

Korekcja geometryczna wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych

Zrób to sam

ZDZIŚŁAW KURCZYŃSKI, WIESŁAW WOLNIEWICZ

Stwierdzenie, że jesteśmy świadkami nowej ery w rozwoju GIS – wyznaczonej zaistnieniem tzw. metrowych obrazów satelitarnych – nie jest już odkrywcze. Na czym jednak polega ta „nowa era” i co z tego będzie miał zwykły zjadacz chleba? Czy korekcja geometryczna to coś dla wąskiego grona wtajemniczonych, czy przeciwnie, wiedza, której praktyczne skutki powinni znać potencjalni użytkownicy tych obrazów, a więc my wszyscy?

Opracowanie mapy wektorowej, ortofotomapy czy Numerycznego Modelu Terenu (NMT) z klasycznych zdjęć fotogrametrycznych lub obrazów satelitarnych wymaga poddania ich procesowi „geometryzacji”, tj. opisanie związków geometrycznych między obiektem (powierzchnią Ziemi) a jego obrazem. To oczywiste. Wiemy również, że w przypadku obrazów satelitarnych ten opis geometryczny jest bardziej złożony niż dla zwykłych zdjęć. Dzieje się tak dlatego, że zdjęcie powstaje w ułamku sekundy, a jego geometria jest zdeterminowana (jest to rzut środkowy). W przypadku obrazów satelitarnych pozyskiwanych skanerami optyczno-mechanicznymi czy elektro-optycznymi jest to proces dynamiczny, obraz tworzy się w miarę ruchu satelity. Każda niestabilność lotu obarcza go zniekształceniami. Nie ma więc dwóch obrazów o takiej samej geometrii. To znacznie komplikuje zadanie.

Od pojawienia się wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych wiele publikacji poświęconych jest ich korekcji geometrycznej. Istnieje duża dysproporcja między bardzo wysoką zdolnością rozdzielczą tych obrazów (odpowiadającą zasobowi treści map topograficznych w skali 1:10 000), a ich relatywnie niską jakością pomiarową (odpowiadającą dokładności drobnoskalowych map topograficznych w skali 1:250 000 czy 1:100 000). Aby tę dysproporcję zlikwidować i wykorzystać pełny potencjał tych obrazów, trzeba je poddać procesowi korekcji geometrycznej. Operatorzy systemów satelitarnych oferują „surowe” obrazy oraz gotowe produkty o różnym stopniu skorygowania. Mamy tu głównie ortofotomapy o różnej dokładności sytuacyjnej czy NMT. Jednak produkty przetworzone oferowane są po znacznie wyższych cenach niż „surowe” obrazy [Z. Kurczyński, W. Wolniewicz, *Wysokorozdzielcze systemy obrazowania satelitarnego*, GEODETA 7/2002, 8/2002 – red.]. Na przykład ortofotomapa jest około 5 razy droższa niż obraz, z którego powstała.

Czy zwykły użytkownik może samodzielnie poddać obrazy korekcji? A jeśli tak, to jakie musi spełnić warunki? Jakich wyników może się spodziewać? Od czego i w jakim stopniu zależy jakość takiej korekcji? Jak się to przekłada na koszty? Takie

pytania stawiają sobie dzisiaj liczni potencjalni użytkownicy, w tym urzędnicy administracji państwowej i samorządowej różnego szczebla, którzy w pierwszym rzędzie mają stać się odbiorcami tych obrazów. Poniższy tekst jest próbą odpowiedzi i „odmitologizowania” problemu, tak aby był zrozumiały nie tylko dla „wtajemniczonych”.

● Nowa jakość problemu korekcji geometrycznej

Czy przedstawiona ranga problemu korekcji geometrycznej wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych nie jest przesadzona? Przecież z podobnymi zadaniami mamy do czynienia od wejścia obrazów satelitarnych do powszechnego użycia, czyli od około 30 lat. Tak jest w istocie, uzasadnione jest jednak stwierdzenie, że zagadnienie to wraz z pojawieniem się obrazów „metrowych” osiągnęło nowy wymiar.

W dotychczasowej praktyce wykształciły się dwa podejścia do opracowania zdjęć lotniczych i obrazów satelitarnych (z właściwymi sobie metodami i grupami zainteresowanych specjalistów). Mowa tu o nurcie „pomiarowym”, reprezentowanym przez fotogrametrów zorientowanych na ekstrakcję ze zdjęć i obrazów informacji ilościowej do tworzenia precyzyjnych – w sensie geometrycznym – opracowań, takich jak mapy, ortofotomapy czy NMT.

Drugim nurtem jest nurt „interpretacyjny”, reprezentowany przez specjalistów licznych branż, zorientowany na ekstrakcję informacji jakościowych dla wykrywania i interpretacji obiektów i zjawisk na powierzchni Ziemi, wizualizowanych najczęściej w formie map tematycznych. Dokładność tych map jest raczej problemem drugorzędny.

Obie orientacje rozwijają się dość niezależnie, choć często korzystają z tych samych materiałów źródłowych, a obie grupy specjalistów rekrutują się z różnych środowisk zawodowych. Można nawet zaobserwować swego rodzaju współzawodnictwo (znane dyskusje: czy fotogrametria jest częścią teledetekcji, czy odwrotnie

nie). Rozwój satelitarnych systemów obrazowania spowodował gwałtowny rozwój drugiej orientacji, rozwinęła się teledetekcja. Różnice obu nurtów widać wyraźnie w podejściu do zdjęć i obrazów satelitarnych. W dotychczasowej praktyce przy opracowaniu tematycznym bazującym na obrazach satelitarnych nie była konieczna nadmierna troska o korekcję geometryczną tych obrazów. Wystarczało płaskie przetworzenie (np. obrazów Landsat czy SPOT), często na punkty wzięte z mapy topograficznej (takiej jaka była dostępna). Autor takiego przetworzenia nie musiał rozumieć niuansów metodycznych. Podejście to było usprawiedliwione tym, że korzystano zwykle z obrazów „nadirowych”, a więc o relatywnie małych zniekształceniach (w porównaniu z rozmiarami piksela). Wraz ze wzrostem zdolności rozdzielczej obrazów satelitarnych i dodatkowo możliwości stereoskopii, fotogrametry zaczęli spoglądać na obrazy tak jak na pomiarowe zdjęcia lotnicze (przydatne np. dla tworzenia czy aktualizacji mapy topograficznej).

Naszkicowany tu stan rzeczy dramatycznie zmienia się wraz z zaistnieniem obrazów „metrowych”. Dla wykorzystania ich pełnego potencjału pomiarowego i interpretacyjnego już nie wystarczy „płaskie przetworzenie na punkty wzięte z mapy topograficznej”. Takie podejście zniweczyłoby bowiem potencjał pomiarowy tych zdjęć. Z drugiej strony, są to dane odpowiadające pod względem możliwości pomiarowych zdjęciom lotniczym pozyskiwanym z wyższych pułapów, ale o geometrii zasadniczo różnej od zdjęć lotniczych. Pomiarowe opracowanie tych danych wymaga bardzo starannej i wyrafinowanej korekcji geometrycznej biorącej pod uwagę wszystkie czynniki zniekształcające.

Można więc postawić tezę, że wysokorozdzielcze obrazy satelitarne łączą oddzielne dotąd nurty: pomiarowy i interpretacyjny. Przynajmniej na etapie obrazowania nie występuje ta dwoistość. Taką tezę wzmacnia fakt, że mamy do czynienia jednocześnie z obrazami panchromatycznymi (przydatnymi w pierwszym rzędzie dla opracowań pomiarowych) i wielospektralnymi (głównie dla opracowań interpretacyjnych). Na marginesie warto zauważyć, że obserwowane ostatnio wchodzenie do praktyki produkcyjnej lotniczej kamery cyfrowej oferującej stereoskopowe, wielospektralne obrazy również łączy oba wspomniane nurty [Z. Kurczyński, *Lotnicza kamera cyfrowa – stan obecny i perspektywy*, GEODETA 11/1999 – red.].

● Geometria wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych

Zdecydowana większość systemów obrazowania satelitarnego (w tym wszystkie obecnie działające i planowane systemy wysokorozdzielcze) opiera się na koncepcji skanera elektro-optycznego. W płaszczyźnie ogniskowej układu optycznego (w przypadku systemów wysokorozdzielczych jest to potężny teleskop zwierciadlany) znajduje się linijka czujników CCD zorientowana w poprzek kierunku lotu i dająca jedną linię obrazu. Obraz w kierunku lotu tworzy się w wyniku ruchu satelity i kolejnego sczytywania sygnałów z linijki CCD. Oznacza to, że obraz kształtują dwa rzuty geometryczne:

- rzut środkowy wzdłuż linijki CCD, tj. w kierunku poprzecznym do kierunku lotu,
- rzut równoległy w kierunku lotu (dla układu optycznego zorientowanego w płaszczyźnie pionowej, prostopadłej do kierunku lotu, będzie to rzut ortogonalny).

Tak więc obraz tworzy się w sposób ciągły, w miarę ruchu satelity – mówi się, że jest to obraz dynamiczny. Dodatkowo jest on

zniekształcany niestabilnym lotem: zmianami kątów nachylenia czy perturbacjami orbity. Oznacza to w efekcie znaczne zniekształcenia, których wielkość wielokrotnie przewyższa rozmiary piksela. Można więc powiedzieć, że dzięki wysokiej zdolności rozdzielczej obraz charakteryzuje się wysokimi walorami interpretacyjnymi, ale stosunkowo niskimi walorami pomiarowymi. Korekcja geometryczna ma na celu zlikwidowanie tej dysproporcji. Warto zauważyć, że problem ten przedstawia się różnie dla obrazów pozyskiwanych z pułapu satelitarnego i lotniczego. Lot satelity jest stabilny, wspomniane zmiany orientacji katowej i perturbacje trajektorii są stosunkowo niewielkie i płynne. Daje to szansę bardzo skutecznej eliminacji zniekształceń. W przypadku samolotu ruch jest bardziej „dynamiczny”, co komplikuje problem korekcji.

Można wskazać kilka źródeł zniekształceń obrazów satelitarnych:

- kamera (błędy kalibracji, tj. wyznaczenia geometrycznych elementów orientacji wewnętrznej, oraz błędy urządzeń elektronicznych odczytujących i zapisujących sygnał z linijki CCD),
- platforma (ruch satelity i perturbacje orbity, zmiany prędkości lotu, zmiany orientacji katowej platformy),
- ciągła rejestracja położenia na orbicie i kątów nachylenia platformy (o ile taka rejestracja ma miejsce),
- ruch obrotowy Ziemi w czasie obrazowania i rzeźba terenu,
- docelowa projekcja kartograficzna skorygowanego obrazu (relacje między geoidą i elipsoidą, projekcja elipsoidy na powierzchnię odwzorowawczą),
- atmosfera (refrakcja).

W kontekście korekcji wysokorozdzielczych obrazów podkreślić należy znaczenie wpływu rzeźby terenu jako czynnika zniekształcającego. We wcześniejszych systemach (np. Landsat, SPOT) problem ten nie występował tak drastycznie, ponieważ obrazowano powierzchnię Ziemi zwykle przy pionowej orientacji osi układu optycznego. Kąt widzenia tamtych układów jest mały – rzędu kilku stopni – i przy nadirowym obrazowaniu wpływ rzeźby jest niewielki, szczególnie w relacji do wymiaru piksela.

Systemy metrowe mają bardzo mały kąt widzenia (około 1 stopnia), ale ich unikalną właściwością jest możliwość skierowania tego układu w dowolnym kierunku – z odchyleniem od linii pionu nawet do 60° – dla zobrazowania interesującego obszaru. Powoduje to znaczący wpływ deniwelacji terenu, szczególnie w relacji do bardzo wysokiej rozdzielczości (bardzo małego piksela) i wynikającej z tego spodziewanej korekcji zniekształceń do poziomu porównywalnego z tą rozdzielczością. Wpływ deniwelacji zależy od kąta wychylenia, np. dla wychylenia układu o 45° wielkość zniekształcenia sytuacyjnego będzie równa samej deniwelacji. Oznacza to, że dla korekcji takich obrazów konieczny będzie Numeryczny Model Terenu o dość wysokiej dokładności. Tym wyższej, im bardziej chcemy wychylić układ optyczny lub im wyższą dokładność korekcji chcemy uzyskać. Z tych powodów przy oczekiwaniu wysokiej precyzji korekcji dopuszcza się wychylenie układu optycznego nieprzekraczające 15-18° od linii pionu.

Wysokorozdzielcze systemy mają możliwość ciągłej rejestracji elementów orientacji zewnętrznej kamery, tj. trajektorii orbity wyznaczanej z pomiarów GPS i kątów nachylenia określanych na podstawie układów śledzących gwiazdy (ang. *star trackers*). Pozwala to na rejestrację trajektorii z dokładnością 2-3 m i kątów nachylenia z dokładnością 2-3" [Fraser C., 2000]. Jednak administratorzy systemów nie są zainteresowani przekazywaniem użytkownikom tych danych w jawnej postaci.

● Metody korekcji geometrycznej

Podstawą korekcji geometrycznej jest określenie matematycznego związku między współrzędnymi terenowymi punktów (X, Y, Z) a współrzędnymi ich obrazów (x, y). Stosuje się tu kilka istotnie różniących się podejść, skutkujących różnymi „modelami geometrycznymi”.

1. Zwykły model wielomianowy typu 2D

$$\begin{aligned} x &= a_0 + a_1X + a_2Y + a_3X^2 + a_4XY + a_5Y^2 + \dots \\ y &= b_0 + b_1X + b_2Y + b_3X^2 + b_4XY + b_5Y^2 + \dots \end{aligned} \quad (1)$$

W podejściu tym „wpasowujemy” płaski obraz w płasko potraktowaną powierzchnię terenu za pomocą transformacji wielomianowej odpowiedniego stopnia. Ten model nie uwzględnia trzeciego wymiaru (rzeźby terenu).

2. Zwykły model wielomianowy typu 3D

$$\begin{aligned} x &= a_0 + a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4X^2 + a_5XY + a_6XZ + a_7YZ + a_8Y^2 + a_9Z^2 + \dots \\ y &= b_0 + b_1X + b_2Y + b_3Z + b_4X^2 + b_5XY + b_6XZ + b_7YZ + b_8Y^2 + b_9Z^2 + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

Różni się od poprzedniego uwzględnieniem trzeciego wymiaru. Niektóre z tych wyrazów mogą być opuszczone, np. te o współczynnikach XZ, YZ^2 czy Z^3 , jako nieopisujące żadnego z elementów procesu pozyskiwania obrazu [Toutin T., Chenier R., Carbonneau Y., 2002]. Niewiadomymi w tym modelu są współczynniki a_i i b_i . Wyznacza się je na podstawie zidentyfikowanych na obrazie i pomierzonych w terenie (ewentualnie odczytanych z mapy) współrzędnych punktów dostosowania – tzw. fotopunktów. Każdy fotopunkt daje parę związków typu (1) lub (2). Wartość współczynników wyznacza się w procesie wyrównawczym.

Opis wielomianowy ma szereg wad: wymaga znacznej liczby punktów dostosowania, jest niestabilny numerycznie, jest bardzo czuły na nierównomierny rozkład tych punktów na obszarze oraz jest nieodporny na błędy w danych. Opis taki może dobrze „wpasować” obraz na punkty dostosowania, pozostawiając znaczne rozbieżności między tymi punktami. Z tych powodów opis wielomianowy może być przydatny na niewielkim obszarze dla korekcji obrazów o mniejszej rozdzielczości. Zwykle wielomiany nie są stosowane dla korekcji obrazów „metrycznych”.

3. Ilorazowy model wielomianowy

$$\begin{aligned} x &= \frac{a_0 + a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4X^2 + a_5XY + a_6XZ + a_7YZ + a_8Y^2 + a_9Z^2 + \dots + a_{19}Z^3}{1 + b_1X + b_2Y + b_3Z + b_4X^2 + b_5XY + b_6XZ + b_7YZ + b_8Y^2 + b_9Z^2 + \dots + b_{19}Z^3} \\ y &= \frac{c_0 + c_1X + c_2Y + c_3Z + c_4X^2 + c_5XY + c_6XZ + c_7YZ + c_8Y^2 + c_9Z^2 + \dots + c_{19}Z^3}{1 + d_1X + d_2Y + d_3Z + d_4X^2 + d_5XY + d_6XZ + d_7YZ + d_8Y^2 + d_9Z^2 + \dots + d_{19}Z^3} \end{aligned} \quad (3)$$

Jest to model typu 3D opisujący relacje teren-obraz w formie ilorazu wielomianów (ang. *Rational Function Polynomial* – RFP lub *Rational Polynomial Coefficients* – RPC). Poszczególne wyrazy wielomianu nie mają prostej interpretacji fizycznej czy geometrycznej związanej z parametrami kamery czy czynnikami zniekształcającymi obraz, stąd mówi się, że jest to model „nieparametryczny”.

Opis zredukowany do wyrazów I stopnia przyjmuje znaną w fotogrametrii formę przekształcenia rzutowego przestrzeni na płaszczyznę (ang. *Direct Linear Transformation* – DLT).

$$\begin{aligned} x &= \frac{a_1 + a_2X + a_3Y + a_4Z}{1 + a_5X + a_{10}Y + a_{11}Z} \\ y &= \frac{a_6 + a_7X + a_8Y + a_9Z}{1 + a_5X + a_{10}Y + a_{11}Z} + a_{12}xy \end{aligned} \quad (4)$$

Przekształcenie rzutowe znalazło w fotogrametrii zastosowanie, ponieważ pozwala opracowywać zdjęcia o nieznanej geometrii (nieznanych elementach orientacji wewnętrznej i zewnętrznej) oraz zdjęcia niemetryczne. W przypadku stosowania najprostszej postaci, tj. przekształcenia rzutowego (4), uwzględnia się często dodatkową korekcję w postaci wyrazu $a_{12}xy$ [Fraser C., 2000].

Wielomian ilorazowy I stopnia zawiera 7 współczynników, wielomian II stopnia – 19 i odpowiednio III stopnia – 39 współczynników w każdym z obu równań (3). Dla obrazów satelitarnych stosuje się zwykle stopień niższy od III (dalsze zwiększanie stopnia nie poprawia wyników). Wartość współczynników określa się w procesie wyrównawczym na podstawie fotopunktów. Każdy fotopunkt pozwala ułożyć jedną parę związków typu (3). Tak więc dla wyznaczenia współczynników wielomianu ilorazowego I stopnia (zawierającego 2×7 współczynników) konieczne będzie minimum 7 fotopunktów, a dla wielomianu II stopnia (zawierającego 2×19 współczynników) odpowiednio 19 fotopunktów. W praktyce, dla wiarygodnego rozwiązania, potrzeba więcej fotopunktów i konieczny jest proces wyrównawczy.

Modele ilorazowe zyskały zastosowanie przy korekcji wysoko-rozdzielczych obrazów satelitarnych. Modele te pozwalają uwzględnić NMT i w znacznym stopniu są pozbawione wad zwykłych transformacji wielomianowych. Dystrybutorzy wysoko-rozdzielczych obrazów najczęściej udostępniają opis geometrii obrazów właśnie w tej postaci, umożliwiając użytkownikom samodzielne opracowania (np. ortorektyfikację) z własnym NMT i bez punktów dostosowania (fotopunktów).

4. Model parametryczny

Model parametryczny opisuje ściśle geometryczne relacje między terenem i jego obrazem. Model taki musi więc uwzględniać wielozróżłowe czynniki zniekształcające, wymienione wcześniej. Dla klasycznego zdjęcia fotogrametrycznego taki ścisły model opiera się na fundamentalnym w fotogrametrii warunku kolinearności i zawiera elementy orientacji wewnętrznej oraz 6 elementów orientacji zewnętrznej zdjęcia (tj. położenie w przestrzeni i 3 kąty nachylenia). Warunek kolinearności jest podstawą również dla budowy ścisłego modelu obrazów satelitarnych. W tym jednak przypadku można odnieść go nie do całego obrazu, a tylko do pojedynczej linii. Nie można mówić o elementach orientacji

obrazów satelitarnych w takim sensie jak dla zdjęcia lotniczego. Wartość elementów orientacji zmienia się w sposób ciągły, należy więc mówić raczej o funkcji tych elementów zależnej od czasu. W literaturze pojawiają się doniesienia o zbudowaniu takich modeli przez różne ośrodki naukowo-badawcze. Autorzy jednak nie publikują ostatecznej ich postaci. Modele takie zawierają szereg niewiadomych elementów – parametrów, któ-

rych wartość dla konkretnego obrazu wyznacza się na podstawie fotopunktów o znanym położeniu terenowym i odwzorowanych na obrazie.

Po skalibrowaniu układu optycznego oraz w przypadku precyzyjnego pomiaru zmiennych w czasie elementów orientacji zewnętrznej kamery znane są elementy modelu parametrycznego. Pozwala to prowadzić opracowanie (np. ortorektifikację „wprost”, tj. bez znajomości fotopunktów (ale ze znanym NMT), lub generować NMT ze stereoskopowej pary obrazów. Niektórzy dystrybutorzy nie chcą udostępniać parametrów modelu w jawnej postaci, obliczają – dla danej sceny obrazowej – odpowiadające im wartości współczynników wielomianu w modelu ilorazowym i te załączają do obrazów udostępnianych użytkownikom.

Ponieważ model parametryczny opisuje rzeczywiste relacje geometryczne, więc poszczególne wyrazy modelu mają konkretną interpretację geometryczną. Modele parametryczne powinny dawać lepsze wyniki niż modele nieparametryczne, być bardziej odporne na rozkład fotopunktów i ewentualne błędy w danych, oraz wymagać mniejszej liczby fotopunktów koniecznych do wyznaczenia niewiadomych parametrów. Czołowi producenci oprogramowania fotogrametrycznego uzupełniają swoje produkty o opcje umożliwiające opracowanie obrazów satelitarnych pozyskanych z podstawowych systemów, w tym ostatnio, o opracowanie wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych. Oferuje się zwykle możliwość wyboru modelu ścisłego lub wielomianu ilorazowego. Na uwagę zasługuje tu najnowsza wersja pakietu Geomatica OrtoEngine kanadyjskiej firmy PCI, w którym „zaszyte” są ściśle modele najważniejszych systemów satelitarnych opracowane przez T. Toutina – pracownika naukowo-badawczego Kanadyjskiego Centrum Teledetekcji (Canada Centre for Remote Sensing – CCRS). Model ten pozwala korygować obrazy satelitarne przy małej liczbie fotopunktów (poniżej 10). Administrator systemu – Space Imaging – nie opublikował wprawdzie ścisłego modelu Ikonosa, T. Toutin zrekonstruował go jednak na podstawie przesłanek teoretycznych oraz metadanych standardowo dołączanych do dystrybuowanych obrazów.

● Przegląd wyników korekcji geometrycznej

Dużemu zainteresowaniu wysokorozdzielczymi obrazami satelitarnymi towarzyszą badania możliwości korekcji geometrycznej tych obrazów. Można wprawdzie nabyć obrazy już przetworzone (ortorektifikowane), jednak cena takich produktów jest wysoka. Rodzi się więc pytanie o możliwość ortorektifikacji lub generowania NMT z obrazów stereoskopowych we własnym zakresie, a jeśli taka możliwość istnieje, to stawiane są kolejne pytania: o model korekcji, liczbę, rozkład i dokładność fotopunktów, jakość koniecznego NMT i wreszcie o spodziewane wyniki. Rozwój rynku GIS, obecna popularność tych obrazów oraz plany i prognozy na najbliższy rok, dwa wskazują, że problemy te będą dotyczyć wielu z nas.

W przypadku zakupu obrazu wraz z parametrami modelu korekcyjnego proces pełnej korekcji nie jest potrzebny. Model taki bazuje na znanej charakterystyce kamery i zarejestrowanych danych pokładowych. Możliwa jest wówczas tzw. georeferencja wprost, czyli np. ortorektifikacja. Nie są więc konieczne fotopunkty i proces wyrównawczy. Do ortorektifikacji konieczny jest natomiast własny NMT. Takie rozwiązanie pozwala na korekcję obrazów na poziomie dokładności odpowiadającej mapom topograficznym w skali od 1:10 000 do 1:25 000. Uzyskanie wyższych dokładności wymaga pełnej korekcji.

Do obrazów QuickBirda (produkt Basic Imagery) dostarczane są dane korekcyjne zarówno w formie modelu ścisłego, jak i współ-

czynników modelu ilorazowego (RPC). Dla obrazów Ikonosa (produkt Geo OrthoKit) dostępny jest ilorazowy model wielomianowy.

Obrazy korygowane są w oparciu o wybrany model korekcji, którego niewiadome parametry wyznaczone są w procesie wyrównawczym na podstawie grupy fotopunktów, jednoznacznie

Przegląd wyników korekcji wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych

Pozycja literatury	Metoda korekcji	Ocena jakości korekcji na punktach kontrolnych				Liczba fotopunktów Liczba punktów kontrolnych Uwagi
		bł. średni [m]		bł. maksymalny [m]		
		m _x	m _y	m _x	m _y	
IKONOS						
[11]	imw I	2,2	5,2	5,1	10,4	7 fotopunktów
	mp	1,3	1,3	3,0	3,0	23 pkt kontrolne
[2]	imw I	1,6 – 2,1				różne NMT
	mp	2,2 – 2,9				
[12]	mp	2,5-2,6	1,9-2,2	10,0	10,0	10 fotopunktów 46 pkt kontrolnych teren górzysty
[7]	mp	1,3-7,6	1,3-4,4	3-16	2-14	7 różnych obrazów, różne obszary i NMT
QuickBird						
[9]	imw I	4,0	2,1	9,5	4,3	10 fotopunktów
	mp	1,4	1,3	2,5	2,8	12 pkt kontrolnych
[12]	mp	1,1	1,0	2,0	2,0	teren płaski
	mp	5,1	6,0	12,0	16,0	teren górzysty
EROS-A1						
[1]	imw I	14,0	2,4	36,8	5,9	7 fotopunktów
	mp	2,1	2,1	4,1	3,9	23 pkt kontrolnych
[13]	mp	1,7	1,8			9 fotopunktów 21 pkt kontrolnych
[11]	imw I	8,0	13,2	20,0	23,0	10 fotopunktów
	mp	3,9	3,5	6,2	6,0	14 pkt kontrolnych
[12]	mp	4,3	4,6	7,0	8,0	teren płaski

imw I – ilorazowy model wielomianowy I stopnia
mp – model parametryczny

imw I – ilorazowy model wielomianowy I stopnia

mp – model parametryczny

zidentyfikowanych na obrazie, a których przestrzenne współrzędne są określone techniką GPS lub – w skrajnym przypadku – odczytane z map. Część tych punktów wchodzi do wyrównania dla wyznaczenia niewiadomych (pełnią one funkcję punktów dostosowania). Część natomiast traktowana jest jako punkty kontrolne, niezbrane w procesie wyrównawczym. Ich położenie obliczane jest po wyrównaniu. Porównanie ze współrzędnymi pomierzonymi GPS daje wiarygodną ocenę dokładności korekcji. Ważne jest, aby takie punkty kontrolne wystąpiły w procesie korekcji i aby na nich dokonywać oceny jakości korekcji, a nie na podstawie rozbieżności na fotopunktach otrzymanych w procesie wyrównawczym. Po wyrównaniu, tj. wyznaczeniu niewiadomych parametrów modelu ścisłego (parametrycznego) czy współczynników wielomianu ilorazowego, obraz można poddać ortorektyfikacji, co jest najbardziej typowym wynikiem opracowania. Do tego jest oczywiście konieczny NMT.

Powyższa tabela przytacza przegląd wyników korekcji obrazów satelitarnych realizowanej w ostatnich dwóch latach przez różnych autorów. Korygowane są „surowe” dane, tj. produkty Ikonos Geo, Basic Imagery (QuickBird) lub format 1A (EROS-A1).

Podane są stosowane metody korekcji, średnie i maksymalne błędy po korekcji oceniane na podstawie punktów kontrolnych oraz liczba użytych fotopunktów i punktów kontrolnych. Cytowane (i inne) opracowania dotyczące korekcji geometrycznej wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych pozwalają na sformułowanie wniosków zawartych w ramce poniżej.

Korekcja geometryczna wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych – wnioski

1. Zwykły model wielomianowy 3D ma wiele wad: wymaga dużo fotopunktów, jest bardzo czuły na nierównomierny ich rozkład i ewentualne błędy w danych. Proces wyrównawczy jest mało stabilny. Takim modelem można uzyskać dość dobre „wpasowanie” na fotopunktach, jednak między nimi mogą wystąpić znaczne zniekształcenia (i dlatego wiarygodna ocena jakości korekcji powinna być prowadzona na punktach kontrolnych). Model może być przydatny do korekcji na niewielkim obszarze i w płaskim terenie.
2. Ilorazowe modele wielomianowe mają wady podobne do zwykłych wielomianów, chociaż nie ujawniają się one tak silnie. Spośród nieparametrycznych metod korekcji ta jest najbardziej zalecana. Stosuje się wielomian I stopnia lub – rzadziej – II stopnia (wymagają one odpowiednio minimum 7 i 19 fotopunktów).
3. Najkorzystniejsze są ściśle modele parametryczne, oparte na związkach opisujących czynniki zniekształcające. Modele takie łatwiej niż inne pozwalają wykryć błędy w danych, są mniej czułe na rozkład fotopunktów, nie generują zniekształceń między fotopunktami, do korekcji wymagają relatywnie mało fotopunktów.
4. Istnieje zależność jakości korekcji od dokładności wysokościowej NMT i wychylenia układu optycznego kamery. Im większe deniwelacje terenu, większe wychylenie układu optycznego i gorszy NMT, tym gorsze wyniki korekcji.
5. Przy korekcji średniorozdzielczych obrazów satelitarnych oraz opracowaniach zdjęć lotniczych udaje się uzyskać dokładności „podpikselowe”. Autorzy przestrzegają przed prostą ekstrapolacją takich wyników na „obrazy metrowe”. W tym przypadku dokładność podpikselowa nie będzie osiągnięta nawet w łatwym terenie [Toutin T., Cheng P., 2000].
6. Wynik korekcji zależy od liczby i jakości fotopunktów. Gdy fotopunkty pozyskiwane są z map 1:10 000, tj. z błędem 3-5 m, potrzeba ich około 20 dla korekcji z dokładnością 3-4 m. Przy fotopunktach mierzonych techniką GPS (błąd poniżej 1 m), wystarcza około 10 fotopunktów dla uzyskania korekcji na poziomie 2-3 m. Ograniczeniem możliwości dalszej poprawy korekcji są błędy z tytułu identyfikacji fotopunktów w terenie i na obrazie. To uniemożliwia praktycznie uzyskanie dokładności lepszych niż 1-2 m. Osiągnięcie wyższych dokładności wymagałoby sygnalizacji fotopunktów w terenie (tak jak dla zdjęć lotniczych), stosowania NMT o dokładności wysokościowej 1,0-1,5 m oraz wychylenia układu optycznego kamery od linii pionu poniżej 15-20°.
7. Nałożenie na ortorektyfikowany obraz mapy wektorowej pokazuje wysoką zgodność takich produktów. Zauważono, że stosowanie do ortorektyfikacji NMT o zbyt małym „oczku” siatki (np. 3 m) może powodować lokalne zniekształcenia widoczne na prostoliniowych elementach, np. drogach [Davis C. H., Wang X., 2001]. Zniekształcenia te uwidaczniają się bardziej przy korekcji metodą wielomianową niż przy metodach ścisłych. Te niekorzystne efekty znikają przy stosowaniu NMT o oczku 10-30 m.
8. Uogólniając, stosowanie ścisłych modeli, dokładnych fotopunktów (błąd położenia około 0,5 m) i odpowiednio dokładnego NMT pozwala uzyskać dokładność korekcji obrazów QuickBirda na poziomie około 1 m, Ikonosa – 1-2 m i EROS-a – 4 m. Wyniki takie odniesione do rozdzielczości tych obrazów, oznaczają możliwość korekcji na poziomie 2 pikseli [Toutin T., Chenier R., Carbonneau Y., Alcad'de N. (2002)].

W literaturze pojawiają się też doniesienia o generowaniu NMT na bazie stereogramu obrazów Ikonosa o dobrej geometrii (kąt wcinający 54°, co daje stosunek bazowy B/H=1,0) [Toutin T., Chenier R., Carbonneau Y., Alcad'de N., 2002]. Wykorzystując model ścisły korekcji oraz powierzchniowe dopasowanie obrazów (ang. *area based matching*), przy 10 fotopunktach uzyskano następujące średnie rozbieżności na punktach kontrolnych: $m_x=1,5$ m, $m_y=1,4$ m, $m_z=1,3$ m. Wygenerowany NMT porównano na ponad 5 milionach punktów z NMT uzyskanym w wyniku lotniczego skaningu laserowego. Średni błąd wysokości na całym obszarze wyniósł $m_z=6,5$ m. Wynik ten jest jednak obciążony błędem systematycznym, generowanym przez obszary zalesione. Wynika to z technologii automatycznej budowy NMT. W wyniku tego procesu powstaje raczej numeryczny model pokrycia, z włączeniem obiektów „wystających” ponad powierzchnię terenu (budynki, drzewa). Na obszarach odkrytych uzyskano dokładność $m_z=1,5$ m. Autorzy konkludują, że na bazie stereoskopowych obrazów satelitarnych można generować NMT o dokładności na poziomie $m_z=1-4$ m, zależnie od pokrycia terenu. Dla uzyskania takiego wyniku konieczna jest edycja automatycznie wygenerowanego NMT.

Dr Zdzisław Kurczyński i dr Wiesław Wolniewicz są pracownikami naukowo-dydaktycznymi w Instytucie Fotogrametrii i Kartografii Politechniki Warszawskiej

Literatura

1. Cheng P., Toutin T., *Orthorectification and DEM generation from high resolution satellite*;
2. Davis C. H., Wang X. (2001), *Planimetric accuracy of Ikonos 1-m panchromatic image products*, Proceedings of the 2001 ASPRS Annual Conference, St. Louis, MI, USA. April 23-27. www.pcigeomatics.com;
3. Dowman I., Tao V. (2002), *An Update on the Use of Rational Functions for Photogrammetric Restitution*, ISPRS Highlights. Vol. 7, No 3, September 2002;
4. Fraser C. (2000), *High-resolution satellite imagery: A review of metric aspects*, Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, part B7. Amsterdam 2000;
5. Ganas A., Lagios E., Tzannaetos N. (2002), *An investigation on the Spatial Accuracy of the Ikonos 2 Orthoimagery within an Urban Environment*, Int. J. Remote Sensing, 2002, vol. 23, no 17, 3513-3519;
6. Toutin T. (1995), *Multisource data fusion with an integrated and unified geometric modelling*, EARSeL Journal Advances in Remote Sensing, 4 (2): 118-129;
7. Toutin T. (2001), *Geometric processing of Ikonos Geo Images with DEM*, ISPRS Join Workshop „High Resolution from Space”, Hannover, Germany, September 19-21, 2001;
8. Toutin T., Cheng P. (2000), *Demystification of Ikonos*, Earth Observation Magazine. Vol. 9, No. 7, pp. 17-21, July 2000. Tłumaczenie polskie: *Demistyfikacja IKONOSA*, GEODETA 10/2000;
9. Toutin T., Cheng P. (2002), *QuickBird – A Milestone for High Resolution Mapping*, Earth Observation Magazine. Vol. 11, No. 4, pp. 14-18, 2002;
10. Toutin T., Chenier R., Carbonneau Y. (2001), *3D geometric modelling of Ikonos Geo Images*, ISPRS Join Workshop „High Resolution from Space”, Hannover, Germany, September 19-21, 2001;
11. Toutin T., Chenier R., Carbonneau Y. (2002), *3D models for high resolution images: examples with QuickBird, Ikonos and Eros*, Int. Archives of ISPRS Symposium, Comm. IV, Ottawa, Canada, July 8-12, 2002, vol. 43, part 4, 547-551;
12. 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, 2002;
13. Westin T., Forsgren J., *Orthorectification of EROS A1 images*, www.lantmateriet.se.