

В.В. Омельчук, к.т.н., доц.

Військова частина, м. Житомир

О.В. Омельчук, слухач

Національний університет оборони України

М.П. Фомін, к.т.н., с.н.с.

Житомирський національний агроекологічний університет

МОНОІМПУЛЬСНЕ РАДІОЛОКАЦІЙНЕ ОЦІНЮВАННЯ РАДІАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ ЦІЛЕЙ ЛІНІЙНО-ЧАСТОТНО МОДУЛЬОВАНИМ СИГНАЛОМ

Запропоновано методику моноімпульсного радіолокаційного оцінювання радіальної швидкості цілей лінійно-частотно модульованим (ЛЧМ) сигналами на основі вимірювання, зумовлених впливом ефекту Доплера, змін параметра модуляції відбитого від цілі й прийнятого сигналу порівняно із зондувальним. Отримано формули для розрахунку середніх квадратичних відхилень оцінок параметра модуляції цифровим вимірювачем та радіальної швидкості цілей й наведено результати математичного моделювання запропонованої методики.

Актуальність проблеми дослідження. 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]

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

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, $b = \Delta f_c / \tau_N$; Δf_c – девіація частоти ЛЧМ сигналу; τ_N – тривалість імпульсу ЛЧМ сигналу.

Амплітуда (обвідна) прямокутного імпульсного ЛЧМ сигналу може бути описана так:

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

Найбільш загальною інформаційною характеристикою ЛЧМ сигналу є 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 вдосконалення методів оброблення таких сигналів та методів вилучення із них тематичної інформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теорія й техніка використання ЛЧМ сигналів досить добре розроблені й описані у багатьох наукових роботах. У роботі [1] докладно розглядаються, зокрема, функції неузгодженості для ЛЧМ сигналів обмеженої бази у вудврдському наближенні та узагальнення їх на ЛЧМ сигнали з дуже великою базою й пропонується подолання невизначеності координат “дальність–швидкість” методом диференціювання дальності. У статті [2] запропонований алгоритм оцінки дальності за методом максимальної правдоподібності на основі лінійної фільтрації одиничних зміщених (через ефект Доплера) вимірів дальності з побудовою траєкторії польоту цілі на основі поліноміальної моделі. Стаття [3] присвячена аналізу вагового оброблення у часовій та частотній областях для зменшення енергетичних втрат і зниження рівня бокових пелюсток (зумовлених доплерівським зміщенням частоти) автокореляційної функції ЛЧМ сигналу. У статті [4] показано, що ефект Доплера призводить до деградації функції невизначеності й, у той же час, до підвищення розрізняювальної здатності за дальністю та радіальною швидкістю цілей. У роботі [5] методами математичного аналізу досліджується функція взаємної кореляції імпульсного ЛЧМ радіолокаційного ехо-сигналу з урахуванням впливу ефекту Доплера на зміщення й швидкість зміни його частоти та побудовано її тіло невизначеності. Разом з тим прикладні потреби вимагають створення методики моноімпульсної радіолокаційної оцінки радіальної швидкості цілі ЛЧМ сигналами.

Мета статті. Розробка методики моноімпульсного радіолокаційного вимірювання радіальної швидкості цілі ЛЧМ сигналами на основі врахування впливу ефекту Доплера на зміщення частоти й параметра модуляції та оцінка похибок зазначеного вимірювання.

Викладення основного матеріалу дослідження. Частотно-часові діаграми зондувального й прийнятого (відбитого від рухомої цілі) сигналу наведені на рисунку 1, де позначено: f_0 – початкова частота ЛЧМ зондувального сигналу в момент t_0 ; f_k – кінцева частота ЛЧМ зондувального сигналу в момент t_k ; Δf_C – девіація частоти ЛЧМ (ширина спектра) зондувального сигналу; $\tau_{\tilde{N}}$ – тривалість (протяжність) ЛЧМ зондувального сигналу.

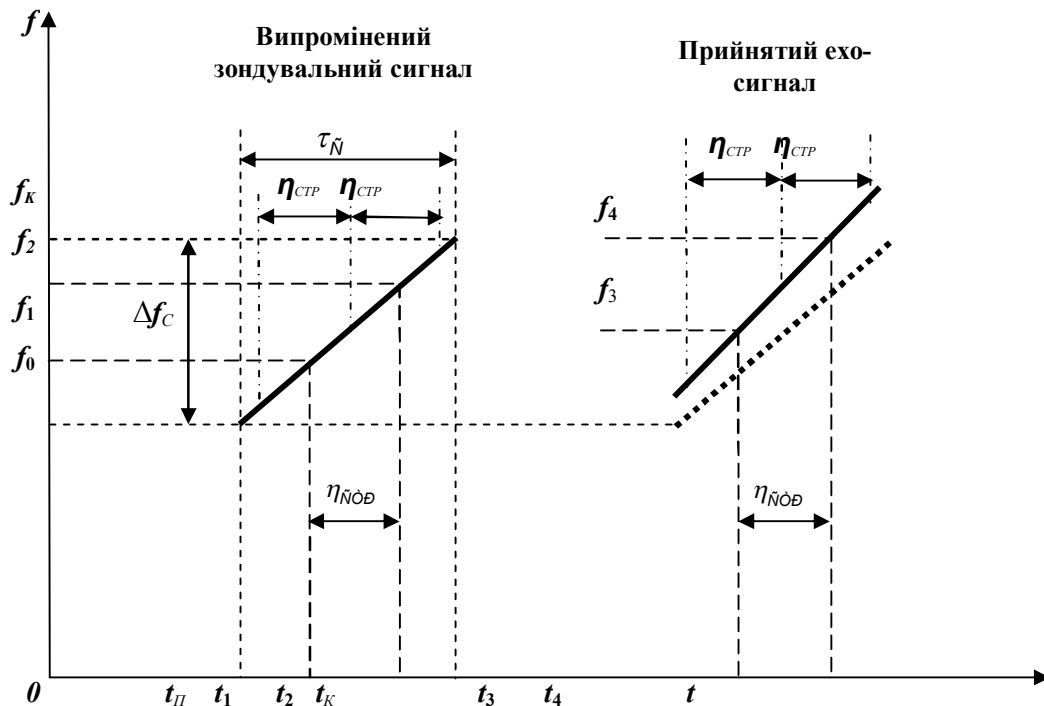


Рис. 1. Частотно-часові діаграми зондувального й прийнятого ЛЧМ сигналів рівнює

девіації частоти ($\Delta f_C = f_k - f_0$), тоді параметр модуляції ЛЧМ сигналу визначається як:

$$b_C = \frac{f_k - f_0}{t_k - t_0} = \frac{\Delta f_C}{\tau_C}. \quad (4)$$

Відбитий від рухомої цілі ЛЧМ радіолокаційний ехо-сигнал унаслідок ефекту Доплера спотворюється порівняно із зондувальним – зміщується його частота та змінюється параметр модуляції пропорційно радіальній швидкості цілі. На рисунку 1 показано частотно-часову діаграму 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 [5] показано 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 [6]. У цифровому вимірювачі [6] здійснюється оцінка миттєвого значення частоти f_1 в момент t_1 шляхом підрахунку кількості імпульсів часової послідовності нулів ЛЧМ сигналу за тривалість вимірювального строба $\eta_{\tilde{N}0В}$, що симетричний відносно моменту t_1 , й аналогічно – частоти f_2 в момент t_2 . Тривалість вимірювального строба $\eta_{\tilde{N}0В}$ задається у вимірювачі шляхом підрахунку тактових імпульсів періоду $T_{\tilde{N}}$ (частота

$f_{\tilde{N}} = 1 / T_{\tilde{N}}$) внутрішнього високостабільного генератора за умови $\eta_{\tilde{N}0В} = N_{\tilde{N}} \cdot T_{\tilde{N}} < \tau_{\tilde{N}} / 2$. Тоді оцінка значення параметра модуляції ЛЧМ випроміненого зондувального сигналу на виході вимірювача обчислюється за формулою:

$$b_{AC} = \frac{f_2 - f_1}{\eta_{\tilde{N}0В}}. \quad (5)$$

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 тривалістю вимірювального строба $\eta_{\text{НОД}}$. Причому, слід зазначити, що ефект Доплера не впливає на тривалість вимірювального строба $\eta_{\text{НОД}}$, оскільки вона є технічною характеристикою вимірювача.

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

$$f_3 \approx f_1 \cdot (1 + 2 \cdot v_r / c), \quad (6)$$

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 внаслідок ефекту Доплера) за тривалість інтервалу строба $\eta_{\text{НОД}}$:

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

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

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

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

$$v_r \approx \frac{b_{\text{ЮН}} - b_{\text{АЧ}}}{b_{\text{АЧ}}} \cdot \frac{\eta_{\text{СТР}}}{2}. \quad (9)$$

Якщо ціль (об'єкт локації) віддаляється від радіолокатора, то у формулах (6)–(8) замість виразу $(1 + 2 \cdot v_r / c)$ запишемо $(1 - 2 \cdot v_r / c)$, а $|b_{\text{ЮН}}| < |b_{\text{АЧ}}|$ 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 $\eta_{\text{НОД}}$, розраховуються за формулою:

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

де N_i – кількість часової послідовності нулів ЛЧМ сигналу на інтервалі вимірювального строба $\eta_{\text{НОД}}$ 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 $\eta_{\text{НОД}} = N_{\text{TI}} \cdot T_{\text{TI}}$.

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 $\eta_{\text{НОД}}$. Як видно похибка цифрового вимірювання миттєвої частоти f_i обернено пропорційна тривалості строба $\eta_{\text{НОД}} = N_{\text{TI}} \cdot T_{\text{TI}}$, що узгоджується із висновками загальної теорії оцінювання частоти [1].

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

$$b_{\text{АЧ}} = \frac{N_2 - N_1}{(N_{\text{TI}} \cdot T_{\text{TI}})^2} + \frac{\varphi_{\text{P2}} - \varphi_{\text{K2}} + \varphi_{\text{P1}} + \varphi_{\text{E1}}}{2 \cdot \pi \cdot (N_{\text{TI}} \cdot T_{\text{TI}})^2}, \quad (11)$$

й параметра модуляції прийнятого ехо-сигналу:

$$b_{\text{ЮН}} = \frac{N_4 - N_3}{(N_{\text{TI}} \cdot T_{\text{TI}})^2} + \frac{\varphi_{\text{P4}} - \varphi_{\text{K4}} + \varphi_{\text{P3}} + \varphi_{\text{E3}}}{2 \cdot \pi \cdot (N_{\text{TI}} \cdot T_{\text{TI}})^2}. \quad (12)$$

Другий доданок у формулах (11) й (12) описує похибки оцінки параметра модуляції цифровим вимірювачем [6], що зумовлені випадковою фазою ЛЧМ сигналу у моменти початку φ_{Pi} й кінця φ_{Ki} відповідного вимірювального строба $\eta_{\text{НОД}}$, які у вимірювачі не враховуються. Оскільки $N_{\text{TI}} \gg 1$, $N_i \gg 1$

й $(\varphi_i / 2 \cdot \pi) \leq 1$, то алгоритм оцінки параметра модуляції випроміненого зондувального й прийнятого ЛЧМ сигналів в цифровому вимірювачі [6] описується формулами:

$$b_{A\zeta} \approx \frac{N_2 - N_1}{(N_{T_I} \cdot T_{T_I})^2}, \quad b_{b\tilde{N}} \approx \frac{N_4 - N_3}{(N_{T_I} \cdot T_{T_I})^2}. \quad (13)$$

Основним джерелом похибок цифрового вимірювання [6] параметра модуляції ЛЧМ сигналу є його випадкова фаза у моменти початку φ_{Pi} й кінця φ_{Ki} відповідного вимірювального строба $\eta_{\tilde{N}OD} = N_{T_I} \cdot T_{T_I}$ та нестабільність періоду тактових імпульсів T_{T_I} , які визначають тривалість вимірювального строба $\eta_{\tilde{N}OD}$.

Формулу для розрахунку дисперсії оцінки параметра модуляції ЛЧМ сигналів на виході вимірювача [6] отримаємо методом лінеаризації функції випадкового аргументу [7, 8]. 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_{T_I} некорельована 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]:

$$\sigma_{b_{A\zeta}}^2 = \frac{1}{\pi^2 \cdot (N_{T_I} \cdot T_{T_I})^4} \cdot \sigma_{\varphi}^2 + \left[\frac{N_2 - N_1}{N_{T_I}^2} \cdot \frac{-2}{T_{T_I}^3} + \frac{\varphi_{I2} - \varphi_{E2} - \varphi_{I1} + \varphi_{E2}}{2 \cdot \pi \cdot N_{T_I}^2} \cdot \frac{-2}{T_{T_I}^3} \right]^2 \cdot \sigma_t^2, \quad (14)$$

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 $N_{T_I} \gg 1$, $N_i \gg 1$ й $(\varphi_j / 2 \cdot \pi) \leq 1$, отримаємо кінцеву формулу дисперсії оцінки параметра модуляції випроміненого ЛЧМ зондувального сигналу на виході вимірювача [6]:

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

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

Аналогічно обчислюється дисперсія оцінки параметра модуляції прийнятого ЛЧМ ехо-сигналу на виході вимірювача [6]:

$$\sigma_{b_{b\tilde{N}}}^2 \approx \frac{1}{3 \cdot (N_{T_I} \cdot T_{T_I})^4} + \frac{4 \cdot (N_4 - N_3)^2}{(N_{T_I} \cdot T_{T_I})^4} \cdot \left(\frac{\sigma_t}{T_{T_I}} \right)^2. \quad (16)$$

Застосовуючи метод лінеаризації функції випадкового аргументу [7, 8] 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:

$$\sigma_{v_r}^2 \approx \left[\frac{1}{b_{A\zeta}^2} \cdot \sigma_{b_{b\tilde{N}}}^2 + \frac{b_{b\tilde{N}}^2}{b_{A\zeta}^4} \cdot \sigma_{b_{A\zeta}}^2 \right] \cdot \tilde{r}^2. \quad (17)$$

Результати розрахунків оцінок за формулами (9)–(17), для радіальної швидкості цілі $v_r = 6000$ м/с, періоду тактових імпульсів $T_{T_I} = 10^{-9}$ с та їх відносній нестабільності $(\sigma_t / T_{T_I}) = 10^{-7}$, наведені в таблиці 1. У зазначеній таблиці використані такі позначення стовпців: f_0 – початкова частота ЛЧМ сигналу; $\tau_{\tilde{N}}$ – тривалість імпульсу ЛЧМ сигналу; Δf_c – девіація частоти ЛЧМ сигналу; B_c – база ЛЧМ сигналу; $\eta_{\tilde{N}OD}$ – тривалість вимірювального строба; N_{T_I} – кількість тактових імпульсів на інтервалі вимірювального строба; $b_{A\zeta}$ – параметр модуляції випроміненого зондувального ЛЧМ сигналу; $b_{b\tilde{N}}$ – параметр модуляції прийнятого ЛЧМ ехо-сигналу; σ_b – середнє квадратичне відхилення оцінки параметра модуляції ЛЧМ сигналу; σ_{v_r} – середнє квадратичне відхилення моноімпульсної оцінки радіальної швидкості цілі. Як приклад розглянуто багатofункціональну РЛС AN/FPS-108 американської системи контролю космічного простору, у якій використовується ЛЧМ сигнал

параметрами: $f_0 = 1200$ МГц, $\Delta f_c = 200$ МГц, $\tau_{\tilde{N}} = 1,5$ мс [9]. 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

обрані параметри (початкова частота f_0 , тривалість ЛЧМ зондувального імпульсу τ_N й девіація частоти ЛЧМ сигналу $\Delta \Delta f_C$) гіпотетичних перспективних радіолокаційних систем, значення яких не менше аналогічних параметрів РЛС AN/FPS-108.

Аналіз наведених у таблиці 1 результатів математичного моделювання цифрового вимірювача [6] 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 однієї десятої її абсолютного значення;

– нестабільність періоду тактових імпульсів (при $(\sigma_t / T_{T1}) \leq 10^{-7}$) 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.

Таблиця 1

Результати математичного моделювання оцінювання цифровим вимірювачем

Радіолокаційна система	Параметри зондувального сигналу				Розрахункові оцінки цифрового вимірювача					
	f_0 , МГц	τ_N , мс	$\Delta \Delta f_C$, МГц	B_C	$\eta_{\text{добр}}$, мс	$N_{\text{п}}$	b_{AC} , МГц/с	$b_{\text{до } N}$, МГц/с	σ_b , МГц/с	σ_{Vr} , м/с
AN/FPS-108	1200	1,5	200	$3 \cdot 10^5$	0,6	$6 \cdot 10^5$	133333,3	133338,8	1,606	2550
перспективна	2400	1,5	500	$7,5 \cdot 10^5$	0,6	$6 \cdot 10^5$	333333,3	333344,44	1,606	1022
перспективна	2400	2,0	500	$1 \cdot 10^6$	0,9	$9 \cdot 10^5$	250000	250004,93	0,715	607
перспективна	2400	3,0	500	$1,5 \cdot 10^6$	1,4	$14 \cdot 10^5$	166666,3	166672,96	0,302	383
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

Висновки:

1. При радіолокації ЛЧМ сигналом з великою базою можлива моноімпульсна оцінка радіальної швидкості цілей за величиною доплерівської зміни його параметра модуляції, чим забезпечується зменшення невизначеності координат “дальність–швидкість” цілей.

2. Прийнятні похибки оцінки радіальної швидкості цілей можуть бути отримані при моноімпульсній радіолокації цілей ЛЧМ сигналами з величиною бази більше 10^6 . Похибки моноімпульсної радіолокаційної оцінки радіальної швидкості цілей ЛЧМ сигналами зменшуються при збільшенні тривалості й/або девіації частоти зондувального сигналу.

3. Для моноімпульсної радіолокаційної оцінки радіальної швидкості цілей може бути використаний цифровий вимірювач швидкості зміни частоти сигналів з лінійною частотною модуляцією.

У подальшому доцільно продовжити розробку методів й програмно-технічних засобів моноімпульсного радіолокаційного оцінювання радіальної швидкості цілей ЛЧМ сигналами.

Список використаної літератури:

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. Волочков Е.Б. Измерение дальности ЛЧМ сигналом при неизвестной доплеровской частоте / Е.Б. Волочков // Радиотехника. – 1991. – № 11. – С. 17–19.
3. Трухачев А.А. Радиолокационные сигналы и их применение / А.А. Трухачев. – М. : Воениздат, 2005. – 320 с.
4. Мрачковский О.Д. О деградации функции неопределенности широкополосного зондирующего сигнала с линейной внутримпульсной частотной модуляцией / О.Д. Мрачковский, В.Е.

- Бычков, А.А. Олейник* // Вісник Національного технічного університету “КПІ” / Радіотехніка. – 2009. – № 38. – С. 41–45.
5. *Омельчук В.В.* Функція взаємної кореляції лінійно-частотно модульованого сигналу з урахуванням ефекту Доплера / *В.В. Омельчук, М.П. Фомін* // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2012. – Т. 1, № 3 (62). – С. 61–66.
 6. А. с. 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.
 7. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей : учебник для студентов вузов / *Е.С. Вентцель*. – 10-е изд., стер. – М. : Издат. центр «Академия», 2005. – 576 с.
 8. *Павленко Ю.Ф.* Измерение параметров частотно-модулированных колебаний / *Ю.Ф. Павленко, П.А. Шпаньон*. – М. : Радио и связь, 1986. – 207 с.
 9. *Павлов В.* Американские многофункциональные РЛС / *В.Павлов* // Зарубежное военное обозрение. – 1984. – №1. – С. 59–62.

ОМЕЛЬЧУК Валентин Васильович – кандидат технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник відділу військової частини, м. Житомир.

Наукові інтереси:

- космічні інформаційні технології та системи;
- радіотехнічні інформаційні системи та їх застосування.

ОМЕЛЬЧУК Олександр Валентинович – слухач Національного університету оборони України, м. Київ.

Наукові інтереси:

- космічні інформаційні технології та системи.

ФОМІН Микола Павлович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри вищої математики й теоретичної механіки Житомирського національного агроекологічного університету.

Наукові інтереси:

- математичний аналіз радіолокаційних систем.

Стаття надійшла до редакції 11.10.2012