

ОЦІНКА РАДІАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ ЦІЛІ ЛЧМ СИГНАЛОМ

Запропонована методика моноімпульсного радіолокаційного оцінювання радіальної швидкості цілей ЛЧМ сигналами на основі вимірювання, зумовлених впливом ефекту Доплера, змін параметра модуляції відбитого від цілі й прийнятого сигналу порівняно із зондувальним. Отримані формули для розрахунку середніх квадратичних відхилень оцінок параметра модуляції цифровим вимірювачем та радіальної швидкості цілей й наведені результати математичного моделювання запропонованої методики.

Ключові слова: ЛЧМ сигнал, ефект Доплера, радіальна швидкість, параметр модуляції, цифровий вимірювач.

The proposed method is a monopulse radar estimation of the radial velocity of targets for LCHM signals based on the measurement due to the influence of the Doppler effect, changes of the modulation parameter reflected from the target and the received signal compared with the sounding. The formulas for calculating the mean square deviations of the estimates of the modulation parameter by a digital meter and the radial velocity of the goals are obtained, and the results of the mathematical modeling of the proposed method are given.

Keywords: LCHM signal, Doppler effect, radial velocity, modulation parameter, digital meter.

Одним із напрямків підвищення інформаційних можливостей сучасних радіолокаційних систем є використання широкосмугових зондувальних сигналів з лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ). Зондувальний ЛЧМ сигнал $u_c(t)$ з прямокутною обвідною $U(t)$ описується виразом [1]

$$u_3(t) = U(t) \cdot \cos \left[2 \cdot \pi \cdot \left(f_0 \cdot t + \frac{b \cdot t^2}{2} \right) + \varphi_0 \right], \quad (1)$$

де: $U(t)$ – амплітуда ЛЧМ сигналу; f_0 – початкова частота ЛЧМ сигналу;

φ_0 – початкова фаза ЛЧМ сигналу, прийmemo $\varphi_0 = 0$; b – швидкість зміни частоти (параметр модуляції) ЛЧМ сигналу, $b = \Delta f_c / \tau_c$; Δf_c – девіація частоти ЛЧМ сигналу; τ_c – тривалість імпульсу ЛЧМ сигналу.

Амплітуда (обвідна) прямокутного імпульсного ЛЧМ сигналу може бути описана наступним чином

$$U(t) = \begin{cases} 1, & t \leq \tau_c, \\ 0, & t > \tau_c. \end{cases} \quad (2)$$

Найбільш загальною інформаційною характеристикою ЛЧМ сигналу є його база, що обчислюється як добуток його тривалості τ_N на ширину спектра Δf_c :

$$B_c = \tau_c \cdot \Delta f_c. \quad (3)$$

Підвищення потенційних інформаційних можливостей радіолокаційної системи з ЛЧМ зондувальним сигналом (точність, детальність, достовірність радіолокаційної інформації тощо) досягається збільшенням величини його бази B_c , що у свою чергу потребує

удосконалення методів оброблення таких сигналів та методів вилучення із них тематичної інформації.

Основна проблема збільшення бази ЛЧМ сигналу полягає в тому, що ефект Доплера призводить до деградації функції невизначеності, точніше до зміни параметра модуляції відбитого від цілі сигналу. Урахування такої зміни параметра модуляції дає можливість моноімпульсної оцінки радіальної швидкості цілі ЛЧМ сигналом. Розглянемо частотно-часові діаграми зондувального й прийнятого (відбитого від рухомої цілі) сигналу (рис. 1). Частотно-часові діаграми зондувального й прийнятого (відбитого від рухомої цілі) сигналу наведені на рис. 1.

На рис. 1 позначено: f_0 – початкова частота ЛЧМ зондувального сигналу в момент t_{Π} ; f_K – кінцева частота ЛЧМ зондувального сигналу в момент t_K ; Δf_C – девіація частоти ЛЧМ (ширина спектра) зондувального сигналу; τ_C – тривалість (протяжність) ЛЧМ зондувального сигналу.

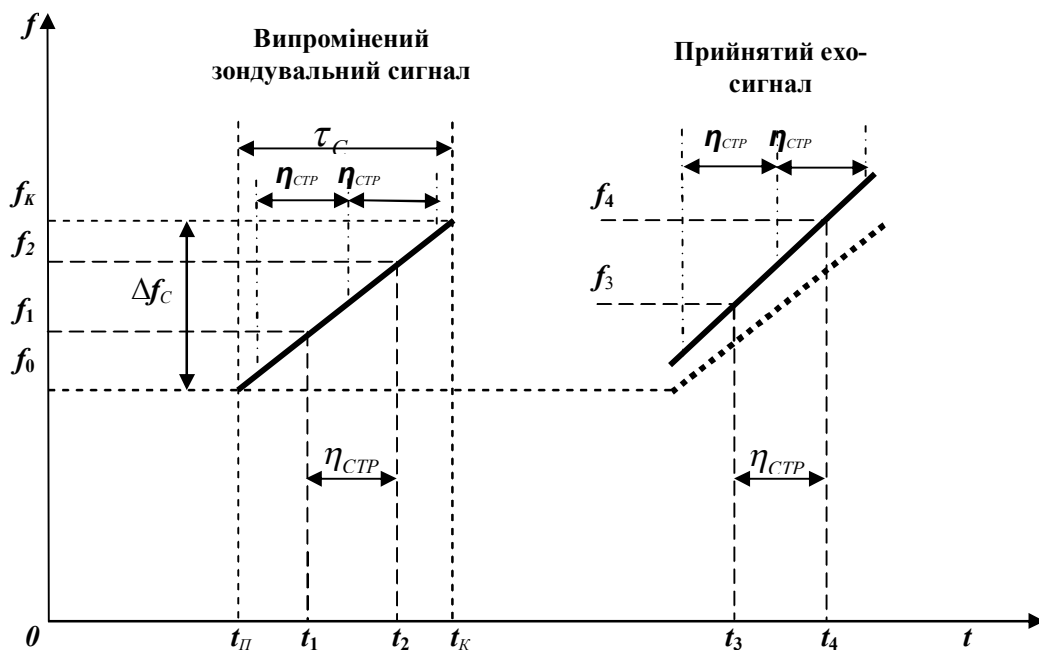


Рис. 1. Частотно-часові діаграми зондувального й прийнятого ЛЧМ сигналу

Для ЛЧМ сигналів з великою базою (при $\Delta f_C \gg 1/\tau_C$) ширина його спектра практично дорівнює девіації частоти ($\Delta f_C = f_K - f_0$), тоді параметр модуляції ЛЧМ сигналу визначається як

$$b_C = \frac{f_K - f_0}{t_K - t_{\Pi}} = \frac{\Delta f_C}{\tau_C}. \quad (4)$$

Відбитий від рухомої цілі ЛЧМ радіолокаційний сигнал унаслідок ефекту Доплера спотворюється порівняно із зондувальним – зміщується його частота та змінюється параметр модуляції пропорційно радіальній швидкості цілі. На рис. 1 показана частотно-часова діаграма прийнятого ехо-сигналу цілі, яка рухається до радіолокатора (пунктирною лінією показана частотно-часова діаграма ехо-сигналу із тією ж затримкою й нульовою радіальною швидкістю радіолокаційної цілі).

У статті [2] показана можливість радіолокаційної моноімпульсної оцінки координат цілей ЛЧМ сигналом. Розглянемо оцінку радіальної швидкості цілі за величиною зміни параметра модуляції із використанням цифрового вимірювача швидкості зміни частоти лінійно-частотно модульованих сигналів [3]. У цифровому вимірювачі здійснюється оцінка миттєвого значення частоти f_1 в момент t_1 шляхом підрахунку кількості імпульсів часової послідовності нулів ЛЧМ сигналу за тривалість вимірювального строба, що симетричний відносно моменту t_1 , й аналогічно – частоти f_2 в момент t_2 . Тривалість вимірювального строба $\eta_{СТР}$ задається у вимірювачі шляхом підрахунку тактових імпульсів періоду $T_{ТИ}$ (частота $f_{ТИ} = 1/T_{ТИ}$) внутрішнього високо стабільного генератора із умови $\eta_{СТР} = N_{ТИ}/T_{ТИ} < \tau_c/2$. Тоді оцінка значення параметра модуляції ЛЧМ випроміненого зондувального сигналу на виході вимірювача знаходиться за формулою

$$b_{B3} = \frac{f_2 - f_1}{\eta_{СТР}}. \quad (5)$$

Оцінка миттєвої частоти f_3 у момент t_3 й частоти f_4 у момент t_4 прийнятого ЛЧМ сигналу здійснюється тим же цифровим вимірювачем й за тим же методом – підрахунком кількості часової послідовності нулів ЛЧМ ехо-сигналу за тривалість вимірювального строба $\eta_{СТР}$. Причому, слід зазначити, що ефект Допплера не впливає на тривалість вимірювального строба $\eta_{СТР}$, оскільки вона є технічною характеристикою вимірювача.

Можна припустити, що прийнятий в момент t_3 сигнал миттєвої частоти f_3 є випромінений у момент t_1 й затриманий зондувальний сигнал миттєвої частоти f_1 , яка зміщена унаслідок ефекту Допплера. Тоді, враховуючи, що радіальні швидкості реальних радіолокаційних цілей $v_r \ll c$ (c – швидкість розповсюдження електромагнітної енергії), а значить $1 \gg (2 \cdot v_r / c) \gg (2 \cdot v_r / c)^2$, отримаємо

$$f_3 \approx f(1 + 2v_r / c), \quad (6)$$

де v_r – радіальна швидкість руху (приближення) радіолокаційної цілі; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Миттєва частота f_4 , прийнятого у момент t_4 ЛЧМ сигналу, розраховується як миттєва частота f_3 у момент t_3 , плюс приріст частоти зумовлений лінійною частотною модуляцією (зміненою унаслідок ефекту Допплера) за тривалість інтервалу строба $\eta_{СТР}$

$$f_4 \approx [f_3 + b_{B3}(1 + 2v_r / c)\eta_{СТР}]. \quad (7)$$

Далі, використавши (6) й (7), отримаємо формулу алгоритму оцінки параметра модуляції прийнятого ЛЧМ сигналу цифровим вимірювачем

$$b_{ПРС} = \frac{f_4 - f_3}{\eta_{СТР}} \approx b_{B3}(1 + 2v_r / c). \quad (8)$$

Звідси шляхом нескладних перетворень знайдемо вираз для моноімпульсної оцінки радіальної швидкості радіолокаційних цілей за величиною зміни параметра модуляції ЛЧМ зондувального сигналу

$$v_r \approx \frac{b_{ПРС} - b_{B3}}{b_{B3}} \cdot \frac{c}{2}. \quad (9)$$

Якщо ціль (об'єкт локації) віддаляється від радіолокатора, то у формулах (6), (7) й (8) замість виразу $(1 + 2 \cdot v_r / c)$ запишемо $(1 - 2 \cdot v_r / c)$, а $|b_{ПРС}| < |b_{B3}|$ й визначене за формулою (9) значення радіальної швидкості цілі v_r буде мати знак “мінус”.

Миттєві значення частот f_1, f_2, f_3 й f_4 , які визначаються у цифровому вимірювачі [6] шляхом підрахунку кількості часової послідовності нулів ЛЧМ сигналу за тривалість вимірювального строба $\eta_{СТР}$, розраховуються за формулою:

$$f_i = \frac{N_i + \frac{\varphi_{Pi} - \varphi_{Ki}}{2 \cdot \pi}}{\eta_{СТР}} = \frac{N_i}{N_{TI} \cdot T_{TI}} + \frac{\varphi_{Pi} - \varphi_{Ki}}{2 \cdot \pi \cdot N_{TI} \cdot T_{TI}}, \quad (10)$$

де N_i – кількість часової послідовності нулів ЛЧМ сигналу на інтервалі вимірювального строба $\eta_{СТР}$ при оцінці миттєвої частоти f_i ; φ_{Pi} , φ_{Ki} – випадкова фаза вимірюваного ЛЧМ сигналу у моменти початку й кінця строба вимірювання; N_{TI} – кількість тактових імпульсів періоду T_{TI} , що визначають тривалість вимірювального строба $\eta_{СТР} = N_{TI} \cdot T_{TI}$.

Перший доданок у формулі (10) є цифровою оцінкою вимірювача [6] миттєвої частоти f_i в момент t_i . Другий доданок у формулі (10) описує похибку цифрової оцінки миттєвої частоти f_i , що зумовлена випадковими фазами вимірюваного ЛЧМ сигналу в моменти початку й кінця строба вимірювання $\eta_{СТР}$. Як видно похибка цифрового вимірювання миттєвої частоти f_i обернено пропорційна тривалості строба $\eta_{СТР} = N_{TI} \cdot T_{TI}$, що узгоджується із висновками загальної теорії оцінювання частоти [4].

Підставивши у формули (5) й (8) відповідне значення миттєвої частоти (10), отримаємо формули розрахунку параметра модуляції випроміненого зондувального сигналу:

$$b_{B3} = \frac{N_2 - N_1}{(N_{TI} \cdot T_{TI})^2} + \frac{\varphi_{P2} - \varphi_{K2} + \varphi_{P1} + \varphi_{K1}}{2 \cdot \pi \cdot (N_{TI} \cdot T_{TI})^2}, \quad (11)$$

й параметра модуляції прийнятого ехо-сигналу

$$b_{PrC} = \frac{N_4 - N_3}{(N_{TI} \cdot T_{TI})^2} + \frac{\varphi_{P4} - \varphi_{K4} + \varphi_{P3} + \varphi_{K3}}{2 \cdot \pi \cdot (N_{TI} \cdot T_{TI})^2}. \quad (12)$$

Другий доданок у формулах (11) й (12) описує похибки оцінки параметра модуляції цифровим вимірювачем, що зумовлені випадковою фазою ЛЧМ сигналу у моменти початку φ_{Pi} й кінця φ_{Ki} відповідного вимірювального строба $\eta_{СТР}$, які у вимірювачі не враховуються. Оскільки $N_{TI} \gg 1$, $N_i \gg 1$ й $(\varphi_i / 2 \cdot \pi) \leq 1$, то алгоритм оцінки параметра модуляції випроміненого зондувального й прийнятого ЛЧМ сигналів в цифровому вимірювачі [2] описується формулами:

$$b_{B3} \approx \frac{N_2 - N_1}{(N_{TI} \cdot T_{TI})^2}, \quad b_{PrC} \approx \frac{N_4 - N_3}{(N_{TI} \cdot T_{TI})^2}. \quad (13)$$

Основним джерелом похибок цифрового вимірювання параметра модуляції ЛЧМ сигналу є його випадкова фаза у моменти початку φ_{Pi} й кінця φ_{Ki} відповідного вимірювального строба $\eta_{СТР} = N_{TI} \cdot T_{TI}$ та нестабільність періоду тактових імпульсів T_{TI} , які визначають тривалість вимірювального строба $\eta_{СТР}$.

Формулу для розрахунку дисперсії оцінки параметра модуляції ЛЧМ сигналів на виході вимірювача отримаємо методом лінеаризації функції випадкового аргументу [4]. З урахуванням зазначеного вище та припускаючи, що випадкові фази у моменти початку й кінця вимірювальних стробів незалежні, а їх середні квадратичні відхилення рівні $\sigma_{\varphi_j} = \sigma_{\varphi}$, а також враховуючи, що нестабільність періоду тактових імпульсів T_{TI} не корельовано із

значенням випадкових фаз у моменти початку й кінця вимірювального строба, отримаємо формулу для оцінки дисперсії параметра модуляції випроміненого ЛЧМ зондувального сигналу на виході вимірювача [6] :

$$\sigma_{bB3}^2 = \frac{1}{\pi^2 \cdot (N_{TI} \cdot T_{TI})^4} \cdot \sigma_{\varphi}^2 + \left[\frac{N_2 - N_1}{N_{TI}^2} \cdot \frac{-2}{T_{TI}^3} + \frac{\varphi_{I2} - \varphi_{K2} - \varphi_I}{2 \cdot \pi \cdot N_I^2} \right] \quad (14)$$

де σ_{φ}^2 – дисперсія випадкової фази рівномірно розподіленої на інтервалі $0 \div 2 \cdot \pi$; σ_t^2 – дисперсія оцінки тривалості вимірювального строба.

Враховуючи, що $\sigma_{\varphi}^2 = \pi^2/3$, а $N_{TI} \gg 1$, $N_I \gg 1$ й $(\varphi_I / 2 \cdot \pi) \leq 1$, отримаємо кінцеву формулу дисперсії оцінки параметра модуляції випроміненого ЛЧМ зондувального сигналу на виході вимірювача

$$\sigma_{bB3}^2 \approx \frac{1}{3 \cdot (N_{TI} \cdot T_{TI})^4} + \frac{4 \cdot (N_2 - N_1)^2}{(N_{TI} \cdot T_{TI})^4} \cdot \left(\frac{\sigma_t}{T_{TI}} \right)^2, \quad (15)$$

де (σ_t / T_{TI}) – відносна нестабільність періоду тактових імпульсів.

Аналогічно обчислюється дисперсія оцінки параметра модуляції прийнятого ЛЧМ сигналу на виході вимірювача

$$\sigma_{bIpc}^2 \approx \frac{1}{3 \cdot (N_{TI} \cdot T_{TI})^4} + \frac{4 \cdot (N_4 - N_3)^2}{(N_{TI} \cdot T_{TI})^4} \cdot \left(\frac{\sigma_t}{T_{TI}} \right)^2. \quad (16)$$

Застосовуючи метод лінеаризації функції випадкового аргументу [4] стосовно формули (9) та вважаючи оцінки параметра модуляції зондувального й прийнятого ЛЧМ сигналів некорельованими, отримаємо формулу для розрахунку дисперсії моноімпульсної оцінки радіальної швидкості цілей ЛЧМ сигналом

$$\sigma_{v_r}^2 \approx \left[\frac{1}{b_{B3}^2} \cdot \sigma_{bIpc}^2 + \frac{b_{Ipc}^2}{b_{B3}^4} \cdot \sigma_{bB3}^2 \right] \cdot \frac{c^2}{4}. \quad (17)$$

Результати розрахунків оцінок за формулами (9)-(17), для радіальної швидкості цілі $v_r = 6000$ м/с, періоду тактових імпульсів $T_{TI} = 10^{-9}$ с та їх відносній нестабільності $(\sigma_t / T_{TI}) = 10^{-7}$, наведені в табл. 1. Як приклад розглянуто багатофункціональну РЛС AN/FPS-108 американської системи контролю космічного простору, у якій використовується ЛЧМ сигнал з параметрами: $f_0 = 1200$ МГц, $\Delta f_c = 200$ МГц, $\tau_{\tilde{n}} = 1,5$ мс [5]. База зазначеного ЛЧМ сигналу РЛС AN/FPS-108 $B_C = 3 \cdot 10^5$, а параметр модуляції $b_C = 133333,3$ МГц/с. Для отримання послідовного ряду результатів розрахунків вибрані параметри (початкова частота f_0 , тривалість ЛЧМ зондувального імпульсу $\tau_{\tilde{n}}$ й девіація частоти ЛЧМ сигналу Δf_c) гіпотетичних перспективних радіолокаційних систем, значення яких не менше аналогічних параметрів РЛС AN/FPS-108.

Таблиця 1

Результати математичного моделювання оцінювання цифровим вимірювачем

Радіолокаційна система	Параметри зондувального сигналу				Розрахункові оцінки цифрового вимірювача					
	f_0 , МГц	τ_c , мс	Δf_c , МГц	B_c	$\eta_{СТР}$, мс	$N_{П}$	$b_{ВЗ}$, МГц/с	$b_{ПрС}$, МГц/с	σ_b , МГц/с	σ_{V_r} , м/с
AN/FPS-108	1200	1,5	200	$3 \cdot 10^5$	0,6	$6 \cdot 1^5$	133333,3	133338,8	1,606	2550
перспективна	3600	2,0	1000	$2 \cdot 10^6$	0,9	$9 \cdot 10^5$	500000	500009,87	0,703	298
перспективна	3600	3,0	1000	$3 \cdot 10^6$	1,4	$14 \cdot 10^5$	333333,16	333346,93	0,302	193

Аналіз наведених у табл. 1 результатів математичного моделювання цифрового вимірювача [3] дає підстави зробити такі висновки:

– збільшення тривалості радіолокаційного ЛЧМ зондувального сигналу створює можливість збільшення тривалості вимірювального строба, чим забезпечується краща точність вимірювання

миттєвої частоти ЛЧМ сигналу, а значить зменшення похибок оцінювання параметра модуляції й моноімпульсної оцінки радіальної швидкості цілей;

– збільшення девіації частоти ЛЧМ зондувального сигналу призводить до збільшення параметра його модуляції, а значить до збільшення абсолютної величини його доплерівського зміщення, що у свою чергу забезпечує зменшення відносних похибок оцінки цього зміщення, тобто забезпечує кращу точність моноімпульсної оцінки радіальної швидкості цілей;

– при величині бази ЛЧМ зондувального сигналу більше 10^6 , середні квадратичні похибки моноімпульсної оцінки радіальної швидкості космічних цілей не перевищують одної десятої її абсолютного значення;

– нестабільність періоду тактових імпульсів (при $(\sigma_t / T_{Tl}) \leq 10^{-7}$) цифрового вимірювача несуттєво впливає на сумарну величину апаратних похибок вимірювання, які визначаються, в основному, випадковими фазами ЛЧМ сигналу в моменти початку й кінця строба вимірювання та його тривалістю.

ДЖЕРЕЛА ТА ЛІТЕРАТУРА

1. Радиоэлектронные системы : Основы построения и теория. Справочник / Под ред. Я.Д. Ширмана. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.

2. Фомін М. П. Функція взаємної кореляції ЛЧМ сигналу з урахуванням ефекту Доплера // Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: Матеріали 5-ої міжнародної науково-практичної конференції. Чернівці: «Місто», 2016. С. 48.

3. Авторское свидетельство СССР № 279566 за 1988 год. М. кл.: G01R 23/00. Цифровой измеритель скорости изменения частоты линейно-частотно модулированных сигналов / В.В. Владимирский, В.В. Омельчук, Н.П. Фомин // Описание изобретения по заявке №3168814 с приоритетом от 27.04.1987 года.

4. Павленко Ю.Ф., Шпаньон П.А. Измерение параметров частотно-модулированных колебаний. М.: Радио и связь, 1986. 207 с.

5. Павлов В. Американские многофункциональные РЛС // Зарубежное военное обозрение. 1984. №1. С. 59-62.