



Badania charakterystyk rozproszeniowych wybranych układów aerodispersyjnych

MIROŚLAWA SZOPA, ZYGMUNT MIERCZYK,
MAREK ZYGMUNT

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W artykule przeprowadzono analizę teoretyczną charakterystyk rozproszeniowych wybranych układów aerodispersyjnych, z uwzględnieniem modelu rozpraszania promieniowania elektromagnetycznego na cząstkach sferycznych oraz niesferycznych. Omówione zostały podstawowe charakterystyki aerozoli naturalnych i sztucznych. Dla wybranych układów aerodispersyjnych przedstawiono wyniki analiz rozproszeniowych. Wyniki analiz porównane zostały z wynikami badań przeprowadzonymi z zastosowaniem dwubarwnego LIDARA rozproszeniowego, opracowanego w Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej.

Słowa kluczowe: rozpraszanie promieniowania, układy aerodispersyjne, aerozole naturalne, aerozole sztuczne, LIDAR

Symbole UKD: 535.3

1. Wprowadzenie

Stosowane powszechnie klasyczne metody kontroli zanieczyszczeń powietrza, w tym preferowane obowiązującymi przepisami metody chemii mokrej okazują się pod wieloma względami mało konkurencyjne w stosunku do metod optoelektronicznych. Nowoczesne metody optoelektroniczne, wykorzystujące układy generacji, wzmacniania, modulacji, transmisji, detekcji, rejestracji i przetwarzania światła, opierają się na wykorzystaniu takich zjawisk fizycznych, jak absorpcja, fluorescencja, dyfrakcja i rozpraszanie. Umożliwia to nie tylko zlokalizowanie zanieczyszczenia oraz zidentyfikowanie go, lecz także określenie koncentracji w czasie rzeczywistym. Ponadto możliwa jest zdalna detekcja zanieczyszczeń oraz pełna automatyzacja

pomiarów poprzez zintegrowanie różnych systemów elektrooptycznych w procesie akwizycji, przetwarzania i transmisji danych.

Rosnące zainteresowanie systemami lidarowymi stosowanymi w monitorowaniu środowiska, których działanie oparte jest na zjawiskach rozpraszania promieniowania elektromagnetycznego na cząstkach materii, stwarza potrzebę badania oraz poznania szczegółowych charakterystyk rozproszeniowych układów aerodyspersyjnych.

Rozpraszanie promieniowania elektromagnetycznego jest zjawiskiem polegającym na zmianie kierunku propagacji promieniowania bez zmiany długości fali (rozpraszanie elastyczne) lub na zmianie zarówno kierunku propagacji, jak i długości fali padającego promieniowania (rozpraszanie nieelastyczne).

2. Model elastycznego rozpraszania promieniowania na cząstkach sferycznych

Charakterystykę kątową zjawiska elastycznego rozpraszania promieniowania elektromagnetycznego na pojedynczej cząstce sferycznej opisuje macierz fazowa [1-5]:

$$P(\Theta) = \begin{bmatrix} P_{11}(\Theta) & P_{12}(\Theta) & 0 & 0 \\ P_{12}(\Theta) & P_{11}(\Theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{33}(\Theta) & P_{34}(\Theta) \\ 0 & 0 & -P_{34}(\Theta) & P_{33}(\Theta) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Poszczególne elementy macierzy dane są wzorami:

$$P_{11}(\Theta) = \frac{\lambda^2}{2\pi\sigma_{SCAT}} \left[|S_1(\Theta)|^2 + |S_2(\Theta)|^2 \right] \quad (2)$$

$$P_{12}(\Theta) = \frac{\lambda^2}{2\pi\sigma_{SCAT}} \left[|S_2(\Theta)|^2 - |S_1(\Theta)|^2 \right] \quad (3)$$

$$P_{33}(\Theta) = \frac{\lambda^2}{2\pi\sigma_{SCAT}} \left[S_1^*(\Theta)S_2(\Theta) + S_1(\Theta)S_2^*(\Theta) \right] \quad (4)$$

$$P_{34}(\Theta) = \frac{\lambda^2}{2\pi\sigma_{SCAT}} \left[S_1^*(\Theta)S_2(\Theta) - S_1(\Theta)S_2^*(\Theta) \right], \quad (5)$$

gdzie: λ — długość fali padającego promieniowania;
 σ_{SCAT} — całkowity przekrój czynny na rozpraszanie;
 $S_1(\Theta)$ i $S_2(\Theta)$ — funkcje fazowo-amplitudowe:

$$\begin{cases} S_1(\Theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n(\cos \Theta) + b_n \tau_n(\cos \Theta)] \\ S_2(\Theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [b_n \pi_n(\cos \Theta) + a_n \tau_n(\cos \Theta)], \end{cases} \quad (6)$$

gdzie: $\pi_n(\cos \Theta)$ i $\tau_n(\cos \Theta)$ są funkcjami kątowymi:

$$\pi_n(\cos \Theta) = \frac{1}{\sin \Theta} P_n^1(\cos \Theta), \quad (7)$$

$$\tau_n(\cos \Theta) = \frac{d}{d\Theta} P_n^1(\cos \Theta). \quad (8)$$

P_n^1 jest stowarzyszonym wielomianem Legendre, natomiast a_n i b_n to zespolone współczynniki Mie:

$$a_n = \frac{m\psi_n(mx)\psi_n'(x) - \psi_n(x)\psi_n'(mx)}{m\psi_n(mx)\xi_n'(x) - \xi_n(x)\psi_n'(mx)} \quad (9)$$

$$b_n = \frac{\psi_n(mx)\psi_n'(x) - m\psi_n(x)\psi_n'(mx)}{\psi_n(mx)\xi_n'(x) - m\xi_n(x)\psi_n'(mx)}, \quad (10)$$

gdzie ψ i ξ to funkcje Ricatti-Bessela, odpowiadające sferycznym funkcjom Bessela, ψ' i ξ' to pochodne funkcji ψ i ξ .

Funkcje Ricatti-Bessela zależne są od zespolonego współczynnika refrakcji (m) oraz bezwymiarowego parametru wielkości cząstek rozpraszających X [1-6].

Zespolony współczynnik refrakcji składa się z części rzeczywistej, którą stanowi współczynnik załamania (m') oraz części urojonej — współczynnika absorpcji (m_i) i jest opisany wzorem:

$$m = m_r - im_i. \quad (11)$$

Część rzeczywista współczynnika określana jest jako stosunek prędkości promieniowania w próżni (c_p) do prędkości światła w badanym materiale (c_m), wyraża się wzorem:

$$m_r = \frac{c_p}{c_m}. \quad (12)$$

Bezwymiarowy parametr wielkości cząstek rozpraszających X dany jest wzorem:

$$X = \frac{2\pi r}{\lambda}, \quad (13)$$

gdzie r jest promieniem cząstki rozpraszającej, a λ długością fali padającego promieniowania.

Poszczególne przekroje czynne dla rozpraszania elastycznego zachodzącego na pojedynczej cząstce obliczane są ze wzorów [1-5]:

Różniczkowy przekrój czynny [$\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$]:

$$\sigma_{diff}(\Theta) = \frac{\lambda^2}{8\pi^2} \left[|S_1(\Theta)|^2 + |S_2(\Theta)|^2 \right]. \quad (14)$$

Całkowity przekrój czynny [m^2]:

$$\sigma_{SCAT} = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \left[|a(n)|^2 + |b(n)|^2 \right]. \quad (15)$$

Przekrój czynny na rozpraszanie wsteczne [$\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$]:

$$\sigma_{BSCAT} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(-1)^n (a(n) - b(n)) \right|^2. \quad (16)$$

Efektywności poszczególnych procesów otrzymujemy przez podzielenie przekrojów czynnych przez czynnik πr^2 , gdzie r jest promieniem cząstek rozpraszających. I tak:

Efektywność rozpraszania:

$$Q_{SCAT} = \frac{\sigma_{SCAT}}{\pi r^2}. \quad (17)$$

Efektywność rozpraszania wstecznego:

$$Q_{BSCAT} = \frac{\sigma_{BSCAT}}{\pi r^2}. \quad (18)$$

Efektywność procesu rozpraszania jako funkcja współczynnika refrakcji (m) i parametru wielkości (X), opisywana jest charakterystycznym przebiegiem. W przebiegu tym wyróżnić można specyficzne oscylacje większej i mniejszej częstotliwości. Oscylacje mniejszej częstotliwości związane są z częścią rzeczywistą współczynnika refrakcji — współczynnikiem załamania, natomiast za oscylacje o częstotliwości większej odpowiedzialny jest współczynnik absorpcji.

Rozpatrując charakter zmian kierunku propagacji promieniowania następujących jako efekt rozpraszania, dokonano podziału na dwa główne rodzaje rozpraszania: rozpraszanie Rayleigha oraz rozpraszanie Mie. Rodzaj powstającego rozproszenia zależy ściśle od bezwymiarowego parametru wielkości X .

A) Rozpraszanie Rayleigha

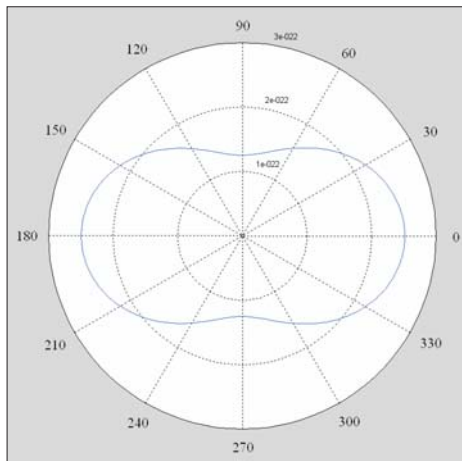
Rozpraszanie Rayleigha zachodzi w przypadku oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z cząstkami rozpraszającymi, dla których parametr wielkości jest mniejszy bądź równy 0,3.

Rozkład kątowy natężenia promieniowania w rozpraszaniu Rayleigha jest charakterystyczny i stały — niezależny od zmian parametru X .

Kątowa charakterystyka rozpraszania opisywana jest funkcją fazową, która dla rozpraszania Rayleigha przybiera uproszczoną formę o postaci [3, 4]:

$$P(\Theta) = \frac{3}{4}(1 + \cos^2(\Theta)), \quad (19)$$

gdzie Θ jest kątem rozproszenia. Kątową charakterystykę rozpraszania Rayleigha przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Charakterystyka kątowa rozpraszania Rayleigha

Wykres wartości dla funkcji fazowej ma dwie charakterystyczne osie symetrii (pierwsza wzdłuż osi x — łącząca kąty rozpraszania 0° i 180° , druga wzdłuż osi y — łącząca kąty rozpraszania 90° i 270°).

Rozkład kątowy rozproszonego promieniowania ma pewną anizotropię, jednak odstępstwa od izotropii są małe.

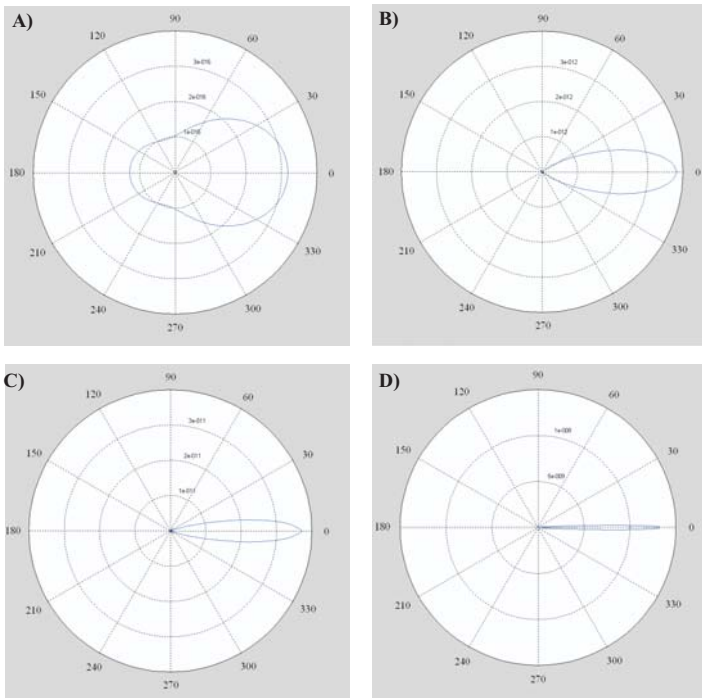
Natężenie promieniowania rozpraszanego jest wprost proporcjonalne do szóstej potęgi promienia cząsteczki rozpraszającej ($I \sim r^6$) i odwrotnie proporcjonalne do czwartej potęgi długości fali ($I \sim 1/\lambda^4$). Rozpraszanie to jest więc charakterystyczne dla cząstek rozpraszających o wielkości atomów oraz małych długości fal promieniowania.

B) Rozpraszanie Mie

Rozpraszanie Mie jest zjawiskiem następującym na skutek oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z cząsteczkami rozpraszającymi, dla których bezwymiarowy parametr wielkości jest większy niż 0,3.

$$(X > 0,3).$$

Rozkład kątowy promieniowania rozproszonego w wyniku tego procesu opisany jest przez macierz fazową i ściśle uzależniony od wartości bezwymiarowego parametru wielkości X . Wraz z rosnącymi wartościami parametru wielkości, kątowy rozkład promieniowania rozproszonego staje się coraz bardziej skomplikowany i wykazuje

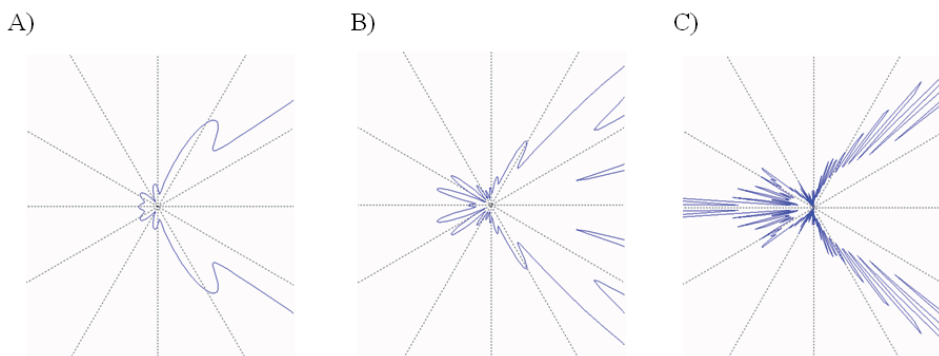


Rys. 2. Charakterystyka kątowna rozpraszania Mie dla różnych wartości parametru X : A) $X = 1$; B) $X = 5$; C) $X = 10$; D) $X = 50$

coraz silniejszą anizotropię. Pojawiają się charakterystyczne „grzebienie” związane z interferencją fal rozproszonych od różnych części cząsteczek, na których zachodzi zjawisko. Coraz więcej promieniowania rozpraszane jest do przodu, przez co zanika symetria pomiędzy rozpraszaniem wprzód a rozpraszaniem wstecznym. Pozostaje tylko jedna oś symetrii w wykresie charakterystyki kątowej rozpraszania — wzdłuż osi x (łącząca kąty rozpraszania 0° i 180°) [1-5].

Rozkład kątowy rozpraszania Mie dla różnych wartości parametru wielkości X przedstawia rysunek 2.

Powstające, charakterystyczne grzebienie interferencyjne przedstawia rysunek 3.



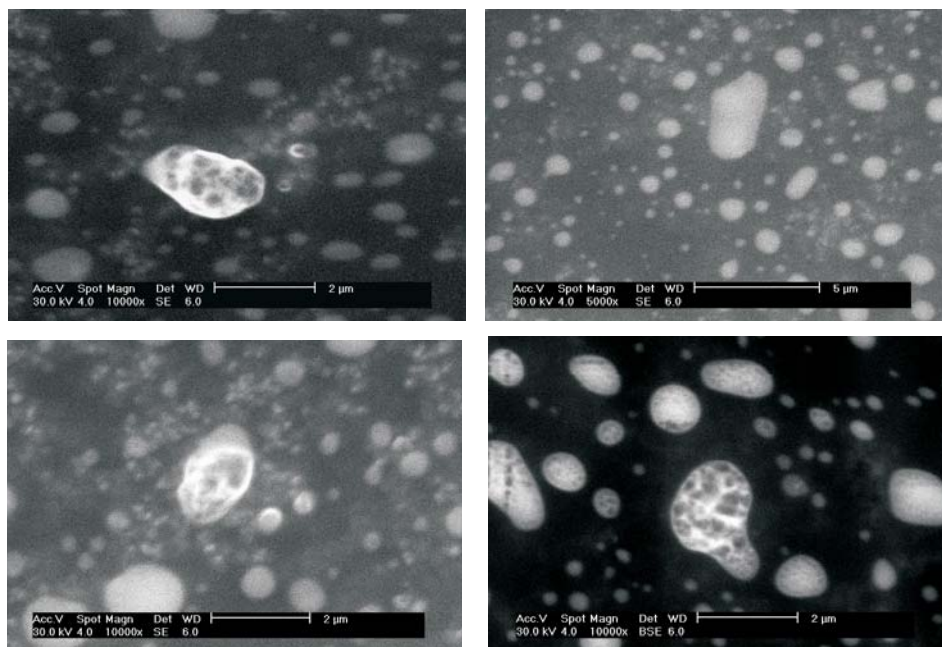
Rys. 3. Powiększenia charakterystyk kątowych rozpraszania Mie dla różnych wartości parametru X :
A) $X = 5$; B) $X = 10$; C) $X = 50$

3. Model elastycznego rozpraszania promieniowania na cząstkach niesferycznych

Teoria Rayleigha oraz Mie opisuje zjawisko rozpraszania promieniowania na cząstkach sferycznych (sprowadza się do rozwiązania równań Maxwella dla identycznych składowych pola elektrycznego i magnetycznego z warunkami brzegowymi na sferze). Cząstki układów aerodispersyjnych często jednak mają specyficzne kształty o zdecydowanie niesferycznych cechach.

Na rysunku 4 przedstawiono zdjęcia ze skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) przykładowych cząstek dymu. Zdjęcia te wykonano w Wojskowej Akademii Technicznej, przy użyciu aparatu SEM Philips XL-30.

W przypadku rozważania zjawiska rozpraszania na takich cząstkach, konieczne jest przyjęcie odpowiedniego modelu, umożliwiającego dopasowanie danych do teorii rozpraszania na cząstkach sferycznych. Jednym ze stosowanych do tego celu modeli jest model kul ekwiwalentnych. Kula ekwiwalentna to kula, która rozprasza promieniowania elektromagnetyczne w sposób najbardziej zbliżony do badanej cząstki niesferycznej [6].



Rys. 4. Zdjęcia SEM przykładowych cząstek dymu mieszanki dymotwórczej M16

Wartość promienia kuli ekwiwalentnej obliczana jest według wzoru:

$$R_{eq} = (a \cdot b^2)^{\frac{1}{3}}, \quad (20)$$

gdzie: a — promień cząstki w kierunku poziomym;
 b — promień cząstki w kierunku pionowym.

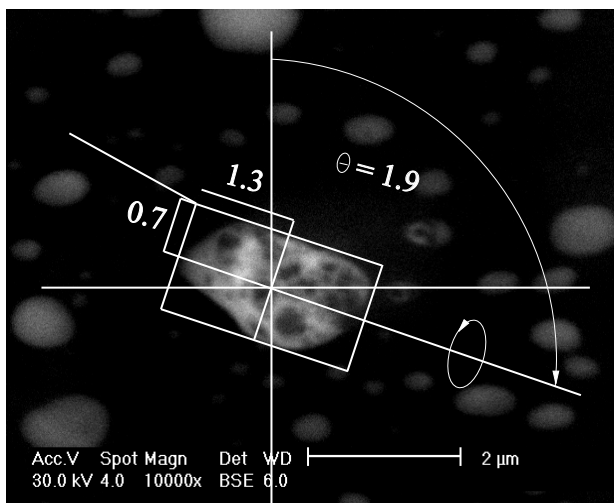
Dla wybranej niesferycznej cząstki dymu wyznaczone zostały wartości kąta obrotu oraz rozmiarów cząstki, które następnie posłużyły do obliczeń wartości promienia ekwiwalentnego. Parametry te przedstawia tabela 1.

TABELA 1

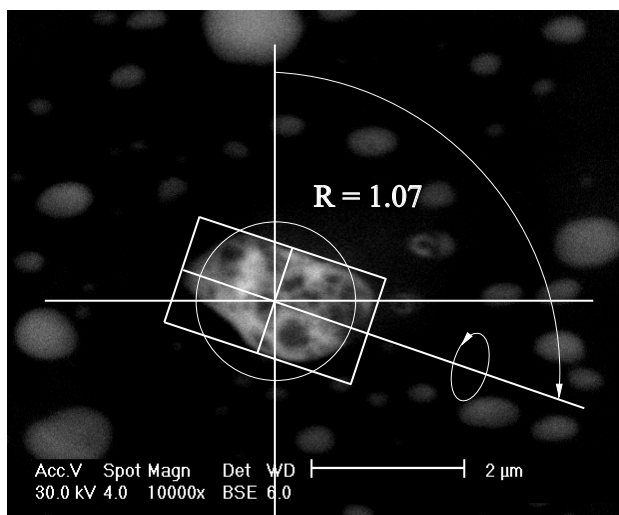
Parametry kształtu cząstki niesferycznej oraz kuli ekwiwalentnej

a [μm]	b [μm]	kąt obrotu θ [rad]	promień kuli ekwiwalentnej [μm]
0,7	1,3	1,9	1,07

Charakterystykę geometryczną analizowanej cząstki niesferycznej przedstawia rysunek 5, natomiast obliczoną dla niej kulę ekwiwalentną rysunek 6.



Rys. 5. Charakterystyka geometryczna przykładowej, niesferycznej cząstki dymu



Rys. 6. Charakterystyka geometryczna kuli ekwiwalentnej obliczonej dla przykładowej, niesferycznej cząstki dymu

4. Układy aerodispersyjne

Układ rozproszony (koloidalny) jest układem dwóch substancji, w którym jedna jest rozproszona w drugiej. Układ aerodispersyjny to układ koloidalny, w którym ośrodek rozpraszający stanowi gaz, a fazą rozproszoną jest ciało stałe (pył) lub ciecz (mgła).

Układy aerospersyjne są układami zmieniającymi się dynamicznie. Głównymi zjawiskami fizykochemicznymi zachodzącymi w tych układach jest: koagulacja, elektryzowanie się cząstek, fotoforeza, termoforeza, dyfuzoforeza, adhezja, sedymentacja, pochłanianie pary wodnej (w przypadku gdy fazą rozproszoną jest ciało stałe). Najważniejszymi zjawiskami, w zależności od panujących warunków, są: koagulacja, adhezja, sedymentacja (w przypadku warunków laboratoryjnych), turbulentne unoszenie cząstek i koagulacja (w przypadku warunków polowych).

W zależności od rodzaju fazy rozproszonej, cząstki rozpraszające aerozolu charakteryzują się specyficznym kształtem. Zazwyczaj w przypadku mgły cząsteczki rozpraszające aerozolu mają kształt regularnych kuleczek. Gdy jednak fazą rozproszoną są ciała stałe, kształt cząsteczek może być silnie nieregularny oraz niesferyczny (np. igły, płatki, zlepki itp.).

Dodatkowo zachodzący proces koagulacji powoduje łączenie się pojedynczych cząstek w większe agregaty, a co za tym idzie powstawanie fazy o nieregularnej i skomplikowanej strukturze. Kolejnym czynnikiem zmieniającym pierwotny kształt cząstek fazy rozproszonej aerozolu jest pochłanianie pary wodnej przez higroskopijne cząsteczki ciał stałych.

Ze względu na genezę powstania, układy aerodispersyjne dzielimy na aerozole naturalne oraz sztuczne (antropogeniczne).

5. Charakterystyka rozpraszania na naturalnych układach aerodispersyjnych

Przykładem naturalnych układów aerodispersyjnych są powszechnie występujące chmury cumulus. Chmury są układem zbudowanym z kropelek skondensowanej pary wodnej lub kryształków lodu rozproszonych w powietrzu atmosferycznym.

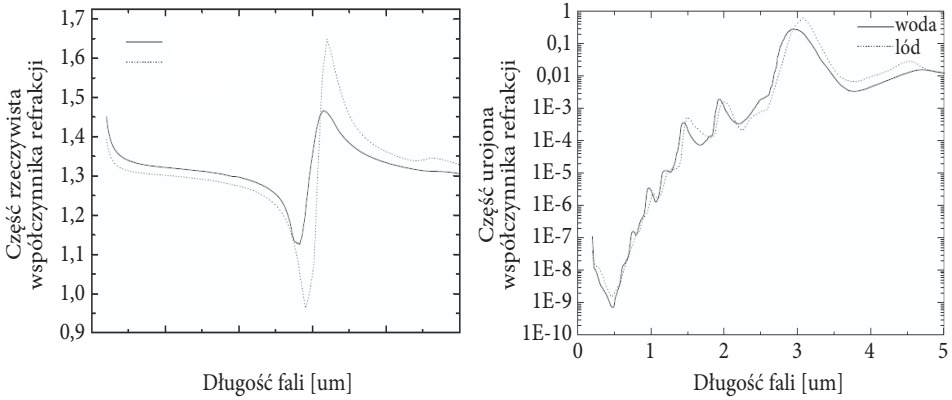
Chmury cumulus (Cu) są grubymi, białymi chmurami kłębiastymi, zbudowanymi z kropelek wody, występującymi w piętrze niskim. Ich podstawa znajduje się na wysokości 1000-2500 m, a średni czas życia cumulusa małych rozmiarów wynosi około 30 minut.

Analizując rozpraszanie promieniowania na chmurach, wartość współczynnika refrakcji dla cumulusa przyjmuje wartość współczynnika dla wody.

Dla długości fali promieniowania 1064 nm oraz 532 nm (pierwsza i druga harmoniczna generacji lasera Nd:YAG) przyjmuje się wartość współczynnika refrakcji $m = 1,33$. Wartość części urojonej dla tych długości fal jest pomijalnie mała.

Rozkład wielkości cząsteczek fazy rozproszonej chmury cumulus opisany jest wzorem [7]:

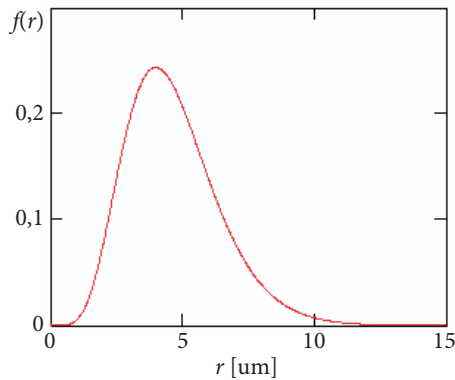
$$f(r) = 0,01(2,4r^6 \exp(-1,5r)). \quad (21)$$



Rys. 7. Wartość współczynnika refrakcji dla wody w zależności od długości fali [7]

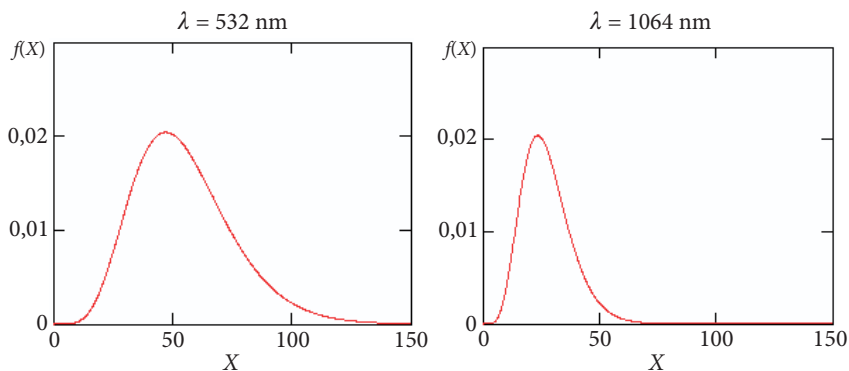
Dla potrzeb analizy zjawiska rozpraszania rozkład wielkości cząstek w zależności od promienia zostaje przekształcony na zależność od bezwymiarowego parametru wielkości.

Wykres rozkładu wielkości cząstek przedstawia rysunek 8. Promień podany jest w mikrometrach.

Rys. 8. Kształt funkcji rozkładu wielkości cząstek w chmurze cumulus w zależności od promienia r

Wykresy rozkładu wielkości cząstek w zależności od parametru X dla długości fali promieniowania 532 nm oraz 1064 nm przedstawia rysunek 9.

Parametry charakterystycznych cząstek rozpraszających chmury cumulus przedstawia tabela 2.



Rys. 9. Kształty funkcji rozkładu wielkości cząstek w chmurze cumulus w zależności od parametru wielkości X dla długości fal 532 oraz 1064 nm

TABELA 2

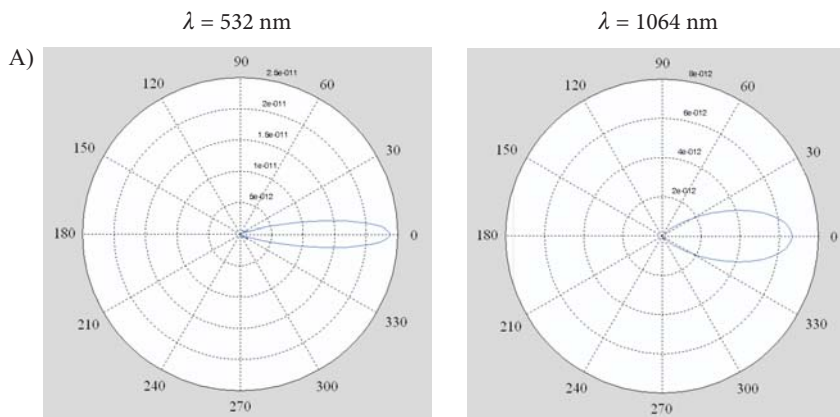
Parametry cząstek charakterystycznych chmury cumulus

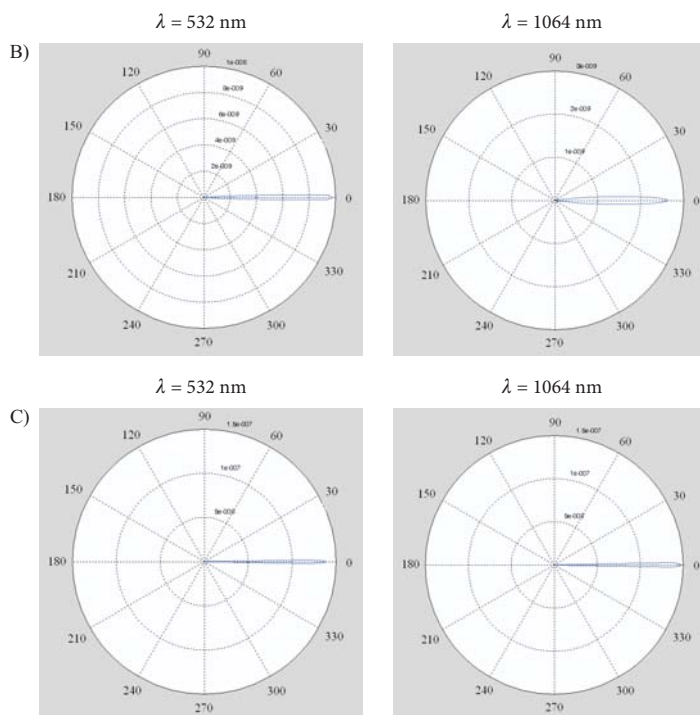
	Wartość minimalna*	Wartość modalna	Wartość maksymalna**
Promień [μm]	0,7	4	12,1
X dla $\lambda = 532$ nm	8,27	47,24	142,91
X dla $\lambda = 1064$ nm	4,13	23,62	71,45

* Wartość minimalna promienia cząstki została przyjęta jako wartość, poniżej której funkcja rozkładu przyjmuje wartości mniejsze niż 0,001.

** Wartość maksymalna promienia cząstki została przyjęta jako wartość, powyżej której funkcja rozkładu przyjmuje wartości mniejsze niż 0,001.

Charakterystyki kątowe rozpraszania dla cząstek charakterystycznych przedstawia rysunek 10.





Rys. 10. Charakterystyki kątowe rozproszenia dla cząstek o rozmiarach charakterystycznych: A) minimalnych; B) modalnych; C) maksymalnych

Wartości całkowitych przekrojów czynnych na rozproszenie oraz efektywności procesów dla cząstek charakterystycznych przedstawia tabela 3.

TABELA 3

Wartości całkowitych przekrojów czynnych na rozproszenie oraz efektywności procesów dla cząstek charakterystycznych chmury cumulus

	Cząsteczki o promieniu minimalnym	Cząsteczki o promieniu modalnym	Cząsteczki o promieniu maksymalnym
$\lambda = 532 \text{ nm}$			
$\sigma_{SCAT} [\text{m}^2]$	$4,993 \cdot 10^{-12}$	$1,091 \cdot 10^{-10}$	$9,524 \cdot 10^{-10}$
$\sigma_{BSCAT} [\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1}]$	$6,253 \cdot 10^{-14}$	$1,233 \cdot 10^{-11}$	$8,345 \cdot 10^{-10}$
$Q_{SCAT} [\text{bezwym.}]$	3,24	2,17	2,07
$Q_{BSCAT} [\text{sr}^{-1}]$	0,041	0,245	1,814

cd. tabeli 3

$\lambda = 1064 \text{ nm}$			
$\sigma_{SCAT} [\text{m}^2]$	$4,5 \cdot 10^{-12}$	$1,089 \cdot 10^{-10}$	$9,838 \cdot 10^{-10}$
$\sigma_{BSCAT} [\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1}]$	$2,615 \cdot 10^{-13}$	$1,109 \cdot 10^{-12}$	$5,942 \cdot 10^{-11}$
$Q_{SCAT} [\text{bezowym.}]$	2,933	2,163	2,139
$Q_{BSCAT} [\text{sr}^{-1}]$	0,17	0,022	0,129

Efektywne (objętościowe) współczynniki rozproszenia wstecznego obliczone dla całej populacji danego układu aerodispersyjnego według zależności:

$$B_{BSCAT} = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} f(x) \sigma_{BSCAT}(x) dx \quad (22)$$

wynoszą 0,011 dla obu długości fal.

6. Charakterystyka rozpraszania na sztucznych układach aerodispersyjnych

Przykład sztucznych układów aerodispersyjnych stanowią mieszanki dymotwórcze. Mieszanki dymotwórcze to mieszaniny pierwiastków lub związków chemicznych, które po wprowadzeniu do atmosfery tworzą trwały dym lub mgłę.

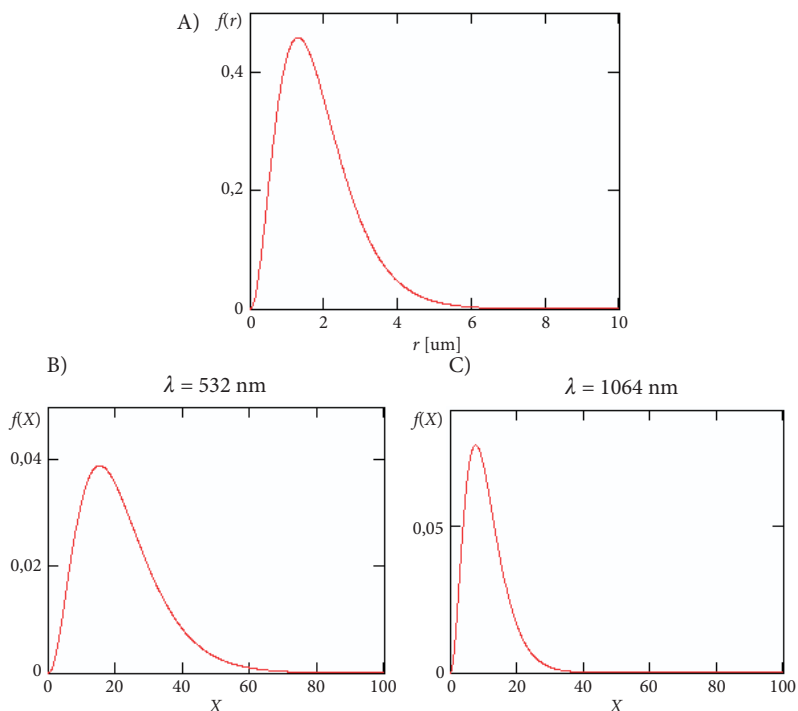
Wśród mieszanek dymotwórczych wyróżniamy trzy grupy, w zależności od rodzaju reakcji tworzenia dymu:

- reakcja składników czynnych z tlenem,
- reakcja składników czynnych z parą wodną,
- proces kondensacji par.

Analizę charakterystyk rozproszeniowych wykonano dla dymotwórczej mieszaniny pirotechnicznej DM11. Mieszanina ta składa się z: 40-60% heksachloroetanu, 4-17% glinu i/lub magnezu i/lub stopu glin-magnez, 8-22% tlenku cynku i/lub dwutlenku tytanu i/lub chloranu potasu, do 10% żelazowapniokrzemu, 8-22% antracenu i/lub naftalenu, do 5% oleju (wg patentu).

Na podstawie pomiarów zawartości cząstek w poszczególnych frakcjach dymu DM11 wyznaczono rozkład promieni cząstek dymu (przedstawiony na rysunku 11), a który aproksymowany jest wzorem:

$$f(r) = \left(\frac{1}{0,541 \cdot \Gamma(3,423)} \right) \cdot \left[\left(\frac{r}{0,541} \right)^{2,423} \exp\left(\frac{-r}{0,541} \right) \right]. \quad (23)$$



Rys. 11. Kształty funkcji rozkładu wielkości cząstek w dymie powstałym z mieszaniny pirotechnicznej DM11 w zależności od promienia cząstek (A), parametru wielkości X dla długości fali 532 (B) oraz parametru wielkości X dla długości fali 1064 nm (C)

Parametry charakterystycznych cząstek rozpraszających dymu przedstawia tabela 4.

TABELA 4

Parametry cząstek dymu o rozmiarach charakterystycznych

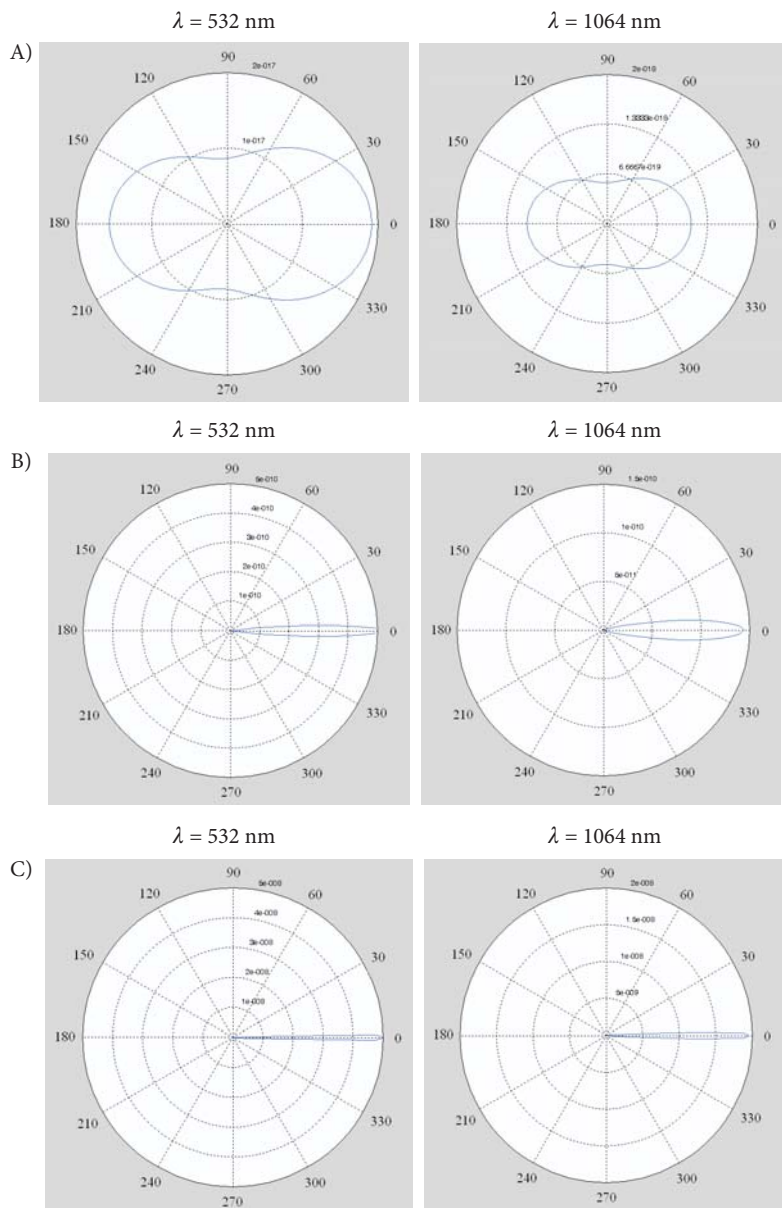
	Wartość minimalna*	Wartość modalna	Wartość maksymalna**
Promień [μm]	0,04	1,85	6,78
X dla $\lambda = 532$ nm	0,47	21,85	80,08
X dla $\lambda = 1064$ nm	0,24	10,93	40,04

* Wartość minimalna promienia cząstki została przyjęta jako wartość, poniżej której funkcja rozkładu przyjmuje wartości mniejsze niż 0,001.

** Wartość maksymalna promienia cząstki została przyjęta jako wartość, powyżej której funkcja rozkładu przyjmuje wartości mniejsze niż 0,001.

Na rysunku 12 przedstawiono charakterystyki kątowe rozpraszania dla podanych cząstek charakterystycznych. Do obliczeń za wartość współczynnika refrakcji

została przyjęta liczba 1,57-0,56 i uznano ją za modelowy współczynnik refrakcji dla dymów [8].



Rys. 12. Charakterystyki kątowe rozpraszania dla cząstek o rozmiarach charakterystycznych: A) minimalnych; B) modalnych; C) maksymalnych

Wartości całkowitych przekrojów czynnych na rozpraszanie oraz efektywności procesów dla cząstek charakterystycznych przedstawia tabela 5.

TABELA 5

Wartości całkowitych przekrojów czynnych na rozpraszanie oraz efektywności procesów dla cząstek charakterystycznych dla dymu mieszanki DM11

	Cząsteczki o promieniu minimalnym	Cząsteczki o promieniu modalnym	Cząsteczki o promieniu maksymalnym
$\lambda = 532 \text{ nm}$			
$\sigma_{SCAT} [\text{m}^2]$	~0	$1,313 \cdot 10^{-11}$	$4,128 \cdot 10^{-11}$
$\sigma_{BSCAT} [\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1}]$	~0	$9,921 \cdot 10^{-13}$	$4,974 \cdot 10^{-11}$
$Q_{SCAT} [\text{bezwym.}]$	0,028	1,221	0,092
$Q_{BSCAT} [\text{sr}^{-1}]$	0,038	0,092	0,344
$\lambda = 1064 \text{ nm}$			
$\sigma_{SCAT} [\text{m}^2]$	~0	$1,317 \cdot 10^{-11}$	$1,75 \cdot 10^{-10}$
$\sigma_{BSCAT} [\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1}]$	~0	$9,5 \cdot 10^{-13}$	$1,334 \cdot 10^{-11}$
$Q_{SCAT} [\text{bezwym.}]$	0,002	1,223	1,212
$Q_{BSCAT} [\text{sr}^{-1}]$	0,003	0,088	0,092

Efektywne (objętościowe) współczynniki rozproszenia wstecznego, obliczone dla całej populacji danego układu aerodypersyjnego, wynoszą:

$$B_{SCAT} = 0,000128563 \text{ dla } \lambda = 532 \text{ nm},$$

$$B_{BSCAT} = 0,000128963 \text{ dla } \lambda = 1064 \text{ nm}.$$

7. Badania lidarowe

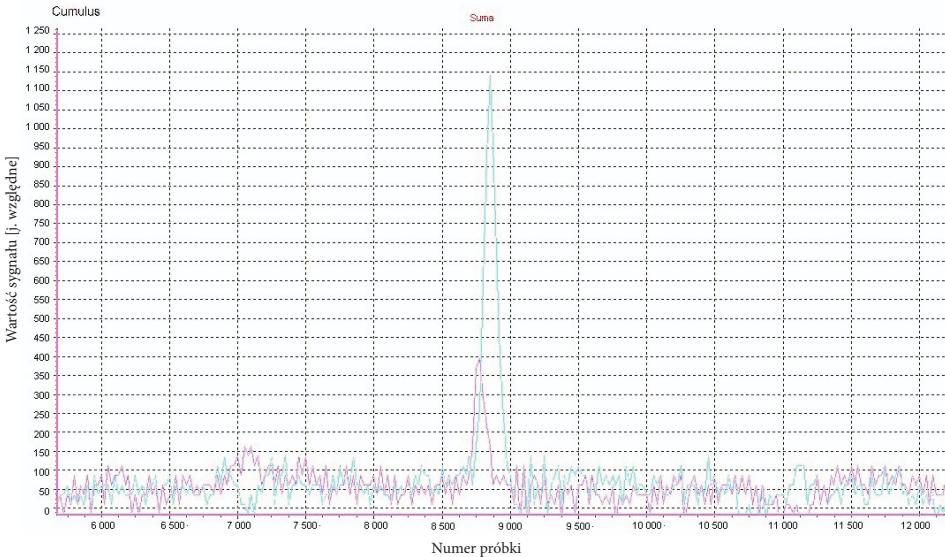
Dla omówionych wcześniej układów aerodypersyjnych przeprowadzono badania przy użyciu LIDARA rozproszeniowego, opracowanego w Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. LIDAR ten jest dwubarwny, jego działanie opiera się na analizie sygnału powrotnego dla długości fal: $\lambda_1 = 532 \text{ nm}$ oraz $\lambda_2 = 1064 \text{ nm}$ (druga i pierwsza harmoniczna generacji lasera Nd:YAG). Współczynnik osłabienia sygnału dla λ_1 względem λ_2 , związany z parametrami omawianego LIDARA wynosi około 3,3 (współczynnik kalibracyjny).

Otrzymane w badaniach sygnały zaprezentowane zostały na rysunkach 13 i 14.

Badania chmury cumulus:

Otrzymany stosunek wartości szczytowych sygnału $\lambda_1 = 532$ nm do $\lambda_2 = 1064$ nm, z uwzględnieniem parametru kalibracyjnego LIDARA, wynosi:

$$\frac{A_{\lambda_1}}{A_{\lambda_2}} \cdot 3,3 = \frac{400}{1150} \cdot 3,3 = 1,148. \quad (24)$$



Rys. 13. Oscylogram sygnału LIDAROWEGO dla $\lambda_1 = 532$ nm (kolor magenta) oraz $\lambda_2 = 1064$ nm (kolor cyjan) otrzymany z chmury cumulus

Otrzymany z przeprowadzonych analiz teoretycznych stosunek efektywności rozpraszania wstecznego dla tych długości fal wynosi:

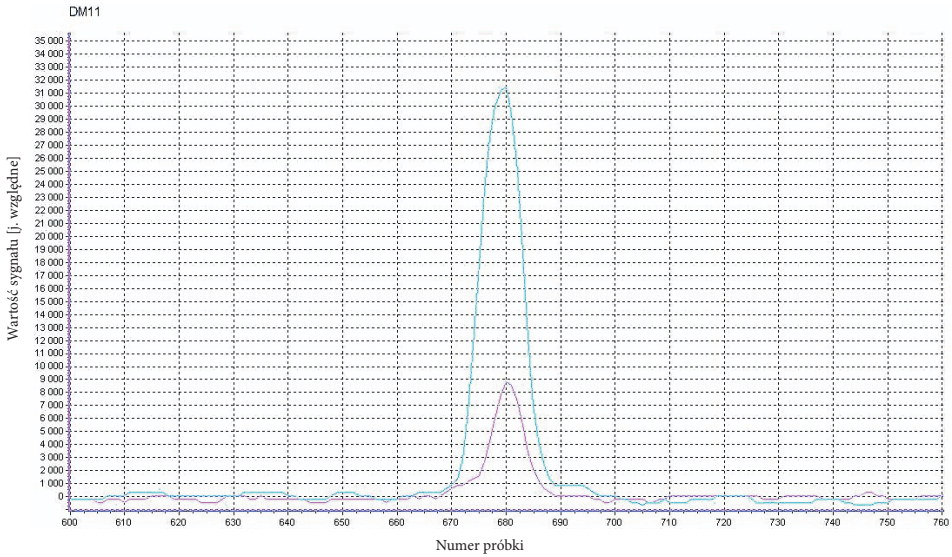
$$\frac{B_{BSCAT\lambda_1}}{B_{BSCAT\lambda_2}} = \frac{0,011}{0,011} = 1. \quad (25)$$

Różnica między stosunkiem sygnału wyliczonym teoretycznie a otrzymanym w wyniku badań wynosi 14,8%.

Badania dymu powstałego z mieszaniny pirotechnicznej DM11:

Otrzymany stosunek wartości maksymalnych sygnałów $\lambda_1 = 532 \text{ nm}$ do $\lambda_2 = 1064 \text{ nm}$, z uwzględnieniem parametru kalibracyjnego LIDARA wynosi:

$$\frac{A_{\lambda_1}}{A_{\lambda_2}} \cdot 3,3 = \frac{8800}{31500} \cdot 3,3 = 0,922. \quad (26)$$



Rys. 14. Oscylogram sygnału lidarowego dla $\lambda_1 = 532 \text{ nm}$ (kolor magenta) oraz $\lambda_2 = 1064 \text{ nm}$ (kolor cyan) otrzymany od dymu powstałego z mieszaniny pirotechnicznej DM 11

Otrzymany z przeprowadzonych analiz teoretycznych stosunek efektywności rozpraszania wstecznego dla tych długości fal wynosi:

$$\frac{B_{BSCAT\lambda_1}}{B_{BSCAT\lambda_2}} = \frac{0,000128563}{0,000128963} = 0,997. \quad (27)$$

Różnica między stosunkiem sygnału wyliczonym teoretycznie a otrzymanym w wyniku badań wynosi 7,5%.

8. Podsumowanie

W artykule został przedstawiony model rozpraszania promieniowania elektromagnetycznego na cząstkach sferycznych oraz zaprezentowany model dopasowania

cząstek niesferycznych do teorii Rayleigha i Mie. Pokazano podstawowe wielkości i zależności współczynników występujących w teorii rozpraszania oraz przedstawiono je graficznie.

Omówione zostały układy aerodispersyjne z podziałem na naturalne oraz sztuczne. Z obu grup aerozoli wybrany został jeden przykład i dla niego przeprowadzono teoretyczne analizy charakterystyk rozproszeniowych. Wyniki analiz porównane zostały z wartościami otrzymanymi podczas badań z zastosowaniem dwubarwnego LIDARA rozproszeniowego, opracowanego w Instytucie Optoelektroniki w Wojskowej Akademii Technicznej.

Wyniki badań zbliżone są do wartości otrzymanych z analiz teoretycznych i wynoszą:

- dla chmury cumulus:
 - teoretyczny stosunek sygnału $\frac{\lambda_{532}}{\lambda_{1064}}$ wynosi 1;
 - otrzymany z badań stosunek sygnału $\frac{\lambda_{532}}{\lambda_{1064}}$ wynosi 1,148;
 - różnica między wartościami wynosi 14,8%;
- dla dymu powstałego z mieszaniny pirotechnicznej DM11:
 - teoretyczny stosunek sygnału $\frac{\lambda_{532}}{\lambda_{1064}}$ wynosi 0,997;
 - otrzymany z badań stosunek sygnału $\frac{\lambda_{532}}{\lambda_{1064}}$ wynosi 0,922;
 - różnica między wartościami stanowi 7,5%.

Różnice w otrzymanych wartościach mogą wynikać zarówno z czynników związanych z układem rozpraszającym (nieidealność odwzorowania rozkładu wielkości aerozoli przez funkcję rozkładu, niesferyczność kształtów cząstek rozpraszających, różnice między przyjętymi, modelowymi wartościami współczynnika refrakcji a wartościami rzeczywistymi), jak i czynników dotyczących samego układu pomiarowego — LIDARA (nieidealność pomiaru parametrów uwzględnianych we współczynniku kalibracji, naturalny rozrzut energii generowanych impulsów). Dodatkowym czynnikiem mogącym powodować różnice w wynikach jest niejednoczesna rejestracja sygnału dla zastosowanych długości fal. Podczas istniejącego opóźnienia czasowego możliwe jest zajście szybkich zmian w ośrodku rozpraszającym, czego efektem jest zmiana w odbieranym sygnale. Do zmian ośrodka rozpraszającego może należeć: zmiana koncentracji cząstek rozpraszających (zagęszczenie lub rozrzedzenie układu aerodispersyjnego), efekty związane ze starzeniem się dymów (zachodzenie procesów koagulacji i sedymentacji cząstek rozpraszających), zmiana ułożenia układu aerodispersyjnego względem

LIDARA (zmniejszenie lub zwiększenie części układu aerodispersyjnego znajdującej się w polu widzenia LIDARA).

Artykuł wpłynął do redakcji 6.03.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w maju 2008 r.

LITERATURA

- [1] P. YANG, H. WEI, G. W. KATTAWAR, Y. X. HU, D. M. WINKER, C. A. HOSTETLER, B. A. BAUM, *Sensitivity of the backscattering Mueller matrix to particle shape and thermodynamic phase*, Applied Optics, vol. 42, 2003, 4380-4395.
- [2] J. W. HOVEWIER, C. V. M. VAN DER MEE, *Testing scattering matrices: a compendium of recipes*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, vol. 55, 1996, 649-661.
- [3] H. C. VAN DE HULST, *Light Scattering by Small Particles*, Wiley, New York, 1957.
- [4] D. W. HAHN, *Light Scattering Theory*, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Florida, 2006.
- [5] S. WOLF, N. V. VOSHCHINNIKOV, *Mie scattering by ensembles of particles with very large size parameters*, Computer Physics Communications, vol. 162, 2004, 113-123.
- [6] Q. XIE, H. ZHANG, Y. WAN, Y. ZHANG, L. QIAO, *Characteristic of Light Scattering by Smoke Particles Based on Spheroid Models*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, vol. 107, 2007, 72-82.
- [7] A. KOKHANOWSCY, *Optical properties of terrestrial clouds*, Earth-Science Reviews, vol. 64, 2004, 189-241.
- [8] K. C. SMYTH, C. R. SHADDIX, *The Elusive History of $m = 1.57 - 0.56i$ for the Refractive Index of Soot*, Combustion and Flame, vol. 107, 1996, 314-320.

M. SZOPA, Z. MIERCZYK, M. ZYGMUNT

Analyses of scattering characteristics of chosen aerodispersive systems

Abstract. In the article, theoretical analyses of a scattering profile of chosen aerosols were made. For these analyses both a model of scattering from spherical particles and nonspherical particles was used. One discussed natural and anthropogenic aerosols, and results of analyses of chosen aerosols were presented. The obtained theoretical results were compared to the results of research with the use of two-wavelength backscattering LIDAR worked out at the Institute of Optoelectronics of the Military University of Technology.

Keywords: light scattering, natural aerosols, anthropogenic aerosols, LIDAR

Universal Decimal Classification: 535.3

