

УДК 621.391.26

В.А. Таршин, О.В. Очкуренко, О.Л. Кузнєцов

*Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків*

## АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ДЧМ СИГНАЛІВ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОСТІ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

*Проведений аналіз сигналів з псевдохаотичною внутрішньою дискретною частотною маніпуляцією (ДЧМ). Розглянуті можливі варіанти побудови пристроїв узгодженої обробки та особливості їх функціонування. Проаналізовані можливості ДЧМ сигналів щодо покращення функціональності систем радіолокаційної розвідки повітряного простору.*

**Ключові слова:** ДЧМ сигнал, функціональність РЛС, узгоджена фільтрація, імітувальна завада.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Отримання повної радіолокаційної інформації про повітряні об'єкти вимагає рішення багатьох різномірних задач у режимі реального часу. У процесі історичного розвитку радіолокаційних систем склалося так, що ці задачі часто вирішуються з використанням різних за функціональним призначенням радіолокаційних засобів. Тобто, на теперішній час, як правило, повний склад інформації про один об'єкт локації отримується шляхом збору повідомлень від різних активних РЛС.

Основними недоліками такого способу отримання інформації є обмежені можливості з обробки прийнятих сигналів існуючих зразків РЛС, неефективне використання енергетичних потенціалів РЛС, необхідність забезпечення електромагнітної сумісності і т.д. Окрім того, у більшості радіолокаційних станцій радіотехнічних військ використовуються прості імпульсні сигнали, що не дозволяє забезпечити одночасно високу якість розділення сигналів та точність визначення координат.

Одним з шляхів усунення цих недоліків є використання багатофункціональних (БФРЛС) і багаторежимних радіолокаторів (БРРЛС). Вони можуть оперативно пристосовуватися до зміни реальних умов повітряної обстановки та мають кращу інформативність. Тому розвиток БФРЛС та БРРЛС є найбільш перспективним.

Такі РЛС можуть використовувати декілька типів зондувальних сигналів, що вимагає використання декількох трактів обробки прийнятих сигналів. Це призводить до того, що всі переваги БФРЛС та БРРЛС досягаються шляхом значного ускладнення систем формування, прийому та обробки сигналів. Одним із напрямків, що дозволяє зменшити складність вказаних вище систем та забезпечити виконання повного обсягу покладених на РЛС задач, є використання єдиної системи сигналів у різних режимах функціонування. Стаття присвячена обґрунтуванню пропозицій щодо використання такої системи сигналів та розгляду режимів функціонування РЛС.

**Аналіз літератури.** Питання застосування якості зондувальних частотномодульованих (ЧМ) та фазоманіпульованих (ФМ) сигналів глибоко вивчені та висвітлені у великій кількості джерел, зокрема [1 – 8]. Так само добре відомі переваги, які забезпечує використання ЧМ та ФМ сигналів.

У літературі показано, що з багатьох точок зору добрі результати можуть бути отримані з використанням фазової псевдохаотичної модуляції (маніпуляції) імпульсних та безперервних сигналів [1 – 8].

Досвід практичного застосування ФМ сигналів показав, що з таким сигналом достатньо просто реалізувати режими випромінювання та обробки простого та ФМ сигналів з різною кількістю парціальних імпульсів ( $n = 1, 13, 42$  для РЛС П-18МА) [9]. Зміна тривалості сигналу не вимагає суттєвих змін пристрою узгодженої обробки. Серед ФМ сигналів найбільше розповсюдження знайшли сигнали отримані шляхом маніпуляції фази за бінарною псевдовипадковою послідовністю [1 – 3].

До недоліків застосування ФМ сигналів відносяться достатньо високий рівень бокових залишків стиснутого сигналу, який визначається видом кодової послідовності та її розмірністю, а дворівнева модуляція фази ( $0$  або  $\pi$ ) обмежує потенційні можливості захисту РЛС від імітувальних завад. Однак ФМ сигнали знайшли своє практичне застосування при модернізації РЛС старого парку [9]. При зміні розмірності ФМ сигналів не потрібно змінювати структуру приймального пристрою РЛС.

При частотній модуляції сигналів найчастіше використовується лінійний закон зміни частоти (ЛЧМ). Такі сигнали широко застосовуються у радіолокаційних системах різного призначення [5, 6, 10]. Для виробництва пристроїв формування та обробки ЛЧМ сигналів використовуються добре відпрацьовані за довгі роки технології [5, 6]. Використання як зондувального ЛЧМ сигналу дозволяє реалізувати потрібні роздільні здатності за дальністю та радіальною швидкістю, однак платою за це є часо-частотна невизначеність сигналу [5, 6], яка мо-

же усунути зміну на протилежний закон модуляції частоти або попереднім вимірюванням частоти з використанням іншого типу сигналу. Досить добре відомі інші проблеми [11] при використанні ЛЧМ сигналів (наприклад, захист РЛС від активних імітувальних завад), що вимагає подальшого удосконалення існуючих РЛС.

Одним з шляхів модернізації РЛС з ЛЧМ сигналом є використання сигналів, які формуються шляхом маніпуляції частоти протягом тривалості імпульсу за законом деякої числової (багаторівневої) псевдохаотичної послідовності. Такі сигнали часто називають дискретними частотоманіпульованими (ДЧМ) хаотичними сигналами [1 – 5, 8, 11]. ДЧМ сигнали достатньо тривалий час використовуються у системах зв'язку, забезпечуючи високу ефективність використання частотного діапазону, завадозахищеність та надійну інформаційну взаємодію [1]. Однак ДЧМ сигнали на жаль не знайшли практичного застосування у вітчизняній радіолокації. Використання ДЧМ сигналу з необхідною шириною спектра замість ЛЧМ при виконанні модернізації озброєння є логічним кроком, який не вимагає зміни антенно-хвильоводного тракту.

Спектрально-кореляційні характеристики та функції невизначеності ДЧМ сигналів розглянуті в [4, 5, 7, 8, 11]. Моделювання роботи пристроїв узгодженої обробки [11], аналіз спектрально-кореляційних характеристик [4, 7, 8, 11] ДЧМ сигналів доводять доцільність роботи у цьому напрямку.

Для обґрунтування вимог до вибору параметрів частотоманіпульованого сигналу та визначення основних переваг необхідно провести аналіз його властивостей та режимів роботи РЛС.

**Мета статті** полягає у аналізі потенційних переваг та особливостей застосування ДЧМ-сигналів в існуючих та перспективних РЛС.

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

де  $U_0$ ,  $f_0$ ,  $\varphi_0$  – амплітуда, робоча частота, початкова фаза сигналу;  $\tau_0$ ,  $\Delta f_0$  – тривалість та ширина спектра парціального імпульсу;  $N_k \Delta f_0$  – значення частоти  $k$ -го парціального імпульсу, яке залежить від закону модуляції;  $N_i (t-t_{i-1})$  – функція, яка визначає закон модуляції частоти;  $1(t-t_{i-1})$  – одинична функція;  $t_i = i\tau_0$  – моменти стрибкоподібної зміни частоти. Вираз (1) передбачає можливість кодування частоти сигналу за законом псевдохаотичної послідовності.

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

$$\dot{U}(t) = U_0 \sum_{i=1}^n [1(t-t_{i-1}) - 1(t-t_i)] \times$$

## Основний матеріал

Застосування єдиної системи сигналів в РЛС пропонується розглядати як один з варіантів модернізації РЛС з ЛЧМ сигналом, хоча це може бути використане і при створенні нових багатофункціональних РЛС.

Для мінімізації витрат при модернізації частотний спектр запропонованого маніпульованого сигналу повинен відповідати частотному спектру ЛЧМ сигналу РЛС, що, в свою чергу, виключає внесення будь-яких конструктивних змін підсилювача потужності, антенно-хвильоводного тракту, перших каскадів приймального тракту.

ДЧМ-сигнал можна представити як сукупність  $n$  зімкнутих простих парціальних імпульсів з однаковою шириною спектра  $\Delta f_0$  і різними центральними частотами. Центральні частоти парціальних імпульсів рознесені у смузі частот ЛЧМ сигналу на величину  $\Delta f_0$ .

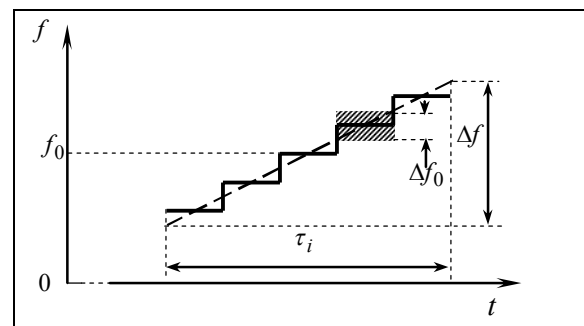


Рис. 1. Закон модуляції частоти ДЧМ сигналу

Тобто лінійний закон зміни частоти апроксимується ступінчастою функцією (рис. 1), а сам сигнал являє собою  $n$  зімкнутих простих парціальних імпульсів з шириною спектра  $\Delta f = n\Delta f_0$  [10]. Такий сигнал з урахуванням закону модуляції описується виразом

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

Вигляд функції  $N_i (t-t_{i-1})$  обирається таким чином, щоб забезпечити як рівномірний розподіл спектральних складових у всій смузі частот, так і збереження роздільних здатностей близьких до тих, що забезпечує ЛЧМ сигнал. Спектр такого сигналу практично не відрізняється від спектра лінійно-частотно-модульованого сигналу за шириною і визначається співвідношенням  $\Pi \approx n\Delta f_0$ .

На рис. 2 наведений результат обробки двох елементарних ДЧМ-сигналів суміжних етапів зондування, які відрізняються законами модуляції частоти (рис. 2, а, б). Система обробки сигналів узгоджена з

законом модуляції частоти 1 (рис. 2, а), а закон 2 (рис. 2, б) відповідає сигналу з попереднього етапу зондування (імітувальній заваді).

Окремо треба відмітити потенційно високу захищеність РЛС, що використовує ДЧМ сигнали, від впливу імітувальних завад. На рис. 2, в та рис. 2, г наочно продемонстровані результати узгодженої фільтрації сигналу та імітувальної завади відповідно. У результаті узгодженої обробки (закон 1) забезпечується наявність на виході фільтра стиснутого імпульсу (рис. 2, в). При налаштуванні узгодженого фільтра на прийом сигналу з новою структурою (закон 2) та надходженні імітувальної завади (закон 1) узгоджена фільтрація режектує імітувальну заваду (рис. 2, г).

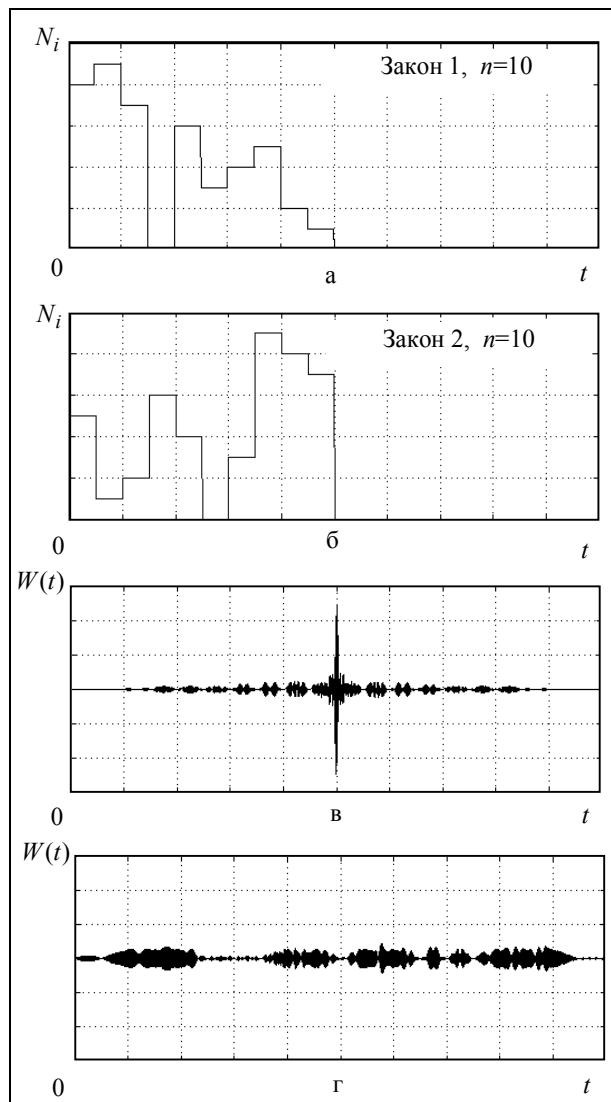


Рис. 2. Закони модуляції частоти сигналів 1 та 2 (а, б), вихідний ефект фільтра узгодженого з сигналом 1 (в), вихідний ефект фільтра при надходженні на його вхід сигналу 2 (г)

Таким чином, застосування в кожному такті зондування нової структури ДЧМ сигналів дозволить на етапі узгодженої обробки суттєво знизити внесок імітувальних завад у формування маскуваль-

ного та заважаючого фону для ведення радіолокаційної розвідки.

Для формування ДЧМ-сигналу може бути використана схема [9], яка показана на рис. 3. Елементи  $f_1, f_2, \dots, f_n$  позначають узгоджені фільтри парціальних імпульсів, настроєні з різницею частот  $\Delta f_0$ . Для збудження схеми використовується  $\delta(t)$ -імпульс. Аналогічна схема використовується у якості узгодженого фільтра ДЧМ-сигналу та забезпечує його стискання у часі.

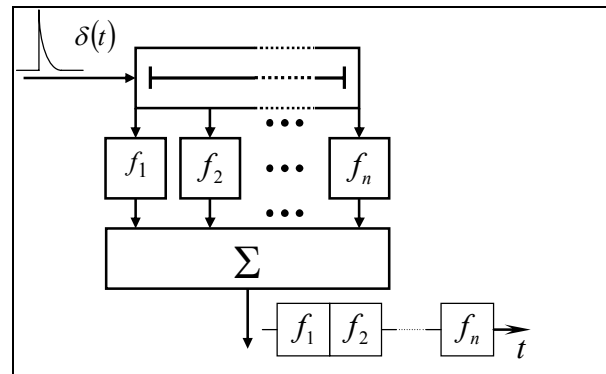


Рис. 3. Схема формування ДЧМ сигналу

Застосування такого способу формування ДЧМ-сигналу дозволяє забезпечити адаптивне (в залежності від цільової обстановки) управління тривалістю сигналу за рахунок виключення з процесу формування та обробки сигналів частини фільтрів. Так, наприклад, використання  $n/2$  фільтрів (скорочення тривалості сигналу) дозволяє зменшити у два рази ближню межу зони виявлення РЛС, коли приймач відключений від антенної системи.

Для здійснення частотної маніпуляції за законом псевдохаотичної послідовності, схема пристрою обробки повинна містити швидкодіючий електронний комутатор (ЕК) для підключення виходів лінії затримки до відповідних входів фільтрів (рис. 4) [11]. Для управління схемою обробки ДЧМ сигналів використовується пристрій формування кодової послідовності, робота якого залежить режиму функціонування РЛС.

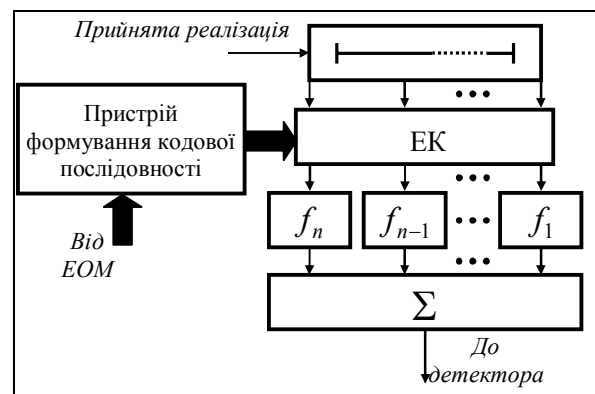


Рис. 4. Пристрій узгодженої обробки ДЧМ сигналу

Вибір закону модуляції частоти здійснюється з використанням числових полів Галуа [5, 7]. Серед найбільш відомих законів модуляції частоти виділяють закони Костаса-Велча та Костаса-Голомба [5, 7, 11]. Необхідно відмітити, що вибір закону модуляції частоти впливає на повноту інформації про повітряну обстановку, визначає режим функціонування РЛС, а тому потребує ретельного аналізу.

При складанні переліку режимів функціонування РЛС треба використовувати інформацію про:

- задачі, які вирішує РЛС у складі угруповання військ;
- задачі підрозділів, які забезпечуються радіолокаційною інформацією;
- координати, параметри руху та клас небезпеки цілей в зоні дії РЛС;
- наявність завад, їх вплив на РЛС;
- електромагнітну сумісність радіолокаційного угруповання;
- попередні режими функціонування РЛС;
- цілевказівки та розпорядження вищого пункту управління.

Перелік режимів функціонування може бути унікальним для конкретної РЛС. Він може змінюватися в залежності від особливостей вирішуваних задач, вимог до радіолокаційної інформації та місця розташування РЛС. Для забезпечення максимальної ефективності радіолокаційної інформації при виборі режимів функціонування повинен бути передбачений попередній оперативний аналіз випромінюваних сигналів, який, перш за все, передбачає аналіз використаних законів частотної модуляції.

Застосування ДЧМ сигналів у порівнянні з ЛЧМ та ФМ дозволяє забезпечити такі переваги:

- може бути значно зменшена швидкісна помилка вимірювання дальності, яка для ДЧМ сигналів не перевищує тривалості парціального імпульсу  $\tau_0$ ;
- зміна законів модуляції частоти у суміжних періодах зондування дає можливість компенсації активних імітувальних завад на етапі узгодженої часо-частотної обробки [11];
- аналіз законів модуляції частоти послідовності випромінюваних сигналів дозволяє передбачувати рівень залишків некомпенсованої імітувальної завади на виході пристрою узгодженої фільтрації (рис. 4) [11];
- дискретна структура сигналу забезпечує скорочення його тривалості для перегляду цілей, що можуть знаходитися ближче до РЛС ніж ближня межа зони виявлення;
- збільшення тривалості сигналу без збільшення ширини спектра дозволяє збільшувати енергетичний потенціал РЛС та покращувати ефективність виявлення малорозмірних цілей, а застосування квазібезперервного ДЧМ сигналу забезпечує форму-

вання завадозахищеного каналу наведення ракет.

– при однаковій розмірності кодової послідовності дискретні частотноманіпульовані сигнали забезпечують кращий коефіцієнт часового стиснення сигналу порівняно з ФМ сигналами такої ж кодової розмірності та тривалості

$$K_{\text{ст}} = \tau_i \Pi = n \tau_0 \Delta f_0 n = n^2; \quad (3)$$

– застосування ДЧМ сигналів дозволяє організувати канали захищеного зв'язку для передачі інформації про об'єкти спостереження, режими роботи РЛС, сигналів управління;

– використання ДЧМ сигналів у РЛС зенітних ракетних комплексів забезпечить відмову від використання декількох типів сигналів, як це робиться, наприклад, в РЛС 9С35 самохідної вогневої установки ЗРК «БУК» [11].

Безумовно застосування ДЧМ сигналів вимагає ретельного вивчення всіх особливостей, в першу чергу, пов'язаних з особливостями функціонування систем захисту від активних та пасивних завад. Окремого вивчення потребують системи формування сигналів та їх синхронізація з приймальним трактом. Данні питання являють собою предмет подальших досліджень.

## Висновки

1. Застосування в радіолокаторах зондувальних сигналів з дискретною частотноманіпульованою структурою забезпечує потенційно високу захищеність РЛС від впливу імітувальних завад. Відповідний вибір закону модуляції ДЧМ сигналів для кожного такту зондування дозволить захистити РЛС від потоку хибних сигналів.

2. Використання ДЧМ сигналів значно підвищує функціональність засобів радіолокаційної розвідки. Відповідний вибір структури зондувальних сигналів дає можливість максимального наближення до найкращих умов контролю повітряного простору.

3. Перехід на застосування ДЧМ сигналів є перспективним напрямком модернізації парку радіолокаційних станцій з ЛЧМ структурою зондувальних сигналів. Це дозволить забезпечити ефективне використання частотного діапазону, підвищити інформативність роботи радіолокаційних засобів та завадозахищеність без суттєвих конструктивних змін РЛС.

4. Втілення ДЧМ сигналів у РЛС РТВ (наприклад, 80К6) може бути одним з кроків до створення універсального багатофункціонального радіолокатора розвідки повітряного простору.

## Список літератури

1. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л.Е. Варакин. – М.: Радио и связь, 1985. – 383 с.
2. Варакин Л.Е. Теория систем сигналов / Л.Е. Варакин. – М.: Сов. радио, 1978. – 304 с.

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

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

5. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория: справочник / Под ред. Я.Д. Ширмана. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.

6. 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.

7. Radar signals, by Nadav Levanon and Eli Mozeson. – John Wiley & Sons, Inc. – 2004. – 411 p.

8. 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.

9. Аеротехніка. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.aerotechnica.ua>.

10. Багдасарян С.Т. Радіолокаційна системотехніка / С.Т. Багдасарян, Ю.В. Кулявець, С.І. Шитіцин. – Х.: ХВУ, 2002. – 243 с.

11. Розширення функціональних можливостей РЛС шляхом застосування сигналів з псевдохаотичною частотною модуляцією сигналів / В.А. Таршин, В.А. Васильєв, О.Л. Кузнєцов, І.В. Злигостєв // Системи обробки інформації.: зб наук. пр. – Х: ХУПС, 2007. – Вип. 1 (59). – С. 103-106.

Надійшла до редколегії 14.02.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О. М. Сотніков, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДЧМ СИГНАЛОВ ПО ПОВЫШЕНИЮ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В.А. Таршин, А.В. Очкуренко, А.Л. Кузнєцов

*Проведен анализ сигналов с псевдохаотической внутренней дискретной частотной манипуляцией. Рассмотрены возможные варианты построения устройств согласованной обработки и особенности их функционирования. Проанализированы возможности ДЧМ сигналов по повышению функциональности систем радиолокационной разведки воздушного пространства.*

**Ключевые слова:** ДЧМ сигнал, функциональность РЛС, согласованная фильтрация, имитирующая помеха.

### THE ANALYSIS OF DFM SIGNALS OPPORTUNITIES ON INCREASE OF RADAR-TRACKING SYSTEMS FUNCTIONALITY

V.A. Tarshyn, A.V. Ochukurenko, A.L. Kuznetsov

*The analysis of signals with pseudo-chaotic internal discrete frequency manipulation is executed. Possible variants of construction of matched filters and feature of their functioning are considered. DFM signals capabilities on increase of radar-tracking systems functionality are analysed.*

**Keywords:** DFM signal, radar functionality, matched filtration, pulsed jamming.