

УДК 621.391.26

В.А. Таршин, В.А. Ковальчук, С.М. Фінагеев

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИБОРУ ЗАКОНУ МОДУЛЯЦІЇ ЧАСТОТИ ДИСКРЕТНОГО ЧАСТОТНОМАНІПУЛЬОВАНОГО СИГНАЛУ

Шляхом теоретичних досліджень та імітаційного моделювання процесу обробки дискретних частотноманіпульованих сигналів проаналізовано вплив закону зміни частоти на результат узгодженої обробки сигналу. Розроблено рекомендації щодо вибору параметрів та закону модуляції частотноманіпульованих сигналів.

Ключові слова: дискретний частотноманіпульований сигнал, узгоджена обробка, псевдохаотична послідовність.

Вступ

Аналіз літератури та постановка проблеми. Сучасні радіолокаційні станції (РЛС) повинні забезпечувати високі показники якості виявлення сигналів, мати можливість пристосування режимів функціонування до умов цільової та завадової обстановки, забезпечувати високу точність, за потреби, змінювати параметри радіолокаційних сигналів відповідно до режимів функціонування. У роботах вітчизняних та закордонних авторів [1 – 3] показана доцільність переходу від застосування сигналів з лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ) до використання сигналів з псевдохаотичною дискретною частотною модуляцією (ДЧМ). Це дозволяє покращити функціональні можливості, електромагнітну сумісність, прихованість роботи [1] та завадо захищеність РЛС [4]. Для покращення прихованості роботи РЛС можуть бути використані також хаотичні сигнали [5, 6], однак їх застосування в якості радіолокаційних потребує особливих підходів до реалізації пристроїв когерентної обробки.

З метою мінімізації внесення змін у приймально-передавальний тракт РЛС пропонується використовувати замість ЛЧМ сигналу ДЧМ сигнал, за умови узгодження їх частотних спектрів, що виключає внесення будь-яких конструктивних змін у структуру підсилювача потужності, антено-хвильового тракту, як одного з найдорожчих елементів РЛС, та перших каскадів приймача.

У роботах [2, 7 – 10] розглянуті функції розузгодження ДЧМ сигналів та правила формування кодівих послідовностей для систем зв'язку.

Однією з вимог ефективного застосування систем сигналів є мінімально можливий рівень бічних залишків сигналів на виході пристроїв узгодженої обробки, оскільки це визначає якість спостереження слабких сигналів на фоні потужних. Вплив кодової послідовності на вигляд стиснутого сигналу та рівень бічних залишків наведено у в багаточисельній літературі, зокрема [7 – 10]. Однак у більшості ви-

падків розглядаються лише сигнали стандартної тривалості, коли кількість дискретів частоти відповідає кількості парціальних імпульсів.

На даний час недостатньо глибоко вивчено вплив виду закону модуляції частоти ДЧМ сигналів, у тому числі сигналів змінної тривалості на рівень бічних залишків ДЧМ сигналу на виході узгодженого фільтра.

Це може бути одним з факторів, який обмежує застосування ДЧМ сигналів у радіолокації.

Метою статті є аналіз впливу форми коду частоти ДЧМ сигналу на результат узгодженої обробки та розробка рекомендацій щодо вибору кодової послідовності ДЧМ сигналу.

Основний матеріал

При проведенні досліджень та розробки пропозицій застосування імпульсних ДЧМ сигналів однією з вихідних умов є відповідність його параметрів характеристикам приймально-передавального тракту сигналу з лінійною частотною модуляцією. Вважається, що ДЧМ радіоімпульс має цілочисельну базу, близьку за значенням до бази ЛЧМ радіоімпульсу

$$n = \Delta f \tau_i, \quad (1)$$

де Δf – девіація частоти (ширина спектра) ЛЧМ радіоімпульсу;

τ_i – тривалість стандартного ЛЧМ радіоімпульсу.

Відповідно до розглянутих у [1] варіантів зміни параметрів ДЧМ радіоімпульсу, можна здійснювати збільшення (зменшення) його тривалості. При проведенні досліджень вважається, що тривалість ДЧМ радіоімпульсу може змінюватися кратно тривалості стандартного сигналу τ_i [1]. При збільшенні тривалості не відбувається збільшення девіації частоти сигналу.

У цьому випадку ДЧМ сигнал, кратний рf тривалістю τ_i може бути записаний у вигляді

$$u(t) = \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} U_{nm}(t) e^{j[2\pi(f_0 + f_{nm})(t - n\tau_i - m\tau_0) + \phi_{nm}]} \right\}; \quad (2)$$

$$U_{nm}(t) = [\theta(t - n\tau_i - m\tau_0) - \theta(t - n\tau_i - (m+1)\tau_0)],$$

де $U_{nm}(t)$ – закон модуляції амплітуди парціальних імпульсів сигналу;

f_0 – початкова частота сигналу;

$f_0 + f_{nm}$ – значення частоти парціального імпульсу;

τ_i – тривалість стандартного ДЧМ радіоімпульсу ($\tau_i = m\tau_0$);

τ_0 – тривалість парціального радіоімпульсу ДЧМ сигналу;

ϕ_{nm} – початкова фаза парціального радіоімпульсу ДЧМ сигналу;

$\theta(t)$ – одинична функція.

Вираз (1) передбачає можливість кодування частоти сигналу за законом псевдохаотичної послідовності, можливість зміни тривалості сигналу у широких межах.

Для підвищення функціональних можливостей РЛС доцільно передбачити можливість управління структурою сигналу відповідно до існуючої задової та цільової обстановки, необхідності виявлення малорозмірних цілей, а також реалізації необхідних розмірів зони виявлення та режимів огляду простору.

Обробка ДЧМ сигналів довільної тривалості забезпечується використанням універсальної схеми узгодженого з ДЧМ сигналом фільтра, структурна схема якого наведена на рис. 1.

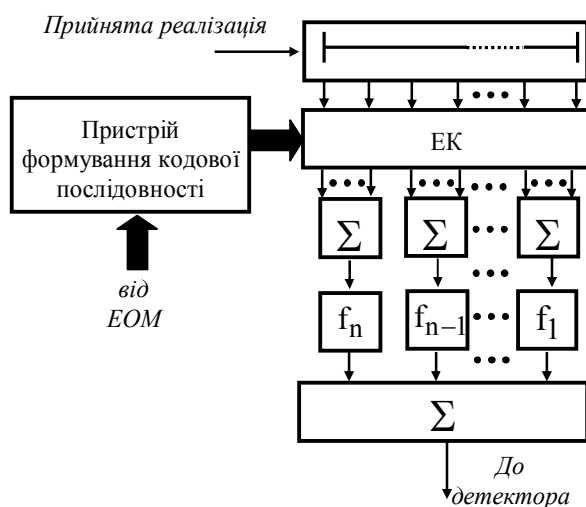


Рис. 1. Фільтр узгоджений з ДЧМ сигналом

Зміна тривалості сигналу не потребує зміни структури фільтра, а узгодження параметрів сигналу та імпульсної характеристики фільтра реалізується

пристроєм формування кодової послідовності, який забезпечує потрібні комутації виходів лінії затримки та фільтрів парціальних імпульсів.

Функціональні можливості з дальності виявлення РЛС можуть бути збільшені шляхом збільшення тривалості ДЧМ сигналу без зміни ширини спектра сигналу.

Наведена структура узгодженого фільтра формально дозволяє обробляти ДЧМ сигнал тривалості від τ_0 до $\tau_i \cdot L$, де L – кількість зімкнутих ДЧМ радіоімпульсів, однак розмірність та вигляд кодової послідовності суттєво впливають на вигляд стиснутого сигналу на виході узгодженого фільтра та рівень бічних залишків.

Для ілюстрації результатів досліджень впливу закону модуляції частоти наводяться декілька прикладів, які узагальнюють вплив кодової послідовності ДЧМ сигналу на результат узгодженої обробки.

Дослідження показали, що при виборі законів модуляції частоти ДЧМ сигналів не завжди доцільно використовувати коди Костаса-Велча та Костаса-Голомба [2], які найчастіше використовуються у системах зв'язку з ДЧМ сигналами, оскільки такі коди призначені для здійснення кодування інформації, і для них не виконується умова забезпечення мінімального рівня бічних залишків.

На рис. 2 наведені закон модуляції частоти ДЧМ сигналу семиелементним кодом Костаса-Велча (рис. 2, а) та результат узгодженої фільтрації ДЧМ сигналу (рис. 2, б). Стиснутий сигнал має достатньо великий рівень бічних залишків, особливо перших. Функція розузгодження сигналу модульованого 7-ми елементним кодом Костаса-Велча, також має значний рівень бічних пелюстків у інших перетинах (рис. 3), що свідчить про необхідність ретельного аналізу коду модуляції частоти перед застосуванням ДЧМ сигналу.

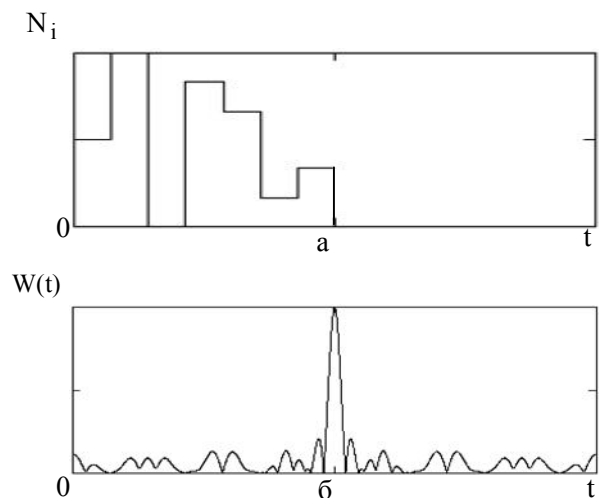


Рис. 2. Закон модуляції частоти сигналу – а; вихідний ефект фільтра на виході амплітудного детектора узгодженого з ДЧМ сигналом – б

Оскільки схема узгодженого фільтра (рис. 1) дозволяє обробляти ДЧМ сигнал різної кратності пропонується розглянути сигнал, з кратністю повторення частот $L=2$. Сигнали Костаса-Велча та Костаса-Голомба не передбачають повторення частот, тому їх використовувати неможливо.

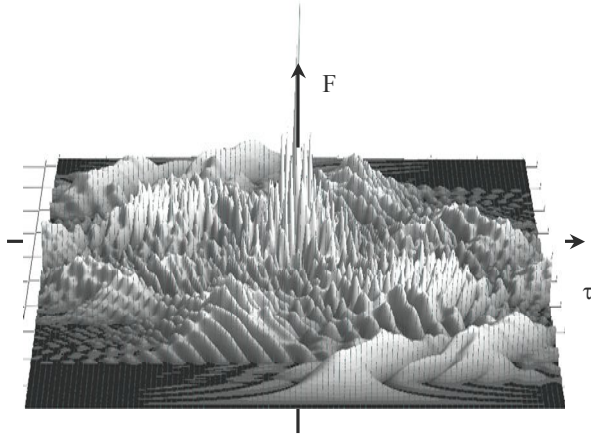


Рис. 3. Тіло розузгодження ДЧМ сигналу з 7-ми елементним кодом модуляції частоти

На рис. 4, а наведено закон модуляції частоти сигналу $L=2$ (рис. 4, а), та його результат узгодженої фільтрації (рис. 4, б).

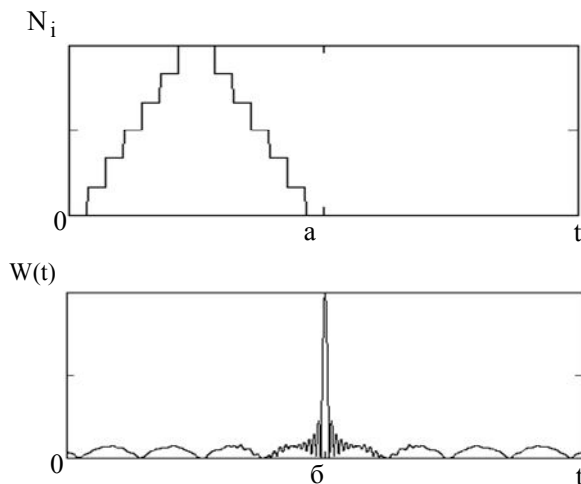


Рис. 4. Закон модуляції частоти сигналу – а; вихідний ефект фільтра на виході амплітудного детектора узгодженого з ДЧМ сигналом – б

Рис. 4, б дозволяє оцінити рівень бічних залишків при відомій частоті сигналу.

При прийомі сигналу з апіорно невідомою частотою Доплера рівень бічних залишків може бути значно більшим. Для оцінки рівня бічних пелюстків необхідно досліджувати тіло розузгодження ДЧМ сигналу.

З порівняння двох сигналів видно, що сигнал з кратністю $L=2$, забезпечує кращий коефіцієнт стиснення, що в свою чергу дозволяє покращити виявлення малорозмірних цілей, та збільшити дальність

виявлення РЛС за рахунок підвищення енергетичного потенціалу. При такому варіанті модуляції частоти рівень бічних залишків знижується у головних перетинах функції розузгодження, але залишається достатньо великим в діагональних перетинах (рис. 5).

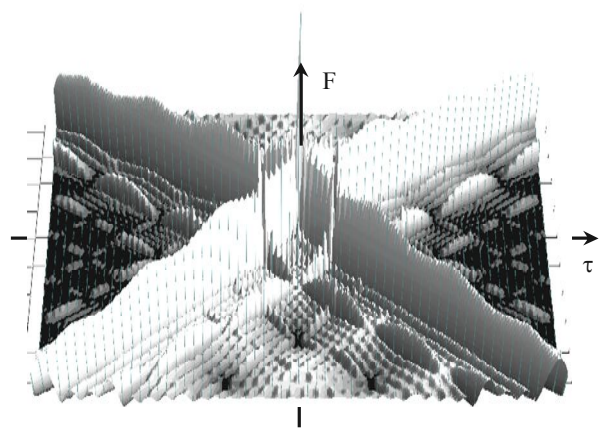


Рис. 5. Тіло розузгодження ДЧМ сигналу з 14-ти елементним кодом модуляції частоти

Такий сигнал може бути використаний у режимах супроводження цілей при достатньо точному вимірюванні частоти Доплера.

При застосуванні у радіолокаційних станціях дискретних з частотною модуляцією сигналів доцільно розробити ряд заходів, які дозволять зменшити рівень бічних залишків стиснутого сигналу та покращити якість виявлення слабких сигналів на фоні потужних.

Серед таких заходів можуть бути:

- вибір закону модуляції частоти, який забезпечує мінімальний рівень залишків стиснутого сигналу. Прикладом такого сигналу є збільшений ДЧМ радіоімпульс з дзеркальним відносно середини законом зміни частоти. Такий сигнал має однаковий (окрім першого) рівень бокових пелюстків при відомій частоті сигналу, який оцінюється приблизним рівнянням ($n_{\text{бн}} = 1/n=0,07$);

- використання вагових функцій для згладжування сигналу у фільтрі, аналогічно операції аподизації у дисперсійних лініях затримки [11]. Недоліком такого способу є те, що при збільшенні (зменшенні) тривалості зондувального сигналу, крім управління лінією затримки та комутацією її виходів з фільтрами парціальних імпульсів, необхідно здійснювати контроль і за ваговими коефіцієнтами. Доцільність застосування таких методів потребує детального вивчення;

- формування парціальних імпульсів сигналу різної амплітуди є найбільш простою з точки зору практичної реалізації. Можливими варіантами є закон зміни амплітуди сигналу типу „косинус на підставці” або дзвіноподібний.

Висновки

Таким чином, дискретна структура сигналу дозволяє керувати тривалістю зондувального сигналу (енергетичним потенціалом РЛС), сприяє розширенню функціональних можливостей РЛС, а також не потребує суттєвої зміни приймального тракту РЛС при зміні режимів функціонування.

ДЧМ сигнали також ефективно можуть бути використані у бортових РЛС літальних апаратів цивільного та військового призначення для рішення радіолокаційних та радіонавігаційних задач. Це обумовлено тим, що застосування ДЧМ сигналів дозволяє забезпечувати електромагнітну сумісність великої кількості об'єктів у обмеженому просторі за рахунок вибору законів модуляції частоти.

Список літератури

1. Таршин В.А. Варіанти режимів випромінювання та узгодженої обробки ДЧМ сигналів. Збірник наукових праць ЦНДІ / В.А. Таршин, О.В. Яценко. – К. ЦНДІ. – 2012. – Вип. 1 (21). – С. 50-53.
2. Radar signals, by Nadav Levanon and Eli Mozeson. – John Wiley & Sons, Inc. – 2004.
3. Чапурский В.В. Избранные задачи теории сверхширокополосных радиолокационных систем / В.В. Чапурский. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 279 с.
4. Очкуренко О.В. Пропозиції щодо захисту радіолокаційних систем з ДЧМ сигналом від пасивних завад / О.В. Очкуренко, О.Л. Кузнецов, Д.В. Бойко // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2013. – Вип. 1 (34). – С. 97-101.

5. Каменский И. В. Свойства функции неопределенности дискретно-кодированных по частоте сигналов Костаса / И. В. Каменский, В. Я. Плёкин // Изв. Вузов. Радиоэлектроника. – 2001. – № 5. – С. 59-68.

6. Радиоэлектронні системи: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. За напрямом підготовки «Радіотехніка» / Ю.М. Седішев, Д.В. Атаманський та ін.; за заг. ред. Ю.М. Седішева. – Х.: ХУПС, 2010. – 360 с.

7. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л.Е. Варакин. – М.: Радио и связь, 1985. – 383 с.

8. Варакин Л.Е. Теория систем сигналов / Л.Е. Варакин. – М.: Сов. радио, 1978. – 304 с.

9. Тузов Г.И. Статистическая теория приема сложных сигналов / Г.И. Тузов. – М.: Сов. радио, 1977. – 400 с.

10. Глазов Б.И. Спектры и корреляционные функции частотноманипулированных шумоподобных сигналов / Б.И. Глазов / Радиотехника – М., 1970. – Т. 25, № 9. – С. 5-10.

11. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория: справочн. Изд. 2-е, перераб. и доп. / под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.: ил.

Надійшла до редколегії 8.01.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ЗАКОНА МОДУЛЯЦИИ ЧАСТОТЫ ДИСКРЕТНОГО ЧАСТОТНОМАНИПУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА

В.А. Таршин, В.А. Ковальчук, С.М. Финагеев

Путем теоретических исследований и имитационного моделирования процесса обработки дискретных частотноманипулированных сигналов проанализировано влияние закона изменения частоты на результат согласованной обработки сигнала. Разработаны рекомендации по выбору параметров и закона модуляции частотноманипулированных сигналов.

Ключевые слова: дискретный частотноманипулированный сигнал, согласованная обработка, псевдохаотическая последовательность.

RECOMMENDATIONS ON THE CHOICE OF THE MODULATION LAW OF DISCRETE FREQUENCY MANIPULATED SIGNAL

V.A. Tarshyn, V.A. Kovalchuk, S.M. Finageev

Influence of frequency change law of discrete frequency manipulated signals on the concerted signal processing result is analyzed by the theoretical research methods and simulations. Recommendations on the choice of the characteristics and modulation law of frequency manipulated signals are developed.

Keywords: discrete frequency manipulated signal, concerted processing, quasi-chaotic sequence.