

WOJCIECH BYCHAWSKI

Geometryzacja zdjęć satelitarnych

Zarys treści. Rozważa się sprawy związane z geometrycznym przekształcaniem zdjęcia satelitarnego poprzez przeniesienie jego treści do pól odniesienia przestrzennego. Przyjmuje się, że sieć odniesienia przestrzennego jest określona współrzędnymi geograficznymi, według koncepcji doc. Krystyny Podlachy. W artykule główną uwagę poświęca się sposobowi samoadresowania się poszczególnych pikseli zdjęcia do właściwych pól odniesienia przestrzennego. Podaje się również sposób szybkiego obliczania geograficznych współrzędnych pikseli.

Problem

Skanerowe zdjęcie satelitarne wykonane z satelity, którego ruch pozorny względem powierzchni Ziemi nie jest równy zeru, jest odwzorowaniem tej powierzchni na boczną powierzchnię walca o osi prostopadłej do płaszczyzny orbity. Świadomość tego, z jakim odwzorowaniem ma się do czynienia, jest ważna, gdy chce się treść zdjęcia wpasować w mapę.

Każda mapa jest wizerunkiem powierzchni Ziemi przedstawionym na płaszczyźnie według ściśle określonych reguł, różnych w zależności od tego w jaki sposób będzie się omijać zasadniczy problem nierozwijałości powierzchni bryły ziemskiej. Nierozwijałość powierzchni kuli oraz elipsoidy sprawia, że nie może powstać mapa wolna od zniekształceń. Jednakże w praktyce istnieje wiele sposobów na to, aby odwzorowanie powierzchni Ziemi na płaszczyznę nie było zniekształcone ponad dopuszczalne dla określonej skali mapy. Każdy z tych sposobów to, pojęciowo rzecz biorąc, rzutowanie punktów z powierzchni bryły ziemskiej na powierzchnię bryły rozwijalnej bądź wprost na płaszczyznę. Pożądany skutek otrzymuje się dobierając stosownie do potrzeb walec, stożek lub płaszczyznę, ich orientację względem odwzorowywanego fragmentu Ziemi oraz sposób projekcji. W efekcie każdy punkt powierzchni Ziemi o współrzędnych geograficznych φ i λ może być przeniesiony na mapę, to znaczy może otrzymać współrzędne x, y na płaszczyźnie, w układzie współrzędnych zorientowanym względem siatki geograficznej.

Mając do dyspozycji mapę ma się tym samym możliwość określenia współrzędnych każdego jej punktu. Każda z map bowiem ma oznaczony przebieg osi układu współrzędnych na płaszczyźnie lub geograficznych, albo i jednych i drugich. Jeżeli na mapie jest oznaczony tylko jeden z tych

układów to przejście do drugiego jest możliwe na podstawie wzorów odwzorowania kartograficznego, w jakim jest sporządzona mapa. Często nie są one ogólnie dostępne. Nie stanowi to jednak uciążliwości dla przeciętnego użytkownika mapy, który z reguły nie ma potrzeby sytuowania obiektów na globie, a jedynie w odniesieniu do otoczenia. Jednak im terytorium jest większe, tym wzrasta potrzeba usytuowania się w układzie globalnym, na przykład w układzie współrzędnych geograficznych.

Gdy mówi się o zgeometryzowaniu zdjęcia, to ma się na myśli takie jego przekształcenie, aby po tej operacji usytuowanie punktów względem siebie było takie jak na mapie. Z tej definicji wynika, że chcąc zgeometryzować zdjęcie trzeba znać związek między odwzorowaniami zdjęcia i mapy. Mówiąc wyraźniej trzeba znać zależność między układami współrzędnych w jakich mierzy się współrzędne odpowiadających sobie punktów na zdjęciu i na mapie.

Jeżeli zasięg zdjęcia jest mały, to problem geometryzacji jest dość prosty, przynajmniej pojęciowo. Mamy bowiem wtedy do czynienia z dwiema płaszczyznami (zdjęcie i mapa) tak ograniczonymi terytorialnie, że są stłumione obawy o znaczące zniekształcenie kątów, odległości i pól. Takie dwie płaszczyzny da się zwykle związać z sobą transformacją konforemną, a jeżeli nie wystarczy to aficzną lub wielomianową. Współczynniki transformacji określa się na podstawie kilku punktów o znanych współrzędnych w obu układach. Powstają w ten sposób równania transformujące, dzięki którym współrzędne każdego punktu na zdjęciu można przeliczyć do układu mapy. W efekcie można je nanieść na mapę w takim miejscu, gdzie powinny być ze względu na jej odwzorowanie kartograficzne. Wtedy punkty łączne oraz inne identyczne powinny się pokryć, natomiast pozostała treść zdjęcia jest wpisana w mapę tak samo dobrze, jak by to było na podstawie np. pomiarów terenowych. Tak z reguły geometryzuje się zdjęcia podczas aktualizowania map na podstawie zdjęć lotniczych i satelitarnych.

Geometryzacja zdjęcia satelitarnego znacznie się komplikuje, gdy jego zasięg nie mieści się w zasięgu odwzorowania map, w które ma być wpisane zdjęcie. W Polsce tak jest często, gdy posługujemy się mapami w układzie „65” i także mapami w odwzorowaniu Gaussa-Krügera, zwłaszcza w pasach 3-stopniowych. Jest tak również wtedy, gdy chce się zgeometryzować zdjęcie z satelity geostacjonarnego, bardzo zniekształcone na naszej szerokości geograficznej.

Kłopoty z odwzorowaniami dają znać o sobie nie tylko przy geometryzowaniu zdjęć ale także, gdy w grę wchodzi komputerowe systemy informacyjne o przestrzeni geograficznej. Kłopoty są na tyle podobne, że warto je rozważać jednocześnie z obu punktów widzenia.

Zdjęcie, zwłaszcza w postaci cyfrowej, można sobie wyobrazić jako uporządkowany zbiór elementarnych powierzchni (pikseli lub mikseli). Porządek w tym zbiorze polega na tym, że piksele są usytuowane w ocz-

kach prostokątnej tablicy (matrycy) względem siebie tak, jak przylegają do siebie w terenie powierzchnie elementarne, szczelnie go pokrywając. A zatem numery linii i kolumny, gdzie znajduje się określony piksel, są jego współrzędnymi w układzie zdjęcia. Wartości zapisane pod takim adresem opisują teren na powierzchni odpowiadającej pikselowi.

Jeżeli informacje o terenie chcemy zapisać w bazie danych komputerowego systemu informacyjnego, to nie możemy postąpić inaczej niż dzieląc terytorium na pola przylegające do siebie szczelnie pokrywające teren.

Sieć pól najprościej jest utworzyć na mapie, wkreślając tam na przykład siatkę kwadratów lub prostokątów. Rzecz jednak w tym, że taka sieć jest wtedy przywiązana do określonego odwzorowania kartograficznego. Oznacza to, że baza danych zorganizowana w oczkach takiej sieci jest matrycą prostokątną tylko w pasie tegoż odwzorowania. Dalej wprowadzić też tak może być, lecz wtedy poszczególne punkty tabeli bazy danych przestaną swym usytuowaniem (linia, kolumna) odpowiadać położeniu pola siatki w terenie. Zarządzanie taką bazą danych może się wówczas skomplikować do tego stopnia, że system informacyjny może stracić sens.

Większość trudności usuwa koncepcja układu odniesień przestrzennych opracowana przez doc. dr Krystynę Podlachę w Instytucie Geodezji i Kartografii w Warszawie.

Według tej koncepcji układem odniesień przestrzennych jest sieć, której pola są ograniczone liniami południków i równoleżników.

Tak skonstruowana sieć ma tę zasadniczą zaletę, że nie jest związana a priori z żadnym odwzorowaniem kartograficznym, a więc i nie ma ograniczeń co do zasięgu. Wadą natomiast jest, że nie jest to sieć równopolewa.

Sieć odniesień przestrzennych zbudowana na siatce geograficznej może być bez zastrzeżeń reprezentowana w pamięci komputera jako prostokątna tablica, której numer wiersza i kolumny jest adresem pola. Można więc pod tym adresem zapisać wszystko to, co ma być powiedziane o powierzchni terenu reprezentowanej przez pole o znanych współrzędnych geograficznych narożników. Wszystko to może się dziać — jak wspomniano — bez wiązania się z jakimkolwiek odwzorowaniem kartograficznym. Natomiast problem odwzorowania kartograficznego może być podjęty w dowolnej chwili, także a posteriori, na przykład dopiero w momencie decyzji o wyprowadzaniu danych z systemu informacyjnego.

Mając w pamięci istotę sieci odniesień przestrzennych powróćmy do zdjęcia satelitarnego i jego geometryzacji.

Geometryzacja zdjęcia o strukturze pikselowej jak dotąd, w ogólności, polega na tym, że na podstawie tablicy zdjęcia oryginalnego tworzy się nową tablicę. Powstaje ona w ten sposób, że wartości poszczególnych pikseli są przenoszone do niej z tablicy źródłowej bez zmian lecz w inne miejsce, tzn. pod inny adres. Nowe adresy, czyli nowe współrzędne obra-

zowe, powstają z przeliczenia poprzednich wzorami transformującymi płaszczyznę zdjęcia oryginalnego na płaszczyznę pożądanego odwzorowania kartograficznego. Jeżeli taki zabieg wykona się dla wszystkich punktów obrazu źródłowego, to w efekcie powstanie nowa tablica, czyli nowe, zgeometryzowane zdjęcie. Na nim wartości pikseli zajmują zmienione miejsce tak, aby nakładały się na swoje odpowiedniki na mapie. Jednakże nowa tablica, czyli analog zdjęcia zgeometryzowanego, przestaje być tak regularna jak pierwotna, która ściśle pokrywała teren pikselami. Teraz bowiem może się zdarzyć, że w nowej tablicy pod określony adres wpłynie więcej niż jedna wartość piksela. Pojawia się więc tym samym puste pola tworzonego obrazu. To stwarza dylemat, jak doprowadzić do szczelnego i jednoznacznego pokrycia terenu pikselami zgeometryzowanego obrazu.

Ten dylemat jest rozwiązywany w różny sposób, jednak zawsze (przynajmniej teoretycznie) ze szkodą dla treści zdjęcia.

Jeżeli geometryzacji poddajemy nie obraz źródłowy lecz jego przetworzenie (na przykład po klasyfikacji) to powstaje sytuacja podobna pojęciowo do systemu informacyjnego, a ściślej biorąc do bazy danych zbudowanej na sieci odniesień przestrzennych. W miejsce odpowiedzi spektralnej jest teraz wpisana informacja o tym, co reprezentuje sobą piksel w sensie użytkowania ziemi.

Cyfrowy zapis obrazu po klasyfikacji jest utworzony tak, jak obraz źródłowy, z pikseli ściśle pokrywających całe terytorium sceny. Jest to więc baza danych wypełniona informacjami pochodzącymi z teledetekcji tyle tylko, że usytuowana w lokalnym układzie współrzędnych.

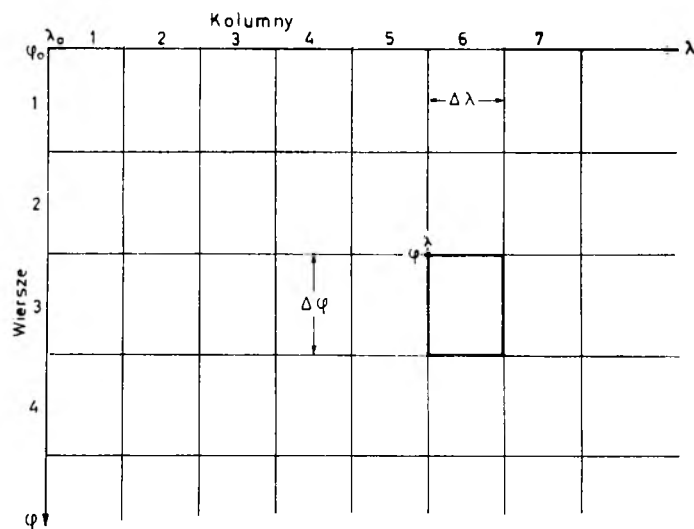
Na problem geometryzacji zdjęć satelitarnych można teraz spojrzeć inaczej, niż to było dotąd. Zamiast tworzenia nowej tablicy wartości każdego piksela skierować do odpowiedniego pola odniesienia przestrzennego, które z istoty jest określone co do położenia. Jeżeli będzie to sieć zbudowana według koncepcji doc. K. Podlachy, a więc wolna od ograniczeń wynikających z odwzorowań kartograficznych, to zyskuje się bardzo wiele. Zwłaszcza chodzi o to, że system informacyjny zbudowany na takiej bazie danych, może spełniać swoje funkcje bez konieczności każdorazowego kartowania badanych zjawisk. Wydanie wyniku w postaci mapy może być tylko opcją, z której można lecz nie koniecznie trzeba korzystać.

Automatyczne adresowanie informacji pochodzących ze zdjęcia satelitarnego

Baza danych systemu informacji o terenie jest z reguły zasilana ręcznie. Polega to na tym, że informacje odnoszące się do określonego pola odniesienia przestrzennego są odpowiednio kodowane i następnie wprowadzane do pamięci komputera przy użyciu klawiatury. Wiele się dzieje

na świecie, aby zautomatyzować tę niezmiernie pracochłonną czynność. Jak na razie tylko bogaty stać na bardzo kosztowną i nie zawsze jeszcze dość sprawną aparaturę do automatycznego zasilania bazy danych informacjami pochodzącymi z istniejących map i z innych źródeł. Jak dotąd łatwiej i taniej robi to człowiek. Ręczne wprowadzanie danych, aczkolwiek żmudne, w końcu się opłaca jeżeli dotyczy wolno zmieniających się danych o terenie. Inaczej ma się sprawa z danymi pochodzącymi z teledetekcji. Po pierwsze, często są to informacje o zjawiskach szybkozmennych, a więc ich kodowanie i ręczne wprowadzanie może nie nadążyć za potrzebami użytkowników systemu informacyjnego, może przekreślić jego funkcjonalność. Po drugie, dane pochodzące z teledetekcji, zwłaszcza ze zdjęć satelitarnych, są bardzo liczne. Sprawia to pikselowa budowa obrazu.

Problem automatycznego przepływu informacji teledetekcyjnych do bazy danych jest ściśle związany z siecią odniesień przestrzennych.



Rys. 1

W naszym przypadku sieć składa się z przylegających do siebie pól ograniczonych południkami i równoleżnikami o stałej wielkości boków wyrażonej w mierze kątowej. Wzdłuż południków jest wielkość $\Delta\varphi$, wzdłuż równoleżników natomiast wielkość $\Delta\lambda$.

Sieć ma swój początek w lewym górnym rogu o współrzędnych geograficznych $\varphi_0 \lambda_0$. Powstaje sytuacja pokazana na rysunku 1.

Usytuowanie każdego pola można opisać numerem linii (L) i kolumny (K).

Łatwo dostrzegalna jest zależność między numerami linii i kolumny a współrzędnymi geograficznymi lewego górnego narożnika pola

$$\varphi = \varphi_0 - (L - 1) \cdot \Delta\varphi; \quad \lambda = \lambda_0 + (K - 1) \cdot \Delta\lambda; \quad (1)$$

skąd

$$L = [(\varphi_0 - \varphi)/\Delta\varphi] + 1; \quad K = [(\lambda - \lambda_0)/\Delta\lambda] + 1; \quad (2)$$

Także i współrzędne geograficzne środka pola (φ_s, λ_s) można łatwo związać z oznaczeniami linii i kolumny gdyż

$$\varphi_s = \varphi - \Delta\varphi/2; \quad \lambda_s = \lambda + \Delta\lambda/2; \quad (3)$$

Wykorzystując równania (1) i (3) otrzymuje się

$$\begin{aligned} \varphi_s &= \varphi_0 - (L - 1) \cdot \Delta\varphi - \Delta\varphi/2; \\ \lambda_s &= \lambda_0 + (K - 1) \cdot \Delta\lambda + \Delta\lambda/2; \end{aligned} \quad (4)$$

Stąd wynika związek między linią i kolumną a współrzędnymi geograficznymi środka pola:

$$\begin{aligned} L &= [(\varphi_0 - \varphi_s)/\Delta\varphi] + 0,5; \\ K &= [(\lambda_s - \lambda_0)/\Delta\lambda] + 0,5; \end{aligned} \quad (5)$$

Wzory (2) są kluczem do automatycznego kodowania adresu dowolnego piksela pod warunkiem, że są znane jego współrzędne geograficzne. Przez pojęcie kodowania w tym przypadku rozumie się określenie linii i kolumny tablicy symbolizującej sieć odniesienia przestrzennego. Jeżeli będzie się wiedzieć pod jaki adres należy przesłać znaczenie (wartość) piksela, to załatwi się dwie sprawy równocześnie: załadowanie bazy danych systemu informacyjnego i geometryzację zdjęcia z precyzją równą wielkości pola odniesienia przestrzennego.

Wyprowadzenie wzorów (2) dla współrzędnych lewego górnego narożnika pola nie jest bez znaczenia. Chodzi bowiem o to, że wyłącznie względem tego narożnika dają się one użyć wprost do określenia linii i kolumny pola, do którego należy piksel o współrzędnych (φ, λ). Można to prześledzić na przykładzie: Przyjmijmy, zgodnie z ustaleniami dla obszaru Polski, że sieć odniesienia przestrzennego ma swój początek w punkcie o współrzędnych

$$\varphi_0 = 54^\circ; \quad \lambda_0 = 14^\circ;$$

Założmy, że sieć jest zbudowana z pól o wymiarach:

$$\Delta\varphi = 10'; \quad \Delta\lambda = 10';$$

Przyjmijmy, że interesujemy się polem P , które leży na przykład na trzeciej linii, w szóstej kolumnie, tzn:

$$L = 3; \quad K = 6;$$

Z wzorów (1) wynika, że lewy górny narożnik pola P ma współrzędne geograficzne:

$$\begin{aligned} \varphi &= 54^\circ - (3 - 1) \cdot 10' & \text{czyli} & \quad \varphi = 53^\circ 40'; \\ \lambda &= 14^\circ + (6 - 1) \cdot 10' & \text{czyli} & \quad \lambda = 14^\circ 50'; \end{aligned} \quad (6)$$

Z definicji wymiarów pola wynika, że wewnątrz niego mieszczą się wszystkie punkty o współrzędnych geograficznych:

$$53^\circ 30' < \varphi < 53^\circ 40'; \quad 14^\circ 50' < \lambda < 15^\circ 00';$$

Weźmy punkt o jakichkolwiek współrzędnych z tego przedziału, na przykład:

$$A(\varphi = 53^\circ 34' 12''6, \lambda = 14^\circ 51' 36''7);$$

i podstawmy je do wzorów (2).

Otrzymamy

$$L = 3,58; \quad K = 6,16; \quad (7)$$

Liczby L i K nie są liczbami całkowitymi, jako że punkt A nie jest lewym górnym narożnikiem pola P . Natomiast część całkowita liczb L , K (7) zawsze i jednoznacznie wskaże na linię i kolumnę, a więc na adres pola, do którego sytuacyjnie należy rozważany punkt.

Tak więc jeżeli wzory (2) mają być użyte do określania w układzie odniesień przestrzennych adresu punktu o współrzędnych φ i λ , to po wykonaniu obliczeń należy przyjąć tylko część całkowitą wyniku.

Opisany sposób samoadresowania się punktów o znanych współrzędnych geograficznych do odpowiednich pól odniesienia przestrzennego może wydawać się pracochłonny. W rzeczywistości jednak algorytm jest wydajny numerycznie i jest realizowany przez komputer bardzo szybko. Problemem natomiast jest określenie współrzędnych geograficznych pikseli.

Określanie współrzędnych geograficznych pikseli zdjęcia satelitarnego

O odwzorowaniu zdjęcia satelitarnego wiadomo tylko tyle, że jest to rzut na powierzchnię boczną walca orbitalnego, albo na płaszczyznę styczną do orbity. Nie są znane z dostateczną dokładnością parametry tych odwzorowań, co nie jest zresztą bolączką, jako że i tak są one szybkozmienne. Tak więc ogólny problem znalezienia elementów orientacji zdjęcia względem Ziemi musi być rozstrzygany osobno dla każdej sceny, nie metodami kartografii matematycznej lecz odpowiednio zaczerpniętymi z fotogrametrii i geodezji.

Najprościej można znaleźć związek między zdjęciem i terenem na podstawie kilku punktów o znanych współrzędnych w obu układach (punkty dostosowania). Układem współrzędnych na zdjęciu może być układ linii i kolumn cyfrowo zapisanego obrazu. Pozostaje kwestia układu współrzędnych terenowych.

Położenie punktu w terenie można określić bądź w układzie słusznym dla całego globu, na przykład w układzie współrzędnych geograficznych, lub w jakimś układzie współrzędnych prostokątnych płaskich. Jednak mówiąc o współrzędnych płaskich nie można pominąć kwestii odwzorowania, w jakim są one wyrażone.

Gdy pobieramy terenowe współrzędne punktów dostosowania z mapy, co należy traktować jako regułę przy geometryzowaniu zdjęć satelitarnych, odwzorowanie jest ściśle zdefiniowane, co oznacza, że istnieje możliwość przeliczenia współrzędnych płaskich na geograficzne i odwrotnie. Nie zawsze są to czynności proste, a niekiedy wzory przeliczeń nie są ogólnie dostępne. Duża pracochłonność przeliczeń jest w tym przypadku o tyle bagatelna, że dotyczy zaledwie kilku punktów w granicach sceny. Trudności pojawiają się dopiero wtedy, gdy chcemy uzyskać współrzędne geograficzne wszystkich pikseli zdjęcia, które liczy się w setkach tysięcy.

Obecnie w Polsce najlepiej jest posługiwać się mapami topograficznymi w odwzorowaniu „GUGiK-80”. Są one łatwo dostępne i na przykład w skali 1 : 100 000 pokrywają cały kraj. Z tych map można odczytać jedynie współrzędne geograficzne. W naszym przypadku jest to wystarczające.

Tak więc po zidentyfikowaniu na zdjęciu i na mapie kilku odpowiednio rozmieszczonych punktów dostosowania można określić dla każdego z nich dwie pary współrzędnych:

- prostokątnych płaskich (x, y) ze zdjęcia,
- geograficznych (φ, λ) z mapy.

Nie da się wprost przeliczyć współrzędnych w układzie zdjęcia (x, y) na geograficzne (φ, λ) i odwrotnie, ponieważ zdjęcie jest odwzorowaniem powierzchni Ziemi o niezdefiniowanych parametrach. Trzeba zatem sięgnąć do odwzorowania pomocniczego.

Jak i odwzorowanie pomocnicze najlepiej przyjąć takie, którego przeliczniki (φ, λ) na (x, y) i odwrotnie są powszechnie znane i ogólnie dostępne. Wtedy bowiem nie ma się obaw, że zostaną naruszone zasady zachowania tajemnicy państwowej przy posługiwaniu się współrzędnymi. Takim odwzorowaniem może być na przykład odwzorowanie Gaussa-Krügera z przesunięciem południka osiowego względem typowego dla tego odwzorowania, gdy było jeszcze używane. Na przykład zamiast południka $\lambda = 18^\circ$ przyjąć $\lambda = 19^\circ$, co jest zresztą korzystniejsze dla wcześniej omawianego układu odniesień przestrzennych.

Teraz, mając do dyspozycji punkty dostosowania, można ich współrzędne (φ, λ) pobrane z mapy przeliczyć na współrzędne w odwzorowaniu pomocniczym (X, Y) . W efekcie ma się dla każdego punktu dostosowania po dwie pary współrzędnych: jedną na płaszczyźnie zdjęcia (x, y) , drugą na płaszczyźnie odwzorowania pomocniczego (X, Y) .

Znalezienie związku między tymi układami sprowadza się do ułożenia

i rozwiązania układu równań transformujących, czyli określenia parametrów funkcji f_1 i f_2 we wzorach

$$X = f_1(x, y); \quad Y = f_2(x, y) \quad (8)$$

Po wykonaniu dostosowania wzory (8) pozwalają na obliczenie współrzędnych terenowych (X, Y) każdego punktu o znanych współrzędnych (x, y) na zdjęciu. Jest to zatem możliwe także w odniesieniu do każdego piksela.

Mając współrzędne X, Y każdego piksela, można obliczyć współrzędne geograficzne:

$$\varphi = F_1(X, Y); \quad \lambda = F_2(X, Y) \quad (9)$$

Funkcje F_1 i F_2 oraz ich parametry są, z istoty rzeczy, znane dla przyjętego odwzorowania pomocniczego. Gdy jest nim odwzorowanie Gaussa-Krügera, to funkcje można znaleźć w każdym podręczniku do geodezji lub kartografii matematycznej.

Jak dotąd po przyjęciu odwzorowania pomocniczego, dochodzenie do geograficznych współrzędnych poszczególnych pikseli teoretycznie nie stanowi problemu. Jednak, gdy weźmie się pod uwagę ogromną liczbę pikseli w obrazie satelitarnym, sprawa staje się poważna.

Obecnie używane algorytmy przeliczenia współrzędnych płaskich na geograficzne są bardzo pracochłonne. Przeliczenie jednego punktu na komputerze IBM/XT trwa ok. 0,4 sekundy. Oznacza to, że przeliczenie sceny satelitarnej trwałoby kilkadziesiąt godzin. Nawet biorąc inny komputer, to i tak staje pod znakiem zapytania sens geometryzowania zdjęć poprzez ich wpisywanie w pola odniesień przestrzennych.

Jednak idea takiego właśnie geometryzowania ma tak wiele zalet, że nie sposób z nich zrezygnować bez walki.

Ciężar sprawy leży, jak widać, w zbyt skomplikowanych, a więc nader pracochłonnych algorytmach przeliczania współrzędnych płaskich na geograficzne. Źródłem powodzenia należy zatem szukać w uproszczeniu tych algorytmów.

Znaczne przyspieszenie przeliczeń można uzyskać stosując wzory interpolacyjne. W ogólności polega to na poszukiwaniu wartości φ, λ na podstawie tablic zawierających odpowiadające sobie wielkości X, Y oraz φ, λ w dostatecznie małych odstępach, by można było interpolować wewnątrz nich. Jednak interpolowanie przy użyciu tablic budzi sprzeciw ze względu na zbyt duże zaangażowanie pamięci operacyjnej komputera. Proponuję zatem postępowanie w myśl następującego rozumowania.

Każde odwzorowanie kartograficzne ma to do siebie, że wiadomo, jak w nim wyglądają obrazy południków i równoleżników. W odwzorowaniu Gaussa-Krügera równik i środkowy południk odwzorowują się jako linie proste. Pozostałe południki i równoleżniki są łukami.

Skoro tak jest, to można napisać równania linii, będących odwzorowaniem siatki geograficznej, a mianowicie:

$$\begin{aligned} X &= a Y^2 + b Y + c; \\ Y &= d X^2 + e X + f; \end{aligned} \quad (10)$$

Wzory (10) opisują ogólną zależność między współrzędnymi punktów leżących na południkach i równoleżnikach przy założeniu, że wielomian drugiego stopnia skutecznie opisuje krzywiznę łuków tych linii.

Parametry oznaczone literami a, b, c są różne, w zależności od tego, jaką szerokość geograficzną reprezentuje określony równoleżnik. Parametry d, e, f w taki sam sposób dotyczą obrazu południka.

Ponieważ wielkości parametrów powinny się zmieniać proporcjonalnie do położenia geograficznego, to

$$\begin{aligned} a &= A \varphi + B; \\ b &= C \varphi + D; \\ c &= E \varphi + F; \\ d &= G \lambda + H; \\ e &= J \lambda + K; \\ f &= L \lambda + M; \end{aligned} \quad (11)$$

gdzie

φ — szerokość geograficzna;

λ — przyrost długości geograficznej liczony od osiowego południka pasa odwzorowawczego (na wschód od tego południka λ ma znak „+”, na zachód „-”).

Łącząc wzory (10) i (11), po odpowiednich przekształceniach, otrzymuje się:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= (X - B Y^2 - D Y - F) : (A Y^2 + C Y + E); \\ \lambda &= (Y - H X^2 - K X - M) : (G X^2 + J X + L); \end{aligned} \quad (12)$$

gdzie

X, Y — współrzędne w odwzorowaniu pomocniczym,

$\dot{\varphi}, \lambda$ — współrzędne geograficzne punktu o współrzędnych X, Y ,

A, \dots, L — współczynniki stałe dla określonego pasa odwzorowania.

Przyglądając się wzorom (12) łatwo dojść do wniosku, że ich realizacja jest dla komputera stosunkowo łatwa. Wzory będą jednak użyteczne dopiero wtedy, gdy znane będą współczynniki od A do L .

Obliczenie tych współczynników jest dość pracochłonne, lecz jest to czynność jednorazowa dla określonego odwzorowania, której warto poświęcić nawet dużo pracy. W efekcie bowiem do pamięci komputera wprowadza się tylko 12 współczynników, uzyskując ten sam skutek, jaki się ma po wprowadzeniu tam tablicy o wielotysięcznej liczebności.

Chcąc obliczyć współczynniki równań (12) należy:

— określić w zwykły sposób współrzędne X, Y , pewnej liczby punktów przecięcia siatki geograficznej,

— wybrać z tego zbioru współrzędne X, Y punktów leżących na tym samym równoleżniku, na przykład φ_i , i dla nich zestawić układ równań

$$\begin{aligned} a_i Y_1^2 + b_i Y_1 + c_i &= X_1; \\ a_i Y_2^2 + b_i Y_2 + c_i &= X_2; \\ \dots\dots\dots & \\ a_i Y_n^2 + b_i Y_n + c_i &= X_n; \end{aligned} \tag{13}$$

gdzie

a_i, b_i, c_i — niewiadome, określane z układu (13), opisujące linię równoleżnika φ_i ,

X, Y — współrzędne punktów leżących na równoleżniku φ_i w liczbie od 1 do n .

Układów równań (13) będzie tyle, ile równoleżników wzięto do obliczeń, na przykład N . Tyle więc będzie wielkości a, b, c . Teraz, zgodnie z wzorami (11) można zestawić układ N równań typu

$$\begin{aligned} A \varphi_1 + B &= a_1; \\ A \varphi_2 + B &= a_2; \\ \dots\dots\dots & \\ A \varphi_N + B &= a_N; \end{aligned} \tag{14}$$

Rozwiązując ten układ otrzymuje się wielkości A i B . Ten sam sposób rozumowania pozwala na obliczenie pozostałych współczynników równań (12).

Jeżeli przyjmie się, że odwzorowaniem pomocniczym jest odwzorowanie Gaussa-Krügera o południku osiowym $\lambda_0 = 19^\circ$, to przeliczenie współrzędnych X, Y w tym odwzorowaniu na geograficzne może być wykonane na podstawie wzorów (12), po wstawieniu tam następujących współczynników:

$$\begin{aligned} A &= 3,58747724328557 \text{ e}-09; \\ B &= -8,60601238207602 \text{ e}-08; \\ C &= -3,15872558722834 \text{ e}-08; \\ D &= 5,29499029526702 \text{ e}-07; \\ E &= 1,11265927799640 \text{ e}+05; \\ F &= -2,23567912762398 \text{ e}+04; \\ G &= -8,47461865488594 \text{ e}-10; \\ H &= 1,92184607899995 \text{ e}-13; \\ J &= -3,99014168990933 \text{ e}-03; \\ K &= -1,21391773996303 \text{ e}-06; \\ L &= 1,19911773692769 \text{ e}+05; \\ M &= -8,79893979785993 \text{ e} 00; \end{aligned} \tag{15}$$

Na podstawie tych współczynników można obliczać współrzędne geograficzne dla całego obszaru Polski. Współrzędne X , Y należy mieć obliczone w odwzorowaniu Gaussa-Krügera przy $\lambda_0 = 19^\circ$, na elipsoidzie Krasowskiego. Współrzędna Y na zachód od południka osiowego jest ujemna.

Do wielkości λ obliczonej z wzorów (12) należy dodać 19° . Wielkości φ i λ otrzymuje się z wzorów (12) w stopniach i jego częściach w układzie dziesiętnym. Chcąc zatem je wykorzystać we wzorach od (1) do (5), co jest celem całego przedsięwzięcia, należy dokonać przeliczenia na stopnie, minuty i sekundy. Przeliczenie wzorami (12) współrzędnych płaskich na geograficzne jednego punktu jest około 17 razy szybsze od przeliczenia dotychczas stosowanymi wzorami. Dokładność obliczonych współrzędnych jest w granicach kilku sekund, co wystarczy aby właściwie zaadresować środek piksela do pola odniesień przestrzennych o boku ok. 250 metrów.

Podsumowanie

Wykorzystując to, co dotychczas zostało powiedziane, można określić adres pola, do którego należy przesłać każdy piksel zdjęcia. Gdy się to wykona, to tablica utworzona z pól odniesienia przestrzennego jest zgeometryzowaną postacią zdjęcia tyle tylko, że w układzie współrzędnych geograficznych.

Jeżeli taką tablicę wyświetli się, bądź wydrukuje punkt po punkcie w linii i linia po linii, to otrzyma się obraz Ziemi w odwzorowaniu, w którym obrazy południków i równoleżników są liniami prostymi, prostopadłymi do siebie, o stałym odstępnie liniowym wzdłuż kolumn i wierszy. Należy podkreślić, że w większości przypadków przedstawienie zawartości bazy danych w takiej postaci w zupełności wystarcza. Jeżeli jednak nie, to znając z założenia współrzędne geograficzne środka każdego pola odniesień przestrzennych, można przejść do dowolnego odwzorowania kartograficznego.

Określeniem związku między położeniem piksela na zdjęciu a jego usytuowaniem w układzie odniesień przestrzennych, jednoznacznie zdefiniowanym w przestrzeni geograficznej, rozwiązuje się problem geometryzacji zdjęć satelitarnych. Nie oznacza to jednak, że zostały rozwiązane wszystkie problemy zasilania baz danych systemów informacyjnych informacjami pochodzącymi z teledetekcji. Pozostał bowiem cały kompleks zagadnień związanych z przesyłaniem pod wskazany adres treści zawartej w pikselu i następnie uogólnienie wiedzy o polu odniesienia przestrzennego pochodzącej z tych pikseli, które trafiły pod wspólny adres. Te problemy będą przedmiotem osobnej publikacji.

Recenzował: prof. dr hab. Andrzej Ciołkosz

Przyjęto do opublikowania w dniu 15.12.1987 r.

WOJCIECH BYCHAWSKI

GEOMETRIZATION OF SATELLITE IMAGES

S u m m a r y

Geometric transformation of satellite image with the use of reference grid is discussed in this article. It has been assumed, that such a grid is formed from meridians and parallels; it is characterized by constant size of cell, expressed in angular measure: $\Delta\varphi$ along meridians, $\Delta\lambda$ along parallels.

Reference grid can be presented in the form of rectangular table (symbolizing database); each grid cell in this table, described by line number (L) and column (K), is located in the geographical coordinate system, so it is geometrized by definition.

Formulas (2) describe relationship between geographical coordinates of the left corner of reference grid cell and its address — line and column number, taken from the table, representing that grid.

Satellite image is treated as a plane formed from pixels, described by x, y coordinates. An image can be accounted to be geometrized, when pixel values, located by x, y coordinates, will be inserted in then proper grid cells (L, K). In order to do it, geographical coordinates of each pixel must be determined. As it cannot be done in a direct way, auxiliary cartographic projection has been utilized. First x, y coordinates are converted to X, Y coordinates in auxiliary projection, and these are transformed to φ, λ geographical coordinates.

Translation: Zbigniew Bochenek

ВОЙЦЕХ БЫХАВСКИ

ГЕОМЕТРИЗАЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

Резюме

Рассматриваются вопросы, связанные с геометрическим преобразованием космического снимка с помощью сети полей пространственных относимостей. Принимается, что такая сеть создается из пересечения меридианов и параллелей и что стороны полей этой сети имеют постоянную длину, выраженную в угловой мере; $\Delta\varphi$ вдоль меридианов и $\Delta\lambda$ вдоль параллелей.

Сеть пространственных относимостей может быть представлена в виде прямоугольной таблицы (символизирующей базу данных), в которой каждое поле, описанное номером линии (L) и колонны (K), находится в системе географических координат и, таким образом, geometrized согласно определению (дефиниции).

Формулы (2) определяют зависимость между географическими координатами левой верхней угловой части поля системы пространственных относимостей и адресом в виде линии (L) и колонны (K) таблицы, символизирующей эту сеть.

Космический снимок рассматривается как поверхность, созданная из пикселей, из которых каждый имеет координаты (x, y).

Снимки можно считать geometrized тогда, когда значения пикселей с координатами (x, y) попадают в соответствующие поля пространственных

относимостей (L, K) . Чтобы это сделать, следует определить географические координаты каждого пикселя. Так как этого нельзя сделать непосредственно, используется вспомогательная картографическая проекция. Сначала перечисляются координаты изображения (x, y) в координаты вспомогательной проекции (X, Y) , а затем (X, Y) в (φ, λ) .

Перевод: Róża Tołstikowa