

Розвиток, бойове застосування та озброєння радіотехнічних військ

УДК 621.396.96:551.501.815

DOI: 10.30748/nitps.2018.31.10

Д.В. Атаманський

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

ВПЛИВ ВІДБИТТІВ ВІД МІСЦЕВИХ ПРЕДМЕТІВ НА ТОЧНІСТЬ ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МЕТЕОУТВОРЕНЬ В ІМПУЛЬСНИХ ДМРЛ

Розглядається точність визначення параметрів метеоутворень (МУ) системами міжперіодної обробки (МПО) сигналів імпульсних ДМРЛ в умовах заважаючого впливу відбиттів від місцевих предметів (МП). Описуються методика і результати аналітичного й експериментального порівняння точності оцінювання параметрів МУ при придушенні відбиттів від МП неадаптивними фільтрами різної структури. Показано, що ефект від їхнього використання залежить від середньої радіальної швидкості МУ, ширини спектра швидкостей (турбулентності) МУ, параметрів і структури неадаптивних фільтрів придушення (НФП). Установлено, що помилки вимірів параметрів МУ знижуються пропорційно збільшенню крутості й глибини зони режекції НФП, якщо спектри МУ перебувають поза цією зоною. Помилки істотно збільшуються, якщо ці спектри розташовані в зоні режекції фільтрів. Наведено рекомендації з вибору НФП і їхньому використанню в системах МПО існуючих і перспективних імпульсних ДМРЛ. Показано, що через складності у виборі параметрів НФП системи МПО повинні комплектуватися наборами фільтрів з різними параметрами й можливістю оперативного включення кожного з них у систему МПО.

Ключові слова: метеоутворення, місцеві предмети, неадаптивний фільтр придушення, коефіцієнт кореляції, імпульсний доплерівський метеорадіолокатор.

Вступ і постановка завдання

Ступінь небезпеки метеоутворень (МУ) в імпульсних доплерівських метеорологічних радіолокаторах (ІД МРЛ) зазвичай визначають по параметрам енергетичного спектра міжперіодних флуктуацій відбиттів від МУ (ВМУ) у кожному з елементів простору, що аналізується [1–3].

Їх оцінювання покладається на систему міжперіодної обробки (МПО) ІД МРЛ. При наявності відбиттів від місцевих предметів (МП) [1–5], особливо при огляді малих кутів місця, в системі МПО будуть оцінюватися параметри їх адитивної суміші з ВМУ, які можуть істотно відрізнитися від безпосередньо потрібних параметрів МУ [6–8].

Знизити шкідливий вплив МП адаптивними фільтрами придушення досить складно через відсутність класифікованих вибірок відбиттів від МП [9, С. 192; 6]. У зв'язку із цим на даний цей час використовуються істотно більш прості (неоптимальні) рішення. Вони зводяться до введення на вході системи МПО неадаптивного фільтра придушення (НФП) МП [1; 3–6; 8], що представляє собою режкторний фільтр, настроєний на нульову доплерівську частоту. Структура й параметри цього фільтра можуть бути різними, їхній вибір неоднозначний і

продиктований зазвичай уявленнями розроблювачів про властивості відбиттів від місцевості.

Різноманітність НФП спричиняє різні величини помилок вимірів параметрів МУ. Крім цього можливо й збільшення помилок через неадаптивність фільтрів до вхідної суміші, у якій відсутні відбиття від МП.

Мета статті:

- оцінити вплив МП на потенційну точність вимірів характеристик МУ при відсутності й наявності НФП;
- проаналізувати помилки вимірів параметрів МУ при використанні відомих НФП завод;
- обґрунтувати рекомендації з вибору НФП для систем МПО сигналів існуючих і перспективних імпульсних ДМРЛ.

1. Моделі вхідних впливів і методика математичного експерименту

А. Як модель відбиттів від МУ й МП прийняті процеси авторегресії (АР – процеси [6; 8; 10]) різного цілого порядку $n > 1$ із заданими інтенсивністю, шириною й центральною частотою унімодального спектра. НФП настроєні на компенсацію відбиттів від джерел з нульовою середньою радіальною швидкістю руху. Розглядаються 3 види НФП. Перший

(Ф1) – класичний фільтр черезперіодного віднімання (ЧПВ) довільної кратності. Другий (Ф2) – вінеровський фільтр заданого порядку, що мінімізує вихідну потужність вхідного процесу із заданим спектром. Третій фільтр (Ф3) – гіпотетичний вінеровський фільтр заданого порядку процесу із спектром, що збігається з спектром МП. Норма вектора ваг всіх фільтрів однакова (дорівнює одиниці).

Б. Вплив МП на ефективність НФП характеризується значеннями помилок виміру

$$\delta\eta, \text{дБ} = \hat{\eta} - \eta, \quad (1,а)$$

$$\delta V_r = |\hat{V}_r - V_r|, \quad (1,б)$$

$$\delta w = \hat{w} - w, \quad (1,в)$$

які порівнюються з їх гранично допустимими значеннями [2]:

$$\delta\eta_{\text{доп}} = 1 \text{ дБ}, \quad \delta V_{\text{доп}} = 1 \text{ м/с}, \quad \delta w_{\text{доп}} = 1 \text{ м/с}. \quad (2)$$

Тут η (дБ), V_r і w – справжні значення інтенсивності (дБ), радіальної швидкості й ширини спектра швидкостей МУ, які задаються при моделюванні, $\hat{\eta}$ (дБ), \hat{V}_r , \hat{w} – їхні оцінки на вході (виході) НФП при наявності відбиттів від МП.

Ці оцінки нижче знаходять добре відомим методом "парних імпульсів" [1–3; 5–6] по елементам ермітової $M \times M$ кореляційної матриці (КМ) $\mathbf{R} = [r_{i\ell}]_{i,\ell=1}^M$ міжперіодних флуктуацій відбиттів на вході НФП. При постійному інтервалі зондування T , який використовується в експериментах, ця матриця – ермітова тьопліцева й повністю визначається своїм першим стовпцем (кореляційною послідовністю (КП)) $\mathbf{r}_1 = [r_{i1}]_{i=1}^M$ [11]. У ролі оцінок параметрів відбиттів у цьому випадку використовуються значення

$$\hat{\eta} = r_{11}, \quad (3,а)$$

$$\hat{V}_r = \frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot \phi, \quad \phi = \arctan \left(\frac{\text{Im}(r_{12})}{\text{Re}(r_{12})} \right), \quad (3,б)$$

$$\hat{w} = \frac{\lambda}{2 \cdot T} \cdot \Delta F, \quad (3,в)$$

де λ – довжина хвилі РЛС, ΔF — ширина спектра міжперіодних флуктуацій відбиттів, яка залежить від модуля коефіцієнта кореляції (КК) $\rho = |r_{12}/r_{11}|$ і порядку p АР – процесу [12].

Якщо при цьому параметри (елементи вектора ваг) НФП постійні й не залежать від характеристик вхідних впливів, то КМ $\mathbf{R}_{\text{out}} = [r_{i\ell}^{(\text{out})}]_{i,\ell=1}^{M_{\text{out}}}$ на його виході також ермітова тьопліцева. У цьому випадку формули (2), у яких КП \mathbf{r}_1 замінена на КП

$\mathbf{r}_{1\text{out}} = [r_{i,1}^{(\text{out})}]_{i=1}^{M_{\text{out}}}$, залишаються справедливими й для параметрів МУ на виході НФП.

При наявності завад (суми шуму приймача й відбиттів від МП) оцінки (3) характеризують не параметри МУ, а параметри їхньої суміші з завадою. Легко показати, що КК $\hat{\rho}_{\text{см}}$ цієї суміші на вході НФП пов'язаний із КК $\rho_{\text{МУ}}$ МУ рівністю

$$\hat{\rho}_{\text{см}} = \frac{\sigma_{\text{МУ}}^2 \cdot \rho_{\text{МУ}} + \sigma_{\text{П}}^2 \cdot \hat{\rho}_{\text{МП}}}{\sigma_{\text{П}}^2 + \sigma_{\text{МУ}}^2}, \quad (4)$$

де $\sigma_{\text{МУ}}^2$ й $\sigma_{\text{П}}^2 = 1 + \sigma_{\text{МП}}^2$ – відносні (стосовно потужності шуму приймача) інтенсивності МУ й завади, $\hat{\rho}_{\text{МП}}$ – КК відбиттів від МП.

Аналогічна формула справедлива й для параметрів процесів на виході НФП, які нижче забезпечуються додатковим індексом "1".

Д. Відбиття від МУ апроксимуються АР – процесами порядку $p_{\text{МУ}} = 5$ з відносною інтенсивністю

$\sigma_{\text{МУ}}^2 = \eta_{\text{МУ}} = 50$ дБ. У розробленій моделі враховується рух МУ з радіальними швидкостями, що змінюються із кроком 0,25 м/с у межах інтервалу однозначності $[-V_{r0}/2, V_{r0}/2]$, і розкидом швидкостей $w_{\text{МУ}} = 2,5$ м/с і $w_{\text{МУ}} = 18$ м/с, що відповідають "незначній" і "сильній" турбулентності [13].

Відбиття від МП із нульовою середньою радіальною швидкістю апроксимуються АР – процесом порядку $p_{\text{МП}} = 10$ з відносною інтенсивністю $\sigma_{\text{МП}}^2 = \eta_{\text{МП}} = 60$ дБ і шириною спектра швидкостей $w_{\text{МП}} = 1,5$ м/с.

Як показали дослідження, результати яких приводяться в наступному пункті роботи, помилки вимірів параметрів ВМУ по вихідному сигналу фільтра Ф2 лежать між відповідними помилками фільтрів Ф1 і Ф3. У зв'язку із цим для економії місця результати по фільтру Ф2 тут не показуються.

2. Результати моделювання і їхній аналіз

А. Розглянемо спочатку вплив завади на точність оцінки параметрів МУ на вході НФП. На рис. 1, а показані сімейства залежностей модуля $\rho = |\hat{\rho}_{\text{см}}(V_r)|$ й фази $\phi(V_r)$ КК суміші завади й МУ на його вході. Параметром сімейств служить інтенсивність МУ $\eta_{\text{МУ}} = \sigma_{\text{МУ}}^2$. Видно, що, як і слідує з (4), при відносно малій інтенсивності $\eta_{\text{МУ}} = 20$ дБ МУ

значення $|\dot{\rho}_{\text{CM}}(V_T)|$ (крива 3) практично збігається зі значенням $|\dot{\rho}_{\text{МП}}(V_T)|$ (крива 1), що несе помилкову інформацію про ширину спектра швидкостей МУ.

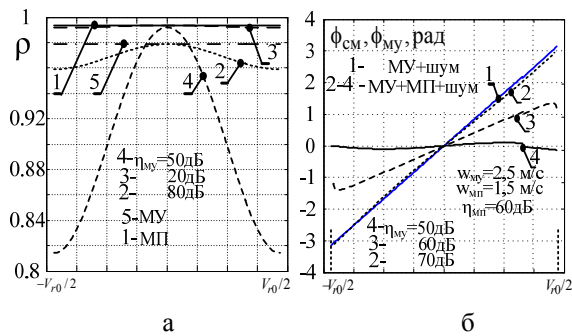


Рис. 1. Модулі й фази КК $\dot{\rho}_{\text{CM}}$ при різних значеннях $\sigma_{\text{МУ}}^2$ ($F_{\text{П}} = 0,75$ кГц, $\lambda = 0,1$ м)

Ці ж закономірності властиві й фазі суміші (рис. 1, б), що несе інформацію про середню швидкість МУ. До необхідних значень $|\dot{\rho}_{\text{МУ}}(V_T)|$ і $\varphi(V_T)$ наближення забезпечується тільки при $\sigma_{\text{МУ}}^2 \gg \sigma_{\text{П}}^2$ (тут – при $\sigma_{\text{МУ}}^2 = 80$ дБ). Звідси слідує, що при малих кутах місця, для яких часто $\sigma_{\text{МУ}}^2 \leq \sigma_{\text{П}}^2$, помилки виміру параметрів МУ можуть стати неприпустимо великими, у зв'язку із чим потрібні спеціальні заходи щодо ослаблення впливу завад.

Б. Перейдемо тепер до оцінки впливу завад при використанні НФП. На рис. 2, а1–б1 і а2–б2 наведені помилки $\delta\eta$ (1,а) оцінювання інтенсивності МУ по вихідним сигналам НФП при незначній ($w_{\text{МУ}} = 2,5$ м/с) і сильній турбулентності ($w_{\text{МУ}} = 18$ м/с). Затемненою смугою показані вимоги до точності її виміру. Параметром кривих служить порядок НФП, позначений на рис. а1 (2) буквою n , а на б1 (2) буквою $zz = n + 1$.

Видно, що в обох випадках можливі неприпустимо великі помилки оцінювання інтенсивності $\delta\eta$ МУ, що рухаються з малими радіальними швидкостями. Вони особливо великі в ЧПВ – фільтри з найбільш широкою зоною режекції і мінімальною крутістю. Ці помилки обумовлені придушенням у НФП відбиттів не тільки від МП, але й від МУ. Вони занижують оцінку реальної інтенсивності МУ й тому вкрай небажані (рис. 2, а1–б1).

Невиправдане розширення смуги $w_{\text{пф}}$ придушення (режекції) НФП змінює потужність ВМУ ($\sigma_{\text{МУ}}^2$) на виході НФП, тим самим збільшує помил-

ку $\delta\eta$. На відміну від ЧПВ, де $w_{\text{пф}}$ росте пропорційно порядку n фільтра, у Ф2 і Ф3-фільтрах $w_{\text{пф}}$ з ростом n значення $w_{\text{пф}}$ може не збільшуватися й навіть зменшуватися.

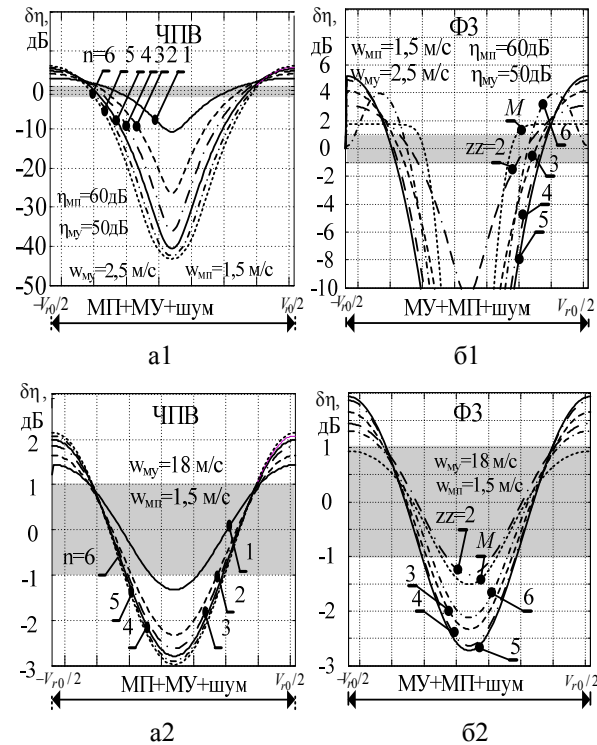


Рис. 2. Помилки оцінювання інтенсивності МУ ($F_{\text{П}} = 0,75$ кГц, $\lambda = 0,1$ м)

При широкому спектрі швидкостей МУ (сильній турбулентності), коли $w_{\text{пф}}$ помітно менше $w_{\text{МУ}}$, НФП придушує тільки незначну частину спектра МУ, так що помилка оцінювання інтенсивності МУ зменшується (рис. 2, а2–б2). У міру росту радіальної швидкості МУ ці помилки зменшуються тим сильніше, чим вужче спектр $w_{\text{МУ}}$ МУ, менша смуга $w_{\text{пф}}$ й крутість зони режекції НФП. Поза зоною режекції НФП можливі припустимі або навіть завишені ("сприятливі") оцінки інтенсивності МУ.

В. Зазначимо, що в якості оцінки потужності МУ ($\sigma_{\text{МУ}}^2$) виступає сума потужності завади на виході НФП (потужність ($\sigma_{\text{П}}^2$) залишків завади) і власне відбиттів від МУ ($\sigma_{\text{МУ}}^2$) на виході НФП. Залишки $\sigma_{\text{П}}^2$ збільшують помилку $\delta\eta$ (1,а) і є наслідком недостатнього придушення завади в НФП.

Необхідну ефективність придушення можна одержати відповідним узгодженням параметрів (крутості, ширини й глибини) енергетичної частотної характеристики (ЕЧХ) НФП із характеристиками спектра відбиттів від МП. Параметри НФП можуть

задаватися априорі, оскільки діапазон зміни КМ інтенсивних МП, відносно вузькі спектри яких зосереджені в околиці нульової доплерівської частоти, зазвичай порівняно невеликий. Разом з тим погодити параметри НФП із ВМУ не можливо через динамічну мінливість їхніх характеристик.

Крутість (порядок n), глибина (K_{Π}) і ширина ($w_{\text{нф}}$) фільтра встановлюються на етапі підготовки ДМРЛ до вимірів ВМУ. У такий спосіб зменшити помилку $\delta\eta$ (1,а) дозволяє ефективна методика вибору параметрів НФП відповідно до характеристик спектра відбиттів від МП.

Г. На рис. 3 наведені залежності від середньої швидкості МУ помилок δw оцінювання ширини спектра швидкостей (ШСШ) МУ при "незначній" (а1 – б1) і "сильній" (а2 – б2) турбулентності.

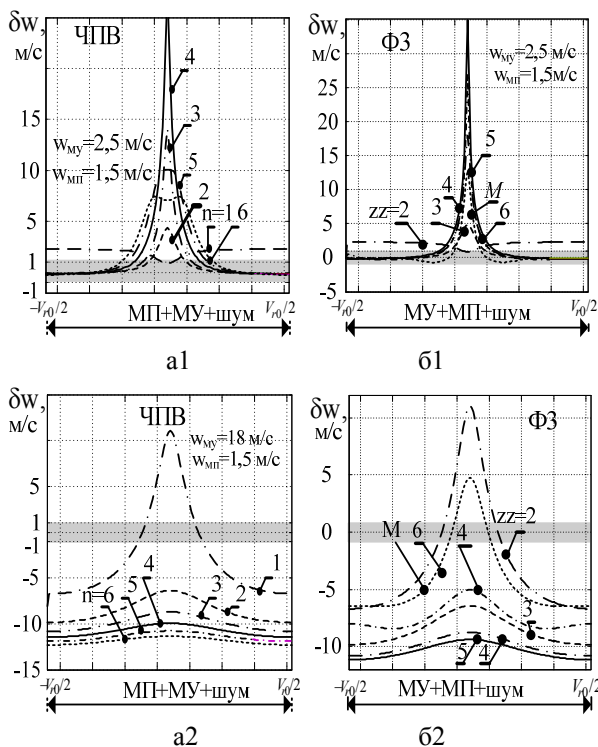


Рис. 3. Помилки оцінювання ШСШ МУ ($F_{\Pi} = 0,75$ кГц, $\lambda = 0,1$ м)

Як і на рис. 2, затемненою смугою тут показані вимоги до точності виміру ШСШ.

З їхнього порівняння слідує, що в першому випадку (рис. 3, а1–б1) помилки виміру ширини спектра МУ в зоні режекції НФП істотно більші допустимих. Останнє пов'язане із придушенням НФП суміші завади й МУ приблизно до рівня шуму приймача, що зменшує КК їхніх залишків, яке еквівалентне розширенню спектра залишків на виході НФП. За рахунок цього можлива необгрунтована "переоцінка" ступеня небезпеки МУ. У міру "виходу" МУ із цієї зони НФП перестають режектувати ВМУ, а помилки входять у припустимі межі.

У другому випадку (рис. 3, а2–б2) при $w_{\text{нф}} < w_{\text{му}}$ НФП не компенсують суміш завади й ВМУ до рівня шуму як у зоні режекції, так і поза нею. Їхня дія при $n > 1$ зводиться тільки до звуження "ефективної" [14–15] ширини $\omega_{\text{еф}}^{(\text{вих})}$ спектра залишків і малий її зміни в міру збільшення радіальної швидкості руху МУ. За рахунок цього можлива небажана "недооцінка" ступеня небезпеки МУ.

Використання $\omega_{\text{еф}}^{(\text{вих})}$ в якості оцінки справжньої ширини спектра МУ зменшує справжній рівень турбулентності відбивачів, що в цілому знижує ступінь небезпеки МУ. У цьому зв'язку перед виміром $\omega_{\text{еф}}^{(\text{вих})}$ необхідна операція відновлення спектра МУ на виході НФП.

Знизити помилку δw можна, якщо забезпечити високі вихідні значення $|\dot{\rho}_{\text{му}}|$, оскільки вузькі спектри ВМУ НФП спотворюються в меншій мірі. Для цього досить збільшити частоту повторення (F_{Π}) зондувальних імпульсів, не змінюючи довжину хвилі РЛС. Однак такий підхід скоротить діапазон однозначного виміру дальності МУ, що не завжди прийнятно.

Д. На рис. 4 наведені залежності від середньої швидкості МУ помилок $\delta V = \delta V_r$ (1,б) оцінювання середньої швидкості МУ при "незначній" (а1–б1) і "сильній" (а2 – б2) турбулентності.

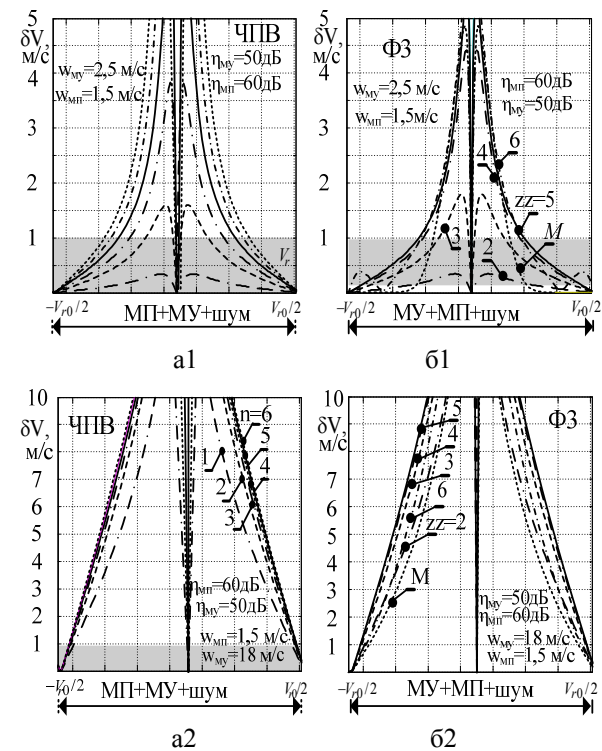


Рис. 4. Помилки оцінювання середньої швидкості МУ ($F_{\Pi} = 0,75$ кГц, $\lambda = 0,1$ м)

Як і раніше, затемненою смугою тут показані вимоги до точності її виміру. Видно, що в обох випадках безпомилково вимірюється нульова радіальна швидкість руху МУ. Відмінна від нуля швидкість МУ вимірюється з помилками, обумовленими перекручуванням форми спектра МУ НФП. Вплив цих перекручувань по мірі росту модуля швидкості МУ зменшується тим сильніше, чим вужче спектр $w_{МУ}$ швидкостей МУ. За рахунок цього зона допустимих помилок у випадку "незначної" турбулентності (рис. 4, а1–б1) істотно ширша, ніж при "сильній" (рис. 4, а2–б2).

Пояснимо помилки оцінювання середньої швидкості МУ рис. 4. Видно, що в точці $V_r = 0$ помилка $\delta V = 0$, а при переході від негативних швидкостей до позитивних швидкостей знак помилки змінюється. Дійсно, при $V_r = 0$ спектр на виході фільтра придушення

$$S_{\text{вих}}(f) = S_{МУ}(f) \cdot |\dot{K}(f)|^2 \quad (5)$$

симетричний щодо лінії $V_r = 0$, оскільки симетричний щодо лінії $V_r = 0$ спектр ВМУ і ЕЧХ НФП. Тоді добуток

$$\sigma_{МУ}^2 \cdot \dot{\rho}_{МУ} = \int_{-0,5}^{0,5} S_{МУ}(f) \cdot |\dot{K}(f)|^2 \exp(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f) df, \quad (6)$$

який описує коефіцієнт коваріації відліків відбиттів МУ на виході НФП, буде дійсним числом. У зв'язку із цим дорівнює нулю фаза

$$\varphi_{МУ} = \arctg \left(\frac{\text{Im}(\sigma_{МУ}^2 \dot{\rho}_{МУ})}{\text{Re}(\sigma_{МУ}^2 \dot{\rho}_{МУ})} \right) - \quad (7)$$

КК суміжних відліків ВМУ на виході фільтра придушення. Тобто дорівнює нулю фаза

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \arctg \left(\frac{\sigma_{МУ}^2 \dot{\rho}_{МУ}}{\sigma_{МУ}^2 \dot{\rho}_{МУ} + \sigma_{П}^2 |\dot{\rho}_{П}|} \right) = \\ &= \arctg \left(\frac{\sigma_{МУ}^2 |\dot{\rho}_{МУ}| \sin(\varphi_{МУ})}{\sigma_{МУ}^2 |\dot{\rho}_{МУ}| \cos(\varphi_{МУ}) + \sigma_{П}^2 |\dot{\rho}_{П}|} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

комплексного КК $\dot{\rho}_{СМ}^{(\text{вих})}$ процесу на виході фільтра придушення.

Тут $\sigma_{П}^2 = \sigma_{Ш}^2 + \sigma_{МП}^2$ і $\sigma_{МУ}^2$ – потужність завади (суміші внутрішнього шуму й відбиттів від МП) і МУ на виході фільтра придушення.

Знак помилки змінюється в силу властивості функції $\sin(-a) = -\sin(a)$.

При порядках n фільтрів, для яких $|\dot{K}(f)|^2 = 1/S_{П}(f)$ (обіляючі фільтри), що фігурує в знаменнику (8) добуток $\sigma_{П}^2 \cdot |\dot{\rho}_{П}| = 0$ через повну декореляцію завади. Фаза суміші φ_1 (8) дорівнює фазі $\varphi_{МУ}$ (7) відліків відбиттів від МУ на виході фільтра придушення. Однак $\varphi_{МУ} \neq \varphi_{МУ}$, оскільки в силу фільтруючих властивостей фільтра, спектр $S_{\text{вих}}(f)$ відрізняється від спектра $S_{МУ}(f)$ й добуток $\sigma_{МУ}^2 \dot{\rho}_{МУ}$ (6), що визначає $\varphi_{МУ}$ (7), відрізняється від $\sigma_{МУ}^2 \dot{\rho}_{МУ}$. При "вужькому" спектрі МУ ці відмінності швидко зменшуються із збільшенням швидкісних відмінностей між МУ й МП і будуть сповільнюватися зі збільшенням коефіцієнта придушення завади. Цим пояснюється збільшення помилки із збільшенням порядку фільтра, що чітко простежується на рис. 4, а1–б1.

При оцінюванні швидкості МУ по широким спектрам ($w_{МУ} = 18 \text{ м/с}$) МУ, що відповідає небезпечній турбулентності, спостерігається значне збільшення значень помилки δV (рис. 4, а2–б2). Воно обумовлене тим, що спектр МУ через велику ширину постійно перебуває в зоні придушення фільтра. Тим самим спектр $S_{\text{вих}}(f)$ спотворюється щодо спектра $S_{МУ}(f)$, а швидкісні відмінності МУ і МП не компенсують ці перекручування (рис. 4, а2–б2).

Графіки (рис. 4) характеризують модуль помилки виміру швидкості МУ. Напрямок руху МУ визначається знаком помилки $\delta V = \hat{V}_r - V_r$, що збігається зі знаком відношення $\text{im}(\dot{\rho}) / \text{re}(\dot{\rho})$ мнимої $\text{im}(\dot{\rho})$ до реальної $\text{re}(\dot{\rho})$ частини КК $\dot{\rho}$ відбиттів.

На рис. 5 для НФП Ф3 М-го порядку показані залежності дробу $\text{im}(\dot{\rho}) / \text{re}(\dot{\rho})$ від швидкості V_r МУ з "незначною" (рис. 5, а) і "сильною" (рис. 5, б) турбулентністю.

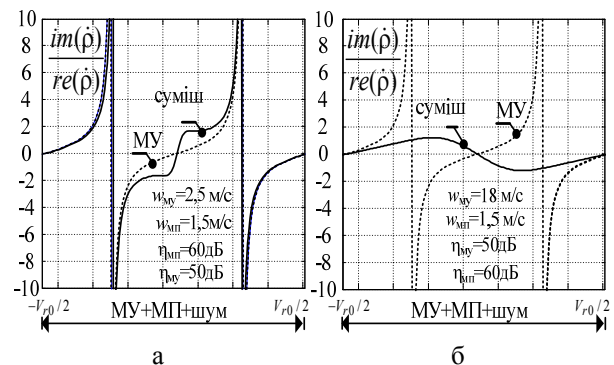


Рис. 5. Відношення мнимої до реальної частини КК відбиттів від МУ і їх суміші з відбиттями від МП на виході Ф3

Видно, що у випадку "незначної" турбулентності (рис. 5, а) знак цього відношення для ВМУ на вході і його суміші з завадою на виході фільтра збігаються, тоді як при "сильній" вони можуть відрізнятися (рис. 5, б). Останній ефект небажаний, оскільки вносить невизначеність в оцінку напрямку руху МУ. Він вимагає спеціальних заходів для його усунення, які тут не обговорюються.

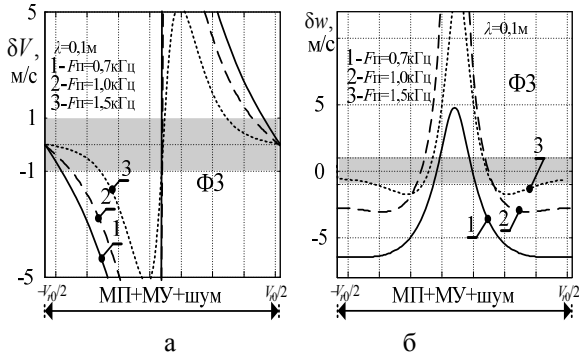


Рис. 6. Точності вимірів параметрів МУ ФЗ-фільтром при різних F_n

Е. Аналіз графіків рис. 2–4 показує, що помилки вимірів характеристик МУ менші при незначній турбулентності (високій ($\rho_{\text{МУ}} = 0,937$) кореляції) відбиттів від МУ на вході фільтрів придушення, ніж

при сильній турбулентності (низькій ($\rho_{\text{МУ}} = 0,37$) кореляції). Тому очевидний спосіб підвищити кореляцію відліків і, відповідно, знизити помилки, полягає в збільшенні частоти повторення зондувальних імпульсів. Результати його застосування показані на рис. 6. Видно, що підвищення частоти повторення імпульсів супроводжується істотним зменшенням помилок вимірів. Однак таке зниження помилок отримано за рахунок скорочення діапазону однозначного виміру дальності МУ, що не завжди неприйнятно. Переваги НРФ можуть нівелюватися при "невдалому" виборі параметрів фільтра. Нижче обговорюються деякі з них.

Про вибір параметрів неадаптивного фільтра придушення

Найбільш очевидним правилом вибору параметрів НРФ може служити критерій мінімуму потужності завади на виході фільтра придушення. Нехай для виміру параметрів ВМУ на тлі відбиттів від МП з відносною потужністю $\eta_{\text{МП}} = 60\text{дБ}$, шириною спектра $w_{\text{МП}} = 1.5\text{м/с}$ (0.04 відн. один.) і формою спектра $r_{\text{МП}} = 10$ реалізовано набір Ф2 – фільтрів з різними параметрами з першого (Ф2–1) по шостий (Ф2–6). порядком (структурою).

Таблиця 1

Потужність $\sigma_{\text{вих}}^2$ завади на виході фільтрів придушення
(Параметри завади: $w_{\text{МП}} = 1.5\text{м/с}$ (0.04 відн. один.), $\eta_{\text{МП}} = 60\text{дБ}$)

| Параметри фільтру | | | $\sigma_{\text{вих}}^2$ фільтру, $\times 10^4$ | | | | | |
|---------------------------------|-----------------------|---------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| $w_{\text{пф}}$, відн.один. | $w_{\text{пф}}$, м/с | $K_{\text{п}}$, дБ | Ф2-1 | Ф2-2 | Ф2-3 | Ф2-4 | Ф2-5 | Ф2-6 |
| 0.05 | 1.8750 | 90 | 8.1314 | 9.9006 | 1.5450 | 0.7422 | 3.6446 | 4.3406 |
| 0.04 | 1.5 | 60 | 0.3423 | 6.3111 | 9.2532 | 6.5465 | 2.5527 | 0.5801 |
| 0.05 | 1.8750 | 60 | 0.8418 | 7.9537 | 8.6310 | 4.2273 | 0.8629 | 0.5747 |
| 0.04 | 1.5 | 90 | 0.4669 | 1.0993 | 0.5043 | 0.0434 | 0.1321 | 0.3825 |
| 0.02 | 0.75 | 90 | 0.4261 | 7.0360 | 9.7089 | 6.5434 | 2.3921 | 0.5603 |
| 0.02 | 0.75 | 60 | 4.0128 | 1.2008 | 5.2265 | 8.2826 | 8.6301 | 6.8836 |

Значення потужності $\sigma_{\text{вих}}^2$ відбиттів від МП на виході фільтрів наведені в табл. 2. Видно, що мінімальна потужність завади забезпечується різним набором параметрів Ф2 – фільтрів. Однак, як показала перевірка, помилки вимірів параметрів ВМУ, що одержуються по вихідним сигналам цих фільтрів, істотно відрізняються. По сукупності вимірів доцільно використати фільтр Ф2–6 з параметрами $w_{\text{пф}} = 1.5\text{м/с}$, $K_{\text{п}} = 60\text{дБ}$, максимально наближеними до характеристик спектра завади (ширині, формі, потужності). Ця обставина вимагає включення в процедуру вибору НРФ спектрального аналізу зава-

дових коливань. Перспективні способи запропоновані й випробувані, зокрема, в [16–17].

Таким чином, поряд із простою технічною реалізації неадаптивні смугові фільтри придушення вони мають істотний недолік – їхня ефективність залежить від параметрів фільтра, вибір яких є непростим завданням і вимагає спеціальних досліджень, що виходять за рамки завдань даної статті.

Висновки

Досліджено вплив відбиттів від місцевих предметів (МП) на помилки вимірів параметрів метеоутворень (МУ) імпульсними ДМРЛ із неадаптивними фільтрами придушення (НФП) завод різної структу-

ри. Розглянуто фільтри черезперіодного віднімання (ЧПВ), вінеровські фільтри для процесів із заданими спектрами (Ф2) і спектрами, що збігаються зі спектрами МП (Ф3). При цьому вважалось, що обсяг вибірки суміші внутрішнього шуму, відбиттів від МУ й МП необмежений. Основні результати досліджень зводяться до наступного.

1. У типовій ситуації обробки слабких відбиттів від МУ на тлі потужних відбиттів від МП помилки вимірів характеристик МУ перевищують припустимі. Застосування НФП може підвищити точність виміру параметрів МУ на тлі потужних завад від нерухомих МП. Ефект від їхнього використання залежить від середньої радіальної швидкості МУ, ширини спектра швидкостей (турбулентності) МУ й виду НФП.

2. Інтенсивність МУ на виході фільтра придушення визначається по сумі потужностей залишків відбиттів від МУ ($\sigma_{1\text{МУ}}^2$) і МП ($\sigma_{1\text{П}}^2$). Потужність $\sigma_{1\text{П}}^2$ зменшується й тим самим зменшується помилка виміру інтенсивності $\delta\eta$ МУ з ростом порядку (кратності) фільтра в силу збільшення його коефіцієнта придушення.

Для МУ з "незначною" турбулентністю (вузьким спектром) істотні помилки виміру можливі при малих швидкостях руху МУ, коли їхній спектр знаходиться в зоні режекції НФП, настроєного на придушення відбиттів від нерухомих МП. З ростом радіальної швидкості МУ вплив цього ефекту знижується тим сильніше, чим вище крутість зони режекції. При однаковому порядку фільтра вона мінімальна у фільтрі ЧПВ, що пояснює його меншу ефективність у порівнянні з фільтрами Ф2 і Ф3. При "сильній" турбулентності помилки виміру інтенсивності МУ в зоні режекції НФП істотно менше, оскільки при цьому придушується тільки незначна частина їхнього спектра. Однак точність виміру швидкості МУ й ширини спектра швидкостей у цьому випадку помітно менше. У зоні режекції НФП занижує потужність МУ, що вкрай небажано, оскільки при цьому занижується їхня безпека. Для зменшення цього ефекту повинні використатися фільтри з максимальною крутістю зони режекції. У таких фільтрах збільшується зона допустимих або навіть завищених оцінок потужності МУ, які що завищують рівень безпеки МУ.

3. Ширина спектра швидкостей МУ виміряються по ширині $\omega_{\text{ост}}$ спектра залишків на виході фільтра придушення. У силу фільтруючих властивостей

фільтра значення $\omega_{\text{ост}}$ менше справжньої ширини $\omega_{\text{МУ}}$ спектра МУ. Для вузьких спектрів МУ (високого модуля $|\dot{\rho}_{\text{МУ}}|$ коефіцієнта кореляції МУ) звуження спектра залишків не приводить до значного збільшення КК. При цьому помилки δw виміру $\omega_{\text{МУ}}$ мінімальні. Вони різні для різних порядків фільтрів через неоднакові різниці між шириною $w_{\text{МУ}}$ спектра МУ й смугами $w_{\text{под}}$ придушення фільтрів.

НФП у зоні режекції можуть породжувати великі помилки виміру ширини спектра МУ з "слабкою" турбулентністю. У цьому випадку можлива необґрунтована "переоцінка" ступеня небезпеки МУ. У міру "виходу" МУ із цієї зони помилки входять у допустимі межі.

При широких спектрах МУ (низьких $|\dot{\rho}_{\text{МУ}}|$), характерних для небезпечних рівнів турбулентності, звуження спектра залишків ВМУ на виході НФП приводить до великих помилок δw у зв'язку із чим можлива небажана "недооцінка" ступеня небезпеки МУ. Тому перед виміром $\omega_{\text{ост}}$ необхідно відновити спектр МУ, або забезпечити високі вихідні значення $|\dot{\rho}_{\text{МУ}}|$. Для цього досить збільшити частоту повторення ($F_{\text{П}}$) зондувальних імпульсів, зберігши незмінними значення ширини МУ $w_{\text{МУ}}$ й довжину хвилі РЛС. Однак таке зниження помилок скоротить діапазон однозначного виміру дальності МУ, що не завжди прийнятно.

4. Неможливо вказати тип і порядок фільтра, що задовольняє вимогам до точності оцінок всіх характеристик МУ. У рамках одного типу фільтра мінімальні помилки оцінювання конкретної характеристики МУ можуть забезпечуватися різними порядками фільтра.

5. Застосування фільтрів з апіорі підібраними параметрами виправдано при відсутності класифікованих вибірок завади. Через складності у виборі параметрів НФП системи МПО повинні комплектуватися наборами фільтрів з різними параметрами й можливістю оперативного включення кожного з них у систему МПО.

Проведений аналіз показує, що використання НФП у цілому зменшує вплив МП на точність оцінювання параметрів МУ, але не вичерпує цю проблему. Потрібні подальші дослідження, спрямовані на ослаблення виявлених недоліків.

Список літератури

1. Радиолокационные метеорологические наблюдения: в 2 т. / Т.А. Базлова [и др.]; под ред. А.С. Солонина; Ин-т радар. метеорологии. – СПб.: Наука, С.-Петербург. изд. фирма, 2010. – Т.1: Научно-методические основы. – 312 с.
2. Автоматизированные метеорологические радиолокационные комплексы "Метеоячейка" / [Н.В. Бочарников, Г.Б. Брылев, Л.И. Кузнецова и др.]; отв. ред. Н.В. Бочарников, А.С. Солонин. – СПб.: Гидрометеоздат, 2007. – 238 с.

3. Bech J. Doppler Radar Observations – Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar and Other Advanced Applications / J. Bech and J.L. Chau. – Edited by Published by InTech, 2012. – 470 p.
4. Пиза Д.М. Усовершенствование метеоканала аэродромного радиолокационного комплекса «Днепр-А» / Д.М. Пиза, Н.П. Чернобородова, М.П. Чернобородов // Радиоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2007. – С. 16-19.
5. Доплеровский метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С. Руководство по эксплуатации, в 6-ти кн. – М.: ЛЭМЗ, 2011.
6. Efremov V. The new generation of Russian C-band meteorological radars. Technical features, operation modes and algorithms / V. Efremov, I. Vylegzhanin, B. Vovshin // Int. Radar Symp. IRS2011, 7–9 Sept. 2011, Leipzig, Germany. – Leipzig, 2011. – P. 239-244.
7. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. – М., ЦАО, 2014. – 110 с.
8. Rachkov D.S. Lattice-filter-based ground clutter canceller for pulse Doppler weather radar / D.S. Rachkov, D.I. Lekhovytskiy, A.V. Semeniaka, V.P. Riabukha, D.V. Atamanskiy // 15th Int. Radar Symp. IRS 2014, 16–18 June 2014, Gdansk, Poland. – Gdansk, 2014. – P. 215-219. DOI: 10.1109/IRS.2014.6869251.
9. Довиак Р.Дж. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения: пер. с англ. под ред. А.А. Черникова / Р.Дж. Довиак, Д.С. Зрнич. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1988. – 512 с.
10. Rachkov D.S. Lattice-filter-based unified structure of system for interperiod processing of weather radar signals / D.S. Rachkov, D.I. Lekhovytskiy // IEEE Int. Radar Conf., 10–15 May 2015, Arlington, USA. – Arlington, 2015. – P. 1234-1239. DOI: 10.1109/RADAR.2015.7131183.
11. Lekhovytskiy D.I. To the theory of adaptive signal processing in systems with centrally symmetric receive channels / D.I. Lekhovytskiy // EURASIP Journ. Adv. Sig. Proc. – 2016. – Vol. 33. – P. 1-11. DOI: 10.1186/s13634-016-0329-z.
12. Леховицкий Д.И. Моделирование пассивных помех импульсным РЛС на основе процессов авторегрессии произвольного порядка / Д.И. Леховицкий, И.Г. Кириллов // Системи обробки інформації. – 2008. – № 3 (70). – С. 90-101.
13. Яновський Ф.Й. Метеонавігаційні радіолокаційні системи повітряних суден / Ф.Й. Яновський. – К.: НАУ, 2003. – 304 с.
14. Сизых В.В. Случайные процессы. Примеры и задачи. Т.1. Случайные величины и процессы. Учебное пособие для вузов. 2-е изд., стереотип. / В.В. Сизых, В.И. Тихонов, Б.И. Шахтарин. – Телеком, 2014.
15. Медиченко М.П. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебное пособие / М.П. Медиченко, В.П. Литвинов. – М.: Изд-во МГОУ, 2011.
16. Dias J.M.B. Nonparametric estimation of mean Doppler and spectral width / J.M.B. Dias, J.M.N. Leitão // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. – Jan. 2000. – Vol. 38, № 1. – P. 271-282.
17. Lekhovytskiy D.I. Estimation of the Energy Spectra of Reflections in Pulse Doppler Weather Radars. Part 1. Varieties of the Spectral Estimation Algorithms / D.I. Lekhovytskiy, D.V. Atamanskiy, D.S. Rachkov, A.V. Semeniaka // Radioelectronics and Communications Systems. – 2015. – Vol. 58, No.12. – P. 523-551.

References

1. Bazlova, T.A. (2010), “Radiolokacionnye meteorologichskie nabludeniya: u 2 t” [Radiolocation meteorological observations], Science, St.-Peterburg, 312 p.
2. Bocharnikov, N.V., Brylev, G.B. and Kuznetsova, L.I. (2007), “Avtomatizirovannyye meteorologichskie radiolokatsionnye komplekсы “Meteoyacheyka”” [Automated meteorological radiolocation complexes “Meteoyacheyka”], Gidrometeoizdat, St.-Peterburg, 238 p.
3. Bech, J. and Chau, J.L. (2012), *Doppler Radar Observations – Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar, and Other Advanced Applications*, 470 p.
4. Pisa, D.M., Chernoborodova, N.P. and Chernoborodov, M.P. (2007), “Usovershenstvovaniye meteokanala aerodromnogo radiolokatsionnogo kompleksa “Dnepr-A”” [Improvement of the weather channel of an aerodrome radiolocation complex “Dnieper-A”], *Radio electronics. Computer science. Management*, No. 2, pp. 16-19.
5. (2011), “Doplerovskiy meteorologicheskii radiolokator DMRL-S. Rukovodstvo po expluatacii, v 6-ti kn.” [Doppler meteorological radiolocator DMRL-S. Manual in 6 books], LEMZ, Moscow, 800 p.
6. Efremov, V., Vylegzhanin, I. and Vovshin, B. (2011), The new generation of Russian C-band meteorological radars. Technical features, operation modes and algorithms, *Int. Radar Symp. IRS2011, 7–9 Sept. 2011*, Leipzig, Germany, pp. 239-244.
7. (2014), “Vremennyye metodicheskyye ukazaniya po ispolzovaniyu informatsii doplerovskogo meteorologicheskogo radiolokatora DMRL-S v sinopticheskoy praktike” [Temporary guidelines on the use of information from Doppler meteorological Radiolocator DMRL-S in synoptic practice], CAO, Moscow, 110 p.
8. Rachkov, D.S., Lekhovytskiy, D.I., Semeniaka, A.V., Riabukha, V.P. and Atamanskiy, D.V. (2014), Lattice-filter-based ground clutter canceller for pulse Doppler weather radar, *15th Int. Radar Symp. IRS 2014, 16–18 June 2014*, Gdansk, Poland, pp. 215-219. <https://doi.org/10.1109/IRS.2014.6869251>.
9. Doviak, R.J. and Zrnic, D.S. (1988), “Doplerovskie radiolokatory i meteorologichskie nabludeniya” [Doppler Radar and Weather Observations], Gidrometeoizdat, Leningrad, 512 p.
10. Rachkov, D.S. and Lekhovytskiy, D.I. (2015), Lattice-filter-based unified structure of system for interperiod processing of weather radar signals, *IEEE Int. Radar Conf., 10–15 May 2015*, Arlington, USA, pp. 1234-1239. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2015.7131183>.
11. Lekhovytskiy, D.I. (2016), To the theory of adaptive signal processing in systems with centrally symmetric receive channels, *EURASIP Journ. Adv. Sig. Proc.*, Vol. 33, pp. 1-11. <https://doi.org/10.1186/s13634-016-0329-z>.
12. Lekhovytskiy, D.I. and Kirillov, I.G. (2008), “Modelirovaniye passivnykh pomekh impulsnym RLS na osnove avtoregres-sii proizvol'nogo poryadka” [Simulation of passive interference of impulse RLS based on autoregressive processes of arbitrary order], *Information processing systems*, No. 3(70), pp. 90-101.
13. Yanovsky, F.J. (2013), “Meteonavigatsiyni radiolokaciyni systemy povitryanyh suden” [Meteorological radar systems for aircraft], NAU, Kiev, 304 p.

14. Sizykh, V.V., Tihonov, V.I. and Shahtarin, B.I. (2014), "Sluchaynye processy. Primery i zadachi. T.1. Sluchyue velichiny i processy. Uchbnoe posobie dlya vuzov" [Random processes examples and tasks. Vol. 1. Random variables and processes: Textbook for higher educational institutions], Telecom, 304 p.
15. Medichenko, M.P. and Lytvynov, V.P. (2011), "Radiotekhnicheskie tsepi i signaly" [Radio engineering circuits and signals], MGU, Moscow, 250 p.
16. Dias, J.M.B. and Leitão, J.M.N. (2000), Nonparametric estimation of mean Doppler and spectral width, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*. Vol. 38, No. 1, pp. 271-282.
17. Lekhovyt'skiy, D.I., Atamanskiy, D.V., Rachkov, D.S. and Semeniaka, A.V. (2015), Estimation of the Energy Spectra of Reflections in Pulse Doppler Weather Radars. Part 1. Varieties of the Spectral Estimation Algorithms, *Radioelektronics and Communications Systems*, Vol. 58, No. 12, pp. 523-551.

Надійшла до редколегії 12.02.2018

Схвалена до друку 20.03.2018

Відомості про автора:

Атаманський Дмитро Володимирович
кандидат технічних наук доцент
доцент Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8705-8584>
e-mail: ataman-19651@ukr.net

Information about the author:

Dmytro Atamanskiy
Candidate of Technical Sciences Associate Professor
Associate Professor of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8705-8584>
e-mail: ataman-19651@ukr.net

**ВЛИЯНИЕ ОТРАЖЕНИЙ ОТ МЕСТНЫХ ПРЕДМЕТОВ НА ТОЧНОСТЬ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ
МЕТЕООБРАЗОВАНИЙ В ИМПУЛЬСНЫХ ДМРЛ**

Д.В. Атаманский

Рассматривается точность определения параметров метеорообразований (МО) системами межпериодной обработки (МПО) сигналов импульсных ДМРЛ в условиях мешающего влияния отражений от местных предметов (МП). Описываются методика и результаты аналитического и экспериментального сравнения точности оценивания параметров МО при подавлении отражений от МП неадаптивными фильтрами различной структуры. Показано, что эффект от их использования зависит от средней радиальной скорости МО, ширины спектра скоростей (турбулентности) МО, параметров и структуры неадаптивных фильтров подавления (НФП). Установлено, что ошибки измерений параметров МО снижаются пропорционально увеличению крутизны и глубины зоны режекции НФП, если спектры МО находятся вне этой зоны. Ошибки существенно увеличиваются, если эти спектры расположены в зоне режекции фильтров. Приведены рекомендации по выбору НФП и их использованию в системах МПО существующих и перспективных импульсных ДМРЛ. Показано, что из-за сложностей в выборе параметров НФП системы МПО должны комплектоваться наборами фильтров с разными параметрами и возможностью оперативного включения каждого из них в систему МПО.

Ключевые слова: метеорообразования, местные предметы, неадаптивный фильтр подавления, коэффициент корреляции, импульсный доплеровский метеорадиолокатор.

**INFLUENCE OF THE REFLECTION FROM THE LOCAL OBJECTS ON THE ACCURACY OF THE METEORING
PARAMETER ESTIMATION IN THE IMPULSE DOPPLER WEATHER RADAR**

D. Atamanskiy

The accuracy of the meteorology (M) parameter determination by the systems of the interperiod processing (SIP) of the signal of the impulse Doppler weather radar is considered in conditions of the interrupting influence of the reflections from the local objects (LO). The techniques and results of the analytical and experimental comparison of the accuracy of meteorology parameter evaluation are described when the reflections from the local objects are suppressed by the surge suppression rfi filters of the different structure. It has been shown that the effect of its use depended on the median radial speed of the local objects (LO), spectral bandwidth (turbulence) of the local objects, parameters and structure of the surge suppression rfi filters (SSF). It has been found that the meteorology error of the parameters of the local objects (LO) had been reduced proportionally to the steepening and depth of the rejection zone of the SSF if the spectra of the local objects had been beyond that zone. The errors had increased significantly if that spectra had been inside the filter rejection zone. The recommendations have been provided as to the choice of the SSF and its use in the SIPs of the existing and perspective impulse doppler weather radars. It has been shown that due to the difficulties of choosing the parameters of the SSF, the SIP must be complemented with the set of filters with different parameters and the possibility to switch on every filter in the SIP promptly.

Keywords: meteorology, local objects, surge suppression filter, correlation coefficient, impulse Doppler weather radar.