

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ ВІД ІМІТУВАЛЬНИХ ПЕРЕШКОД

Надано рекомендації щодо практичного застосування дискретних частотно-модульованих сигналів у системах радіолокаційного спостереження. Показано, що це дозволяє підвищити захист радіолокаційних станцій (РЛС) від імітувальних перешкод та розширити їх функціональні можливості.

Постановка проблеми. Висока щільність завантаження частотного діапазону, в якому виконують поставлені завдання радіолокаційні засоби військового призначення, значний вплив на їх роботу різноманітних перешкод зумовлюють необхідність пошуку ефективних алгоритмів та структур трактів обробки сигналів. Можливість вирішення цих проблем підтверджується стрімким розвитком і широким втіленням у зразки радіолокаційного озброєння цифрових систем.

Застосування малопомітних засобів повітряного нападу, збільшення дальності дії протирадіолокаційної зброї та необхідність приховування факту роботи активних засобів радіолокації вимагає ефективного вирішення проблеми забезпечення потрібного енергетичного потенціалу та розширення набору режимів функціонування. Усі вказані класи завдань, як і захищеність РЛС від впливу імітувальних перешкод, передбачають використання систем сигналів, структура яких не повторюється у сусідніх періодах зондування.

Вибір системи сигналів цілком визначається призначенням РЛС, особливістю їх функціонування та передбачає проведення порівняльного аналізу існуючих систем сигналів.

Крім того, при розробці сучасних та вдосконаленні існуючих РЛС потрібно велику приділяти увагу приховуванню інформації, яка може міститися у радіолокаційних сигналах, та захисту РЛС від впливу імітувальних перешкод.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Достатньо вивчені та широко застосовуються на практиці сигнали з внутрішньоімпульсною фазовою модуляцією. Ефективність їх використання підтверджується на практиці також тим, що вони вводяться в обробку при модернізації низки радіолокаторів виявлення цілей [1–6]. Серед фазово-модульованих (ФМ) сигналів найбільше розповсюдження знайшли отримані шляхом маніпуляції фази за бінарною псевдовипадковою послідовністю [1–3]. У цьому випадку ФМ сигнал становить послідовність зімкнутих між собою радіоімпульсів, початкова фаза кожного з яких набуває значення 0 або π залежно від кодової послідовності.

Також не завжди доцільно використовувати фазову модуляцію сигналів при модернізації систем, у яких до цього використовувалися частотно-модульовані (наприклад, за лінійним законом) сигнали.

Викликають інтерес сигнали, які отримують шляхом маніпуляції частоти за законом деякої числової (багаторівневої) псевдохаотичної послідовності при незмінних амплітуді

та величині квантування за частотою і часом. Їх часто називають дискретними частотно-маніпульованими (ДЧМ) шумоподібними сигналами [4]. Використання ДЧМ сигналів у радіолокаційних системах дозволить певним чином вирішити вказані вище проблеми.

Однак псевдохаотична модуляція фази бінарною $(0, \pi)$ кодовою послідовністю не дозволяє повністю використати всі переваги складних систем сигналів. Модуляція іншим значенням фази на практиці значно ускладнює процес формування та когерентної обробки таких сигналів.

При розгляді особливостей застосування ДЧМ сигналів для підвищення перешкодозахищеності та інформативності радіотехнічних систем необхідно провести порівняльний аналіз основних властивостей систем сигналів з псевдохаотичними законами модуляції фази та частоти, а також розглянути особливості режимів функціонування трактів первинної обробки сигналів.

Мета статті – надати пропозиції щодо застосування ДЧМ сигналів та вибору режимів функціонування для підвищення інформативності та перешкодозахищеності РЛС.

Виклад основного матеріалу. Сигнали найчастіше класифікують за характером їх зміни у часі. Вони поділяються на модульовані (з безперервною зміною параметрів) та маніпульовані (з дискретною зміною параметрів).

При виборі систем сигналів доцільно враховувати та оцінювати:

- 1) вид та характеристику функції невизначеності;
- 2) базу та величину «ансамблю» сигналів;
- 3) взаємкореляційні характеристики «ансамблю» сигналів;
- 4) правило формування «ансамблю», складність формування та обробки сигналів.

Частотно-маніпульований сигнал становить сукупність зімкнутих між собою радіоімпульсів, несуча частота яких змінюється стрибкоподібно за законом деякої періодичної багаторівневої числової послідовності при незмінних амплітуді та періоді квантування за частотою і часом [4]. Такий сигнал з урахуванням псевдохаотичного закону модуляції описується виразом

$$u(t) = \begin{cases} U_0 \sum_{i=1}^n [1(t-t_{i-1}) - 1(t-t_i)] \times \\ \times \cos \left[2\pi f_0 t + \varphi_0 + \Delta f_0 \left(\sum_{k=1}^{i-1} N_k \tau_0 + N_i (t-t_{i-1}) \right) \right], & \text{при } 0 \leq t \leq \tau_i, \\ 0, & \text{при інших } t \end{cases} \quad (1)$$

де U_0, f_0, φ_0 – амплітуда, несуча частота, початкова фаза сигналу;

τ_0 – тривалість парціального імпульсу (крок квантування у часі);

Δf_0 – крок квантування за частотою;

$N_k \Delta f_0$ – рівні квантування за частотою;

$N_i (t-t_{i-1})$ – функція, що визначає закон модуляції частоти;

$1(t-t_{i-1})$ – одинична функція;

$t_i = i\tau_0$ – моменти переключення частоти.

З виразу (1) визначається комплексна амплітуда сигналу, часовий запис якої має вигляд

$$\dot{U}(t) = U_0 \sum_{i=1}^n [1(t-t_{i-1}) - 1(t-t_i)] \exp \left[-j\Delta f_0 \left\{ \sum_{k=1}^{i-1} N_k \tau_0 + N_i (t-t_{i-1}) \right\} \right]. \quad (2)$$

Вигляд функції $N_i(t-t_{i-1})$ обирається таким чином, щоб забезпечити рівномірний розподіл спектральних складових у всій смузі частот з одного боку (рис. 1) та збереження роздільних здатностей, близьких до тих, що забезпечує лінійно-частотно-модульований (ЛЧМ) сигнал. Застосування частотної маніпуляції у порівнянні з частотною модуляцією (наприклад, ЛЧМ) дозволяє деяким чином спростити технічну реалізацію пристроїв генерування та обробки сигналів. Спектр псевдохаотичного сигналу практично не відрізняється від спектра ЛЧМ сигналу за шириною і визначається співвідношенням $\Pi \approx n\Delta f_n$.

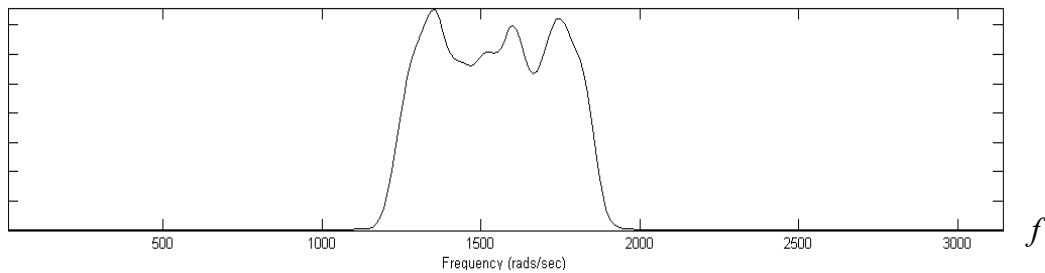


Рис. 1. Приклад амплітудно-частотного ДЧМ сигналу

Вибір закону модуляції частоти здійснюється з використанням числових полів Галуа. Серед найбільш відомих законів модуляції частоти виділяють закони Костаса-Велча та Костаса-Голомба [7].

У результаті узгодженої обробки частотно-маніпульованих сигналів забезпечується часове стиснення сигналу:

$$K_{cm} = \tau_i \Pi = n\tau_0 \Delta f_0 n = n^2. \quad (3)$$

Для формування та узгодженої фільтрації ДЧМ сигналів у схемі (рис. 2) передбачено електронний комутатор (ЕК). З метою зміни послідовності підключення фільтрів до виходів лінії затримки у схемі передбачено пристрій формування кодової послідовності, управління роботою якого здійснюється (може здійснюватися) через електронну обчислювальну машину (ЕОМ). Після детектора (Д) відбувається подальша обробка сигналів на відеочастоті.

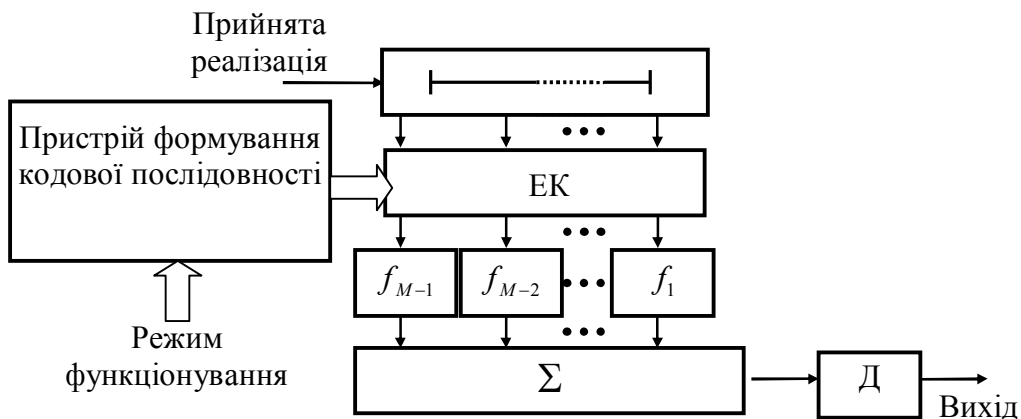


Рис. 2. Пристрій обробки ДЧМ сигналів на проміжній частоті

Задовольняючи вимоги часового розділення, для ДЧМ сигналів можна обирати розрядність кодової послідовності, n -розрядне кодування сигналу за частотою дає можливість отримати велику кількість кодових послідовностей і, тим самим, забезпечити високу перешкодозахищеність радіотехнічних систем.

У порівнянні з фазоманіпульованими сигналами для забезпечення коефіцієнта стиснення n^2 необхідно використовувати n -елементний ДЧМ сигнал на відміну від n^2 -елементного ФМ сигналу.

При зміні кодової послідовності у кожному періоді зондування виключається розвідка таких сигналів противником та постановка імітувальних перешкод. На рис. 3 показані результати узгодженої обробки сигналу 1 (рис. 3 (в)) та імітувальної перешкоди (сигналу з попереднього етапу випромінювання) (рис. 3 (г)).

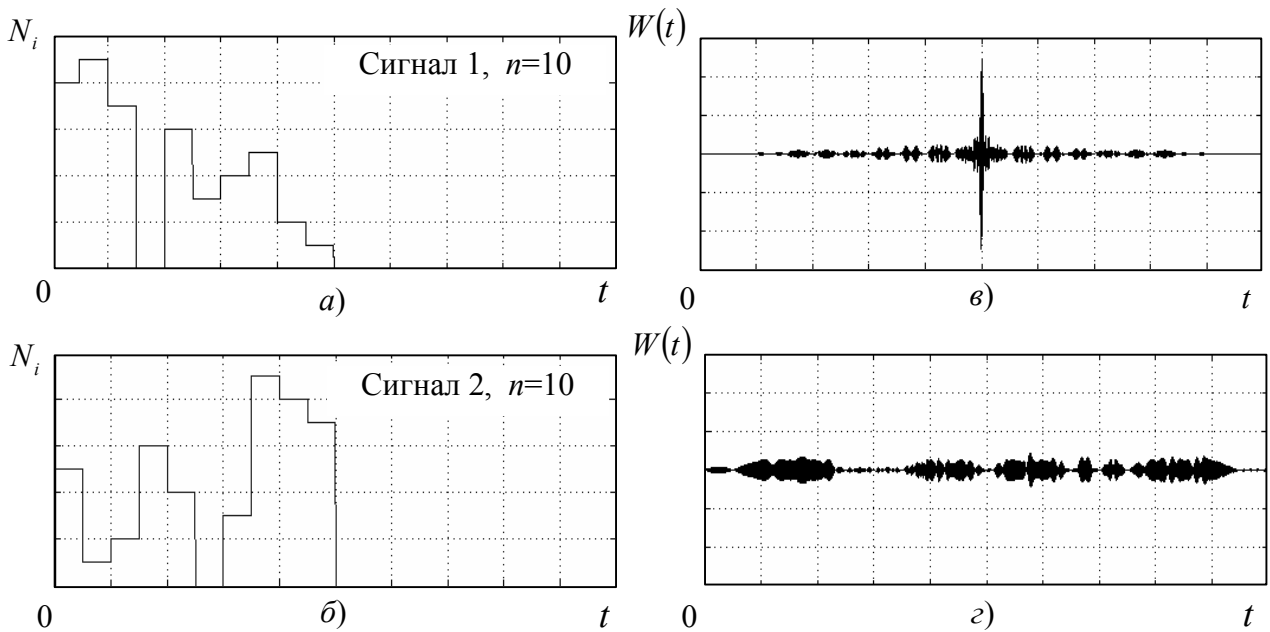


Рис. 3. Закони модуляції частоти сигналів 1 та 2 (а, б), вихідний ефект фільтра узгодженого з сигналом 1 (в), вихідний ефект фільтра при надходженні на його вхід сигналу 2 (г)

Вибір розрядності та вигляду закону модуляції частоти дозволяє керувати взаємною кореляцією сигналів у сусідніх періодах зондування. При використанні сигналів 1 та 2 (рис. 3 (а, б)) взаємна кореляційна функція має вигляд, наведений на рис. 3 (г). За відсутності збігу кодових послідовностей у сусідніх періодах зондування рівень нормованого за сигналом вихідного ефекту фільтра при впливі імітувальної перешкоди зрівнюється з боковими залишками стиснутого сигналу і становить близько 20% [4], тобто рівень перешкоди на виході узгодженого фільтра порівняний з боковими пелюстками корисного сигналу.

Результат узгодженої обробки ДЧМ сигналів має обвідну, яка в області головного максимуму описується функцією $\sin(x)/x$ (рис. 3 (в)) [10].

При використанні ДЧМ сигналів з псевдохаотичним законом модуляції частоти може бути значно зменшена швидкісна помилка вимірювання дальності, притаманна сигналам з регулярним законом зміни частоти [9], яка не перевищує тривалості парціального імпульсу τ_0 .

Застосування дискретних частотно-маніпульованих сигналів забезпечує адаптивне до умов функціонування управління енергетичним потенціалом активних радіолокаційних систем. У цьому разі, окрім зміни потужності зондувальних сигналів, можна обирати їх тривалість, в одних випадках збільшуючи її та дальність дії РЛС, в інших – зменшуючи при спостереженні близько розташованих цілей.

Адаптивний підхід до вибору тривалості сигналів не передбачає зміни структури узгодженого фільтра, при цьому до виходів лінії затримки підключаються тільки ті фільтри, які визначені кодовою послідовністю модуляції частоти зондувального сигналу.

Збільшення тривалості ДЧМ сигналів може забезпечуватися шляхом формування зімкнутих між собою n -елементних ДЧМ радіоімпульсів тривалості τ_i . Збільшення тривалості до $4\tau_i$ ($4 \times n$) забезпечується збільшенням дальності виявлення приблизно у 1,4 рази у порівнянні з випадком використання сигналів стандартної тривалості. Наприклад, для РЛС 9С35 СВУ ЗРК БУК-М1 у цьому разі дальність дії збільшується з 75 км [11, 12] до 105 км, а збільшення мертвої зони навколо станції може бути усунуте чергуванням режимів роботи з короткими та тривалими сигналами.

Важливо зазначити, що збільшення дальності дії РЛС не призводить до збільшення дальності розвідки сигналів противником.

Окрім цього, додаткова захищеність РЛС від імітувальних перешкод забезпечується бінарною фазовою модуляцією парціальних імпульсів ДЧМ сигналів.

Висновки. Сам факт застосування в РЛС складних ДЧМ сигналів дозволяє покращити перешкодозахист, гнучко керувати параметрами випромінювання, режимами роботи станцій, а також покращити їх тактико-технічні характеристики.

Використання ДЧМ сигналів забезпечує необхідну роздільну здатність за дальністю та радіальною швидкістю і не вимагає особливого підходу до реалізації систем захисту від активних та пасивних перешкод.

Щодо введення запропонованого варіанту побудови тракту узгодженої обробки сигналів РЛС 9С35 СВУ ЗРК БУК-М1, то після відповідного доопрацювання можна відмовитись від використання квазібезперервного сигналу. Обробка сигналів може проводитися в цьому ж самому тракті. Додатково використання ДЧМ замість квазібезперервних сигналів не призводить до неоднозначності вимірювання дальності, а захист від імітувальних перешкод не вимагає переходу до ручного супроводження цілей.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л. Е. Варакин. – М. : Радио и связь, 1985. – 384 с.
2. Варакин Л. Е. Теория систем сигналов / Л. Е. Варакин. – М. : Советское радио, 1978. – 304 с.
3. Тузов Г. И. Статистическая теория приема сложных сигналов / Г. И. Тузов. – М. : Советское радио, 1977. – 400 с.
4. Глазов Б. И. Спектры и корреляционные функции частотно-манипулированных шумоподобных сигналов / Б. И. Глазов // Радиотехника. – 1970. – Т. 25, № 9. – С. 4–10.

5. Глазов Б. И. Анализ спектральных и корреляционных свойств L-ичных дискретных ЧМ сигналов / Б. И. Глазов, Л. П. Котенко, Б. С. Мерзликин // Радиотехника. – 1975. – Т. 30, № 12. – С. 15–19.
6. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / [под ред. А. И. Петрова, В. Н. Харисова]. – [3-е изд. перераб.]. – М. : Радиотехника, 2005. – 285 с.
7. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория : [справочник] / [Я. Д. Ширман, С. Т. Багдасарян, А. С. Маляренко и др.]; под ред. Я. Д. Ширмана. – [2-е изд. перераб. и доп.]. – М. : Радиотехника, 2006. – 512 с., 593 ил., библи. 975 назв.
8. Ширман Я. Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос. – М. : Радио и связь, 1981. – 416 с.
9. Багдасарян С. Т. Радіолокаційна системотехніка / С. Т. Багдасарян, Ю. В. Кулявець, С. І. Шипіцин. – Х. : ХВУ, 2002. – 243 с.
10. Розширення функціональних можливостей РЛС шляхом застосування сигналів з псевдохаотичною частотною модуляцією сигналів / В. А. Таршин, В. А. Васильєв, О. Л. Кузнецов, І. В. Злигостєв // Системи обробки інформації. – Х. : ХУПС, 2007. – Вип. 1 (59). – С. 103–106.
11. Синельников В. И. Устройство радиотехнических систем наведения зенитных ракетных комплексов. Системы индикации и помехозащиты РЛС 9С35А СОУ 9А310 : учеб. пособ. / В. И. Синельников, В. А. Сумцов, Г. И. Насонов. – К. : КВЗРИУ, 1983. – 64 с.
12. Устройство радиотехнических систем наведения зенитных ракетных комплексов. Системы индикации и помехозащиты изделия 9С35А : альбом схем. – К. : КВЗРИУ, 1983. – 24 с.

Подано 15.07.08

В. А. Таршин, А. Д. Носова

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ ОТ ИМИТИРУЮЩИХ ПОМЕХ

Предоставлены рекомендации по практическому применению дискретных частотно-модулированных сигналов в системах радиолокационного наблюдения. Показано, что это позволяет качественно решить проблему защиты радиолокационных станций (РЛС) от имитирующих помех и расширить их функциональные возможности.

V. A. Tarshin, A. D. Nosova

IMPROVEMENT THE SYSTEM OF RADAR STATION PROTECTION FROM IMITATIVE HINDRANCES

The article considers recommendations regarding practical application of frequency-modulated signals in the system of radar observation. It allows to solve a protection problem of radar station from imitating hindrances. It enlarges functional possibilities of radar