

УДК 621.391:621.397

А.П. Глушко, О.В. Чечуй, А.М. Магурін, А.В. Лук'яненко

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПОБУДОВИ СУЧАСНОЇ ТЕЛЕВІЗІЙНОЇ СИСТЕМИ ПОВІТРЯНОЇ РОЗВІДКИ

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 двомірної ізотропного випадкового поля на фоні білого шуму, та визначені вимоги до елементів цих систем.

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

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 (ТПР), що здійснюється за допомогою телевізійних систем, які мають у своєму складі літакову передавальну й наземну приймальну станції. ТПР дозволяє спостерігати в реальному часі за об'єктами й діями як противника, так і своїх військ. Основними характеристиками телевізійних систем, які впливають на якість отриманих зображень, 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 диференціальна імпульсно-кодова модуляція.

Обрана модель телевізійного зображення розглядалась як випадкове поле на фоні шуму [1] та апертурних викривлень, обумовлених первинним перетворювачем. Урахування шуму первинного перетворювача покращує завадостійкість системи в порівнянні з випадком, коли шум вважається білим, збільшує тривалість «світлового дня» та висоту польоту літального апарату. Корекція апертурних викривлень суттєво залежить від відношення сигнал-шум, збільшення якого покращує розділювальну здатність телевізійної системи.

Достовірність отриманих результатів підтверджена методами математичного та імітаційного моделювання за допомогою програм MathCAD та MathLAB.

Синтез квазіоптимального рекурсивного фільтра телевізійних сигналів

Для визначення нижнього граничного значення середнього квадрата помилки (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 , нормованою кореляційною функцією

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

і нормованою при позитивних і негативних частотах просторовою спектральною щільністю

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

де α - 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, $F(f_x, f_y)$ - спектральна функція трикутного імпульсу [2].

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

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

Відповідно (3), з урахуванням (1) та (2), 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, 2 - нижнє граничне значення СКП фільтрації).

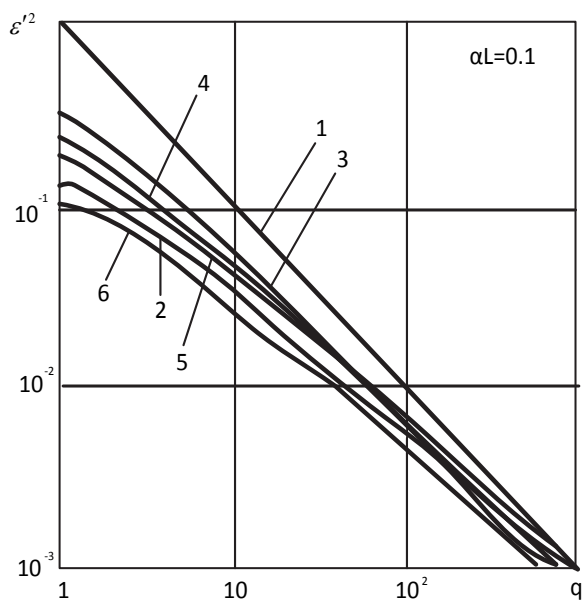


Рис. 1. Залежність нормованого нижнього граничного значення СКП від відношення потужності сигналу до потужності шуму при $\alpha L = 0,1$

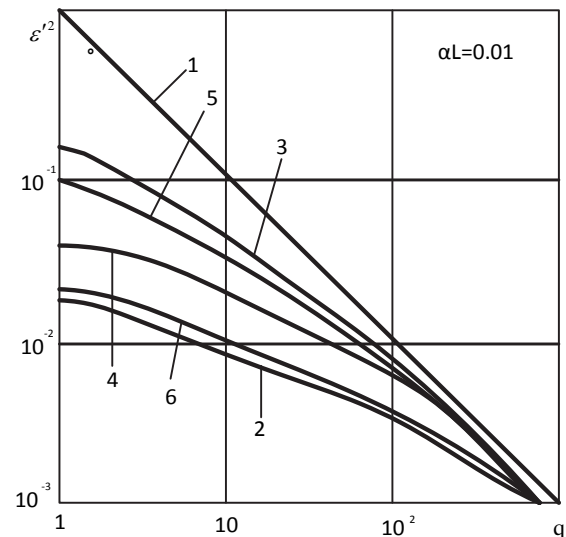


Рис. 2. Залежність нормованого нижнього граничного значення СКП від відношення потужності сигналу до потужності шуму при $\alpha L = 0,01$

Відмінність кривих 1 і 2 характеризує можливість поліпшити якість відновленого (прийнятого) зображення за рахунок фільтрації.

Квазіоптимальна рекурентна фільтрація. У задачі, що вирішується, зображення представимо векторною n -компонентною послідовністю, яку будемо задавати апріорним 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 сподівань 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 сподівань та дисперсійною матрицею D_{N_i} .

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

Загальний підхід до рішення задачі розроблено в [4]. Такий фільтр для нерухомого випадкового поля є квазіоптимальним. Він по точності наближається до оптимального зі збільшенням n .

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

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

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

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 (4) прийме вигляд

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

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 (5), отримуємо

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

Для рекурсивного фільтра, синтезуючого без урахування зв'язку строк по (7), на рис. 1–2 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 урахувувались зв'язки з

елементами попередніх строк та фільтрацію зображень з затримкою на один такт (інтерполяцією). Залежність СКП таких фільтрів наведено на рис. 1–2 кривими 4–6.

Де залежності 4 – фільтрація з урахуванням зв'язку з елементом попередньої строки, 5 – фільтрація з затримкою без урахування зв'язку строк, 6 – фільтрація із затримкою та з урахуванням зв'язку строк.

В системах ТПР зображення, що розглядається, перетворюється в відеосигнал шляхом розгортки в оптико-електронному перетворювачі [5–6], апертурна характеристика якого відома. На виході перетворювача формується адитивна суміш відеосигналу з шумом

$$y(i,j) = \sum_{k=i}^{i+\mu-1} \sum_{l=j}^{j+\nu-1} f(k,l)\lambda(k,l) + u_1(i,j), \quad (8)$$

де $f(k,l)$ – проекція апертурної характеристики на випадкове поле,

$u_1(i,j)$ – адитивний забарвлений шум оптико-електронного перетворювача.

Слід враховувати суттєві значення апертурної характеристики розміром $\mu \times \nu$. Значення апертурної характеристики $f(k,l)$ утворюють вектор-строку розміром

$$1 \times \mu\nu: F(i,j) = [f(i,j), \dots, f(i+\mu-1, j+\nu-1)].$$

Значення поля, відповідно апертурі променя розгортки, утворює вектор-стовбець розміром

$$\mu\nu \times 1: \Lambda(i,j) = [\lambda(i,j), \dots, \lambda(i+\mu-1, j+\nu-1)]^T.$$

На підставі наведеного запишемо:

$$\sum_{k=1}^{i+\mu-1} \sum_{l=1}^{j+\nu-1} f(k,l)\lambda(k,l) = F(i,j)\Lambda(i,j).$$

Шум оптико-електронного перетворювача $u_1(i,j)$ у напрямку розгортки по строчці i – забарвлений, а по j – вважаємо білим. Сформуємо марковський вектор $U(i,j)$, компонентом якого є шум оптико-електронного перетворювача $u_1(i,j) = A(i,j) U(i,j)$, де $A(i,j)$ – відома матриця-строка.

Сформуємо вектор параметрів суміші сигналу з шумом $X(i,j) = [\Lambda^T(i,j) U^T(i,j)]^T$. Тоді рівняння (8) прийме вигляд:

$$y(i,j) = H(i,j)X(i,j), \text{ де } H(i,j) = [F(i,j), A(i,j)].$$

На підставі наведеного, аналогічно [2], автори роботи отримали загальний вираз рівняння фільтрації телевізійного зображення на фоні забарвленого шуму з урахуванням апертурних викривлень. Можливість корекції апертурних викривлень та компенсації шуму оптико-електронного перетворювача перевірено шляхом імітаційного моделювання. Оцінку ефективності синтезованої системи здійснено по розрахунку СКП.

З отриманих результатів досліджень можливо зробити наступні висновки.

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 затримкою, 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 затримкою.

4. Урахування шуму первинного перетворювача покращує шумостійкість системи в порівнянні з випадком коли шум вважається білим, що збільшить тривалість "світлового дня" та висоту польоту літального апарату, який здійснює розвідку.

5. Корекція апертурних викривлень суттєво залежить від відношення сигнал-шум, збільшення якого впливає на розділювальну здатність телевізійної системи.

Таким чином, надані пропозиції щодо покращення характеристик систем ТПР доцільно використовувати при модернізації існуючих та урахувувати при розробці сучасних систем.

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. под ред В. И. Тихонова / Г. Ван Трис. – 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 // Искатель. – М., 2008.

6. Волков В.Г. Электронно-оптическая система визуального обнаружения / В.Г. Волков. – ОКБ «ТЕКОН-ЭЛЕКТРОН». – Украина, 2005.

Надійшла до редколегії 7.07.2017

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

**ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПОСТРОЕНИЮ СОВРЕМЕННОЙ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ
ВОЗДУШНОЙ РАЗВЕДКИ**

А.П. Глушко, А.В. Чечуй, А.Н. Магурин, А.В. Лукьяненко

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 двумерного изотропного случайного поля на фоне белого шума, а также определены требования к элементам этих систем.

Ключевые слова: *разделительная способность, квазиоптимальная фильтрация, рекурсивный фильтр, корреляционная матрица, дисперсия, апертурные искажения, сигнал-шум.*

PROPOSALS FOR THE BUILDING OF AERIAL RECONNAISSANCE TELEVISION SYSTEM

A. Glushko, A. Chechui, A. Magurin, A. Lukyanenko

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, and the requirements for the elements of these systems are specified.

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