

Zdzisław Kurczyński

ZDJĘCIA LOTNICZE I ZOBRAZOWANIA SATELITARNE - STAN OBECNY I PERSPEKTYWY*

1. Wprowadzenie

Od zaistnienia możliwości fotografowania z powietrza, tj. od początków awiacji obserwuje się stałe doskonalenie kamer lotniczych i wykorzystania zdjęć lotniczych dla celów pomiarowych. Doskonalenie mechaniki i optyki kamer lotniczych, jakości filmów oraz metod opracowania, miały ten skutek praktyczny, że metody fotogrametryczne wkraczały w coraz to większe skale opracowań, oraz stopniowo zmieniała się relacja między skalą opracowania a skalą zdjęć z wynikającymi stąd efektami ekonomicznymi. Na tle tych ewolucyjnych zmian w zakresie zdjęć lotniczych można zaobserwować jakościowe „skokowe” zmiany zapoczątkowane w drugiej połowie lat 80-tych. „Nowa jakość” zdjęć lotniczych jest wytyczana przez:

- kamery FMC (Forward Motion Compensation - kompensacja ruchu postępowego samolotu);
- stabilizowane zawieszenia kamery kompensujące rozmazanie obrazu spowodowane ruchami kątowymi kamery (AMC: Angular Motion Compensation);
- nową generację obiektywów;
- upowszechnienie technologii GPS do nawigacji, sterowania pracą kamery i precyzyjnego wyznaczania współrzędnych środków rzutów kamery;
- udane próby pomiaru kątowych elementów orientacji kamery w locie.

Wymienione okoliczności spowodowały skokową zmianę jakości zdjęć lotniczych. Jakże to pociąga skutki praktyczne?

Równocześnie szybko rozwija się fotogrametria cyfrowa, z cyfrową postacią danych na wejściu. Aby opracować klasyczne (analogowe) zdjęcia metodami fotogrametrii cyfrowej należy je w pierwszej kolejności zeskanować. Obserwuje się rozwój specjalizowanych skanerów do skanowania zdjęć lotniczych. Pojawia się pytanie: jak skanować zdjęcia (oraz z jaką rozdzielczością), aby w procesie skanowania nie zdegradować ich wyjściowej jakości?

Obok tradycyjnych zdjęć lotniczych szybko rozwijają się kamery CCD (z prostokątną matrycą sensorów) i skanery elektrooptyczne z linijką sensorów, dostarczające obrazy w postaci cyfrowej. Ten rozwój jest zauważalny szczególnie w zakresie obrazowania ziemi z kosmosu. Jaki jest potencjał kartograficzny tych zobrazowań? Czy i jaki wpływ ma ten rozwój na tradycyjne zdjęcia lotnicze? Jaka jest wobec tego przyszłość tradycyjnych zdjęć lotniczych? Artykuł niniejszy jest próbą oceny obecnego stanu zdjęć lotniczych oraz zobrazowań satelitarnych i odpowiedzi na postawione pytania.

* Publikację opracowano na podstawie referatów prezentowanych na XVIII Kongresie ISPRS w ramach Komisji Nr I „Sensory, platformy i obrazy”

2. Współczesne lotnicze kamery pomiarowe

2.1. Nowa generacja obiektywów

Potencjał pomiarowy zdjęcia określa w pierwszym rzędzie jakość obiektywu kamery. Tę jakość wyrażają maksymalne błędy geometryczne (dystorsja) i zdolność rozdzielcza. Zdolność rozdzielczą wyraża się zwykle liczbą par linii jaką jest w stanie odwzorować obiektyw w jednym milimetrze obrazu (para linii to linia czarna i biała). Zwykle podaje się tę zdolność dla układu: obiektyw - film, w formie wskaźnika AWAR (Area Weighted Average Resolution), tj. średniej zdolności rozdzielczej w kierunku radialnym i tangencjalnym, ważonej w całym formacie zdjęcia. Głównie dzięki komputerowemu projektowaniu obiektywów obserwuje się duży postęp w tym zakresie:

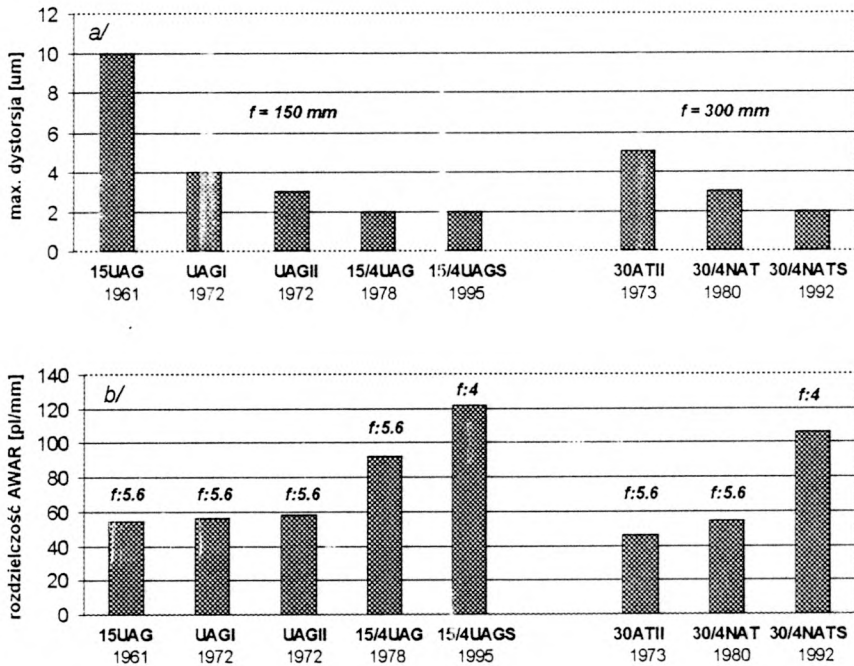
- od rozdzielczości rzędu 50÷60 par linii/milimetr i dystorsji $\pm 10 \mu\text{m}$ w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych;
- do rozdzielczości rzędu 110÷120 par linii/milimetr i dystorsji $\pm 2 \mu\text{m}$ w początkach lat 90-tych.

Towarzyszą tym zmianom dodatkowe cechy:

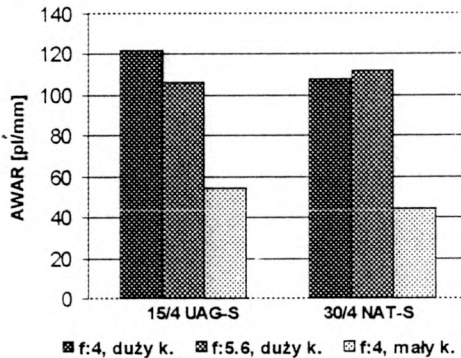
- zdolność rozdzielcza jest bardziej wyrównana w całym polu widzenia obiektywu, nie ma obserwowanego dawniej drastycznego spadku ku brzegom zdjęcia;
- dawniej obiektyw „najostrej rysował” przy przysłonie przymkniętej do wartości około $f: 8$, obecnie to optimum znajduje się praktycznie przy pełnym otworze przysłony, tj. dla otworów $f: 4$ ÷ $f: 5.6$.

Producenci zarówno kamer jak i filmów chętnie podają zdolność rozdzielczą dla kontrastowych obiektów, zwykle dla testów o kontraście $K=100:1$ (tj. $\log K=2$). Taka charakterystyka jest oderwana od rzeczywistości zdjęć lotniczych. Takie kontrasty nie występują w typowej scenie widzianej przez kamerę lotniczą, przeciwnie, przeważają kontrasty średnie i małe. Dla użytkownika o wiele więcej mówiąca jest zdolność rozdzielcza dla małych kontrastów, wyznaczana dla kontrastu $K=1.6:1$ (tj. $\log K=0.2$). Obserwuje się polepszenie zdolności rozdzielczej najnowszych obiektywów w tym zakresie (zwykle nie podawane w metrykach kamer).

Przedstawione trendy można zaobserwować na przykładzie obiektywów Wild/Leica: szerokokątnym UAG i normalnokątnym NAT (rys. 1. i rys. 2.). Uzyskane zdolności rozdzielcze współczesnych obiektywów zbliżają się do wartości teoretycznych, limitowanych jedynie dyfrakcją światła. Podobnie można powiedzieć o ich jakości geometrycznej. Szczytkowa dystorsja obiektywów w całym polu widzenia nie przekracza $2 \mu\text{m}$ (zwykle jest mniejsza od $1 \mu\text{m}$). Oznacza to, że obiektywy nowej generacji są praktycznie wolne od dystorsji. Możliwości dalszej poprawy zarówno jakości geometrycznej jak i rozdzielczości obiektywów typowych kamer lotniczych są praktycznie wyczerpane [Schlienger, Kom. I].



Rys. 1. Rozwój obiektywów Wild/Leica: a/ dystorsja dla maksymalnej wartości przysłony, b/ rozdzielczość dla dużego kontrastu obiektu i optymalnej przysłony (Film Kodak Panatomic-X 2412, kontrast 1000:1)



Rys. 2. Zdolność rozdzielcza nowych obiektywów Leica dla: kontrastu dużego K=1000:1 oraz małego K=1.6:1

2.2. Kompensacja rozmazania (FMC)

W wyniku ruchu postępowego samolotu, w czasie otwarcia migawki kamery, następuje rozmazanie obrazu. Wyjściem z trudności jest stosowanie odpowiednio krótkich czasów ekspozycji. Czas ekspozycji jest wartością krytyczną szczególnie dla zdjęć wielkoskalowych. Dla przykładu, przy zdjęciach w skali 1:5 000, prędkości samolotu $V = 220 \text{ km/h}$ i dopuszczalnym rozmazaniu $ds = 0,02 \text{ mm}$ taki maksymalny czas ekspozycji wyniósłby $1/600 \text{ s}$ (!). Jest to możliwe tylko przy wysokoczułym filmie - wysokoczułym, a więc gruboziarnistym - co prowadzi do obniżenia rozdzielczości. Od dawna czyniono próby kompensacji rozmazania w czasie ekspozycji, ale dopiero w latach 80-tych pojawiły się na rynku konstrukcje, które ten problem rozwiązały skutecznie. Są to tzw. kamery FMC:

- Zeiss Jena (od 1982): LMK, LMK1000, LMK 2000, LMK 3000;
- Carl Zeiss (od 1984): RMK TOP;
- Leica (od 1987): RC 20, RC 30;
- CNIIGAiK Moskwa: AFA-TK-10/18 (format 18x18 cm).

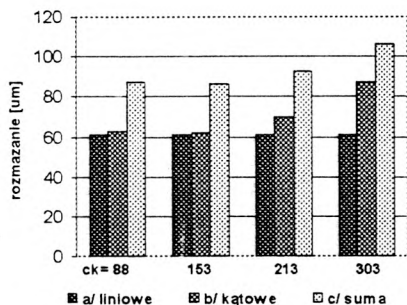
We wszystkich tych kamerach kompensacja rozmazania jest realizowana poprzez mechaniczny ruch płyty wypłaszczającej z filmem względem ramki tłowej, z prędkością równą prędkości obrazu w płaszczyźnie ramki tłowej. Stosowanie kamer FMC umożliwiło skokowy wzrost zdolności rozdzielczej zdjęć lotniczych dzięki kompensacji rozmazania spowodowanego ruchem samolotu. Kamery FMC kompensując rozmazanie umożliwiają stosowanie długich czasów ekspozycji (rzędu $1/200+1/100 \text{ s}$, a nawet $1/50 \text{ s}$), dają to możliwości stosowania drobnoziarnistych średnio- i niskoczułych filmów lotniczych, co sprzyja dalszemu wzrostowi rozdzielczości zdjęć.

Ocenia się, że jeśli rozmazanie obrazu jest mniejsze od połowy wartości rozdzielczości, to stosowanie kompensacji nie przynosi efektów. Może to mieć miejsce w przypadku zdjęć drobnoskalowych na średnioczułych filmach.

2.3. Stabilizacja kątowna kamery

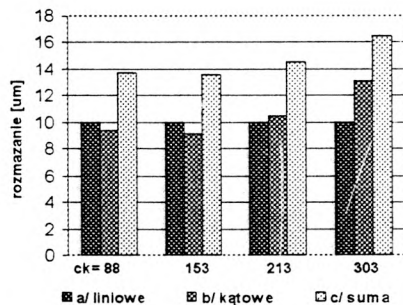
Po uporaniu się z rozmazaniem obrazu spowodowanym ruchem samolotu okazało się, że kolejną barierą na drodze dalszej poprawy zdolności rozdzielczej zdjęć są rozmazania obrazu spowodowane drganiami liniowymi i niestabilnością kątowną kamery. Szczególnie groźne okazały się drgania kątowne. Stanowiły one przeszkodę szczególnie w stosowaniu drobnoziarnistych filmów wymagających dłuższych czasów ekspozycji. Ograniczało to zalety kamer FMC. Pojawiły się nowe, stabilizowane zawieszania kamer pomiarowych:

- SM 2000: Carl Zeiss Jena (1990) do kamer serii LMK 2000;
- T-AS: Zeiss Oberkochen (1991) do kamery RMK TOP;
- PAV 30: Leica (1995) do kamery RC 30.



Rys.3. Przewidywane rozmaźnienie obrazu (zdjęcia 1:5 000, 141 mm od środka, prędkość lotu $V=220$ km/h, czas ekspozycji 1/200 s):

- a/ liniowe (spowodowane ruchem samolotu);
- b/ kątowe ($2^\circ/s$ wokół każdej osi, tj. dla typowej turbulencji);
- c/ efekt sumaryczny.



Rys.4. Szczętkowe rozmaźnienie obrazu dla kamery FMC na stabilizowanym podwieszeniu (warunki jak dla rys. 3):

- a/ liniowe (deniwelacje, błędy sterowania FMC);
- b/ kątowe ($0.3^\circ/s$ wokół każdej osi);
- c/ efekt sumaryczny.

Zawieszania te bazując na efekcie żyroskopowym utrzymują oś kamery w pionowym położeniu, uniezależniając ją od turbulentnych ruchów samolotu. Dodatkowo, nowsze konstrukcje amortyzatorów skuteczniej izolują kamerę od niskoamplitudowych, wysokoczęstotliwościowych liniowych drgań konstrukcji samolotu (drganie od silnika, drganie turbulentne, inne). Parametry wymienionych stabilizowanych zawieszek kamery są zbliżone. Dla PAV 30 wynoszą:

- stopień stabilizacji kątowej $\geq 10:1$ (typowo 30:1);
- błąd pionowania osi kamery 0.3° ;
- prędkość kątowa szczątkowych ruchów kątowych kamery $0.3^\circ/s$.

Kompensacja ruchu postępowego (kamery FMC) i ruchów kątowych (AMC) umożliwiły w zakresie zdjęć wielkoskalowych stosowanie filmów barwnych i średniczołych, drobnoziarnistych filmów czarno-białych (takich jak Kodak Plus-X 2402 czy Aviphot Pan 150 o rozdzielczości rzędu 80÷130 pl/mm dla dużego i 40÷55 pl/mm dla małego kontrastu, a w zakresie zdjęć średnioskalowych i drobnoskalowych, niskoczulych, superdrobnoziarnistych filmów (takich jak Kodak Panatomic-X 2412 czy Agfa Aviphot Pan 50 o rozdzielczości rzędu 200÷400 pl/mm dla dużego i 80÷120 pl/mm dla małego kontrastu). Dało to w sumarycznym efekcie skokowy wzrost zdolności rozdzielczej, szczególnie wielkoskalowych zdjęć lotniczych. Wpływ rozmaźnienia obrazu spowodowany ruchem samolotu oraz niestabilnością kątową kamery ilustruje rys. 3. Jest to ilustracja przypadku zdjęć wielkoskalowych (1:5 000) i typowych warunków lotu (prędkość 220 km/h, obroty kamery z prędkością $2^\circ/s$ wokół każdej osi, tj. dla typowej turbulencji lotu). Z rysunku widać, że dla czasu ekspozycji 1/200 s należy się spodziewać rozmaźnienia spowodowanego ruchem samolotu na poziomie 0,06 mm oraz obrotami kamery na poziomie 0,06÷0,09 mm (założono niezależność i przypadkowość każdego ruchu). Wartości te byłyby odpowiednio mniejsze przy krótszym czasie ekspozycji. Rysunek 4 ilustruje spodziewane szczątkowe rozmaźnienia obrazu dla tych samych warunków, ale w przypadku stosowania kamer FMC na stabilizowanym podwieszeniu. Założono stałą wartość niewyeliminowanego rozmaźnienia liniowego równą 0,01 mm z tytułu wpływu deniwelacji i błędów sterowania kompensacją. Widać, że sumaryczne nieostrości jakie mogą wystąpić na zdjęciu są na poziomie

0.014±0.016 mm. Porównanie wielkości dla obu przypadków daje pogląd o ilościowym przyroście jakości zdjęć w zakresie zdjęć wielkoskalowych. W zakresie zdjęć średnio- i drobnoskalowych ten przyrost jakości nie jest aż tak widoczny.

2.4. Systemy nawigacyjne oparte o GPS

Wszystkie kamery lotnicze nowej generacji (serii LMK, RMK TOP, RC 20 i 30) są przystosowane do współpracy z systemami nawigacyjnymi bazującymi na odbiornikach GPS. Powstały wyspecjalizowane systemy takie jak CCNS-4, T-Flight (Zeiss), ASCOT (Leica). Pozwalają one na zaprojektowanie misji fotolotniczej w formie analitycznej, a następnie jej realizację pod nadzorem systemu. Dawniej, samolot nad obiektem był nawigowany wizualnie, a kamera była wyzwalana przez regulator pokrycia, sterowany „ręcznie”. Przy nawigacji wizualnej trudno było utrzymać samolot na zaprojektowanej osi szeregu z dokładnością wymaganą dla dużych skal zdjęć, a położenie środków zdjęć w szeregu było poza kontrolą. W przypadku sprzężenia kamery z systemem nawigacyjnym, wyzwalenie kamery następuje w zaprojektowanych miejscach przestrzeni, a samolot jest prowadzony według wskazań systemu. Oznacza to, że środki zdjęć tworzą bardzo regularną siatkę, tzw. „blok symetryczny”. Odstępstwa faktycznego położenia zdjęć od zaprojektowanych są rzędu 30–70 m, co spełnia tolerancje nawigacyjne nawet dla największych skal. Z pomocą systemów nawigacyjnych sprzężonych z kamerą łatwo jest realizować tzw. „zdjęcia celowane”. Ma to szczególne znaczenie przy wykonawstwie zdjęć dla tworzenia ortofotomap. Planuje się wówczas wyzwolenie kamery nad środkami sekcji mapy, a ortofotomapa powstaje z przetworzenia tylko jednego zdjęcia, pokrywającego całą sekcję. Stosowanie systemów nawigacyjnych daje i inne korzyści:

- na etapie projektowania łatwiej jest zaprojektować optymalne położenie punktów polowej osnowy fotogrametrycznej (F-punktów);
- dzięki „symetrii” blok jest bardziej „sztywny” geometrycznie, w procesie aerotriangulacji wystarcza nieco mniej punktów przejściowych i fotopunktów;
- występuje mniej zdjęć odrzuconych z powodu niezachowania tolerancji nawigacyjnych (dotyczy szczególnie dużych skal);
- „symetria” bloku jest bardzo pożądana w procesie automatycznej aerotriangulacji.

Nową i bardzo doniosłą możliwością systemów nawigacyjnych opartych o GPS jest precyzyjny pomiar współrzędnych środków rzutów kamery w locie, w momencie wykonania zdjęcia. Jest to pomiar kinetyczny, różnicowy (technologia DGPS - differential GPS), odniesiony do 1÷2 aktywnych stacji naziemnych, położonych na znanych punktach. Intensywne badania i testy wykazały, że te naziemne odbiorniki GPS mogą być znacznie oddalone od obszaru fotografowanego. Można do tego celu wykorzystać permanentnie działające stacje GPS na danym obszarze. Błąd położenia kamery określony na tej drodze jest mniejszy od 0,1 m. Taka dokładność jest zadawalająca nawet dla dużych skal zdjęć. Znajomość współrzędnych środków rzutów zdjęć istotnie zmienia technologię aerotriangulacji. Zmiana ta wyraża się radykalnym zmniejszeniem liczby punktów osnowy polowej (mniej pomiarów terenowych, a w przypadku zdjęć wielkoskalowych, dodatkowo mniej punktów sygnalizowanych w terenie przed nalotem). Dla regularnego bloku zdjęć wystarcza praktycznie 4÷8 fotopunktów.

Należy dodać, że stosowanie technologii GPS zarówno dla nawigacji jak i precyzyjnego pomiaru położenia kamery już dawno z fazy eksperymentów przeszło w fazę operacyjną. Od początku lat 90-tych stało się standardową opcją produkcyjną. Wszystkie

składowe elementy technologii są dostępne na rynku komercyjnym (systemy nawigacyjne, software, pakiety wyrównania aerotriangulacji z opcją GPS). W Polsce systemy nawigacyjne oparte o GPS są stosowane od około 5 lat, a pomiar środków rzutów kamery w locie zastosowano po raz pierwszy w 1995 roku (obiekt „Poznań” i „Częstochowa”), oraz szerzej w 1997 roku, przy zdjęciach miast realizowanych w ramach programu PHARE. Pomiar położenia kamery podraża koszt zdjęć wielkoskalowych o około 10%÷40%. Są to koszty mniejsze od efektów na dalszych etapach wykorzystania zdjęć dla celów pomiarowych.

2.5. Pomiar orientacji kątowej kamery. Zintegrowane systemy nawigacyjne

Pomiar wszystkich elementów orientacji kamery w locie oznaczałby możliwość pomiarowego wykorzystania zdjęć bez osnowy polowej. Technologia DGPS pozwala na precyzyjne wyznaczenie współrzędnych kamery i znalazła już uznanie w produkcyjnej praktyce wykonawstwa zdjęć. A co z orientacją kątową kamery? Już od lat trzydziestych próbuje się określić w locie elementy kątowej orientacji kamery. Wyniki nie są zadawalające z punktu widzenia potrzeb pomiarowego opracowania fotogrametrycznego. Z pojawieniem się technologii GPS próbuje się wykorzystywać ją również do pomiaru kątów nachylenia kamery (a ściślej mówiąc samolotu), w tzw. metodzie „wieloantenowej”. Polega to na instalacji w samolocie 3÷4 anten GPS: na końcach skrzydeł i kadłuba. Z różnic współrzędnych anten można określić elementy kątowej orientacji bryły samolotu, utożsamiane z elementami orientacji samej kamery. Ta metoda pozwala określić te elementy z dokładnością $0.2^\circ \div 0.4^\circ$. Ta dokładność nie jest wystarczająca dla opracowań pomiarowych.

Dalszą poprawę dokładności i duże nadzieje wiąże się z tzw. zintegrowanymi systemami nawigacyjnymi. Jest to sprzężenie GPS-u z tanim systemem INS niższej klasy (INS - Inertial Navigation System: inercyjny system nawigacyjny, systemy INS wysokiej klasy są bardzo kosztowne). Oba systemy są komplanarne pod względem propagacji błędów. Systemy GPS wykazują bardzo wysoką i stabilną dokładność w długim przedziale czasu, ale są podatne na krótkookresowe zakłócenia (np. problem nieoznaczoności spowodowany krótkotrwałymi utratami łączności z satelitami na skutek przesłonięcia satelity skrzydłem samolotu w czasie manewru nawrotu między szeregami). Systemy INS odwrotnie, są dokładne i bardzo stabilne w krótkim przedziale czasu (do kilku sekund), w dłuższym przedziale ujawniają się ich duże błędy systematyczne (efekt dryftu żyroskopowego i systematyczne błędy akcelerometrów). Te charakterystyki powodują, że INS może być użyty do „wygładzenia” obserwacji GPS zakłóconych szumem i odwrotnie, system GPS może służyć do aktualizacji wskazań INS kompensując jego długookresowe błędy systematyczne. Eksperymentalne konstrukcje i testy wskazują na możliwość określenia elementów kątowej orientacji z dokładnością 0.01° dla pochylenia podłużnego i poprzecznego oraz 0.1° dla skręcenia kamery. Byłaby to dokładność zadawalająca dla pomiarowego wykorzystania zdjęć lotniczych. Jednak znaczenie zintegrowanych systemów nawigacyjnych można widzieć w innym kontekście, mianowicie dla ciągłej rejestracji elementów orientacji (położenie i kąty) lotniczych skanerów cyfrowych. Brak tych elementów jest obecnie przeszkodą w pomiarowym wykorzystaniu obrazów skanerowych.

3. Ocena jakości współczesnych zdjęć lotniczych

Pojemność informacyjna zdjęć lotniczych jest uwarunkowana ich zdolnością rozdzielczą. Zdolność rozdzielcza jest limitowana przez kilka czynników, a mianowicie:

- zdolność rozdzielczą obiektywu R_O ;
- zdolność rozdzielczą filmu R_F ;
- rozmazanie obrazu spowodowane ruchem postępowym samolotu R_{FM} ;
- rozmazanie obrazu spowodowane ruchami kątowymi kamery R_{AM} ;
- kontrast obiektu;
- wpływ atmosfery;
- zdolność rozdzielczą filmu duplikacyjnego (w przypadku duplikowania) R_D .

Znając wartości poszczególnych składowych procesu fotografowania wyrażone w parach linii/mm można określić wynikową zdolność rozdzielczą zdjęć R_{ZDJ} , wg uproszczonej zależności:

$$1/(R_{ZDJ})^2 = 1/(R_O)^2 + 1/(R_O)^2 + 1/(R_F)^2 + 1/(R_{FM})^2 + 1/(R_{AM})^2 + 1/(R_D)^2$$

Na końcowym efekcie tego procesu waży najbardziej jego „najślabsze ogniwo”. Tym słabym ogniwem było do niedawna rozmazanie obrazu spowodowane ruchem postępowym samolotu i ruchami kątowymi kamery. Było to szczególnie widoczne przy fotografowaniu wielkoskalowym. Wprowadzenie kamer FMC i stabilizowanych podwieszę zminimalizowało ten problem, oraz dodatkowo umożliwiło stosowanie bardziej drobnoziarnistych filmów. Poprawiła się jakość obiektywów. Wszystkie te okoliczności spowodowały skokowy wzrost zdolności rozdzielczej zdjęć lotniczych. Upraszczając zagadnienie, można oczekiwać, że współczesne zdjęcia lotnicze charakteryzują się rozdzielczością:

- około 55 par linii/mm dla obiektów kontrastowych (1 pl/mm = 18 μ m).
- około 40 par linii/mm dla obiektów o niskim kontraście (1 pl/mm = 25 μ m).

Są to wartości uśrednione dla całego formatu zdjęcia (AWAR).

Skanowanie zdjęć jest coraz częstszym etapem technologicznym. Powstaje pytanie: jak skanować zdjęcia (z jaką rozdzielczością), aby nie zdegradować ich oryginalnej jakości? Zgodnie z teorią próbkowania, zdjęcia o rozdzielczości R_{ZDJ} należałoby skanować z rozdzielczością [Light, 1996]:

$$1/(2 * \sqrt{2}) * R_{ZDJ} \leq \text{piksel skanowania} \leq 1/2 * R_{ZDJ}$$

Dla zdjęć o rozdzielczości np. 25 μ m (tj. 40 par linii/mm) oznacza to skanowanie z pikselem o wymiarach w zakresie 9-13 μ m). Tylko skanowanie z taką rozdzielczością pozwoli zachować pełny potencjał informacyjny zdjęcia.

Poprawa jakości zdjęć pod względem ich jakości geometrycznej i zdolności rozdzielczej spowodowała wzrost dokładności opracowania. Dla przykładu, dla zdjęć wielkoskalowych 1:2 500, przy pokryciu podłużnym 70%, pozyskanych kamerą RC30 z obiektywem 15 UAG-S i podwieszeniem PAV 30, na średnioczułym filmie Kodak

Plus-X 2402, uzyskano szacunkowe błędy opracowania na punktach kontrolowanych [Schlienger, Kom. I]:

$$\begin{aligned}\sigma_{E,N}: & \pm 1.5 \text{ cm} \quad (6 \mu\text{m w skali zdjęcia}) \\ \sigma_H: & \pm 3.0 \text{ cm} \quad (0.08\% \text{ wysokości lotu})\end{aligned}$$

Są to błędy opracowania na poziomie dokładności punktów osnowy geodezyjnej. Dokładności te uzyskano dla długiego czasu ekspozycji (1/100 s), przy sztucznie wywołanych silnych turbulencjach lotu.

Zbliżone dokładności (odniesione do skali zdjęcia) uzyskano dla zdjęć średnio- i drobnoskalowych. Dla zdjęć 1:66 200, obiektywu 15/4 UAG-S i filmu superdrobnoziarnistego Panatomic-X 2412, na naturalnych punktach kontrolowanych uzyskano dokładności [Leica Production Information. Test with ...]:

$$\begin{aligned}\sigma_E: & \pm 0.61 \text{ m} \quad (9 \mu\text{m w skali zdjęcia}) \\ \sigma_N: & \pm 0.55 \text{ m} \quad (8 \mu\text{m w skali zdjęcia}) \\ \sigma_H: & \pm 0.54 \text{ m} \quad (0.05\% \text{ wysokości lotu})\end{aligned}$$

W cytowanych opracowaniach zdjęcia wykonywano przy maksymalnym otworze obiektywu (f: 4). Do opracowania zdjęć nowej generacji autorzy zalecają zwiększone powiększenie układu optycznego autografu do około 18-krotnego.

4. Obrazowanie w zakresie optycznym z pulapu satelitarnego

Obrazowanie powierzchni Ziemi z kosmosu datuje się od umieszczenia na orbitach wokółziemskich pierwszych sztucznych satelitów i załogowych statków kosmicznych. Stale rozwijają się techniczne środki obrazowania powierzchni ziemi, pozyskuje się coraz doskonalsze obrazy. Doskonalsze, to znaczy o lepszej jakości radiometrycznej, większej stabilności geometrycznej i większej zdolności rozdzielczej. Obrazy te wykorzystywane są ogólnie mówiąc do monitorowania obiektów i zjawisk zachodzących na powierzchni ziemi i kontroli dynamiki tych zjawisk. Rozwinęła się teledetekcja satelitarna. Celem tego rozdziału nie jest przegląd technicznych możliwości satelitarnego obrazowania, lecz jedynie ocena przydatności obrazów dla opracowań fotogrametrycznych, głównie produkcji i aktualizacji map topograficznych. Można tu wyróżnić:

- fotograficzne kamery satelitarne dostarczające tradycyjne zdjęcia fotograficzne;
- elektrooptyczne skanery, dostarczające obrazy w postaci cyfrowej.

Kamery fotograficzne dostarczają obrazy w formie analogowej (na filmie srebrnym), o wysokiej jakości geometrycznej. Znane metody i technologie fotogrametrycznego opracowania mają tu bezpośrednie zastosowanie. Warto tu zwrócić uwagę na oferowane obecnie rosyjskie zdjęcia kosmiczne wykonane systemem SPIN-2 na który składa się wielkoformatowa kamera pomiarowa TK-350 i kamera panoramiczna KVR-1000 (tab.1). Jedno zdjęcie pomiarowe pokrywa 7 zdjęć panoramicznych. Kamera pomiarowa zapewnia stereoskopię i najwyższą jakość geometryczną, a kamera panoramiczna, poprzez bardzo wysoką zdolność rozdzielczą zapewnia odpowiedni zasób treści. Połączenie tych źródeł

umożliwia produkcję mapy topograficznej w skali 1:50 000 bez fotopunktów i ortofotoplanów w skali 1:10 000 [Lavrov, I; SPIN-2: Internet]. Pomimo oczywistych zalet zdjęcia satelitarne jednak się nie rozpowszechniły. Bariery są koszty i mała operatywność takich systemów (trzeba wystrzelić kamerę z filmem, a następnie nasświetlony film ściągnąć na ziemię). Nie wydaje się, aby tą drogą poszedł rozwój obrazowania ziemi z kosmosu.

Wybrane satelitarne systemy obrazowania w zakresie optycznym

Kamery fotograficzne							
Parametr	MC Zeiss	LFC Itek	KFA-1000	SPIN - 2			
				TK-350	KVR-1000		
Format zdjęcia [mm]	230x230	240x480	300x300	300x450	180x720		
Odł. obrazowa [mm]	305	305	1000	350	1000		
Wysokość orbity	250 km	250 km	200 km	220 km			
Skala	1:800 000	1:800 000	1:200 000	1:630 000	1:220 000		
Rozdzielczość	27 m	10 m	5-10 m	10 m	2 m		
Dokładność opracowania	Syt.	7 m	5 m	4 m	15-20 m	7-10 m	
	Wys.	20 m	15 m	15 m	5-7 m		
Skanery elektrooptyczne							
Parametr	SPOT		Landsat		MOMS-02		
	P	MS	MSS	TM	kanal 1-4	kanal 5	kanal 6-7
Piksel	10 m	20 m	79 m	30 (120) m	13,5 m	4,5 m	13,5
Liczba kan. spektr.	1	3	4	6	4	1	1
Obrazowany pas	60 km	60 km	185 km	185 km	78 km	37 km	78 km
Stereo	w poprzek orbity		nie		nie		wzd. orb.

W przeciwieństwie do kamer fotograficznych ciąglemu udoskonaleniu podlegają i rozwijają się elektrooptyczne skanery. Sensorem w takim skanerze jest linijka czułych detektorów (CCD) umiejscowiona w płaszczyźnie tłowej kamery i zorientowana prostopadle do kierunku lotu. Długość linijki detektorów, odległość obrazowa układu optycznego i wysokość lotu determinują szerokość obrazowanego pasa. Obraz tworzy się w sposób ciągły, w miarę ruchu postępowego satelity. Mówimy, że jest to obraz dynamiczny, w odróżnieniu od kadru tradycyjnego zdjęcia nasświetlonego w ułamku sekundy. Geometria obrazu w poprzek lotu (tj. wzdłuż linijki detektorów) jest zgodna z rzutem środkowym, wzdłuż osi lotu jest to rzut ortogonalny. Na to nakładają się zniekształcenia spowodowane ciągłą zmianą położenia i orientacji kątowej, w rezultacie geometria obrazu skanerowego jest bardziej złożona i zmienna w czasie. Należy jednak zauważyć, że lot satelity jest bardzo stabilny, dzięki temu skanerowy obraz satelitarny charakteryzuje się wewnątrznie spójną geometrią, a zmienną w czasie dynamikę obrazu daje się opisać stosunkowo prostymi funkcjami. Miarą zdolności rozdzielczej obrazu skanerowego są wymiary jednostkowego elementu rejestrującego promieniowanie, lub jego obrazowego odpowiednika - piksela podanego w mierze terenowej. Tabela 1 prezentuje parametry kilku najważniejszych skanerów satelitarnych. Skaner może pracować w jednym kanale spektralnym (tryb Pan - obraz czarno-biały), lub synchronicznie w kilku (tryb MS - obraz barwny). Z punktu widzenia potrzeb kartograficznych szczególnie interesujące i perspektywiczne są skanery z trzema linijkami detektorów, obrazującymi ten sam pas terenu: jedna obrazuje „do przodu”, druga „nadiowo”

- spodziewana wysoka dokładność sytuacyjna i wysokościowa opracowania obrazów.

Planowane satelitarne systemy obrazowania w zakresie optycznym

Korporacja „System”	Earth Watch „Early Bird”		Earth Watch „Quick Bird”		Orbital Sciences „Orb View-3”		Space Imaging	
	Pan	MS	Pan	MS	Pan	MS	Pan	MS
Typ sensora	kamera CCD (tablica sensorów)		skaner CCD (linijka sensorów)		skaner CCD (linijka sensorów)		skaner CCD (linijka sensorów)	
Piksel	3 m	15 m	1 m	4 m	1 m i 2 m	8 m	1 m	4 m
Pasma spektr. (µm)	.45-.80	.50-.59 .61-.68 .79-.89	.45-.90	.45-.52 .53-.59 .63-.69 .70-.90	.50-.90	.45-.52 .52-.60 .63-.69 .76-.90	.45-.90	.45-.52 .52-.60 .63-.69 .76-.90
Stereo	wzdłuż orbity		wzdłuż orbity		wzdłuż orbity		wzdłuż orbity	
Odch. pola widz. - wzdłuż orbity	±30°		±30°		±45°		±45°	
- w poprzek orb.	±30°		±30°		±45°		±45°	
Obrazowany pas	6x6 km	30x30km	36 km		8 km		12 km	
Pozycjonowanie	GPS		GPS		GPS		GPS	
Orientacja kat.	nie		nie		tak		tak	
Dokładność: - z F p-tami	sył. 6 m	wys. 4 m	sył. 2 m	wys. 3 m	sył. 2 m	wys. 3 m	sył. 2 m	wys. 3 m
- bez F p-tów	-	-	-	-	12 m	8 m	12 m	8 m
Pan - zakres panchromatyczny				MS - zakres wielospektralny				

Według ocen autorów, np. obrazy "Orb View - 1" umożliwią tanie tworzenie map topograficznych w skali 1: 24 000 z cięciem warstwicowym 6 m, oraz ortofotomap w jeszcze większych skalach [Fritz, 1996]. Biorąc pod uwagę wcześniej prezentowane kryteria przydatności obrazów, należałoby przewidywać, że obrazy z pikselem o wymiarach terenowych 1 m zawierają zasób treści odpowiadający mapie w skali 1: 10 000. Należy jednak mieć na uwadze, że oceny te są ekstrapolacją dotychczasowych doświadczeń w zakresie fotogrametrycznego opracowania obrazów satelitarnych. Mowa bowiem o obrazach o rozdzielczości będącej blisko teoretycznej granicy, limitowanej przez zjawisko dyfrakcji światła. Już wkrótce praktyka zweryfikuje te zapowiedzi. Przewiduje się rozwój rynku komercyjnego na te obrazy i opracowania (GIS, kartografia, surowce naturalne, środowisko, monitorowanie ziemi). Koszt obrazów na jednostkę powierzchni będzie około 2 razy niższy niż zdjęć lotniczych. Biorąc pod uwagę wcześniej zasygnalizowane zalety obrazów satelitarnych ocenia się, że tworzony właśnie komercyjny przemysł obserwacji ziemi w zakresie optycznym może przejąć około 50% rynku zdjęć lotniczych [Fritz, 1996]. Takie są oczekiwania i zapowiedzi autorów planowanych przedsięwzięć. Jeśli uznać je nawet za nieco przesadzone, to i tak stoimy niewątpliwie w przededniu nowej ery obrazowania satelitarnego.

7. Perspektywy zastąpienia kamery lotniczej kamerą cyfrową

Wysokorozdzielcze skanery elektrooptyczne z linijką detektorów z dużym powrotem używane się do obrazowania powierzchni ziemi z kosmosu. Systemy te stale się rozwijają, również w kierunku pozyskiwania obrazów stereoskopowych o wysokiej jakości pomiarowej. Standardem są tu skanery z linijką detektorów liczącą 6÷8 tysięcy elementów.

Dostępne są linijki liczące 12 tys. elementów [Claus, 1995]. Otwarta i realna jest droga podwojenia tej liczby. Dość naturalną byłaby próba umieszczenia takich systemów obrazowania na pokładzie samolotu. Jakie są przeszkody w przeniesieniu tych systemów i dobrodziejstw obrazowania elektronicznego na pułap lotniczy? Skoro fotogrametria idzie w kierunku rozwoju metod i technologii cyfrowych, to jakie są perspektywy zastąpienia tradycyjnej kamery analogowej kamerą cyfrową?

Tradycyjna kamera lotnicza charakteryzuje się bardzo wysoką zdolnością rozdzielczą i znakomitą jakością geometryczną obrazu w całym kadrze. Skaner elektrooptyczny z linijką detektorów, aby dać obraz porównywalny pod względem rozdzielczości, musiałby mieć linijkę złożoną z około 23 tysięcy elementów. Zakładając, że byłaby to kamera panchromatyczna (czarno-biały obraz) z rejestracją wartości radiometrycznej piksela na 8 bitach oraz prędkości samolotu $V = 150$ węzłów (277 km/h), oznaczałoby to konieczność transmisji i rejestracji danych z następującą prędkością:

- dla obrazowania ekwiwalentnego skali 1: 40 000: 35,5 Mb/s;
- dla obrazowania ekwiwalentnego skali 1: 26 000 (np. zdjęcia Phare): 54,5 Mb/s;
- dla obrazowania ekwiwalentnego skali 1: 5 000 (np. zdjęcia Phare): 284 Mb/s.

Dla obrazowania stereoskopowego (skaner z trzema linijkami) te wartości należałoby potroić, a dla obrazowania barwnego pomnożyć przez kolejne 3 razy. O ile linijka detektorów złożone z 23 000 sensorów jest już do pomyslenia na obecnym poziomie technologicznym, to transmisja i zapis danych ze wskazanymi prędkościami leży poza obecnymi możliwościami.

Drugi problem, jaki się pojawia, to stabilność geometryczna obrazu skanerowego. Przy obrazowaniu z kosmosu obraz charakteryzuje się wysoką jakością geometryczną dzięki bardzo stabilnemu ruchowi satelity. Problem ten ma się zupełnie inaczej w przypadku lotu samolotu. Niestabilność liniowa i kątowa ruchu powodowałyby „przerwy” i „nakładanie się” obrazów poszczególnych linii obrazu. Konieczna byłaby precyzyjna stabilizacja kamery oraz ciągła rejestracja elementów orientacji (trajektorii lotu i elementów kątowych). Wiąże się w tym zakresie nadzieje ze „zintegrowanymi systemami nawigacyjnymi”. Jeśli przyjąć (jak poprzednio) piksel o wymiarach $10 \mu\text{m}$ i dopuścić błąd położenia z tytułu błędów pomiaru kątów nachylenia skanera na poziomie 20% wymiarów piksela, to łatwo obliczyć, że rejestracja tych kątów musiałaby być na poziomie dokładności równej 3" (trzy sekundy kątowe). To również przewyższa obecne możliwości.

Problemy związane ze stabilnością geometryczną obrazu są nieobecne w przypadku kamery CCD z prostokątną matrycą sensorów. Jest to - z geometrycznego punktu widzenia - cyfrowy odpowiednik kamery analogowej. Obecnie osiągalne matryce zawierają do 5120×5120 elementów [Light, 1996], tymczasem matryca ekwiwalentna - pod względem rozdzielczości - kamery lotniczej musiałaby zawierać około $23\,000 \times 23\,000$ elementów. Nic nie zapowiada pojawienia się takich sensorów w najbliższym czasie. W przypadku kamery CCD z tablicą sensorów nadal pozostają aktualne ograniczenia związane z transmisją i zapisem danych.

Przedstawione problemy stanowią wyzwanie dla producentów kamer cyfrowych. Tymczasem, w zakresie potrzeb pomiarowych, stan obecny wytyczają cyfrowe stacje fotogrametryczne, bazujące na skanowanych zdjęciach lotniczych. Pozycja stale doskonalonych, tradycyjnych kamer lotniczych na dzień dzisiejszy jest niezagrażona. Nie wydaje się, aby stan ten mógł zmienić się dramatycznie w ciągu najbliższych 10 lat. W międzyczasie będą trwały dalsze intensywne badania i doskonalenie kamer cyfrowych,

które doprowadzą do prawdopodobnie nieuniknionego przejścia na technologie wyłącznie cyfrowe.

8. Podsumowanie

- 1). W latach dziewięćdziesiątych nastąpił skokowy wzrost jakości lotniczych kamer pomiarowych. Stało się tak za sprawą:
 - polepszenia jakości obiektywów;
 - stosowania systemów kompensacji rozmazania obrazu spowodowanego ruchem samolotu (system FMC);
 - konstrukcji nowych, stabilizowanych zawiesznień (AMC), stosowania technologii GPS dla nawigacji, sterowania pracą kamery i precyzyjnego określenia położenia środka rzutów w locie.
- 2). Wzrost jakości kamer spowodował wyraźny wzrost jakości zdjęć lotniczych, szczególnie ich zdolności rozdzielczej.
- 3). Stoimy w przededniu nowej ery obrazowania satelitarnego. Wkrótce będą dostępne obrazy stereoskopowe o rozdzielczości nawet do 1 m. Zmieni to podejście do problemu produkcji i aktualizacji średnioskalowych map topograficznych.
- 4). Rozwój elektrooptycznych skanerów cyfrowych z linijką detektorów, czy kamer CCD z prostokątną matrycą obrazową CCD, prawdopodobnie nie wyprze w najbliższej dekadzie tradycyjnych pomiarowych kamer lotniczych.

Literatura:

Claus M., 1995, *Demands on Electro-optical Cameras for Sensing and Mapping*, Photogrammetric Week 1995, Wichmann-Verlag

Fritz L., 1996 *The Era of Commercial Earth Observation Satellites*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, January 1996

Leica Production Information, Test flight with the new lens cone Leica 30/4 NAT-S

Leica Production Information. Test with the new Leica 15/4 UAG-S. Results of High-Altitude Photographs with Leica RC30 and 15/4 UAG-S Lens Cone.

Light D. L., 1993, *The National Aerial Photogrammetric Program as a Geographic Information System Resource*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 59 (1993), No 1

Light D. L., 1996, *Film Cameras or Digital Sensor? The Challenge Ahead for Aerial Imaging*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 62 (March 1996)

Orbimage: Internet, <http://www.orbimage.com>

Schiewe J., Siebe E., 1994, *Revision of Cartographical Databases Using Digital Orthoimages*, ISPRS Comm. III Symposium, Sept 5-9, 1994, Munich, Germany.

Schiewe J., 1995, *Cartographical Potential of MOMS-02/D2 Image Data*, Photogrammetric Week 1995, Wichmann-Verlag.

Space Imaging: Internet, <http://www.spaceimage.com>

SPIN-2: Internet, <http://www.spin-2.com>

Torlegard K., 1992, *Sensors for Photogrammetric Mapping: Review and Prospects*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 47 (1992)

Uwaga

Odsyłacze bibliograficzne z liczbą rzymską odnoszą się do spisu opracowań prezentowanych w czasie Kongresu, który zamieszczony jest na końcu niniejszego zeszytu. Rzymska liczba podana po nazwisku autora określa numer komisji do której należy cytowany tytuł.

Recenzował: prof. dr hab. inż. Józef Jachimski