

Amatorskie pomiary meteorologiczne: pomiar widzialności i współczynnika ekstynkcji

Krzysztof MARKOWICZ*

Wprowadzenie

W początkach meteorologii widzialność była wielkością subiektywną, określaną w oparciu o tzw. repery (charakterystyczne obiekty, takie jak maszty, wzniesienia, budynki). Została ona zdefiniowana jako największa odległość, przy której dany ciemny obiekt w pobliżu horyzontu jest jeszcze widoczny i rozpoznawalny na tle nieboskłonu, przy czym rozmiar kątowy obserwowanego obiektu powinien przekraczać $0,3^\circ$ szerokości katowej. Wraz z rozwojem technik pomiarowych pojęcie widzialności dostosowano do potrzeb współczesnej meteorologii, wprowadzając pojęcie meteorologicznego zasięgu optycznego (ang. *Meteorological Optical Range*), określonego jako długość drogi w atmosferze potrzebnej do zredukowania strumienia promieniowania świetlnego emitowanego przez lampę żarową o temperaturze 2700 K do $1/20$ jego wartości początkowej. Założenie progowej wartości $1/20$ w definicji meteorologicznego zasięgu optycznego ciągle budzi wiele kontrowersji, przyjmuje się też niekiedy, że ta progowa wartość kontrastu powinna wynosić $1/50$. Konkretnie zdefiniowany meteorologiczny zasięg optyczny jest wielkością obiektywną i tylko w przybliżeniu równoważną opisanej wyżej widzialności atmosferycznej. Widzialność, w odróżnieniu od meteorologicznego zasięgu optycznego, zależy od indywidualnych predyspozycji obserwatora oraz od warunków radiacyjnych w atmosferze. W szczególności, ze względu na własności rozpraszające molekuł powietrza oraz innych cząstek znajdujących się w atmosferze, prawdopodobieństwo rozpraszania fotonów do przodu jest znacząco wyższe niż do tyłu. Tym samym obiekty oświetlone od strony obserwatora mają większy kontrast (widzialność jest większa) niż oświetlone „z tyłu”.

Metody pomiarowe widzialności oraz zasięgu optycznego obejmują techniki bezpośrednie oraz pośrednie. Do tych ostatnich zaliczamy pomiary własności optycznych atmosfery (np. współczynnika transmisji, rozpraszania oraz absorpcji). Jedną z najprostszych metod szacowania widzialności jest technika oparta na analizie zdjęć wykonywanych przy użyciu aparatu cyfrowego. Pozwala ona wyznaczyć współczynnik ekstynkcji powietrza, a na jego podstawie – widzialność. Metoda ta jest szczególnie użyteczna w obszarach pagórkowatych oraz górskich, gdzie nierówności terenu stanowią naturalne punkty odniesienia. Pozwala ona na uzyskanie dużej dokładności w przypadku wysokiej widzialności, dla której standardowe metody optyczne obciążone są znanymi błędami.

Podstawy teoretyczne

Kontrast jest wielkością opisującą ilościowo różnicę między obiektem a jego tłem. Kontrast obiektu

w zerowej odległości (*inherent contrast*) zdefiniowany jest następująco

$$C(0) = \frac{I_t(0) - I_b(0)}{I_b(0)},$$

gdzie $I_t(0)$ oraz $I_b(0)$ są luminancjami (radiancjami) obiektu oraz tła. W przypadku obiektów o zerowym współczynniku odbicia kontrast wynosi -1 .

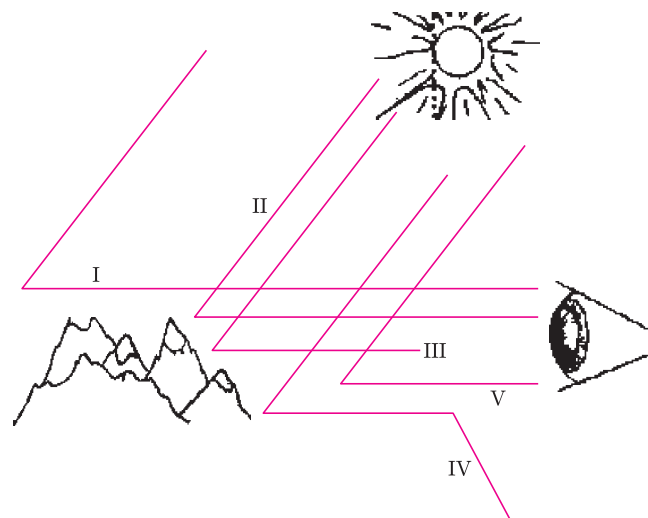
Analogicznie kontrast w odległości r (*apparent contrast*) wyraża się wzorem

$$C(r) = \frac{I_t(r) - I_b(r)}{I_b(r)}.$$

Kontrast obiektu maleje z odległością ze względu na procesy rozpraszania i absorpcji promieniowania słonecznego. Promieniowanie odbite od obiektu jest stopniowo osłabiane przez oba procesy (rys. 1). Z kolei promieniowanie słoneczne może zostać rozproszone w kierunku obserwatora, co prowadzi do wzrostu promieniowania na drodze od obiektu do obserwatora o czynnik I_p (tzw. *path radiance*). Luminancja promieniowania docierającego do obserwatora, który znajduje się w odległości r od obiektu, jest zatem sumą wkładu od (osłabionego) promieniowania od obiektu i czynnika $I_p(r)$ i wyraża się wzorem

$$I_t(r) = I_t(0)T(r) + I_p(r),$$

gdzie funkcja $T(r)$ opisuje transmisję atmosferyczną. Podstawiając to do wzoru na kontrast w odległości r ,



Rys. 1. Redukcja kontrastu pasma wzniesień wskutek procesów rozpraszania i absorpcji promieniowania słonecznego w atmosferze. Promień I opisuje część promieniowania słonecznego, która jest rozpraszana za górami i dociera do obserwatora, II–IV opisują promieniowanie, które jest odbijane od gór i część dociera do obserwatora (II), druga część zostaje pochłonięta w powietrzu (III), a pozostała zostaje rozproszona i nie dociera do obserwatora (IV). Ostatni przypadek V opisuje promieniowanie słoneczne, które zostaje rozproszone w kierunku obserwatora na drodze łączącej obserwatora z górami.

*Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

otrzymujemy

$$C(r) = \frac{I_t(0)T(r) + I_p(r) - I_b(0)T(r) - I_p(r)}{I_b(0)T(r) + I_p(r)} = \frac{I_t(0) - I_b(0)}{I_b(0) + I_p(r)/T(r)}.$$

Po wykorzystaniu wzoru na kontrast w zerowej odległości dostajemy

$$C(r) = C(0) \frac{T(r)}{T(r) + I_p(r)/I_b(0)}.$$

W ogólnym przypadku wyznaczenie członów występujących w powyższym równaniu jest skomplikowane i wymaga użycia zaawansowanego modelu transferu radiacyjnego w atmosferze. My posłużymy się przybliżeniem, które jest uzasadnione w dużej odległości od obiektu. Transmisja atmosferyczna jest wówczas bliska zeru, a czony $I_p(r)$ oraz $I_b(0)$ są porównywalne, co pozwala przybliżyć w powyższym wzorze mianownik przez jedynkę. Ostatecznie otrzymujemy wzór

$$C(r) = C(0)T(r).$$

Wykorzystując definicję transmisji w postaci

$$T(r) = e^{-\sigma r},$$

gdzie σ jest współczynnikiem ekstynkcji, wyznaczamy widzialność ze wzoru

$$r = \frac{\ln 50}{\sigma}.$$

Relacja ta nosi nazwę wzoru Koschmiedera i pochodzi z 1921 roku. Przyjęto w niej, że (ciemny) obiekt jest na granicy widoczności, gdy kontrast zmniejszy się 50 razy. Odwrotnie, znajomość widzialności pozwala obliczyć współczynnik ekstynkcji σ .

Wykonanie pomiarów

Kontrast obiektów znajdujących się przy powierzchni Ziemi może być wyznaczony na podstawie zdjęcia cyfrowego wykonanego w kierunku poziomym. Wyznaczenie widzialności przy użyciu tej techniki wymaga znajomości kontrastu w zerowej odległości. Można jednak wykonać zdjęcia obiektu w dwóch różnych odległościach od niego, r_1 oraz r_2 . Wówczas otrzymujemy układ dwóch równań na dwie niewiadome $C(0)$ oraz σ :

$$\begin{aligned} C(r_1) &= C(0)e^{-\sigma r_1}, \\ C(r_2) &= C(0)e^{-\sigma r_2}. \end{aligned}$$

Stąd możemy wyznaczyć współczynnik ekstynkcji jako

$$\sigma = \frac{\ln(C(r_2) : C(r_1))}{r_2 - r_1}.$$

Nie zawsze musimy wykonywać zdjęcia w różnych odległościach od tego samego obiektu. W terenie pagórkowatym lub górzystym możemy wykorzystać do naszych pomiarów różne pasma wzniesień, zakładając, że ich własności optyczne są identyczne (rys. 2), i wyznaczyć współczynnik ekstynkcji z powyższego wzoru. Jest on sumą współczynnika ekstynkcji związanej z rozpraszaniem na molekułach powietrza σ_{RAY} oraz związanej z rozpraszaniem na aerozolu atmosferycznym (zanieczyszczeniach) σ_{AER} :

$$\sigma = \sigma_{\text{RAY}} + \sigma_{\text{AER}}.$$



Rys. 2. Definiowanie kontrastu lasu dla dwóch pasm wzniesień w rejonie Podkarpacia.

Współczynnik ekstynkcji dla molekuł powietrza może być wyznaczony z przybliżonego wzoru

$$\sigma_{\text{RAY}} = \frac{pg}{p_0RT}(A\lambda^{-4} + B\lambda^{-5} + C\lambda^{-6}) \quad [1/m],$$

gdzie g jest przyspieszeniem grawitacyjnym w ms^{-2} , p jest ciśnieniem atmosferycznym w hPa, λ – długością fali w μm , T – temperaturą powietrza w K, R – stałą gazową dla powietrza suchego $287,1 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$, a pozostałe stałe przyjmują wartości:

$$\begin{aligned} p_0 &= 1013 \text{ hPa}, \\ A &= 8436 \cdot 10^{-6} \mu\text{m}^4, \\ B &= -1225 \cdot 10^{-7} \mu\text{m}^5, \\ C &= 14 \cdot 10^{-5} \mu\text{m}^6. \end{aligned}$$

Analizując zdjęcie cyfrowe, mamy do dyspozycji trzy składowe barwne: czerwoną R, zieloną G oraz niebieską B. Widzialność atmosferyczna określona jest dla długości fali około 550 nm, odpowiadającej największej czułości oka ludzkiego. W związku z tym do oszacowania widzialności należy korzystać z macierzy G. Innym rozwiązaniem jest transformacja obrazu RGB do zdjęcia w skali szarości i wyznaczanie kontrastu obiektu na zdjęciu czarnobiałym. W celu odczytania wartości pikseli macierzy G możemy posłużyć się jednym z wielu dostępnych programów, np. *octave*, *matlab*.

Chcąc szacować dokładność takiego pomiaru, należy wiedzieć, że aparaty cyfrowe na ogół różnią się charakterystyką spektralną kanałów RGB. Nawet dla danego egzemplarza aparatu wielkości te mogą zmienić się w czasie, np. pod wpływem zmian temperatury. Tym samym szacowanie ekstynkcji powietrza dla długości fali 550 nm na podstawie kanału G może być obarczone sporymi błędami i nie należy spodziewać się dokładności do kilku cyfr znaczących.

Opisana tu metoda pozwala wnioskować o zawartości zanieczyszczeń w atmosferze poprzez oszacowanie współczynnika ekstynkcji aerozolu. Wartości tego współczynnika wahają się zwykle w przedziale od 0,05 do $0,3 \text{ km}^{-1}$, przy czym wartości poniżej $0,1 \text{ km}^{-1}$ charakteryzują czyste powietrze, a powyżej $0,2 \text{ km}^{-1}$ – powietrze silnie zanieczyszczone.