

УДК 621.396

К.В. Герасименко

Державний університет телекомунікацій, Київ

## МОДЕЛІ НАВМИСНИХ ПЕРЕШКОД СИГНАЛАМ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Розглянуті проблеми забезпечення перешкодостійкості навігаційної апаратури споживачів супутникових радіонавігаційних систем (СРНС) та математичні моделі навмисних перешкод сигналам СРНС GPS та ГЛОНАСС, що дозволяє оцінити ефективність їх подавлення структурними та шумовими перешкодами.

**Ключові слова:** супутникові радіонавігаційні системи, апаратура споживачів, навмисні перешкоди.

### Вступ

На сучасному етапі розвитку засобів координатно-часового забезпечення широкого кола споживачів базовими є глобальні супутникові радіонавігаційні системи (СРНС) ГЛОНАСС і GPS. Успіхи в галузі мікроелектроніки дозволили створити малогабаритне і порівняно дешеве приймальне обладнання, яке забезпечує високу точність навігаційно-часових визначень, що при глобальній зоні дії вказаних систем зумовлює постійно зростаюче коло завдань, які вирішуються на основі технологій СРНС. Це, у свою чергу, посилює вимоги, що пред'являються до точності, надійності, цілісності та доступності сигналів СРНС. Оскільки рівень системних сигналів в точці прийому (-157 ... -171 дБВт) низький, задовольнити комплекс вимог неможливо без істотного підвищення завадостійкості функціонування приймальної навігаційної апаратури споживачів (НАС) [1, 2].

**Постановка завдання в загальному вигляді.** В умовах широкої номенклатури сучасних приймачів і радіоелектронних комплексів на їх основі розробники і користувачі такої апаратури зацікавлені в її максимальній уніфікації та універсальності застосування окремих модулів у випадку, якщо ідеологія радіоелектронного комплексу дозволяє його блочне виконання. Тому перспективною та необхідною є ідея побудови апаратури подавлення перешкод у вигляді окремого функціонально завершеного модуля, що включається за бажанням споживача між виходом антенної системи і високочастотним входом практично будь-якого сучасного приймача СРНС. Тим самим досягаються як універсальність застосування апаратури, так і певний економічний ефект, що полягає в тому, що користувачів не будуть змушувати оновлювати парк приймального обладнання повністю.

**Аналіз основних публікацій.** Дослідженням в цьому напрямку присвячене достатня кількість

робіт [1 – 10]. Але варто підкреслити те, що найбільш небезпечною для НАС є широкопasmовою перешкодою [1, 3], а найбільш ефективним способом її придушення – просторова режекція [2 – 4], оскільки при досягненні необхідних значень придушення перешкоди в корисний сигнал вносяться мінімальні спотворення.

Виходячи з цього, метою статті є аналіз способів подавлення сигналів СРНС навмисними перешкодами та визначення відповідних математичних моделей перешкод для подальшої оцінки їх ефективності.

### Основний матеріал

На думку фахівців навмисні перешкоди радіонавігаційним сигналам СРНС умовно доцільно розділити на структурні та шумові [4 – 6].

Структурні перешкоди повторюють структуру супутникового навігаційного повідомлення форматів ГЛОНАСС або GPS і можуть містити або не містити довільних даних про місцезнаходження об'єкта. До числа таких перешкод можна віднести перешкоди з фазовою маніпуляцією, модульовані М-последовністю (ПФММ) або кодом Голда (ПФМГ).

До шумових перешкод слід віднести прямошумові перешкоди, які можна розглядати як стаціонарний білий гаусівський шум (БГШ).

Перешкода з фазовою маніпуляцією, модульована М-последовністю, за своєю структурою подібна сигналам СРНС ГЛОНАСС, та її математично можна представити у вигляді [6, 7]

$$\begin{aligned} S_{i,L1}(t) &= \\ &= \sqrt{2P_i} \cdot D_{i,G1}(t) \cdot C_i(t) \cdot \cos(\omega_{i,L1}t + \theta_i); \\ S_{i,L2}(t) &= \\ &= \sqrt{2P_i} \cdot D_{i,G1}(t) \cdot C_i(t) \cdot \cos(\omega_{i,L2}t + \theta_i), \end{aligned} \quad (1)$$

де  $P_i$  - потужність перешкоди сигналу  $i$ -го супутника ГЛОНАСС;

$D_{i,GI}(t)$  - дані і-го супутника ГЛОНАСС, що враховуються при формуванні перешкоди;

$C_i(t)$  - код і-го супутника ГЛОНАСС;

$\omega_{i,L1}$  - кругова частота і-го супутника ГЛОНАСС, що відповідає частоті L1 з урахуванням доплерівського зсуву;

$\omega_{i,L2}$  - кругова частота і-го супутника ГЛОНАСС, що відповідає частоті L2 з урахуванням доплерівського зсуву;

$\theta$  - початковий фазовий зсув.

Перешкода з фазовою маніпуляцією, модульована кодом Голда, за своєю структурою подібна сигналам GPS та має такий математичний опис [6, 7]:

$$S_{i,L1}(t) = \sqrt{2P_{i,1}} \cdot D_i(t) \cdot C_i(t) \cdot \cos(\omega_{L1}t + \theta_i) + \sqrt{2P_{i,Q}} \cdot P_i(t) \cdot C_i(t) \cdot \sin(\omega_{L1}t + \theta_i); \quad (2)$$

$$S_{i,L2}(t) = \sqrt{2P_{i,Q}} \cdot D_i(t) \cdot P_i(t) \cdot \cos(\omega_{L2}t + \theta_i),$$

де  $S_i(t)$  - завада сигналам і-го супутника GPS;

$t$  - системний час відповідного супутника;

$P_{i,1}$  - потужність синфазної складової і-го супутника GPS;

$D_i(t)$  - дані і-го супутника GPS;

$C_i(t)$  - C/A-код і-го супутника GPS;

$\omega_{L1}$  - кругова частота супутника GPS, відповідна частоті L1 з урахуванням доплерівського зсуву;

$\theta$  - початковий фазовий зсув;

$P_{i,Q}$  - потужність квадратурної складової і-го супутника GPS;

$P_i(t)$  - P-код і-го супутника GPS;

$\omega_{L2}$  - кругова частота супутника GPS, відповідна частоті L2 з урахуванням доплерівського зсуву.

Розглядаючи ПФМГ і ПФММ як сумарний добуток прямокутних імпульсів з одиничною амплітудою і тривалістю  $\tau_N$  і кодовою послідовністю

$$A = (a_1 a_2 a_3 \dots a_N)$$

комплексну огинаючу спектра перешкоди можна представити у вигляді [8, 9]

$$G(\omega) = U_S G_0(\omega) H(\omega), \quad (3)$$

де  $H(\omega) = \sum_{k=1}^N a_k \exp(-i(k-1)\tau_0)$  - спектр кодової послідовності A;

$$G_0(\omega) = \tau_0 \frac{\sin\left(\frac{\omega\tau_0}{2}\right)}{\left(\frac{\omega\tau_0}{2}\right)} \cdot \exp\left(-i\frac{\omega\tau_0}{2}\right) - \text{спектр}$$

прямокутного імпульсу;

$\tau_0$  - тривалість прямокутного імпульсу.

Тут коефіцієнти  $a_k$  є елементами кодової послідовності A, яка представляє собою M-послідовність для ПФММ або код Голда для ПФМГ.

Амплітудний спектр ПФММ і ПФМГ є модулем від спектру комплексної огинаючої спектру завади, який після перетворення виразу (3) набуває наступного вигляду [6, 7]:

$$|G_0(\omega)| = \sqrt{2P} \times \tau_0 \frac{\sin\left(\frac{\omega\tau_0}{2}\right)}{\left(\frac{\omega\tau_0}{2}\right)} \cdot \sum_{k=1}^N \sum_{n=1}^N a_k a_n \cos(k-n)\omega\tau_0. \quad (4)$$

Оскільки перешкода являє собою фазоманіпульоване коливання з частотою  $\omega_0$ , спектр перешкоди в остаточному вигляді може бути представлений у вигляді

$$S(\omega) = \frac{1}{2} |G(\omega - \omega_0)| = \sqrt{2P} \cdot \tau_0 \times \frac{\sin\left(\frac{\omega\tau_0}{2}\right)}{\left(\frac{\omega\tau_0}{2}\right)} \sum_{k=1}^N \sum_{n=1}^N a_k a_n \cos(k-n)(\omega - \omega_0)\tau_0, \quad (5)$$

Наведений вираз дозволяє оцінити тільки спектральну щільність потужності перешкоди з двопозиційною фазовою маніпуляцією. З урахуванням того, що ПФММ та ПФМГ має характер багатократної фазової маніпуляції, вираз (5) можна подати у вигляді [6, 7]

$$S(\omega) = \sqrt{2P} \cdot \tau_0 \frac{\sin\left(\frac{[\omega - \omega_0]\tau_0}{2\log_2 m}\right)}{\left(\frac{[\omega - \omega_0]\tau_0}{2\log_2 m}\right)} \times \sum_{k=1}^N \sum_{n=1}^N a_k a_n \cos(k-n)(\omega - \omega_0)\tau_0 \quad (6)$$

Прямошумову перешкоду, що формується генератором перешкод, можна розглядати як стаціонарний білий гаусівський шум з обмеженим спектром та нульовим математичним сподіванням [5, 6, 9]:

$$M[n(t)] = 0; \quad M[n(t)n(t+\tau)] = \frac{N_0\delta(\tau)}{2}, \quad (7)$$

де  $M[n(t)]$  - математичне сподівання БГШ;

$M[n(t)n(t + \tau)]$  - кореляційна функція БГШ;

$N_0(f) = \text{const}$  - спектральна щільність БГШ.

### Висновки

Аналіз математичних моделей навмисних перешкод СРНС GPS та ГЛОНАСС та ряду досліджень вітчизняних та зарубіжних авторів [1, 3, 6, 7] дозволяє зробити наступні висновки:

ефективність подавлення сигналів СРНС ГЛОНАСС перешкодою з фазовою маніпуляцією, модульованою М-последовністю, перевищує ефективність подавлення перешкодою з фазовою маніпуляцією, модульованою кодом Голда до 2,5 дБ і прямошумовими завадами – до 27 дБ;

ефективність подавлення сигналів СРНС GPS перешкодою з фазовою маніпуляцією, модульованою кодом Голда перевищує ефективність подавлення перешкодою з фазовою маніпуляцією, модульованою М-последовністю до 2,5 дБ і шумовими завадами – до 28 дБ.

Слід зауважити, що отримані результати справедливі при подавленні сигналів одного навігаційного космічного апарата.

Однак, для зриву роботи НАС, як правило, потрібне одночасне подавлення сигналів від декількох НКА.

Частотний розподіл каналів, що використовується в СРНС ГЛОНАСС, з енергетичної точки зору робить її більш завадостійкою в порівнянні з СРНС GPS і СРНС Galileo, в яких застосовується кодове розділення сигналів.

Дослідження показали, що в сучасних умовах основним методом боротьби з перешкодами є формування нулів в діаграмі спрямованості антени НАС в напрямках приходу завад та наступної просторово-часової адаптивної обробки прийнятих навігаційних сигналів.

### Список літератури

1. Naylor J. *Advanced GPS Anti-Jam Technology*. Lockheed Martin / J. Naylor, S. Sorber // *G-Star Lockheed Martin's*. Washington, D. C.: National Press Club, 2000. – P. 1–11.

2. Писарев С.Б. *Возможности пространственной режекции помех при приеме сигналов глобальных навигационных спутниковых систем* / С.Б. Писарев, А.В. Немов, А.М. Иванов, М.М. Фуксов // *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. – 2003. – Вып. 2. – С. 61–72.

3. Forssell B. *Jamming: Susceptibility of Some Civil GPS Receivers* / B. Forssell, T. Desen // *GPS World*. – 2003. – № 1. – P. 54–58.

4. Куприянов А.И. *Теоретические основы радиоэлектронной борьбы. Учебное пособие* / А.И. Куприянов, А.В. Сахаров. – М.: Вузовская книга, 2007. – 356 с.

5. Шебшаевич В.С. *Сетевые спутниковые радионавигационные системы* / В.С. Шебшаевич, П.П. Дмитриев и др. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.

6. Кащеев А.А. *Оценка эффективности подавления сигналов спутниковых радионавигационных систем преднамеренными помехами* / А.А. Кащеев, В.И. Кошелев // *Журнал радиоэлектроники*. – 2012. – № 7. – С. 1–12.

7. Конин В.В. *Спутниковые системы навигации. Учебное пособие* / В. В. Конин, Л. А. Конина. – К.: Наукова думка, 2008. – 286 с.

8. ГЛОНАСС. *Принципы построения и функционирования* / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 3-е, перераб. – М.: Радиотехника, 2005. – 688 с.

9. Варакин Л.Е. *Системы связи с шумоподобными сигналами* / Л.Е. Варакин. – М.: Радио и связь, 1985. – 344 с.

10. Кравченко Ю.В. *Аналіз основних способів зниження радіолокаційної помітності та можливості їх застосування до наземних та повітряних об'єктів* / Ю.В. Кравченко, Т.І. Дубас // *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2014. – №2. – С. 19–25.

Надійшла до редколегії 2.10.2015

Рецензент: д-р техн. наук проф. Ю.В. Кравченко, Київський національний університет ім. Т. Шевченка, Київ.

### МОДЕЛИ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ СИГНАЛАМ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

К.В. Герасименко

*Рассмотрены проблемы обеспечения помехоустойчивости навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем и математические модели преднамеренных помех сигналам GPS и ГЛОНАСС, что позволяет оценить эффективность их подавления структурными и шумовыми помехами.*

**Ключевые слова:** спутниковые радионавигационные системы, аппаратура потребителей, преднамеренные помехи.

### MODEL JAMMING SIGNALS OF SATELLITE RADIO NAVIGATION SYSTEMS

K. V. Gerasimenko

*The problems of providing noise immunity consumer navigation equipment satellite radio navigation systems and mathematical models of jamming GPS and GLONASS that enables them to assess the effectiveness of structural and suppress noise.*

**Keywords:** satellite navigation systems, equipment users, deliberate interference.