

**ZASTOSOWANIE METODY CYFROWEGO PRZETWARZANIA
OBRAZÓW DO WYZNACZANIA GĘSTOŚCI GRAFICZNEJ
OPRACOWAŃ KARTOGRAFICZNYCH
NA PRZYKŁADZIE PLANÓW MIAST**

**APPLICATION OF DIGITAL IMAGE PROCESSING METHOD
FOR MEASURING MAPS GRAPHICAL DENSITY
ON THE EXAMPLE OF CITY MAPS**

Agata Ciolkosz-Styk

Instytut Geodezji i Kartografii

SŁOWA KLUCZOWE: złożoność, gęstość graficzna, cyfrowe przetwarzanie obrazów, transformacja falkowa, plany miast

STRESZCZENIE: Dostępność dużej ilości danych skłania do przekazania za pomocą mapy możliwie bogatej informacji, co często skutkuje przeładowaniem opracowań kartograficznych. Tę sytuację dobrze ilustruje przykład planów miast, które należą do najbardziej złożonych prezentacji kartograficznych. Przedstawiają one bowiem obszary o największej koncentracji różnego rodzaju obiektów i form działalności człowieka. Wobec faktu, że plany miast należą do najczęściej wykorzystywanych opracowań kartograficznych problem efektywności przekazu informacji za ich pośrednictwem nabiera szczególnego znaczenia.

Chociaż złożoność od wielu lat jest przedmiotem zainteresowania kartografów, jednak żadna z dotychczas stosowanych w kartografii miar złożoności nie pozwala na jej automatyczne określenie w przypadku tak graficznie skomplikowanych opracowań jak plany miast. Konieczne było więc zaproponowanie nowej metody, pozwalającej na wyznaczenie złożoności graficznej tych opracowań. W tym celu zastosowane zostały techniki cyfrowego przetwarzania obrazów. Zaproponowana metoda zapewnia porównywalność map obciążonych różnymi elementami (sygnaturami punktowymi, liniowymi, napisami etc.). Na podstawie analizy wybranych materiałów kartograficznych można stwierdzić, iż metoda ta pozwala na ilościową ocenę obciążenia graficznego planów miast przy pomocy sformalizowanego wskaźnika.

1. WSTĘP

W II połowie XX w. w krajach, w których rozwój nowoczesnych technologii teleinformatycznych był najszybszy, ukształtował się nowy typ społeczeństwa, tzw. społeczeństwo informacyjne (Hetmański, 2003). W społeczeństwie tym informacja, w tym informacja o charakterze przestrzennym, odgrywa niezwykle istotną rolę (MacEachren, 1991). Przyczyniły się do tego nowoczesne techniki, które zasadniczo usprawniły pozyskiwanie, gromadzenie i przetwarzanie danych. O ile przez wieki głównym problemem przy opracowaniu map było uzyskanie wystarczających danych źródłowych,

tak obecnie trudnością jest odpowiedni wybór pożądaney informacji z zalewu dostępnych danych (Taylor, 1991). Dostępność dużej ilości danych skłania do przekazania za pomocą mapy możliwie bogatej informacji. Skutkuje to często przeładowaniem opracowań kartograficznych, przez co stają się one mało komunikatywne i trudne w odbiorze. Tę sytuację dobrze ilustruje przykład planów miast, które należą do najczęściej wykorzystywanych, a przez to również najczęściej wydawanych publikacji kartograficznych. Z tych wysokonakładowych opracowań korzysta wiele grup użytkowników o zróżnicowanych potrzebach i przygotowaniu do czytania map, dlatego też problem efektywności przekazu informacji za ich pośrednictwem jest szczególnie istotny.

Plany miast należą do najbardziej złożonych prezentacji kartograficznych, ponieważ obszary, które prezentują są miejscami największej koncentracji różnego rodzaju obiektów i form działalności człowieka, wynikających z rozwoju cywilizacji. Oddanie tej specyfiki na planie miasta stawia problem wyboru najbardziej istotnych z punktu widzenia potrzeb użytkownika elementów treści. Przedstawienie wszystkich obiektów i ich charakterystyk jest niemożliwe, jeżeli ma być zachowana czytelność planu. Wykorzystanie nowoczesnych technologii pozwoliło na znalezienie metody, pozwalającej na określenie złożoności planów miast za pomocą sformalizowanego wskaźnika.

2. ZŁOŻONOŚĆ JAKO WŁAŚCIWOŚĆ MAPY

Złożoność jest od wielu lat przedmiotem zainteresowania kartografów, ponieważ wywiera ona wpływ na czytelność i efektywność opracowań kartograficznych. Zależy ona przede wszystkim od liczby znaków na mapie, ich zróżnicowania oraz od odległości między poszczególnymi znakami, czyli od ich zagęszczenia. Złożoność mapy jest efektem współdziałania dwóch zakresów interakcji między jej elementami, odnoszących się do dwóch podstawowych aspektów mapy – syntaktycznego i semantycznego. Odpowiadają one zarazem dwóm aspektom złożoności – graficznemu (ang. *visual complexity*) i treściowemu, zwanemu inaczej pojęciowym (ang. *intellectual complexity*). Złożoność pojęciowa (treściowa) jest uwarunkowana przede wszystkim ilością przedstawianej informacji, charakterem jej ujęcia i stopniem przetworzenia oraz metodą klasyfikacji i liczbą klas. Nawet jeśli grafika mapy jest odpowiednio dobrana, a przedstawiane na mapie obiekty są wystarczająco czytelne, użytkownik mapy może mieć trudności ze zrozumieniem jej treści, jeśli ilość prezentowanej informacji jest zbyt duża (Huang, 2002).

Złożoność wizualna (graficzna) jest efektem przestrzennego zróżnicowania graficznej struktury mapy. Czynniki określającymi to zróżnicowanie są: stopień kompleksowości, poziom generalizacji i stopień uporządkowania zmiennych graficznych. Złożoność graficzna może być traktowana jako przeciwieństwo czytelności. Wingert (1974) zastosował do badania wpływu złożoności na interpretację mapy analizę gęstości struktury graficznej i wykazał empirycznie, że wysoka gęstość obrazu (przeładowanie szczegółami) znacznie obniża dokładność ocen informacji o strukturze przestrzennej. Bertin (1967) określił czytelność jako zdolność do wyróżnienia zmiennych z tła i uważał, że wpływają na nią gęstość graficzna, rozróżnialność i rozdzielczość, związane z liczbą znaków, ich wielkością i ich proporcjami, przy czym gęstość graficzną mapy uznał za najbardziej istotny czynnik.

3. METODY BADANIA WIZUALNEJ ZŁOŻONOŚCI MAP

Zagadnienie złożoności map nurtowało badaczy już od dawna, ponieważ to właśnie złożoność w zasadniczym stopniu wpływa na informację uzyskiwaną z mapy przez odbiorcę. Rozwój badań dotyczących wpływu złożoności map na ich odbiór rozpoczął się jednak dopiero na przełomie lat 60. i 70. XX w., kiedy to dzięki metodom badawczym zaczerpniętym z psychologii możliwe stało się określanie tego wpływu (Montello, 2002). Złożoność jako cechę obiektywną można badać wyłącznie na poziomie wizualnym, gdyż jedynie na tym poziomie możliwe jest oddzielenie warstwy obiektywnej od subiektywnej, a w konsekwencji jej porównanie (Żyszkowska, 1993). Pierwsze próby wyznaczenia złożoności map polegały jedynie na poszukiwaniu ogólnego wskaźnika (ang. *vector measures*), pozwalającego na określenie, która z dwóch porównywanych map charakteryzuje się większym obciążeniem graficznym (Fairbrain, 2006). Należy podkreślić, że w początkowej fazie badań nad złożonością graficzną map większość prac dotyczyła map statystycznych, w przypadku których możliwe było zastosowanie metryki pozwalającej, w sposób nieskomplikowany, ocenić ilościowo ich złożoność. Według MacEachrena (1982) liczba obiektów powierzchniowych, krawędzi i węzłów występujących na mapie w dużym stopniu oddaje jej złożoność wizualną. Znaczenie możliwych do zmierzenia (zliczenia) węzłów, krawędzi czy połączeń między elementami było głębiej studiowane przez Egenhofera (Egenhofer i in., 1994). Linie i tworzone przez nie węzły były również ważne dla Ebiego (Ebi i in., 1992) oraz Ilga (1990) w badaniach nad złożonością obrazów i możliwością ich rekonstrukcji w procesie automatycznej digitalizacji. Badaniem wizualnej złożoności map zajmowała się także Mersey (1990). Zaproponowana przez nią metoda szacowania złożoności graficznej, podobnie jak u MacEachrena (1982), wykorzystywała teorię grafów i opierała się na ważonej liczbie krawędzi występujących na mapie. Z zastosowaniem teorii grafów można spotkać się również w pracach Dietzela (1983). Warto zwrócić uwagę na badania eksperymentalne prowadzone przez Murraya i Liu (1994). W swoich pracach wykorzystali oni systemy informacji geograficznej. Badania ich wykazały, iż czas i poprawność odpowiedzi użytkowników tych systemów, w których dane wyświetlane są w postaci grafów na monitorach (i wizualnie przypominają mapy) nie są związane ze złożonością całych grafów, ale raczej z przestrzennym zróżnicowaniem ich złożoności. Powyższe prace pozwoliły na zupełnie nowe spojrzenie na złożoność graficzną map. Okazało się, iż złożoność graficzną mapy należy określać biorąc pod uwagę jej zmienność przestrzenną, a nie jedynie proste miary, takie jak liczba linii czy obiektów powierzchniowych określonego typu. Podobne wskaźniki, uwzględniające przestrzenny rozkład gęstości graficznej, zostały opracowane przy zastosowaniu wymiaru fraktalnego (Burrough, McDonnell, 1998) oraz metody autokorelacji przestrzennej (Bonham-Carter, 1994).

Kolejnym, bardzo obiecującym, ilościowym wskaźnikiem pozwalającym na określenie obciążenia graficznego analizowanej mapy jest entropia (Gattrell, 1977; Knopfli, 1983; He i in., 1997). Taka miara posiada bezpośrednie połączenie z zawartością informacyjną mapy i jest związana z próbami ilościowego określenia przekazu informacji poprzez system komunikacji. Jednak poważnym mankamentem tej metody, na który wskazują Li i Huang (2002), jest brak uwzględniania przestrzennego rozkładu obiektów. Zważywszy jednak, iż rozmieszczenie przestrzenne informacji ma zasadnicze znaczenie, Li i Huang postulowali, aby miary złożoności uwzględniały również ten aspekt. Optowali oni

więc za wskaźnikami takimi jak wieloboki Thiessena (zwane także jako poligony Voronoi). Neumann (1994) wykorzystał miarę entropii opartą na wielobokach Thiessena i uwzględniającą stopień zróżnicowania węzłów grafu wskazującego na wszystkie możliwe wewnętrzne połączenia na mapie (pomiędzy punktami, liniami oraz znakami powierzchniowymi), otrzymując topologiczną charakterystykę zawartości informacyjnej mapy, będącą odpowiednikiem miary jej złożoności. Najbardziej aktywnym badaczem zastosowań miary entropii w praktyce kartograficznej jest Bjørke (1996, 1997, 2003). Wykorzystując koncepcję informacji użytecznej pokazał on, jak zmiany stosowanych na mapach symboli, ich dokładność oraz oszacowanie nieuporządkowania może wpłynąć na wydajność procesu redagowania i odbioru mapy. Bardzo ciekawym pomysłem określania złożoności graficznej mapy jest, zaczerpnięta z informatyki, kompresja danych (Coveney, Highfield, 1995).

Różnorodność opisanych powyżej miar złożoności mapy spowodowana jest ich różnym przeznaczeniem oraz różnym pojmowaniem pojęcia złożoności. Dlatego też w wielu przypadkach miary te korzystają z różnych, zupełnie odmiennych, charakterystyk analizowanej mapy. Jednak żadna z tych miar złożoności nie pozwala na automatyczne określanie złożoności tak graficznie skomplikowanych opracowań jak plany miast. Konieczne było więc zaproponowanie nowej metody, pozwalającej na wyznaczenie złożoności graficznej tych opracowań. W tym celu zastosowane zostały techniki cyfrowego przetwarzania obrazów.

4. ZASTOSOWANIE TECHNIK CYFROWEGO PRZETWARZANIA OBRAZÓW DO OKREŚLANIA ZŁOŻONOŚCI MAPY

4.1. Mapa jako dwuwymiarowy rozkład zmiennej intensywności

Mapa, w tym również plan miasta, jest dwuwymiarowym rozkładem zmiennej intensywności, dlatego do oszacowania jej gęstości graficznej można wykorzystać techniki cyfrowego przetwarzania obrazów. Obraz cyfrowy może być zdefiniowany jako dwuwymiarowa funkcja $f(x, y)$, gdzie x oraz y oznaczają współrzędne na płaszczyźnie. Wartość funkcji w danym punkcie (x, y) nazywa się intensywnością lub poziomem szarości i oznacza jednostką bezwymiarową DN (Gonzales, Woods, 2002). W przypadku, kiedy wszystkie współrzędne x i y oraz wartość funkcji f zakodowane są liczbami skończonymi oraz dyskretnymi, obraz nazywamy obrazem cyfrowym. Obraz ten składa się ze skończonej liczby elementów, z których każdy ma własne położenie oraz wartość. Elementy te stanowią podstawowe komórki każdego obrazu cyfrowego i nazywane są pikselami.

Przetwarzanie obrazów cyfrowych polega na wykonaniu wielu różnych operacji matematycznych, które realizowane są na obrazie w odpowiedniej kolejności (Pratt, 2001). Techniki cyfrowego przetwarzania obrazów są często wykorzystywane w wielu dziedzinach nauki i techniki, w których obraz jest nośnikiem zakodowanej informacji użytecznej. Można wyróżnić dwa główne zastosowania, dla których wykorzystuje się i rozwija tego typu narzędzia. Pierwszym z nich jest modyfikacja lub poprawa wyglądu obrazów w celu ich łatwiejszego przyswojenia przez odbiorcę. Drugim głównym zastosowaniem tego typu technik są cele pomiarowe. Techniki te dostarczają bowiem specjalnych narzędzi do przygotowania obrazów w sposób umożliwiający lub ułatwiający

wyznaczenie poszukiwanych wartości, cech lub parametrów zakodowanych w obrazie (Gonzales, Woods, 2002). Pomiary oparte na przetwarzaniu informacji zawartych w obrazach często są podstawowym źródłem danych eksperymentalnych, toteż dąży się do jak najlepszego zdefiniowania cech lub struktury obiektów analizowanych i dalszego oddzielenia ich od informacji zbytecznej, która często zakłóca nam informację użyteczną. Zazwyczaj osiąga się to poprzez wyznaczenie krawędzi, unikalnego rozkładu jasności, barwy czy tekstury obiektu (Russ, 2007). W bardziej skomplikowanych przypadkach można stosować kombinację powyższych cech, o ile jest ona w stanie jednoznacznie zidentyfikować poszukiwane obiekty. Typy miar, które są wykorzystywane w analizie całego obrazu lub też jego fragmentów (indywidualnych cech), determinują liczbę, rodzaj oraz odpowiednią kolejność operacji przetwarzania dokonywanych na obrazie.

W celu analizy gęstości graficznej planów miast technikami cyfrowej analizy obrazu, konieczne było posiadanie ich w postaci cyfrowej. Dlatego też fragmenty planów miast, przedstawiające centra wielkich miast, zostały w wyniku digitalizacji zapisane w postaci map bitowych z wykorzystaniem przestrzeni barw RGB, a następnie konwertowane do 8 bitowych map szaroodcieniowych. Konwersja ta podyktowana była wymogami później stosowanych procedur przetwarzania obrazu. Przejście ze skali barwnej do skali szarości dla systemów cyfrowego przetwarzania obrazów dokonywane jest poprzez uwzględnienie wszystkich składowych barwnych, toteż informacja użyteczna zawarta w obrazach nie jest tracona.

4.2. Obciążenie graficzne

Automatyczne komputerowe określenie gęstości graficznej (liczba obiektów graficznych) jest praktycznie niemożliwe do osiągnięcia, dlatego w niniejszym opracowaniu posłużono się pojęciem obciążenia graficznego jako wskaźnika złożoności graficznej planów miast. Obciążenie graficzne jest to liczba elementów graficznych przypadających na jednostkę mapy. Miara ta, odnosząca się do liczby elementów graficznych, nie tylko oddaje złożoność na poziomie syntetycznym, wskazując miejsca zagęszczenia obiektów, ale uwzględnia pośrednio również złożoność na elementarnym poziomie. Odzwierciedla bowiem skomplikowanie poszczególnych obiektów, przez co wierniej oddaje złożoność planów miast. Na postrzeganie przez ludzki umysł oprócz liczby elementów wpływa także ich złożoność (Forsythe, 2009).

4.3. Krawędziowa reprezentacja obiektów

Ze względu na niemożliwość automatycznego wyznaczania obiektów na obrazie rastrowym (m.in. ze względu na wzajemne nakładanie się elementów powierzchniowych, liniowych, punktowych oraz napisów), a tym samym bezpośredniego określenia gęstości graficznej mapy, wartość tej gęstości i jej rozkład przestrzenny został wyznaczony pośrednio, poprzez określenie obciążenia graficznego. Zostało one wyznaczone z pewnym przybliżeniem, poprzez zaproponowany przez Autorkę estymator. Najlepszym przybliżeniem określenia występowania obiektów na danym obszarze jest wyznaczenie położenia ich krawędzi. Uwidacznia się ono nagłą zmianą intensywności pomiędzy pikselami obrazu. Tło, na którym znajduje się obiekt, jak również jego wypełnienie (w większości przypadków jest ono jednolite dla każdego obiektu) może być pominięte

w obliczeniach. Jest to podyktowane faktem charakterystycznego postrzegania obrazu (macierzy dwuwymiarowej) przez systemy komputerowe, w których każdy punkt macierzy (piksel) reprezentowany jest przez pojedynczą wartość liczbową. Jeżeli wokół rozpatrywanego piksela znajdują się piksele o identycznej wartości oznacza to, że sygnał przestrzenny jest niezmienny i nie niesie informacji użytecznej (Gonzales, Woods, 2002). Procedura wyznaczania rozkładu krawędzi jest często stosowanym zabiegiem w technikach cyfrowego przetwarzania obrazów. Jej zaletą jest możliwość jednoznacznego ukazania występowania obiektów na obrazach, na których tło zlewa się wizualnie z poszukiwanymi obiektami.

Przetwarzanie rozkładu przestrzennego krawędzi obiektów zamieszczonych na planie miasta pozwala na obliczenie jego obciążenia graficznego, traktowanego jako estymator gęstości graficznej. Do wyznaczenia poszukiwanego rozkładu krawędzi obiektów zastosowano zaawansowane przetwarzanie obrazu, wykorzystujące transformację falkową oraz funkcje analizy obrazu.

4.4. Zastosowanie transformacji falkowej do wyznaczania krawędzi

Wyznaczanie krawędzi obiektów na obrazie jest procedurą stosunkowo prostą numerycznie. Wykorzystuje ona fakt, iż krawędź obiektu jest reprezentowana przez gwałtowną zmianę intensywności sąsiadujących pikseli. W literaturze rozróżnia się cztery podstawowe typy krawędzi: pochyła, stopień, linia, dach (literatura). W niniejszych analizach za elementy graficzne obrazu przyjęte zostały wszystkie rodzaje znaków punktowych, liniowych i powierzchniowych, dlatego w procedurze wyznaczania krawędzi na obrazach planów miast, za krawędź uznane zostały wszystkie gwałtowne zmiany intensywności pikseli reprezentowane przez typ *stopień*.

Najprostszym algorytmem wyznaczania krawędzi obiektów jest odejmowanie od siebie dwóch identycznych obrazów, przesuniętych względem siebie o jeden piksel. Ze względu na możliwość wystąpienia w obrazie krawędzi dowolnie zorientowanych przestrzennie, operację tę wykonuje się dwukrotnie – pojedynczo dla kierunku X oraz Y. Podobną operację można wykonać, stosując różniczkujące filtry splotowe ze specjalnie dobranymi maskami filtru (Pratt, 2001). Zazwyczaj stosowane są filtry Prewitt'a lub Sobel'a o rozmiarze okna 3x3 piksele. Większy rozmiar okna jest rzadko stosowany. Zaletą obliczeń wykorzystujących operacje splotowe jest szybkość realizacji, natomiast mankamentem – zbyt duża czułość na rastrowy charakter drukowanych na planach obrazów obiektów (wypełnienie rastrowe). Mankamentem jest również występowanie szumu intensywnościowego w obrazie (losowy rozkład intensywności, niezwiązany z obiektami występującymi w obrazie). Występowanie wypełnienia rastrowego oraz szumu intensywnościowego najbardziej widoczne jest w digitalizowanych obrazach planów miast. Dlatego też w przypadku analizowania tego typu obrazów znacznie wygodniej jest wykorzystywać do wyznaczenia krawędzi jedną z nowoczesnych technik przetwarzania obrazu, jaką jest transformacja falkowa.

Metoda transformacji falkowej jest bardzo atrakcyjną techniką filtracji i analizy sygnału zawierającego lokalne zmiany jego parametrów (Daubechies, 1992). Transformacja falkowa powstała w ramach prac nad polepszeniem efektywności stosowanej powszechnie w analizie obrazów cyfrowych transformacji Fouriera dla

sygnałów nieokresowych, które są znacznie częściej obiektem analiz niż sygnały okresowe. Transformacja Fouriera przetwarza funkcję z danej przestrzeni w ten sposób, że wyeksponowane są jej własności okresowe, częstotliwościowe. Transformacja Fouriera w zastosowaniu do analizy obrazów pozwala na wyznaczenie z obrazu harmonicznych o określonej częstotliwości przestrzennej (Russ, 2007). Każdy obiekt w obrazie, charakteryzujący się skończonymi wymiarami poprzecznymi oraz periodycznym występowaniem, posiada określoną częstość przestrzenną dobrze go identyfikującą. Ponieważ transformacja Fouriera jest operacją globalną (wszystkie wartości transformaty Fouriera wyliczane są z całego obrazu) nie pozwala ona na dokładną lokalizację przestrzenną obiektów o określonej częstotliwości przestrzennej. Dlatego też Gabor (Gröchenig, 2001) proponował analizę fragmentów sygnału modulowanego funkcją Gaussa za pomocą transformaty Fouriera (TF), w celu uzyskania nie tylko częstotliwościowej, ale również czasowej (przestrzennej) informacji odnośnie do sygnału. Takie podejście jest równoznaczne z lokalnym analizowaniem częstości, w przeciwieństwie do analizy globalnej realizowanej przez TF. Taką samą właściwością, przy zwiększonej dokładności lokalizacji czasowo-przestrzennej sygnału zapewnia transformacja falkowa. Dlatego też metoda transformacji falkowej w wersji dyskretnej (DTF) i ciągłej (CTF) jest chętnie stosowana m. in. do przetwarzania obrazów w optycznych metodach pomiarowych. Metoda transformacji falkowej umożliwia dostrajanie szerokości filtra do różnych obszarów widma podczas przetwarzania, przez co lokalizuje sygnał w odniesieniu do czasu (położenia) i częstotliwości (częstości przestrzennej). Dzięki właściwości wielorozdzielczości zapewnia ona dobrą rozdzielczość przestrzenną w małej skali (w zakresie niskich częstości przestrzennych) oraz dobrą rozdzielczość częstości przestrzennych w dużej skali.

Ogólnie rzecz ujmując można powiedzieć, że przekształcenie falkowe polega na korelacji (porównywaniu) analizowanego sygnału z tzw. falką-matką. Falka-matka to podstawowa funkcja, która w procesie transformacji jest przeskalowywana i przesuwana wzdłuż analizowanego sygnału. Należy pamiętać, że podczas transformacji wykorzystywana jest tylko jedna falka-matka (funkcja o określonym kształcie). W wyniku działania transformacji otrzymywany jest zbiór współczynników korelacji $W(a,b)$ dla każdej skali falki a oraz dla każdego przesunięcia. Ponieważ skala falki a dobierana jest bezpośrednio do możliwego zakresu zmian analizowanego sygnału, natomiast przesunięcie b jest bezpośrednio związane z (jego) długością (sygnału), to w rezultacie przetwarzania sygnału jednowymiarowego uzyskujemy wynik w postaci dwuwymiarowej macierzy współczynników $W(a,b)$. Rozkład współczynników falkowych $W(a,b)$ nazywamy skalogramem, a każdy współczynnik o współrzędnych (a,b) określa miarę korelacji analizowanego fragmentu sygnału z falką o danej skali, ze wszystkimi tego konsekwencjami – wysoki dodatni współczynnik oznacza ścisłą korelację między tymi dwiema funkcjami. W przypadku analizy sygnałów dwuwymiarowych, takich jak obrazy cyfrowe, w wyniku transformacji falkowej otrzymywana jest macierz trójwymiarowa współczynników $W(a,b,c)$, gdzie a to skala falki natomiast b i c to przesunięcie falki w dwóch ortogonalnych kierunkach w obrazie.

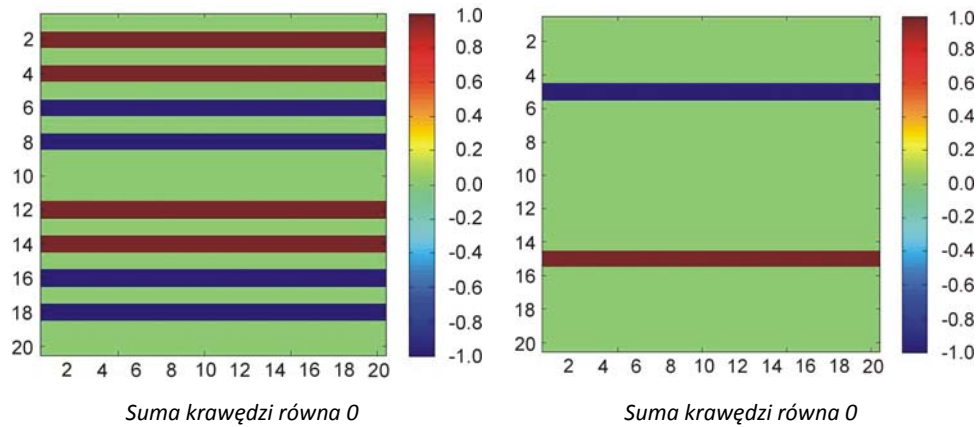
W przeciwieństwie do typowego zastosowania transformacji falkowej, czyli dekompozycji sygnału na zbiór współczynników falkowych, a następnie ich rekombinacji do postaci sygnału przetworzonego, w analizach wykorzystywany był wyznaczony w procesie transformacji rozkład współczynników korelacji $W(a,b)$. Dla specjalnie

dobrych kształtów falek-matek rozkład ten, będący wynikiem korelacji analizowanego obrazu z falką na wybranym poziomie dekompozycji, wskazuje jednoznacznie na położenie granicy pomiędzy obiektami (krawędzie) usuwając jednocześnie niepotrzebne tło i wypełnienie obiektu. W niniejszych analizach zastosowano falkę-matkę typu Symlet 5, a wszystkie obliczenia zostały wykonane w środowisku MATLAB. Środowisko to jest przystosowane i zoptymalizowane pod kątem operacji na macierzach, dlatego bardzo dobrze nadaje się do przetwarzania obrazów, które mogą być rozpatrywane jako macierze dwuwymiarowe.

W stosunku do spłotowej filtracji różniczkującej opisanej wcześniej, transformacja falkowa ma istotną zaletę. Dobierając odpowiednio skalę dekompozycji zastosowanej falki możliwe jest uniezależnienie się od zmiennych grubości linii w obrazie, a także skuteczna redukcja szumów intensywnościowych. Przy zastosowaniu standardowych filtrów różniczkujących grubość linii wpływa na uzyskiwane wyniki wyznaczenia krawędzi. Do wyznaczenia położenia krawędzi obiektów w obrazie rastrowym (skanowanym planie miasta) wykorzystana została ciągła transformacja falkowa (CWT) z falkami-matkami typu Haar, Daubechies oraz Symlet. Ponieważ, podobnie do różniczkującej filtracji spłotowej, transformacja falkowa działa w jednym kierunku (nawet jeżeli przetwarzany jest sygnał dwuwymiarowy), w celu wyznaczenia krawędzi obraz transformowany był dwukrotnie – raz w kierunku pionowym i raz w kierunku poziomym. Następnie dwie otrzymane mapy krawędzi składane były do jednej wspólnej mapy.

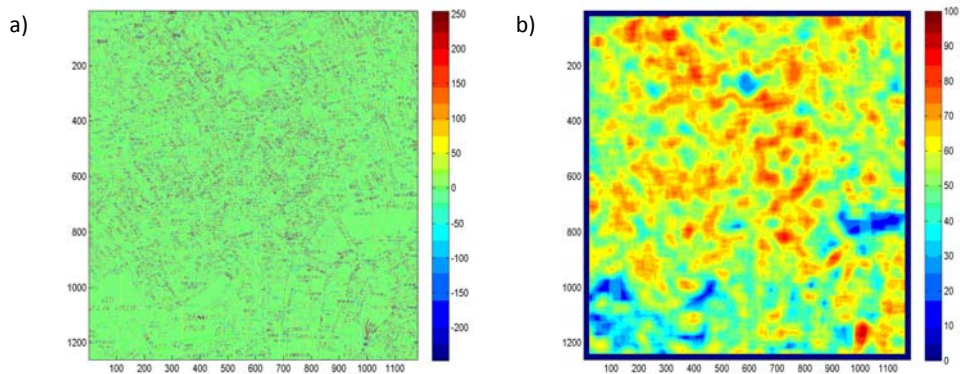
4.5. Wyznaczenie obciążenia graficznego

Znając rozkład krawędzi obiektów w obrazie możliwa jest estymacja gęstości graficznej na zadanym obszarze. Intuicyjnym jest, że czym więcej krawędzi wystąpi na badanym obszarze, tym większa jest jego gęstość graficzna. Zatem wydaje się, że sumowanie wartości pikseli w wyznaczonych mapach krawędzi w zadanym obszarze powinno w dobrym stopniu przybliżać liczbę krawędzi. Jednakże w przypadku proponowanego przez Autorkę rozwiązania algorytmicznego nie jest to możliwe. Jest to podyktowane specyfiką otrzymywanych map krawędzi, które przyjmują wartości symetryczne względem wartości zerowej. Sumowanie dawałoby zatem wyniki przypadkowe, nieskorelowane z liczbą występujących obiektów w danym obszarze. W przypadku, gdy w rozpatrywanym obszarze znalazłaby się parzysta liczba krawędzi, z których połowa reprezentowana by była liczbami dodatnimi natomiast druga połowa liczbami ujemnymi, ich suma oscylowałaby wokół zera (rys. 1). Taka sytuacja mogłaby mieć miejsce dla różnej parzystej liczby krawędzi. Dlatego też w analizach wykorzystano, jako estymator obciążenia graficznego, odchylenie standardowe wartości intensywności reprezentujących krawędzie w badanym obszarze. Odchylenie to wyznaczone jest w każdym punkcie mapy na podstawie jego otoczenia. W taki sposób otrzymywany jest dwuwymiarowy rozkład gęstości graficznej obiektów (mapa gęstości graficznej) na analizowanym planie.



Rys. 1. Przykład dwóch różnych map zawierających parzystą liczbę krawędzi, dających ten sam wynik sumowania wartości krawędzi

Wyznaczenie odchylenia standardowego wartości krawędzi, a tym samym estymacja obciążenia graficznego dokonywana jest dla każdego piksela mapy krawędzi, a obliczenia prowadzone są z wykorzystaniem wartości uwzględniających otoczenie rozpatrywanego piksela. W ten sposób uzyskiwana jest mapa wskazująca na przestrzenny rozkład gęstości graficznej. W prowadzonych obliczeniach przyjęto obszar obliczeniowy wielkości 41×41 pikseli. Obszar ten odpowiada obszarowi $0,5 \times 0,5 \text{ cm}^2$ na skanowanych mapach. Mapy skanowane były z rozdzielczością przestrzenną 300 dpi zapewniającą z jednej strony odpowiednie rozróżnienie szczegółów mapy, z drugiej nie powodującą zbyt szczegółowego próbkowania kolorowego wypełnienia rastrowego. Dobór wielkości okna obliczeniowego został przeprowadzony empirycznie po analizie rozkładów gęstości wyliczonych dla różnych wielkości obszarów obliczeniowych. Dla wykorzystywanej wielkości okna udało się znaleźć kompromis pomiędzy zakresem zmienności gęstości a jej ciągłością w obrazie. Przykładowa mapa krawędzi dla wybranego planu miasta oraz wyznaczona z niej mapa rozkładu gęstości graficznej przedstawiona została na rysunku 2.



Rys. 2. a) Wyznaczona mapa krawędzi dla przykładowego planu miasta oraz b) wyliczona z niej mapa obciążenia graficznego

5. WNIOSKI

Zaproponowana przez Autorkę artykułu metoda pozwala z jednej strony na automatyczne wyznaczanie obciążenia graficznego, z drugiej zapewnia porównywalność planów, obciążonych różnymi elementami graficznymi (sygnaturami punktowymi, liniowymi, powierzchniowymi i napisami). Należy zaznaczyć, iż porównywalność wyników uzyskana będzie jedynie w przypadku stosowania odpowiednio dobranych i stałych (przynajmniej w danym eksperymencie) parametrów metody: rozdzielczości – wielkości piksela oraz wielkości otoczenia – pola podstawowego, w którym wykonywana jest analiza falkowa.

Wiele dotychczas stosowanych metod badania złożoności odnosi się jedynie do wybranych elementów map, natomiast w zaproponowanej metodzie analizie poddane są wszystkie elementy zamieszczone na mapie, a zatem mamy tu do czynienia z badaniem na wyższym, syntetycznym poziomie.

Należy dodać, iż występuje duża zgodność wrażeń wizualnych ze stopniem obciążenia graficznego zobrazowanym na falkogramach. Zaproponowana metoda ma istotne znaczenie w kontekście systemów informacji geograficznej i możliwości wizualizacji ogromnych baz danych. Bogactwo danych powoduje, że często liczba wyświetlanych informacji jest znaczna, a należy mieć na względzie, że stopień złożoności mapy ma duże znaczenia dla jej poprawnego odbioru. Dzięki zastosowaniu zaproponowanej metody możliwe jest łatwe wyznaczenie obciążenia graficznego mapy i dostosowanie przedziałów skalowych, w których wyświetlana jest informacja, do możliwości percepcyjnych użytkownika. Poza tym, mimo coraz większej ekspansji map elektronicznych, produkcja tradycyjnych map papierowych rozwija się jak nigdy dotąd (W. Ostrowski, 2008). Warto również podkreślić, że opracowana metoda stanowi przyczynek do rozwoju badań nad złożonością map.

6. LITERATURA

- Bertin J., 1967. *Semiologie graphique. Les diagrammes, les reseaux, les cartes*, La Haye-Paris, Mouton et Gouthier-Villar, 2 ed. 1973.
- Bjørke J. T., 2003. Generalization of road networks for mobile map services: an information theoretic approach, *Proceedings of the International Cartographic Conference*, Durban, South Africa, 127–135.
- Bonham-Carter G. F., 1994. *Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS*, Pergamon, Oxford.
- Burrough P., McDonnell R., 1998. *Principles of geographical information systems*, Clarendon Press, Oxford.
- Conveny P., Highfield R., 1995. *Frontiers of complexity*, Faber and Faber, London.
- Daubechies I., 1992. *Ten lectures on wavelets*, SIAM, Philadelphia.
- Dietzel P.P., 1983. Measuring complexity on topographical maps, *Proceedings of ACSMASP Fall Convention*, Salt Lake City, s. 45–49.
- Ebi N., Lauterbach B., Besslich P., 1992. Automatic data acquisition from topographic maps using a knowledge-based image analysis system, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXIX (B4), s. 655–663.

- Egenhofer M. J., Clementini E., Di Felice P., 1994. Evaluating inconsistencies among multiple representations, *Proceedings of 6th International Symposium on Spatial Data Handling*, Edinburgh, s. 901–919.
- He Z., Zhu G., Pang, X., 1997. A study of cartographic information theory used in mapmaking, *Proceedings of the International Cartographic Conference (ICA)*, Stockholm, s. 2249–2261.
- Fairbairn D., 2006. Measuring map complexity, *The Cartographic Journal*, Vol. 43(3), s. 224–238.
- Forsythe A., 2009. Visual complexity: Is that all there is?, *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*, LNCS, Springer, s. 158–166.
- Gatrell A. C., 1977. Complexity and redundancy in binary maps, *Geographical Analysis*, Vol. 9(3), s. 29–41.
- Gonzales R. C., Woods R. E., 2002. *Digital image processing*, Prentice Hall, New Jersey.
- Gröchenig K., 2001. *Foundations of time-frequency analysis*, Birkhauser, Boston.
- Knopfli R., 1983. *Communication theory and generalization*, *Graphic communication and design in contemporary cartography*, Taylor D. R. F (red.), John Wiley, Chichester.
- Li Z., Huang P., 2002. Quantitative measures for spatial information of maps. *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 16(7), s. 699–709.
- MacEachren A. M., 1982. Map complexity: comparison and measurement, *The American Cartographer*, Vol. 9(1), s. 31–46.
- Mersey J., 1990. Colour and thematic map design: the role of colour scheme and map complexity in choropleth map communication, *Cartographica*, Vol. 27(3), s. 1–157.
- Murray J.X., Liu, Y., 1994. A software engineering approach to assessing complexity in network supervision tasks, *Proceedings of IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics*, San Antonio.

APPLICATION OF DIGITAL IMAGE PROCESSING METHOD FOR MEASURING MAPS GRAPHICAL DENSITY ON THE EXAMPLE OF CITY MAPS

KEY WORDS: city maps, maps complexity, complexity measures, digital image processing, wavelet transformation

Summary

During the centuries the main problem on mapping was to obtain the sufficient and reliable source data; presently, an appropriate selection of the desired information from the deluge of available data is a problem. An availability of large amount of data induces to transfer the possibly rich information by means of map. It often results in overloading the cartographic documents, that is why they become less communicative and difficult to read. This situation is well illustrated by the example of city maps which are the most commonly used and thus the most frequently published cartographic products. Many user groups with different needs as well as preparation to read maps use these high volume publications. Therefore, the maps communication effectiveness problem is of particular importance.

The city maps are the most complex cartographic presentations, because the presented areas are the places with the greatest concentration of different kinds of objects and forms of human activity arising from the civilization development. Conveying these specific features on the city maps leads to

the problem of selecting the most relevant elements of content in terms of user's needs, since presenting all objects and their characteristics is impossible if the city map readability is to be kept. Although complexity has been the cartographers' object of interest for many years, because it exerts an impact on readability and effectiveness of cartographic documents, none of the measures used so far may be applied for automatic determination of complexity of such graphically complicated objects as city maps.

Therefore a novel approach was needed for these applications. For that purpose digital image processing techniques have been proposed and successfully applied by the authors. The analysis of the spatial distribution of the objects' edges on the map surface, calculated using continuous wavelet transform, is the basis of the proposed measure. The method allows for comparison of complexity of city maps loaded by different type of graphical elements (point signatures, lines, text, etc.). Extended analyses of selected cartographic materials proved the usability of the method for quantitative estimation of city map complexity via formal index.

Dane autora:

Dr Agata Ciołkosz-Styk
e-mail: agata.ciolkosz-styk@igik.edu.pl
telefon: +48 22 329 19 23