

УДК 621.391:621.397

А.П. Глушко, О.В. Чечуй, В.В. Сінько, М.С. Зотов

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

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ТЕЛЕВІЗІЙНОЇ СИСТЕМИ ПОВІТРЯНОЇ РОЗВІДКИ З ПОКРАЩЕНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Розглянуті особливості побудови сучасних систем повітряної розвідки та шляхи їх удосконалення. Проведено аналіз статистичних характеристик таких систем з обранням математичної моделі сигналу, який являє собою адитивну суміш двомірною ізотропного випадкового поля на фоні білого шуму.

Ключові слова: розділювальна здатність, квазіоптимальна фільтрація, рекурсивний фільтр, кореляційна матриця, дисперсія, сигнал-шум.

Вступ

Постановка проблеми. Досвід ведення бойових дій в сучасних військових конфліктах переконливо свідчить про те, що повітряна розвідка є однією з найважливіших умов успіху бойових дій авіації та інших родів військ. Її завданням є своєчасне забезпечення командування і штабів повними і достовірними даними про противника. Одним із основних видів повітряної розвідки є телевізійна розвідка, що здійснюється за допомогою телевізійних систем, що мають у своєму складі літакову передавальну й наземну приймальню станції, і дозволяють спостерігати за об'єктами й діями військ противника. Основними характеристиками телевізійних систем, які впливають на якість отриманого зображення є:

- спектральна чутливість;
- масштаб телевізійного зображення;
- контраст телевізійного зображення;
- розділювальна здатність.

В існуючих телевізійних системах для забезпечення необхідної розділювальної здатності застосовують апертурні коректори, які частково компенсують викривлення відеосигналу обумовлені первинними перетворювачами. Таке технічне рішення недостатньо повно відповідає сучасним вимогам.

Обґрунтовано, що шляхом цифрової обробки первинного сигналу на сучасній елементній базі можливе покращення тактико-технічних характеристик телевізійних систем повітряної розвідки, а саме розділювальної здатності, тривалості «світлового дня», висоти польоту літального апарату, який здійснює розвідку.

Поставлену задачу вирішено шляхом синтезу цифрового пристрою (фільтр), який здійснює двомірну рекурсивну обробку відеосигналу в основі якого реалізована диференційна імпульсно-кодова модуляція.

Обрана модель телевізійного зображення розглядалась як випадкове поле на фоні шуму та апертурних викривлень, обумовлених первинним перетворювачем.

Оцінка якості корекції апертурних викривлень та завадостійкості запропонованого цифрового пристрою проведено шляхом імітаційного моделюван-

ня. Урахування шуму первинного перетворювача покращує завадостійкість системи в порівнянні з випадком коли шум вважається білим та впливає на тривалість «світлового дня», висоти польоту літального апарату, який здійснює розвідку. Корекція апертурних викривлень суттєво залежить від відношення сигнал-шум, збільшення якого впливає на розділювальну здатність телевізійної системи. Достовірність отриманих результатів підтверджена методами математичного та імітаційного моделювання за допомогою програм MathCAD та MathLAB.

Основний розділ

Синтез квазіоптимального рекурсивного фільтру телевізійних сигналів

Для визначення нижнього граничного значення СКП фільтрації зображення $s(x, y)$ в прямокутних координатах x, y будемо вважати ізотропним випадковим полем Гауса з відомими характеристиками: математичним очікуванням m_s , дисперсією D_s , нормовану кореляційною функцією

$$R_s(\Delta x, \Delta y) = R_s(\Delta x, \Delta y) / D_s = \exp\left\{-a\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}\right\}$$

і нормованої при позитивних і негативних частотах просторової спектральної щільності

$$\begin{aligned} \hat{G}(f_x, f_y) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R_s(\Delta x, \Delta y) \exp\{-i2\pi(f_x \Delta x + f_y \Delta y)\} \times \\ &\times d\Delta x d\Delta y = 2\pi a / (a^2 + 4\pi^2 f_x^2 + 4\pi^2 f_y^2)^{3/2}, \end{aligned} \quad (1)$$

де a – характеристика зображення; $\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ – відстань між точками зображення з координатами $(x_1, x_2; y_1, y_2)$; f_x, f_y – просторові частоти.

Припускаючи фільтрацію зображення в дискретних координатах, будемо вважати, що здійснюється рівномірна дискретизація поля $s(x, y)$ з інтервалом L по обох координатах. У результаті утворюється поле $\lambda(x, y)$, яке складається з квадратних елементів. Відомі його математичне сподівання і дисперсія. Усередині кожного елемента яскравість постійна і дорівнює яскравості зображення $s(x, y)$ в

середині елемента. Нормована спектральна щільність дискретизованого поля відображена в формулі, яка наведена у перелічених нижче джерелах.

На зображення $\lambda(x, y)$ накладається шум $n(x, y)$, елементи якого незалежні. Спектральна щільність такого шуму

$$G_n(f_x, f_y) = D_n F(f_x, f_y), \quad (2)$$

де D_n – дисперсія шуму.

Розглянемо задачу фільтрації дискретизованого поля $\lambda(x, y)$. Нижнє граничне значення СКП фільтрації оптимальним фізично нереалізуємим фільтром, що враховує всі зв'язки елементів зображення [3], має вид

$$\varepsilon^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G_\lambda(f_x, f_y) G_n(f_x, f_y)}{G_\lambda(f_x, f_y) + G_n(f_x, f_y)} df_x df_y. \quad (3)$$

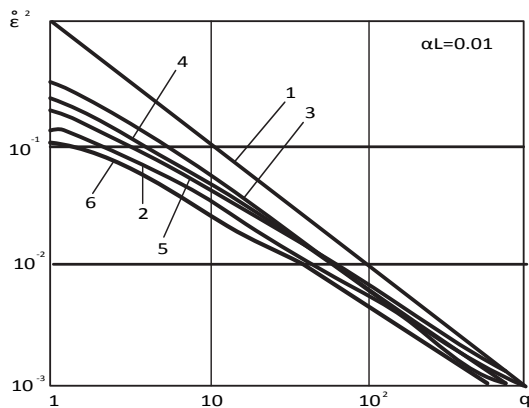


Рис. 1. Графік залежності СКП $\varepsilon^2 = \varepsilon^2/D_s$ від відношення $q = D_s/D_n$ при $\alpha L = 0,1$

Відповідно (3), з урахуванням (1–3), знаходимо залежність нормованого нижнього граничного значення СКП від відношення потужності сигналу до потужності шуму.

На рис. 1 ($\alpha L = 0,1$) та рис. 2 ($\alpha L = 0,01$) побудовані графіки залежності СКП $\varepsilon^2 = \varepsilon^2/D_s$ від відношення $q = D_s/D_n$ (1 – варіант відсутності фільтрації). Відмінність кривих 1 і 2 характеризує можливість поліпшити якість відновленого (прийнятого) зображення за рахунок фільтрації.

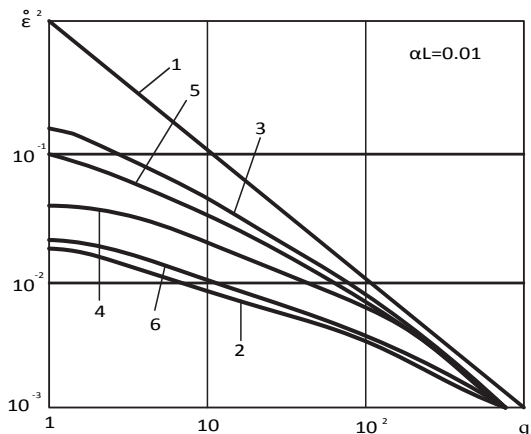


Рис. 2. Графік залежності СКП $\varepsilon^2 = \varepsilon^2/D_s$ від відношення $q = D_s/D_n$ при $\alpha L = 0,01$

Квазіоптимальна рекурентна фільтрація

У вирішуваній задачі зображення представимо векторною n -компонентною послідовністю, яку будемо задавати апіорним рекурентним рівнянням

$$\Lambda_i = \Phi_{i-1} (\Lambda_{i-1} - M_{\Lambda_{i-1}}) + M_{\Lambda_i} + N_{\Lambda_i},$$

де i – номер елемента на строчці; Λ_{i-1} – n -мірний вектор заданих елементів зображення, для яких зв'язок з Λ_i передбачається суттєвим; Φ_{i-1} – відома ($n \times n$) – мірна перехідна матриця; M_{Λ_i} – n -мірний вектор математичних очікувань векторної послідовності Λ_i ; N_{Λ_i} – n -мірний вектор формувального просторового шуму, який характеризується нульовою матрицею математичних очікувань та дисперсійною матрицею D_{Λ_i} .

Зв'язок між m -мірним вектором вимірюючих параметрів X_i та n -мірним вектором оцінюючих елементом зображення Λ_i задамо рівнянням

$$X_i = H_i \Lambda_i + N_{X_i},$$

де H_i – відома ($m \times n$)-мірна матриця, яка визначає зв'язок між векторами спостереження X_i та параметром Λ_i , що оцінюється; N_{X_i} – m -мірний вектор шуму вимірювання, який вважається гаусовським, з нульовою матрицею математичних очікувань та дисперсійною матрицею D_{N_i} .

Розглядається синтез фільтру, який на основі вектору спостережень $[X_1^T, X_2^T, \dots, X_i^T]$ формує його по критерію мінімуму СКП оцінку вектора Λ_i (t – індекс транспонування).

Загальний підхід до рішення задачі розроблено в [3]. Такий фільтр для нерухомого випадкового поля є квазіоптимальним. Він по точності наближається до оптимального зі збільшенням n .

$$(E_i)^{-1} = [D_{\Lambda_i} - \Phi_{i-1} D_{\Lambda_{i-1}} \Phi_{i-1}^T + \Phi_{i-1} E_{i-1} \Phi_{i-1}^T]^{-1} + H_i^T D_{N_i}^{-1} H_i -$$

зворотна кореляційна матриця помилок поточної фільтрації вектора Λ_i

На основі отриманого загального рішення задачі можна записати рівняння фільтрації та дисперсії помилки оцінювання параметру Λ_i у встановленому режимі для випадку, коли спостереження x_i та оцінюючий параметр λ_i – скалярні функції:

$$\lambda_i^* = \Phi(\Lambda^* - M_\Lambda) + m_\lambda + \theta [(x_i - m_\lambda) - \Phi(\Lambda^* - M_\Lambda)]; \quad (4)$$

$$(\varepsilon^2)^{-1} = [D_\lambda - \Phi R_\Lambda \Phi^T + \Phi E_\Lambda \Phi^T]^{-1} + D_n^{-1}, \quad (5)$$

де R_Λ – кореляційна матриця вектору Λ ; E_Λ – кореляційна матриця помилок фільтрації вектора Λ ; D_λ – дисперсія формуючого просторового шуму; D_n – дисперсія шуму вимірювання; $\theta = \varepsilon^2/D_n$ – оптимальний коефіцієнт передачі фільтра у встановленому режимі.

Використовуючи отримане загальне рішення задачі, розглянемо різні варіанти.

Фільтрація елементу зображення j -ї строки без урахування зв'язку з елементами сусідніх строк

У цьому випадку $\Lambda = \lambda_{i-1,j}$. Згідно [2] кореляційна функція яскравості зображення місцевості близька до експоненціальної, отже $\Phi = e^{-\alpha L}$.

Тоді рівняння фільтрації (6) прийме вигляд

$$\lambda_{i,j}^* = e^{-\alpha L} (\lambda_{i-1,j}^* - m_\lambda) + m_\lambda + \vartheta \left[(x_{i,j} - m_\lambda) - e^{-\alpha L} (\lambda_{i-1,j}^* - m_\lambda) \right]. \quad (6)$$

Якість фільтрації рекурсивним фільтром буде характеризувати відносно помилки оцінювання ε'^2 , яка являє собою відношення апостеріорної дисперсії до апіорної $\varepsilon'^2 = \varepsilon^2 / D_\lambda$. Розв'язуючи (6), отримуємо

$$\varepsilon'^2 = \frac{(1 - e^{-2\alpha L})(1 + q)}{2q e^{-2\alpha L}} \times \sqrt{1 + \frac{4q e^{-2\alpha L}}{(1 - e^{-2\alpha L})(1 + q)^2} - 1}. \quad (7)$$

Для рекурсивного фільтра, синтезуючого без урахування зв'язку строк по (7), на рис. 1 і рис. 2 побудовані криві 3. Порівнюючи їх з кривою 2, можливо зробити висновок, що розглянутий найпростіший фільтр значно поступається оптимальному в точності оцінювання при $q < 10 \dots 20$. Авторами роботи синтезовані цифрові фільтри в моделі зображень, яких урахувались зв'язки з елементами попередніх строк та фільтрацію зображень з затримкою на один такт (інтерполяцією). Залежність СКП таких фільтрів наведено на рис. 1 та 2 кривими 4–6.

До залежності 4 – фільтрація з урахуванням зв'язку з елементом попередньої строки, 5 – фільтрація з запізнюванням без урахування зв'язку строк,

6 – фільтрація із запізнюванням та з урахуванням зв'язку строк.

Висновки

З отриманих результатів досліджень можливо зробити наступні висновки:

1. Перевага в якості фільтрації збільшується зі зменшенням інтервалу дискретизації та відношення сигнал-шум.

2. При відношенні сигнал-шум більш ніж 15...20 доцільно застосувати фільтр з запізненням, не враховуючи зв'язок строчок.

3. При відношенні сигнал-шум менш ніж 15...20 доцільно застосувати фільтр, який враховує зв'язок строчок та працює з запізненням.

Список літератури

1. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1982.
2. Величкин А.И. Передача аналоговых сообщений по цифровым каналам связи / А.И. Величкин. – М.: Радио и связь, 1983.
3. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. В 3 т.: пер. с англ. / Ван Трис Г.; под ред. В.И. Тихонова. – М.: Сов. Радио, 1972.
4. Сейдж Э.П. Теория оценивания и её применение в связи и управление / Э.П. Сейдж, Дж. Мелс. – М.: Связь, 1976.
5. Богданов И.В. Система мониторинга и целеуказания, удаленных объектов / И.В. Богданов. – М.: «Искатель», 2008.
6. Волков В.Г. Электронно-оптическая система визуального обнаружения / В.Г. Волков. – ОКБ «ТЕКОН-ЭЛЕКТРОН». – Украина, 2005.

Надійшла до редколегії 2.06.2017

Рецензент: д-р техн. наук доц. В.І. Васишин, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ ВОЗДУШНОЙ РАЗВЕДКИ С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

А.П. Глушко, О.В. Чечуй, В.В. Сінько, М.С. Зотов

Рассмотрены особенности построения современных систем воздушной разведки и пути их совершенствования. Проведен анализ статистических характеристик таких систем с выбором математической модели сигнала, который представляет собой аддитивную смесь двухмерного изотропного случайного поля на фоне белого шума.

Ключевые слова: разделяющая способность, квазиоптимальная фильтрация, рекурсивный фильтр, корреляционная матрица, дисперсия, сигнал-шум.

FEATURES OF THE BUILDING OF AERIAL RECONNAISSANCE TELEVISION SYSTEM WITH IMPROVED CHARACTERISTICS

A. Glushko, O. Chechuy, V. Sin'ko, M. Zotov

The features of building modern air reconnaissance systems and ways to improve them are considered. The statistical characteristics of such systems are analyzed with the choice of a mathematical model of the signal, which is an additive mixture of a two-dimensional isotropic random field in the background of white noise.

Keywords: separating ability, quasi-optimal filtering, recursive filter, correlation matrix, dispersion, SNR.