

PROPAGACJA WIĄZKI ŚWIATŁA LASERA W ŚLADZIE AERODYNAMICZNYM WYBRANYCH OBIEKTÓW MODELOWYCH

Katarzyna KLEMM^{*}, Krzysztof PIESZYŃSKI^{**},
Kazimierz ROŻNIAKOWSKI^{***}

^{*} Politechnika Łódzka, Instytut Architektury i Urbanistyki
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: katarzyna.klemm@p.lodz.pl

^{**} Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki
ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, e-mail: krzysztof.pieszynski@p.lodz.pl

^{***} Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki
ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, e-mail: kazimierz.rozniakowski@p.lodz.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań propagacji wiązki światła lasera w śladzie aerodynamicznym wybranych obiektów. Zaobserwowano zależność między parametrami wiązki światła a kształtem modelowych obiektów. Do analizy wybrano rozkład amplitud natężenia światła, który przybliżono rozkładem gaussowskim. Parametry tego rozkładu mogą być przydatne do oszacowania wybranych parametrów śladu aerodynamicznego.

Słowa kluczowe: ślad aerodynamiczny, wiązka światła lasera, rozkład Gaussa, mediana, wariancja.

1. WPROWADZENIE

Propagacja wiązki światła lasera w powietrzu atmosferycznym jest związana z fluktuacjami współczynnika załamania. Efekty tego zjawiska obserwowane są od stuleci, głównie w astronomii, między innymi jako migotanie, drganie gwiazd, deformacje na przykład tarczy słonecznej podczas zachodu, miraży i zniekształcenia obrazu w pobliżu gorących obiektów [1-3]. Zauważalne są one nawet przy odległościach dużo mniejszych niż w powyższych przypadkach, zwłaszcza jeśli w badaniach użyto światła spójnego i monochromatycznego (wiązka lasera). Te efekty mogą mieć duży wpływ na próby użycia takiej wiązki do przesyłania informacji. Dlatego też do komunikacji optycznej stosuje się pozwalające wyeliminować te oddziaływania światłowodów, jednak nie zawsze jest to możliwe, zwłaszcza jeśli taka komunikacja ma charakter doraźny lub dokonuje się między obiektami pozostającymi w ruchu [4-6]. Zaburzenia w propagacji wiązki lasera powodowane przez przepływ powietrza mogą również zostać wykorzystane do badania tegoż przepływu, mierzenia jego prędkości, monito-

ringu turbulencji, a w efekcie mogą przyczynić się do eliminacji niepożądanych zjawisk takich jak: silne wiatry i zawirowania powietrza w obszarach zabudowanych powodujące dyskomfort wśród mieszkańców, powstawanie źródeł hałasu,

niepożądane rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń lub przeciwnie – ich nadmiernej koncentracji, czy też występowanie nagłych podmuchów na szlakach komunikacyjnych, na przykład na mostach czy przy wlotach do tuneli, mogących stanowić zagrożenie dla bezpieczeństwa odbywającego się tam ruchu samochodowego [7-9].

Celem tej pracy jest próba zbadania wpływu jaki na propagację wiązki światła lasera mogą mieć zaburzenia przepływu powietrza wywołane znajdującymi się w pobliżu obiektami architektonicznymi oraz opisanie zależności między kształtem obiektu a wpływem przez niego wywieranym na parametry liczbowe uzyskane ze statystycznej analizy otrzymanych wyników (rozkład Gaussa, mediana, wariancja). Aby ten cel osiągnąć posłużono się modelem doświadczalnym o rozmiarach umożliwiających używanie go wewnątrz laboratorium oraz podyktowanych dostępnością materiałów.

2. PODSTAWY TEORETYCZNE

Jeśli przyjąć, że wiązka światła (obecnie w badaniach doświadczalnych często używa się wiązek generowanych przez lasery) nie napotyka na swojej drodze przeszkód, na tyle małych w stosunku do długości fali świetlnej, aby trzeba było uwzględniać zjawiska dyfrakcyjne, to wtedy wszystkie rozważania dotyczące jej propagacji, można

przeprowadzić w oparciu o prawa optyki geometrycznej [1,3,7].

Jeżeli przyjąć ponadto, że ośrodek będzie pod względem optycznym jednorodny, czyli współczynnik załamania n nie będzie zależał od współrzędnych, wówczas światło poruszać się będzie po linii prostej, w przeciwnym przypadku, tor wiązki światła może być inny.

Przyczyną, która powoduje zmianę lokalnej wartości współczynnika załamania $n(x,y,z)$ w gazie, jest zgodnie z prawem Lorenza-Lorentza [3] i wynikami wielu badań eksperymentalnych [1,3,7] zmiana gęstości gazu, jest ona przedstawiana za pomocą związku:

$$n \approx 1 + \frac{3}{2} \rho \cdot \text{const}(v) \quad (1)$$

gdzie: ρ – gęstość gazu, v – częstość światła.

Natomiast zmiana gęstości może zostać wywołana zmianą ciśnienia czy też temperatury, co w przypadku gazów wynika z równania Clapeyrona lub Van der Waalsa [5].

Niezależnie jednak od przyczyn powstania niejednorodności współczynnika załamania $n(x,y,z)$, tor promienia najwygodniej jest w takiej sytuacji wyznaczyć z równania toru promienia. To równanie w postaci wektorowej ma postać [3]:

$$\frac{d}{ds} \left(n(x,y,z) \frac{d\vec{r}}{ds} \right) = \vec{\nabla} n(x,y,z) \quad (2)$$

gdzie $\vec{r} = x \cdot \vec{i} + y \cdot \vec{j} + z \cdot \vec{k}$ – jest wektorem opisującym położenie punktów toru promienia, ds – opisuje element toru.

W wielu przypadkach można przewidzieć funkcyjny kształt $n(x,y,z)$, na przykład jego liniowy charakter. W takich sytuacjach można wyznaczyć równanie toru biegu wiązki światła i porównując wyniki obliczeń z danymi eksperymentalnymi, ustalić ilościowo wartości współczynników wyznaczających przewidywany funkcyjny kształt $n(x,y,z)$.

W przypadku gdy współczynnik załamania zależy tylko od jednej współrzędnej i jest jej liniową funkcją, na przykład $n = n_0 + n_1 \cdot x$, gdzie n_0 i n_1 są pewnymi stałymi, a równoległa wiązka światła, początkowo rozchodzi się wzdłuż osi z , to w pierwszym przybliżeniu z równania (2) otrzymuje się równanie toru wiązki światła w postaci paraboli (3), której ramiona są odchyłone w kierunku zwiększającego się współczynnika załamania:

$$z = \alpha \cdot x^2 \quad (3)$$

gdzie α jest stałą zależną od n_1 .

W przypadku gdy obserwacja wiązki dokonywana jest w płaszczyźnie prostopadłej do początkowego kierunku rozchodzenia się światła analizę obserwowanego zjawiska można przeprowadzić, badając jak zmienia się amplituda natężenia światła.

3. METODYKA BADAŃ

W pomiarach wykorzystano następujące elementy aparaturowe: źródłem przepływu powietrza była dmuchawa zasilana prądem stałym o napięciu $U=6,5$ V i natężeniu $I=0,5$ A za pomocą zasilacza laboratoryjnego. Modele, które użyto do badań były bryłami wykonanymi z pleksiglasu o wysokości 5 cm; walec o średnicy 3 cm; oraz graniastosłupy o podstawach kwadratowej i trójkątnej – boki o długości 3 cm. Dmuchawa została trwale przymocowana do płyty pleksiglasowej o długości 40 cm, szerokości 21 cm, i grubości 8mm. Ta płyta mogła być swobodnie przemieszczana po powierzchni ciężkiego, optycznego stołu laboratoryjnego. Na płycie przed dmuchawą przyklejono arkusz papieru milimetrowego, umożliwiając dokładne określanie pozycji ustawionych brył względem dmuchawy, jak również pozycję całego układu płyta-dmuchawa-bryła względem stołu laboratoryjnego, a tym samym zamocowanego na nim lasera. W badaniach wykorzystano laser półprzewodnikowy o pracy ciągłej, emitujący światło o długości fali 670 nm, wiązka lasera biegła 25 mm nad poziomem stołu, to znaczy 17mm nad poziomem pleksiglasowej płyty, i docierała do oddalonej od lasera o 32 cm fotodiody typu BPYP.17, podłączonej do oscyloskopu cyfrowego lub nanowoltomierza selektywnego sprzężonego z komputerem. Przed pomiarami optycznymi, z użyciem lasera zmierzono pole prędkości przepływu powietrza w warunkach bez przeszkody, oraz w obecności kolejnych przeszkód (modeli budynków) za pomocą anemometru.

Poniższe skróty oznaczają jaki typ obiektu modelowego i w którym miejscu został umieszczony w układzie pomiarowym:

Układ 1 – bez modelowego obiektu.

Układ 2 – modelowy obiekt w kształcie walca, znajdujący się w odległości 5 cm od wylotu dmuchawy i 6 cm od lewej strony papieru milimetrowego.

Układ 3 – modelowy obiekt o podstawie kwadratu, którego krawędź umieszczono równoległe do linii papieru milimetrowego, znajdujący się w odległości 5 cm od wylotu dmuchawy i 6 cm od lewej strony papieru milimetrowego.

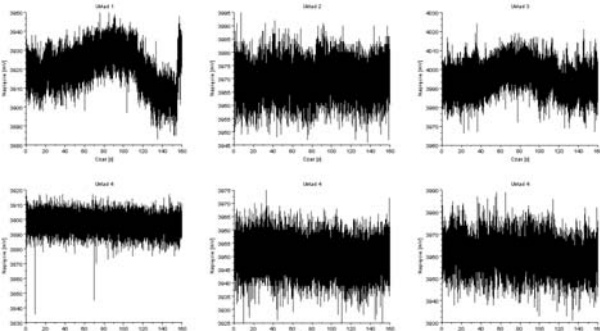
Układ 4 - modelowy obiekt o podstawie kwadratu, którego krawędź ustawiono pod kątem 45 stopni do linii papieru milimetrowego, znajdujący się w odległości 5 cm od wylotu dmuchawy i 5,4 cm od lewej strony papieru milimetrowego.

Układ 5 – modelowy obiekt o podstawie trójkąta równobocznego, skierowanego wierzchołkiem w kierunku dmuchawy, znajdujący się w odległości 5,3 cm od dmuchawy i 6 cm od lewej krawędzi papieru milimetrowego.

Układ 6 – modelowy obiekt o podstawie trójkąta równobocznego skierowany bokiem trójkąta równoległe do dmuchawy, znajdujący się w odległości 5 cm od dmuchawy i 6 cm od lewej krawędzi papieru milimetrowego.

4. WYNIKI BADAŃ

W pierwszej kolejności (rys. 1) zamieszczono charakterystyczne wyniki pomiarów sygnału (fluktuacji natężenia światła) dla kolejnych wymienionych wcześniej układów. Z zamieszczonych na tym rysunku fluktuacji natężenia światła wynika, że ich amplituda zależy od zastosowanego układu.



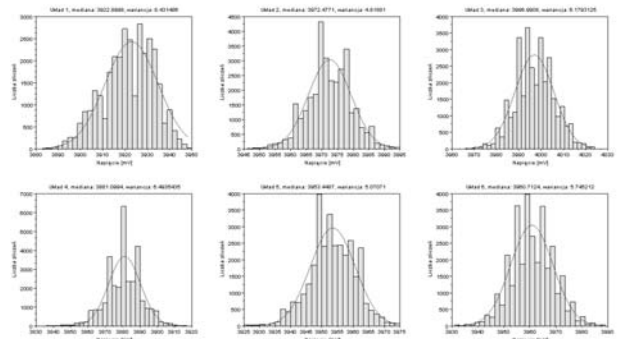
Rys. 1. Wyniki pomiaru napięcia na fotodiodzie w odległości 1,5 cm od dmuchawy.

Fig. 1. Photodiode voltage for the different models systems U.

Tymczasem na rysunku 2 przedstawiono histogramy zarejestrowanych wcześniej fluktuacji natężenia światła. Ponadto na każdym rysunku zamieszczono obwiednię otrzymanego histogramu. Przyjmując, że zarejestrowany sygnał jest zmienną losową, której gęstość wyraża się wzorem [4]:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

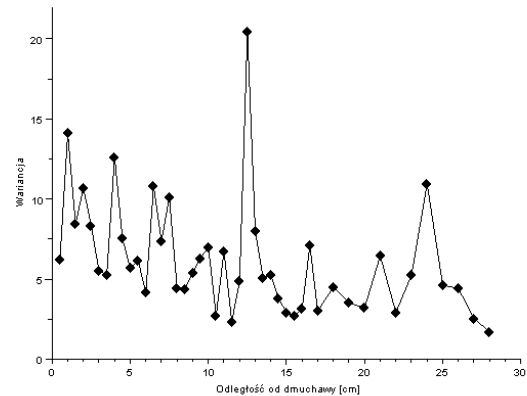
gdzie: m – jest medianą, a σ^2 jest wariancją, obliczono te parametry dla wymienionych wcześniej układów w funkcji odległości od dmuchawy.



Rys. 2. Histogramy oraz przybliżające je funkcje Gaussa dla pomiaru w odległości 1,5 cm od dmuchawy.

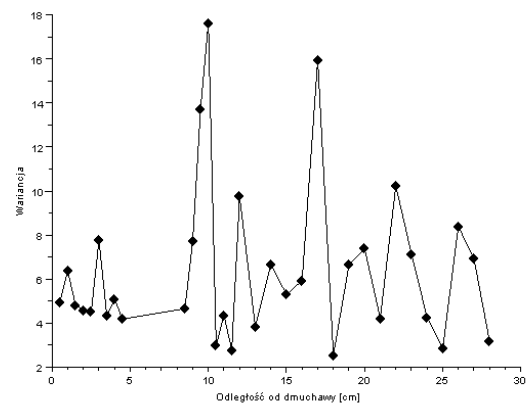
Fig. 2. Histogram of the Gaussian distribution for the different models systems U.

Otrzymane wyniki obliczeń wariancji przedstawiono na rysunkach 3 -8, a mediany na rysunkach 9-14.



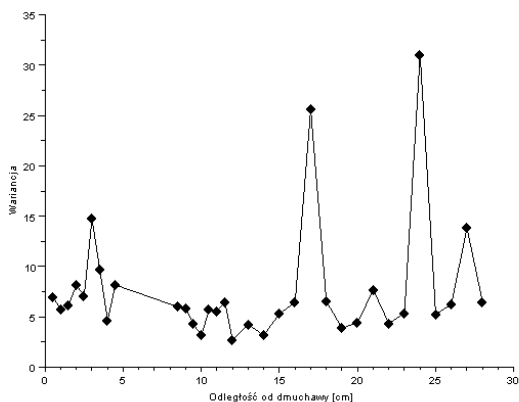
Rys. 3. Wariancja w funkcji odległości pomiaru od dmuchawy dla układu 1.

Fig. 3. Variance versus distance for U1 system.

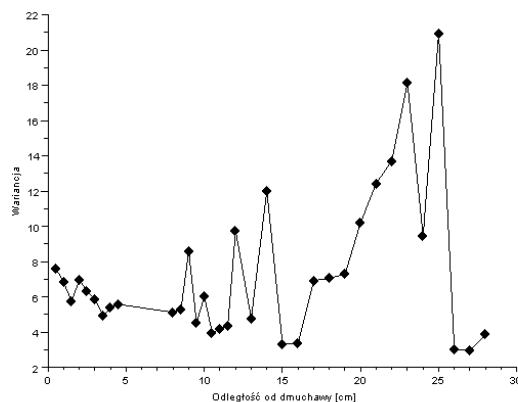


Rys. 4. Wariancja w funkcji odległości pomiaru od dmuchawy dla układu 2.

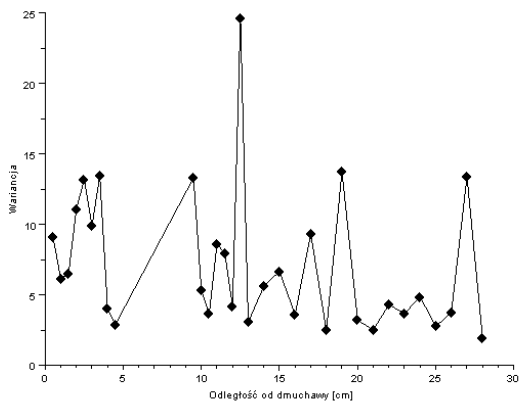
Fig. 4. Variance versus distance for U2 system.



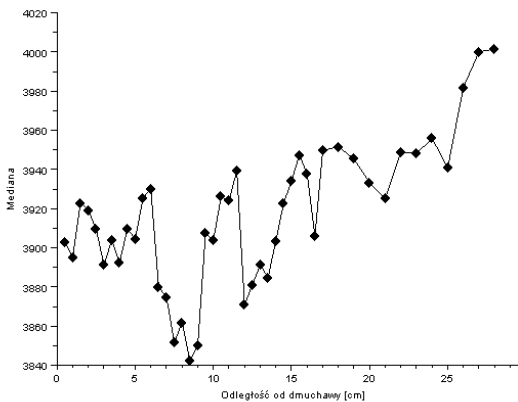
Rys. 5. Wariancja w funkcji odległości pomiaru od dmuchawy dla układu 3.
Fig. 5. Variance versus distance for U3 system.



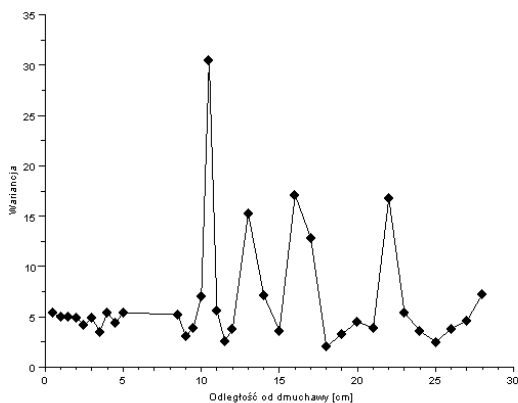
Rys. 8. Wariancja w funkcji odległości pomiaru od dmuchawy dla układu 6.
Fig. 8. Variance versus distance for U6 system.



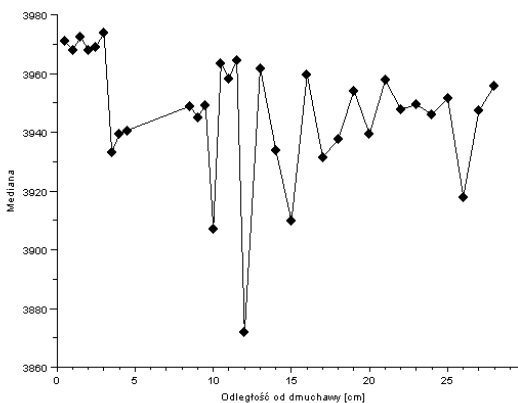
Rys. 6. Wariancja w funkcji odległości pomiaru od dmuchawy dla układu 4.
Fig. 6. Variance versus distance for U4 system.



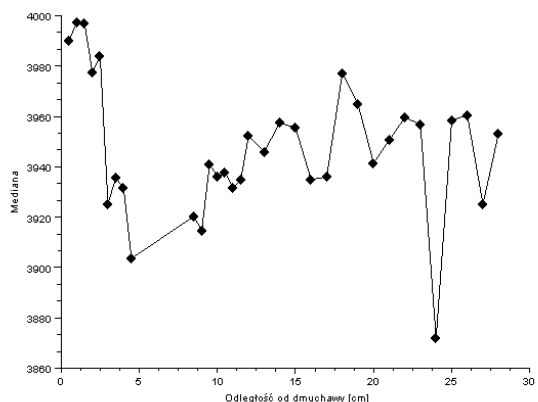
Rys. 9. Mediana w funkcji odległości pomiaru od dmuchawy dla układu 1.
Fig. 9. Median versus distance for U1 system.



Rys. 7. Wariancja w funkcji odległości pomiaru od dmuchawy dla układu 5.
Fig. 7. Variance versus distance for U5 system.

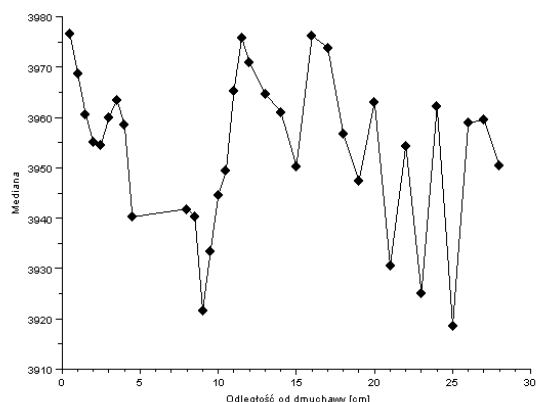


Rys. 10. Mediana w funkcji odległości pomiaru od dmuchawy dla układu 2.
Fig. 10. Median versus distance for U2 system.



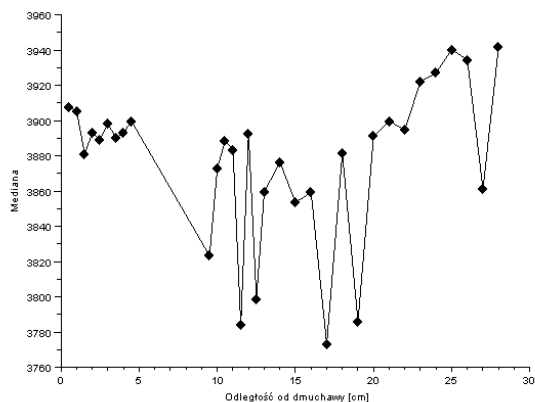
Rys. 11. Mediana w funkcji odległości pomiaru od dmuchawy dla układu 3.

Fig. 11. Median versus distance for U3 system.



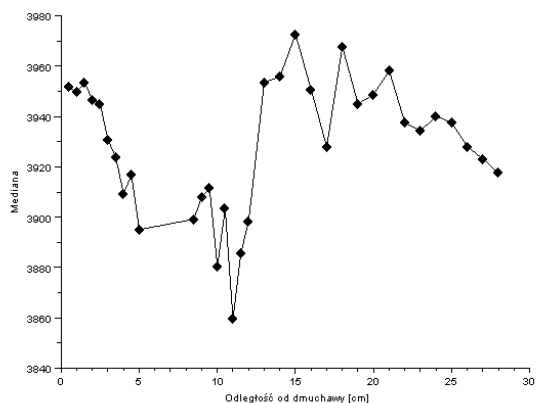
Rys. 14. Mediana w funkcji odległości pomiaru od dmuchawy dla układu 6.

Fig. 14. Median versus distance for U6 system.



Rys. 12. Mediana w funkcji odległości pomiaru od dmuchawy dla układu 4.

Fig. 12. Median versus distance for U4 system.



Rys. 13. Mediana w funkcji odległości pomiaru od dmuchawy dla układu 5.

Fig. 13. Median versus distance for U5 system.

5. PODSUMOWANIE

Jednym z podstawowych problemów pojawiających się podczas wykonywania powyższych badań jest dokładność wykonywanych pomiarów na każdym ich etapie. Wszystkie badania wykonano w niezbyt dużym pomieszczeniu laboratoryjnym, w którym ruch powietrza a także zmiana jego parametrów, takich jak temperatura lub wilgotność, mogły powodować dodatkowe fluktuacje mierzonego sygnału.

Zamieszczone w tej pracy wyniki badań dotyczą rejestracji fluktuacji natężenia światła za pomocą wzmacniacza selektywnego, przy całkowitym czasie trwania pomiaru 35 sekund. Zatem, mogą pojawiać się wtedy długookresowe fluktuacje światła, które utrudniają rejestrację właściwego sygnału. Wynika stąd, że wykonanie pomiarów w czasie znacznie krótszym (kilka sekund) mogłoby wyeliminować te długookresowe fluktuacje.

Przybliżanie uzyskanych histogramów za pomocą rozkładu normalnego jest dość dokładne, z wyjątkiem pomiarów ze wspomnianymi wyżej zaburzeniami długookresowymi, kiedy to następuje znacząca deformacja kształtu uzyskiwanego histogramu, niejednokrotnie zauważalne jest wtedy drugie maksimum. Zmiany wariancji i mediany w obszarze śladu aerodynamicznego dają się względnie dobrze przybliżyć liniowo. Należy sądzić, że jakość przybliżenia zwiększy się jeszcze bardziej gdy skróci się czas pomiaru. Potencjalnie otwiera to drogę do prób określania typu modelu architektonicznego zaburzającego przepływ powietrza na podstawie samej analizy sygnału z fotodiody (rozkładu amplitud natężenia światła).

LASER BEAM PROPAGATION IN THE AERODYNAMIC WAKE OF SELECTED MODELS OBJECTS

Summary: The work presents some experimental examinations of the laser beam propagation in the aerodynamic wake of selected objects (obstacles). Large differences between laser light intensity for used objects were observed. Gaussian distribution (median, variance) for the light intensity was analyzed.

LITERATURA

- [1] Skorko M., Fizyka, PWN 1979, Warszawa.
- [2] Jaworski B.M., Dietłaf A.A., Fizyka poradni encyklopedyczny, PWN 1971, Warszawa.
- [3] Kaczmarek F., Wstęp do fizyki laserów, PWN 1986, Warszawa.
- [4] Mahdih M.H., "Numerical approach to laser beam propagation through turbulent atmosphere and evaluation of beam quality factor", Optics Communications 281 (2008) 3395–3402
- [5] Verraneault R.E., JR. and Akora R.K., "Effects of turbulence on laser beam position", Digital Avionics Systems, 2001. DASC.
- [6] Tan G.T., Lg P.Y., Feng G.H., Lin J.R., Zhao Q.E., Huang X.D., "The elimination-compensation-utilization technique of the turbulence effects of the collimated laser beam in the atmospheric propagation", Antennas and Propagation Society International Symposium, 1985
- [7] Klemm K., Pieszyński K., Roźniakowski K., „Wizualizacja turbulentnego przepływu powietrza w strefie modelu za pomocą parametru C_n ”, Fizyka budowli w teorii i praktyce, Nr 2 – 2010.
- [8] Moryń-Kucharczyk E., „Aerodynamika Środowiska”, http://imc.pcz.czest.pl/instytut/pl/3/3.8/materialy/eelab/e_e_11.pdf
- [9] „Przepływy turbulentne i ich metrologia”, http://www.imc.pcz.czest.pl/instytut/pl/3/3.8/materialy/mp2_wp/mp2_wp6b.pdf
- [10] Deresz E., Koch C., Kulesza T. Trajdos, Wojdat M., Poradnik Inżyniera - Matematyka, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1971.