

# Amatorskie pomiary meteorologiczne: Kamera całego nieba

Krzysztof MARKOWICZ\*

**Informacje ogólne.** Kamera całego nieba jest przyrządem służącym do monitoringu zachmurzenia atmosferycznego. Umożliwia ona ciągłe obserwacje stopnia pokrycia chmurami całego nieboskłonu oraz okolic tarczy słonecznej, co ma szczególne znaczenie w pomiarach fotometrycznych. Analiza zdjęć cyfrowych pozwala na identyfikację rodzajów chmur, sekwencja czasowa zaś kolejnych fotografii – na szacowanie prędkości i kierunku przemieszczania się chmur. Przyrząd ten wpisuje się w kanon standardowych narzędzi meteorologicznych i wypełnia lukę związaną z brakiem przyrządów do obserwacji zachmurzenia.



Fot. 1. Kamera całego nieba

**Informacje techniczne.** Kamery nieba umożliwiają obrazowanie niemal całego nieboskłonu za pomocą jednej z dwóch metod. Pierwsza z nich wykorzystuje szerokokątny obiektyw typu „rybie oko” skierowany do góry. Druga metoda (zastosowana w kamerze widocznej na fotografii 1) wykorzystuje wypukłe zwierciadło. Rozwiązanie takie pozwala na niemal 180° kąt widzenia matrycy aparatu cyfrowego umieszczonego centralnie nad zwierciadłem. Rolę zwierciadła na fotografii 1 spełnia kołpak od amerykańskiego samochodu ciężarowego, nabyty w USA w cenie kilku dolarów. Niezależnie od zastosowanej metody sporo problemów sprawi obecność Słońca. Natężenie promieniowania naszej gwiazdy jest o mniej więcej 5 rzędów wielkości większe niż natężenie promieniowania rozproszonego pochodzące od nieboskłonu. W przypadku kamery pokazanej na fotografii 1 zastosowano ruchomą przesłonę, której zadaniem jest blokowanie bezpośredniego promieniowania słonecznego. Przesłona ta porusza się w płaszczyźnie poziomej zgodnie z kierunkiem pozornego ruchu Słońca po nieboskłonie dzięki zastosowaniu silnika krokowego sterowanego przy użyciu mikrokontrolera. Szczegóły tego rozwiązania są dość skomplikowane i nie będzie ono tu opisywane.



Fot. 2. Przykładowe zdjęcia nieboskłonu wykonane kamerą całego nieba.

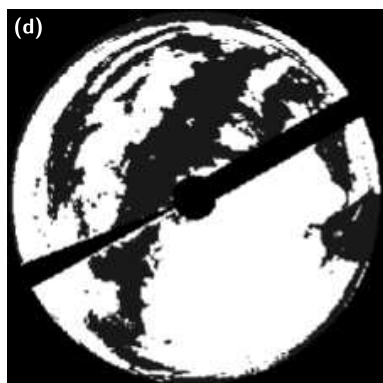
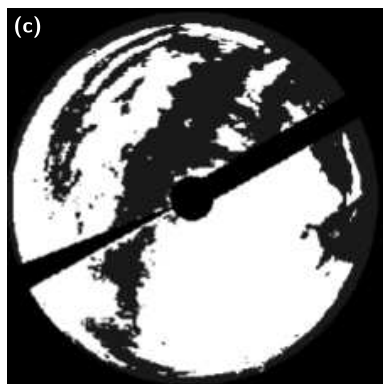
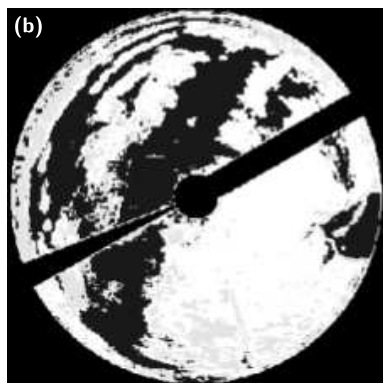
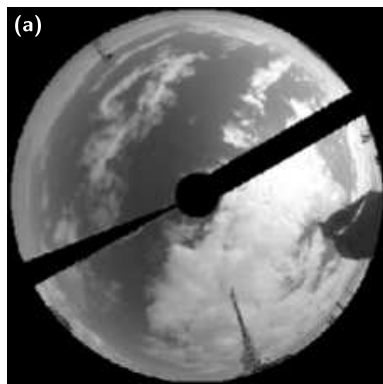
Zainteresowani mogą uzyskać więcej szczegółów na temat budowy i sterowania silnika krokowego, kontaktując się z autorem (kmark@igf.fuw.edu.pl).

Rezygnacja z przesłony ograniczającej oświetlenie matrycy aparatu cyfrowego może być częściowo skompensowana zmniejszeniem czasu naświetlania oraz wykonywaniem kilku zdjęć z różnym czasem naświetlania. Technika ta, zwana w skrócie HDR (*high dynamic range imaging*), pozwala efektywnie wydobywać szczegóły na obrazach. Jednak nawet wykonywanie zdjęć tylko przy jednym czasie otwarcia migawki pozwala w zdecydowanej większości przypadków zdobyć interesujące informacje na temat rozkładu zachmurzenia. Podczas wyboru rodzaju aparatu cyfrowego należy kierować się możliwością sterowania urządzeniem za pośrednictwem komputera. Ma to na celu wykonywanie zdjęć w trybie automatycznym z zadanym interwałem czasowym. Innym parametrem jest rozdzielczość matrycy CCD. Stosowanie matrycy z wysoką rozdzielczością nie jest wskazane, gdyż znacząco spowalnia przetwarzanie danych, a zysk w postaci dodatkowych informacji jest niewielki. W przedstawionej kamerze wykorzystano aparat cyfrowy CANON CyberShot A75 o matrycy 3,2 mln pikseli. Aparat ten jest obsługiwany przez komercyjny program *PSRemote*, dostępne są jednak także nieodpłatne programy, które mogą być wykorzystane na potrzeby kamery nieba. W przypadku profesjonalnych kamer nieba stosuje się aparaty z możliwością zapisu danych w trybie RAW, w odróżnieniu od standardowego zapisu w postaci skompresowanych plików JPEG.

**Przetwarzanie danych.** Analiza zdjęć z kamery nieba może być wykonana przy użyciu oprogramowania pozwalającego na czytanie formatu danych JPEG oraz przetwarzanie macierzy RGB. Przykładem może być tu bezpłatny program *OCTAVE* kompatybilny z komercyjnym programem *MATLAB*. Głównym celem przetwarzania danych uzyskanych z przyrządu jest oszacowanie zachmurzenia, określenie rodzaju chmur (konwekcyjne, warstwowe i pierzaste). Zbudowanie

\*Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

odpowiedniego algorytmu pozwalającego w sposób obiektywny rozróżniać chmury na tle nieboskłonu nie jest zadaniem prostym, dlatego ciągle niezastąpione w detekcji chmur jest oko doświadczzonego meteorologa.



Fot. 3. Przykład działania 3 algorytmów detekcji chmur. Zdjęcie z kamery nieba (a) oraz rozkład zachmurzenia uzyskany na podstawie sieci neuronowych (b), stosunku sygnału w kanale R i B (c) oraz rozkładu promieniowania słonecznego na podstawie modelu (d).

Najczęściej stosowane techniki opierają się na detekcji chmur na podstawie stosunku sygnału w kanale czerwonym (R) do sygnału w kanale niebieskim (B) lub indeksów opartych na np. wariancji oświetlenia w sąsiadujących pikselach. Chmury, zbudowane z kropelek wody lub kryształków lodu o rozmiarach znacznie większych od długości fali promieniowania, rozpraszają promieniowanie niemal niezależnie od długości fali, podczas gdy rozpraszanie na molekułach czystego powietrza (rozpraszanie Rayleigha) słabnie z długością fali jak  $1/\lambda^4$ . Tym samym stosunek promieniowania w kanale czerwonym i niebieskim jest znacznie mniejszy dla obszarów nieboskłonu, gdzie występują chmury.

Sytuację komplikuje jednak aerozol atmosferyczny, który podobnie jak chmury zmienia barwę nieboskłonu. W przypadku wysokiej grubości optycznej aerozoli nawet doświadczony meteorolog ma kłopoty z raportowaniem cienkich chmur typu pierzastego. Na dodatek barwa nieboskłonu zależy od położenia Słońca, co utrudnia stosowanie jednego kryterium do detekcji obszarów pokrytych chmurami. Znaczną komplikację stanowią również obszary tzw. aureoli słonecznej (obszar naokoło Słońca) oraz tzw. pojaśnienia horyzontalnego. W obszarach tych wartości R, G, B mogą nasycać się, a to uniemożliwia stosowanie jakichkolwiek algorytmów do detekcji chmur. Innym podejściem stosowanym do detekcji chmur są sieci neuronowe. Stosowanie sieci neuronowych do zdjęć nieboskłonu pozwala na identyfikację rodzajów zachmurzenia, choć wymaga uprzedniego wytrenowania sieci, co jest rzeczą dość pracochłonną i opartą na subiektywnej ocenie osoby budującej sieć neuronową, co gorsza, optymalny wybór serii treningowej zdjęć nie jest rzeczą prostą.

Do analizy zmienności spektralnej promieniowania wygodnie użyć jest wykładnika Ångströma. Definiujemy go na podstawie sygnału mierzonego w kanale czerwonym R i niebieskim B zgodnie ze wzorem

$$\alpha = -\frac{\log(R/B)}{\log(\lambda_R/\lambda_B)},$$

gdzie  $\lambda_R$  i  $\lambda_B$  odpowiada długości fali kanału spektralnego R i B. Informacje o długościach tych fal można uzyskać u producentów aparatów cyfrowych. Współczynnik Ångströma jest najwyższy dla błękitnego nieba i maleje wraz ze wzrostem grubości optycznej chmur oraz aerozoli atmosferycznych. Ustawienie progowej wartości  $\alpha$  pozwala na konstrukcję prostego algorytmu do detekcji chmur. Wartość tę należy ustawiać na podstawie analizy co najmniej kilku zdjęć testowych. Należy jednak podkreślić, że najprostsze aparaty cyfrowe nie pozwalają na rejestrację wartości bezwzględnych promieniowania w trzech zakresach spektralnych RGB. Relacja pomiędzy kanałami (kalibracja względna) ustalana jest w trakcie tzw. balansu bieli. Dzięki temu biała kartka papieru niezależnie od oświetlenia (temperatury barowej oświetlenia) jest zawsze biała na fotografii. Realizowane jest to na etapie przetwarzania zdjęcia w samym aparacie, np. gdy używamy automatycznego balansu bieli. Zmiana względnej kalibracji kanałów RGB jest z punktu widzenia metod detekcji zachmurzenia rzeczą niepożądaną. Najlepszym rozwiązaniem jest ustalenie stałego balansu bieli niezależnie od warunków oświetleniowych. Jednak, jak pokazują wyniki analiz zdjęć z kamery nieba, największe problemy z detekcją chmur występują przy niewielkim oświetleniu, na przykład podczas dużego zachmurzenia lub w godzinach wschodu czy zachodu Słońca. W pozostałych przypadkach nawet automatyczny balans bieli nie prowadzi do dużych błędów w interpretacji zdjęć.

Na koniec warto zwrócić uwagę na aspekt korekcji geometrycznej. Zastosowanie w kamerze nieba zwierciadła czy szerokokątnego obiektywu prowadzi do powstania aberracji optycznej. Tym samym obraz rejestrowany przez matrycę CCD jest zniekształcony w kierunku radialnym od środka zdjęcia. Wymaga to skorygowania obrazu, tak aby odległość radialna na zdjęciu była proporcjonalna do odległości na nieboskłonie. Jest to istotne, gdy wyznaczamy stopień pokrycia chmurami (zachmurzenie).