



You have downloaded a document from
RE-BUŚ
repository of the University of Silesia in Katowice

Title: Synergia systemów obrazowania powierzchni ziemi

Author: Leszek Kolondra

Citation style: Kolondra Leszek. (2005). Synergia systemów obrazowania powierzchni ziemi. "Geoinformatica Polonica" (T. 7 (2005), s. 45-99).



Uznanie autorstwa - Użycie niekomercyjne - Bez utworów zależnych Polska - Licencja ta zezwala na rozpowszechnianie, przedstawianie i wykonywanie utworu jedynie w celach niekomercyjnych oraz pod warunkiem zachowania go w oryginalnej postaci (nie tworzenia utworów zależnych).



UNIwersYTET ŚLĄSKI
W KATOWICACH



Biblioteka
Uniwersytetu Śląskiego



Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego

ZDZISŁAW KURCZYŃSKI¹

SYNERGIA SYSTEMÓW OBRAZOWANIA POWIERZCHNI ZIEMI

Słowa kluczowe:

systemy obrazowania Ziemi, kamera cyfrowa, VHRS, potencjał kartograficzny, zdolność rozdzielcza

Abstrakt

Opracowania fotogrametryczne przez dziesięciolecia bazowały na tradycyjnych zdjęciach lotniczych. Sytuacja ta ulega gwałtownej zmianie w ostatnich latach. Staje się tak za sprawą pojawienia się nowych technicznych środków obrazowania Ziemi, a mianowicie lotniczych kamer cyfrowych oraz wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych, o potencjale kartograficznym porównywalnym z potencjałem drobnoskalowych zdjęć lotniczych. Nastąpiło więc zbliżenie – pod względem technicznym – możliwości obrazowania z pulapu lotniczego i satelitarnego.

W opracowaniu zaproponowano system pojęć oraz wskaźników ilościowych dla oceny potencjału kartograficznego wieloźródłowych danych, tj. tradycyjnych zdjęć lotniczych, obrazów cyfrowych pozyskiwanych lotniczymi kamerami cyfrowymi oraz obrazów satelitarnych o bardzo dużej rozdzielczości. Umożliwiło to porównanie danych wieloźródłowych oraz dało podstawę oceny przydatności konkretnych zdjęć i obrazów dla realizacji postawionych zadań pomiarowych.

Podjęta w pracy problematyka ma praktyczne odniesienie do obecnych uwarunkowań rozwoju krajowych systemów GIS oraz ich dalszych perspektyw.

SYNERGY OF EARTH SURFACE IMAGING SYSTEMS

Key words:

Earth surface imaging systems, digital camera, VHRS, cartographic potential, resolution

Abstract

For a long time, photogrammetric projects were based on conventional aerial photographs. This situation has been rapidly changed recently. This results from development of new Earth surface imaging systems, including aerial digital cameras and high resolution satellite images, which cartographic potential is comparable with small scale aerial photographs. Thus, from the technical point of view, imaging possibilities from satellite platforms are approaching those of aerial ones.

The discussed publication proposes a system of terms and quantitative indices which can be used for evaluation of the cartographic potential of multi-source data, i.e. conventional aerial photographs, digital images acquired with aerial digital cameras and very high resolution satellite images. This allowed for comparing various systems and became the basis for evaluation of the usefulness of particular photographs and images for implementation of specified measurement tasks.

Issues discussed in the publication may be practically referred to the existing conditions of national GIS systems development as well as to their future perspectives.

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji, Instytut Fotogrametrii i Kartografii, Warszawa

I. Wprowadzenie

Rozwój technik obrazowania Ziemi, a w ślad za tym i rozwój metod opracowania i zastosowań pozyskanych zobrazowań szedł w ostatnich dziesięcioleciach w dwóch, wyraźnie rozłącznych kierunkach:

- fotografowanie lotnicze, głównie dla zastosowań topograficznych (mapy, ortofotomapy, Numeryczny Model Terenu (NMT)) i w mniejszym stopniu dla zastosowań interpretacyjnych,

- obrazowanie satelitarne (i w znacznie mniejszym stopniu fotografowanie satelitarne), głównie dla monitorowania zjawisk zachodzących na powierzchni globu, wizualizowane w formie map tematycznych drobnego i średnioskalowych, ilustrujących obiekty i zjawiska będące przedmiotem zainteresowania. Rozwój technik obrazowania satelitarnego i metod opracowania doprowadził do powstania i rozwoju teledetekcji satelitarnej – z czasem samodzielnej dyscypliny naukowej i aplikacyjnej.

Zgodnie z dotychczasową tradycją i praktyką kształcono dwie grupy specjalistów, wykorzystujących zdjęcia lotnicze i obrazy satelitarne dla różnych zastosowań:

- fotografatorów wykorzystujących zdjęcia lotnicze dla zastosowań pomiarowych, tworzących na ich bazie takie produkty, jak NMT, ortofotomapy czy mapy wektorowe,

- specjalistów interpretacji i teledetekcji zorientowanych na ekstrakcję informacji jakościowych z obrazów, tj. na interpretacyjne zastosowania, owocujące tematycznymi opracowaniami.

Specjaliści z obu grup działają zwykle oddzielnie i wywodzą się z różnych środowisk akademickich i zawodowych. Rozłączność ta jest często większa, niż by to było uzasadnione merytorycznie.

Obecny etap rozwoju wyraźnie pokazuje, że powyższy podział na kierunek pomiarowy i interpretacyjny przestaje być adekwatny do rzeczywistości. Następuje scalenie dotychczas rozbieżnych technik i pułapów, z których obrazowana jest Ziemia. Ta unifikacja dotyczy:

- technicznych środków obrazowania (kamery analogowe, kamery cyfrowe, inne niefotograficzne techniki obrazowania),

- pułapów obrazowania (pułap lotniczy i satelitarny),

- zakresów spektralnych obrazowania (zakres panchromatyczny i wielospektralny).

W zakresie lotniczego i satelitarnego obrazowania powierzchni Ziemi w ostatnich kilku latach zaistniała jakościowo nowa sytuacja. Proces tych zmian trwa nadal. Ta nowość przejawia się w kilku trendach:

1. Zaistnienie w 1999 r. komercyjnych satelitarnych systemów obrazowania powierzchni Ziemi o bardzo dużej rozdzielczości (określane również VHRS – Very High Resolution Satellites – satelity bardzo dużej rozdzielczości, lub jako systemy „metrowe”, tj. z pikselem zbliżonym do 1 metra lub mniej). Zapowiadany jest rozwój tych systemów idący m.in. w kierunku dalszego zwiększania rozdzielczości. Zdolność rozdzielcza tych systemów zbliżyła się do rozdzielczości tradycyjnych zdjęć lotniczych, a w zakresie zdjęć drobnoskalowych nastąpiło zrównanie rozdzielczości. Stworzyło to całkowicie nową sytuację współistnienia i konkurencji danych obrazowych z pułapu lotniczego i satelitarnego.

2. Pojawienie się na rynku po 2000 r. lotniczych kamer cyfrowych. Kamery te powoli wchodzi na rynek obrazowania z pułapu lotniczego i będą wypierać tradycyjne kamery fotogrametryczne na film zwojowy.

Znamienną cechą lotniczych kamer cyfrowych i systemów satelitarnych dużej rozdzielczości są techniczne możliwości jednoczesnego obrazowania w kilku zakresach spektralnych z podczerwienią termalną włącznie. Rozwiązanie takie pod względem technicznym góruje nad równoczesnym wykorzystaniem wszystkich typów emulsji stosowanych w fotografowaniu lotniczym: czarno-białej panchromatycznej, czarno-białej w podczerwieni, barwnej w barwach rzeczywistych i barwnej w podczerwieni. Separacja zakresów spektralnych (barw), zakres dynamiczny i rozdzielczość radiometryczna obrazowania cyfrowego (lotniczego i satelitarnego) znacznie przewyższają możliwości tradycyjnych filmów zwojowych. Ma to zasadnicze znaczenie dla zastosowań obrazów do opracowań interpretacyjnych i tematycznych. Obrazy takie – pod względem technicznym – w jednakowym stopniu spełniają wymagania

zarówno opracowań o charakterze pomiarowym, jak i potrzeb teledetekcji.

Wprowadzone rozwiązania umożliwiają zaspokojenie potrzeb związanych ze wzrostem zapotrzebowania na informację obrazową i gwałtownym rozwojem różnych aplikacji Systemów Informacji Geograficznej – GIS (GIS – Geographical Information System).

Zapoczątkowana nowa sytuacja w zakresie obrazowania lotniczego i satelitarnego rodzi wiele pytań natury technicznej, ale również pytań o skutki ekonomiczne dalszego rozwoju technik obrazowania i opracowania danych obrazowych. Na rynku usług fotolotniczych i fotogrametrycznych budzi to nawet pewne zaniepokojenie o najbliższą przyszłość. Te pytania i wątpliwości wynikają również z braku jasnych i powszechnie akceptowalnych podstaw umożliwiających ocenę potencjału pomiarowego i interpretacyjnego każdego z trzech głównych, dostępnych obecnie źródeł obrazowania, umożliwiających porównanie i ocenę przydatności danych dla realizacji konkretnych zadań pomiarowych. Można tu wskazać m.in. następujące zasadnicze kwestie natury technicznej dotyczące:

- porównania jakości geometrycznej i interpretacyjnej obrazów pozyskanych lotniczymi kamerami cyfrowymi ze zdjęciami tradycyjnymi,

- oceny perspektyw zastąpienia tradycyjnych kamer przez kamery cyfrowe,

- oceny potencjału pomiarowego i interpretacyjnego obrazów satelitarnych o bardzo dużej rozdzielczości i porównania tego potencjału ze zdjęciami lotniczymi.

Na powyższe pytania natury technicznej nakładają się wątpliwości środowiska geoinformatycznego dotyczące zapotrzebowania na zdjęcia i obrazy z pułapu lotniczego w świetle zaistnienia obrazów satelitarnych o bardzo dużej rozdzielczości oraz konsekwencji technicznych i ekonomicznych powstałych w wyniku wprowadzenia do produkcji cyfrowych obrazów lotniczych i satelitarnych.

Przedstawiona sytuacja zmienia się dynamicznie, pojawiają się różne oceny przedstawionych problemów i różne scenariusze ich rozwoju. Znamienna jest rozbieżność ocen dotyczących potencjału kartograficznego wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych i porównania tego potencjału ze zdjęciami lotniczymi. To zróżnicowanie

oceny może po części wynikać z braku doświadczeń produkcyjnych wykorzystania nowych źródeł obrazowania powierzchni Ziemi oraz braku uporządkowanych pojęć umożliwiających porównywanie wieloźródłowych danych obrazowych. Nie bez wpływu na tę sytuację są działania firm komercyjnych promujących nowe produkty, wzmagające „szum” informacyjny wokół przedstawionych kwestii.

Przedstawione problemy stały się bardzo aktualne również w kraju. Wynika to z pewnych opóźnień w pokryciu powierzchni kraju takimi podstawowymi produktami, jak Numeryczny Model Terenu, cyfrowa ortofotomapa czy wektorowa mapa numeryczna. Trwają obecnie intensywne prace w tym zakresie. Tworzona jest ortofotomapa o zasięgu krajowym dla potrzeb Systemu Identyfikacji Działek Rolnych – LPIS, składowej Zintegrowanego Systemu Zarządzania i Kontroli – IACS (LPIS – Land Parcel Identification System, IACS – Integrated Administration Control System), wdrażana jest Baza Danych Topograficznych (TBD), w perspektywie czekają prace nad modernizacją katastru. Uruchomiono Centrum Operacji Regionalnych – ROC dla odbioru i obróbki obrazów satelitarnych (tzw. Stacja ROC – Regional Operations Centre). W tej sytuacji nie może dziwić, że rozważane są różne scenariusze techniczne realizacji pilnych bieżących i przyszłych zadań na poziomie ogólnokrajowym.

Postęp w zakresie obrazowania cyfrowego z pułapu lotniczego oraz zaistnienie satelitarnych systemów o bardzo dużej rozdzielczości (tj. zbliżonej do 1 m w zakresie panchromatycznym) powodują, że – w kategoriach technicznych – nastąpiło zbliżenie i częściowe pokrycie się potencjału pomiarowego i interpretacyjnego trzech, dotąd rozbieżnych, źródeł obrazowania powierzchni Ziemi:

- zdjęć lotniczych wykonywanych współczesnymi kamerami analogowymi (na film zwojowy),

- obrazów cyfrowych pozyskiwanych lotniczymi kamerami cyfrowymi,

- obrazów satelitarnych o bardzo dużej rozdzielczości.

Dalszy rozwój przyniesie dalsze zbliżenie i nałożenie technicznych możliwości wymienionych źródeł. W opinii autora niniejszej publikacji nie jest uzasadnione

rozłączne postrzeganie tych źródeł. Tworzą one wzajemnie komplementarny układ wieloźródłowych danych obrazowych, przydatny dla opracowań zarówno pomiarowych, jak i teledetekcyjnych. Takie postrzeganie wymaga jednak zbudowania spójnego systemu oceny jakości i porównania kamer analogowych i cyfrowych oraz pułapów obrazowania: lotniczego i satelitarnego. Taki spójny system pozwoli ocenić przydatność konkretnych zdjęć lub obrazów dla realizacji postawionych zadań pomiarowych czy też pozwoli zaprojektować pożądane parametry zdjęć lub obrazów umożliwiających realizację takich zadań.

Publikacja niniejsza jest próbą stworzenia takiego systemu pojęć oraz technicznych i technologicznych relacji dla oceny potencjału kartograficznego wieloźródłowych danych. Cel ten wymaga rozwiązania szeregu zadań cząstkowych:

- oceny jakości współczesnych, tradycyjnych zdjęć lotniczych,
- oceny stanu zaawansowania budowy lotniczych kamer cyfrowych i perspektyw zastąpienia nimi kamer tradycyjnych,
- zdefiniowania pojęcia zdolności rozdzielczej zdjęć analogowych i obrazów cyfrowych oraz określenia relacji między nimi,
- porównania pojemności informacyjnej zdjęć analogowych i cyfrowych,
- oceny stanu rozwoju wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych,
- oceny potencjału kartograficznego (pomiarowego i interpretacyjnego) wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych oraz porównania tego potencjału ze zdjęciami lotniczymi,
- określenia wymaganych parametrów obrazów cyfrowych (lotniczych i satelitarnych) dla realizacji konkretnych zadań pomiarowych.

2. Stan obecny i perspektywy rozwoju analogowych kamer topograficznych

Lata rozwoju lotniczych kamer topograficznych to ciągle ich doskonalenie, możliwe dzięki rozwojowi optyki, mechaniki precyzyjnej, elektroniki i chemii. Ten ewolucyjny rozwój doprowadził w latach 80. do

konstrukcji, które – wydawało się – zbliżyły się do kresu możliwości dalszego rozwoju. W drugiej połowie lat 80. dzięki wprowadzeniu nowych, wspomaganych komputerowo metod projektowania układów optycznych, a także rozwojowi mikroelektroniki, powstały nowe konstrukcje kamer lotniczych. Są one na tyle różniące się od poprzednich, że uzasadnione jest określanie ich jako **kamery lotnicze nowej generacji**. Tę nową jakość uzyskano poprzez zastosowanie w nich:

- nowej generacji obiektywów charakteryzujących się istotnym wzrostem zdolności rozdzielczej,
- systemu FMC (FMC: Forward Motion Compensation) – kompensującego ruch postępowy samolotu,
- systemu AMC (AMC: Angular Motion Compensation) – kompensującego rozmazanie obrazu spowodowane ruchami kątowymi kamery,
- systemu AEC (AEC: Automatic Exposure Control) – zapewniającego poprawną ekspozycję zdjęć,
- systemu nawigacyjnego GPS pozwalającego na sterowanie pracą kamery i precyzyjny pomiar współrzędnych środków rzutów w locie lub zintegrowanego systemu GPS/INS (INS: Inertial Navigation System – inercyjny system nawigacyjny) pozwalającego na pomiar wszystkich elementów orientacji zewnętrznej kamery w locie.

Zastosowane rozwiązania pozwoliły na znaczne podwyższenie jakości zdjęć i ułatwiły ich opracowanie. Do kamer nowej generacji zaliczane są kamery:

- Zeiss Jena (od 1982): LMK, LMK 1000, LMK 2000, LMK 3000,
- Carl Zeiss, obecnie Z/I Imaging (od 1984): RMK TOP,
- Leica (od 1987): RC 20, RC 30.

Jakość współczesnych zdjęć lotniczych

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

- zdolność rozdzielczą obiektywu,
- zdolność rozdzielczą filmu,
- rozmazanie obrazu spowodowane ruchem postępowym samolotu,

- rozmazanie obrazu spowodowane ruchami kątowymi kamery,
- kontrast obiektu,
- wpływ atmosfery.

Na końcowym efekcie tego procesu waży najbardziej jego „najsłabsze ogniwo”. Tymi słabymi ogniwami były do niedawna rozmazania obrazu spowodowane ruchem postępowym samolotu i ruchami kątowymi kamery. Ich wyeliminowanie spowodowało skokowy wzrost zdolności rozdzielczej zdjęć lotniczych. Można oczekiwać, że współczesne czarno-białe zdjęcia lotnicze, wykonane na niskoczułym filmie lotniczym, kamerą FMC na stabilizowanym podwieszeniu, 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). „Najsłabszym” ogniwem we współczesnym procesie fotografowania lotniczego jest film. Dla filmów o mniejszej zdolności rozdzielczej należy liczyć się z pogorszeniem średniej zdolności rozdzielczej zdjęć. Tę zależność według obecnego stanu ilustruje tabela 1 (Kurczyński 1999a).

Tabela 1. Zdolność rozdzielcza zdjęć (dla małego kontrastu obiektu).

Table 1. Resolution of aerial photos (for low object contrast).

Rodzaj filmu	Zdolność rozdzielcza zdjęć dla niskiego kontrastu obiektów (1.6:1) [pary linii/mm]	Nieostrość [μ m]
Niskoczuły czarno-biały	40	25
Średniczuły czarno-biały	35	29
Wysokoczuły czarno-biały	30	33
Średniczuły barwny	30	33
Barwny IR	25	40

Tabela ilustruje oczekiwaną zdolność rozdzielczą zdjęć lotniczych wykonanych dla celów pomiarowych. Dla zdjęć wykonywanych z wysokich pułapów, szczególnie o przeznaczeniu interpretacyjnym, stosowane są cienkowarstwowe filmy o bardzo dużej rozdzielczości, umożliwiające uzyskanie zdjęć o rozdzielczości większej niż w tabeli.

Poprawa jakości zdjęć pod względem ich jakości geometrycznej i zdolności rozdzielczej spowodowała wzrost dokładności opracowania. Ten wzrost jakości przekłada się na konkretny i wymierny efekt ekonomiczny: to samo zadanie pomiarowe może być zrealizowane poprzez opracowanie zdjęć lotniczych w mniejszej skali. W zakresie opracowań mapowych oznacza to zmianę tzw. „przełożenia skalowego”, tj. proporcji między skalą mapy a skalą zdjęć, na podstawie których dana mapa może być opracowana z zachowaniem wymaganej dokładności geometrycznej i zasobu treści właściwych opracowywanej mapie. Te zmiany przekładają się na efekt ekonomiczny: ten sam obszar pokryty zdjęciami w mniejszej skali oznacza konieczność wykonania i opracowania mniejszej liczby zdjęć, a wiadomo, że koszty opracowania fotograficznego są – w pierwszym przybliżeniu – proporcjonalne do liczby opracowywanych zdjęć. Należy dodać, że zmiana przełożenia skalowego, jako efekt poprawy jakości zdjęć, jest obserwowana bardziej w zakresie opracowań wielkoskalowych niż średnio- i drobnoskalowych. Praktyka pokazuje, że współczesne zdjęcia lotnicze pozwalają na pomiary punktowe wyrażające się dokładnością:

- błąd sytuacyjny: 6–10 μ m w skali zdjęcia,
- błąd wysokościowy: 0,05% + 0,08% wysokości lotu.

Dokładności takie uzyskuje się kamerami nowej generacji z obiektywami szerokokątnymi przy maksymalnym otworze (1:4), na stabilizowanym podwieszeniu. Podane dokładności odnoszą się do punktów kontrolnych: sygnalizowanych dla zdjęć wielkoskalowych i naturalnych dla zdjęć drobnoskalowych (Leica 1996; Schlienger 1996). W zakresie zdjęć wielkoskalowych są to więc dokładności opracowania na poziomie dokładności punktów osnowy geodezyjnej.

Kierunki dalszego rozwoju lotniczych kamer pomiarowych

Współczesne obiektywy kamer pomiarowych charakteryzują się rewelacyjnymi parametrami: praktycznie wyeliminowano dystorsję, a zdolność rozdzielcza średnio w całym kadrze (AWAR) jest na poziomie 110–120 [par linii/mm]. Znamienne jest przy tym to, że ta rozdzielczość uzyskiwana jest przy maksymalnym otworze obiek-

tywu (dla otworów względnych $f/4 = f/5,6$). Świadczy to o tym, że aberracje zostały praktycznie wyeliminowane, a głównym czynnikiem limitującym zdolność rozdzielczą jest dyfrakcja światła. Dzięki kompensacji rozmycia (system FMC) i stabilizowanemu zawieszaniu można pełniej wykorzystywać te parametry obiektywów. Powstaje pytanie: czy jest możliwy dalszy postęp? Jaką drogą pójdzie dalszy rozwój kamer lotniczych?

Zbudowanie nowej generacji tradycyjnych kamer lotniczych byłoby celowe, gdyby udało się w znaczący sposób podwyższyć osiągnięte już parametry, głównie zwiększenie zdolności rozdzielczej. Z teoretycznych przesłanek bazujących na teorii dyfrakcji światła wiadomo, że dalszą poprawę zdolności rozdzielczej obiektywów można byłoby uzyskać zwiększając ich jasność, co zmniejszyłoby wpływ dyfrakcji. Jasność współczesnych obiektywów wynosi 1:4. Obiektyw taki waży 50–60 kg, a ciężar całej kamery (z podwieszeniem, ładownikiem i jednostką napędową) przekracza 130 kg. Zwiększenie jasności obiektywu o jedną „działkę”, tj. do 1:2,8, byłoby okupione bardzo znaczącym zwiększeniem gabarytów i ciężaru kamery. Ze względów praktycznych nie jest to przewidywane. Można więc prognozować, że możliwości dalszego rozwoju tradycyjnej, fotograficznej, lotniczej kamery pomiarowej praktycznie wyczerpały się.

Dalszych możliwości rozwoju obrazowania lotniczego należy upatrywać w całkowitej jakościowej zmianie technicznych środków obrazowania. Tą nową „jakością” będzie lotnicza kamera cyfrowa. Obiektyw takiej kamery poddawany jest wprawdzie takim samym ograniczeniom jak obiektyw kamery tradycyjnej, jednak kamera cyfrowa wykazuje szereg innych istotnych zalet z punktu widzenia potrzeb obrazowania powierzchni Ziemi, stawiających ją ponad kamerą tradycyjną.

Obecni producenci tradycyjnych kamer lotniczych przewidują, że produkcja takich kamer będzie kontynuowana jeszcze do końca bieżącego dziesięciolecia. Już nie przewiduje się wypuszczenia na rynek całkowicie nowych modeli kamer analogowych. Po tym okresie nastąpi równowaga popytu na kamery analogowe i kamery cyfrowe, z tendencją wzrostu przewagi lotniczych kamer cyfrowych.

3. Konstrukcje lotniczych kamer cyfrowych i perspektywy ich rozwoju

3.1. Koncepcje konstrukcji lotniczych kamer cyfrowych

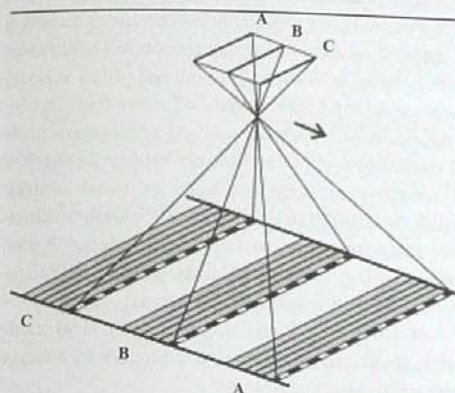
Cywilne systemy satelitarne dostarczające obrazy o globalnym pokryciu liczą sobie ponad 30 lat. Obrazy te od dawna znalazły miejsce w licznych zastosowaniach. W zakresie klasycznych opracowań fotogrametrycznych przechodzi się na technologie cyfrowe (w zakresie opracowań teledetekcyjnych nastąpiło to wcześniej). Nadal jednak dominującym źródłem danych jest klasyczna kamera pomiarowa na film zwojowy. W technologiach zorientowanych na opracowania cyfrowe tradycyjne zdjęcia lotnicze muszą być najpierw zamienione na postać cyfrową w procesie skanowania. Rodzi się pytanie o perspektywy zastąpienia tradycyjnej lotniczej kamery fotogrametryczną kamerą cyfrową.

Jeszcze kilka lat temu nie do pomyslenia była lotnicza kamera cyfrowa jako dostępny produkt rynkowy, która dawałaby obrazy zbliżone pod względem jakości geometrycznej do zdjęć wykonywanych tradycyjnymi kamerami fotogrametrycznymi. Latem 2000 r., podczas Kongresu Międzynarodowego Towarzystwa Fotogrametrii i Teledetekcji w Amsterdamie, po raz pierwszy zostały zaprezentowane produkcyjne egzemplarze takich kamer. Stało się to za sprawą:

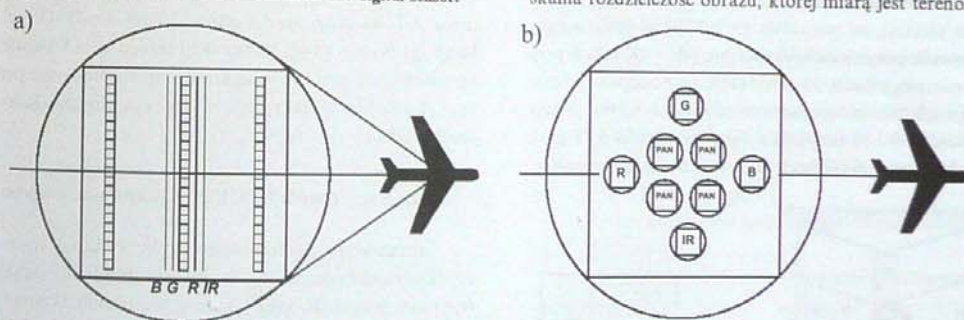
- postępu w produkcji linijek i matryce CCD,
- postępu w szybkości transmisji i zapisu sygnałów z elementów CCD na nośniki pamięci masowej,
- postępu w zakresie pomiaru elementów orientacji liniowej (położenie) i kątowej (nachylenia) platformy, na której umieszczona jest kamera,
- postępu w budowie i upowszechnieniu Cyfrowych Stacji Fotogrametrycznych do opracowania zdjęć.

Koncepcja lotniczej kamery cyfrowej jest realizowana dwiema drogami. Pierwsza to koncepcja skanera elektrooptycznego. Sensorem w takim skanerze jest linijka czułych detektorów CCD umiejscowionych w płaszczyźnie tłowej obiektywu i zorientowana prostopadle do kierunku lotu. Obraz tworzy się w sposób ciągły, w miarę ruchu postępowego samolotu (czy satelity). Z punktu widzenia potrzeb pomiarowych opracowań przestrzennych szczególnie interesujące i mające per-

spektywy rozwoju są skanery z trzema linijkami detektorów, obrazującymi ten sam pas terenu: jedna obrazuje „do przodu”, druga „nadiowo” i trzecia „wstecz”. W czasie jednego lotu otrzymuje się trzy obrazy stereoskopowe, o dobrej wyznaczalności wysokości (rys. 1 i 2).



Rys. 1. Skaner elektrooptyczny z 3 linijkami detektorów.
Fig. 1. Optoelectronic scanner with three-line digital sensor.



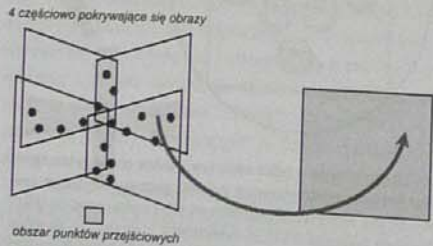
Rys. 2. Konstrukcja lotniczej kamery cyfrowej: a – oparta na skanerze elektrooptycznym – jeden obiektyw i jedna płaszczyzna tłowa (w płaszczyźnie tłowej kamery znajdują się trzy linijki CCD dla obrazowania stereoskopowego w zakresie panchromatycznym oraz 4 linijki CCD dla obrazowania wielospektralnego: w zakresie niebieskim (B), zielonym (G), czerwonym (R) i podczerwonym (IR)). b – oparta na kilku modułach (głowicach optycznych) z prostokątnymi tablicami CCD (8 obiektywów i płaszczyzn tłowych: 4 w zakresie panchromatycznym, tworzące zespół wielokamerowy dla zwiększenia pola widzenia i 4 wielospektralne obrazujące w zakresie niebieskim (B), zielonym (G), czerwonym (R) i podczerwonym (IR)).

Fig. 2. Concepts of airborne digital cameras: a – based on optoelectronic scanner – one lens and focal plane (in focal plane three line CCD sensors for stereo imaging in panchro range, and four CCD lines for multispectral imaging: in blue (B), green (G), red (R) and infrared (IR) spectral range. b – based on several modules (optical heads) with array CCD sensors (8 lenses and focal planes: four in panchro, creating multicamera assembly for increasing the field of view and four multispectral in blue (B), green (G), red (R) and infrared (IR) spectral range).

wymiar piksela. Mówiąc inaczej: samolot musi lecieć na tyle wolno i na tyle wysoko (większy wymiar piksela), aby nadażyć z zapisem danych.

Przykładem kamer cyfrowych opartych na koncepcji skanera elektrooptycznego jest Lotnicza Kamera Cyfrowa ADS40 (*Airborne Digital Sensor*) firmy LH Systems, oraz Lotnicza Stereoskopowa Kamera Dużej Rozdzielczości HRSC-A (*High Resolution Stereo Camera – Airborne*) skonstruowana przez Niemieckie Centrum Kosmiczne DLR (Kurczyński 2000).

Problemy związane ze stabilnością geometryczną obrazu nie występują w przypadku drugiej koncepcji: kamery z prostokątną matrycą sensorów CCD. Jest to – z geometrycznego punktu widzenia – cyfrowy odpowiednik kamery fotograficznej. W tym rozwiązaniu występuje jednak inna trudność: rozmiar tablicy CCD. Matryca ekwiwalentna pod względem wymiarów kamery lotniczej musiałaby zawierać około 500 mln elementów (23 000 × 23 000!). Nic nie zapowiada pojawienia się takich sensorów w najbliższym czasie. Matrycę CCD produkuje się na „plastrze” półprzewodnika. Do niedawna bazowano na technologii „4-calowej” (średnica plastra), co pozwalało na produkcję tablic kwadratowych o wymiarach 60 × 60 mm (4K × 4K pikseli przy wymiarach piksela 15 μm). Obecnie dostępna technologia „5-calowa” pozwala produkować tablice o wymiarach 80 × 80 mm (9K × 9K przy pikselu 8,75 μm). Technologia „6-calowa” jest w fazie eksperymentów.



Rys. 3. Kamera wielomodułowa DMC 2001. Zasięg pokrycia poszczególnych modułów panchromatycznych i pokrycie wynikowego zdjęcia.

Fig. 3. Multihead DMC 2001 camera. Ground coverage of individual panchromatic modules and coverage of result image.

W tej technologii zbudowano tablice CCD o rozdzielczości 10K × 5K.

Wyjściem z ograniczenia związanego z rozmiarami dostępnych tablic CCD jest kamera wielomodułowa, zawierająca kilka sprzężonych ze sobą głowic optycznych – każda z oddzielnym obiektywem i tablicą CCD. Pola widzenia tych modułów częściowo zachodzą na siebie. Z uzyskanych w ten sposób kilku obrazów generuje się jeden, o większym polu widzenia i większej rozdzielczości niż każdy moduł oddzielnie (rys. 2b i 3). Obrazowanie wielospektralne w tym rozwiązaniu może być zrealizowane poprzez dołożenie kolejnych modułów optycznych, obrazujących w kilku zakresach widma. Moduły wielospektralne mają zwykle gorszą rozdzielczość geometryczną, a pole widzenia każdego z nich pokrywa sumaryczne pole widzenia sprzężonych modułów obrazujących w zakresie panchromatycznym.

W przypadku kamer z tablicami CCD aktualnie pozostają ograniczenia związane z prędkością odczytu i zapisu sygnałów z sensorów.

Przykładem kamer cyfrowych opartych na prostokątnej matrycy sensorów CCD jest Modułowa Kamera Cyfrowa DMC 2001 (DMC – *Digital Modular Camera*) firmy Z/I Imaging oraz kamera UltraCam-D (Vexcel Imaging). Każda z tych konstrukcji składa się z 8 głowic optycznych: 4 pracują w zakresie panchromatycznym oraz 4 pracują w zakresach wielospektralnych (Kurczyński 2000).

Integracja danych GPS/INS. Geokodowanie wprost

Przeszkodą pomiarowego wykorzystania lotniczych obrazów skanerowych jest trudność dokładnej rejestracji trajektorii lotu i kątów nachylenia skanera. Rozwiązaniem jest zintegrowanie dwóch systemów: GPS (ang. Global Positioning System) i INS (ang. Inertial Navigation System). System GPS pozwala rejestrować trajektorię lotu (X, Y, Z) z dokładnością nie gorszą niż 10 cm. Inercjalny system nawigacyjny INS mierzy przyspieszenia wzdłuż trzech osi oraz zmiany kątowych pochyłań kamery. Ciągłe integrowanie (sumowanie) tych pomiarów w czasie pozwala wyznaczyć bardzo dokładnie trajektorię lotu samolotu (z błędem rzędu 2 cm) i kąty pochylenia (z dokładnością kilkunastu sekund kątowych).

wych). Wadą systemów INS jest dryft, powodujący spadek dokładności pomiaru pozycji i kątów nachylenia z upływem czasu. Ten błąd systematyczny może być korygowany na podstawie danych GPS, zachowujących wysoką i stabilną w czasie dokładność. Z kolei dane INS są wykorzystywane do interpolacji pozycji podczas możliwych, krótkich przerw w łączności z satelitami GPS (np. „przesłonięcie” satelity skrzydłem samolotu podczas manewru nawrotu).

Systemy GPS i INS charakteryzują się więc różną i komplementarną propagacją błędów. Ich integracja jest realizowana w procesie obróbki zarejestrowanych danych z wykorzystaniem filtrowania Kalmana. Pozwala to wykorzystać zalety obu systemów. Stosowane w fotogrametrii systemy bazują na dostępnych na rynku systemach GPS i średniej klasy systemach INS (odgrywa tu rolę cena: cena systemu INS niskiej klasy jest rzędu 10 tys. USD, średniej klasy – 100 tys. USD, a wysokiej klasy – 1 mln USD). Liczne opracowania testowe wskazują, że zintegrowanie systemów GPS/INS pozwala obecnie z dużą częstotliwością (rzędu 50–250 Hz) rejestrować położenie z dokładnością lepszą niż 10 cm i kąty orientacji z dokładnością 10" ± 30", tj. 0,003" ± 0,008" (niektórzy autorzy, cytując wyniki eksperymentalnych opracowań, podają nawet wyższe dokładności; błędy kątowe poniżej 10"). Taka precyzja jest zbliżona do dokładności wyznaczenia elementów orientacji zewnętrznej zdjęć fotogrametrycznych, określanych w procesie aerotriangulacji blokowej. Jest to więc dokładność wystarczająca dla potrzeb lotniczych kamer cyfrowych z liniijką detektorów.

Zagadnienie integracji GPS/INS ma dla fotogrametrii szersze znaczenie niż tylko wynikające z potrzeb kamer cyfrowych. Systemy takie są sprzężane również z tradycyjnymi kamerami fotogrametrycznymi, skanerami laserowymi czy innymi platformami. Skoro jest możliwe wyznaczenie w locie, z wystarczającą dokładnością, wszystkich elementów orientacji zewnętrznej zdjęć (liniowych i kątowych), to można pomiar fotogrametryczny (tj. wyznaczenie położenia X, Y, Z punktów podlegających opracowaniu, odfotografowanych na zdjęciach) sprowadzić do bezpośredniego „przeźrzenia go” w locie w przód” ze znanych elementów orientacji. Jest to realizacja tzw. „geokodowania wprost” (ang.

direct geocoding, direct georeferencing). Oznacza to wyeliminowanie osnowy polowej i procesu aerotriangulacji. Trwają intensywne, również międzynarodowe, eksperymenty w celu określenia zakresu użyteczności tego rozwiązania. Uzyskane wyniki pokazują, że taka możliwość została osiągnięta. Utrzymywanie technologii aerotriangulacji jest jednak na obecnym etapie nadal pożądane, bardziej dla zabezpieczenia niezawodności całego procesu niż dla zwiększenia dokładności.

3.2. Porównanie kamer cyfrowych z kamerami analogowymi

Kamera lotnicza jest kluczowym elementem całego procesu fotografowania lotniczego. Ponieważ sama kamera w znacznym stopniu determinuje etapy tego procesu, a także późniejszego procesu opracowania zdjęć, przy porównywaniu kamer cyfrowych i analogowych należy postrzegać je w szerszym kontekście tych procesów.

Obrazowanie kamerami cyfrowymi ma wiele zalet w porównaniu z klasycznymi zdjęciami lotniczymi. Zalety te wyrażają się:

- zmniejszeniem kosztów procesu fotografowania,
- skróceniem czasu dostarczenia danych,
- wyższą jakością radiometryczną obrazów,
- możliwością nowych aplikacji.

Wśród istotnych zalet obrazowania kamerami cyfrowymi na uwagę zasługują:

- wyeliminowanie kosztownego filmu i obróbki fotolaboratoryjnej,
- wyeliminowanie czasochłonnego i kosztownego etapu skanowania zdjęć,
- zakres dynamiczny i rozdzielczość radiometryczna obrazów cyfrowych są znacznie większe od filmu. Zakres dynamiczny (tj. stosunek maksymalnej wartości sygnału z elektronicznego sensora do „szumu” sygnału) jest około 3500 : 1, tj. 11–12 bitów; dla porównania, ten zakres dla zdjęć skanowanych wynosi około 6–7 bitów. Cecha ta oznacza znacznie lepszą wyróżnialność szczegółów w najjaśniejszych i najciemniejszych partiach obrazu. Ma to szczególne znaczenie przy obrazowaniu miast (cienie zajmują duże partie obrazu),

- lepsza reprodukcja barw,
- łatwiejsza droga do obrazowania wielospektralnego (ważne dla opracowań tematycznych),
- radykalnie skrócony czas dostarczenia obrazów do odbiorcy.

3.3. Uwarunkowania zastąpienia tradycyjnej kamery lotniczej kamerą cyfrową

Najpierw zapowiedzi, a następnie prezentacja „produkcyjnych” rozwiązań kamer cyfrowych podczas Kongresu w Amsterdamie spowodowały bardzo ożywioną dyskusję w środowisku fotogrametrycznym. Stawiane jest pytanie: czy kamera cyfrowa będzie stanowić konkurencję dla używanych obecnie tradycyjnych, wielkoformatowych kamer lotniczych?

Odpowiedź jest złożona i musi uwzględniać wiele uwarunkowań, wykraczających poza czysto techniczne kwestie. O konkurencyjności kamery cyfrowej w stosunku do kamery tradycyjnej stanowić będzie kilka czynników:

1. Opracowania fotogrametryczne przechodzą na technologie zorientowane cyfrowo. Wylodem są stosowane nadal tradycyjne zdjęcia lotnicze, które trzeba najpierw zeskanować, aby później opracowywać je w ciągu zorientowanym cyfrowo. Powszechna jest świadomość zalet kamer cyfrowych, z drugiej jednak strony firmy fotogrametryczne zainwestowały w dominujący obecnie ciąg „hybrydowy”, bazujący na tradycyjnej kamerze i specjalistycznym skanerze do zdjęć lotniczych. Żywotność tego sprzętu liczona jest na kilkanaście lat. Muszą zaistnieć ważne techniczne i rynkowe powody, aby skłonić „produkcję” do zmiany obecnych technologii i związanych z tym nowych, znacznych inwestycji.
2. Decydującym czynnikiem w upowszechnieniu kamer cyfrowych może okazać się dostępność dla szerokiego kręgu potencjalnych użytkowników softwaru oraz szczegółowych parametrów geometrycznych i radiometrycznych kamer, umożliwiającą włączenie obrazów cyfrowych do technologicznego procesu opracowań fotogrametrycznych. Oczekiwane jest wsparcie w tym zakresie samych producentów kamer.

3. Rozwiązania konstrukcyjne kamer cyfrowych idą w kierunku umożliwienia równoczesnego pozyskiwania zarówno stereoskopowych obrazów panchromatycznych (czarno-białych), jak i barwnych obrazów w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni. Oznacza to, że kamery te łączą dwie – obecnie niezależne – dziedziny opracowań bazujących na zdjęciach: pomiarowe opracowania fotogrametryczne i tematyczne opracowania teledetekcyjne. Twórcy kamer cyfrowych przewidują, że 50% (aż 50%!) wykorzystania kamer cyfrowych stanowić będą zastosowania związane z teledetekcyjnymi opracowaniami tematycznymi.
4. Ważnym czynnikiem jest cena. Koszt kamery cyfrowej kształtuje się na poziomie 1÷1,5 mln USD. Przekracza on 1,5–2 razy cenę oferowanych na rynku tradycyjnych kamer lotniczych.
5. Pojawienie się i przewidywany rozwój satelitarnych obrazów z „metrym” pikselem przejmie rynek zdjęć lotniczych w zakresie drobnych skal. Zdjęcia lotnicze (tradycyjne czy cyfrowe) zostaną „zepchnięte” do obrazowania w zakresie skal średnich i dużych, w tym szczególnie obszarów zurbanizowanych.
6. Ważąc „za” i „przeciw”, nie należy oczekiwać szybkiego zastąpienia tradycyjnej kamery lotniczej przez jej cyfrowy odpowiednik. Oba typy kamer będą koegzystować, z właściwymi sobie zakresami zastosowań, przy stopniowym przechodzeniu na rozwiązania cyfrowe.

4. Porównanie pojemności informacyjnej zdjęcia analogowego i obrazu cyfrowego

Pojemność informacyjna zdjęć analogowych i obrazów cyfrowych zależy od ich przestrzennej zdolności rozdzielczej oraz rozdzielczości radiometrycznej.

Na gruncie tradycyjnej fotografii lotniczej pojęcie przestrzennej zdolności rozdzielczej jest jednoznacznie zdefiniowane i jednakowo rozumiane, a procedury wyznaczania praktycznej zdolności rozdzielczej są znormalizowane i opisane międzynarodowymi standardami. Rozdzielczość odnosi się do najwyższej częstotliwości przestrzennej, która może być rozpoznana w płaszczyźnie tłowej kamery i jest mierzona w cyklach na milimetr,

inaczej: liczbie par linii na milimetr obrazu. Para linii stanowiąca jeden cykl to linia jasna i ciemna. Równoważna takiemu cyklowi odległość terenowa (czyli szerokość linii jasnej i ciemnej łącznie) definiowana jest jako **terenowa zdolność rozdzielcza** (ang.: *Ground Resolved Distance – GRD*).

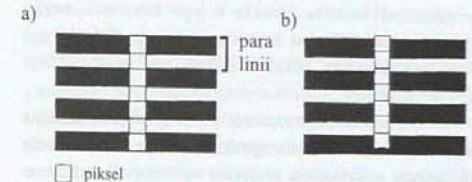
W praktyce terenowa zdolność rozdzielcza może być określana poprzez sfotografowanie wyłożonych testów paskowych o stopniowo zmieniającej się częstotliwości przestrzennej (grubości linii jasnych i ciemnych), określonej szerokości, długości i kontraście. Zwykle określa się terenową zdolność rozdzielczą niezależnie w kierunku lotu i kierunku poprzecznym. Terenową zdolność rozdzielczą na zdjęciu określa ta grupa pasków, dla której paski jasne i ciemne są jeszcze różnialne jako oddzielne. Tak określona terenowa zdolność rozdzielcza opisuje jakość zdjęcia, tj. końcowego ognia całego procesu zdjęciowego. Uwzględnia więc sumarycznie jakość obiektywu, film, wpływ atmosfery, rozmazanie spowodowane ruchem samolotu, drgania kamery, obróbkę fotochemiczną. Spodziewaną zdolność rozdzielczą zdjęć lotniczych wykonanych współczesnymi kamerami lotniczymi (tj. kamerami z kompensacją rozmazania FMC) dla małego kontrastu obiektu, dla różnych rodzajów filmu przedstawiono w tabeli 1.

Posiłkując się zawartymi tam danymi można oczekiwać, że np. terenowa zdolność rozdzielcza zdjęć w skali 1:26 000, wykonanych na filmie barwnym, wyniesie około 0,86 m. Dla zdjęć w tej samej skali, ale wykonanych na niskoczułym, drobnoziarnistym filmie czarno-białym, zdolność rozdzielcza zdjęć będzie wyższa i wyniesie około 0,65 m.

Precyzja definicji „terenowej zdolności rozdzielczej” oraz znormalizowana procedura jej określania sprawiają, że jest to powszechnie akceptowana i używana miara jakości zdjęć, umożliwiającą porównywanie różnych systemów obrazowania.

Całkowicie inną sytuację mamy w przypadku obrazów cyfrowych, pozyskanych skanerami optyczno-mechanicznymi, skanerami elektrooptycznymi (z liniijką czułych cementów CCD) czy kamerami cyfrowymi bazującymi na prostokątnych matrycach CCD. W tych przypadkach obraz składa się z pikseli. Każdemu pikselowi odpowiada czuły element CCD w płaszczyźnie

ogniskowej układu optycznego kamery. Rozdzielczość obrazu cyfrowego ma związek z wymiarami piksela: im mniejszy piksel, tym większa szczegółowość obrazu (wyższa rozdzielczość). Wielkością charakteryzującą tę wielkość jest kąt, pod jakim układ optyczny kamery widzi fragment terenu rzutowany na powierzchnię pojedynczego piksela IFOV (ang.: *Instantaneous Field of View – IFOV*) lub odpowiadający mu terenowy wymiar, tzw. **piksel terenowy**. Często piksel terenowy mylnie utożsamiany jest z terenową zdolnością rozdzielczą obrazu. Terenowa zdolność rozdzielcza – zdefiniowana jak wyżej – jest miarą rozdzielczości zdjęcia, tymczasem piksel terenowy jest tylko wielkością obszaru obrazowanego przez pojedynczy piksel liniiki czy matrycy CCD. Różnice te poglądowo ilustruje rys. 4.



Rys. 4. Relacje między wymiarami piksela a szerokością pary linii, stanowiących terenową zdolność rozdzielczą obrazu: a – próbkowanie jest zgodne z parami linii, b – próbkowanie jest niezgodne z parami linii.

Fig. 4. The relationship between pixel and line pairs, composing ground resolution of image: a – sampling is aligned with the line pairs, b – sampling is misaligned with the line pairs.

Para linii na obiekcie może być rozróżniona, jeżeli piksel ma wymiar połowy szerokości pary linii i układ pikseli i linii będzie przypadkowo zgodny (rys. 4a). W przypadku jednak niezgodności (rys. 4b) linie nie będą rozróżnialne jako oddzielne. W tym przypadku piksel musiałby być mniejszy. Ogólnie, dla rozróżnienia pary linii, stosunek między szerokością pary linii a wymiarem piksela powinien leżeć w przedziale od 2:1 do 3:1. W teorii próbkowania relację tą opisuje tzw. współczynnik Kella. Zwykle przyjmuje się, że:

$$2 \times P_{\text{teren}} \leq R_{\text{teren}} \leq 2\sqrt{2} \times P_{\text{teren}} \quad (1)$$

gdzie:

- P_{teren} – terenowy wymiar piksela,
- R_{teren} – terenowa zdolność rozdzielcza.

Tak więc terenowa zdolność rozdzielcza obrazu cyfrowego, rozumiana jak na gruncie tradycyjnych zdjęć lotniczych, jest równa dwóm – trzem wymiarom piksela terenowego.

Należy dodać, że powyższa zależność uwzględnia tylko pikselową strukturę obrazu cyfrowego. Faktyczna terenowa zdolność rozdzielcza obrazu cyfrowego może być dodatkowo zdegradowana przez wady optyki, atmosferę i rozmazanie spowodowane ruchem platformy (samolotu czy satelity).

Terenowa zdolność rozdzielcza jest wyjściowym i kluczowym parametrem określającym, co faktycznie na danym zdjęciu może być dojrzone (wykryte), rozpoznane i pomierzone. Praktycy wiedzą, że zależy to nie tylko od terenowej zdolności rozdzielczej, ale również od kształtu obiektu i jego kontrastu względem tła. Obiekt musi być wystarczająco duży i tworzyć wystarczający kontrast z tłem, aby mógł być wykryty na zdjęciu.

Istnieją empiryczne zależności łączące minimalne wymiary obiektu możliwego do wykrycia i rozpoznania na zdjęciu z wielkością zdolności rozdzielczej, kształtem obiektu (liniowy, punktowy) i jego kontrastem. Problemy te są szczegółowej traktowane w literaturze z zakresu fotointerpretacji.

Wydaje się dziwne, że na obrazach satelitarnych dostrzec można białe linie namalowane przez środek asfaltowej drogi i jednocześnie nie można dostrzec obiektów znacznie większych. Jest to wynikiem kombinacji kontrastu i oświetlenia obiektu, zakresu dynamicznego sensora, wpływu atmosfery oraz geometrii „widzenia” i próbkowania. Z wymienionych czynników najistotniejszym jest kontrast.

W przypadku obrazów satelitarnych należy liczyć się z istotnym wpływem atmosfery, powierzchnia Ziemi obrazowana jest przez całą jej grubość. Atmosfera powoduje bardzo istotne zmniejszenie kontrastów; bardziej odczuwalne w zakresie fal krótszych (niebieski, zielony) i mniej w zakresie fal dłuższych (czerwony, podczerwony). Zmniejszenie kontrastu ma bezpośredni, degradujący wpływ na możliwości interpretacyjne obrazu.

Zależność (1) pozwala powszechnie stosowane pojęcie zdolności rozdzielczej tradycyjnych zdjęć prze-

nieść na obraz o pikselowej strukturze geometrycznej, właściwej dla kamery cyfrowej, ale również dla zdjęć analogowych po zeskanowaniu. Zależności tej nie można jednak utożsamiać z relacją pojemności informacyjnej zdjęcia analogowego, wykonanego kamerą na film i obrazu cyfrowego otrzymanego kamerą cyfrową. Poszukiwanie takiej relacji ma obecnie, tj. w dobie wchodzenia do użycia kamer cyfrowych i powszechności obrazów satelitarnych, kapitalne znaczenie praktyczne, pozwoli bowiem ocenić faktyczny potencjał interpretacyjny zdjęć i obrazów wykonywanych różnymi systemami (analogowymi i cyfrowymi) z różnych pułapów (lotniczego i satelitarnego) i wskazać ich przydatność do rozwiązywania konkretnych zadań pomiarowych. Przy poszukiwaniu takiej relacji należy uwzględnić dodatkowe uwarunkowania:

1. Opracowania fotogrametryczne są obecnie zdominowane przez technologie cyfrowe. W przypadku opracowania zdjęć analogowych należy najpierw zamienić je na postać cyfrową w procesie skanowania.
2. Zdjęcia analogowe i obrazy cyfrowe różnią się istotnie rozdzielczością radiometryczną, co ma wpływ na ich pojemność informacyjną, a w konsekwencji jakość produktów wytwarzanych na ich bazie.

W przypadku skanowania zdjęć powstają pytania:

- o przestrzenną rozdzielczość skanowania (tj. o wymiar piksela skanowania),
- o rozdzielczość radiometryczną.

Ograniczeniem jest tu jakość fotograficzna zdjęć i ich ziarnista struktura. Obraz utworzony w emulsji światłoczułej składa się z mikroskopijnych czarnych (nieprzezroczystych) ziaren srebra na jasnym (przezroczystym) tle. Upraszczając zjawisko, przy skanowaniu z pikselem porównywalnym z rozmiarami ziaren, otrzymamy obraz o 1-bitowej rozdzielczości radiometrycznej (tj. wynikowy piksel skanowania byłby albo biały, albo czarny). Aby przełożyć gęstość optyczną zdjęcia na postać cyfrową, piksel skanowania musi być dostatecznie duży. Problem ten jest analogiczny do problemu druku, gdzie za pomocą czarnych punktów (kropli atramentu w drukarce lub farby drukarskiej) należy oddać różne tony szarości.

Mając na uwadze rozpiętość tonalną zdjęć (wyrażoną przez rozpiętość gęstości optycznych), zdjęcia

powszechnie skanuje się z rozdzielczością 8 bitów, tj. z rozróżnieniem 256 poziomów „szarości”. Aby rozróżnić tyle poziomów w druku, wynikowy piksel drukowanego obrazu musiałby składać się z $16 \times 16 = 256$ pól białoczarnych. Każdemu takiemu polu odpowiada jedna kropla atramentu (lub jej brak). Dysponując takim polem, poprzez dozowanie kropli atramentu, można w rezultacie uzyskać piksel drukowanego obrazu o stopniowanej jasności w zakresie od 0 (brak atramentu) do 255 (wszystkie pola zapełnione kroplami atramentu). Przekładając to na ziarnistą strukturę obrazu i zakładając – dla uproszczenia – regularny rozkład ziaren, piksel skanowania nie może być mniejszy od 16-krotnego wymiaru takich ziaren. Poza samą ziarnistą strukturą obrazu srebrowego, należy również mieć na uwadze nieostrości spowodowane różnymi czynnikami (obiektów, atmosfera, rozmazanie spowodowane ruchem samolotu, inne). W rezultacie istnieje związek między jakością zdjęcia, ograniczoną nieostrościami i ziarnistą strukturą, a minimalnym wymiarem piksela skanowania.

W procesie skanowania zdjęć należy tak dobrać piksel skanowania, aby nie zdegradować tkwiącego w nich potencjału pomiarowego wyrażanego przez wysoką jakość geometryczną i zdolność rozdzielczą. Teoria próbkowania wskazuje, że dla zachowania zdolności rozdzielczej oryginalnych zdjęć należy je skanować z pikselem w zakresie:

$$\frac{1}{2\sqrt{2}R} < P_{\text{skan}} < \frac{1}{2R} \quad (2)$$

gdzie:

R – zdolność rozdzielcza zdjęć wyrażona w parach linii/mm,

P_{skan} – wymiar piksela skanowania zdjęć.

Tabela 2 prezentuje rekomendowane wielkości piksela skanowania, określone zgodnie z powyższą regułą, dla współczesnych zdjęć lotniczych (tj. wykonanych kamerami FMC nowej generacji, na stabilizowanym zawieszaniu) na różnych filmach lotniczych [Kurczyński 1999a].

Skanowanie z pikselem mniejszym niż rekomendowany jest nieuzasadnione, skutkuje bowiem wzrostem

Tabela 2. Rekomendowana rozdzielczość skanowania współczesnych zdjęć lotniczych.

Table 2. Recommended scanning resolution of present aerial photos.

Rodzaj filmu	Zdolność rozdzielcza zdjęć dla niskiego kontrastu obiektów (1,6:1) [pary linii/mm]	Nieostrość [μm]	Rekomendowany piksel skanowania [μm]
Niskoczuły czarno-biały	40	25	9–12
Średniczuły czarno-biały	35	29	10–14
Wysokoczuły czarno-biały	30	33	12–16
Średniczuły barwny	30	33	12–16
Barwny IR	25	40	14–20

„szumów” spowodowanych ziarnistą strukturą obrazu i poza zwiększeniem objętości wynikowych zbiorów nie wnosi nowych informacji. Odwrotnie, skanowanie z większym pikselem oznacza degradację potencjału tkwiącego w oryginalnych zdjęciach.

Czułym elementem w kamerach cyfrowych, zamiast ziarnistej emulsji, jest sensor elektroniczny CCD w formie linijki lub prostokątnej tablicy czułych elementów. Dzięki temu obraz uzyskany taką kamerą charakteryzuje się – w porównaniu z emulsją srebrową – znacznie większym zakresem dynamicznym i większą rozdzielczością radiometryczną. Zakres dynamiczny (tj. stosunek maksymalnej wartości sygnału z elektronicznego sensora do „szumu” sygnału) jest jak około 3500:1, tj. odpowiada 11–12 bitom (11 bitów oznacza możliwość rozróżnienia 2048 poziomów sygnału, a 12 bitów odpowiednio 4096). Oznacza to około 16-krotny wzrost rozdzielczości radiometrycznej w porównaniu ze zdjęciami tradycyjnymi (niektórzy autorzy oceniają praktyczny zakres dynamiczny skanowanych zdjęć na 6–7 bitów, a obrazów z kamer cyfrowych na 10–12 bitów, nadal daje to około 16-krotną relację tych zakresów). Ma to oczywisty związek z pojemnością informacyjną obrazów. Teoria przetwarzania sygnałów pozwala określić ilościowy związek między wielkością piksela (na gruncie tej teorii określanej jako „rozdzielczość prze-

strzenna") a rozdzielczością radiometryczną (tj. „rozdzielczością amplitudową”). Zgodnie z tą teorią obraz cyfrowy o rozdzielczości 12 bitów (używa się określenia „próbki z głębią” 12 bitów) ma taką samą pojemność informacyjną jak taki sam obraz o rozdzielczości 8 bitów, zawierający 4 razy więcej pikseli (tj. z pikselem dwukrotnie mniejszym). Inaczej mówiąc: **piksel-12 bitowy jest – pod względem pojemności informacyjnej – ekwiwalentny $2 \times 2 = 4$ pikselom 8-bitowym.**

Powyższe przesłanki teoretyczne pozwalają znaleźć praktyczne relacje między potencjałem informacyjnym analogowych i cyfrowych systemów obrazowania. **Badania laboratoryjne pokazują, że zdjęcia analogowe po „optymalnym” zeskanowaniu (w rozumieniu wcześniejszych rekomendacji) oraz obraz z kamery cyfrowej, oba z tym samym wymiarem piksela terenosom, różnią się przestrzenną zdolnością rozdzielczą w proporcji jak 1:1,8 na korzyść obrazu cyfrowego (Leberl i in. 2003).** Różnica ta jest spowodowana ziarnistą strukturą zdjęcia oraz różną rozdzielczością radiometryczną obu systemów. Zdjęcie lotnicze po zeskanowaniu zawiera „szum” spowodowany ziarnem emulsji. Widać to szczególnie na jednorodnych powierzchniach, gdzie piksele skanowania wykazują znaczne zróżnicowanie wartości; obraz takiej powierzchni z kamery cyfrowej jest bardziej „gładki”.

Powyższe przesłanki można ująć w zależność określającą warunek zrównania przestrzennej rozdzielczości analogowych i cyfrowych systemów obrazowania:

$$P_{\text{cyfr}} = k P_{\text{skan}} M_{\text{skl}} \quad (3)$$

gdzie:

- P_{cyfr} – terenowy wymiar piksela kamery cyfrowej,
- P_{skan} – wymiar piksela skanowania zdjęć,
- M_{skl} – mianownik skali zdjęć,
- k – współczynnik empiryczny określający wpływ na przestrzenną zdolność rozdzielczą ziarnistej struktury zdjęcia analogowego i różnic rozdzielczości radiometrycznej systemu analogowego i cyfrowego. Przy porównaniu systemów cyfrowych o rozdzielczości radiometrycznej 11–12 bitów ze zdjęciami skanowanymi z „optymalnym” pikselem (w rozumieniu wcześniejszych rekomendacji – wzór 2) przyjmuje się $k \approx 1,8$.

Powyższa zależność pozwala znaleźć parametry obrazowania cyfrowego o zasobie treści odpowiadającej danym zdjęciom lotniczym, a tym samym projektować parametry obrazowania cyfrowego dla określonych zadań pomiarowych.

Przytoczone różnice pojemności informacyjnej obu systemów obrazowania przekładają się na potencjał kartograficzny obu typów obrazów, wyrażany przez ich możliwości pomiarowe i interpretacyjne. W świetle powyższych relacji przestrzennej zdolności rozdzielczej obrazów otrzymanych kamerą cyfrową i zdjęć skanowanych, przy uwzględnieniu jakości współczesnych zdjęć lotniczych wykonanych kamerami nowej generacji i zachowaniu rekomendacji ich skanowania, można następująco sformułować porównanie potencjału interpretacyjnego kamery analogowej i kamery cyfrowej: **pod względem potencjału interpretacyjnego odpowiednikiem współczesnej, lotniczej, analogowej kamery pomiarowej o formacie 23×23 cm, jest kamera cyfrowa zawierająca około 11 tysięcy pikseli w kierunku poprzecznym do kierunku lotu.**

Dotychczasowe niebogie doświadczenia praktyczne z kamerami cyfrowymi potwierdzają ten wniosek. Spośród obecnych na rynku kamer cyfrowych warunki ten spełniają kamery DMC2001, UltraCam-D, HRSC-AX150, HRSC-AX047, a kamera ADS40 spełnia go ze znacznym nadmiarem.

W kontekście dokładności geometrycznej opracowania dodatkową zaletą kamer cyfrowych jest:

- trzykrotne odwzorowanie terenu w każdym szeregu kamerami opartymi na koncepcji skanera elektrooptycznego lub
- możliwość zwiększonego pokrycia podłużnego obrazów wykonanych kamerami opartymi na prostokątnej matrycy CCD, praktycznie bez wzrostu kosztów opracowania.

W przypadku cyfrowego opracowania automatycznego powyższe różnice jakości zdjęć analogowych i obrazów cyfrowych przekładają się na jakość korelacji obrazów (ang.: *image matching*). Praktyczne pomiary wskazują, że jakość korelacji obrazów cyfrowych jest około 2,5 razy lepsza niż zdjęć skanowanych (tj. błąd średni korelacji odniesiony do wymiarów piksela jest 2,5 razy mniejszy) (Leberl i in. 2003). W rezultacie oznacza

to np. lepszą jakość aerotriangulacji czy Numerycznego Modelu Terenu.

Pojemność informacyjna zdjęć i obrazów uwarunkowana ich zdolnością rozdzielczą i rozdzielczością radiometryczną jest pierwszorzędnym czynnikiem determinującym ich potencjał kartograficzny. Przybliżeniu problemu potencjału kartograficznego zdjęć i obrazów i wynikającej z tego ich użyteczności dla realizacji różnych zadań pomiarowych poświęcony jest rozdział 5.

5. Ocena potencjału kartograficznego zdjęć i obrazów

5.1. Zdefiniowanie problemu oceny potencjału kartograficznego

Typowe produkty kartograficzne spełniają jednoznacznie określone wymagania określające jakość produktu finalnego. W praktyce geodezyjnej wymagania te są skodyfikowane w formie wytycznych technicznych (standardów technicznych).

W przypadku map sytuacyjno-wysokościowych podstawowymi parametrami określającymi jakość mapy są:

- dokładność sytuacyjna (dokładność lokalizacji sytuacyjnej) obiektów na mapie. W praktyce krajowej określa się ją zwykle na 0,3 mm w skali mapy (błąd średni),
- dokładność wysokościowa, określana w praktyce krajowej na 1/3 zasadniczego cięcia warstwicowego (samą wielkość zasadniczego cięcia precyzują instrukcje, w zależności od stopnia złożoności rzeźby terenu. Instrukcja określa również dokładność wysokościową w zależności od spadku terenu),
- zakres treści mapy, tj. szczegółowy wykaz obiektów, jaki ma się znaleźć na mapie. Zależy to od rodzaju mapy, a szczegóły precyzyjnie określają odpowiednie instrukcje techniczne.

Parametry te dla mapy sytuacyjno-wysokościowej w tradycyjnym ujęciu są pochodną skali mapy. W pierwszym rzędzie to w parametrze skali mapy zakodowane są powyższe wymagania jakości mapy.

W przypadku map numerycznych pojęcie skali mapy utraciło ten sens, pozycja obiektów jest tu kodowana w skali terenowej. Nadal jednak używany jest parametr skali jako ekwiwalent określający szczegółowość (zasób treści) i dokładność geometryczną mapy.

W przypadku **cyfrowej ortofotomapy** parametrami określającymi jej jakość są:

- terenowy wymiar piksela ortofotomapy,
- średni błąd położenia sytuacyjnego.

W przypadku druku mapy (niskonakładowym – plotowanie na ploterze lub wysokonakładowym – druk) pojawia się skala ortofotomapy. Można mówić wówczas o wymiarze piksela wyrażonym w skali mapy.

W przypadku **Numerycznego Modelu Terenu (NMT)** parametrami określającymi jakość takiego produktu są:

- struktura geometryczna danych tworzących NMT (siatka – GRID, punkty rozproszone – TIN),
- dokładność wysokościowa NMT, rozumiana jako średni błąd wysokości wyinterpolowanej z NMT w dowolnym punkcie (punkcie o zadanej lokalizacji sytuacyjnej),

– terenowa wielkość oczka siatki (dla struktury GRID) lub średnia odległość punktów pomiarowych (dla struktury TIN czy innej).

Wymienione powyżej produkty są wynikiem opracowania fotogrametrycznego zdjęć lotniczych. Tak dobiera się parametry geometryczne zdjęć lotniczych, aby w danych warunkach produkcyjnych wytworzyć produkt spełniający postawione wymagania. W praktyce projektowania zdjęć lotniczych sprowadza się to do zaprojektowania dwóch podstawowych parametrów:

- skali zdjęć lotniczych determinującej możliwy do osiągnięcia zasób treści tworzonej mapy i jej dokładność sytuacyjną oraz koszty wytworzenia tej mapy. Dokładność sytuacyjna opracowania jest wprost proporcjonalna do skali zdjęć (im większa skala zdjęć, tym wyższa dokładność sytuacyjna pomiaru i większy zasób możliwej do odczytania treści, ale i wyższe koszty opracowania),

– obiektywu kamery (ogniskowa kamery wraz ze skalą zdjęć określają wysokość fotografowania, dokładność pomiaru wysokościowego jest odwrotnie proporcjonalna do wysokości lotu).

Dziesięciolecia praktyki fotogrametrycznej ustaliły relacje między skalą mapy a skalą zdjęć lotniczych, z których daną mapę można wytworzyć. Rozwój optyki, metod opracowania i stosowane technologie produkcyjne zmieniają te relacje w kierunku wzrostu dyspro-

porcji między skalą mapy a skalą zdjęć, z oczywistymi wynikającymi z tego efektami ekonomicznymi. Są to problemy powszechnie znane w środowisku, a obowiązujące instrukcje techniczne precyzyjnie określają te relacje.

Przedstawiona sytuacja przestaje być tak klarowna, jeżeli przedmiotem zainteresowania nie jest potencjał kartograficzny klasycznych zdjęć lotniczych, lecz obrazów cyfrowych, pozyskiwanych kamerami cyfrowymi (typu skaner elektrooptyczny z liniijką CCD lub kamera z matrycą elementów CCD) z pułapu lotniczego czy satelitarnego. Upraszczając problem, w przypadku zdjęć lotniczych o potencjale kartograficznym tych zdjęć – w pierwszym rzędzie – decyduje ich zdolność rozdzielcza, będąca pochodną skali zdjęć. Ta zdolność rozdzielcza jest tu jednoznacznie zdefiniowana i może być precyzyjnie wyznaczona. W przypadku obrazów cyfrowych trudno jest mówić o ich skali, a możliwości interpretacyjne obrazów zależą od wymiaru piksela. Spotykamy się więc tutaj z innymi wielkościami, należy zdefiniować parametry właściwe dla określenia potencjału kartograficznego obrazów oraz znaleźć relacje tych parametrów z parametrami opisującymi klasyczne zdjęcia lotnicze.

Wokół tych problemów obserwuje się w środowisku wiele nieporozumień, skutkujących tym, że pod tymi samymi pojęciami są rozumiane różne treści. Przykładem tego może być np. utożsamianie terenowej wielkości piksela obrazu cyfrowego z jego terenową zdolnością rozdzielczą. Ten brak jednakowego rozumienia pojęć może prowadzić do bardziej zasadniczych nieporozumień, np. w ocenie potencjału obrazów o określonych parametrach. Sytuację komplikuje dodatkowo fakt, że obraz „pikselowy” nie ma skali, można go (lub produkty z niego pochodne) wizualizować (wyświetlać na ekranie czy plotować) w dowolnej skali, co zaciemnia faktyczne relacje między obrazem a produktem, jaki z niego można wytworzyć.

Aby ocenić potencjał kartograficzny danych obrazów cyfrowych i stwierdzić ich przydatność do wytworzenia (czy aktualizacji) mapy sytuacyjno-wysokościowej należy:

– ocenić dokładność pomiaru sytuacyjnego i wysokościowego na bazie obrazów i porównać te dokładności z wymaganymi dla tworzonej mapy,

– ocenić możliwości interpretacyjne obrazów, tj. ocenić ich zasób treści i porównać ten zasób z zakresem treści wymaganej dla tworzonej mapy. Ocena taka odpowie na pytanie: czy (w jakim zakresie) możliwa do ekstrakcji informacja jakościowa z obrazów jest adekwatna do zakresu treści, która obowiązuje dla tworzonej mapy.

Można się spotkać z oceną potencjału zdjęć czy obrazów odnoszącą się tylko do oceny dokładności geometrycznej. Autorzy takich ocen konkludują, że dokładność ta spełnia wymagania mapy w określonej skali, sugerując tym samym, że skoro tak, to dane obrazy nadają się do tworzenia czy aktualizacji mapy w tej skali. Tkwi tu istotne nieporozumienie. Tymczasem o przydatności bądź nieprzydatności decydują oba wymienione kryteria, a analiza i praktyka pokazują, że drugie kryterium (dotyczące zasobu informacyjnego) jest bardziej krytyczne. Na gruncie fotogrametrii wiadomo, że w zakresie kartografii średnioskalowej i drobnoskalowej o przełożeniu między skalą mapy a skalą zdjęć fotogrametrycznych, z których można tę mapę wytworzyć, decydują w pierwszym rzędzie ograniczone możliwości interpretacyjne zdjęć. Spełnienie wymagań dokładnościowych jest – w zakresie skal średnich – mniej krytyczne.

Możliwości interpretacyjne zdjęć i obrazów są pochodną ich zdolności rozdzielczej. Pojęcie zdolności rozdzielczej zdjęć lotniczych jest pojęciem jednoznacznie zdefiniowanym i może być dla danych zdjęć jednoznacznie określone. Trudniej jest pojęcie zdolności rozdzielczej przenieść na obrazy cyfrowe. Przed przejściem do oceny zasobu treści obrazów cyfrowych należy uporządkować pojęcie ich zdolności rozdzielczej. W rozdziale 4: „Porównanie pojemności informacyjnej zdjęcia analogowego i obrazu cyfrowego” zostało zdefiniowane pojęcie przestrzennej zdolności rozdzielczej w odniesieniu do tradycyjnych zdjęć lotniczych oraz obrazów cyfrowych. W rozdziale tym przedstawiono relację między terenową zdolnością rozdzielczą obrazu cyfrowego a wymiarami jego piksela oraz zilustrowano na przykładach efekty, jakie występują przy obrazowaniu obiektów o wymiarach zbliżonych do terenowej wielkości piksela. W konkluzji zostało powiedziane, że terenowa zdolność rozdzielcza obrazu cyfrowego, rozumiana jak na gruncie tradycyjnych zdjęć lotniczych, jest równa dwóm – trzem wymiarom piksela terenowego. W dalszej części podjęto

próbę porównania pojemności informacyjnej analogowych i cyfrowych systemów obrazowania uwzględniając – obok relacji ich przestrzennej zdolności rozdzielczej – również istotne różnice rozdzielczości radiometrycznej obu systemów.

5.2. Kryteria oceny potencjału kartograficznego zdjęć i obrazów

Ocena dokładności geometrycznej opracowania

W kontekście tworzenia (czy aktualizacji) map sytuacyjno-wysokościowych należy mówić o wymaganej dokładności sytuacyjnej oraz wysokościowej takiej mapy. Standardowo przyjmuje się, że:

– średni błąd sytuacyjny wynosi 0,3 mm w skali mapy,

– średni błąd wysokościowy dla terenu płaskiego wynosi 1/3 zasadniczego cięcia warstwicowego mapy.

Powszechnie wiadomo, że dokładność sytuacyjna opracowania zdjęć liniowo zależy od skali zdjęć i dokładności ich pomiaru. Błąd sytuacyjny jest wprost proporcjonalny do mianownika skali zdjęć i błędów ich pomiaru. Dla obrazów cyfrowych błąd opracowania jest wprost proporcjonalny do terenowego wymiaru piksela. Można to ująć zależnością:

$$m_{\text{syf}} = M_{\text{zdj}} m_{\text{pom}} = \frac{W}{f} m_{\text{pom}} = k P_{\text{teren}} \quad (4)$$

gdzie:

- m_{syf} – dokładność opracowania sytuacyjnego,
- M_{zdj} – mianownik skali zdjęć,
- W – wysokość lotu,
- f – ogniskowa kamery,
- m_{pom} – błąd pomiaru na zdjęciach,
- P_{teren} – terenowy wymiar piksela,
- k – współczynnik empiryczny, zwykle $k \approx 0,5 - 0,9$ [Schiewe 1995].

Pierwsza część tego wzoru jest znana z klasycznego opracowania fotogrametrycznego. Druga część odnosi się do obrazów cyfrowych. Należy podkreślić, że zarówno błąd pomiaru na zdjęciach (m_{pom}), jak i współczynnik „ k ” bardzo zależą od kontrastu obrazu. W przypadku automatycznego

opracowania obrazów cyfrowych istotny wpływ na jakość korelacji obrazów ma ich jakość radiometryczna.

Dokładność opracowania wysokościowego zdjęć lotniczych zależy od skali tych zdjęć, ich stosunku bazowego i dokładności pomiaru paralaksy na zdjęciach. Dla danego obiektu i typowego pokrycia podłużnego zdjęć (tj. dla danego stosunku bazowego) błąd opracowania wysokościowego jest wprost proporcjonalny do wysokości lotu. Zależność ta pozostaje aktualna również dla kamer cyfrowych. Dokładność opracowania wysokościowego można zatem wyrazić jako:

$$m_{\text{wys}} = \frac{W}{f} \frac{W}{B} m_k \quad (5)$$

gdzie:

- m_{wys} – dokładność opracowania wysokościowego,
- W – wysokość lotu,
- f – ogniskowa kamery,
- W/f – mianownik skali zdjęć,
- B – baza podłużna,
- B/W – stosunek pomiaru paralaksy podłużnej,
- m_k – błąd pomiaru paralaksy podłużnej.

Dla obrazów cyfrowych błąd pomiaru paralaksy podłużnej można wyrazić w funkcji rozmiaru piksela, co prowadzi do zależności przekształconej do postaci:

$$m_{\text{wys}} = k \frac{W}{B} P_{\text{teren}} \quad (6)$$

gdzie:

- k – współczynnik empiryczny, zwykle $k \approx 0,3 - 0,8$ [Schiewe 1995],
- P_{teren} – terenowy wymiar piksela.

Uwzględniając powyższe, empirycznie potwierdzone zależności, można określić przewidywaną dokładność geometryczną sytuacyjnego i wysokościowego opracowania zdjęć i lotniczych obrazów cyfrowych oraz obrazów pozyskiwanych z popularnych systemów satelitarnych.

Ocena zasobu treści zdjęć i obrazów cyfrowych

Przydatność konkretnych obrazów cyfrowych dla opracowania (czy aktualizacji) mapy w określonej skali i o określonej zawartości treści zależy od wielu czynni-

ków związanych z terenem (rzeźba terenu, kontrast obiektów) oraz parametrów tych zdjęć, a w tym przestrzennej zdolności rozdzielczej. Oczywiście jest, że zasób treści zdjęć zależy w pierwszym rzędzie od ich przestrzennej zdolności rozdzielczej. To rozdzielczość określa potencjalne możliwości interpretacyjne, zatem zdolność rozdzielcza warunkuje, czy i w jakim stopniu obiekty topograficzne, stanowiące wymaganą treść mapy w danej skali, mogą być odczytane i pomierzone na zdjęciach. Lata praktyki ukształtowały relacje między skalą tworzonej mapy, pod którą kryje się wymagany zasób treści, oraz skalą zdjęć lotniczych, których rozdzielczość umożliwia – w danych warunkach technologicznych fotogrametrycznego opracowania – opracowanie mapy o wymaganym zasobie treści.

W przypadku obrazów pozyskiwanych kamerami cyfrowymi (lotniczych czy satelitarnych) parametrem określającym ich możliwy do ekstrakcji zasób treści są wymiar piksela i jakość radiometryczna, wyrażana przez rozdzielczość radiometryczną. W rozdziale 4 podano ilościowe relacje tych parametrów pozwalające porównywać analogowe i cyfrowe systemy obrazowania (wzór 3). Pozwala to wskazać pożądane parametry zdjęć analogowych i systemów cyfrowych dla wytworzenia map sytuacyjno-wysokościowych w określonej skali. Parametry te przedstawia tabela 3.

Zawarte w tabeli relacje dotyczą:

– współczesnych technologii opracowania fotogrametrycznego,

Tabela 3. Rekomendowane parametry zdjęć lotniczych i systemów cyfrowych dla opracowania map sytuacyjno-wysokościowych o treści topograficznej.

Table 3. Recommended parameters of aerial photos and digital imaging systems for compilation of topographic planimetric and contour maps.

Skala mapy topograficznej	Skala zdjęć lotniczych	Piksel terenowy obrazu cyfrowego
1:2000	1:10 000	0,25 m
1:5000	1:18 000	0,45 m
1:10 000	1:26 000	0,65 m
1:25 000	1:40 000	1,00 m
1:50 000	1:70 000	1,75 m

– zdjęć lotniczych wykonywanych współczesnymi kamerami lotniczymi na filmie drobnoziarnistym (nisko-czułym lub średnioczułym) i skanowanych zgodnie z rekomendacjami zawartymi w rozdz. 4 (dla obliczeń przyjęto piksel skanowania 14 μ m),

– kamer cyfrowych o rozdzielczości radiometrycznej 11–12 bitów.

Przytoczone w tabeli parametry tradycyjnych zdjęć lotniczych i systemów cyfrowych wywodzą się ze stosowanych w praktyce przełożeń między skalą map a skalą zdjęć oraz relacji pojemności informacyjnej analogowych i cyfrowych systemów obrazowania. Nie należy jednak podanych relacji traktować jako uniwersalne. W konkretnych przypadkach mogą mieć miejsce odstępstwa od tych reguł, szczególnie w przypadku tworzenia map numerycznych, często o zasobie treści istotnie różniącym się od zasobu tradycyjnych map topograficznych.

Komentarz do rekomendowanych relacji:

1. Podane rekomendacje dotyczą przypadku tworzenia map topograficznych w określonej skali o „tradycyjnym” zasobie treści.
2. Zakres treści mapy topograficznej w danej skali nawet w tradycyjnym rozumieniu jest różny w różnych krajach. Z tego punktu patrząc, mapy w tradycji europejskiej są wyraźnie bogatsze w treść od map amerykańskich, a mapy polskie bogatsze od map europejskich. Przekłada się to na związek skali mapy z wymaganymi parametrami zdjęć i obrazów.
3. Zakres treści map topograficznych zależy od charakteru terenu: jest inny dla obszarów miejskich, a inny dla odkrytych obszarów rolniczych. Przekłada się to na związek skali mapy z wymaganymi parametrami zdjęć i obrazów.
4. Obecnie tworzy się mapy topograficzne w wersji numerycznej. Częściej mówi się raczej o bazie danych topograficznych niż o mapie. Pojęcie „skali” takiej mapy jest w znacznym stopniu umowne.
5. Zakres treści map topograficznych (czy baz danych topograficznych) może znacznie odbiegać od zakresu tradycyjnych map, aż do sytuacji, gdy mapa taka ma treść zorientowaną na konkretne potrzeby, np. danej branży (mapa „branżowa”), o znacznie zubożonej treści. W takich przypadkach problem należałoby

widzieć poprzez możliwość interpretacji obrazu w zakresie obiektów stanowiących treść konkretnego opracowania.

6. Problem relacji między skalą mapy a parametrami zdjęć czy obrazów nieco inaczej kształtuje się w przypadku tworzenia nowej mapy topograficznej i aktualizacji takiej mapy. Przy aktualizacji mapy, posługując się istniejącą mapą, można odczytać więcej detali z obrazu (np. decyzja, czy widoczna linia to droga polna, czy granica działki).
7. Na relacje między skalą mapy a parametrami zdjęć i obrazów ma wpływ technologia opracowania (nieco inaczej będzie przy wektoryzacji „mono” ortofotobrazu, a inaczej przy stereodigitalizacji).

Porównując oba kryteria określające potencjał kartograficzny obrazów, tj. dokładność geometryczną opracowania i możliwości interpretacyjne, łatwo zauważyć, że dostępne obrazy satelitarne łatwiej spełniają wymagania dokładności geometrycznej niż wymagania dotyczące zasobu treści. Krytycznym czynnikiem limitującym potencjał kartograficzny dostępnych obrazów satelitarnych jest ich ograniczony zasób treści, a dopiero w drugiej kolejności ich dokładność geometryczna.

Ocena możliwości generowania ortofotomap ze zdjęć i obrazów cyfrowych

Jeżeli celem opracowania jest wytworzenie cyfrowej ortofotomapy, to jej zdolność rozdzielczą określa wymiar wynikowego piksela terenowego. Należy mieć na uwadze, że w procesie ortorektifikacji następuje przepróbkowanie (ang.: *resampling*) oryginalnego obrazu na wynikową ortofotomapę. Każde przepróbkowanie wiąże się z pewną stratą informacji, na poziomie 10–20%. Dla zachowania właściwych relacji między rozdzielczością obrazu a rozdzielczością ortofotomapy, piksel obrazu czy skanowanego zdjęcia powinien być mniejszy o 10–20% od piksela generowanej ortofotomapy.

Cyfrowa ortofotomapa funkcjonuje zwykle w formie cyfrowej, nie ma więc zastosowania pojęcie jej skali. Skala pojawia się przy wydruku cyfrowej ortofotomapy. Przy wydruku ortofotomapy przyjmuje się, że dla zachowania oryginalnej treści ortofotomapy cyfrowej wy-

druk powinien mieć rozdzielczość około 10 pikseli/mm. Praktyka pokazuje, że przy korzystaniu z obrazów cyfrowych i właściwej ich obróbce cyfrowej można uzyskać zadowalający efekt wizualny już przy wydruku o rozdzielczości 5–7 pikseli/mm.

Przyjmuje się dodatkowo, że dokładność cyfrowej ortofotomapy, wyrażona w wielkości jej piksela, wynosi 2–3 piksele. Dla uzyskania takiej dokładności konieczne jest – na etapie ortorektifikacji – wykorzystanie Numerycznego Modelu Terenu (NMT) o odpowiedniej dokładności wysokościowej.

Uwzględniając powyższe rekomendacje, można określić, w jakiej maksymalnej skali można wizualizować (plotować, drukować) cyfrowe ortofotomapy, wytworzone z powszechnie dostępnych obrazów satelitarnych.

Obrazy satelitarne:

– z pikselem $P_{term} = 30$ m (np. wielospektralne kanały ETM Landsat 7) umożliwiają wytworzenie ortofotomap w skali 1:150 000,

– z pikselem $P_{term} = 20$ m (np. wielospektralne kanały SPOT 1–4) umożliwiają wytworzenie ortofotomap w skali 1:100 000,

– z pikselem $P_{term} = 15$ m (np. panchromatyczny kanał ETM Landsat 7) umożliwiają wytworzenie ortofotomap w skali 1:75 000,

– z pikselem $P_{term} = 10$ m (np. wielospektralne kanały SPOT 5, panchromatyczne kanały SPOT 1–4) umożliwiają wytworzenie ortofotomap w skali 1:50 000,

– z pikselem $P_{term} = 5$ m (np. panchromatyczny kanał SPOT 5, panchromatyczny kanał IRS-1C/1D) umożliwiają wytworzenie ortofotomap w skali 1:25 000,

– z pikselem $P_{term} = 1,8 \div 2,5$ m (np. panchromatyczny kanał SPOT 5 w trybie „super”, obrazy panchromatyczne EROS-A) umożliwiają wytworzenie ortofotomap w skali 1:10 000,

– z pikselem $P_{term} = 1$ m (np. wysokorozdzielcze systemy obrazowania satelitarnego: Ikonos-2, QuickBird) umożliwiają wytworzenie ortofotomap w skali 1:5000.

Wizualizacja cyfrowych ortofotomap w większej skali nie zwiększa zakresu informacji odczytywanych przy wizualnym oglądzie ortofotomapy.

Porównanie wymaganej rozdzielczości obrazów cyfrowych dla tworzenia topograficznej mapy wektoro-

wej i ortofotomapy potwierdza znany fakt, że dla wytworzenia cyfrowej ortofotomapy wystarczają obrazy o niższej zdolności rozdzielczej niż dla wytworzenia mapy wektorowej w tej samej skali (przykład: zdjęcia 1:26 000 pozwalają wytworzyć ortofotomapę odpowiadającą skali 1:5000, ale mapę wektorową tylko w skali 1:10 000).

5.3. Ocena przydatności wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych dla tworzenia produktów kartograficznych

Przez wiele lat komercyjne zastosowania obrazów satelitarnych były ograniczone dostępnymi obrazami z pikselem 10 m i stereoskopią „z sąsiednich” orbit (jak SPOT). Od niedawna działają operacyjne systemy obrazowania z pikselem 1 m, a nawet nieco mniejszym. Stawia to oczywiste pytanie: czy (w jakim stopniu) obrazy te mogą być przydatne dla wytwarzania typowych produktów kartograficznych. Odpowiedź na takie pytania powinna uwzględniać kryteria zarówno techniczne, jak i ekonomiczne, szczególnie w porównaniu z rozwiązaniem bazującym na tradycyjnych zdjęciach lotniczych.

W literaturze można spotkać się z różnymi opiniami na temat zakresu przydatności wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych. Niejednoznaczne są opinie o potencjale kartograficznym tych obrazów. Można wskazać kilka powodów tych rozbieżności:

1. Brak dostatecznych wyników eksperymentalnych potwierdzających praktyczny zakres użyteczności obrazów, szczególnie w kontekście prac kartograficznych prowadzonych na szerszą skalę. Satelitarne obrazy dużej rozdzielczości są dostępne od końca 1999 r., tj. od umieszczenia na orbicie satelity Ikonos-2 – pierwszego, komercyjnego systemu „metroowego”. Jednak dopiero po zaistnieniu systemu QuickBird i jego wejściu w fazę operacyjną (druga połowa 2002 r.), oraz w przededniu zaistnienia kolejnych, można mówić o rynku takich obrazów.
2. Autorzy, wypowiadając się o potencjale kartograficznym obrazów, nie zawsze rozróżniają potencjał pomiarowy od potencjału interpretacyjnego. Często za kryterium użyteczności przyjmuje się tylko dokładność

pomiarową, tymczasem czynnikiem limitującym przydatność obrazów satelitarnych nie są ich wysokie możliwości pomiarowe, ale ograniczone możliwości interpretacyjne.

3. Powodem nieporozumienia może być niejednoznaczne rozumienie zdolności rozdzielczej obrazów cyfrowych.
4. Środowisko geoinformacyjne jest „zalewane” informacją typu reklamowego. Z oczywistych powodów w takich informacjach wyolbrzymia się zalety obrazów satelitarnych lub przedstawia problem jednostronnie.
5. Opinie o potencjale obrazów satelitarnych formułowane są w oparciu o wybrane próbki tych obrazów pozyskane w bardzo dobrych warunkach atmosferycznych, o bardzo wysokiej jakości, dostarczone przez dystrybutorów tych obrazów. Tymczasem realna jakość tych obrazów może być zróżnicowana, głównie z powodu wpływu atmosfery. Należy mieć na uwadze, że atmosfera wpływa degradującą na jakość, szczególnie w takich obszarach, jak Europa.
6. Autorzy, wypowiadając się o przydatności obrazów satelitarnych do tworzenia produktów kartograficznych w określonej skali, mają często na uwadze tworzenie ortofotomap, tymczasem należy rozróżniać wymagania w odniesieniu do tworzenia ortofotomap i numerycznych map topograficznych (patrz rozdz. 5.2: „Kryteria oceny potencjału kartograficznego zdjęć i obrazów”).

Kartograficzne wykorzystanie wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych

W kontekście tworzenia map sytuacyjno-wysokościowych potencjał kartograficzny obrazów należy rozumieć jako:

- potencjał pomiarowy, określający dokładność sytuacyjną i wysokościową opracowania,
- potencjał interpretacyjny, określający zasób treści obrazu.

W kwestii możliwości korekcy geometrycznej wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych można stwierdzić, że stosowanie ścisłych modeli, dokładnych fotopunktów (błąd położenia około 0,5 m) i odpowiednio dokładnego NMT pozwala uzyskać dokładność korek-

cji obrazów QuickBird na poziomie około 1 m, obrazów Ikonos 1÷2 m i EROS 4 m. Wyniki takie, odniesione do rozdzielczości tych obrazów, oznaczają możliwość korekcy na poziomie 1–2 piksele [Kurczyński i in. 2002b; Toutin i in. 2002].

Z dwóch kryteriów potencjału kartograficznego obrazów satelitarnych drugie jest bardziej „krytyczne”. Jeżeli zadaniem jest tworzenie czy aktualizacja mapy topograficznej (o dokładności sytuacyjno-wysokościowej i zasobie treści jak „tradycyjna” mapa topograficzna), to zgodnie z analizą przeprowadzoną w rozdz. 5.2. i zawartymi tam rekomendacjami (tabela 3):

- dla tworzenia mapy w skali 1:10 000 konieczny jest piksel obrazu $P_{\text{ter}} \leq 0,65$ m,
- dla tworzenia mapy w skali 1:25 000 konieczny jest piksel obrazu $P_{\text{ter}} \leq 1,00$ m,
- dla tworzenia mapy w skali 1:50 000 konieczny jest piksel obrazu $P_{\text{ter}} \leq 1,75$ m.

Oznacza to, że spośród dostępnych obrazów satelitarnych obecnie dostępne obrazy Ikonos-2 i QuickBird (z pikselem terenowym w zakresie 0,6÷1,0 m) są przydatne dla tworzenia map topograficznych w skali 1:25 000 w pełnym zakresie treści. Obrazy te nie gwarantują tworzenia map topograficznych w skali 1:10 000 w pełnym zakresie treści.

Dla tworzenia map topograficznych w skali 1:50 000 przydatne i wystarczające są obrazy systemu EROS-1A z pikselem terenowym 1,8 m. Czyny to przydatnym te obrazy dla tworzenia i aktualizacji priorytetowego obecnie w kraju produktu, jakim jest mapa wektorowa poziomu 2 (VMap level 2).

Potencjał kartograficzny obrazów satelitarnych można wyrazić poprzez odniesienie do zdjęć lotniczych o podobnym potencjale. Analiza przeprowadzona w rozdz. 5.2, dotycząca potencjału pomiarowego i interpretacyjnego obrazów cyfrowych, pozwala stwierdzić, że potencjał kartograficzny (pomiarowy i interpretacyjny) wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych typu Ikonos czy QuickBird z pikselem zbliżonym do 1 m odpowiada potencjałowi zdjęć lotniczych w skali 1:25 000–1:35 000 (porównaj tabelę 3).

Powyższe stwierdzenie dotyczy potencjału kartograficznego obrazów satelitarnych w kontekście tworzenia topograficznych map wektorowych i nie może być

uogólniane na inne możliwe produkty i zastosowania tych obrazów. Stwierdzenie to jest bardzo ważne z technicznego i ekonomicznego punktu widzenia. Wskazuje, jakie zdjęcia lotnicze mogą być zastąpione przez wysokorozdzielcze obrazy satelitarne. Należy zauważyć, że w literaturze można spotkać bardziej „optymistyczne” oceny potencjału obrazów satelitarnych.

Przedstawione problemy mają kluczowe znaczenie dla aktualnej sytuacji krajowej. Rozpoczęto wdrażanie Bazy Danych Topograficznych (TBD), w skład której wchodzi trzy główne komponenty:

- Numeryczny Model Terenu o dokładności wysokościowej 1 m,
- cyfrowa ortofotomapa z pikselem 0,5 m i dokładnością 1,5 m (3 piksele),
- mapa wektorowa o zasobie treści i dokładności odpowiadającej tradycyjnej mapie topograficznej w skali 1:10 000.

Wytworzenie TBD dla kraju jest zadaniem priorytetowym dla państwowej służby geodezyjnej, jest to jednak zadanie bardzo kosztowne z realizacją obliczoną na wiele lat. Obecnie dostępne wysokorozdzielcze obrazy satelitarne typu Ikonos czy QuickBird nie pozwalają wytworzyć ortofotomap w standardzie TBD. W zakresie komponentu mapy wektorowej mapa taka może być wytworzona w niepełnym wymiarze treści, ale w perspektywie około 2 lat sytuacja ulegnie zasadniczej zmianie, wraz z uruchomieniem planowanych systemów satelitarnych z pikselem terenowym na poziomie 0,5 m.

W rozdz. 5.2 przedstawiono analizy i kryteria dotyczące generowania ortofotomap z obrazów cyfrowych. Z analizy tej wynika, że:

1. Obrazy panchromatyczne SPOT 1–4 (piksel 10 m) są przydatne dla generowania czarno-białych ortofotomap odpowiadających skali 1:50 000.
2. Obrazy wielospektralne SPOT-5 (piksel 10 m) są przydatne dla generowania barwnych ortofotomap odpowiadających skali 1:50 000.
3. Obrazy panchromatyczne SPOT-5 (piksel 5 m) lub IRS-1C/1D (piksel 5,8 m) są przydatne dla generowania czarno-białych ortofotomap odpowiadających skali 1:25 000.
4. Obrazy panchromatyczne SPOT-5 w trybie „super” (piksel 2,5 m) lub obrazy EROS-1A (piksel 1,8 m)

są przydatne dla generowania czarno-białych ortofotomap odpowiadających skali 1 : 10 000.

5. Obrazy Ikonos-2 oraz QuickBird są przydatne dla generowania czarno-białych lub barwnych ortofotomap odpowiadających skali 1 : 5000.

Odnosząc możliwości generowania cyfrowych ortofotomap z obrazów satelitarnych do aktualnych potrzeb krajowych należy zauważyć przydatność obrazów Ikonos i QuickBird do generowania ortofotomap na potrzeby Systemu Identyfikacji Działek Rolnych – LPIS (LPIS, składowa IACS). Taka ortofotomapa ma piksel terenowy 1 m i dokładność około 2 m, spełnia więc standardy UE w tym zakresie. Cyfrowa ortofotomapa o takich parametrach może być drukowana w skali 1 : 5000.

6. Podsumowanie

Przez dziesięciolecie rozwoju fotogrametria wypracowała metody opracowania produktów fotogrametrycznych na bazie zdjęć lotniczych. W ślad za tym opracowano bardzo wydajne technologie fotogrametryczne. Zdefiniowano precyzyjnie wskaźniki określające potencjał pomiarowy i interpretacyjny zdjęć. Pozwala to trafnie zaplanować optymalne parametry zdjęć lotniczych umożliwiających realizację postawionego zadania pomiarowego. „Optymalne” parametry zdjęć oznacza parametry umożliwiające osiągnięcie zadanych parametrów produktu (np. dokładność i zakres treści mapy) w danych warunkach technologicznych i przy minimalizacji kosztów (głównie: minimalizacji liczby zdjęć koniecznych do opracowywania). Rozwój optyki, mechaniki, elektroniki i metod opracowania skutkował zmianami technologicznymi i zmianami relacji parametrów zdjęć i celu, jakimi mają służyć (w przypadku mapy to tzw. „przełożenie skalowe”) z wynikającymi z tego skutkami ekonomicznymi. Ten ukształtowany przez dziesięciolecie obraz uległ zachwianiu w minionych 3–5 latach, wraz z pojawieniem się jakościowo nowych źródeł obrazowania, tj. lotniczych kamer cyfrowych i wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych o potencjale kartograficznym częściowo pokrywającym się z potencjałem zdjęć lotniczych.

Pojawił się problem oceny potencjału tych nowych źródeł i znalezienia relacji między wskaźnikami ich jako-

ści a jakością tradycyjnych zdjęć. Doniesienia literaturowe wskazują na znaczne rozbieżności takich ocen.

W przedstawionej pracy zaproponowano pojęcia i wskaźniki ilościowe umożliwiające ocenę zdolności rozdzielczej obrazów pozyskiwanych kamerami cyfrowymi (lotniczymi czy satelitarnymi). Zdefiniowano pojemność informacyjną obrazów cyfrowych, uwzględniającą – oprócz przestrzennej zdolności rozdzielczej – również rozdzielczość radiometryczną. Pozwala to na porównania tradycyjnych zdjęć lotniczych z obrazami satelitarnymi. Dało to podstawy do znalezienia technicznych relacji między parametrami charakteryzującymi jakość zdjęć lotniczych a parametrami obrazów cyfrowych, a dalej, do technologicznych związków między wytwarzanymi produktami kartograficznymi a planowymi parametrami obrazowania, umożliwiającymi wytworzenie takich produktów.

Przedstawiona w pracy metodyka posłużyła do oceny potencjału pomiarowego wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych. Pozwoliło to odnieść obecnie dostępne systemy satelitarne do możliwości tworzenia z nich różnorodnych produktów. W kontekście opracowań mapowych zwrócono uwagę na znaczną rozbieżność między stosunkowo dużym potencjałem pomiarowym takich obrazów (umożliwiającym osiągnięcie dużych dokładności geometrycznych pomiaru) a ograniczonym potencjałem interpretacyjnym tych obrazów.

Przedstawiona w pracy metodyka pozwala postrze-
gać dostępne obecnie źródła obrazowania, a mianowicie:

- tradycyjne zdjęcia lotnicze,
- lotnicze obrazowanie cyfrowe,
- wysokorozdzielcze obrazowanie satelitarne

jako wzajemnie komplementarny system oraz dobierać źródło i parametry obrazowania do potrzeb postawionego zadania pomiarowego. Zaprezentowane w pracy trendy rozwoju pozwalają prognozować, że w najbliższych latach będą równorzędnie dostępne te trzy źródła, ze stopniową tendencją wypierania kamer tradycyjnych przez kamery cyfrowe oraz przejmowaniem części zastosowań bazujących dotychczas na zdjęciach lotniczych przez obrazowanie satelitarne. Będzie to jednak proces stopniowy, rozłożony na kilka lat.

W pracy postawiono tezę o zbliżeniu, rozłącznych dotąd, dwóch nurtów wykorzystania zdjęć i obrazów,

Bibliografia

mianowicie nurtu pomiarowego (reprezentowanego przez fotogrametrów) i nurtu interpretacyjnego (reprezentowanego przez specjalistów teledetekcji). Na etapie pozyskiwania danych źródłowych dla obu wspomnianych nurtów zbliżenie to stało się faktem. Obrazy pozyskiwane lotniczymi kamerami cyfrowymi i obrazy satelitarne charakteryzują się bardzo wysokimi możliwościami pomiarowymi i interpretacyjnymi, dzieje się tak za sprawą ich dużej przestrzennej zdolności rozdzielczej, dużej rozdzielczości radiometrycznej i wielospektralności, wyrażającej się obrazowaniem w kilku wąskich zakresach spektralnych. Obrazowania te są w równym stopniu dedykowane dla opracowań pomiarowych, jak i interpretacyjnych. Ta nowa okoliczność może skłonić przedstawicieli obu nurtów do częściowej rewizji stosowanych dotąd podejść metodycznych oraz zbliżenia obu nurtów.

Podjęta w pracy problematyka ma praktyczne odniesienie do uwarunkowań krajowych. Kraj stoi przed pilną potrzebą wytworzenia produktów o zasięgu krajowym: Numerycznego Modelu Terenu, ortofotomapy i bazy danych topograficznych. Współczesne techniki obrazowania, włączając w to wysokorozdzielcze obrazowanie satelitarne, mogą ułatwić i przyspieszyć realizację tego zadania, a w przyszłości utrzymać te produkty w stanie aktualności. Można oczekiwać, że nowe możliwości techniczne w zakresie obrazowania szybko znajdują odbicie w tworzonych czy aktualizowanych standardach technicznych i wytycznych technicznych z zakresu fotogrametrii. Dla przykładu, przy definiowaniu standardu ortofotomapy nie ma uzasadnienia standard ten definiować oddzielnie dla ortofotomapy wytworzonej ze zdjęć lotniczych i obrazów satelitarnych. Funkcjonujący dotąd w praktyce podział na ortofotomapy „lotnicze” i „satelitarne” traci uzasadnienie w tym sensie, że taki sam produkt końcowy można wytworzyć z różnych danych źródłowych.

Istnieje również szansa, że wysokorozdzielcze obrazy satelitarne dostępne bez zbędnych technicznych i formalnych przeszkód zachęcą organa administracji samorządowej regionalnej i lokalnej do ich wykorzystania dla rozwiązywania regionalnych i lokalnych zadań gospodarczych. Zdjęcia i obrazy zajęłyby wówczas trwałe miejsce w życiu gospodarczym, adekwatne do ich faktycznych możliwości i potencjalnych korzyści.

Cramer M., 2003, *Integrated GPS/inertial and digital aerial triangulation – recent test results*, Photogrammetric Week '03, Heidelberg: Wichmann.

Ewiak I., Kaczyński R. 2004, *Accuracy of DTM generation from SPOT4 and SPOT5-HRS data*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXIII, part B7, Istanbul, XX ISPRS Congress, XXXV, B1, Com. I, p. 474–478.

Jacobsen K., 2003, *Geometric Potential of IKONOS and QuickBird-Images*, Photogrammetric Week '03, Heidelberg: Wichmann.

Kaczyński R., 1999, *Satelitarne programy rozpoznawcze i szpiegowskie USA i ZSRR w okresie trwania zimnej wojny*, Geodeta, nr 11 (54), listopad.

Kaczyński R., Ewiak I., Ren Wei Chun, Yang Ming Hui, 2001, *Evaluation of panchromatic IKONOS data for mapping*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 11, Kraków, s. 3–1 do 3–6.

Kaczyński R., 2002, *Dokładność opracowania ortofotomapy cyfrowej z danych Carterra Geo Pan I Quick Bird Pan*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Warszawa.

Kaczyński R., Ewiak I., Majde A., 2004, *Accuracy of DTM and ortho generated from IKONOS stereo data*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXIII, part B7, Istanbul, XX ISPRS Congress, XXXV, B4, Com. IV, p. 463–464.

Kurczyński Z., 1999a, *Zasady wykonywania prac fotolotniczych. Wytyczne techniczne K-2.7*, GUGiK, Warszawa.

Kurczyński Z., 1999b, *Lotnicze kamery cyfrowe – stan obecny i perspektywy*, Geodeta, nr 11 (54), listopad.

- Kurczyński Z., 2000b, *Lotnicza cyfrowa kamera fotografometryczna. Nowe wyzwania i szansa*, Geodeta, nr 12 (67), grudzień.
- Kurczyński Z., Wolniewicz W., 2002a, *Wysokorozdzielcze systemy obrazowania satelitarne*, część I, Geodeta, nr 7 (86), lipiec 2002, część II, Geodeta, nr 8 (87), sierpień.
- Kurczyński Z., Wolniewicz W., 2002b, *Korekcja geometryczna wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych*, Geodeta, nr 11 (90), listopad.
- Kurczyński Z., Wolniewicz W., 2003, *SPOT 5 – Nowa jakość obrazowania satelitarnego*, Geodeta, nr 7 (98), lipiec.
- Kurczyński Z., 2004, *Współdziałanie wieloźródłowych systemów obrazowania powierzchni Ziemi*, Prace Naukowe PW, Geodezja, z. 39, Oficyna Wydawnicza PW.
- Kurczyński Z., Wojtynek R., Wolniewicz W., 2004, *Assessment of VHR images utilization for the needs of the polish national geodesy authorities*, Geographical Information Systems in Research & Practice, Zagreb, Croatia, p. 65–71.
- Kurczyński Z., Wolniewicz W., 2005, *Ocena przydatności obrazów satelitarnych o bardzo dużej rozdzielczości (VHRS) do tworzenia baz danych topograficznych*, Przegląd Geodezyjny, nr 5, maj.
- Kurczyński Z., Wolniewicz W., 2005, *Assessment of Very High Resolution Satellite Images (VHR) for the development of topographic database*, 6th Geomatic Week, 8th–12th February, Barcelona.
- Leberl F. i in., 2003, *The UltraCam Large Format Aerial Digital Camera System*, Proceedings of ASPRS, Anchorage, Alaska, 5–9 May.
- Leberl F., Gruber M., 2003, *Flying the New Large Format Digital Aerial Camera Ultracam*, Photogrammetric Week '03, Heidelberg: Wichmann.
- Leica, 1996, *Leica production Information. Test with the new Leica 15/4 UAG-S Lens cone. Results of High-Altitude Photography with Leica RC30 and 15/4 UAG-S Lens Cone.*
- Nale D. K., 2002, *QuickBird – Aerial Product Comparison Report* (prepared by EMAP International for DigitalGlobe, August, www.digitalglobe.com)
- Schiewe J., 1995, *Cartographic potential of MOMS-02/D2 Images Data*. Photogrammetric Week '95, Heidelberg: Wichmann.
- Schlienger R., 1996, *Increased Image Quality Resulting from New Technologies in Aerial Cameras*, International Congress for Photogrammetry, Com. I, Vienna.
- Toutin T., Chenier R., Carbonneau Y., Alcad' de N., 2002, *3D mapping with high resolution images*, Proceedings of 22nd EARSeL Symposium, Prague, Czech Republic, June 4–6.

Summary

For a long time, photogrammetric projects were based on conventional aerial photographs. This situation has been rapidly changed recently. This results from development of new Earth surface imaging systems, including aerial digital cameras and high resolution satellite images, which cartographic potential is comparable with small scale aerial photographs (scale 1:25 000 and smaller). Thus, from the technical point of view, imaging possibilities from satellite platforms are approaching those of aerial ones.

This new situation gives rise to heated discussions within the geoinformation society, concerning further development of conventional aerial cameras and future perspectives of replacing them with new, digital cameras. Considering the foreseen development of satellite, high resolution imaging of the Earth surface, the future of aerial imaging is questioned. Various opinions concerning the discussed issues and various development scenarios are presented. Symptomatic divergence of opinions is interesting; it results from the lack of well-ordered terms, which would allow for comparison of multi-source image data.

The discussed publication proposes a system of terms and quantitative indices which can be used for evaluation of the cartographic potential of multi-source data, i.e.:

- 1) conventional aerial photographs,
- 2) digital images acquired with aerial digital cameras,
- 3) very high resolution satellite images.

This allowed for comparing various systems and became the basis for evaluation of the usefulness of particular photographs and images for implementation of specified measurement tasks.

Development perspectives of various technical means used for satellite and aerial imaging are discussed in the publication. According to the author's opinion, separate consideration of those sources is not justified. They create a system of complimentary components.

The only problem, which should be solved, is to select a source and imaging parameters for a given task. The development trends, presented in the publication, allows to foresee that the discussed three sources will be equally available within the nearest future, with the tendency to replace conventional cameras with digital ones and to take over some applications, which have been based on aerial photographs, by satellite imageries. The tendency of mutual linkage between aerial and satellite imaging, for the needs of existing and new GIS applications, will be much stronger than expansion of one source at the expense of another one. However, this would be a gradual process, which will last several years.

The thesis concerning the approach between the currently separated two trends of the use of photographs and images, namely the measurement trend (represented by photogrammetrists) and the interpretation trend (represented by remote sensing experts), is presented in the publication. This approach becomes the reality for both trends at the source data acquisition stage. Images acquired with aerial digital cameras and satellite images are characterised with high measurement and interpretation possibilities; this results from their high spatial and radiometric resolution, as well as from the multispectral nature of those images, allowing for data acquisition in several spectral bands. Those images are equally dedicated for measurement and interpretation tasks. These new circumstances may impel representatives of both trends to partially revise the currently used methodological approaches and to get them much closer to each other. Such situation is the realisation of the earliest expectation. During XVI-th Congress of International Society of Photogrammetry and Remote Sensing the new definition of photogrammetry was elaborated, connecting photogrammetry and remote sensing into one trend and the name of Society was widened for the „remote sensing” component.

Issues discussed in the publication may be practically referred to the existing conditions of national GIS systems development as well as to their future perspectives.