

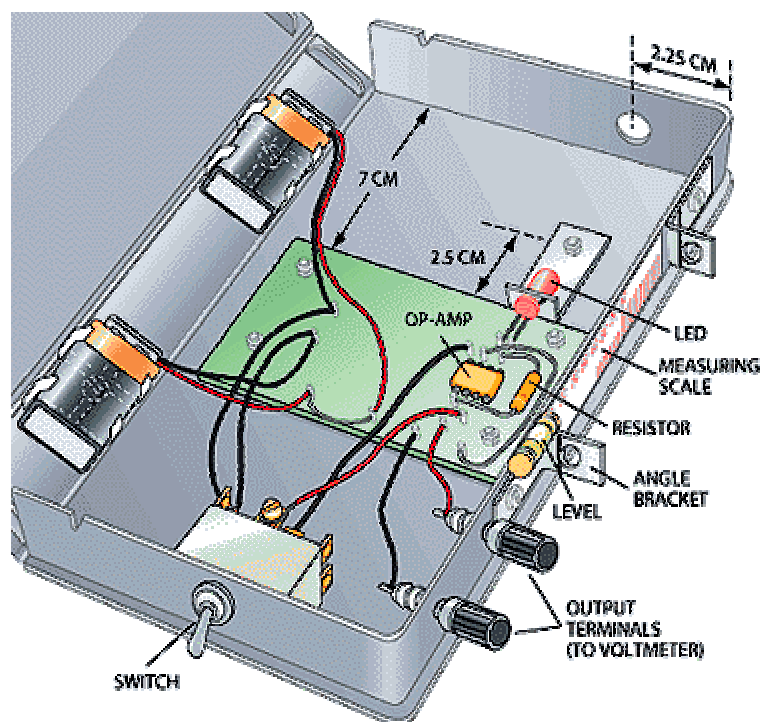
# Krzysztof Markowicz

## Pomiary grubości optycznej aerozoli przy pomocy sunphotometru

Aerozole w atmosferze generalnie rozpraszają promieniowanie słoneczne, przy czym parametry tego rozpraszania zależą od wielkości aerozolu. Małe aerozole podlegają Rayleighowskiemu rozpraszaniu, które prowadzi do rozpraszania symetrycznego tzn. taka sama liczba fotonów jest rozpraszana do przodu co do tyłu. Większe aerozole podlegają prawu rozpraszania Mie, dzięki któremu zdecydowana większość fotonów jest rozpraszana do przodu. W atmosferze mamy oba typy aerozolu, aerozol mały  $r < 0.1$  mikrometra to przede wszystkim aerozol pochodzenia antropogenicznego (pyły drobne sadze i substancje nie spalone). Większy aerozol  $r = 0.1 - 10$  mikrometrów to drobiny piasku naniesione z pustyń i jest on zdecydowanie pochodzenia naturalnego.

Jedną z technik pomiaru zawartości aerozolu czyli jego grubości optycznej polega na pomiarze promieniowania słonecznego dochodzącego do powierzchni ziemi. Pomiaru przyrządem zwanym sunphotometr polega na pomiarze radiacji słonecznej (czyli promieniowania bezpośredniego) na powierzchni ustawionej prostopadle do biegu fotonów. Przykładem takiego przyrządu jest Microtops, przyrząd ten wymaga ręcznego ustawiania "na Słońce". Dokładny opis działania, procesu kalibracji oraz wyniki pomiarów w czasie INDOEXU znajdują się na stronie [Wyniki z Microtopsa](#). Koszt tego przyrządu jest jednak wysoki i wynosi około 5000\$. Przyrząd bardzo podobny do microtopsa można zbudować samemu, proponuje pewne zmiany w budowie tego przyrządu w stosunku do wersji przedstawionej przez [sieć GLOBE](#), które jeszcze bardziej uprasza układ elektroniczny do zbierania danych. Głównym elementem przyrządu jest detektor promieniowania słonecznego, którym w tym przypadku jest dioda emisyjna (świecąca), której koszt nie przekracza 1zł. Zaletą takiej diody jest wąskie widmo emisyjne a co za tym idzie absorbcyjne około 50nm co jest szczególnie istotne dla pomiaru grubości optycznej aerozolu. W czasie padania fotonów na diodę złącze półprzewodnikowe n-p ulega polaryzacji i napięcie na zaciskach diody wynosi

około 1.5 V przy ustawieniu na Słońce. Jednak napięcie to jest bardzo słabym wskaźnikiem natężenia promieniowania słonecznego, ponieważ bardzo słabo zmienia się. Znacznie lepszym parametrem jest prąd płynący przez złącze n-p, dzięki zastosowaniu popularnego wzmacniacza operacyjnego 741 jako przetwornika prąd napięcie wspomniany prąd daje się prosto mierzyć przy użyciu miernika uniwersalnego. Koszt takiego miernika jest obecnie dość niski i wynosi około 30-40zł. W rezultacie napięcie z diody jest podawane na miernik elektroniczny, który ustawia się na zakres od 2V. Dioda detekcyjna wymaga jednak zrobienia starannej obudowy tak aby kat widzenia diody był zminimalizowany do obszaru tarczy słonecznej i niewielkiego obszaru wokół niej. Tak aby do diody nie trafiały fotony rozproszone w atmosferze. W celu łatwego naprowadzania przyrządu na tarczę słoneczną stosuje się celownik optyczny widoczny na rys. Składa się on z niewielkiego otworka przez który pada promieniowanie słoneczne na tarczę. W czasie pomiaru należy tak ustawić przyrząd aby plamka słoneczna znalazła się w centrum tarczy.



Wykres 1 Widok przyrządu w wersji oryginalnej

## Teoria wyznaczania grubości optycznej aerozolu

Programy w matlabie do obliczania grubości optycznej można uzyskać pisząc pod adres: [kmark@igf.fuw.edu.pl](mailto:kmark@igf.fuw.edu.pl)

Ze względu na mocno ograniczone środowisko osób używających oprogramowania naukowego matlab, napisałem odpowiednie programy w fortranie, które po zrobionej kompilacji działają na wszelkich komputerach klasy PC w środowisku DOS i LINUX. Można je otrzymać pisząc do mnie na ten sam adres: [kmark@igf.fuw.edu.pl](mailto:kmark@igf.fuw.edu.pl). Pakiet tych programów zawiera program kalibracyjny, właściwy program obliczający grubość optyczną oraz dodatkowy program umożliwiający obliczenie ciśnienie atmosferyczne.

Natężenie promieniowania słoneczne po przejściu przez atmosferę wyraża się prawem Beera;

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-m\tau} \quad (1)$$

gdzie:  $m$  jest masą optyczną atmosfery  $\tau$  jest całkowita grubością optyczną, zaś  $I_0$  jest wartością poza atmosferyczną natężenia promieniowania słonecznego (stałą słoneczną).

W czasie przechodzenia promieniowania przez atmosferę następuje jego absorbcja oraz rozpraszanie. Dla zakresu długości fal mierzonych przez przyrząd zasadnicze znaczenie mają następujące procesy: rozpraszanie molekularne, rozpraszanie po przez aerozole zawarte w powietrzu oraz absorbcja przez ozon.

Całkowita grubość optyczna wyraża się więc wzorem:

$$\tau = \tau_R + \tau_A + \tau_{O_3} \quad (2)$$

gdzie;  $\tau_R$ ,  $\tau_A$ ,  $\tau_{O_3}$ , oznaczają odpowiednio grubość optyczną: molekularną, aerozolową oraz ozonową. W celu wyeliminowania zależności stałej słonecznej od położenia planety na orbicie wokół słońca wprowadza się wartość stałej słonecznej dla średniej odległości od Słońca  $I_{0s}$ . Wówczas równanie 1 przyjmuje postać

$$I(\lambda) = I_{0s}(\lambda) * \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 e^{-m\tau} \quad (3)$$

gdzie  $d_0$  i  $d$  są odpowiednio: średnią i aktualną odległością Ziemi od Słońca.

W przypadku pomiarów wyżej przedstawionym przyrządem odpowiedź diody jest liniowa na natężenie promieniowania słonecznego dzięki czemu możemy zapisać:

$$V(\lambda) = V_{0s}(\lambda) * \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 e^{-m} \quad (4)$$

gdzie  $V_{0s}$  i  $V$  są odpowiednio napięciem na diodzie odpowiednio w przypadku gdy przyrząd znajduje się poza atmosferą oraz przy powierzchni ziemi. Fizycznie jest nie możliwe umieszczenie przyrządu poza atmosferą dlatego stosuje się technikę kalibracyjną Langley'a do wyznaczenia tej stałej.

Wykorzystując równania 2 oraz 4 można otrzymać wzór na grubość optyczną aerozolu:

$$\tau_A = \frac{1}{m} \left[ \ln\left(\frac{V_{0s}}{V}\right) + 2 \ln\left(\frac{d}{d_0}\right) \right] - \tau_R - \tau_{0s} \quad (5)$$

Wzór ten pozwala wyznaczyć grubość optyczną na podstawie sygnału z detektora  $V$ . Potrzebne są jednak dodatkowe wielkości fizyczne które można wyznaczyć przy pomocy empirycznych wzorów. W pierwszym przybliżeniu dla uproszczenia sytuacji możemy założyć że ozon nie absorbuje światła mierzonego przez diodę. W związku z tym założymy, że  $\tau_{0s} = 0$  nie popełniamy przy tym wielkiego błędu ponieważ w obszarze widzialnym ozon bardzo słabo absorbuje energię słoneczną. Poprawkę związaną ze zmianą odległości Ziemi od Słońca możemy policzyć ze wzoru:

$$\left(\frac{d_0}{d}\right)^2 = 1 + \left[ 0.034 \cos\left(2\pi \frac{jd}{365}\right) \right] \quad (6)$$

gdzie  $jd$  oznacza tzw. Julian Day czyli numer dnia od początku roku.

Molekularna grubość optyczną wyznaczamy ze wzoru:

$$\tau_R = \frac{P}{1013} (A\lambda^{-4} + B\lambda^{-5} + C\lambda^{-6}); \quad (7)$$

gdzie  $p$  jest ciśnieniem atmosferycznym w hpa,  $\lambda$ - długość fali światła mierzona przez diodę w [ $\mu\text{m}$ ] zaś stałe  $A$ ,  $B$  i  $C$  wynoszą

$A=8436e-6;$

$B=-1225e-7;$

$C=14e-5;$

Masę optyczną  $m$  wyznaczamy ze wzoru empirycznego:

$$m = \left[ \frac{1}{\sin(\Theta_h) + a \left( \Theta_h \frac{180}{\pi} + b \right)^c} \right] \quad (8)$$

gdzie  $\Theta_h$  – kat pomiędzy słońcem a horyzontem w radianach, zaś:

$a=0.50572;$

$b=6.07995;$

$c=1.6364;$

W celu wyznaczenia masy optycznej atmosfery musimy znać kąt nachylenia Słońca do horyzontu. Wartość jego najlepiej jest wyznaczyć numerycznie zamiast wykonywać dość trudne techniczne pomiary tego kąta. Metodę obliczania tego kąta można znaleźć w pracy:

Ekstynkcja promieniowania słonecznego. Gotowe programy do obliczania położenia Słońca na horyzoncie w fortranie i matlabie można uzyskać pod adresem

[kmark@igf.fuw.edu.pl](mailto:kmark@igf.fuw.edu.pl)

## Kalibracja przyrządu metodą Langley'a

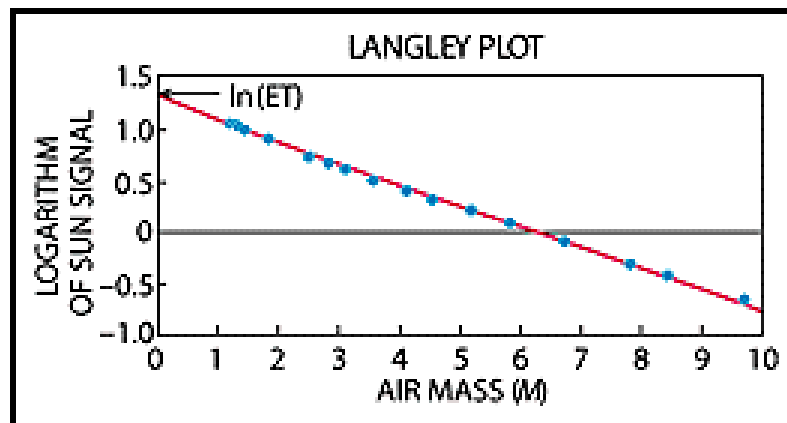
Kalibracja przyrządu polega na wyznaczeniu stałej  $V_{0\lambda}$ , która jest niezbędna do obliczenia grubości optycznej aerozolu. Metoda Langley'a opiera się na częstych pomiarach wykonywanych w czasie bezchmurnej pogody w odstępach około 20 min. Kalibrację najlepiej wykonać jest w górach np. na Kasprowym Wierchu lecz nie jest to konieczne. W czasie kalibracji warunki meteorologiczne powinny być możliwie stałe zaś pomiary wykonuje się rano lub wieczorem. Optymalną kalibrację powinno się

wykonywać w czasie gdy słońce znajduje się od 10 do 40 stopni nad horyzontem.

Wychodząc z równania 4 po zlogarytmowaniu stronami mamy:

$$\ln V(\lambda) = \ln \left[ V_{0s}(\lambda) * \left( \frac{d_0}{d} \right)^2 \right] - m \tau \quad (9)$$

Jak wynika z powyższego wzoru logarytm zmierzonego napięcia jest wprost proporcjonalny do masy optycznej m przy założeniu stałości całkowitej grubości optycznej  $\tau$ . W związku z tym wykonując pomiary napięcia V przy różnych wartościach masy optycznej (kąta nachylenia Słońca) a następnie wykonując interpolacje do wartości m=0 otrzymujemy wartość szukanej stałej  $V_{0s}$ . Wykres 2 przedstawia wyniki kalibracji przyrządu wartość stałej kalibracyjnej odczytujemy na osi lnV i jest ona równa współczynnikowi wolnemu w równaniu prostej interpolacyjnej.



Wykres 2 Kalibracja przyrządu