

УДК 528.711.1

Кононов В. І.

Центр аерокосмічних досліджень Землі (м. Київ, Україна)

РОЗРАХУНОК РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ АЕРОФОТОСИСТЕМИ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ ПОЛЬОТУ

© Кононов В.І., 2003

Выполнен расчет разрешающей способности аэрофотосистемы с учетом влияния факторов полета.

The calculation of resolution for aerophotocamera system taking into account the main flight factors was done.

Реальні чинники польоту тією чи іншою мірою знижують результативну роздільну здатність аерофотосистеми відносно роздільної здатності АФА, отриманої з паспортних даних.

Оцінку реальної роздільної здатності АФА у польоті необхідно виконувати для уточнення масштабу фотографування, який залежить від заданих розмірів і контрасту елемента розрізнення на місцевості і заданої точності визначення координат на знімку.

Масштаб знімання, а за заданої фокусної відстані об'єктива АФА висота фотографування суттєво впливають на визначення економічної ефективності польотно-знімальних робіт. Зі зменшенням масштабу знімання збільшується величина захоплення на місцевості, що дає економію льотного часу знімання заданої ділянки місцевості. Слід відзначити, що затрати на оплату льотного часу (літако-годин) складають до 80% від вартості всього аерофотознімання [1].

Висота фотографування може вибиратися з таких умов:

- умови побудови цифрової моделі рельєфу місцевості і точності визначення координат об'єктів для заданого масштабу карти;
- умови дешифрування картографічних об'єктів, яка визначається величиною найменшої деталі, що розрізняється на місцевості.

Остання умова вимагає більших масштабів знімання, тому саме цей випадок ми вибрано для прикладу. Необхідну висоту фотографування вибираємо з умови розрізнення заданої мінімальної деталі на місцевості, розмір якої дорівнює d_k , (k – контраст деталі відносно фону місцевості). Середній контраст об'єктів на аерокосмічних знімках достатньо малий і має порядок $k \approx 0,1 \div 0,2$, де

$$k = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}}$$

У цьому випадку висота фотографування визначається із виразу:

$$H = d_k \cdot f \cdot R_{k \Sigma xy}^1,$$

де: H – висота фотографування в [м]; d_k – розмір мінімальної деталі на місцевості [м]; f – фокусна відстань об'єктива АФА [мм]; $R_{k \Sigma xy}^1$ – середньовагова по полю кадру величина результативної роздільної здатності АФА в польоті [мм^{-1}], що визначається за контрастом k .

У виразі (2) величина d_k задається, величина f відповідає об'єктиву АФА, величину $R_{k \Sigma}^1$ необхідно отримати як результат відповідного розрахунку.

Середньовагова за полем кадру величина результативної роздільної здатності $R_{k \Sigma xy}^1$ визначається за американською методикою AWAR (area-weighted-average resolution) [8], за цією ж методикою визначаються середньовагові по полю кадру функції передачі модуляції (ФПМ) сучасних об'єктивів АФА, які наводяться у фірмових каталогах [9].

Кінцева середньовагова по полю кадру результативна роздільна здатність АФА в польоті визначається із виразу (8):

$$R_{k\Sigma xy}^1 = \sqrt{R_{k\Sigma x}^1 \cdot R_{k\Sigma y}^1}, \quad (3)$$

де $R_{k\Sigma x}^1$ - середньовагова роздільна здатність у напрямку польоту (із врахуванням зсуву зображення);

$R_{k\Sigma y}^1$ - середньовагова роздільна здатність у напрямку перпендикулярному до напрямку польоту.

Структурна схема проходження сигналу в аерофотосистемі для випадку визначення роздільної здатності із урахуванням впливу чинників реального польоту, представлена на рис. 1 [2, 3]. На основі структурної схеми розробляють математичну модель для розрахунку роздільної здатності.

На рис.1 кожна складова є математичною моделлю для окремого елемента аерофотосистеми або визначального чинника польоту, який впливає на роздільну здатність. Математичні моделі побудовані в ділянці Фур'є-перетворення і, як правило, є виразами для визначення ФПМ відповідної ланки, що згодом спрощує синтез результативних характеристик системи (вирази (4) і (5)). В даній математичній моделі враховуються лише основні чинники, які впливають на якість зображення, і тому подана математична модель не є вичерпною.

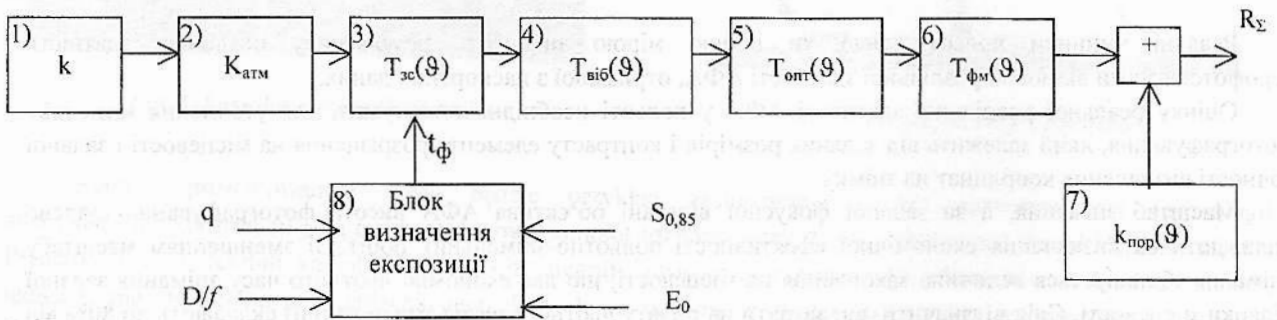


Рис.1. Структурна схема аерофотосистеми для розрахунку роздільної здатності.

Розглянемо блоки структурної схеми рис. 1 (ФПМ в блоках структурної схеми є функціями просторової частоти θ [мм⁻¹]): блок 1 - визначає вхідний сигнал, яким є зображення стандартної міри для визначення роздільної здатності з контрастом k , що дорівнює контрасту заданої деталі на місцевості; блок 2 - визначає вплив атмосферного серпанку на контраст зображення об'єкта і характеризується коефіцієнтом послаблення контрасту $K_{атм}$ ($K_{атм} \approx 0,7 \div 0,95$); блок 3 - відображає вплив зсуву зображення під час поступального руху носія і характеризується ФПМ зсуву зображення $T_{зс}(\theta)$; блок 4 - відображає вплив вібрацій АФА, які обумовлені, головним чином, впливом вібрацій носія, і характеризується ФПМ вібрацій $T_{віб}(\theta)$; блок 5 - відображає вплив оптичної системи АФА і характеризується ФПМ оптичних систем АФА $T_{опт}^1(\theta)$, відомості про яких наводяться у сучасних каталогах [9]; блок 6 - відображає вплив передавальних властивостей аерофотоматеріалів $T_{фм}(\theta)$, відомості про яких наводяться у сучасних каталогах (Agfa, 1991); блок 7 - відображає вплив фотографічної гранулярності (зернистості) на якість зображення і характеризується кривою порогової модуляції $k_{пор}(\theta)$; блок 8 - містить вираз стандартної експонетричної формули [6], за якою визначається величина фотографічної витримки $t_ф$, необхідної для розрахунку зсуву зображення у блоці 3 при визначенні $T_{зс}(\theta)$. У блоці 8 вводяться чутливість плівки за ISO або $S_{0,85}$, освітленість аероландшафту E_0 [лк], відносний отвір об'єктиву D/f і кратність світлофільтра q .

Результивна ФПМ аерофотосистеми з урахуванням впливу чинників реального аерофотознімання у напрямку польоту, яка відповідає структурній схемі на рис. 1, визначається виразом[2, 3]:

$$T_{\Sigma}^1(\theta) = T_{зс}(\theta) \cdot T_{віб}(\theta) \cdot T_{опт}^1(\theta) \cdot T_{фм}(\theta), \quad (4)$$

де: $T_{опт}^1(\theta)$ - середньовагова по полю кадра ФПМ оптичної системи АФА.

Відповідна ФПМ у напрямку перпендикулярному до напрямку польоту буде

$$T_{\Sigma y}^1(\theta) = T_{віб}(\theta) \cdot T_{опт}^1(\theta) \cdot T_{фм}(\theta) \quad (5)$$

ФПМ окремих ланок аерофотопроцесу у правій частині виразів (4) і (5) відповідають позначенням структурної схеми рис. 1.

Роздільна здатність аерофотосистеми визначається шляхом графічного розв'язання рівнянь[2]:

$$k_{\Sigma} \cdot T_{\Sigma}^1 \cdot (R_{k_{\Sigma}}^1) = k_{\text{пор}} \cdot (R_{k_{\Sigma}}^1), \quad (6)$$

де: $k_{\text{пор}}(\vartheta)$ – порогова характеристика аероплівки (крива порогової модуляції [4]); k – заданий контраст міри; $k_{\text{атм}}$ – коефіцієнт послаблення контрасту атмосферою.

$$k_{\Sigma} = k \cdot k_{\text{атм}}, \quad (7)$$

У виразі (6) замість $T_{\Sigma}^1(R_{k_{\Sigma}}^1)$ послідовно підставляють $T_{\Sigma_x}^1(\vartheta)$ та $T_{\Sigma_y}^1(\vartheta)$ і як результат розв'язання отримують величини $R_{k_{\Sigma_x}}^1$ і $R_{k_{\Sigma_y}}^1$, необхідні для отримання величини $R_{k_{\Sigma_{xy}}}^1$ у виразі (3).

Порогова характеристика аероплівки визначається емпіричним виразом:

$$k_{\text{пор}}(\vartheta) = k^{-1} \cdot \sqrt{0,04^2 + \frac{0,055 \cdot \sigma_D^2}{\gamma^2}}, \quad (8)$$

де: γ – коефіцієнт контрасту, до якого проявляють аероплівку; σ_D – середньоквадратичне значення шумів гранулярності фотографічної плівки, виміряне за заданого значення величини γ та середньої щільності $D \approx 1,0$, апертурою, площа якої $Q=400\text{мкм}^2$ (стандарт Росії).

Для західноєвропейських та американських аероплівок σ_D вимірюють апертурою з площею $Q=2000\text{мкм}^2$ (круглий отвір з діаметром 50 мкм), тому у виразі (6) це значення σ_D необхідно помножити на коефіцієнт 2,24. Коефіцієнт перерахунку визначається з використанням формули Селвіна[5]:

$$\sigma_D \cdot \sqrt{Q} = k_c = \text{const}, \quad (9)$$

де: k_c – коефіцієнт Селвіна, який для кожної плівки є постійною величиною. Якщо необхідно визначити значення σ_D для інших щільностей, крім $D=1$, то можна скористатися формулою Х.Фризера [5]:

$$\sigma_D(D) = \sigma_D = 1 \cdot \sqrt{D}, \quad (10)$$

де: $\sigma_{D=1}$ – значення середньоквадратичної гранулярності, виміряної для середньої щільності $D=1$.

Слід відзначити, що величина σ_D залежить від величини γ і тому у формулу (8) необхідно підставляти величину σ_D , виміряну за тією самою величиною γ , яку підставляють у вираз. Якщо відома величина σ_D , виміряна за іншого значення γ , то її можна перерахувати за наближеним співвідношенням:

$$\sigma_D(\gamma_2) = \sigma_D(\gamma_1) \sqrt{\gamma_2/\gamma_1}, \quad (11)$$

де: γ_1 – величина γ , при якій виміряне значення $\sigma_D(\gamma_1)$; γ_2 – величина γ , до якої проявлена конкретна плівка.

ФПМ зсуву зображення за величини коефіцієнта корисної дії закривача 0,8 і більшою визначають із виразу [2]:

$$T_{zc}(\vartheta) = \frac{\sin(\pi \cdot \delta_x \cdot \vartheta)}{\pi \cdot \delta_x \cdot \vartheta}. \quad (12)$$

Величину лінійного зсуву зображення δ_x за відсутності системи компенсації зсуву зображення знаходять за формулою:

$$\delta_x = \frac{W}{H} \cdot f \cdot t_f, \quad (13)$$

де: W – швидкість польоту носія [м/сек]; H – висота польоту [м]; f – фокусна відстань об'єктива АФА [мм]; t_f – фотографічна витримка [сек].

Фотографічна витримка визначається в блоці 8 за стандартною експонетричною формулою [6].

Для сучасних АФА з компенсацією зсуву зображення, які випускають фірми Zeiss і Leica, величина остаточного зсуву зображення у напрямку польоту після компенсації зсуву зображення має порядок 0,005 мм, тобто. $\delta_x \approx 0,005\text{мм}$.

ФПМ вібрацій та інших дестабілізуювальних чинників польоту визначається за наближеною формулою [2]:

$$T_{\text{віб}}(\vartheta) = \exp[-2,6 \cdot (\delta_0 \cdot \vartheta)^2], \quad (14)$$

де: δ_0 – величина випадкових зсувів зображень у фокальній площині за рахунок вібрацій, її порядок 0,005±0,01мм.

Величина δ_0 , залежна від величини вібрацій корпусу носія, пов'язаних з роботою двигунів, визначається досконалістю системи амортизації АФА і різко зменшується під час зменшення величини фотографічної витримки АФА.

Таким чином, нами отримано всі необхідні для розрахунків вихідні вирази для ФПМ.

Як приклад, розглянемо визначення роздільної здатності в польоті АФА RMK TOP фірми Zeiss з використанням аероплівки Aviphot Pan200S PE1.

Вихідні дані для розрахунку: залишковий зсув зображення $\delta_{zc} = 0,005\text{мм}$ (АФА оснащений досконалою системою компенсації зсуву зображення), середньоквадратичне значення вібрацій в фокальній площині АФА - $\delta_0 = 0,008\text{мм}$. Результати розрахунків представлені графіками на рис. 2 і рис. 3. Кінцеві результати

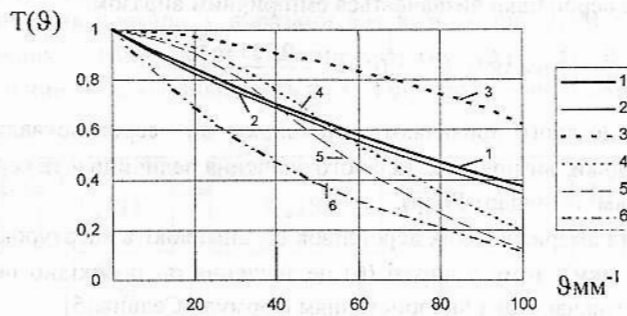


Рис.2 Вихідні ФПМ для визначення роздільної здатності аерофотосистем з врахуванням впливу чинників польоту.

1 - ФПМ об'єктива АФА RMK TOP PLEOGON A3, $f=153\text{мм}$, $d/f=1/5,6$ [9]; 2 - ФПМ аероплівки Aviphot Pan200S PE1, $\sigma_D = 0,055$ ($Q=400\text{мкм}^2$), $\gamma=1,33$, $S_{0,85}=400$ [7]; 3 - ФПМ АФА зсуву зображення у напрямку польоту з врахуванням зсуву зображення ($\delta_{zc}=0,005\text{мм}^{-1}$), (див. вир. (12)); 4 - ФПМ вібрацій ($\delta_0=0,008\text{мм}^{-1}$), (див. вир. (14)); 5 - ФПМ сумісного впливу вібрації і зсуву зображення; 6 - результувна ФПМ АФА без врахування зсувів і вібрацій.

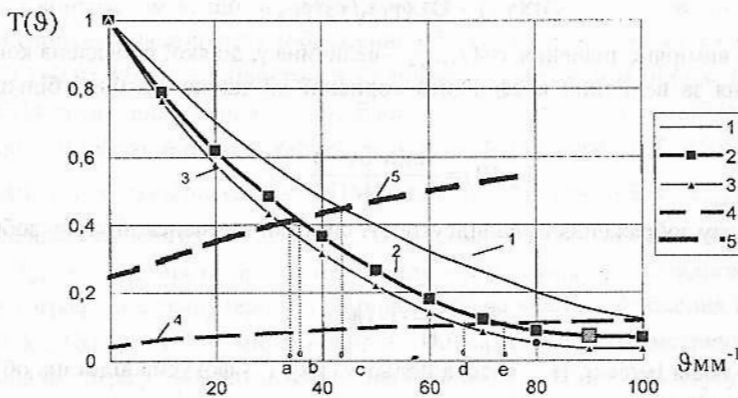


Рис.3. Визначення результувної роздільної здатності АФА..

1 - ФПМ АФА без врахування впливу зсуву і вібрацій (див. криву 6 на рис.2); 2 - ФПМ АФА з врахуванням впливу лише вібрацій; 3 - ФПМ АФА з врахуванням впливу зсуву і вібрацій; 4 - порогова крива аероплівки Aviphot Pan200S PE1 для $k=1,0$ (див.(8)); 5 - порогова крива аероплівки Aviphot Pan200S PE1 для $k=0,2$ (див.(8)).

визначення роздільної здатності відзначені точками a, b, c, d і e на осі просторових частот (рис. 3). Роздільні здатності за напрямком польоту і в перпендикулярному напрямку для контраста $k = 0,2$ дорівнюють $R_{0,2\Sigma y}^1 = 32\text{мм}^{-1}$, $R_{0,2\Sigma y}^1 = 36\text{мм}^{-1}$ (близькість значень пояснюється наявністю в даному АФА досконалої системи компенсації зсуву зображення) В АФА без системи компенсації зсуву зображення ці величини суттєво

відрізняються одне від одного. Результивна роздільна здатність в нашому випадку $R_{0,2\Sigma xy}^1 = 34\text{мм}^{-1}$ (для порівняння результивна роздільна здатність за контрастом $k = 1,0$ буде $R_{1,0\Sigma xy}^1 = 71\text{мм}^{-1}$ (див. точки d і e на рис.3)). Роздільна здатність АФА заданої плівки без врахування зсуву зображення за контрастом $k = 0,2$ дорівнює 44мм^{-1} (див. точку c на рис.3).

Точки на рис.3:

a - $R_{0,2\Sigma x}^1$; b - $R_{0,2\Sigma y}^1$; c - $R_{0,2\Sigma}^1$ АФА (без врахування чинників польоту); d - $R_{1,0\Sigma x}^1$; e - $R_{1,0\Sigma y}^1$.

Наприкінці слід підкреслити, що одна і та ж величина результивної роздільної здатності $R_{0,2\Sigma xy}^1$ аерофотосистем, отримана на аероплівках з різною величиною середньоквадратичної гранулярності σ_D (за однакового коефіцієнта контрастності γ) по-різному впливає на процес дешифрування [4].

Аеронегативи з меншою величиною σ_D за інших умов дозволяють отримати кращі результати дешифрування. Останнє пояснюється тим, що на зображення з меншою гранулярністю за однієї і тієї ж величини роздільної здатності можна розрізнити більшу кількість градацій, ніж на зображенні з більшою грануляцією.

Однак, на практиці цю перевагу аерофотоматеріалів з малою гранулярністю (малою чутливістю $S_{0,85}$) можна реалізувати лише в аерофотосистемах з досконалими системами компенсації зсуву зображень.

Точність розрахунків результивної роздільної здатності за даною методикою має порядок 10-20 % і визначається, головним чином, точністю вихідних даних та похибками, пов'язаними з лінійністю фотографічного матеріалу. Точність збільшується під час розрахунків величин роздільної здатності, які визначаються за мірами малого контрасту.

Література.

1. Бурштинська Х. Аерофотографія. – ЛГГАТ, Львів. – 1999. – 356 с.
2. Кононов В.И. Связь информационных и вероятностных оценок систем формирования изображений (иконических систем). – Оптико-механическая промышленность (Оптический журнал). – 1991. – №11. – С.13-18.
3. Кононов В.И. и др. Оптические системы построения изображений. – Техніка. – Киев. – 1981. – 134 с.
4. Макдональд Д.И. Качественная оценка фотографической системы для аэросъемки. – Сб. «Оценка качества оптического изображения». Пер. с англ.. – Геодезиздат, М. – 1959. – С.61-84.
5. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации. – Мир. – М. – 1978. – С.360-362.
6. Физические основы и технические средства аэрометодов. Под редакцией А.И. Виноградовой. – Наука, Л. – 1967. – С.58-59.
7. Agfa. Technische Information. Aviphot Pan200S PE1 Herausgegeben von Agfa-Gevaert N.V. B-2640 Mortsel-Belgien. – 1991.
8. Photographic Lenses, Mil-Standart-150 (U.S.Government Printing Office, Oct.23, 1950).
9. RMK TOP, Reihenmeß Kammer – System für Luftbild-aufnahmen.Carl Zeiss.D-7082. Oberkochen Germany.