

JACEK DRACHAL

Optymalna metoda wizualizacji obrazu cyfrowego

Zarys treści. Współczesna kartografia wykorzystuje zdjęcia satelitarne, zarejestrowane oryginalnie w formie cyfrowej. Jedną z metod ich opracowania jest klasyczna interpretacja odbitki fotograficznej, otrzymanej w wyniku wizualizacji obrazu cyfrowego. W artykule przedstawiono analizę metod wizualizacji pod kątem ich efektywności w analogowym przekazie informacji cyfrowej oraz wskazano metodę optymalną, polegającą na zmianie kodów oryginału przez tzw. wyrównanie histogramu i neutralizacji funkcji przenoszenia systemu wizualizacji przy użyciu całki z funkcji rozkładu normalnego Gaussa.

Źródła obrazów cyfrowych. Urządzenia do wizualizacji

Od 1972 roku są dostępne satelitarne zdjęcia Ziemi wykonane z pokładu amerykańskiego satelity Landsat przy użyciu skanera wielospektralnego. Zdjęcia z trzech pierwszych satelitów serii Landsat miały rozdzielczość terenową ok. 80 m, dwa następne (od r. 1982) zostały wyposażone w dodatkowy system skanowania zapewniający rozdzielczość wykonywanych zdjęć rzędu 30 m. W 1986 r. pojawiły się na rynku zdjęcia francuskiego satelity SPOT o rozdzielczości terenowej 20 i 10 m. Wspomniane zdjęcia są podstawowym materiałem wykorzystywanym przez ośrodki teledetekcji na całym świecie do opracowania map tematycznych, jak również do aktualizacji map topograficznych wykonanych w skalach od 1:50 000 do 1:1 000 000. Wspólną cechą wymienianych zdjęć satelitarnych jest cyfrowa forma rejestracji – oryginał obrazu jest uporządkowaną sekwencją liczb zapisanych na taśmie magnetycznej.

Wraz z rozwojem systemów przetwarzania obrazów cyfrowych, bez których obrazy satelitarne w formie cyfrowej byłyby bezużyteczne, pojawiły się skanery laboratoryjne umożliwiające zamianę dowolnego obrazu tzw. analogowego, np. zdjęcia fotograficznego w formie odbitki pozytywowej, przezrocza itp. na obraz cyfrowy.

Opracowano także systemy skanerowe przeznaczone na wyposażenie samolotów, w celu uzyskania zdjęć Ziemi w większej skali niż umożliwiają to systemy satelitarne. Tym samym ustaliły się trzy podstawowe źródła obrazów cyfrowych. O rozpowszechnieniu cyfrowego zapisu obrazu zadecydowała z jednej strony pewna przewaga systemu skanerowego nad kamerą fotograficzną, z drugiej zaś możliwość automatycznego opracowania obrazu w komputerowym systemie przetwarzania. System skanerowy umożliwia przekaz obrazu drogą radiową na Ziemię, co ma zasadnicze znaczenie w przypadku systemów satelitarnych.

Światłoczułość systemu, a raczej jego czułość na różne zakresy promieniowania emitowanego przez Ziemię, jest znacznie większa niż światłoczułość

materiałów fotograficznych, a ponadto nie jest ograniczona tylko do promieniowania fotograficznego. Dzięki temu możliwa jest rejestracja obrazu Ziemi w wąskich zakresach promieniowania i z zadowalającą dynamiką, co czyni ze skanerów wielospektralnych szczególnie atrakcyjne źródło informacji. Cyfrowa forma obrazów umożliwia ich opracowanie w specjalnych systemach przetwarzania.

Metody oferowane w takich systemach przewyższają metody analogowe szybkością i dokładnością opracowania, a ponadto wiele z nich to metody nieznanne klasycznej interpretacji zdjęć, a umożliwiające wydobyć z obrazu zupełnie nowego rodzaju informacji. Atrakcyjność systemów przetwarzania obrazów cyfrowych zdecydowała o konstrukcji laboratoryjnego systemu skanowego, który zamienia, jak już wspomniano, zdjęcia wykonane kamerą fotograficzną na obraz cyfrowy. Proces odwrotny – zamiana obrazu cyfrowego na analogowy, czyli tzw. wizualizacja – jest wykonywany na różnych etapach opracowania przy użyciu różnych urządzeń wizualizujących systemu i ma w związku z tym różny stopień wyrafinowania zależnie od stawianego celu.

Istnieją trzy typy urządzeń przeznaczonych do wizualizacji: monitor obrazowy, ploter mozaikowy i ploter fotograficzny. Monitor spełnia rolę pomocniczą przy opracowaniu obrazu cyfrowego. Dzięki szybkości wizualizacji umożliwia orientację wśród zbiorów liczbowych, kontrolę pośrednich etapów pracy, daje możliwość prób – jest podstawowym narzędziem analizy. Obraz wyświetlony na monitorze nie stanowi z reguły ostatecznego rezultatu opracowania jako obraz analogowy fotografowany z ekranu, gdyż obejmuje niewielką liczbę pikseli (512x512, a nawet 256x256) i jest zniekształcony geometrycznie (ekran jest zwykle prostokątny), stanowi za to doskonałe źródło orientacyjnej wiedzy o obrazie.

Plotery są przeznaczone do wizualizacji rezultatów pracy, zapewniają wysoką jakość obrazu analogowego zarówno pod względem geometrycznym, jak i tonalnym. Wyższą jakość gwarantuje ploter fotograficzny, który pozwala uzyskać obraz analogowy o doskonałej skali tonalnej i wysokiej rozdzielczości, przez co może być stosowany m.in. przy opracowywaniu fotomapy satelitarnej. Mozaikowe plotery graficzne mają rozdzielczość rzędu milimetra i skalę tonów istotnie zredukowaną w stosunku do oryginału cyfrowego, a więc ich użyteczność jest mniejsza.

Przy wizualizacji obrazu cyfrowego za pomocą plotera nie wystarcza już tylko znajomość obsługi urządzeń systemu. Pełne wykorzystanie możliwości urządzeń wymaga starannie opracowanej metody postępowania. Najwyraźniej problem wizualizacji daje znać o sobie w urządzeniu o najwyższej jakości, tj. w ploterze fotograficznym. Przedstawiona dalej metoda wizualizacji obrazów dotyczy tego właśnie urządzenia. Wyjaśnia ona także zagadnienia wizualizacji występujące w mniejszym zakresie w pozostałych urządzeniach: ploterze graficznym i monitorze obrazowym.

Cyfrowy zapis obrazu

Do cyfrowej rejestracji obrazu jest stosowana skala 256 liczb całkowitych od 0 do 255, które w procesie rejestracji odpowiadają zakresowi natężeń promieniowania od pewnego maksimum (liczba 255) do natężenia 100-krotnie mniejszego (0). W skanerach satelitarnych, rejestrujących promieniowanie pochodzące z powierzchni Ziemi, górna granica czułości radiometrycznej skanera (odpowiada jej liczba 255) jest cyklicznie korygowana tak, aby przekraczała spodziewane dla danej orbity maksymalne natężenie promieniowania. Każda zmiana maksimum zakresu powoduje odpowiednią zmianę jego minimum (liczba 0), a zatem w skanerach satelitarnych skala liczbowa ma ustaloną reprezentację radiometryczną jedynie na obszarze południkowego pasa powierzchni Ziemi, rejestrowanego z jednej orbity. W skanerze laboratoryjnym rejestrowane jest natężenie promieniowania sztucznego źródła światła po przejściu przez przezroczysty materiał fotograficzny lub odbiciu od materiału nieprzezroczystego i wtedy przejście lub odbicie pełnego sygnału świetlnego kodowane jest liczbą 255, zaś sygnał osłabiony 100-krotnie, w wyniku pochłaniania przez skanowany obraz, kodowany jest liczbą 0. W pełni przezroczyste (lub białe) punkty obrazu są więc kodowane jako 255, a punkty nieprzezroczyste o dużej gęstości optycznej (czarne) jako 0. Istnieje zresztą techniczna możliwość przyporządkowania skali liczbowej innemu zakresowi natężenia promieniowania niż 2 logarytmy dziesiętne. W skanerach laboratoryjnych najczęściej są stosowane dwie skale radiometryczne: od sygnału pełnego do 100-krotnie osłabionego – odpowiadająca zakresowi gęstości optycznej skanowanego obrazu 0 – 2 D i od sygnału pełnego do 1000 krotnie osłabionego – odpowiadająca zakresowi 0 – 3 D (Drachal, 1980).

Zastosowana w skanerach 256-stopniowa skala natężeń promieniowania została uznana za optymalną we wszystkich urządzeniach przeznaczonych do cyfrowego przetwarzania obrazów. Kolejne liczby całkowite od 0 do 255 można zapisać używając najkrótszej „liczby” komputerowej czyli 8-bitowego bajtu, a standard takiego właśnie zapisu liczb rozpowszechnił się wcześniej w systemach komputerowych (Schowengerdt, 1983). Z drugiej strony liczba stopni równa 256 przekracza o rząd wielkości możliwości ludzkiego oka, uznano więc taką dokładność rejestracji za wystarczającą.

Zakresy spektralne rejestrowanego promieniowania zostały zaprojektowane inaczej dla skanera laboratoryjnego, a inaczej dla skanerów satelitarnych i lotniczych. Do rejestracji obrazu w laboratorium wystarczą cztery zakresy spektralne: panchromatyczny, obejmujący całe spektrum promieniowania widzialnego, przeznaczony do rejestracji obrazów monochromatycznych (czarno-białych) i trzy zakresy barwne: czerwony, zielony i niebieski, wystarczające do rejestracji obrazów wielobarwnych. W skanerach rejestrujących promieniowanie Ziemi został zastosowany co prawda zakres panchromatyczny w skanerze HVR umieszczonym na satelicie SPOT, ale z reguły rejestrowane bywa promieniowanie w zakresach interesujących z punktu widzenia zakresu i ilości informacji

o obiektach na Ziemi, na przykład w 7-kanalowym skanerze Thematic Mapper satelity Landsat zastosowano trzy zakresy promieniowania widzialnego (niebiesko-zielony, zielony i czerwony), trzy zakresy bliskiej poczerwieni i jeden zakres podczerwieni termalnej (Zawiła-Niedźwiecki, 1986; Hord, 1982). Warto zauważyć, że w przeciwieństwie do skanerów laboratoryjnych zakresy spektralne skanerów satelitarnych i lotniczych uniemożliwiają z reguły odtworzenie rzeczywistych barw rejestrowanego obrazu powierzchni Ziemi, jako mniej użytecznych przy rozróżnieniu i klasyfikacji obiektów, niż kombinacje zakresów niewidzialnych.

Kodowanie obrazu liczbami zakresu (0,255) odbywa się w ten sposób, że obraz zostaje podzielony przez skaner na elementy (piksele), które są kodowane w zależności od natężenia emitowanego przez nie promieniowania, odpowiednimi liczbami. W skanerze laboratoryjnym piksel jest kwadratem o boku rzędu części milimetra, np. 0,1. W wyniku skanowania negatywu 6x6 cm powstaje 360 000 pikseli i tyleż liczb – kodów. W skanerach satelitarnych i lotniczych piksel jest kwadratem (TM Landsat, Spot) lub prostokątem (MSS Landsat) o wymiarach terenowych rzędu kilku lub kilkudziesięciu metrów, np. 30 m w systemie TM. W efekcie skanowania obszaru 180x180 km (tyle w przybliżeniu obejmuje obraz-scena tego satelity) liczbami (0,255) zostaje zakodowanych około 36 mln pikseli.

Problem wizualizacji

W przypadku wizualizacji obrazu cyfrowego na monitorze lub ploterze bez żadnych dodatkowych zabiegów otrzymuje się zwykle nienajlepszy efekt. Uzyskany obraz bywa mało kontrastowy, a w dodatku zbyt ciemny lub zbyt jasny. Jest to sytuacja normalna, natomiast gorzej byłoby wówczas, gdyby obraz wyświetlony, np. na monitorze robił wrażenie dobrej jakości (występowałyby cała skala tonów), bo wtedy zachodziłoby podejrzenie nieprawidłowej rejestracji cyfrowej. Wyjaśnienie jest następujące. Prawidłowa rejestracja obrazu analogowego (powierzchni o zróżnicowanym natężeniu promieniowania) wymaga doboru odpowiedniej skali radiometrycznej skanera. Skala ta musi przekraczać zarówno z dołu, jak i z góry przewidywaną rozpiętość rejestrowanego natężenia promieniowania.

W satelitach rejestrujących obraz Ziemi w sposób ciągły, wzdłuż pasów w przybliżeniu południkowych, zakres skali radiometrycznej jest ustawiany automatycznie raz dla całego pasa. Mogą tam wystąpić zarówno śniegi na północy Europy lub piaski Sahary (silna emisja promieniowania odbitego), jak i zbiorniki wodne (znikoma emisja z powodu dużego pochłaniania). Przy tak ustalonej skali satelitarny obraz z terenu, np. Polski jest w sposób naturalny bardzo ciemny.

Jeśli w skanerze laboratoryjnym wyposażonym w dwie skale radiometryczne 2D i 3D zarejestrować normalne amatorskie zdjęcie, używając kolejno obu zakresów, to powstałe dwa obrazy cyfrowe będą wyraźnie różniły się. Pierwszy

(2D) będzie miał większe wartości kodów, drugi zaś mniejsze. Po wizualizacji pierwszy obraz będzie bliski oryginałowi, drugi natomiast znacznie ciemniejszy. W urządzeniach wizualizujących konstrukcyjnie ustalone jest przyporządkowanie skali cyfrowej skali tonów. Kod 0 jest zamieniany na ton czarny, kod 255 na biały, a kody pośrednie, na pośrednie tony szare. Jeśli w zapisie obrazu cyfrowego występują liczby małe np. od 20 do 60, to wyświetlony obraz będzie bardzo ciemny. Jeżeli będą to tylko liczby duże, np. 200–250, to analogowy obraz będzie bardzo jasny, jeśli średnie, np. 100–150, to obraz nie będzie miał kontrastu.

Zagadnienie niezgodności zakresów kodów

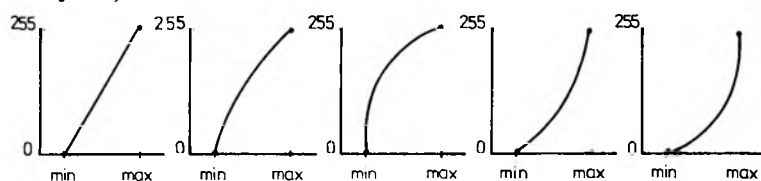
Gdyby istniała możliwość dostrajania radiometrycznego zakresu skanera oddzielnie dla każdego skanowanego obrazu (wymagałoby to co najmniej próbnego skanowania), to nie występowałby problem niezgodności zakresów obrazu cyfrowego i urządzenia wizualizującego. Obraz terenu Polski byłby wtedy kodowany 256. liczbami, a nie 40. czy 60., jak ma to miejsce teraz. Zwiększyłoby to istotnie zawartość informacyjną takiego obrazu, ale niestety ogromnie wzrosłyby też koszty jego pozyskania. Rozwiązanie, które pozostaje, to przeskalowanie oryginalnych 40-tu czy 60-ciu kodów do zakresu 0-255, czyli przemnożenie ich przez pewien współczynnik tak, aby równomiernie rozłożyły się na całej skali. Nie zwiększa to teoretycznie zawartości informacyjnej obrazu, pozwala go jednak łatwiej analizować wizualnie.

Powstaje pytanie czy można w dowolny sposób zmieniać wartości obrazu cyfrowego bez straty zawartych w nich informacji. Aby to wyjaśnić, należy najpierw ustalić, na czym polega zawartość informacyjna obrazu cyfrowego, co ma dla niej decydujące znaczenie.

Istota informacji cyfrowej. Dopuszczalne zmiany oryginalnego zapisu. Prosta metoda wizualizacji

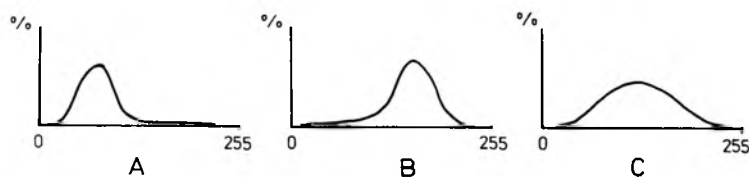
Detektory skanera oznaczają za pomocą liczb różne wartości natężeń promieniowania, podobnie jak cyfrowy densytometr w laboratorium fotograficznym. Liczby te stanowią informację o rzeczywistych natężeniach promieniowania, pochodzących od poszczególnych obiektów na Ziemi, gdy zostaną odniesione do skali natężenia promieniowania przyjętej przez skaner. Jednak skala przyjmowana przez skaner satelity na nowo dla każdej orbity nie jest odnieszona do jakiejś skali bezwzględnej, z czego wynika, że tego rodzaju przekaz informacji nie jest intencją projektantów systemu. W cyfrowym zapisie obrazu zawarta jest zatem informacja względna, dotycząca różnic natężenia promieniowania w ramach danego obszaru lub obrazu. Zachowanie tej informacji jest jedynym ograniczeniem, gdy chodzi o wprowadzenie zmian do oryginalnego zapisu cyfrowego. Wynika stąd, że bez uszczuplenia zawartości informacyjnej obrazu liczbowe kody pikseli można poddać dowolnym przekształceniom

matematycznym zachowującym ich oryginalne zróżnicowanie, tzn. dowolne dwa piksele, z których pierwszy był na oryginale zakodowany liczbą mniejszą niż drugi, mogą w wyniku przekształcenia otrzymać nowe kody, ale takie, że pierwszy dalej będzie mniejszy niż drugi, jeśli zaś kodowane były tymi samymi liczbami, będą po przekształceniu zakodowane równymi liczbami, mimo że innej wartości. Ten typ przekształcenia zbioru liczbowego, jaki stanowi cyfrowy obraz, realizuje grupa funkcji rosnących i funkcje tej grupy należą do wyposażenia typowego systemu przetwarzania obrazów cyfrowych. Najczęściej stosowane są następujące: liniowa, pierwiastka kwadratowego, logarytmiczna, kwadratowa i wykładnicza (przykładowe wykresy przedstawia w wymienionej kolejności rys. 1).



Rys. 1. Wykresy funkcji najczęściej stosowanych do przeskalowania kodów obrazu cyfrowego: (A) liniowa, (B) pierwiastka kwadratowego, (C) logarytmiczna, (D) kwadratowa i (E) wykładnicza

Jeśli w obrazie cyfrowym występuje np. 40 kolejnych kodów od 21 (MIN) do 60 (MAX), to każda z tych funkcji zastosowana do przeskalowania kodów spełni swe zadanie w tym sensie, że zamieni bardzo ciemny oryginał na obraz zróżnicowany tonalnie, wystarczy tylko przed uruchomieniem funkcji podać dwa parametry: minimum = 21 i maksimum = 60, czyli skrajne wartości kodów występujące w obrazie. W wyniku działania funkcji wartości te zostaną zastąpione skrajnymi wartościami pełnego zakresu monitora czy plotera, tzn. 21 kodem 0, a 60 kodem 255, pośrednie zaś zgodnie z funkcją, odpowiednimi wartościami pośrednimi. W zależności od tego, czy wśród kodów obrazowych występuje przewaga mniejszych (bliźszych 21), czy większych (bliźszych 60) można uzyskać lepszy obraz stosując funkcję wypukłą mniej lub bardziej rozjaśniającą (na rys. 1 B lub C). O tym, że obraz ten wymaga rozjaśnienia a nie np. przyciemnienia, decyduje zakres jego kodów. W tym wypadku obraz składa się z małych kodów – mniejszych od średniego, czyli 128. Liczba wystąpień poszczególnych kodów w całym obrazie jest informacją bardzo przydatną przy wizualizacji. Systemy przetwarzania są wyposażone w program realizujący to zadanie w formie wykresu lub zestawienia liczbowego drukowanego lub wyświetlano na monitorze. Nosi on nazwę histogramu. (rys. 2).

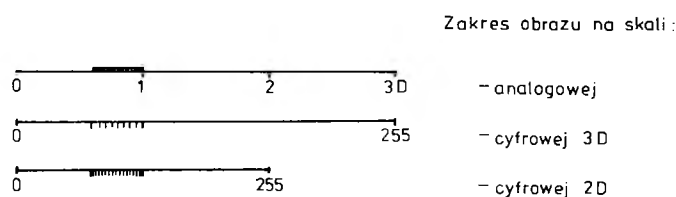


Rys. 2. Przykładowe wykresy histogramów obrazu cyfrowego

Po obejrzeniu histogramu wiadomo od razu czy obraz rozjaśnić, przyciemnić czy przeskalować kody równomiernie, bowiem występuje w obrazie przewaga kodów mniejszych (rys. 2A), większych (rys. 2B) lub średnich (rys. 2C). Wybór jednej z pięciu funkcji jest jednak przypadkowy i zazwyczaj wystarcza zaledwie do orientacyjnego wyświetlania obrazu na monitorze. Pozostawia natomiast wątpliwości, gdy jest stosowany przed wizualizacją w ploterze fotograficznym. Można się bowiem domyślać, że funkcja o krzywiźnie nieco innej, np. pośredniej między funkcją pierwiastka kwadratowego a logarytmiczną, spełniłaby określone wymagania lepiej. Wiadomo jest, że lepszy wynik zapewnia wybór funkcji związanej z histogramem, np. funkcji rozjaśniającej do obrazu o przewadze kodów mniejszych. Na ile ściśły powinien być ten związek i z czego wynika? Odpowiedź na to pytanie wymaga głębszej analizy zawartości informacyjnej obrazu cyfrowego.

Zawartość informacyjna obrazu cyfrowego. Elementarna informacja

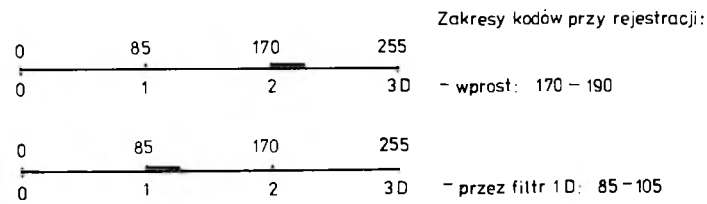
Informacja zawarta w obrazie cyfrowym tkwi we względnym zróżnicowaniu kodów poszczególnych jego pikseli. Im jest ono większe, tym więcej informacji zawiera obraz cyfrowy. Jeżeli pewien obraz zostanie najpierw zapisany przy użyciu 20 a potem 30 liczb, w wyniku zastosowania dwu różnych zakresów gęstości optycznej do jego zapisu cyfrowego: najpierw 3D, a potem 2D, to jest oczywiste, że drugi zapis zawiera więcej informacji (rys. 3).



Rys. 3. Porównanie skali kodów 2D i 3D zastosowanych do rejestracji tego samego obrazu

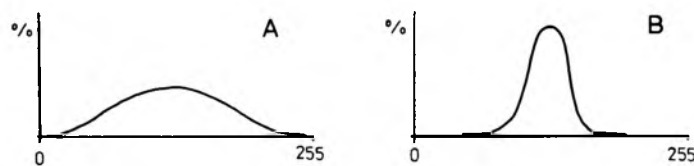
W pierwszym przypadku różnica kodów o 1 odpowiada różnicy gęstości optycznej o $3/255 = 0,012 D$, w drugim o $2/255 = 0,008 D$, czyli w drugim zapisie zostały zarejestrowane mniejsze różnice tonalne skanowanego obrazu.

Na zawartość informacyjną nie mają natomiast wpływu bezwzględne wartości kodów. I tak np. jeśli dokonać cyfrowej rejestracji obrazu w skanerze laboratoryjnym przy skali 3D raz w sposób prosty, a następnie po przesłonięciu obrazu jednolitym szarym filtrem o wartości 1D, obie rejestracje będą miały tą samą zawartość informacyjną, mimo, że w drugim przypadku zostaną zastosowane kody o mniejszych wartościach (rys. 4).



Rys. 4. Porównanie zakresów kodów obrazu rejestrowanego dwoma sposobami: bez filtra i przez filtr 1D

Ale dwa różne obrazy o tej samej liczbie pikseli, zapisane przy użyciu tej samej liczby kodów, mają z reguły różną zawartość informacji. Jeśli porównamy histogramy dwu obrazów tego samego obiektu, z których pierwszy powstał w warunkach dobrego oświetlenia (pełne słońce), a drugi w świetle przyćmionym (zmierzch, zachmurzenie) to pierwszy okaże się bardziej zróżnicowany, drugi mniej (rys. 5 A i B).



Rys. 5. Histogramy obrazów tego samego obiektu wykonane w warunkach różnego oświetlenia: (A) w pełnym i (B) w świetle przyćmionym

Może się w takim przypadku okazać, że pewne małe różnice tonalne, widoczne na pierwszej rejestracji, uległy zatarciu na drugiej, powodując wzrost liczby różnic średnich. Gdyby były to zwykłe fotografie, pierwsza okazałaby się mocno zróżnicowana tonalnie, a druga szara. Histogram uświadamia nam zatem, że poza liczbą kodów zastosowanych przy rejestracji obrazu liczy się również zróżnicowanie liczby wystąpień każdego z nich. Wynika stąd wniosek, że o zawartości informacyjnej obrazu cyfrowego decyduje wewnętrzne zróżnicowanie zbioru liczbowego stanowiącego ten obraz, im zróżnicowanie jest silniejsze, tym obraz zawiera więcej informacji. Elementarną informacją jest więc każda niezerowa różnica kodów, występująca między pikselami dowolnie wybranej pary. Im więcej takich różnic występuje w danym obrazie tym większa jest jego zawartość informacyjna.

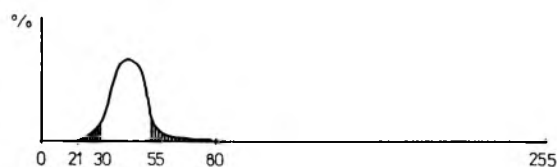
Wizualizacja obrazu cyfrowego przy użyciu tak dobrego urządzenia, jakim jest ploter fotograficzny, powinna być wykonana w sposób najlepszy z możliwych, a zarazem metodyczny a nie przypadkowy. Bez wątplenia nie tylko zakres kodów obrazu musi być „rozciągnięty” na całą skalę plotera, ale ponadto rozciągnięcie takie musi być w jakiś sposób związane z histogramem obrazu, choćby dla rozjaśnienia obrazu o mniejszych kodach przez zastosowanie funkcji o wypukłym wykresie. Należy pamiętać, że celem prawidłowej wizualizacji nie jest „ładny” obraz analogowy, lecz obraz przekazujący informacje ukryte w jego

cyfrowej postaci. Informacje te mogą być świadomie i w sposób kontrolowany pomniejszone lub nawet zniekształcone, ale nieporządane są efekty przypadkowe i trudne do powtórzenia.

Najtrudniejszym zadaniem wizualizacji jest „rekonstrukcja” obrazu tonalnego. Obraz taki, np. satelitarny obraz Ziemi, nawet jeśli został zarejestrowany przy użyciu jedynie 60 kodów z 256-stopniowej skali, jest dla obserwatora i tak zbyt bogaty w informacje. Obraz składający się z 16 tonów sprawia wrażenie ciągłego pod względem tonalnym, a 30-stopniowa skala tonów o stałym skoku gęstości optycznej stanowi dla większości obserwatorów granicę rozróżnialności tonalnej. Niestety przez nieumiejącą wizualizację bardzo łatwo jest zdegradować tak bogaty obraz do poziomu słabej fotografii. Dobrze zwizualizowany obraz może natomiast zadowolić pod względem technicznym nawet wymagającego fotografa.

Prawidłowa fotograficzna rekonstrukcja obrazu cyfrowego wymaga metody zapewniającej przeniesienie największej liczby informacji elementarnych. Pośrednio informuje o tej liczbie histogram. Jeśli przyjrzymy się typowemu histogramowi obrazu cyfrowego (rys. 6), zauważymy, że zakres kodów może obejmować kolejne liczby od 21 do 80, czyli 60, jak na rysunku 6, ale znakomita większość pikseli kodowana jest jedynie 25-ciomą liczbami od 30 do 55.

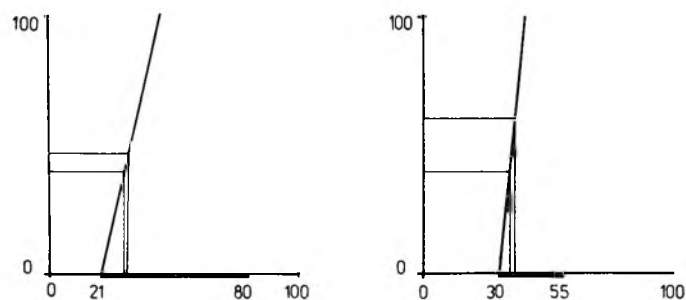
Wynika stąd, że większość różnic występujących w obrazie między parami pikseli, tworzona jest przez te 25 najczęściej występujących wartości, a zatem kody te mają znacznie większą wagę dla zawartości informacyjnej obrazu, niż 35 pozostałych.



Rys. 6. Typowy histogram obrazu cyfrowego

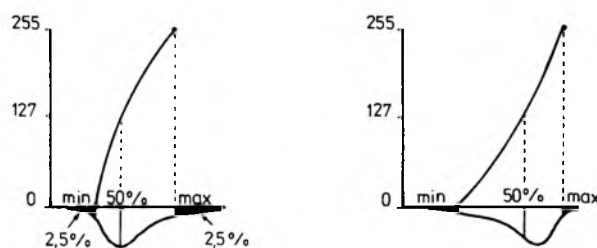
Dbłość o możliwie najlepszy przekaz informacji zmusza do optymalnego wykorzystania niewielkiej w końcu skali tonów (30) przez pominięcie różnic kodów występujących w obrazie bardzo rzadko (kody najmniejsze i największe), a pozostawienie całej skali tonów na przedstawienie pozostałych różnic. W praktyce przyjmuje się, że „pominięcie” pewnego procentu (np. 5%) ogólnej liczby pikseli kodowanych najmniejszymi i największymi wartościami przez zniwelowanie ich różnic i przedstawienie dwoma tonami skrajnymi czarnym i białym, nie powoduje u obserwatora wrażenia nieciągłości obrazu. (Pratt, 1978). Po dokonaniu takiego zabiegu zastosowanie tego samego typu funkcji, np. liniowej do rozciągnięcia zakresu kodów znakomicie zwiększa zróżnicowanie tonów na obrazie (rys. 7).

Zróżnicowanie tonalne zdjęcia (obrazu analogowego) jest miarą jego zawartości informacyjnej, jak zróżnicowanie zbioru liczbowego w odniesieniu do cyfrowego oryginału. Analogowy przekaz elementarnej informacji cyfrowej odbywa się bowiem przez różnicę tonów na zdjęciu.



Rys. 7. Pominięcie niewielkiego procentu pikseli pozwala na zwiększenie zróżnicowania tonów na obrazie

Aby sprecyzować przebieg funkcji pomiędzy nowym minimum i maksimum, wynikłymi z pominięcia skrajnych kodów, brakuje dodatkowego warunku, takiego który by uwzględnił w ścisły sposób strukturę kodów, tzn. powodował np. rozjaśnienie obrazu w przypadku przewagi kodów o mniejszej wartości. Warunkiem takim jest zrównoważenie histogramu: funkcja powinna mieć taki przebieg, który zapewni przedstawienie połowy pikseli obrazu, kodowanych mniejszymi liczbami, przy użyciu ciemnej połowy skali tonów, od czarnego do średniego szarego (kod 127), a pozostałe piksele resztą tonów, aż do białego. Przez określenie trzeciego punktu wykresu funkcji, wybór jednej z kilku dostępnych w systemie jest łatwiejszy, a nawet staje się możliwe wyznaczenie funkcji ustalonego typu, np. kwadratowej ($y = Ax^2 + Bx + C$) dokładnie przechodzącej przez trzy zadane punkty (rys. 8).



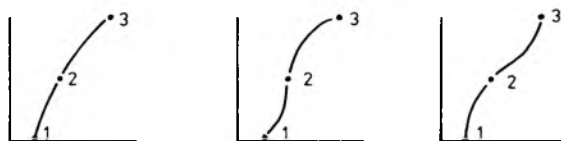
Rys. 8. Przykładowe wykresy funkcji, przechodzące przez trzy ustalone punkty

Wartość kodu obrazu, który w wyniku przekształcenia ma przyjąć wartość 127, czyli jakby środek ciężkości histogramu, jest odczytywany z histogramu sumowego, drukowanego razem z histogramem. Jest to dodatkowe zestawienie liczbowe, składające się z sum częściowych histogramu, liczonych od kodu 0. Wartości (rys. 9) histogramu sumowego są zwykle wyrażane procentowo.

22	114,0	1415,0	2,2	...
23	162,0	1577,0	2,4	..
24	217,0	1794,0	2,7	....
25	302,0	2096,0	3,2	.....
26	448,0	2544,0	3,9	.....
27	594,0	3138,0	4,8	.....
28	811,0	3949,0	6,0	.....
29	1041,0	4990,0	7,6	.....
30	1428,0	6418,0	9,8	.....
31	1779,0	8197,0	12,5	.....
32	2343,0	10540,0	16,1	.....
33	2874,0	13414,0	20,5	.....
34	3490,0	16904,0	25,8	.....
35	4276,0	21280,0	32,3	.....
36	4757,0	25937,0	39,6	.....
37	5222,0	31159,0	47,5	.....

Rys. 9. Typowy wydruk histogramu obrazu cyfrowego (fragment); w kolejnych kolumnach przedstawiono: (1) wartości kodów obrazu, (2) wartości histogramu, (3) wartości histogramu sumowego, (4) wartości histogramu sumowego w %, (5) reprezentację graficzną

Dotychczasowe 3-punktowe określenie przebiegu funkcji, mimo pewnego wyrafinowania pozostaje nadal nieściśle. Po pierwsze, nieściśle jest wyznaczenie minimum i maksimum w oparciu o kryterium doświadczalne (5%). Po drugie, przebieg rosnącej funkcji między trzema punktami nadal jest niesprecyzowany i nie wiadomo, jakiego typu funkcja spełnia zadanie najlepiej (rys. 10).



Rys. 10. Przykładowe przebiegi wykresów funkcji rosnącej między trzema ustalonymi punktami

Kontynuując rozumowanie, które doprowadziło do określenia trzeciego punktu wykresu funkcji (50%), można łatwo wyznaczyć punkty dodatkowe: 25% i 75% i dalsze 12,5%, 37,5%, 62,5%, 87,5%, itd. Otrzymamy w efekcie pełny przebieg funkcji ściśle uzależniony od histogramu. Zgodnie z rozumieniem zawartości informacyjnej obrazu cyfrowego jest to rozwiązanie gwarantujące najlepszą zamianę informacji cyfrowej na analogową. Znane jest pod nazwą „wyrównania histogramu” i realizowane jest przez komputer w ten sposób, że dla każdej kolejnej wartości kodu obrazu wyznaczona jest wartość funkcji w oparciu o odpowiednią wartość histogramu sumowego.

Przykład: Wartość kodu 24
Wartość histogramu 31200
Wartość histogramu sumowego w% 17,3
Wartość funkcji $f(24) = 17,3 \cdot 256 = 44$

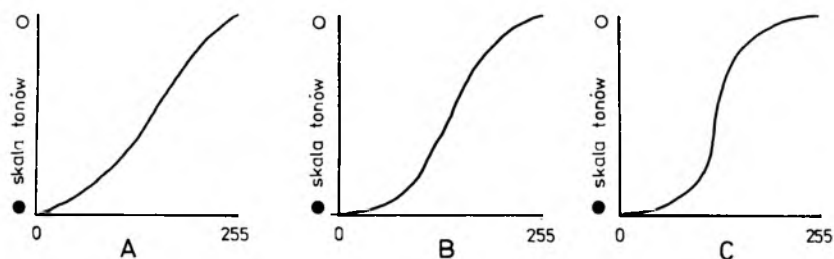
Innymi słowy, wartość histogramu sumowego pozwala wyznaczyć taką część całej 256 stopniowej skali, która procentowo odpowiada części całej liczby pikseli, wizualizowanej przy użyciu tej części skali tonów.

Znalezienie najlepszego pod względem informacyjnym sposobu przeskalowania kodów obrazu cyfrowego pozwala krytycznie ocenić rozwiązania przybliżone. Rozwiązanie pierwsze polegające na wyznaczeniu przebiegu funkcji w oparciu o absolutne minimum i maksimum zbioru kodów jest najmniej ścisłe. Nieuwzględnienie histogramu kodów prowadzi do nieekonomicznego wykorzystania skali tonalnej. Przeważająca większość elementarnych informacji (rzędu 90%) ukrytych w średnich kodach, wizualizowana jest przy użyciu ok. 1/3 części skali tonów. Rozwiązanie oparte na kryterium pominięcia pewnego procentu pikseli kodowanych skrajnymi wartościami jest pierwszym rozwiązaniem o charakterze statystycznym, pierwszym przybliżeniem funkcji wyrównującej histogram. Ścisłe rzecz biorąc to kryterium powinno wynosić 0,8%, gdyż taki to procent ogólnej liczby pikseli może być przedstawiony dwoma tonami – czarnym i białym. Na jeden ton przypada bowiem $1/256 \cdot 100\% = 0,4\%$ liczby pikseli. Następne rozwiązanie, w oparciu o kryterium 50% jest kolejnym przybliżeniem funkcji wyrównującej histogram. Każde z kolejnych przybliżeń rozwiązania ścisłego wprowadza istotny skok jakościowy wizualizowanego obrazu, równoznaczny ze wzrostem przekazu informacji cyfrowej za jego pośrednictwem.

Funkcja przenoszenia systemu wizualizującego

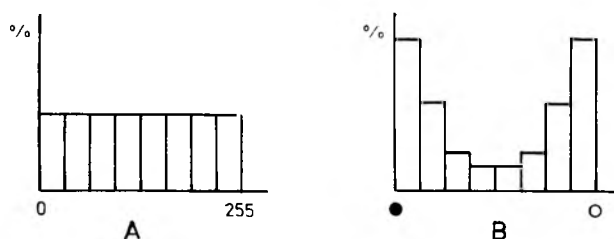
Rozważania powyższe mogą pozostać słuszne jedynie w teorii jeśli nie nastąpi po nich równie ścisłe rozwiązanie problemu funkcji przenoszenia systemu wizualizującego. Funkcja wyrównująca histogram, mimo że spełnia wymagania teorii informacji, nie ma bezpośredniego zastosowania w praktyce, gdyż nie istnieje system wizualizacji o liniowej charakterystyce. W rzeczywistości jest ona nawet niechętnie wykorzystywana do wyświetlania orientacyjnych obrazów na monitorze – obraz jest zbyt kontrastowy, o niewielkiej zawartości informacyjnej. Powodem jest działanie naturalnej funkcji przenoszenia systemu wizualizującego o przebiegu pokazanym na rysunku 11, A, B, C.

Każde z urządzeń wizualizujących reaguje z charakterystyczną dla siebie bezwładnością na stałe przyrosty sygnału cyfrowego. Liczby początku zakresu (0,255) nie wywołują zmiany tonów, dla dalszych zmiany tonów są nieproporcjonalnie małe, następnie proporcjonalne, aż do momentu przy końcu zakresu, gdy znowu nieproporcjonalnie maleją, aż do zaniku. W rezultacie wzrasta liczba pikseli przedstawionych na obrazie skrajnymi tonami – czarnym i białym,



Rys. 11. Przykładowe wykresy funkcji przenoszenia systemów wizualizujących

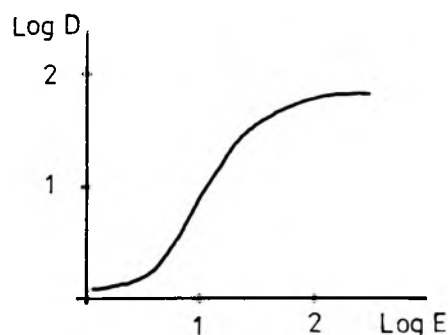
a obraz staje się kontrastowy i nie odpowiada założeniom optymalnego przekazu informacji. Gdyby wykreślić histogram tonów takiego obrazu (dla uproszczenia w 8 podzakresach), to w niczym nie przypominałby, przyjętego za najlepszy, wyrównanego histogramu (rys. 12).



Rys. 12. Wyrównany histogram kodów obrazu cyfrowego (A), i odpowiedni histogram tonów tego obrazu po wizualizacji (B)

Monitor obrazowy ma względnie dobrą charakterystykę (rys. 11A), nie wymagającą korekcji zwłaszcza z uwagi na specjalne zastosowanie monitora. Wyraźne natomiast jest działanie funkcji przenoszenia na obraz wizualizowany przy użyciu plotera fotograficznego. W ploterze naświetlany jest materiał fotograficzny, który po wywołaniu albo jest ostatecznym rezultatem albo jest poddawany jeszcze drugiemu procesowi fotochemicznemu: reprodukcji. Funkcja przenoszenia procesu fotochemicznego jest znana w fotografii pod nazwą krzywej charakterystycznej. Ma ona ustalony przebieg dla danego materiału fotograficznego i warunków wywołania. Wykreślana jest na podstawie badania densytometrycznego w układzie współrzędnych: logarytmicznej skali naświetleń ($\log E$) i logarytmicznej skali zaciemnień ($\log D$), jak na rysunku 13.

Gdy przy użyciu plotera wykonywany jest diapozytyw, to w procesie wizualizacji jest realizowany jeden proces fotochemiczny. Funkcja przenoszenia systemu ma przebieg zbliżony do krzywej charakterystycznej zastosowanego materiału fotograficznego (rys. 11B). Gdy natomiast wykonywana jest odbitka stykowa, powiększenie fotograficzne lub reprodukcja poligraficzna, system wizualizacji jest już oparty na dwóch procesach fotochemicznych, których niekorzystne efekty sumują się i dają w wyniku mocno zakrzywiony przebieg

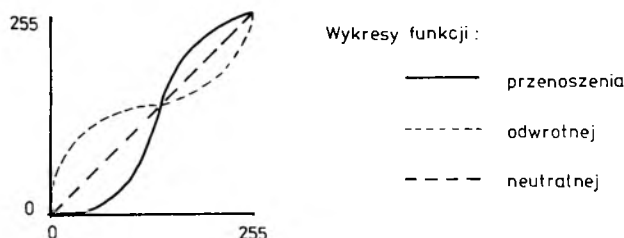


Rys. 13. Krzywa charakterystyczna procesu fotochemicznego

funkcji (rys. 11C). Na przebieg funkcji przenoszenia danego procesu wizualizacji ma więc wpływ każdy z procesów fotochemicznych i związane z nimi rodzaje materiałów i warunków wywołania, a także wielkość powiększenia zastosowanego przy reprodukcji. Z tych względów każdy kilkietapowy proces, różniący się w zależności od ostatecznego rezultatu, tworzy wraz z ploterem fotograficznym pewien odrębny system o charakterystycznej dlań funkcji przenoszenia.

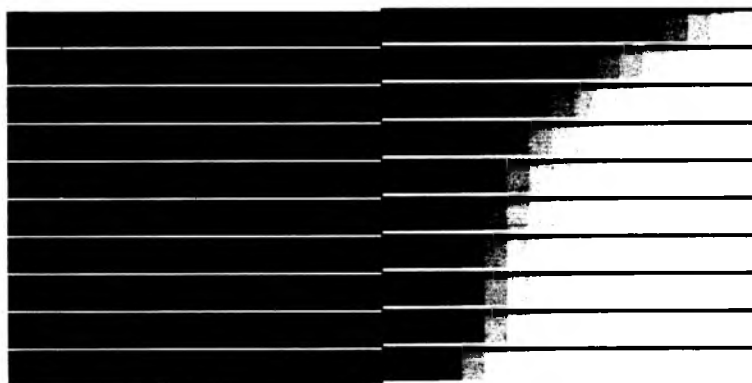
Oczywiste, że najwygodniejszy byłby system wizualizacji o liniowej funkcji przenoszenia, który nie naruszałby struktury obrazu, nadanej mu przez wyrównanie histogramu. Niestety taki idealny system nie jest nawet możliwy, a producenci sprzętu i materiałów fotograficznych oraz poligraficznych mogą jedynie dążyć do maksymalnego przybliżenia liniowej charakterystyki swych systemów. Z pomocą przychodzi 256-stopniowa skala kwantowania i kodowania obrazu zastosowana w urządzeniach cyfrowych. Po raz pierwszy w historii fotografii i poligrafii wyznaczenie funkcji przenoszenia tych fotochemicznych procesów może być w pełni i ściśle wykorzystane do poprawy jakości obrazu tonalnego; 256-stopniowa skala tonów przewyższa swą szczegółowością niemal 10-krotnie skalę rozróżnianą przez ludzkie oko. Ten zapas, poza innymi zaletami ma i tę, że umożliwia „przygotowanie” obrazu cyfrowego na spodziewane zniekształcenia danego procesu wizualizacji. Przygotowanie polega na dodatkowym matematycznym przekształceniu kodów – według funkcji odwrotnej do funkcji przenoszenia procesu. W trakcie wizualizacji funkcja przenoszenia neutralizuje efekt funkcji odwrotnej, a obraz cyfrowy zostaje zamieniony na obraz tonalny bez zniekształceń, jak w idealnym systemie o liniowej charakterystyce. Rozwiązanie to, choć realne, może być uciążliwe w gorzej wyposażonym laboratorium. Wymaga ono bowiem ustalenia warunków wywołania, najlepiej przez automatyzację, i stosowania materiałów dobrej jakości, zapewniających powtarzalność wyników. Można wtedy dla każdego z wykonywanych procesów, np. diapozytyw, odbitka stykowa, powiększenie, reprodukcja poligraficzna, o ustalonym typie stosowanych materiałów i procesów wywołania wykonać test, polegający na kompletnej wizualizacji (aż do ostatecznego rezultatu) sztucznie wygenerowanego obrazu, będącego 256-stopniową skalą kodów. Densytometryczne zbadanie relacji między skalą kodów a skalą zaczerńień wystarcza do

wykreślenia przebiegu funkcji przenoszenia procesu. Po dygitalizacji i wyznaczeniu funkcji odwrotnej można już odpowiednio „przygotowywać” obrazy cyfrowe przeznaczone do wizualizacji w tym procesie (rys. 14) [Pratt, 1978].



Rys. 14. Neutralizacja funkcji przenoszenia przez funkcję odwrotną

Bardziej praktyczne, bo mniej uciążliwe i szybsze, jest rozwiązanie, które nie wymaga wyznaczania przebiegu funkcji przenoszenia. Funkcja odwrotna wybierana jest „na oko” z grupy funkcji na podstawie specjalnie opracowanego obrazu testowego (rys. 15). Obraz ten jest sztucznie generowanym w komputerze zestawem dziesięciu 33-stopniowych skali kodów, o stałym przyroście (o osiem) wartości liczbowych od 0 do 255: 0, 8, 16, 24, ... 255. Każda skala jest „przygotowana” na funkcję przenoszenia badanego procesu przy użyciu funkcji korygującej o nieco innym parametrze. W efekcie, na zwizualizowanym obrazie testowym między skalą o nadmiernym kontraście (rozróżnialność tonów w środkowej części skali) a skalą o kontraście zbyt małym (rozróżnialność tonów na końcach skali), można na oko wybrać tę, która pozwala najłatwiej rozróżnić wszystkie 33 stopnie. Jest to sposób uwzględniający dodatkowo funkcję przenoszenia oka obserwatora, stanowi więc rozwiązanie najbardziej kompleksowe i mimo, że nie opiera się na ścisłym wyznaczeniu funkcji przenoszenia procesu, umożliwia jej neutralizację z dobrym przybliżeniem. Jako funkcję odwrotną, neutralizującą działanie funkcji przenoszenia, zastosowano w OPOLiS całość z funkcji rozkładu normalnego Gaussa.



Rys. 15. Obraz testowy do wyznaczenia funkcji odwrotnej „na oko”

Zastosowania

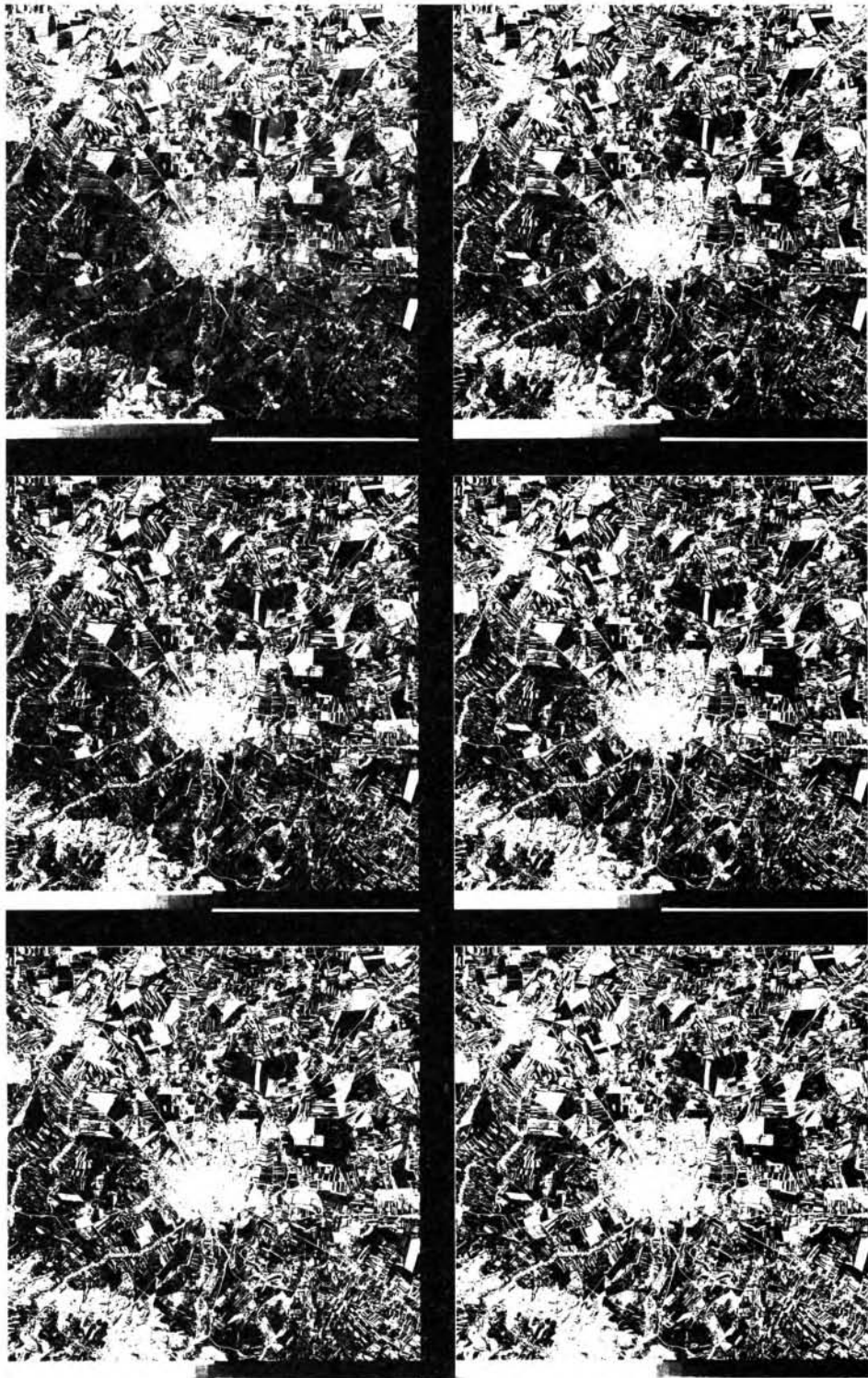
Sposób wizualizacji złożony z wyrównania histogramu i wprowadzenia funkcji odwrotnej do funkcji przenoszenia zapewnia najlepszy przekaz informacji cyfrowej za pośrednictwem obrazu analogowego. Stosowany jest do obrazów oryginalnych i wyników przetworzeń, np. dzielenia wartości odpowiadających sobie kodów z dwóch kanałów spektralnych (*ratio*), lub transformacji wartości kodów metodą głównych składowych. Statystyczna metoda wyrównania histogramu jest stosowana do wszystkich obrazów cyfrowych, których analogowe źródło jest albo nieznanne (obraz powierzchni Ziemi) albo nieistniejące (obraz *ratio*) a generalnie – nie wzbudza takiego zainteresowania, jak informacje zawarte w obrazie.

Inaczej rzecz wygląda, jeśli przy użyciu laboratoryjnego skanera ma być wykonana kopia, wierna oryginałowi. W tym przypadku dla ścisłego zachowania tonacji oryginału obraz cyfrowy wymaga liniowego przeskalowania kodów, bez wyrównywania histogramu. Drugi etap – wprowadzenie funkcji odwrotnej procesu – pozostaje bez zmian.

Opracowanie najlepszej metody wizualizacji obrazu cyfrowego ma zasadnicze znaczenie dla kartografii opartej na przetwarzaniu wielospektralnych obrazów cyfrowych, rejestrowanych z satelity lub samolotu, w której przekaz informacji odbywa się za pośrednictwem obrazu wielobarwnego lub czarno-białego, o wysokiej jakości reprodukcji tonów. Obrazy satelitarne przetransformowane geometrycznie do odpowiedniego odwzorowania i uzupełnione niezbędną treścią kartograficzną (siatka geograficzna, znaki umowne na oznaczenie granic, nazwy miast, rzek, etc.) są rozpowszechniane jako aktualne i tanie fotomapy. Wzrasta popularność metody pracy opartej na klasycznej interpretacji komputerowo przetworzonego materiału cyfrowego, przedstawionego w formie barwnego zdjęcia. Na barwnym zdjęciu, tzw. kolorowej kompozycji, wykonanym zgodnie z opisaną metodą, następuje naturalna kombinacja informacji z trzech kanałów np. spektralnych, prowadząca do rozróżnienia obiektów i ich klasyfikacji za pośrednictwem barw.

Opisana metoda rozwiązuje problem wizualizacji w sposób ścisły i wygodny w użyciu, niemniej wymaga wyposażenia w sprzęt i materiały na poziomie jakościowym odpowiadającym jakości cyfrowych obrazów satelitarnych i komputerowego systemu ich przetwarzania. W praktyce zapewnia najwyższą jakość barwnych obrazów fotograficznych i reprodukcji poligraficznych.

Częściową ilustracją metody stanowią zdjęcia zamieszczone na końcu artykułu (rys. 16). Są one wizualizacją tego samego cyfrowego oryginału przetworzonego najpierw według funkcji wyrównującej histogram, a potem według funkcji korygującej o parametrze wzrastającym od $\sigma = 10$ do $\sigma = 60$. Obraz zarejestrowany został przez system Thematic Mapper satelity Landsat 5 dnia 18 lipca 1984, w paśmie 0,76–0,90 μm (4 kanał spektralny). Widoczny na zdjęciu fragment przedstawia okolice Świdnicy, województwo wałbrzyskie, w skali 1:300 000.



Rys. 16

L I T E R A T U R A

1. Drachal J.: *Przetwornik graficzno-cyfrowy OPTRONICS*: „Przegląd Geodezyjny” nr 9–10, 1980.
2. Hord R. M.: *Digital Image Processing of Remotely Sensed Data*. Academic Press, New York, 1982.
3. Pratt W. K.: *Digital Image Processing*. Wiley, New York, 1978.
4. Schowengerdt R. A.: *Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing*, Academic Press, New York, 1983.
5. Zawiła-Niedźwiecki T.: *Pierwsze zastosowanie zdjęć z satelity SPOT*. „Przegląd Geodezyjny” nr 11, 1986.

Recenzował: doc. dr hab. inż. *Wojciech Bychawski*

Przyjęto do opublikowania w dniu 9 czerwca 1987 r.

JACEK DRACHAL

OPTIMUM METHOD OF VISUALIZATION OF A DIGITAL IMAGE

S u m m a r y

Modern cartography utilizes satellite images, originally registered in a digital form, for elaboration and updating of topographic maps. One of the stages, often being a method of elaboration of such images is classical interpretation of a paper print, obtained as a result of visualization of a digital image. A laboratory scanner system is used for the photographic visualization; in such a system digital codes of the original image are converted into appropriate values of light intensities, what results in exposure of the light sensitive material. Photographic processing of the image is performed in conventional way, at a photographic laboratory.

For coding the digital image a scale of numbers (0,255) is applied, it corresponds to the relative latitude of registered radiation from 1 to 100; such a scale is determined for the entire, meridional belt of the terrain, scanned by a satellite, thus on a single image – a frame, which diversification is lower, only part of the interval (0,255) appears.

Proper visualization should fulfil the requirement of the optimum transfer of information comprised in the digital, original data. It requires the full utilization of the means of transfer of the visualizing system, it means, the photographic scale of tones in this case. In order to meet this requirement, original codes of the digital image, characterized by the real range smaller than the full range, are converted in such a way which allows to cover the full range between 0 and 255, it means the corresponding tonal interval between black and white. For rescaling the values of codes increasing functions are applied, which do not disturb the image content, since they do not change order of increasing codes. The selection of a function, ensuring the best transfer of the information comprised in the digital image, follows the analysis of the nature of the information with consideration of its relations with two characteristic values of the digital image: the number of codes applied for its registration and probability of occurrence of particular codes. It was stated as a result of the analysis that particular codes participate in the information content of the image in various levels; this participation is proportional to the probability of occurrence of a code in the image. The most appropriate function, with consideration of the transfer of digital information, it means. such a function, which assigns a part of the tonal scale to each part of the original scale of codes, proportionally to its information input, is called the histogramme equalizing function.

In its nature this function assigns only new numerical values to original codes, what in practice does not correspond to appropriate diversification of optical density. Thus full utilization of the scale of tones requires, besides the best rescaling of original codes onto the nominal scale of tones, introduction of the next operation, which would allow to obtain the real scale of tones possibly close to the nominal scale of 256 steps with the constant interval of density. In order to obtain such a scale it is necessary to fully control the photographic process, aiming at elimination of incidental factors and direction of the processes according to the needs. Incidental factors may be eliminated by means of automation of process and their systematic implementation. In the case of the photographic plotter it is easy to control the photographic process. The exposing device, controlled by numbers from the range (0,255) creates 256 levels of light intensity, which, after developing, correspond to the full range of density from black to white; it is possible to select such numbers which result in required, linear increase of optical density. Selection of proper numbers is in practice the next functional transformation of codes of the digital image, at this time, according to the function neutralizing the disadvantageous influence of the transfer function of the visualizing system. The simple test method was proposed in order to determine the approximate neutralizing function; this method relies upon utilization of the integral of the normal distribution Gauss function in 10 variants, characterized by different parameters of flattening.

Translation: *Jacek Domański*

ЯЦЕК ДРАХАЛЬ

ОПТИМАЛЬНЫЙ МЕТОД ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Резюме

Современная картография использует для разработки тематических карт и актуализации топографических карт спутниковые снимки, оригинально зарегистрированные в цифровом виде. Одним из этапов, а часто методом обработки таких снимков, является классическая интерпретация фотографического отпечатка, полученного в результате визуализации цифрового изображения. Для фотографической визуализации используется лабораторная сканерная система, в которой цифровые коды оригинала, замененные на соответствующую интенсивность света, вызывают засвечивание светочувствительного материала. Проявление изображения производится традиционным способом в фотографической лаборатории. Для кодирования цифрового изображения применяется шкала цифр (0,255), соответствующая относительному диапазону интенсивности зарегистрированного излучения от 1 до 100, причем эта шкала установлена для всего меридиального пояса сканированного спутником, поэтому на одиночном снимке-сцене, как значительно менее дифференцированном, выступает только часть цифр интервала (0,255).

Правильная визуализация должна выполнять условие оптимальной передачи информации, содержащейся в цифровом оригинале. Это требует полного использования средств передачи системы визуализации, т.е. в данном случае шкалы тонов фотографии. С этой целью оригинальные коды цифрового изображения с фактическим диапазоном меньшим от полного диапазона, заменяются так, чтобы охватывали полный диапазон цифр от 0 до 255, а тем самым соответствующий ему номинально диапазон тонов от черного до белого. Для масштабирования величин кодов применяются возрастающие функции, которые сохраняют порядок возрастания кодов и тем самым не искажают содержания изображения. Выбору наиболее правильной функции с учетом передачи информации, содержащейся в цифровом

изображении, предшествует анализ характера этой информации с точки зрения нахождения связей её с двумя характеристическими величинами для цифрового изображения: числом кодов применяемых для его регистрации и вероятностью выступления каждого из них. В результате анализа установлено, что отдельные коды цифрового изображения имеют разный вклад в его информационное содержание, а также, что этот вклад пропорционален вероятности выступления кода в изображении. Наиболее подходящая функция учитывающая передачу цифровой информации, т.е. такая, которая подчиняет каждой части оригинальной шкалы кодов часть шкалы тонов, пропорциональную их вкладу информации, называется функцией уравнивающей гистограмму.

В сущности эта функция подчиняет оригинальным кодам единственно новые цифровые значения, которым на практике не соответствует совсем надлежащее дифференцирование величин плотности почернения на фотографии. Полное использование шкалы тонов требует таким образом, кроме наилучшего с точки зрения информационного масштабирования оригинальных кодов на целую номинальную шкалу тонов, введения очередной операции, которая фактическую шкалу тонов максимально приблизила бы к номинальной 256 – градусной шкале с градусами отличающимися постоянной величиной плотности почернения. Необходим с этой целью контроль фотографического процесса, заключающийся в устранении случайных факторов и управлении процессом соответственно с требованиями. Случайные факторы можно исключить путем автоматизации процессов и методической реализации каждого из них. Управление фотографическим процессом в случае фотографического плоттера является чрезвычайно упрощенным. Устройство для экспонирования, управляемое цифрами диапазона (0, 255), вырабатывает 256 уровней интенсивности света, которым соответствует после проявления полный диапазон плотности почернения от черного до белого, таким образом возможен выбор таких цифр, которые вызывают желательный линейный прирост плотности почернения на фотографии. Выбор соответствующей цифры является очередным функциональным преобразованием кодов цифрового изображения, в данном случае согласно функции нейтрализующей неблагоприятное влияние функции переноса системы визуализации. На приблизительное определение нейтрализующей функции предложен простой тестовый метод, заключающийся в применении интеграла из функции нормального распределения Гаусса в 10-ти вариантах, отличающихся параметром сплюснутости.

Перевод: *Róża Tolstikowa*