

Barbara BUKOWSKA-BELNIAK, Maciej DWORNIK, Andrzej LEŚNIAK

AGH AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, WYDZIAŁ GEOLOGII, GEOFIZYKI I OCHRONY ŚRODOWISKA,
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Porównanie metod redukcji szumu dla środowiskowych obrazów termograficznych

Mgr inż. Barbara BUKOWSKA-BELNIAK

Absolwentka Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (2006). Ukończyła studia podyplomowe „Termografia w podcierwienu” na Politechnice Łódzkiej. Zainteresowania badawcze to termografia, badania termograficzne, analiza i przetwarzanie obrazów cyfrowych (w szczególności termicznych), modelowania ciepła. Badania ukierunkowane są na zastosowania środowiskowe.



e-mail: bukowska@agh.edu.pl

Mgr inż. Maciej DWORNIK

Absolwent Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (2007), asystent w Katedrze Geoinformatyki i Informatyki Stosowanej na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH. Zainteresowania badawcze koncentrują się wokół wykorzystania metod obliczeniowych w tomografii sejsmicznej oraz zastosowania metod analizy obrazów w naukach o Ziemi. Jest autorem kilkunastu publikacji naukowych i wystąpień konferencyjnych.



e-mail: dwornik@geol.agh.edu.pl

Prof. dr hab. inż. Andrzej LEŚNIAK

Kierownik Katedry Geoinformatyki i Informatyki Stosowanej na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH w Krakowie. Wykształcenie i kolejne stopnie uzyskiwał w dziedzinie Nauk o Ziemi w specjalnościach Geofizyka i Geoinformatyka. Specjalista w zakresie metod monitoringu środowiskowego, sejsmologii inżynierskiej, teorii sygnałów i geoinformatyce (szczególnie w zastosowaniach technik satelitarnych SAR).



e-mail: lesniak@agh.edu.pl

Streszczenie

W artykule przedstawione zostały standardowe oraz nowoczesne metody redukcji szumu dla termograficznych obrazów cyfrowych. Pokazano działanie kilku rodzajów filtracji różniących się zasadą działania: począwszy od metod działających w domenie przestrzeni lub częstotliwości do metod przestrzenno-częstotliwościowych (transformata falkowa, krzywkowa). Metody odszumiania przetestowane zostały zarówno na przykładzie temperaturowych obrazów syntetycznych, jak i na rzeczywistych środowiskowych obrazach termicznych.

Słowa kluczowe: środowiskowe obrazy termograficzne, redukcja szumu, transformacja falkowa, transformacja krzywkowa.

Comparison of noise reduction methods for environmental thermal images

Abstract

Thermography, as a fast and remote method of temperature imaging, can be used in environmental process monitoring [1, 2]. The recorded thermal images are noisy and low contrast. In Section 2 of the paper standard and modern methods of noise reduction for digital images are presented. The effect of several different types of filtration (operations in space or frequency domain [5, 6, 7]) and spatial-frequency transforms (wavelet transform (Fig. 1) [8] and curvelet transform [9]) are shown in Section 3. Noise reduction methods were tested both on synthetic temperature data examples and environmental thermal images. In order to examine the noise level of a camera, after the camera software corrections, the experiment (Fig. 2) was conducted. Fig. 3 shows the results of synthetic image denoising. Tab. 1 lists the mean square error for all the presented methods. In Section 4 the results of all the noise reduction methods for environmental images are presented (Figs. 4, 5). The best results for synthetic images were obtained for the wavelet transform using Daubechies wavelet family. This method required adapting several parameters. For both environmental images the Butterworth filtering, the wavelet and curvelet methods gave the best results.

Keywords: environmental thermal images, denoising, wavelet transform, curvelet transform.

1. Wstęp

Termografia jako zdalna metoda oceny rozkładu temperatury na powierzchni badanego obiektu [1] jest wykorzystywana do obserwacji różnego rodzaju, naturalnych lub wywołanych wskutek działalności człowieka, środowiskowych procesów cieplnych. Procesy takie mają wpływ na stan środowiska. Procesy antropogeniczne mogą doprowadzić np. do zanieczyszczenia środowiska naturalnego, czego przykładem mogą być wycieki ścieków, olejów i innych nieczystości, nielegalne składowiska odpadów, samozapłonny hałd węglowych [2]. Badania termograficzne takich procesów są trudne do zrealizowania, ponieważ przeważnie wymagają specjalnych warunków atmosferycznych [3]. Pomimo tego badania termograficzne pozwalają zlokalizować anomalie termiczne, a następnie je monitorować.

Powstałe w wyniku badań terenowych środowiskowe obrazy termograficzne charakteryzują się niską rozdzielczością przestrzenną oraz niewielkim kontrastem temperatur. Lokalizacja anomalii termicznych jest dodatkowo utrudniona przez występowanie szumu różnego pochodzenia. Szum obecny na obrazach termicznych może mieć związek z niejednorodnym (mimo standardowej korekcji producenta) działaniem detektorów, wpływem warunków zewnętrznych, a także specyfiką obserwowanego obiektu. Problemy dotyczące dokładności pomiarów termograficznych oraz błędy pomiarów zostały opisane w [4]. W niniejszym artykule zaprezentowano metody redukcji szumu dla zarejestrowanych obrazów termicznych z uwzględnieniem ich działania na krawędzie obserwowanych anomalii termicznych.

2. Zastosowane metody redukcji szumu

Procedura odszumiania obrazów termograficznych odbywała się z wykorzystaniem kilku metod przetwarzania obrazów cyfrowych:

- w domenie przestrzeni: filtracja medianowa, filtracja adaptacyjna;
- w domenie częstotliwości: filtracja dolnoprzepustowa Butterwortha, filtracja dolnoprzepustowa Gaussa;
- w domenie przestrzenno-częstotliwościowej: transformacja falkowa, krzywkowa.

Filtracja medianowa [5] jest przykładem filtru nieliniowego. Jego działanie polega na przypisaniu każdemu pikselowi obrazu wartości mediany z jego otoczenia. Dzięki temu eliminowane są ekstremalne wartości z obrazu, przy zachowaniu ostrości krawędzi. Jego główną zaletą jest wysoka skuteczność w eliminacji szumu impulsowego. Działanie filtru optymalizuje się poprzez wybór wielkości otoczenia i/lub wielokrotne wykonywanie filtracji.

Filtracja adaptacyjna (filtracja Wienera) odbywa się w dwóch krokach [6]. W pierwszym dla każdego piksela obrazu obliczana jest średnia μ i wariancja σ^2 w otoczeniu piksela. W drugim kroku obliczana jest wartość piksela centralnego obrazu $I(x,y)$ według równania 1:

$$I^{new}(x,y) = \mu + \frac{\sigma^2 - v^2}{\sigma^2} (I(x,y) - \mu), \quad (1)$$

gdzie: v^2 – założona *a priori* wariancja szumu w otoczeniu piksela.

Wariancja w otoczeniu danego piksela na ogół jest proporcjonalna do prawdopodobieństwa przynależności danego punktu do krawędzi. Im większe prawdopodobieństwo, że dany piksel należy do krawędzi obiektu, tym mniejsza jest moc uśredniania. Jeżeli wariancja jest niewielka, bardziej prawdopodobne jest, że dany piksel należy do jednorodnego obszaru. Wtedy moc uśredniania jest większa, gdyż różnice w wartościach piksela i średniej z otoczenia są traktowane jako szum.

W domenie częstotliwości wykorzystano dwie maski filtrów dolnoprzepustowych: Butterwortha (BF) i Gaussa (GF). Charakterystyki amplitudowe dla obu filtrów dane są następującymi wzorami [7]:

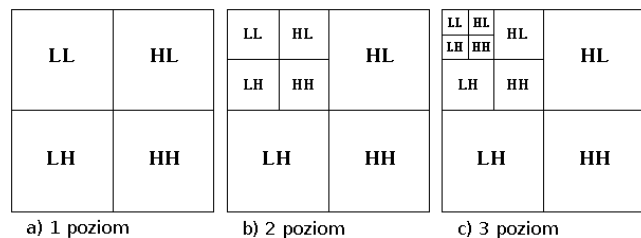
$$BF(x,y) = \frac{1}{1 + (D(x,y)/D_0)^{2n}}, \quad (2)$$

$$GF(x,y) = \exp\left(\frac{-D(x,y)^2}{2 \cdot D_0^2}\right), \quad (3)$$

gdzie: $D(x,y)$ – odległość piksela o współrzędnych (x,y) od środka obrazu.

Filtracja odbywa poprzez wymnożenie widma dwuwymiarowej transformaty Fouriera obrazu (poprzedzone przesunięciem energii transformaty obrazu do jej środka, ang. *Fftshift* [5]) przez daną maskę filtru, a następnie powrót do domeny przestrzeni. Dla obu masek założono, że filtr nie zmienia widma fazowego obrazu. Filtr Butterwortha opisany jest z użyciem dwóch wartości parametrów: częstotliwości odcięcia D_0 i rzędu filtru n . Częstotliwość odcięcia definiuje jako część widma sygnału zostanie zachowana. Rząd filtru opisuje stromość zbocza filtru. W przypadku filtru Gaussa określana jest wartość odchylenia (szerokość pasma przepuszczalnia).

Transformacja falkowa (ang. *Wavelet Transform*) umożliwia wielorozdzielczą analizę obrazu [8]. Obraz dekomponowany jest na współczynniki aproksymujące (reprezentujący aproksymację LL) oraz współczynniki detali (komponenty detaliczne: pionowy LH, poziomy HL i przekątny HH). Wynik dekompozycji zależy od rodzaju użytej falki oraz liczby poziomów dekompozycji: im więcej poziomów tym więcej jest wydobywanych detali obrazu. Schemat dekompozycji na różnych poziomach przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat dwuwymiarowej dekompozycji falkowej na kolejnych poziomach [8]

Fig. 1. Scheme of two-dimensional wavelet decomposition on each level [8]

Zastosowanie transformaty falkowej do redukcji szumu na obrazach cyfrowych sprowadza się do usunięcia współczynników

detali na odpowiednich poziomach dekompozycji (ang. *tree based wavelet denoising*). Oprócz wspomnianego rodzaju falki oraz liczby poziomów dekompozycji, wpływ na rezultat redukcji szumu ma wiele parametrów. Należy określić sposób progowania współczynników detali: łagodne (ang. *soft*) lub ostre (ang. *hard*) oraz zakres progowania na każdym poziomie dekompozycji. Należy również określić, które współczynniki będą zerowane przy transformacji odwrotnej (LH, HL lub LL).

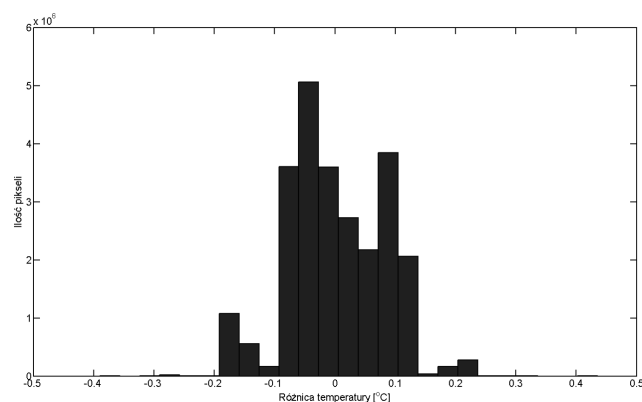
Transformacja krzywkowa (ang. *Curvelet Transform*) oparta jest na transformacie Ridgelet. Są one rozwinięciem transformaty falkowej [9]. Twórcy metody krzywkowej wprowadzili dodatkowy parametr orientacji, a także niejednorodne prawo skalowania. Dzięki temu uzyskano większą rozdzielczość przestrzennie-częstotliwościową oraz zachowaną ostrość krawędzi. Obliczenia przeprowadzono w oparciu o przygotowany przez twórców metody algorytm. Umożliwia on jednocześnie porównanie działania metody z transformacją falkową dla „najlepszej skali” [9].

3. Przeprowadzone symulacje

Przedstawione metody odszumiania zostały przetestowane na dwóch rodzajach danych: syntetycznych i rzeczywistych danych pomiarowych. Wszelkie obliczenia przeprowadzane były na danych temperaturowych (w stopniach Celsjusza). Dane syntetyczne składały się z jednolitego tła ($T=20^{\circ}\text{C}$) o rozmiarze 256x256 pikseli, na którym umieszczono dwie anomalie termiczne ($T_1=10^{\circ}\text{C}$ i $T_2=30^{\circ}\text{C}$ o rozmiarze 40x40 pikseli każda). Następnie zastosowano rozmycie kołowym filtrem uśredniającym o promieniu 7 pikseli, aby zasymulować rozmycie anomalii, typowe dla obrazów termicznych. Tak powstały model posłużył jako rzeczywisty rozkład temperatur.

W celu symulacji szumu matrycy związanego z pomiarem, wykonano sekwencje obrazów. Obrazy rejestrowane były przy użyciu kamery VIGOcam v50 o rozdzielczości 384x288 pikseli, wyposażonej w detektor mikrobolometryczny. Sekwencje obrazowały jednorodny temperaturowo i stały lokalizacyjnie obszar testowy. Długość sekwencji wynosiła 440 obrazów, a czas trwania całej sekwencji 5 sekund. Pozwoliło to na ograniczenie wpływu dryftu temperaturowego.

Następnie policzono różnice pomiędzy wartością każdego piksela a średnią temperaturą obliczoną na podstawie wszystkich pikseli z serii obrazów. Rozkład wartości odstępstw od średniej temperatury przedstawia rysunek 2. Ponieważ pomierzony rozkład błędów nie jest opisany rozkładem normalnym oraz nie wykazywał zależności przestrzennych, zastosowano metodę nieparametryczną do wygenerowania przykładowego rozkładu szumu (rysunek 3c), który następnie został dodany do modelu.



Rys. 2. Histogram różnic pomiędzy wartością średnią temperatury a temperaturami pikseli serii obrazów

Fig. 2. Histogram of the difference between the average temperature and the pixel temperature of series of images

W celu oceny jakości procedury odszumiania policzono średni błąd kwadratowy pomiędzy niezaszumionymi danymi syntetycz-

nymi T^{teor} a wynikiem odszumiania T^{est} . W tabeli 1 przedstawiono wartości błędów rekonstrukcji RMSE dane wzorem:

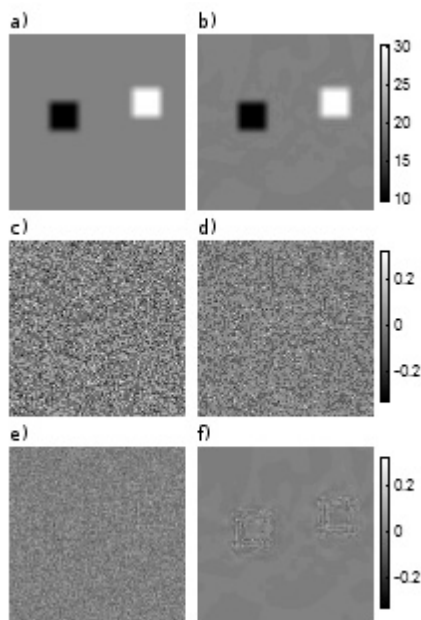
$$RMSE(T^{teor}, T^{est}) = \sqrt{\frac{\sum_{x,y} (T_{x,y}^{teor} - T_{x,y}^{est})^2}{256 \cdot 256}}, \quad (4)$$

Tab. 1. Średni błąd kwadratowy pomiędzy danymi syntetycznymi a wynikiem odszumiania

Tab. 1. Mean square error between the synthetic data and after noise reduction

Metoda		RMSE, °C
Brak filtracji		0.0748
Filtracja medianowa		0.0590
Filtracja adaptacyjna		0.0742
Filtracja Butterwortha		0.0524
Filtracja Gaussa		0.0569
Transformacja falkowa	f. Daubechies 1, level 5, hard	0.0257
	f. Symlet 2, level 5, hard	0.0342
	wavelet finest scale [9]	0.0421
Transformacja krzywkowa – curvelet finest scale [9]		0.0405

Najlepszy rezultat, przy optymalnych wartościach parametrów dla danej metody, osiągnięto przy użyciu transformacji falkowej. Jednak znalezienie optymalnej konfiguracji wartości parametrów dla poszczególnych rodzin falek jest czasochłonne. Transformacja krzywkowa pozwoliła uzyskać bardzo niski błąd, przy dopasowaniu wartości tylko jednego parametru. Korzystając z analogicznego algorytmu „najlepszej skali” dla transformacji falkowej wartość błędu była jednak wyższa. Należy podkreślić, że każda z testowanych metod odszumiania zmniejszyła wartość błędu RMSE. Wartość błędu przy braku filtracji była zbliżona do podawanej przez producenta kamery rozdzielczości termicznej NETD równej 0.08 °C.



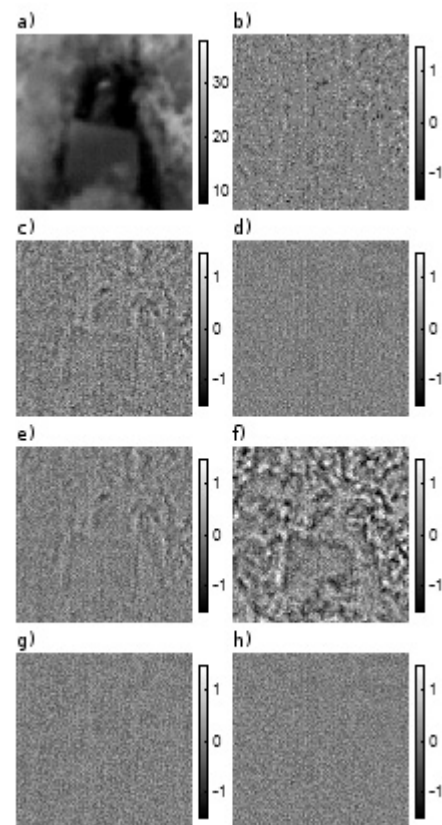
Rys. 3. a) Obraz syntetyczny, b) obraz odszumiony przy użyciu najlepszej metody (f), c) szum. Różnica pomiędzy obrazem syntetycznym a wynikiem odszumiania przy użyciu metody: d) filtracji medianowej, e) filtracji Butterwortha, f) transformacji falkowej faleką Daubechies

Fig. 3. a) Theoretical image, b) result of denoising using the best method (f), c) noise. Difference between the theoretical image and the result of denoising for the method of: d) median filtration, e) Butterworth filtration, f) wavelet transform (Daubechies wavelet)

Na rysunku 3 przedstawiono obraz syntetyczny, obraz odszumiony (charakteryzujący się najniższą wartością błędu RMSE) oraz rozkład dodanego szumu. Z racji tego, że odszumione termogramy nie przedstawiały wyraźnych różnic między sobą na rysunku 3d-f zaprezentowano jedynie rozkłady wartości błędów procedury odszumiania dla najbardziej efektywnych metod. W domenie przestrzeni przedstawiono efekt działania filtracji medianowej, w domenie częstotliwości filtracji Butterwortha, a w domenie przestrzenno-częstotliwościowej transformaty falkowej przy użyciu faleki Daubechies. Zaobserwowano inny charakter rozkładu wartości błędów dla metod w dziedzinach przestrzeni i częstotliwości niż w wyniku działania transformaty falkowej. W przypadku rysunku 3d,e rozkład wartości błędów ma charakter równomierny. Natomiast w przypadku rysunku 3f wyższe wartości błędów koncentrują się przy krawędziach anomalii, na pozostałym obszarze wartości błędów są minimalne, co świadczy o wpływie filtracji jedynie w obrębie krawędzi obiektów.

4. Odszumianie termicznych obrazów środowiskowych

Przetestowane metody odszumiania z optymalnymi wartościami parametrów zostały wykorzystane do redukcji szumu na obrazach termograficznych pochodzących z obserwacji środowiskowych.

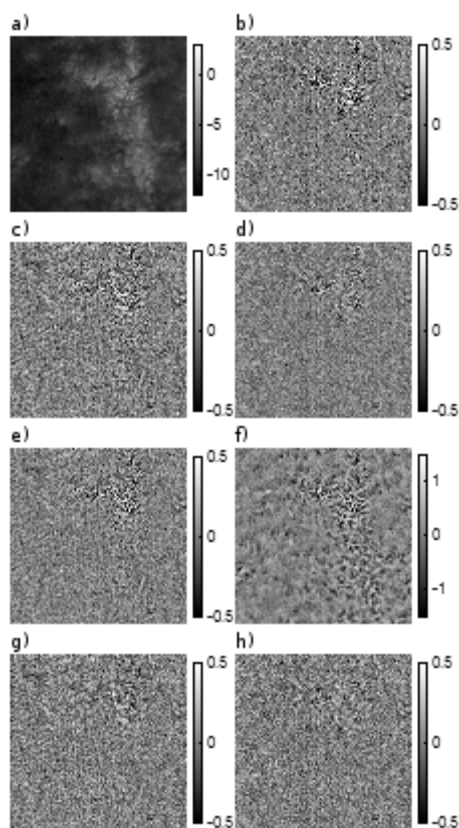


Rys. 4. a) Obraz termograficzny anomalii o niższej temperaturze niż tło. Różnica pomiędzy obrazem po redukcji szumu a obrazem wejściowym (a) dla metody: b) filtracji medianowej, c) filtracji adaptacyjnej, d) filtracji Butterwortha, e) filtracji Gaussa, f) transformacji falkowej faleką Daubechies, g) transformacji falkowej - algorytm [9], h) transformacji krzywkowej

Fig. 4. a) Thermographic image with low temperature anomaly. Difference between the result of denoising and the original image (a) for the method of: b) median filter, c) adaptive filter, d) Butterworth filter, e) Gauss filter, f) wavelet transform with Daubechies wavelet, g) wavelet transform using algorithm with finest scale [9], h) curvelet transform

Na rysunku 4 przedstawiono porównanie działania poszczególnych metod filtracji dla obrazu przedstawiającego ujście nielegalnej instalacji odprowadzenia ścieków z domu jednorodzinne. Obraz wykonany został latem w słoneczny dzień, dzięki czemu odprowadzana ciecz miała znacznie niższą temperaturę niż otoczenie. Obraz ten cechuje się wysokim kontrastem termicznym pomiędzy anomalią a otoczeniem. Na przedstawionym termogramie (rysunek 4a), oprócz szumu matrycy, widoczne są liczne zakłócenia związane, np. z nierównomiernym nagraniem roślinności.

W celu lepszego pokazania różnic w działaniu poszczególnych metod na rysunku 4b-h przedstawiono różnice pomiędzy wynikami odszumiania testowanymi metodami a obrazem wejściowym (rysunek 4a). Spodziewanym rezultatem powinien być szum o jednorodnym rozkładzie (rysunek 3c). Najlepszy rezultat uzyskano na rysunkach 4d,g,h. Na rysunkach 4b,c,e,f widoczne są kontury anomalii niskotemperaturowej oraz wpływ niejednorodności termicznej (roślinność). Metody użyte w przypadkach 4b,c,e,f powodują zmniejszenie części wpływu roślinności kosztem rozmycia krawędzi anomalii.



Rys. 5. a) Obraz termograficzny anomalii o wyższej temperaturze niż tło. Różnica pomiędzy obrazem po redukcji szumu a obrazem wejściowym (a) dla metody: b) filtracji medianowej, c) filtracji adaptacyjnej, d) filtracji Butterwortha, e) filtracji Gaussa, f) transformacji falkowej falką Daubechies, g) transformacji falkowej - algorytm [9], h) transformacji krzywkowej

Fig. 5. a) Thermographic image with high temperature anomaly. Difference between the result of denoising and the original image (a) for the method of: b) median filter, c) adaptive filter, d) Butterworth filter, e) Gauss filter, f) wavelet transform with Daubechies wavelet, g) wavelet transform using algorithm with finest scale [9], h) curvelet transform

Na rysunku 5a przedstawiono obraz termograficzny, na którym występuje anomalia termiczna wywołana przez rurę z ciepłą wodą znajdującą się pod powierzchnią ziemi. Badanie zostało wykonane

zimą, a zarejestrowany obraz cechuje się niższym kontrastem niż obraz przedstawiony na rysunku 4a.

Na rysunkach 5b-h przedstawiono różnice pomiędzy wynikami odszumiania a obrazem wejściowym (5a). Jednorodny rozkład różnic uzyskano dla obrazów 5d i 5h. Największe różnice przy odszumianiu dla obu termogramów uzyskano na obrazie 4f i 5f (falka Daubechies o identycznych parametrach dekompozycji i rekonstrukcji obrazu jak w przypadku 3f).

5. Wnioski

Dla danych syntetycznych zaobserwowano poprawę jakości obrazu podczas usuwania typowego szumu matrycy kamery termowizyjnej. Najlepsze rezultaty uzyskano dla transformaty falkowej (falka Daubechies). Właściwy dobór odpowiedniej falki, poziomu dekomponującego oraz parametrów usuwania detali i rekonstrukcji wymaga jednak znacznie większej ilości testów niż w przypadku pozostałych metod filtracji.

Dla rzeczywistych danych pomiarowych, filtracje odszumiające mają dodatkowo za cel, oprócz eliminacji szumu matrycy, minimalizację zakłóceń występujących podczas pomiaru. Dla obydwu przedstawionych środowiskowych obrazów termograficznych filtracja Butterwortha, transformacja falkowa [9] oraz krzywkowa powodowała największą redukcję szumu, zachowując przy tym ostrość granic.

Zaprezentowane metody, w szczególności filtracja Butterwortha oraz transformacja krzywkowa, pozwalają na uniwersalne i efektywne odszumienie różnego rodzaju termograficznych obrazów środowiskowych. Przeprowadzone testy wykazały wysoką skuteczność metod przestrzenno-częstotliwościowych, redukujących, zarówno szum matrycy, jak wpływ zakłóceń zewnętrznych.

Praca niniejsza została wykonana w ramach grantu dziekańskiego nr: 15.11.140.327 na Wydziale GGiOŚ Akademii Górniczo-Hutniczej.

6. Literatura

- [1] Więcek B., De Mey G.: Termowizja w podczzerwieni. Podstawy i zastosowania. Wydawnictwo PAK, Warszawa, 2011.
- [2] Bukowska-Belniak B., Leśniak A.: Application of thermographic research in environmental protection. Polish Journal of Environmental Studies, Vol. 18, No. 3A, p. 38-43, Olsztyn, 2009.
- [3] Wróbel A.: Zastosowania termowizji w badaniach środowiska. Pomiar termowizyjny w praktyce: praca zbiorowa pod red. H. Madury, Agenda Wydawnicza SIMP, Warszawa, 2004.
- [4] Minkina W., Dudzik S.: Infrared thermography: Errors and uncertainties, Blackwell Science, 2009.
- [5] Tadeusiewicz R., Korohoda P.: Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów. Wydawnictwo Fundacji Postępu Telekomunikacji, Kraków, 1997.
- [6] Lim J. S.: Two-dimensional signal and image processing. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1990.
- [7] Zieliński T.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2009.
- [8] Białasiewicz J. T.: Falki i aproksymacje. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2004.
- [9] Starck J. L., Candes E. J., Donoho D. L.: The curvelet transform for image denoising. IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 11, No. 6, p.670-684, 2002.

otrzymano / received: 17.06.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.08.2013

artykuł recenzowany / revised paper