

WIKTOR TRACZ, JERZY MOZGAWA, KRZYSZTOF STEREŃCZAK

Wymiar fraktalny jako sposób opisu złożoności przestrzeni leśnej*

Fractal dimension as a tool for description of forest structure complexity

ABSTRACT

Tracz W., Mozgawa J., Stereńczak K. 2011. Wymiar fraktalny jako sposób opisu złożoności przestrzeni leśnej. Sylwan 155 (6): 384-392.

The paper describes the procedure of calculation of surface fractal dimension based on using raster datasets: preprocessed LIDAR data. The procedure was used to assess the surface complexity of forest stand canopy. Relationships between size of the pixels of raster image and fractal dimension of canopy surface presented on that image were recognized. Dependence of fractal dimension on age and species composition of a stand was also found.

KEY WORDS

fractal dimension, shape complexity, surface roughness, canopy surface

ADDRESSES

Wiktor Tracz – e-mail: wiktortracz@wl.sggw.pl

Jerzy Mozgawa – e-mail: jerzy.mozgawa@wl.sggw.pl

Krzysztof Stereńczak – e-mail: krzysztof.sterenczak@wl.sggw.pl

Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa; Wydział Leśny SGGW;
ul. Nowoursynowska 159; 02-776 Warszawa

Wstęp

W ramach informatyzacji leśnictwa rozpoczęto w 1998 roku budowę systemu informacji przestrzennej, opartego na wektorowym modelu danych. Podstawową jednostką geometryczną podziału powierzchniowego lasu, jaka została przyjęta, był drzewostan. Informacje do bazy danych opisowych były zbierane w trakcie prac inwentaryzacyjnych na potrzeby średniookresowych (10-letnich) planów zarządzania gospodarstwa leśnego.

Równoległe z zakładaniem Leśnej Mapy Numerycznej artykułowana była potrzeba zmiany leśnictwa surowcowego na model trwale zrównoważonej wielofunkcyjnej gospodarki leśnej (TZWGL), opartej na koncepcji proekologicznego leśnictwa ekosystemowego. W modelu TZWGL przedmiotem gospodarki leśnej jest cały ekosystem leśny, spełniający określoną funkcję w przestrzeni przyrodniczej regionu i kraju. Model TZWGL został wprowadzony do krajowych aktów prawnych i jest aktualnie realizowany w leśnictwie krajowym. Implementacja zasad TZWGL w praktyce gospodarczej wymaga istotnego uszczegółowienia sposobu opisu stanu lasu w zakresie niezbędnym do zrealizowania potrzeb podstawowych działów leśnictwa: hodowli, ochrony i użytkowania. Szczegółowe postulaty inwentaryzacyjne formułowane przez wymienione wyżej działy leśnictwa kierowane są przede wszystkim do zarządzania lasu, bowiem

* Niniejsza praca powstała w ramach projektu badawczego N N309 114537 „Las i jego cechy w rastrowym modelu danych przestrzennych” finansowanego ze środków przeznaczonych na naukę w latach 2009-2011

wyniki inwentaryzacji urzędniowej stanowią podstawowy zasób informacji wprowadzanej do Systemu Informatycznego Lasów Państwowych (SILP).

Diagnoza współczesnych potrzeb inwentaryzacyjnych leśnictwa [Mozgawa 2008] została wykorzystana do sformułowania niektórych hipotez w temacie „Las i jego cechy w rastrowym modelu danych przestrzennych” finansowanym ze środków MNiSZW (N N309 114537):

- implementacja zasad trwale zrównoważonej wielofunkcyjnej gospodarki leśnej wymaga zwiększenia dokładności opisu przestrzennej zmienności stanu lasu, przy zachowaniu lub obniżeniu poziomu kosztów aktualnie prowadzonych inwentaryzacji;
- optymalnym dla realizacji celów TZWGL sposobem gromadzenia, analizy i prezentacji danych przestrzennych o lesie jest wykorzystanie rastrowego modelu danych o zmiennym polu podstawowym.

Konferencja INTERGEO 2008 poświęcona zagadnieniom geodezji, gospodarki przestrzennej i geoinformacji była dobrą okazją do oceny trendów rozwojowych w geomatyce i analizy zapotrzebowania rynku w zakresie nowych technologii geoinformacyjnych. Uczestnicy Konferencji stwierdzili, że nowe propozycje rozwiązań programowych w systemach informacji przestrzennej w zakresie danych rastrowych są generalnie pozytywnie przyjmowane na rynku usług geoinformacyjnych. Propozycja wykorzystania rastrowych modeli danych do opisu stanu i zmian lasu, jak również prowadzenia analiz przestrzennych na danych rastrowych, wpisuje się zatem w ogólne trendy rozwojowe geomatyki.

Wprowadzenie rastrowego zapisu informacji o lesie stwarza szczególnie dogodne warunki prowadzenia analiz geostatystycznych i zapewnia opis zmienności przestrzennych wewnątrz różnych jednostek podziału przestrzennego lasu. Wprowadzenie zapisu rastrowego wymaga jednak konieczności rozwiązania dla określonej skali przestrzennej co najmniej dwóch problemów poznawczych, a mianowicie: ustalenia przy jakiej wielkości oczka rastra pojawiają się związki przestrzenne i jaki typ semiwariancji modeluje te związki. Najmniejsza skala przestrzenna zmienności jest określana jako przestrzenna zmienność wewnątrzdrzewostanowa. Poznanie tej zmienności umożliwi uzyskanie wglądu w przestrzenną dystrybucję cech drzew będących rezultatem relacji między uwarunkowanym genetycznie wzrostem drzew a konkurencyjnością występującą między drzewami. Do ustalenia zmienności wewnątrzdrzewostanowej potencjalnie mogą być wykorzystywane również odmienne od geostatystycznych techniki analityczne. Zastosowane narzędzia analityczne we wszystkich przypadkach powinny jednak bazować na danych inwentaryzacyjnych dostatecznie dobrze uwzględniających własności geometryczne analizowanego obiektu.

Fraktale

Dwu- i trójwymiarowe kształty, jakie tworzy przyroda, sugerują jednocześnie wykorzystanie modelu rastrowego do zapisu danych przestrzennych i koncepcji fraktali do opisu geometrii przestrzennych obiektów przyrodniczych.

Pojęcie fraktali i geometrii fraktalnej wprowadził Mandelbrot [1967], podejmując próbę opisu nieregularności występujących w przyrodzie. Fraktale reprezentują formy, które są samopodobne, tzn. bez względu na skalę analizowany szczegół wygląda podobnie jak cały obiekt rzeczywisty. Obiekty naturalne rzadko są dokładnie samopodobne. Najczęściej mogą być uznane za samopodobne w sensie statystycznym.

Możliwość zastosowania geometrii fraktalnej do badania i modelowania zagadnień przyrodniczych jest zależna od skali badanego obiektu/zjawiska [Kenkel, Walker 1993]. Zgodny jest pogląd, że podejście fraktalne lepiej uwzględni specyfikę geometryczną detali środowiska

w porównaniu z tradycyjną geometrią euklidesową [Lorimer 1994; Kenkel, Walker 1996; Purkis, Kohler 2008]. Pierwsze badania z wykorzystaniem wymiaru fraktalnego dotyczyły kwantyfikacji liniowych elementów środowiska leśnego [Zeide, Pfeifer 1991; Mozgawa, Krawczyk 1991; Berezovskaya i in. 1997; Walker, Kenkel 1998; Zhu i in. 2006]. Obecnie wymiar fraktalny wykorzystuje się między innymi w monitoringu środowiska, detekcji zmian czy ocenie krajobrazu [Lam i in. 1998; Quattrochi i in. 2001; Lam 2004; Al-Hamdan 2004].

Obliczanie wymiaru fraktalnego

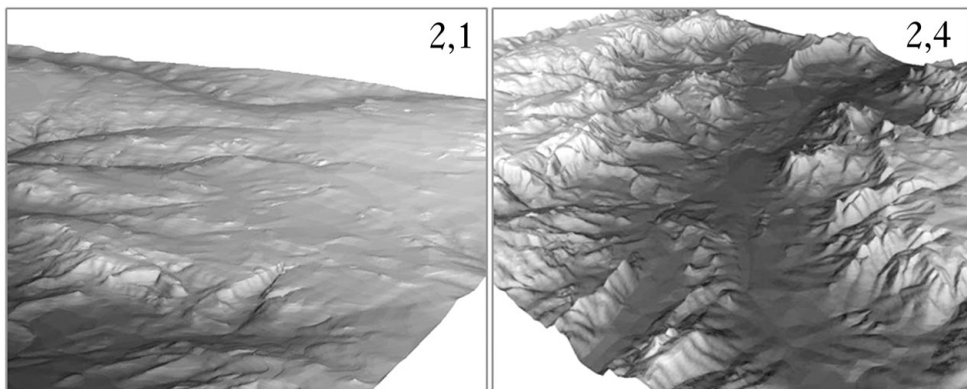
Podstawową cechą ilościową w geometrii fraktalnej jest wymiar fraktalny D , który jest wykorzystywany jako miara skomplikowania elementów liniowych (ryc. 1) czy powierzchniowych (ryc. 2). Wartość D elementów jedno- i dwuwymiarowych mieści się w zakresie od 1 do 2, a elementów trójwymiarowych – w zakresie od 2 do 3. Wymiar fraktalny o wartościach zbliżających się do maksymalnej wartości zakresu (np. 2 dla elementów dwuwymiarowych) charakteryzuje elementy o kształcie bardziej złożonym (zróżnicowanym). Dla obiektów przyrodniczych, które nie są ściśle samopodobne, zostały opracowane liczne metody wyliczenia D . Charakterystykę tych metod przedstawili Kenkel i Walker [1993]. Zhou i Lam [2005] z kolei dokonali porównania niektórych metod obliczenia wymiaru fraktalnego.

Koncentrowanie uwagi na wyznaczaniu liniowego wymiaru fraktalnego z pewnością miało przyczynę w technicznej trudności uzyskania miar 3D obiektów przyrodniczych. Zdecydowany przełom w tej dziedzinie nastąpił z chwilą wykorzystania zobrażeń lotniczego skaningu laserowego (LIDAR) do kwantyfikacji zróżnicowania wysokościowego środowiska [Purkis,



Ryc. 1.

Liniowy wymiar fraktalny niektórych liści drzew [Vlcek, Cheung 1986]
 Linear fractal dimension of some leaves [Vlcek, Cheung 1986]



Ryc. 2.

Powierzchniowy wymiar fraktalny rzeźby terenu
 Surface fractal dimension of relief

Kohler 2008], w tym środowiska leśnego [Koch i in. 2009]. Lotnicze dane lidarowe przetworzone do formy rastrowego numerycznego modelu koron w sposób naturalny stały się dogodnymi danymi dla różnych analiz, między innymi do dokładnej oceny zróżnicowania wysokościowego drzewostanu lub zróżnicowania powierzchni koron drzewostanu za pomocą powierzchniowego wymiaru fraktalnego. Zrealizowanie idei przetransformowania danych lidarowych do formy powierzchniowego wymiaru fraktalnego jest jednak limitowane wysoką komplikacją numerycznego wyznaczania powierzchniowego wymiaru fraktalnego w zbiorach rastrowych [Wen, Sinding-Larsen 1997; Zhou, Lam 2005].

Potencjalne zastosowania wymiaru fraktalnego powierzchni zapisanej za pomocą rastrowego modelu danych przestrzennych można wyspecyfikować następująco:

- Wymiar fraktalny podany dla oczka rastra może spełniać funkcje metadanych dla elementów mniejszych od oczka lub dla okna złożonego z $N \times N$ oczek.
- Wyliczone wielkości wymiaru fraktalnego można wykorzystać jako zmienne wyjaśniające w modelowaniu matematycznym stosowanym do pośredniego wyznaczania cech inwentaryzacyjnych.
- Wyznaczenie wymiarów fraktalnych dla rastrow utworzonych w szeregu czasowym jest potencjalnym źródłem informacji do badania zmian.
- Wyliczając z pierwotnej mapy rastrowej wymiar fraktalny dla ruchomego okna obejmującego $N \times N$ pikseli uzyskujemy dane do utworzenia wtórnej mapy rastrowej, a następnie do jej wykorzystania w badaniu zmienności przestrzennej lokalnego wymiaru fraktalnego.

W niniejszym opracowaniu koncentrujemy uwagę na ustaleniu sprawnej procedury obliczania powierzchniowego wymiaru fraktalnego z wykorzystaniem dużych zbiorów rastrowych oraz wykorzystaniu jej w ocenie złożoności kształtu powierzchni koron drzewostanów. Dysponowanie taką metodą mogłoby istotnie rozszerzyć zakres wykorzystania danych lidarowych w opisie zróżnicowania powierzchniowego i wysokościowego wybranych fragmentów lasu. Dane empiryczne wykorzystane w opracowaniu umożliwiają również próbę odpowiedzi na pytania o to, jak wymiar rastra wpływa na wymiar fraktalny obrazu oraz jaką informację zawiera wymiar fraktalny z punktu widzenia inwentaryzacji cechy i jej zmienności.

Materiał i metody

Materiały terenowe zebrano w Uroczysku Głuchów, należącym do Leśnego Zakładu Doświadczalnego Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Lotnicze skanowanie laserowe wykonano w maju 2007 roku. Zastosowano system Falcon II firmy TopoSys GmbH o pulsacyjno-włóknistym typie sensora. Długość wysyłanej fali wynosiła 1560 nm, a częstotliwość pulsów – 5 nsec. Skanowania dokonywano z wysokości 700 m z częstotliwością 83 kHz w zakresie 14,3°. Skaner rejestrował pierwsze (FE) i ostatnie (LE) odbicie z ponad 50% poprzecznym pokryciem sąsiadujących szeregów. Średnica plamki skanera wynosiła 0,7 m. Obszar leśny pokryty skanowaniem laserowym miał powierzchnię około 1000 ha. Uzyskane dane charakteryzowały się wysoką gęstością chmury punktów (10-15 punktów na m^2).

Numeryczne modele terenu wyinterpolowano za pomocą oprogramowania TreesVis [Weinacker i in. 2004]. W badaniach wykorzystano wysokościowy model koron (WMK) powstający w wyniku odejmowania odpowiadających sobie pikseli znajdujących się w numerycznym modelu pokrycia terenu (NMPT) i numerycznym modelu terenu (NMT) [Stereńczak 2008]. Dzięki takiej operacji w wysokościowym modelu koron wartości pikseli odpowiadają wysokości roślinności rosnącej w jego obrębie.

Do badań wybrano 3 różniące się między sobą wydzielenia, w których założono powierzchnie próbne (tab.). W dwóch przypadkach były to drzewostany sosnowe, różniące się bardzo wyraźnie wybranymi cechami taksacyjnymi, oraz dla porównania, jedna powierzchnia próbna znajdowała się w drzewostanie dębowym.

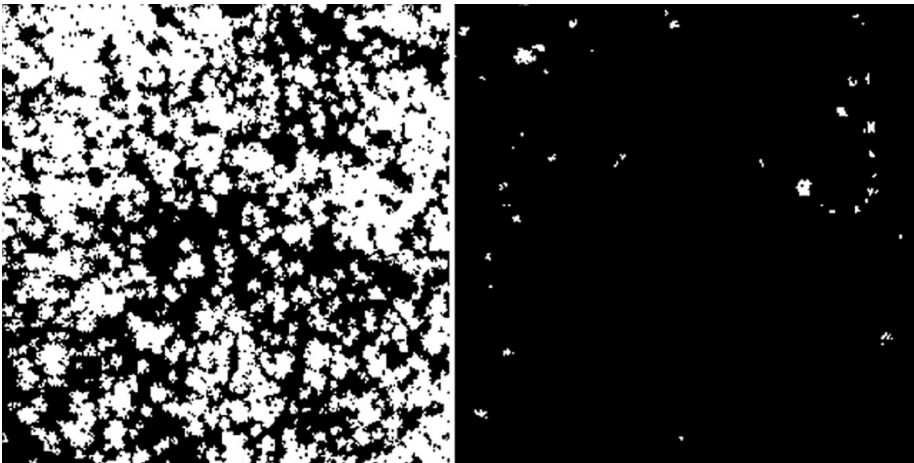
Analizowane powierzchnie próbne miały kształt kwadratu o boku równym 128 m. Dla każdej z nich wygenerowano WMK o rozdzielczości terenowej wynoszącej 0,5 m, 1 m, 2 m, 4 m i 8 m. Wszystkie modele o rozdzielczości od 1 m do 8 m powstały w wyniku interpolacji modelu 0,5 m. Dokonano przeklasyfikowania treści modeli na obrazy binarne, gdzie wartość „1” otrzymywały obszary znajdujące się powyżej określonej wysokości, a wartość „0” obszary poniżej tej wysokości (ryc. 3). Dla WMK powierzchni dębowej minimalna wysokość wynosiła 16 m, a maksymalna – 23 m. Na powierzchniach sosnowych minimalne wysokości wynosiły 19 i 11 m, a maksymalne – 29 i 21 m, odpowiednio dla So1 i So3. Wygenerowano modele przedstawiające wysokości co 1 m od wartości minimalnej do wartości maksymalnej. Przygotowanie wysokościowych modeli koron do obliczeń wymiaru fraktalnego wykonano w programie ArcGIS 9.3.

W analizie danych rastrowych wykorzystano najczęściej stosowaną metodę obliczenia powierzchniowego wymiaru fraktalnego D obiektów przedstawionych na obrazach rastrowych, tzw. metodę wymiaru pudełkowego (ang. box-counting). Polega ona na nakładaniu na obraz siatki kwadratów o zmieniającym się rozmiarze i zliczaniu kwadratów, które zawierają analizowany obiekt [Karperien 2007]. Metoda ta została zaimplementowana w wielu programach

Tabela.

Charakterystyka wydzieleń, w których założono powierzchnie próbne
Characteristics of forest compartments where study plots were localised

Powierzchnia	Gatunek	Wiek [lat]	Zadrzewienie	TSL	Wysokość [m]	Piętrowość	Zapasy [m ³ /ha]	Zwarcie
So1	So	87	0,8	LMw	26	2	385	umiarkowane
So3	So	32	0,7	BMśw	12	1	126	pełne
Db	Db	74	0,8	LMśw	21	1	236	pełne



Ryc. 3.

Obraz powierzchni próbnej dębowej z ustalonym progiem wysokości na 19 m (lewo) i 23 m (prawo)

Oak study plot with height threshold set for 19 m (left) and 23 m (right)

czarny – piksele znajdujące się poniżej progu; biały – piksele znajdujące się powyżej progu
black – pixels below threshold value; white – pixels above threshold value

służących do obliczenia wymiaru fraktalnego. W badaniu wykorzystano program FracLac [Karperien 2007]. Wymiar fraktalny obliczony tą metodą jest liniowym wymiarem fraktalnym (wartość D mieści się w zakresie od 1 do 2) i opisuje obiekty jedno- i dwuwymiarowe (linia, obszar/polygon). Tak zwany powierzchniowy wymiar fraktalny opisuje złożoność kształtu powierzchni obiektów trójwymiarowych. Można go obliczyć dodając jedynkę do wartości liniowego wymiaru fraktalnego [Goodchild 1980; Lam, De Cola 1993].

Dla każdego modelu binarnego o danej rozdzielczości przestrzennej (wymiar oczka rastra) przedstawiającego ten sam fragment lasu został obliczony liniowy wymiar fraktalny. W celu obliczenia powierzchniowego wymiaru fraktalnego powierzchni koron danej powierzchni próbnej, obliczono średnią wartość D dla modeli przedstawiających różne wysokości koron i dodano 1. W taki sam sposób obliczono powierzchniowy wymiar fraktalny WMK zapisanych za pomocą obrazów rastrowych dla wszystkich rozdzielczości terenowych.

Według powyższej metodyki przetworzonym i obliczonym zostały poddane obrazy rastrowe zapisane w 5 rozdzielczościach terenowych, przedstawiające powierzchnie koron dwóch fragmentów lasu sosnowego i jednego fragmentu lasu dębowego. Utworzono i poddano analizie 36 WMK dla drzewostanu dębowego, 53 WMK dla drzewostanu oznaczonego jako So1 i 52 WMK dla drzewostanu oznaczonego jako So3.

Wyniki

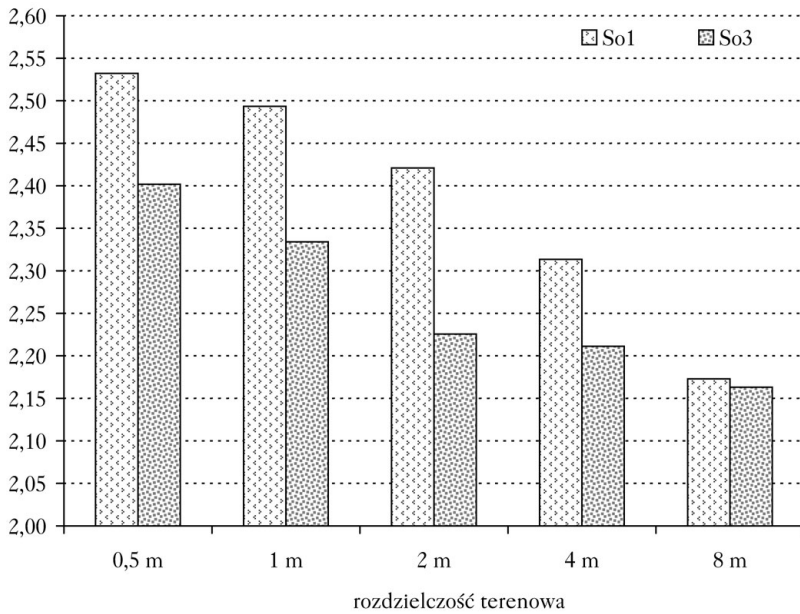
Wymiar fraktalny powierzchni koron drzew fragmentu lasu sosnowego oznaczonego jako So1 jest większy niż dla fragmentu lasu oznaczonego jako So3 dla wszystkich rozdzielczości terenowych wykorzystanych obrazów rastrowych. Różnica wielkości D kształtuje się na poziomie 4-8% (ryc. 4). Wymiar fraktalny powierzchni koron drzew fragmentu drzewostanu sosnowego oznaczonego jako So1 jest większy niż dla fragmentu drzewostanu dębowego dla wszystkich rozdzielczości terenowych wykorzystanych obrazów rastrowych. Różnica wielkości D kształtuje się na poziomie 2-6% (ryc. 5).

Wraz ze zmniejszaniem się rozdzielczości terenowej rastra zmniejsza się wymiar fraktalny. Zależność ta ma miejsce dla wszystkich trzech badanych powierzchni próbnych. Współczynnik korelacji między wymiarem fraktalnym dla So1 i rozdzielczością terenową obrazu wynosi $-0,9876$, a dla fragmentu lasu dębowego $-0,9447$. Dla badanych powierzchni próbnych różnica wielkości D zmniejsza się wraz ze zmianą rozdzielczości terenowej obrazu. Współczynnik korelacji między różnicą wymiaru fraktalnego dla So1 i dla So3 a rozdzielczością terenową obrazu wynosi $-0,9874$.

Podsumowanie

W badaniach zaproponowano i zastosowano wieloetapową procedurę obliczenia wymiaru fraktalnego. Zawiera ona następujące etapy: przetwarzanie danych lidarowych do postaci obrazów rastrowych o zadanej rozdzielczości, przygotowanie obrazów przekrojów wysokościowych i przetworzenie ich do postaci binarnej, obliczenie liniowego wymiaru fraktalnego dla każdego z obrazów oraz obliczenie powierzchniowego wymiaru fraktalnego danego modelu wysokościowego koron drzewostanu. Procedura taka jest raczej pracochłonna. Wykorzystując narzędzia automatyzacji i grupowania operacji w procesy można ją przyspieszyć. Możliwe jest również zbudowanie osobnej aplikacji, która mogłaby realizować zadanie opisane w artykule.

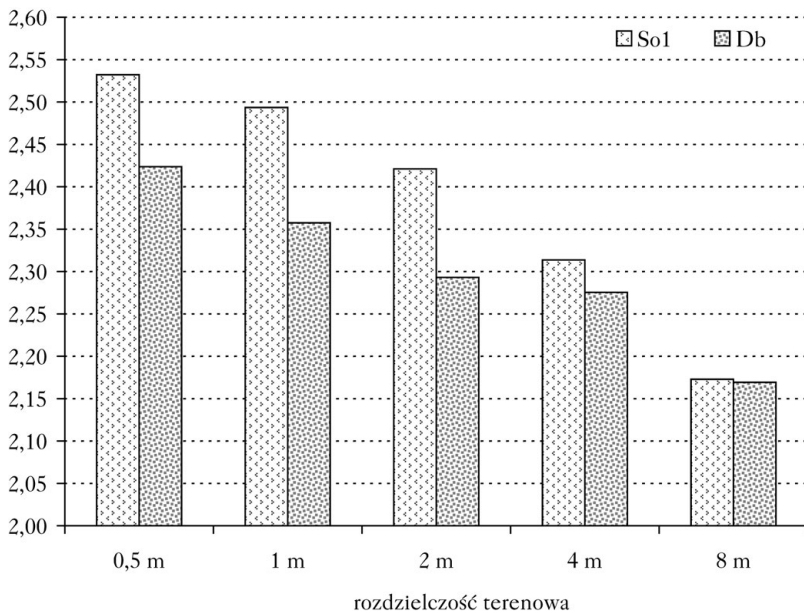
Przeprowadzone badania wykazują, że wymiar fraktalny powierzchni koron dla drzewostanów z jednakowym gatunkiem panującym, ale w różnym wieku, jest różny. Dla starszego drzewostanu sosnowego odnotowano większą jego wartość. Może być to spowodowane tym, że



Ryc. 4.

Zależność wymiaru fraktalnego powierzchni koron od rozdzielczości terenowej dla sosnowych powierzchni próbnych

Relation between fractal dimension of canopy and spatial resolution for pine study plots



Ryc. 5.

Zależność wymiaru fraktalnego powierzchni koron od rozdzielczości terenowej dla sosnowej (So1) i dębowej powierzchni próbnej

Relation between fractal dimension of canopy and spatial resolution for So1 pine and oak study plots

mniejsze korony drzew na powierzchni So3 były mocniej zgeneralizowane niż większe korony drzew z powierzchni So1. Różnica jest wyraźna dla rozdzielczości rastra od 0,5 m do 4 m. Dla drzewostanów z różnym gatunkiem panującym (drzewostan sosnowy i dębowy), mających porównywalny wiek, wymiar fraktalny powierzchni koron jest różny. Wydaje się, że różnica ta jest zależna przede wszystkim od kształtu korony (przekroju pionowego korony), zwarcia i wieku drzew. W tym przypadku różnice można zinterpretować w ten sposób, że większe zmiany występują na powierzchni koron drzew iglastych niż liściastych. Górne piętro drzewostanu dębowego jest bardziej homogeniczne, gdyż korony przyjmują bardziej owalny kształt, o wiele mniej zróżnicowany niż wyraźnie stożkowe kształty koron sosen. Wymiar fraktalny powierzchni koron jest wyraźnie zależny od rozdzielczości terenowej obrazów użytych do zapisania WMK. Dla wiarygodnych analiz za pomocą wymiaru fraktalnego warstwy koron przy wykorzystaniu WMK, wymiar terenowy pikseli obrazu rastrowego powinien być nie mniejszy niż 8 m.

Wymiar fraktalny jest wykorzystywany w badaniach przyrodniczych do określenia skomplikowania obiektów liniowych i powierzchniowych. W przypadku obiektów powierzchniowych mówi się też o szorstkości powierzchni, którą wymiar fraktalny pozwala określić. Można go wykorzystać m.in. jako miarę skomplikowania fragmentów roślin, powierzchni koron drzew pojedynczych i drzewostanów. Jego wartość zależy od użytej metody obliczenia. Ponieważ różne metody dają odmienne wyniki, zalecane jest zastosowanie tej samej metody do obliczenia wszystkich badanych obiektów.

Literatura

- Al-Hamdan M. 2004. Flow resistance characterization of forested flood plains using spatial analysis of remotely sensed data and GIS. Praca doktorska. University of Alabama, Huntsville.
- Berezovskaya F. S., Karev G. P., Kisiluk O. S., Khlebopros R. G., Tselniker Y. L. 1997. A fractal approach to computer-analytical modeling of tree crowns. *Trees* 11: 323-327.
- Goodechild M. 1980. Fractals and the accuracy of geographical measures. *Mathematical Geology* 12: 85-98.
- Karperien A. 2007. *FracLac for ImageJ* ver. 2.5.
- Kenkel N., Walker D. 1993. Fractals and ecology. *Abstracta Botanica* 17 (1-2): 53-70.
- Kenkel N., Walker D. 1996. Fractals in the Biological Sciences. *COENOSIS* 11: 77-100.
- Koch B., Straub C., Dees M., Wang Y., Weinacker H. 2009. Airborne laser data for stand delineation and information extraction. *International Journal of Remote Sensing*. 30 (4): 935-963.
- Lam N. 2004. Fractals and scale in environmental assessment and monitoring. W: Sheppard E., McMaster R. [red.]. *Scale and Geographic Inquiry: Nature, Society, and Method*. Blackwell Publishing, Oxford. 23-40.
- Lam N., De Cola L. 1993. *Fractals in Geography*. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Lam N., Quattrochi D., Qiu H.-L., Zhao W. 1998. Environmental assessment and monitoring with image characterization and modeling system using multiscale remote sensing data. *Applied Geographic Studies* 2 (2): 77-93.
- Lorimer N., Haight R., Leafy A. 1994. *The Fractal Forest: Fractal Geometry and Applications in Forest Science*. Forest Service. General Technical Report NC-170.
- Mandelbrot B. 1967. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science* 155: 636-638.
- Mozgawa J. 2008. Potrzeby inwentaryzacyjne leśnictwa a możliwości ich realizacji wybranymi technikami geomatycznymi. *Techniki geomatyczne w inwentaryzacji lasu – potrzeby i możliwości*. Wydawnictwo SGGW.
- Mozgawa J., Krawczyk J. 1991. Fractal analysis of the meadows-forest border by photointerpretation for the Białowieża National Park. *Phytocoenosis* 3: 243-247.
- Purkis S., Kohler K. 2008. The role of topography in promoting fractal patchiness in carbonate shelf landscape. *Coral Reef* 27: 977-989.
- Quattrochi D., Emerson C., Lam N., Qiu H. 2001. Fractal characterization of multitemporal remote sensing data. W: Tate N. J., Atkinson P. M. [red.]. *Modeling Scale in Geographical Information Science*. Wiley, New York. 13-34.
- Stereńczak K. 2008. Możliwości wykorzystania wysokościowego modelu koron w badaniach środowiska leśnego. *Czasopismo Techniczne* 2-Ś: 273-279.
- Sung Q., Chen Y., Chao P. 1998. Spatial variation of fractal parameters and its geological implication. *TAO* 9 (4): 655-672.
- Vlcek J., Cheung E. 1986. Fractal analysis of leaf shapes. *Canadian Journal of Forest Research* 16: 124-127.

- Walker D., Kenkel N. 1998. Fractal analysis of spatio-temporal dynamics in boreal forest landscapes. *Abstracta Botanica* 22: 13-28.
- Weinacker H., Koch B., Weinacker R. 2004. TREESVIS: A Software System for Simultaneous ED-Real-Time Visualisation of DTM, DSM, Laser Raw Data, Multispectral Data, Simple Tree and Building Models. Proceedings of the ISPRS working group VIII/2, Freiburg, 3-6 2004. 90-95.
- Wen R., Sinding-Larsen R. 1997. Uncertainty in fractal dimensions estimated from power spectra and variograms. *Mathematical Geology* 29 (6): 727-753.
- Zeide B., Pfeifer P. 1991. A method for estimation of fractal dimension of tree crowns. *Forest Science* 37: 1253-1265.
- Zhou G., Lam N. 2005. A comparison of fractal dimension estimators based on multiple surface generation algorithms. *Computer and Geosciences* 31: 1260-1269.
- Zhu X., Nilanchal P., Zuo W., Yang X. 2006. Fractal analysis applied to spatial structure of China's vegetation. *China's Geographic Science* 16: 48-55.

SUMMARY

Fractal dimension as a tool for description of forest structure complexity

Fractal dimension is used in environment research for assessment of shape complexity of line and surface objects, e.g. parts of plants, canopy of single trees and forest stand canopy.

The paper describes the procedure of calculation of surface fractal dimension based on using large raster datasets. One among other important sources of raster data is airborne LIDAR data, which is used also in forestry. In the research canopy height model (CHM) and surface fractal dimension are used for assessment of canopy shape complexity of pine and oak forest stands. Three investigations were made. First, dependence between size of the pixels of raster image and fractal dimension of canopy surface presented on that image was recognized. Second, dependence between fractal dimension and age of a forest stand, and third, dependence between fractal dimension and species of trees in stand. Results show that fractal dimensions of canopy surface of stands with the same species but with different age are different. Fractal dimension of canopy surface strongly depends on size of the pixels of raster image used for storing canopy height model.