

ZBIGNIEW BOCHENEK
WALDEMAR MADEJ

[528.71:629.785:621.398]:681.3.04:63

Numeryczne przetwarzanie obrazów satelitarnych i jego zastosowanie w opracowaniu mapy użytkowania ziemi okolic Warszawy

Wprowadzenie

Teledetekcja zajmuje się zbieraniem informacji o obiektach materialnych na podstawie pomiarów dokonywanych na odległość, bez fizycznego kontaktu z nimi. Informacje te mogą być przesyłane do obserwatora za pośrednictwem pól siłowych lub elektromagnetycznych, a w szczególności poprzez spektralne, przestrzenne oraz czasowe zmiany tych pól. W tym artykule będziemy zajmować się jedynie oddziaływaniem pól elektromagnetycznych na instrumenty pomiarowe, które zostały zainstalowane na pokładach satelitów LANDSAT 1 i 2. Satelity te zostały umieszczone na orbitach odpowiednio w lipcu 1972 r i styczniu 1975 r. Wszystkie informacje zbierane przez satelity ERTS/Landsat są rejestrowane na taśmach magnetycznych, a następnie mogą być przekształcane na obrazy oraz rejestrowane fotograficznie. Obrazy takie przedstawiają fragment powierzchni ziemi o wymiarach w przybliżeniu 185×185 km, przy czym jednemu obserwowanemu obszarowi odpowiadają cztery obrazy spektralne. Każdy obraz reprezentuje przestrzenny rozkład energii elektromagnetycznej dla obserwowanego obszaru. Informacje dotyczące określonej powierzchni są uzyskiwane przez badanie i analizowanie przestrzennych i spektralnych zmian w zarejestrowanych danych, a następnie odniesienie ich do określonych klas obiektów.

Aktualnie w rozwoju technologii teledetekcji wyróżnia się dwa typy systemów:

- zorientowane obrazowo (image-oriented systems),
- zorientowane cyfrowo (numerically-oriented systems).

Dualizm systemów wynika przede wszystkim z przyczyn historycznych, jako konsekwencja niezależnego rozwoju metod analogowych i technologii komputerowych. Przykładem systemu zorientowanego obrazowo może być kamera zainstalowana na pokładzie samolotu oraz interpretator analizujący zmiany pola elektromagnetycznego zarejestrowane na materiałach fotograficznych. W systemach zorientowanych obrazowo

obraz wizualny odgrywa zasadniczą rolę w procesie analizy, podczas gdy w systemach zorientowanych cyfrowo obraz wizualny jest sprawą drugorzędną i może nawet nie być formowany. Jeśli jest tworzony, to po to, aby nadzorować pracę systemu lub aby przekazywać informacje operatorowi, gdyż obraz jest oczywiście najbardziej efektywną formą przekazywania olbrzymiej liczby informacji człowiekowi.

W systemach zorientowanych cyfrowo w proces przetwarzania danych obrazowych jest włączony komputer. Przetwarzanie komputerowe obrazowych danych wielospektralnych w większości przypadków ma na celu dokonanie operacji spośród następujących czterech kategorii:

- wstępne przetwarzanie,
- efektywne kodowanie informacji,
- rozpoznawanie klas obiektów (pattern recognition),
- grafika komputerowa.

Wstępne przetwarzanie danych ma na celu przede wszystkim polepszenie jakości obrazu, przez skompensowane degradacji wprowadzanych przez systemy rejestracji danych obrazowych. Wśród wielu możliwych operacji można tu wymienić: geometryczne i radiometryczne korekcje, zwiększanie kontrastu, cyfrowa filtracja, uwypuklanie konturów itp. Z efektywnym kodowaniem informacji mamy do czynienia w przypadku transmisji lub magazynowania danych. W przypadku zbyt wielkich wymagań w stosunku do kanału transmisji lub pojemności pamięci musimy wprowadzić bardziej efektywne kodowanie lub dokonać operacji, które pozwoliłyby zredukować wspomniane wymaganie, np.: transformacje wg Principal Components lub wybór podzbioru (Feature Selection). Terminu „rozpoznawanie klas obiektów” albo „pattern recognition” używamy na określenie czynności wykrywania i wyodrębniania cech charakterystycznych zawartych w danych obrazowych. Techniki stosowane do komputerowego albo numerycznego rozpoznawania klas obiektów zostaną przedstawione pokrótce w następnym rozdziale.

Ostatnią kategorią, gdzie znajduje zastosowanie technika komputerowa, jest tzw. „grafika komputerowa”. W przypadku obrazów wielospektralnych grafika komputerowa związana jest zarówno z danymi wejściowymi, czyli zobrazowywaniem danych surowych lub wstępnie przetworzonych, jak i z prezentacją wyników obliczeń, a więc z danymi wyjściowymi. W obu przypadkach obrazy te mogą być tworzone na ekranach monitorów czarno-białych lub kolorowych oraz za pomocą różnego typu drukarek, plotterów i przetworników numeryczno-graficznych.

Numeryczna analiza obrazowych danych wielospektralnych

Energia elektromagnetyczna zmierzona i zarejestrowana w każdym paśmie spektralnym może być następnie wykorzystywana jako cecha charakterystyczna przy komputerowym, wielowymiarowym rozpoznawaniu obiektów. Proces ten stanowi podstawę do interpretacji elementów składowych danej sceny. Oczywiście obrazy z każdego pasma spektralnego mogą być także interpretowane wizualnie, ale interpretacja taka staje się mało praktyczna, gdy liczba obrazów wzrasta, a wielkość analizowanego obszaru jest znaczna. Toteż wielkie znaczenie jest przypisywane maszynowym (albo komputerowym) technikom wspomagającym proces analizy i interpretacji.

Z kolei w cyfrowo zorientowanych systemach teledetekcji główną rolę odgrywa technika rozpoznawania obiektów (pattern recognition). Najogólniej zajmuje się ona opracowywaniem podstaw teoretycznych i algorytmów dla procedur pozwalających decydować, do której klasy powinien być zaliczony dany element obrazowy. Decyzja jest podejmowana przy tym w taki sposób, aby osiągnąć średnio biorąc poprawną klasyfikację.

W przypadku uzyskiwania danych obrazowych za pomocą skanerów wielospektralnych, każdemu elementowi odpowiada n liczb albo pomiarów, czyli po jednym dla każdego z n kanałów. Wygodnie jest wtedy uważać, że tych n pomiarów definiuje punkt w n -wymiarowej przestrzeni Euklidesowej, zwanej dalej przestrzenią pomiarów. Pomiar odpowiadające dowolnemu punktowi mogą być przedstawione jako wektor:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \text{ lub } X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T.$$

Cechy spektralne związane z jakąś klasą obiektów wykazują pewną przypadkowość wywołaną przez przypadkowość natury. Wektory pomiarów z tej samej klasy mają tendencję do tworzenia zgrupowań punktów w przestrzeni pomiarów. Zadaniem algorytmu klasyfikacji cech jest podział przestrzeni pomiarów na regiony decyzyjne, przy czym każdy region odpowiada określonej klasie. Dowolny punkt przypadający do danego regionu jest zaliczany do klasy związanej z tym regionem. Powierzchnie oddzielające regiony decyzyjne są zwane powierzchniami decyzyjnymi. Załóżmy, że możemy wyróżnić m klas obiektów. Niech $g_1(X), \dots, g_m(X)$ będą skalarowymi funkcjami X , takimi że: $g_i(X) > g_j(X)$ dla wszystkich X w regionie odpowiadającym i -tej klasie (przy czym $j \neq i$).

Jeżeli funkcje wyróżniające $g(X)$ są ciągłe na granicach obszarów, to powierzchnie decyzyjne są opisywane równaniami postaci: $g_i(X) - g_j(X) = 0$.

Zadanie znalezienia algorytmu klasyfikacji sprowadza się więc do problemu optymalnego wyboru funkcji wyróżniających. Wyznaczanie takich funkcji jest dokonywane najczęściej na podstawie zbioru cech czyli pomiarów „treningowych” typowych dla poszczególnych klas. „Próbki treningowe” mogą być określane na podstawie dwóch różnych metod: metodą banku danych lub metodą ekstrapolacji. Wykorzystując metodę banku danych, należy uprzednio zebrać jak najwięcej cech spektralnych odpowiadających wszystkim spotykanym w przyrodzie klasom obiektów. Po utworzeniu takiego banku dane treningowe byłyby dostępne bez żadnego problemu dla każdego analizowanego następnie obrazu. Wielką zaletę tej metody stanowi właściwość, że przy klasyfikacji wymagane jest jedynie minimum wiedzy o klasyfikowanych danych oraz, że ten sam bank danych może być stosowany przy klasyfikacji dowolnej liczby nowych zbiorów danych. Jednakże metoda ta ma również poważne wady, gdyż odpowiedni bank danych musiałby być bardzo duży i musiałby zawierać dane zbierane w różnych warunkach w celu uwzględnienia naturalnych statystycznych zmian, takich jak zmiany czasowe, zmiany parametrów oświetlenia terenu podczas rejestracji, zmiany warunków atmosferycznych, itp. Przez zastosowanie metody ekstrapolacji unikamy tych wszystkich kłopotów. W tym przypadku dane treningowe dla każdej z klas są uzyskiwane przez lokalizowanie pośród analizowanych danych, typowych przykładów próbek odpowiadających poszukiwanym klasom. Przez wybór podzbioru danych spośród klasyfikowanych danych zapewniamy, że próbki treningowe są zebrane w tych samych warunkach co dane. Powierzchnie decyzyjne są wyznaczane na podstawie takich podzbiorów przykładowych, a następnie, jest poddawany klasyfikacji cały zbiór danych. A zatem klasyfikacja jest tu oparta na ekstrapolacji z niedużej liczby próbek na cały zbiór danych. Metoda ta ma więc tę zaletę, że dokładna kalibracja przyrządów pomiarowych nie jest tu sprawą krytyczną. Wymaga ona jednak pewnej wiedzy „a priori” o analizowanej scenie. Wiedza taka może być zebrana przez obserwacje naziemne lub zdjęcia fotograficzne. Mimo tych niedogodności metoda ekstrapolacji jest obecnie powszechnie stosowana.

W przypadku statystycznych technik rozpoznawania klas obiektów, na podstawie przykładowych podzbiorów próbek są estymowane nieznanne funkcje gęstości prawdopodobieństwa dla każdej z klas. Takie podejście jest wykorzystywane w wielu praktycznych zastosowaniach, gdyż:

— dane pomiarowe zawsze są obciążone zakłóceniami, które zacierają granice między klasami,

— cechy charakterystyczne rozpatrywanych klas mogą pokrywać się częściowo w przestrzeni pomiarowej.

I tylko metoda statystyczna prowadzi do podjęcia decyzji, które są poprawne w sposób „najbardziej prawdopodobny”.

Najczęściej zakłada się, że kształt funkcji prawdopodobieństwa jest znany, a poszukuje się jedynie wartości pewnych parametrów związanych z tymi funkcjami. Na przykład w przypadku wielowymiarowego rozkładu gaussowskiego wyznaczyć należy wektor wartości oczekiwanych oraz macierz wariancji-kowariancji.

Jeżeli algorytm klasyfikacji jest zaprojektowany tak, aby zminimalizować straty wynikające ze złej klasyfikacji, to mówimy, że jest on optymalny w sensie bayesowskim.

Dla danego pomiaru X , oczekiwane straty wynikające z zadecydowania, że $X \in k_i$, są wyrażone następująco:

$$L_x(i) = \sum_{j=1}^m \lambda(i|j) \cdot p(k_j|X),$$

gdzie:

$\lambda(i|j)$ — jest stratą (albo kosztem) w przypadku zaklasyfikowania danej próbki do klasy k_i , mimo że należy aktualnie do klasy k_j ,

$p(k_j|X)$ — jest prawdopodobieństwem, że próbka X należy do klasy k_j .

Stosując regułę Bayesa:

$$p(X, k_j) = p(X|k_j) \cdot p(k_j) = p(k_j|X) \cdot p(X),$$

gdzie:

$p(X|k_j)$ — jest prawdopodobieństwem pojawienia się próbki X , pod warunkiem, że X należy do klasy k_j ,

$p(k_j)$ — jest prawdopodobieństwem „a priori” związanym z klasą k_j , oczekiwane straty możemy zapisać jako:

$$L_x(i) = \sum_{j=1}^m \lambda(i|j) \cdot p(X|k_j) \cdot p(k_j)/p(X).$$

Można dowieść, że minimum funkcji $L_x(i)$ zapewnimy stosując tak zwaną Regułę Decyzyjną Maksymalnego Prawdopodobieństwa (MLDR— —maximum likelihood decision rule), która w przypadku przyjęcia funkcji strat jako: $\lambda(i|j) = 0$ dla $i = j$, oraz $\lambda(i|j) = 1$ dla $i \neq j$, ma następującą postać:

Decydujemy $X \in k_i$, wtedy i tylko wtedy, gdy:

$$p(X|k_i) \cdot p(k_i) \geq p(X|k_j) \cdot p(k_j) \text{ dla wszystkich } j.$$

W przypadku, gdy algorytm klasyfikacyjny zakłada $p(X|k_i)$ jako wielowymiarową gaussowską funkcję gęstości prawdopodobieństwa, to jest:

$$p(X|k_i) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} |E_i|^{-\frac{1}{2}} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} (X-M_i)^T \cdot E_i^{-1} \cdot (X-M_i) \right\}$$

gdzie:

- X — wektor pomiarowy,
- M_i — wektor wartości oczekiwanych dla klasy k_i ,
- E_i — macierz wariancji-kowariancji dla klasy k_i ,
- $|E_i|$ — wyznacznik macierzy E_i ,
- $(X-M_i)^T$ — oznacza transponowanie wektora $X-M_i$.

Funkcja wyróżniająca dla metody największego prawdopodobieństwa ma postać $g_i(X) = p(X|k_i) \cdot p(k_i)$, a więc:

$$\log g_i(X) = \log p(k_i) - \frac{1}{2} \log |E_i| - \frac{1}{2} (X-M_i)^T \cdot E_i^{-1} \cdot (X-M_i).$$

W następnym rozdziale zostanie przedstawiony pokrótce System LARSYS opracowany na Uniwersytecie Purdue w USA. Stosowany aktualnie w tym systemie algorytm klasyfikacyjny wykorzystuje regułę decyzyjną opartą na powyższym równaniu.

System LARSYS do numerycznego przetwarzania obrazów wielospektralnych

System LARSYS został opracowany i wdrożony w amerykańskim ośrodku teledetekcji LARS, który organizacyjnie należy do Uniwersytetu Purdue w West Lafayette, Indiana. Ośrodek LARS został utworzony w roku 1966 w celu prowadzenia badań nad zastosowaniem metod teledetekcji w różnych dziedzinach.

W latach 1971—1973 nastąpiło w wyżej wymienionym ośrodku uformowanie oraz stworzenie dokumentacji jednolitego systemu komputerowego do przetwarzania danych wielospektralnych. System ten powstał z połączenia wielu programów i procesorów software'owych, z których wiele zostało napisanych we wcześniejszych latach działalności LARS.

Aktualnie, system zawiera trzy zasadnicze składniki:

- sieć komputerową, to znaczy komputer ogólnego przeznaczenia wraz z zespołem dołączonych do niego lokalnych oraz odległych terminali inteligentnych i urządzeń wejściowo-wyjściowych,
- bank danych wielospektralnych,

— LARSYS, system software'owy do analizy danych wielospektralnych.

Głównym elementem sieci komputerowej jest komputer IBM System 370, Model 158, o pojemności pamięci operacyjnej 512 k bajtów. Jest on zainstalowany w centrum obliczeniowym LARS. Towarzyszy mu bogaty zestaw urządzeń wejściowo-wyjściowych, takich jak: stacje magnetycznej pamięci taśmowej, bębny i dyski magnetyczne, czytniki i perforatory kart, drukarki wierszowe, elektryczne maszyny do pisania, monitory alfanumeryczne, itp. Do komputera tego są podłączone również terminale inteligentne. Jako terminale lokalne pracują między innymi:

— minikomputer DEC PDP 11/34 o pojemności pamięci wewnętrznej 64 k bajtów wraz z przetwornikiem digitalizującym firmy CYBERGRAPH oraz elektrostatyczną drukarką-plotterem firmy VARIAN,

— graficzny system cyfrowy IBM 4507 zawierający: monitor TV o 577 liniach \times 768 elementach w linii, klawiaturę sterującą oraz pióro świetlne,

— końcówka firmy DATA 100 wraz z czytnikiem i perforatorem kart oraz drukarką wierszową.

Do komputera głównego, za pośrednictwem jednostek sterujących teletransmisją, były podłączone również terminale odległe zlokalizowane w różnych częściach USA. Umożliwiało to wykorzystywanie komputera jednocześnie przez kilkudziesięciu użytkowników. W pomieszczeniu komputerowym jest zorganizowany także bank danych wielospektralnych, który aktualnie składa się z około 5000 krążków taśmy magnetycznej. Każda taśma, zwana Pamięcią Obrazu Wielospektralnego (Multispectral Image Storage Tape), zawiera dane wielospektralne zarejestrowane przez systemy pomiarowe umieszczone na pokładzie satelity lub samolotu, a przekształcone do postaci CCT (Computer Compatible Tape) i zformatowane według wymagań programów w Systemie LARSYS.

Podstawową jednostką danych na taśmie jest przebieg („run”). Przebieg zawiera wszystkie dane wielospektralne odpowiadające pojedynczemu prostokątowi na powierzchni Ziemi, przy czym może to być obszar odpowiadający całej scenie LANDSAT-owskiej lub jej części. Elementy obrazu są umieszczane kolejno liniami, a w ramach linii mają przyporządkowane numery kolumn. Informacje związane z jednym elementem obrazu zawierają tyle liczb, w ilu kanałach spektralnych odbywała się rejestracja danych.

Wielospektralny bank danych jest dostępny dla wszystkich użytkowników Systemu LARSYS i stanowi podstawową bazę danych. Każdy przebieg jest opatrzony na początku „rekordem” identyfikującym ID, który jest wpisany także do katalogu przebiegów przechowywanego na dyskach Systemu LARSYS.

System LARSYS jest software'owym systemem do analizy danych wielospektralnych. Został wdrożony na komputerze IBM 370/158, pracującym pod nadzorem Systemu Operacyjnego CP-67, który zapewnia pracę komputera z podziałem zasobów (resource sharing) pomiędzy wieloma zadaniami wykonywanymi na rzecz różnych użytkowników. Z punktu widzenia użytkownika, System LARSYS składa się z 18 niezależnych Funkcji Przetwarzających (Processing Functions). Funkcje te umożliwiają łatwe manipulowanie oraz przetwarzanie danych wielospektralnych uzyskanych metodami teledetekcji. Wymiana informacji pomiędzy poszczególnymi funkcjami odbywa się za pośrednictwem zbiorów (files) tworzonych na dyskach systemu. Podstawowym wejściem do systemu są dane cyfrowe zapisane na taśmie magnetycznej.

Wśród tych 18 Funkcji Przetwarzających, albo Procesów, trzy są typu pomocniczego i służą do wyszukiwania informacji katalogowych lub do manipulowania danymi na Taśmach Pamięci Obrazów Wielospektralnych. Są to funkcje o nazwach: IDPRINT, DUPLICATERUN, TRANSFERDATA.

Cztery następne funkcje służą do jakościowej oceny danych zapisanych na taśmie. Należą do nich: LINEGRAPH, COLUMNOGRAPH, HISTOGRAM oraz GRAPHHISTOGRAM.

Dwie kolejne funkcje są pomocne przy wyborze obszarów treningowych lub testowych wymaganych w procesie klasyfikacji. Są to: PICTEREPRINT i IMAGEDISPLAY. Produkują one obrazy dla wybranego kanału spektralnego na drukarce wierszowej lub monitorze TV. W obu przypadkach, maksymalna liczba poziomów szarości wynosi 16. Do wykonywania operacji przygotowawczych do procesu klasyfikacji służą trzy następujące funkcje:

CLUSTER — dokonuje nie nadzorowanej, automatycznej klasyfikacji, w wyniku której następuje pogrupowanie wektorów danych w określoną przez użytkownika liczbę klas.

STATISTICS — wylicza histogramy, wektory wartości oczekiwanych oraz macierze wariancji-kowariancji dla każdej wskazanej przez użytkownika klasy obiektów spektralnych, występujących w danym obrazie. Wyniki obliczeń umieszcza na dysku w Zbiorze Statystyk.

SEPARABILITY — na podstawie wyników obliczeń poprzedniej funkcji, wyznacza ilościowe miary rozróżnialności między poszczególnymi klasami obiektów w funkcji wszystkich kombinacji między kanałami spektralnymi.

Do przeprowadzania klasyfikacji nadzorowanej służą dwie funkcje, które wykorzystują dane ze Zbioru Statystyk:

CLASSIFYPOINTS — dokonuje klasyfikacji metodą największego prawdopodobieństwa (maximum likelihood), punkt po punkcie dla wszyst-

kich elementów obrazu wielospektralnego we wskazanym przez użytkownika obszarze.

SAMPLECLASSIFY — klasyfikuje grupy punktów, na podstawie pojedynczych decyzji, przez porównanie statystycznych miar odległości między tymi grupami.

Wyniki uzyskiwane w trakcie procesu klasyfikacji są umieszczane w Zbiorze Wyników Klasyfikacji. Do analizowania i prezentowania tych wyników obliczeń służą cztery następujące funkcje:

PRINTRESULTS — drukuje mapy klasyfikowanych obszarów na drukarce wierszowej, przy czym każda klasa obiektów jest reprezentowana innym symbolem. Drukowane są również wyniki tabelaryczne zawierające liczbową ocenę klasyfikacji dla pól treningowych lub testowych z rozbiciem na poszczególne klasy.

COPYRESULTS, LISTRESULTS oraz PUNCHSTATISTICS — pozwalają na łatwe manipulowanie wynikami obliczeń.

Dostęp użytkownika do software'u i hardware'u Systemu LARSYS odbywa się za pomocą Komend Sterujących (Control Commands), które są wprowadzane za pośrednictwem terminala z klawiaturą. Dzięki językowi komend można uzyskać łączność z systemem, wywołać do wykonania zadanie, czyli ciąg funkcji przetwarzających, sterować danymi wejściowymi oraz wynikami obliczeń, lub zażądać ogólnych informacji od systemu.

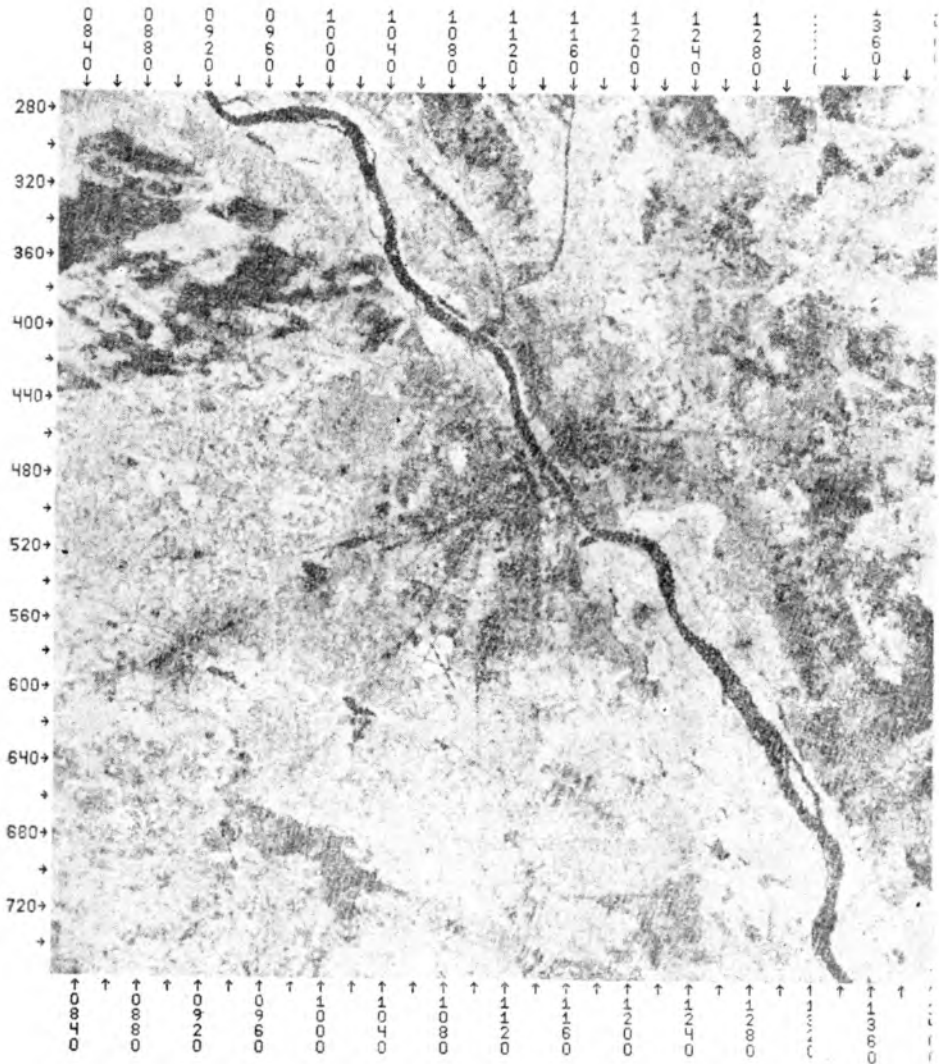
Parametry dla Funkcji Przetwarzających są wprowadzane przez użytkownika za pośrednictwem pliku kart perforowanych wczytywanych przez czytnik kart.

Metodyka numerycznego opracowania mapy użytkowania ziemi okolic Warszawy

Opisany w poprzednim rozdziale system numerycznej analizy stosowany w amerykańskim Ośrodku Teledetekcji Purdue University został wykorzystany do opracowania mapy tematycznej struktury użytkowania ziemi na podstawie satelitarnych danych wielospektralnych z obszaru Polski. Jako materiał wyjściowy wykorzystano dane wielospektralne zarejestrowane przez satelitę Landsat dnia 26 czerwca 1975 r nad obszarem centralnej Polski. Wybrano ten zbiór danych ze względu na ich dobrą jakość oraz termin rejestracji.

W pierwszej części pracy zobrazowano całą scenę na ekranie monitora obrazowego IBM 4507 w celu wyboru jej części do dalszego opracowania. Wybrano obszar południowej części Niziny Mazowieckiej, stanowiący ok. 1/4 całej sceny. Dane wielospektralne z tego obszaru zobrazo-

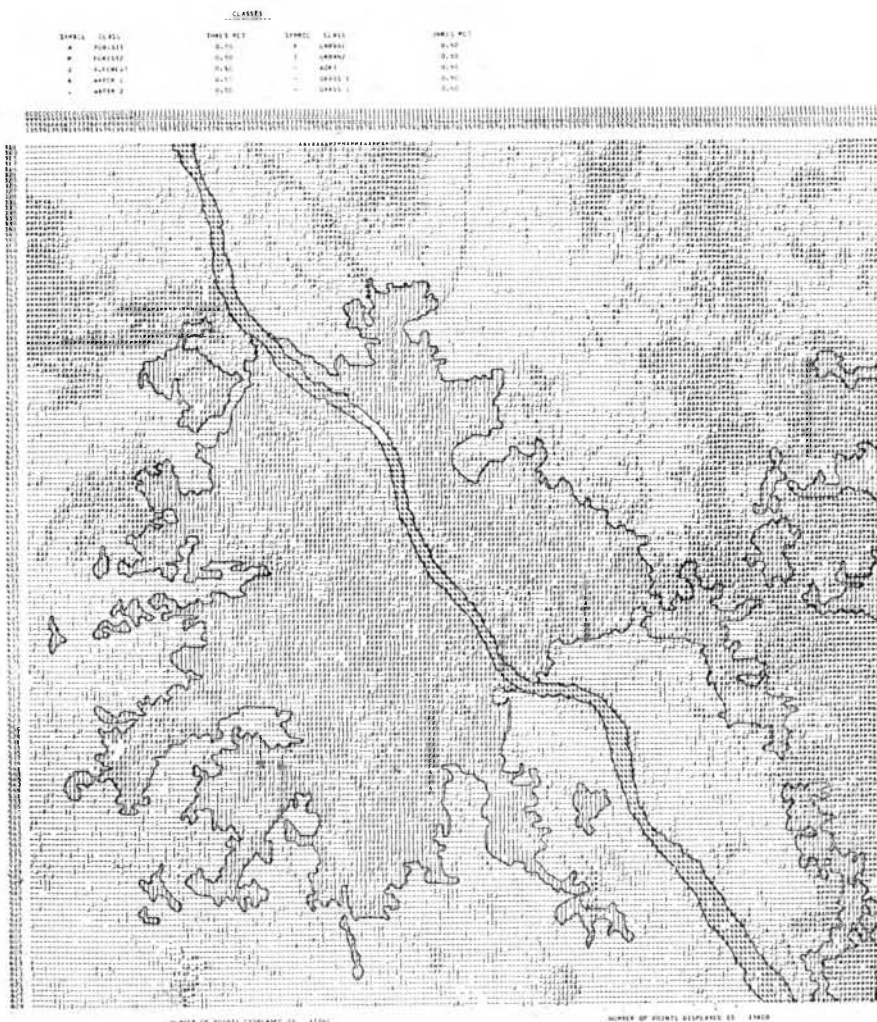
wano w postaci wydruków z drukarki wierszowej oraz drukarki elektrostatycznej, pozwalającej na otrzymanie quasi-fotograficznych obrazów o zaprogramowanej skali szarości. Przykładowy tego typu wydruk danych został przedstawiony na rysunku 1. Następnym etapem pracy był wybór obszarów treningowych dla dokonania podziału na jednolite grupy odbicia spektralnego, czyli tzw. „klasterowania”. W tym celu zostały wybrane 4 obszary treningowe rozmieszczone w najważniejszych miejscach badanego regionu. Założono podział na 17 klas spektralnych z uwagi na duże zróżnicowanie terenu.



Rys. 1

Następnie przeprowadzono „klasterowanie” pól treningowych oraz klasyfikację opracowywanego obszaru wykorzystując podstawowe funkcje oprogramowania LARSYS. W wyniku klasyfikacji otrzymano mapę komputerową zawierającą 17 klas charakteryzujących się różnymi wartościami odbicia spektralnego. Mapa ta była produktem wyjściowym do następnego etapu opracowania.

W drugiej części pracy dokonano wyboru fragmentu sklasyfikowanego obszaru do dalszej, szczegółowej analizy. Wybrano obszar okolic Warszawy położony między $52^{\circ}05'N$ i $52^{\circ}15'N$ oraz $20^{\circ}45'E$ i $21^{\circ}15'E$, sta-



Rys. 2

nowiący w przybliżeniu kwadrat o powierzchni ok. 1400 km². Obszar ten charakteryzuje się dużym zróżnicowaniem struktury użytkowania ziemi.

W dalszej części fragment mapy klasyfikacyjnej z 17 klasami spektralnymi dotyczący powyższego obszaru został porównany z informacjami terenowymi i sposobie użytkowania ziemi. Przeanalizowano także dane statystyczne charakteryzujące spektralne właściwości odbicia



Rys. 3

poszczególnych klas w celu utworzenia tzw. klas informacyjnych, określających rodzaj użytkowania terenu. Łącząc posiadaną informację spektralną i przestrzenną o badanym obszarze wyróżniono 9 klas informacyjnych. Następnie dla każdej z klas wybrano pola treningowe w celu „wytrenowania” komputera do rozpoznawania tych klas.

Po otrzymaniu danych statystycznych przeprowadzono powtórnie klasyfikację badanego obszaru; jako wynik uzyskano wydruk mapy użytkowania ziemi z podziałem na 9 klas. Wynik ten udoskonalono wprowadzając dziesiątą klasę dla obszarów dotychczas nieklasyfikowanych. Ostateczna klasyfikacja została przedstawiona w kilku formach, a mianowicie:

1. Wydruku z drukarki wierszowej z wykorzystaniem symboli alfanumerycznych (rys. 2).
2. Wydruku z drukarki elektrostatycznej z wykorzystaniem symboli obrazkowych (rys. 3).
3. Kompozycji barwnych zarejestrowanych na przeźroczach.
4. Kompozycji barwnych na papierze Chromalin otrzymywanych za pomocą urządzenia laserowego.

Omówienie wyników opracowania

Wyróżnienie klas użytkowania ziemi zostało dokonane na podstawie dwóch typów informacji o badanym terenie, a mianowicie:

1. Informacji spektralnej.
2. Informacji przestrzennej.

Informację spektralną stanowiły dane statystyczne, charakteryzujące wielkość odbicia w poszczególnych zakresach promieniowania rejestrowanych przez skaner wielospektralny satelity Landsat. Dane te określały także wielkość sumarycznego odbicia oraz stosunek wartości odbicia w zakresach promieniowania widzialnego (0,5÷0,7 m) do wartości odbicia w zakresach promieniowania podczerwonego. (0,7÷1,1 m).

nie poszczególnych elementów użytkowania ziemi dla badanego obszaru.

Informację przestrzenną stanowiły mapy przedstawiające rozmieszczenie

Wykorzystując łącznie te dwa typy informacji, na podstawie znajomości charakterystyk odbicia głównych elementów naturalnych i antropogenicznych występujących w terenie, wyróżniono pięć grup użytkowania ziemi.

- I. Obszary leśne.
- II. Obszary wodne.
- III. Obszary zabudowane.
- IV. Tereny rolnicze.
- V. Tereny zielone.

Następnie dokonano dalszego podziału tych grup na podstawie różnic odbicia spektralnego. Wyróżniono w rezultacie następujące klasy użytkowania ziemi:

- I. Obszary leśne.
 1. Lasy liściaste.
 2. Lasy iglaste.
 3. Tereny leśne o małej zawartości drzewostanu (z przewagą gatunków liściastych).
- II. Obszary wodne.
 1. Rzeka Wisła.
 2. Stawy i jeziora.
- III. Obszary zabudowane.
 1. O zwartej zabudowie.
 2. Tereny przemysłowe i nowo zabudowane.
- IV. Tereny zielone.
 1. Łąki.
 2. Fastwiska.
- V. Tereny rolnicze.

Ostatnim etapem pracy było dokonanie oceny dokładności otrzymanej klasyfikacji. Ocenę tę przeprowadzono w kategoriach jakościowych w oparciu o posiadane mapy i znajomość badanego obszaru. Stwierdzono, iż obszary leśne zostały sklasyfikowane z dużą dokładnością. Pewne niezgodności mogą występować jedynie w przypadku lasów mieszanych, lecz zajmują one stosunkowo niewielką powierzchnię na badanym obszarze. Główne parki miejskie zostały sklasyfikowane w tej grupie.

Klasyfikacja obszarów wodnych dała zadowalające wyniki. Mielizny i tereny piaszczyste w korycie rzeki zostały wyróżnione od wody. Jedynie w północnej części opracowywanego obszaru obraz rzeki uległ przerwaniu na skutek występowania nad korytem rzeczonym zanieczyszczeń przemysłowych o odmiennych charakterystykach odbicia.

Klasyfikacja terenów zabudowanych została przeprowadzona dość dokładnie, zwłaszcza w odniesieniu do terenów śródmiejskich o zwartej zabudowie mieszkaniowej. Drogi i linie kolejowe, zwykle otoczone zabudowaniami, zostały również sklasyfikowane w tej grupie.

Trudne jest dokonanie oceny klasyfikacji terenów rolniczych i zielonych z uwagi na brak dokładnych danych dotyczących charakteru rolniczego użytkowania ziemi z czerwca 1975 r. Niemniej nie stwierdzono znaczących niezgodności przy konfrontowaniu zasięgu powierzchniowego tych klas z innymi wyróżnionymi grupami użytkowania ziemi.

Reasumując można stwierdzić, iż numeryczna analiza danych wielospektralnych z satelity Landsat umożliwia szybką, dość dokładną klasyfi-

kację głównych elementów użytkowania ziemi. Dokładność klasyfikacji, ograniczona parametrami technicznymi stosowanego systemu rejestracji (rozdzielczość terenowa ok. 70 m), uzależniona jest od złożoności rozmieszczenia klas użytkowania terenu na badanym obszarze oraz od wielkości różnic odbicia spektralnego pomiędzy poszczególnymi klasami. Szczegółowość opracowania zależy zaś od ilości posiadanych danych naziemnych o rozmieszczeniu różnych elementów pokrycia powierzchni ziemi oraz od znajomości ich charakterystyk odbicia. Dokładność tego typu opracowań będzie wzrastać w miarę wprowadzania nowocześniejszych systemów rejestracji (o większej rozdzielczości terenowej) oraz udoskonalania metod interpretacji komputerowej. W obecnym stadium rozwoju mapy tematyczne otrzymywane w wyniku numerycznej analizy danych wielospektralnych z satelitów Landsat mogą spełniać dużą rolę w badaniu zmian środowiska, planowaniu przestrzennym oraz gospodarce terenowej.

L I T E R A T U R A

- [1] Swain P.H.: *Pattern recognition: a basis for remote sensing analysis*. LARS Information Note 111572. 1972.
- [2] Landgrebe D.A.: *Machine processing for remotely acquired data*. LARS Information Note 031573. 1973.
- [3] Phillips T.L.: *LARSYS user's manual*. Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University, West Lafayette, Indiana. 1974.
- [4] Anderson J.R., Hardy E.E., Roach J.T.: *A land use classification system for use with remote-sensor data*. Geological Survey Circular 671, Washington. 1972.
- [5] Cary T.K., Lindenlaub J.C.: *A case study using LARSYS for analysis of Landsat data*. LARS Information Note 050575. 1975.
- [6] Odenyo V.A., Pettry D.E.: *Land-use mapping by machine processing of Landsat-1 data*. Photogrammetric Engineering, 43:515—524. April 1977.
- [7] Bochenek Z.T., Madej W.A.: *Land use classification of the Warsaw, Poland area by digital analysis of Landsat data*. LARS Technical Report 090777. Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University, 1977.

Recenzował: dr hab. inż. Andrzej Ciołkosz
Rękopis złożono w Redakcji w listopadzie 1977 r.

**ЗБИГНЕВ БОХЕНЕК
ВАЛЬДЕМАР МАДЕЙ**

**ЧИСЛОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ
И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В РАЗРАБОТКЕ КАРТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ЗЕМЕЛЬ ОКРЕСТНОСТЯХ ВАРШАВЫ**

Резюме

Статья в первой части содержит сжатое описание принципов цифрового преобразования аэрофотоснимков и космических снимков. Затем в сокращении характеризуется цифровая система анализа многоспектральных данных, применяемая в американском центре телдетектирования Purdue University, которая была использована авторами для реализации исследовательского проекта.

Во второй части статьи описано методику работ, связанных с проведением анализа использования земель на основе многоспектральных данных со спутника Landsat с помощью вышеуказанной системы. В заключении произведено оценку точности полученных результатов классификации, а также пригодность применяемого метода для составления тематических карт на основе анализа спутниковых снимков на территорию Польши.

**ZBIGNIEW BOCHENEK
WALDEMAR MADEJ**

S u m m a r y

Principles of digital processing of satellite and aerial images were briefly described in the first part of this article. Next, system of numerical analysis, utilized in Laboratory for Applications of Remote Sensing Purdue University (USA), which was used by the authors for realization of their research project, was shortly characterized.

The method, used for land use analysis on the base of multispectral Landsat data by means of this system, was described in the second part of this article. In the last part accuracy of classification was estimated, as well as usefulness of this method for preparation of thematic maps for Poland on the base of satellite data, was evaluated.