відомо, при розгляді властивостей нового класу радіосигналів СРНС для порівняльної характеристики типів меандрової модуляції застосовується наступне позначення: ВОС( $f_M, f_c$ ) (або МПВП( $f_M, f_c$ )). Оскільки на практиці частоти  $f_M, f_c$  зазвичай кратні опорній синхрочастоті  $f_{on}$  в СРНС (зокрема, для систем GPS і Galileo  $f_{on} = 1,023$  МГц), то часто використовується і дещо інша форма запису для позначення типу меандрової модуляції радіосигналів: ВОС( $\alpha, \beta$ ) (або МПВП( $\alpha, \beta$ )), де  $\alpha = f_M / f_{on}$  і  $\beta = f_c / f_{on}$ . Так, наприклад, у модернізованій системі GPS в разі застосування радіосигналів М-коду використовується меандрова модуляція типу ВОС (10,5) при наступних значеннях параметрів:  $f_M = 10$  МГц і  $f_c = 5$  МГц,  $f_{on} = 5,115$  МГц.

Зауважимо, якщо в ВОС-сигналах використовується модуляція типу ВОС( $\alpha, \beta$ ), причому  $\alpha, \beta$  – цілі позитивні числа і  $\alpha = \beta$ , то такий тип меандрової модуляції носить назву модуляції манчестерським кодом.

Класифікація меандрових радіосигналів СРНС зазвичай здійснюється відповідно до однієї з двох ознак: 1) за відносним фазуванням коливань  $r(t)$  і  $g(t)$ , 2) за ступенем кратності тривалостей меандрового імпульсу і символу ПВП.

При використанні першої класифікаційної ознаки розрізняють синусну меандрову модуляцію (sinВОС-сигнали) і косинусну меандрову модуляцію (cosВОС-сигнали). При sinВОС-сигналах меандрова ПВП  $d_{Sin}(t)$  визначається виразами (2) і (3). При cosВОС-сигналах меандрова ПВП характеризується виразом (2), в якому меандрове коливання  $r_{Cos}(t)$  має вигляд:

$$r_{Cos}(t) = \text{sign}[Cos\omega_M t]. \quad (5)$$

При використанні другої класифікаційної ознаки для кількісної характеристики різних типів меандровий ШПС (ВОС-сигналів) вводиться коефіцієнт кратності меандрових імпульсів  $N_M$ , який дорівнює кількості імпульсів меандрового коливання  $r(t)$ , що вкладаються на тривалості символу ПВП  $g(t)$ , тобто містяться в меандровому символі [4]:

$$N_M = \frac{\tau_c}{\tau_M} = \frac{2f_M}{f_c}. \quad (6)$$

Одиничний символ (елемент) меандрової ПВП далекомірного коду  $d(t)$ , тобто меандровий символ має тривалість  $\tau_c = N_M \tau_M$  і з урахуванням співвідношень (2), (3) і (4) може бути описаний виразом виду:

$$\mu_c(t) = \sum_{m=0}^{N_M-1} (-1)^m rect_M[t - m\tau_M], \quad (7)$$

де  $N_M$  – коефіцієнт кратності імпульсів меандрового коливання.

Із розгляду виразів (2), (3), (4), (7) видно, що формула для одиничної меандрової ПВП далекомірного коду  $d(t)$  різноманітна в залежності від того, ціле чи неціле число періодів  $T_M$

меандрового коливання  $r(t)$  поміщається на інтервалі  $\tau_c$  (тобто коефіцієнт  $N_M$  – парне чи непарне число).

Таким чином вираз для одиничної меандрової ПВП далекомірного коду (модулююча функція ВОС-сигналів) має вигляд:

$$d(t-t_0) = \sum_{k=0}^{L-1} v_k \mu_c(t-k N_M \tau_M - t_0), \quad \text{якщо } N_M - \text{парне}; \quad (8)$$

$$d(t-t_0) = \sum_{k=0}^{L-1} (-1)^k v_k \mu_c(t-k N_M \tau_M - t_0), \quad \text{якщо } N_M - \text{непарне}. \quad (9)$$

Зіставлення (4), (8) і (9) показує, що меандровий ШПС (ВОС-сигнали) можна трактувати як традиційні ШПС з двійковою фазовою маніпуляцією, але тільки з тією відмінністю, що одиничний символ (елемент) меандрової ПВП далекомірного коду  $d(t)$  має складну форму і є меандровим символом  $\mu_c(t)$ , а не просто прямокутним відеоімпульсом тривалістю  $\tau_c$ . Згідно (7) символ  $\mu_c(t)$  являє собою відрізок меандрового коливання  $r(t)$  тривалістю  $\tau_c$ , що містить кілька меандрових відеоімпульсів, число яких дорівнює коефіцієнту кратності  $N_M$ .

Зауважимо, що при  $N_M$  – непарному числі в формулах (8) і (9) присутній множник  $(-1)^k$ , який забезпечує з'єднання функцій  $\mu_c(t-k\tau_c)$  на сусідніх проміжках  $\tau_c$  в безперервне меандрове коливання  $(-1)^k \mu_c(t-k\tau_c)$ , де  $k=1, 2, \dots, (L-1)$ , на всьому періоді ПВП далекомірного коду  $T_L$ .

### Висновки

В основі принципу формування меандрових шумоподібних радіосигналів (ВОС-сигналів) має місце двійкова фазова маніпуляція радіосигналів меандрової ПВП (МПВП) далекомірного коду. Меандрова ПВП далекомірного коду  $d(t)$ , для стислості, розглянута, як результат перемноження власне ПВП далекомірного коду і додаткового меандрового коливання (специфіка ВОС-сигналів). Для нового покоління супутникових радіонавігаційних систем, Galileo і модернізованої GPS, наведена класифікація меандрових радіосигналів відповідно до однієї з двох ознак: за відносним фазуванням коливань  $r(t)$  і  $g(t)$ , та за ступенем кратності тривалостей меандрового імпульсу і символу ПВП. Серед важливих переваг середньоорбітальних супутникових радіонавігаційних систем (СРНС), в яких передбачається застосування меандрових радіосигналів, можна виділити такі: потенційно більш висока завадостійкість і точність, та більш ефективне використання частотного спектру в умовах помітно зростаючого числа цивільних і військових користувачів.

### Список літературних джерел

1. Betz J.W. The Offset Carrier Modulation for GPS Modernization // Proceeding of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation (ION – NTM99), January 1999, P.639-648.
2. Betz J.W. Binary Offset Carrier Modulation for Radionavigation // Navigation, Journal of ION, 2001-2002, V.48, №4. P.227-235.
3. Understanding GPS, Elliott Kaplan, 2nd ed., ARTECH HOUSE, 2006. P.726.
4. Ярлыков М.С. Меандровые радиосигналы (ВОС-сигналы) в спутниковых радионавигационных системах нового поколения. – М.: Новости навигации, 2007, № 3. С.10-23.
5. Ярлыков М.С. Характеристики меандровых сигналов (ВОС-сигналов) в спутниковых радионавигационных системах нового поколения. – М.: Радиотехника, 2008, № 8. С.61-75.
6. Вейцель А.В. Новый класс меандровых шумоподобных радиосигналов для радионавигационных систем. – М.: Электроника, радиотехника и связь, Вестник МАИ, 2009, Т.16, №7. С.43-48.