

**METODY PRZYROSTOWE W PRZETWARZANIU
DANYCH BATYMETRYCZNYCH –
ANALIZA BŁĘDÓW PRZETWARZANIA DLA
ZAPROPONOWANYCH MODELI MATEMATYCZNYCH**

**INCREMENTAL METHODS
IN THE BATHYMETRIC DATA PROCESSING –
PROCESSING ERRORS ANALYSIS FOR PROPOSED
MATHEMATICAL MODELS**

Janusz Ogrodniczak

Instytut Nawigacji i Hydrografii Morskiej, Akademia Marynarki Wojennej

Słowa kluczowe: przetwarzanie danych batymetrycznych, modulacja delta
Keywords: bathymetric data processing, delta odulation

Wprowadzenie

W artykułach (Ogrodniczak, 2006, 2006a) zostały zaproponowane modele matematyczne wykorzystujące metody przyrostowe w przetwarzaniu informacji o przebiegu zmienności kształtu dna morskiego wzdłuż profilu pomiarowego. Modele te zostały zaimplementowane w aplikacji autorskiej, która posłużyła do przeprowadzenia badań symulacyjnych. Rezultaty badań posłużyły do porównania przedstawionych modeli matematycznych oraz oceny możliwości ich wykorzystania w przypadku różnego ukształtowania dna. Realizacja programowa pozwoliła w prosty sposób przebadać różne kombinacje kryteriów oceny dokładności dopasowania przebiegu aproksymującego do sygnału wejściowego oraz metod aproksymacji, w stosunku do których można stosować zarówno logikę dwuwartościową, jak i czterowartościową przy jednoczesnej zmianie parametrów przetwarzania. W celu zapewnienia możliwości porównywania uzyskiwanych rezultatów, zmianie ulegały jedynie kształty przebiegu wejściowego, a dla wybranego przebiegu wejściowego badano wpływ różnych wartości amplitudy przebiegu. Założono, iż okres lub czas narastania, zależnie od typu przebiegu wejściowego, będzie miał wartość stałą dla wszystkich prób.

Wskaźniki do oceny jakości przetwarzania

Aby umożliwić porównanie efektów działania algorytmów opartych o wspomniane modele matematyczne zdefiniowane zostały następujące wskaźniki:

- błąd maksymalny,
- średnia wartość błędu,
- średnia względna wartość błędu,
- współczynnik korelacji,
- liczba restartów,
- ilościowy rozkład błędów.

Do ich wyliczenia wykorzystane zostały badania symulacyjne. Nie ograniczały się one jedynie do przebadania danych pochodzących z rzeczywistych fragmentów dna morskiego, ale – w celu zapewnienia bardziej zróżnicowanego materiału badawczego – przygotowane zostały zestawy danych testowych, wygenerowane w oparciu o krzywe matematyczne. Takie podejście pozwoliło uzyskać zbiory punktów, dla których wartości głębokości spełniają założenia dotyczące równomierności i dokładności oraz o narzuconej rozdzielczości poziomej i pionowej. Zgodnie z przyjętymi założeniami badania symulacyjne zostały ograniczone tylko do przetwarzania informacji o wartościach głębokości stąd zestawy danych testowych zawierają tylko wartości głębokości. Pominęto informację o pozycji, przyjmując, że zmiany pozycji cechują się mniejszą dynamiką niż zmiany głębokości, a więc otrzymane wyniki będą również reprezentatywne w tym przypadku.

Zastosowanie techniki badań symulacyjnych w odniesieniu do wyznaczania błędów przetwarzania dla programowej realizacji układu przyrostowego kodowania danych batymetrycznych pozwoliło na znaczne poszerzenie zakresu oraz przyspieszenie procesu badań. Ma to również swoje uzasadnienie ekonomiczne.

Analiza wyników badań symulacyjnych

Kwantowanie dwuwartościowe

Równomierna aproksymacja schodkowa

Analizując wyniki badań symulacyjnych można stwierdzić, iż w przypadku stosowania równomiernej aproksymacji schodkowej dla kwantowania dwuwartościowego różnice pomiędzy wynikami uzyskiwanymi przy wykorzystaniu kryterium różnicy wartości chwilowych, a kryterium minimalnej odległości krzywych są nieistotne (Ogrodniczak, 2006). Natomiast można zauważyć niewielką przewagę kryterium minimalnej odległości krzywych przy porównywaniu wartości współczynnika korelacji (dla wzorców sinusoidalnych i trójkątnych sytuacja odwrotna) (Ogrodniczak, 2007).

Adaptacyjna aproksymacja schodkowa

W przypadku adaptacyjnej aproksymacji schodkowej jej przydatność zależy od ukształtowania fragmentu dna morskiego, z którego przetwarzamy dane batymetryczne. Największą poprawę rezultatów przetwarzania danych batymetrycznych, w stosunku do równomiernej aproksymacji schodkowej, można zaobserwować dla dna morskiego o dużej dynamice zmian. Poprawa wyników jest szczególnie widoczna dla przypadków, w których wielkość kroku kwantowania nie jest dobrze dobrana, lub nie może być tak dobrana ze względu na duże zróżnicowanie ukształtowania dna. Natomiast stosowanie adaptacyjnej aproksymacji schod-

kowej w przypadku dna o małej amplitudzie zmian głębokości i dobrze dobranej wartości kroku kwantowania może dać gorsze rezultaty niż dostosowanie równomiernej aproksymacji schodkowej. Jest to efekt naturalny dla tej metody, gdyż zgodnie z modelem matematycznym nie istnieje możliwość rozróżnienia pomiędzy dobrze dopasowanym przebiegiem aproksymującym, a nienadającym, który wymaga uruchomienia mechanizmu adaptacyjnego.

Podobnie, jak w przypadku równomiernej aproksymacji schodkowej, również i w tym różnice pomiędzy stosowaniem kryterium różnicy wartości chwilowych, a kryterium minimalnej odległości krzywych są nieznaczne, jeśli chodzi o wartości błędów dla jednej próbki, dla większej liczby próbek błędy średnie są mniejsze dla kryterium minimalnej odległości krzywych.

Aproksymacja odcinkowa o stałym przyroście kąta nachylenia krzywej aproksymujące

Podobnie, jak w przypadku obu wcześniej opisywanych typów aproksymacji, także i w tym różnice pomiędzy rezultatami możliwymi do osiągnięcia przy wykorzystaniu obu kryteriów oceny dokładności dopasowania przebiegu aproksymującego do kształtu dna są podobne. Dla tego typu aproksymacji udało się osiągnąć najlepsze wyniki dla większości testów. Tylko dla wzorców testowych o kształcie sinusoidalnym i trójkątnym, o największej wartości międzyszczytowej oraz dla wzorca piłokształtnego lepsze wyniki dało zastosowanie innych typów aproksymacji. Należało się spodziewać takich rezultatów biorąc pod uwagę dużą bezwładność algorytmu aproksymacji odcinkowej o stałym przyroście kąta nachylenia krzywej aproksymującej, w odniesieniu do zmian kierunku zmian głębokości.

Wpływ liczby próbek uprzednich

Zwiększanie liczby próbek uprzednich uwzględnianych przy wyznaczaniu wartości sygnału wyjściowego w danym kroku przetwarzania, zazwyczaj, powoduje zmniejszenie wartości błędów. Jest to szczególnie widoczne dla aproksymacji odcinkowej o stałym przyroście kąta nachylenia krzywej aproksymującej przy zastosowaniu kryterium minimalnej odległości krzywych. Odwrotny efekt występuje dla aproksymacji odcinkowej o stałym przyroście kąta nachylenia krzywej aproksymującej przy zastosowaniu kryterium minimalnej odległości krzywych. Rezultaty osiągnięte w tym przypadku dla pojedynczej próbki są porównywalne z rezultatami osiąganymi dla tego typu aproksymacji i dwóch lub większej liczby próbek uprzednich.

Należy zwrócić uwagę, iż zwiększenie liczby próbek uprzednich może prowadzić do zwiększenia wartości błędów maksymalnych. Jest to efekt, zgodny z oczekiwaniami, gdyż analiza, nie tylko ostatniej wartości głębokości, ale i kilku poprzednich ma za zadanie lepsze dopasowanie przebiegu aproksymującego do większego fragmentu dna, a nie tylko w stosunku do jednego punktu pomiarowego. Stąd możliwe jest zwiększenie błędu dla pojedynczego punktu na korzyść mniejszego błędu sumarycznego dla analizowanych punktów.

Sterowanie mechanizmem adaptacyjnym

Podobnie, jak zwiększenie liczby próbek uprzednich, także zwiększenie liczby próbek uwzględnianych przy sterowaniu mechanizmem adaptacyjnym prowadzi do poprawy rezultatów przetwarzania.

Kwantowanie czterowartościowe

Wyniki symulacji, uzyskane z wykorzystaniem kwantowania czterowartościowego, są trudniejsze do interpretacji ze względu na dodatkowy wskaźnik, który należy uwzględnić przy porównywaniu – liczbę restartów. Porównanie rezultatów uzyskiwanych dla różnych kombinacji metod aproksymacji i kryteriów opisanych przez autora (Ogrodniczak, 2006) – stosowanych przy przetwarzaniu danych batymetrycznych i kwantowaniu czterowartościowym – wskazuje, że występujące tu tendencje nie różnią się zasadniczo od tendencji występujących dla kwantowania dwuwartościowego.

W przypadku wzorców testowych o małej wartości międzyszczytowej, dla których nie występują szybkie zmiany nachylenia dna, często okazuje się, że samo dodanie trzeciej wartości, oznaczającej brak zmian w przebiegu aproksymującym, daje wyraźne zmniejszenie wartości błędów. W pozostałych przypadkach ta metoda kwantowania pozwala na utrzymanie błędów maksymalnych na akceptowalnym poziomie oraz zmniejszenie błędów średnich. W przypadku wyjątkowo źle dobranych parametrów kwantowania otrzymujemy dużą liczbę restartów, maleje współczynnik kompresji, nie dopuszczamy jednak do wystąpienia zbyt dużych rozbieżności pomiędzy kształtem dna, a przebiegiem aproksymującym.

Szczególnie zastosowanie kwantowania czterowartościowego dla funkcji testowych o dużej zmienności nachyleń z bocz (piła, eksponencjalna, sinc) i o dużej wartości międzyszczytowej, uwidacznia olbrzymią poprawę w stosunku do kwantowania dwuwartościowego o tych samych parametrach. Nadal najlepsze rezultaty są osiągane, zazwyczaj, dla aproksymacji odcinkowej o stałym przyroście kąta nachylenia krzywej aproksymującej i kryterium różnicy wartości chwilowych. Podobnie, jak w przypadku kwantowania dwuwartościowego, także w tym można zaobserwować pozytywny wpływ zwiększenia liczby próbek uprzednich na wyniki przetwarzania. Szczególnie widoczne jest zmniejszenie liczby restartów przy zwiększeniu liczby próbek uprzednich do dwóch, dalsze zwiększanie ich liczby rzadko powoduje znaczącą poprawę rezultatów (w tym przypadku zarówno zmniejszenie błędów, jak i zmniejszenie liczby restartów, albo niewielkie zwiększenie wartości błędów przy jednoczesnym bardzo znaczącym zmniejszeniu liczby restartów). Podobne tendencje występują również w zakresie błędów przetwarzania.

Rysunki 1 i 2 stanowią ilustrację analizy wyników symulacji dla przetwarzania danych batymetrycznych metodami przyrostowymi z wykorzystaniem kwantowania dwuwartościowego. Natomiast rysunki 3 i 4 ilustrują wpływ zastosowania kwantowania czterowartościowego na przetwarzanie danych batymetrycznych w tych samych warunkach. Wszystkie rysunki stanowią przykład dla wzorca testowego opartego o funkcję sinc. W tabelach 1 i 2 przedstawiono symbole zastosowane na rysunkach. Różne kolory symboli na rysunkach oznaczają badania symulacyjne wykonywane dla różnych parametrów kwantowania.

Tabela. 1. Symbole dla aproksymacji schodkowej

Lp.	Liczba pomiarów uprzednich	1	2	3
1.	Równomierna aproksymacja schodkowa Kryterium różnicy wartości chwilowych	△	△	△
2.	Równomierna aproksymacja schodkowa Kryterium odległości krzywych (całkowe)	○	○	○
3.	Adaptacyjna aproksymacja schodkowa (2 pomiary) Kryterium różnicy wartości chwilowych	+	+	+
4.	Adaptacyjna aproksymacja schodkowa (4 pomiary) Kryterium różnicy wartości chwilowych	×	×	×
5.	Adaptacyjna aproksymacja schodkowa (2 pomiary) Kryterium odległości krzywych (całkowe)	□	□	□
6.	Adaptacyjna aproksymacja schodkowa (4 pomiary) Kryterium odległości krzywych (całkowe)	◇	◇	◇

Tabela. 2. Symbole dla aproksymacji odcinkowej
o stałym przyroście kąta nachylenia krzywej aproksymującej

Lp.	Liczba pomiarów uprzednich	1	2	3
1.	Aproksymacja odcinkowa o stałym przyroście kąta nachylenia krzywej aproksymującej. Kryterium różnicy wartości chwilowych	△	△	△
2.	Aproksymacja odcinkowa o stałym przyroście kąta nachylenia krzywej aproksymującej. Kryterium odległości krzywych (całkowe)	○	○	○

Rezultaty badań z wykorzystaniem rzeczywistych danych testowych

Poza wzorcami wygenerowanymi, przy użyciu przygotowanej aplikacji, do przeprowadzenia badań symulacyjnych wykorzystano wyniki pomiarów z akwenów rzeczywistych.

W wyniku badań symulacyjnych otrzymane dla rzeczywistych próbek dna z dwóch różnych akwenów, które zostały przeanalizowane, podobnie jak wyniki symulacji otrzymanych przy użyciu wygenerowanych wzorców testowych. Opisane w nim wyniki analizy mogą być również odniesione do wyników symulacji opartych na rzeczywistych próbkach dna.

Wejście do portu:

- Dla kwantowania dwuwartościowego minimalna wartość błędu maksymalnego wynosi 247 cm dla równomiernej aproksymacji schodkowej i kryterium różnicy wartości chwilowych przy czterech próbkach (błąd średni wynosi 8,11 cm, dla jednej i dwóch próbek błędy maksymalne 278 cm i 262 cm odpowiednio). Minimalna wartość błędu średniego wynosi 2,07 cm dla aproksymacji odcinkowej o stałym przyroście kąta nachylenia krzywej aproksymującej i kryterium minimalnej odległości krzywych przy czterech próbkach (błąd maksymalny wynosi 278 cm, błędy średnie dla jednej i dwóch próbek 27,84 cm i 2,30 cm odpowiednio).

- Dla kwantowania czterowartościowego wartość błędu maksymalnego osiąga wartość 9 cm – dla tych samych warunków przetwarzania, jak dla minimalnego błędu maksymalnego powyżej – przy minimalnej liczbie restartów, wynoszącej 2821, to jest 0,25% całkowitej liczby punktów. Błąd średni 3,97 cm przy czterech próbkach uprzednich, dla dwóch błęd maksymalny taki sam, błąd średni minimalnie większy.

Profil 2172

- Dla kwantowania dwuwartościowego minimalna wartość błędu maksymalnego wynosi 62 cm dla adaptacyjnej aproksymacji schodkowej i kryterium różnicy wartości chwilowych przy czterech próbkach. Błąd średni osiąga wartość minimalną 3,17 cm dla aproksymacji odcinkowej o stałym przyroście kąta nachylenia krzywej aproksymującej i kryterium różnicy wartości chwilowej przy czterech próbkach. Dla dwóch próbek wartość błędu średniego jest minimalnie większa, natomiast dla jednej próbki jest ona prawie dziesięciokrotnie większa.
- Dla kwantowania czterowartościowego wartość błędu maksymalnego osiąga wartość 9 cm dla liniowej aproksymacji schodkowej i kryterium różnicy wartości chwilowych i dwóch próbek. Przy minimalnej liczbie restartów, równej 56 (0,53%), błąd średni wynosi 4,03 cm, natomiast przy wzroście liczby restartów do 68 (0,64%) dla czterech próbek błąd średni spada do 3,03 cm przy niezmiennym błędzie maksymalnym.

Profil 2229

- Dla kwantowania dwuwartościowego minimalna wartość błędu maksymalnego wynosi 56 cm dla liniowej aproksymacji schodkowej i kryterium różnicy wartości chwilowych i czterech próbek. Minimalna wartość błędu średniego wynosi 4,40 cm dla aproksymacji odcinkowej o stałym przyroście kąta nachylenia krzywej aproksymującej i kryterium różnicy wartości chwilowej i czterech próbkach. Dla dwóch próbek błąd średni jest minimalnie większy, dla jednej próbki prawie ośmiokrotnie większy.
- Dla kwantowania czterowartościowego wartość błędu maksymalnego osiąga wartość 9 cm dla tych samych warunkach przetwarzania, co powyżej i 311 restartach (1,64%). Błąd średni wynosi 3,96 cm, dla dwóch i czterech próbek rezultaty są identyczne.

Profil 2249

- Dla kwantowania dwuwartościowego minimalna wartość błędu maksymalnego wynosi 84 cm dla adaptacyjnej aproksymacji schodkowej i kryterium minimalnej odległości krzywych i czterech próbek. Minimalna wartość błędu średniego wynosi 4,34 cm dla aproksymacji odcinkowej o stałym przyroście kąta nachylenia krzywej aproksymującej i kryterium różnicy wartości chwilowej przy czterech próbkach. Dla dwóch próbek błąd średni jest minimalnie większy, dla jednej jest ponad siedmiokrotnie większy.
- Dla kwantowania czterowartościowego wartość błędu maksymalnego osiąga wartość 9 cm dla tych samych warunkach przetwarzania, co powyżej, i 286 restartach (2,23%). Błąd średni 3,95 cm, dla dwóch i czterech próbek rezultaty są identyczne.

W przypadku kwantowania czterowartościowego dla jednej próbki błędy są niewiele większe, ale liczba restartów znacznie większa niż dla dwóch, lub czterech próbek.

Biorąc pod uwagę liczbę restartów występujących dla rzeczywistych danych testowych, wartości współczynników kompresji dla wartości głębokości uzyskanych dla poszczególnych zestawów danych przedstawiają się następująco:

– Wejście do portu	–	1:15,38
– Profil 2172	–	1:14,75
– Profil 2229	–	1:12,67
– Profil 2249	–	1:11,79

Maksymalna wartość współczynnika kompresji, możliwa do uzyskania przy przetwarzaniu danych batymetrycznych z wykorzystaniem metody kwantowania czterowartościowego, wynosi 1:16. Zatem wyniki uzyskane dla danych rzeczywistych są nieznacznie niższe, ale zastosowanie tej metody zapewnia utrzymanie wartości błędu maksymalnego na określonym poziomie. Procentowa wartość błędu maksymalnego w stosunku do maksymalnej różnicy głębokości – wartość bezwzględna głębokości nie wpływa na wartości błędów – dla poszczególnych zestawów danych przedstawiają się następująco:

– Wejście do portu	–	0,79%
– Profil 2172	–	0,13%
– Profil 2229	–	0,13%
– Profil 2249	–	0,10%

Podsumowanie

Przedstawiona powyżej analiza wyników badań symulacyjnych wskazuje, iż wykorzystanie więcej niż jednej próbki w mechanizmie predykcji powoduje, w większości przypadków, wyraźne zmniejszenie błędów przetwarzania danych batymetrycznych z zastosowaniem metod przyrostowych, zarówno dla kwantowania dwu, jak i czterowartościowego. Wyrażna jest także w tym względzie przewaga kwantowania czterowartościowego nad dwuwartościowym.

Literatura

- Gaździcki J., 2001: Leksykon geomatyczny. PTIP, Warszawa.
- Haykin S., 2000: Systemy telekomunikacyjne. WKŁ, Warszawa.
- Klonowicz Z., Zurzycki Z., 1983: Teoria obwodów. PWN, Warszawa.
- Krak M.-J., Ormeling F., 1998: Kartografia. Wizualizacja danych przestrzennych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Magnuszewski A., 1999: GIS w geografii fizycznej. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Marven C., Ewers G., 1999: Zarys cyfrowego przetwarzania sygnałów. WKŁ, Warszawa.
- Ogrodniczak J., 2005: Systemy przetwarzania danych batymetrycznych z wykorzystaniem modulacji sigma-delta. Prace naukowe Politechniki Radomskiej, *Elektryka* 1 (9) 2005, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom.
- Ogrodniczak J., 2006: Metody przyrostowe w przetwarzaniu danych batymetrycznych – kryteria oceny dokładności dopasowania przebiegu aproksymującego do sygnału wejściowego, *Roczniki Geomatyki*, Tom IV, Zeszyt 3, PTIP, Warszawa.
- Ogrodniczak J., 2006a: Incremental Methods in Bathymetric Data Processing – Bathymetric Data Quantisation, Materiały VII Międzynarodowej Konferencji „Transport Systems Telematics”, 25-27 października, Katowice-Ustroń. Section III, Chapter 10.

Ogrodniczak J., 2007: The Software Simulator of the Measurement Area in Evaluating Errors in Bathymetric Data Processing.

Oppenheim A.V., 1982: Sygnały cyfrowe. WNT, Warszawa.

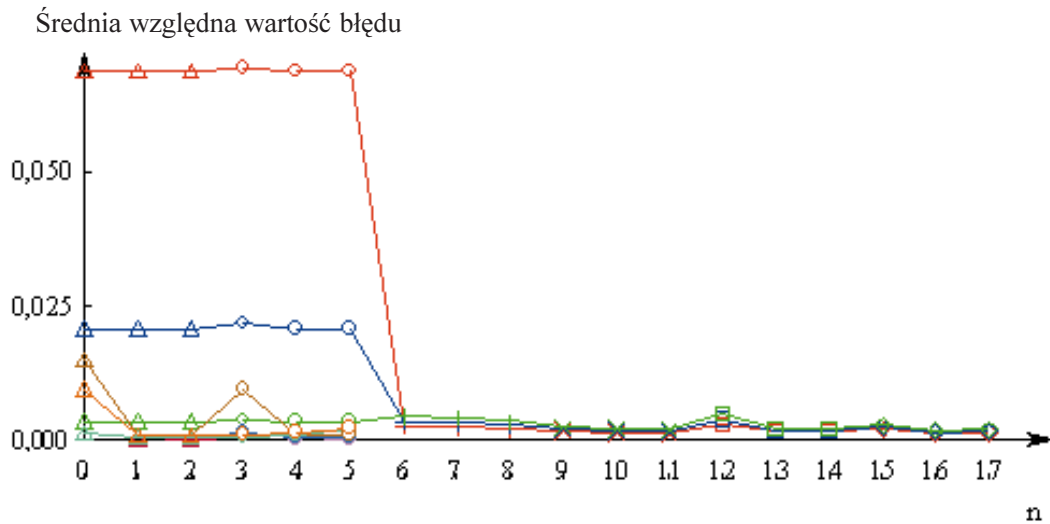
Wojnar A., 1980: Teoria sygnałów. WNT, Warszawa.

Summary

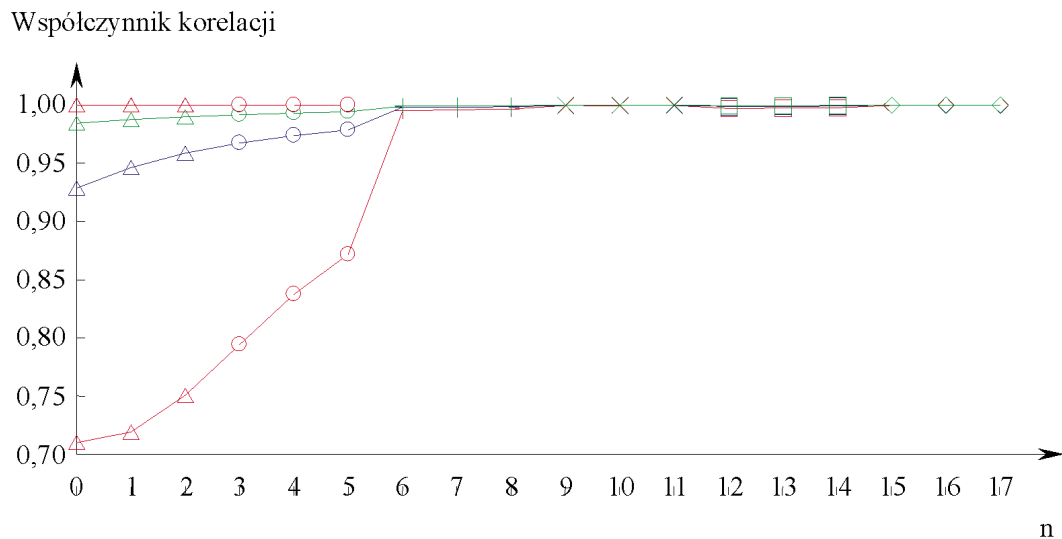
In the papers [1, 2] mathematical models using incremental methods in processing of information about the course of variability in the shape of sea bed along the measurement profile were proposed. These models were implemented in author's application and served simulation tests. The results of the tests were used for comparisons and for assessment of possibilities to use them in the case of various shapes of the seabed.

1. Janusz Ogrodniczak, „Metody przyrostowe w przetwarzaniu danych batymetrycznych – kryteria oceny dokładności dopasowania przebiegu aproksymującego do sygnału wejściowego”, (Incremental methods in the bathymetric data processing – accuracy criteria for the approximation of input signal) *Roczniki Geomatyki* (Annals of Geomatics) 2006, Vol. IV, Number 3, Warszawa.
2. Janusz Ogrodniczak, „Incremental Methods in Bathymetric Data Processing – Bathymetric Data Quantisation”, *Advances in Transport Systems Telematics*, Section III, Chapter 10, Katowice, 2006.

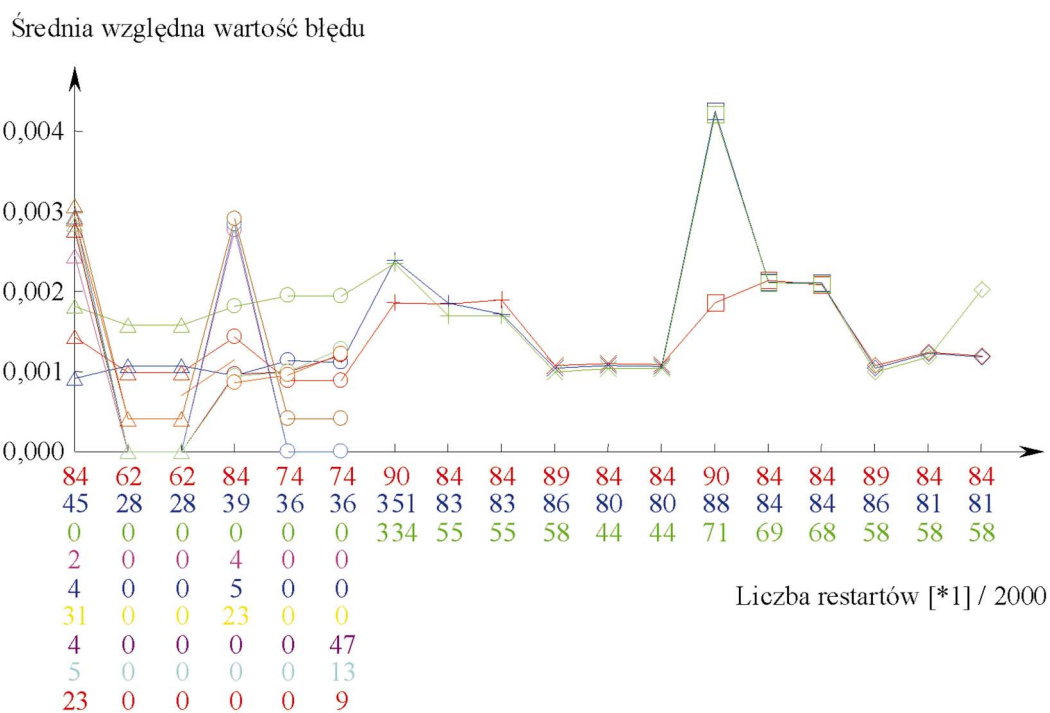
Janusz Ogrodniczak
j.ogrodniczak@amw.gdynia.pl
tel. (58) 626 29 13



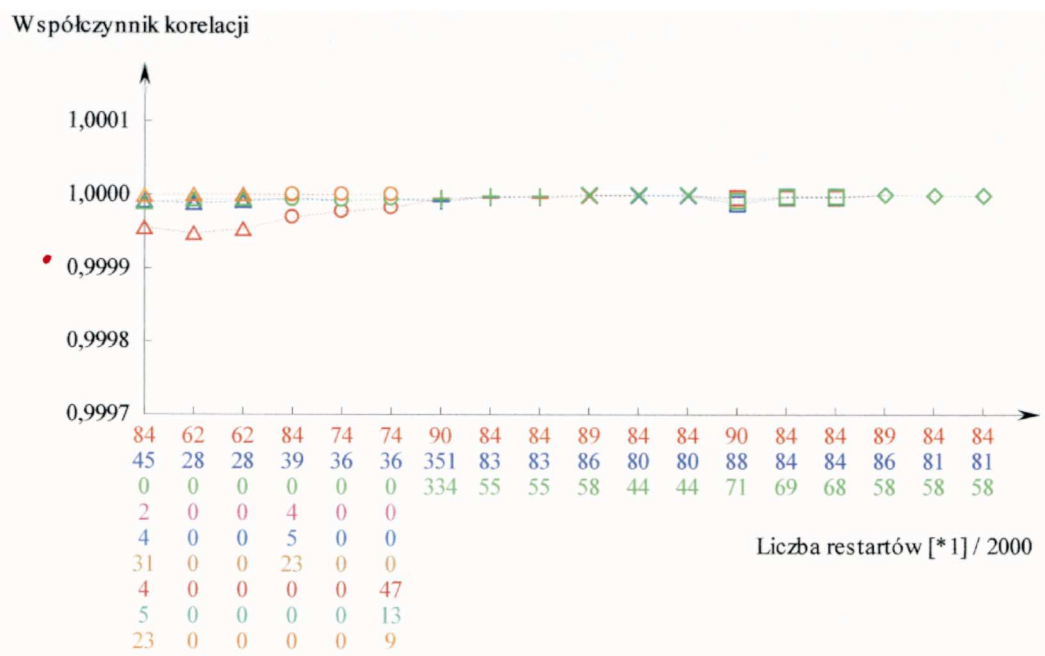
Rys. 1. Średnia względna wartość błędu dla kwantowania dwuwartościowego, dla różnych wartości parametrów kwantowania i różnej liczby próbek – przykład dla wzorca testowego opartego o funkcję sinc



Rys. 2. Współczynnik korelacji dla kwantowania dwuwartościowego, dla różnych wartości parametrów kwantowania i różnej liczby próbek – przykład dla wzorca testowego opartego o funkcję sinc



Rys. 3. Średnia względna wartość błędu dla kwantowania czterwartościowego, z uwzględnieniem liczby restartów, dla różnych wartości parametrów kwantowania i różnej liczby próbek – przykład dla wzorca testowego opartego o funkcję sinc



Rys. 4. Współczynnik korelacji dla kwantowania czterwartościowego, z uwzględnieniem liczby restartów, dla różnych wartości parametrów kwantowania i różnej liczby próbek – przykład dla wzorca testowego opartego o funkcję sinc