WYDZIAŁ FIZYKI
UNIWERSYTET WARSZAWSKI

ZADANIE G3
MIERZENIE ODLEGŁOŚCI ZA POMOCĄ LIDARU.

1. Cel ćwiczenia

Ćwiczenie polega na wykonaniu pomiarów w laboratorium przy użyciu prostego systemu lidarowego. Zostanie sprawdzona poprawność wyjustowania układu emisji i detekcji wiązki lasera i przeprowadzenie za jego pomocą szeregu pomiarów.

Celem ćwiczenia jest:

- zrozumienie zasady działania lidaru na podstawie budowy używanego, prostego systemu lidarowego;
- pomiar odległości do obiektu za pomocą pomiaru czasu przelotu impulsu lasera i wyznaczenie parametrów systemu, takich jak opóźnienie czasowe sygnału oraz martwego pola systemu;
- wyznaczenie prędkości światła w powietrzu;
- oszacowanie dywergencji wiązki lasera wykorzystywanego w używanym systemie lidarowym.

2. Wprowadzenie teoretyczne

2.1. Czym jest lidar?

Lidar (ang. ***Li**ght **D**etection **a**nd **R**anging*) jest instrumentem pomiarowym działającym w oparciu o aktywną teledetekcję. Technologia ta wykorzystuje promieniowanie elektromagnetyczne (np. wiązkę laserową) o ściśle określonej długości fali, zależnej od przeznaczenia aparatury. Służy m.in. do detekcji obiektów oraz pomiaru odległości do nich. Poprzez emisję impulsów świetlnych i pomiar czasu ich przelotu - od lasera do momentu detekcji powrotu odbitego lub rozproszonego światła do detektora - systemy lidarowe mogą z dobrą precyzją określać odległość do celu. Co więcej poprzez interakcję zachodzące między światłem, a badany ośrodkiem, można analizować jego strukturę. Zasada pomiaru jest analogiczna do tej stosowanej w radarach, ale lidar wykorzystuje generowane przez lasery promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie optycznym (nadfioletowym -UV, widzialnym - VIS lub podczerwonym - IR) [1].

Lidary coraz częściej znajdują zastosowanie w życiu codziennym, m. in. w samochodach autonomicznych czy robotach sprzątających. Ogromna różnorodność tych systemów pozwala na ich wykorzystywanie zarówno do prostych pomiarów odległości, czy też mapowaniu topograficznemu jak również do badania złożonych procesów fizycznych.

Duża grupa systemów lidarowych (np. lidary Mie-Ramana, skaningowe, oceaniczne czy też dopplerowskie) ma ogromne znaczenie w badaniach atmosferycznych. Umożliwiają one wykrywanie podstawy chmur, wyznaczanie wysokości występowania warstw aerozoli atmosferycznych oraz badanie ich własności optycznych. Pomiary te pozwalają na określenie zdolności aerozoli do rozpraszania i absorpcji promieniowania, a w sposób pośredni ich kształtu (poprzez pomiar zmiany stopnia polaryzacji światła), czy też rozmiaru (wyznaczanie wykładnika Angstroma) [1]. Wyspecjalizowane systemy lidarowe pozwalają również na badanie złożonych procesów zachodzących w atmosferze (np. ruchy turbulentne) oraz w warstwie przypowierzchniowej oceanów.

Lidary można również klasyfikować ze względu na platformę pomiarową, czyli miejsce ich instalacji. Pierwszą grupę stanowią lidary naziemne stacjonarne, prowadzące obserwacje w stałych lokalizacjach, czego przykładem może być europejska sieć badawcza

EARLINET-ACTRIS [2], bądź sieć lidarów typu Polly^{XT} (PollyNET) [3]. Drugą kategorią są lidary naziemne mobilne - instalowane w przygotowanych do tego zabudowach pojazdów, na przyczepach lub na pokładach statków badawczych, które po spełnieniu odpowiednich wymogów bezpieczeństwa umożliwiają wykonywanie pomiarów w dowolnym rejonie. Kolejną grupę tworzą lidary lotnicze, montowane na pokładach samolotów, zazwyczaj kierujące wiązkę laserową ku powierzchni Ziemi (w nadirze). Wykorzystuje się je m.in. w badaniach procesów atmosferycznych oraz do walidacji obserwacji satelitarnych - przykładem są pomiary z wykorzystaniem lidaru HSRL podczas kampanii NASA ACTIVATE [4] czy loty badawcze samolotu HALO w ramach europejskich misji EUREC4A [5] i PERCUSION [6]. Ostatnią grupą są lidary satelitarne, pracujące na orbicie okołoziemskiej i zapewniające globalny zasięg obserwacji, takie jak instrumenty działające w ramach misji CALIPSO [7] oraz EarthCARE [8].

2.2. Mechanizmy interakcji światła z materią

Podczas propagacji światła w ośrodku materialnym zachodzi szereg procesów, które ze względu na ich naturę można podzielić na odbicie, rozpraszanie oraz absorpcję. W przypadku lidarowych pomiarów atmosferycznych główną rolę odgrywają procesy absorpcji, czyli pochłaniania energii promieniowania przez składniki ośrodka (m.in. parę wodną, dwutlenek węgla czy ozon) i jej zamiany na energię wewnętrzną, czy też rozpraszania [1]. Ze względu na zachowanie energii fotonu rozpraszanie dzieli się na elastyczne oraz nieelastyczne, w wyniku którego rozproszone światło odpowiednio zachowuje bądź zmienia swoją długość fali. Do najważniejszych mechanizmów rozpraszania w atmosferze należą:

- **Rozpraszanie Rayleigha -** rozpraszanie elastyczne zachodzące na cząsteczkach gazów atmosferycznych o rozmiarach znacznie mniejszych od długości fali padającego promieniowania. Jest ono najsilniejsze dla fal krótkich (np. w zakresie ultrafioletu, proporcjonalnie do λ^{-4}), jednak charakteryzuje się niewielkim przekrojem czynnym, przez co w pomiarach na krótkich dystansach (np. w pomieszczeniach) sygnał ten jest zazwyczaj niemierzalny.
- **Rozpraszanie Mie** - rozpraszanie elastyczne na cząstkach o rozmiarach porównywalnych z długością fali lub większych od niej, takich jak aerozole atmosferyczne, pyły czy kropelki wody (tworzące mgłę i chmury). Jest znacznie silniejsze od rozpraszania Rayleigha i stanowi główne źródło sygnału rozproszonego wstecz w badaniach atmosfery.
- **Rozpraszanie Ramana -** rozpraszanie nieelastyczne na cząsteczkach gazów, podczas którego następuje wymiana energii między fotonem a stanami rotacyjno-oscylacyjnymi cząsteczki, skutkująca przesunięciem długości fali (pasma Stokesa i antystokesa). Choć jest o kilka rzędów wielkości słabsze od rozpraszania Rayleigha, pozwala na selektywną identyfikację oraz wyznaczanie profili stężeń wybranych gazów (np. pary wodnej).

Moc powracającego sygnału zależy od właściwości optycznych badanego ośrodka. Dwie kluczowe wielkości fizyczne opisujące oddziaływanie promieniowania z atmosferą to **współczynnik rozpraszania wstecznego *β(z)* [m^{-1} sr^{-1}]**, określający część promieniowania rozproszonego w kierunku odbiornika na jednostkę długości i jednostkowy kąt bryłowy oraz **współczynnik ekstynkcji *α(z)* [m^{-1}]** uwzględniający całkowite tłumienie wiązki laserowej (wskutek rozpraszania i absorpcji) podczas jej propagacji [10].

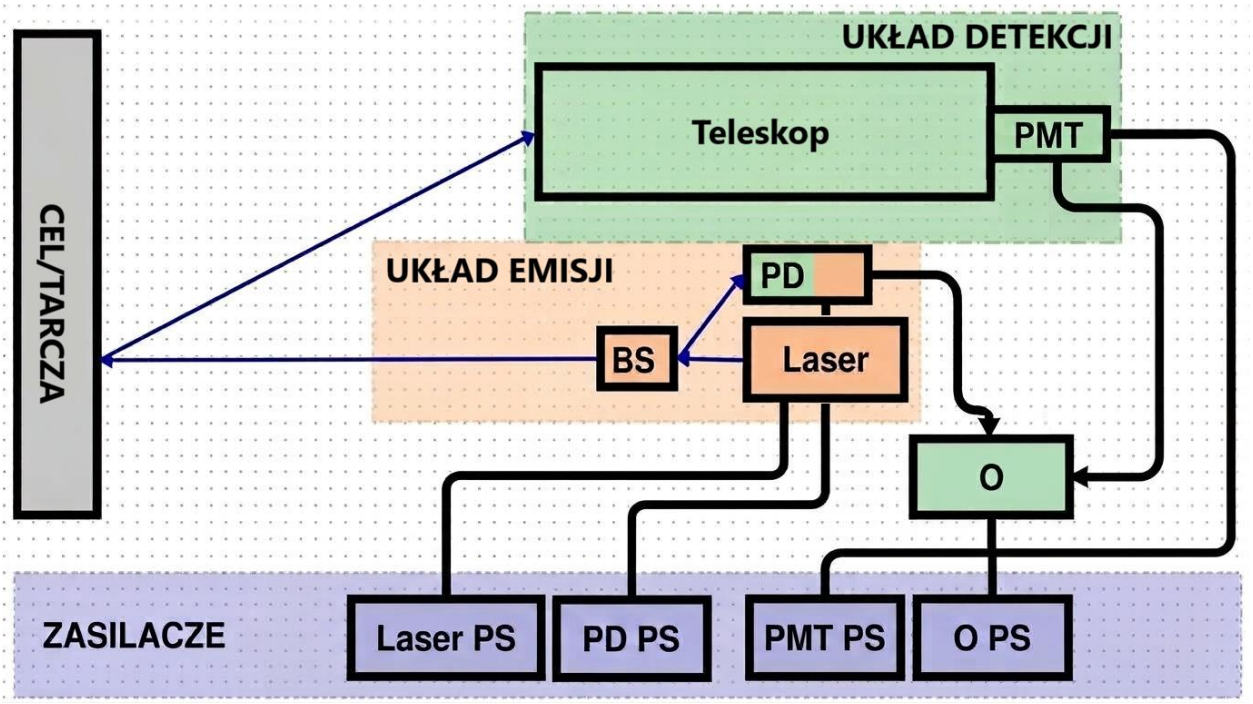
Moc sygnału $P(z)$ docierającego z odległości z można opisać za pomocą uproszczonego równania lidarowego postaci:

$$P(z) \propto \frac{\beta(z)}{z^2} \exp\left(-2\int_0^z \alpha(r)dr\right). \quad (1)$$

Zależność ta wskazuje, że moc sygnału powrotnego jest wprost proporcjonalna do współczynnika rozpraszania wstecznego w danym punkcie ($\beta(z)$), maleje z kwadratem odległości (z^{-2}) oraz podlega wykładniczemu tłumieniu w wyniku ekstynkcji ($\alpha(z)$) na dwukierunkowej drodze optycznej (stąd czynnik -2 w wykładniku funkcji eksponencalnej).

2.3. Zasada działania lidaru

Lidar składa się zasadniczo z trzech głównych sekcji: układu emisji, układu detekcji oraz zasilania (Rys. 1). Na układ emisji (Rys. 1, kolor pomarańczowy) składają się laser, płytka światłodzieląca (z ang. beam splitter, BS) oraz fotodioda (PD). Krótki impuls światła laserowego trafia na płytkę światłodzielącą, gdzie jego zasadnicza część jest przepuszczana w badanym kierunku, natomiast niewielki ułamek ulega odbiciu i kierowany jest na fotodiodę. Fotodioda generuje sygnał elektryczny, który po przesłaniu do układu detekcji (a dokładniej do oscyloskopu) stanowi punkt referencyjny, od którego rozpoczyna się pomiar czasu przelotu impulsu.

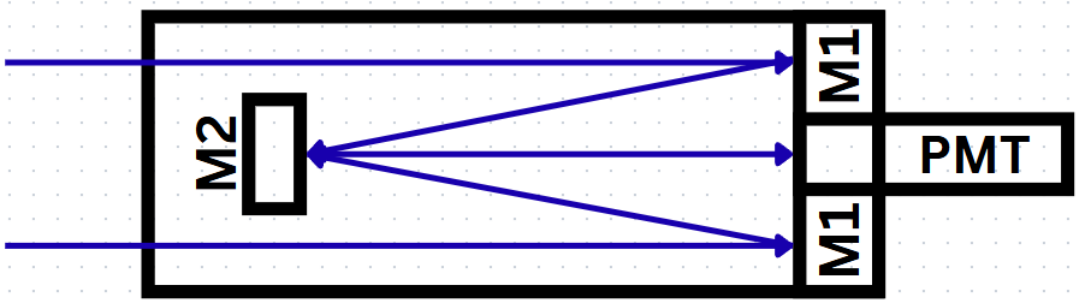


Rys. 1. Schemat blokowy lidaru z podziałem na układ emisji (kolor pomarańczowy), układ detekcji (kolor zielony) oraz sekcję zasilania (kolor ciemnoniebieski). Zastosowane skróty oznaczają: PD - fotodioda, BS - płytka światłodzieląca, PMT - fotopowielacz, O - oscyloskop, natomiast bloki z dopiskiem PS to zasilacze poszczególnych podzespołów. Niebieskie strzałki obrazują bieg impulsów świetlnych, a czarne linie - połączenia przewodowe (sygnałowe i zasilające).

W przypadku propagacji światła w powietrzu porusza się ono z prędkością c_p = 299705543 m/s [9], która jest nieco mniejsza niż prędkość światła w próżni (co wskazuje również współczynnik załamania światła w powietrzu $n > 1$). Jeśli impuls na swojej drodze napotka obiekt rozpraszający lub odbijający (taki jak ściana, cząstka aerozolu lub cząsteczka pary wodnej), wówczas jego część ulega rozproszeniu wstecznemu i powraca do lidaru.

Rozproszone wstecznie światło jest częściowo wychwytywane przez zwierciadło główne teleskopu (Rys. 2, M1), które odbija je do zwierciadła wtórnego (Rys. 2, M2). Następnie światło to jest ogniskowane na fotokatodzie fotopowielacza (Rys. 2, PMT), gdzie sygnał ulega wzmocnieniu i zostaje następnie przesłany do oscyloskopu, pokonując tym samym drogę poprzez cały układ detekcji. W fazie końcowej sygnał przetwarzany jest na

postać cyfrową przez wbudowany w oscyloskop przetwornik analogowo-cyfrowy.



Rys. 2. Schemat teleskopu Newtona użytego w tym zestawie. M1 – zwierciadło główne, M2 – zwierciadło wtórne, PMT – fotopowielacz. Niebieskie strzałki przedstawiają bieg impulsów świetlnych.

Przesunięcie czasowe Δt pomiędzy momentem emisji, a detekcją wynika z odległości jaką impuls pokonuje od lidaru do obiektu i z powrotem, czyli:

$$\Delta t = \frac{2z}{c_p} + t_{\mathrm{u}}, \tag{2}$$

gdzie t_{u} oznacza stałe opóźnienie czasowe wynikające z propagacji sygnału przez układ detekcji oraz kable.

2.4. Czynniki geometryczne: martwa strefa i dywergencja wiązki

W lidarach o konfiguracji dwuosiowej (Rys. 1), czyli takich w których oś wiązki laserowej jest przesunięta równolegle względem osi optycznej teleskopu, w niewielkiej odległości od przyrządu wiązka znajduje się całkowicie poza polem widzenia teleskopu (z ang. *field of view*, FOV). Obszar ten nazywany jest **martwą strefą** (martwym polem) układu. Mimo że z uproszczonego równania lidarowego (1) wynikałby w tym rejonie bardzo silny sygnał (ze względu na czynnik z^{-2}), jednakże promieniowanie rozproszone wstecznie nie dociera do fotopowielacza i nie jest rejestrowane. Wraz ze wzrostem odległości wiązka stopniowo wchodzi w stożek pola widzenia teleskopu (obszar niepełnego przekrycia), aż do osiągnięcia odległości pełnego przekrycia z_{full}, powyżej której cały przekrój wiązki mieści się w polu widzenia detektora. W pełnym równaniu lidarowym efekt ten uwzględnia się poprzez pomnożenie sygnału przez tzw. **funkcję przekrycia geometrycznego** (z ang. *overlap* funciton) $O(z) \in [0,1]$, która przyjmuje wartość 0 w strefie martwej oraz 1 w obszarze pełnego przekrycia.

Drugim istotnym parametrem geometrycznym jest **dywergencja (rozbieżność) wiązki laserowej θ**. Rzeczywista wiązka laserowa nie jest idealnie skolimowana - wskutek zjawiska dyfrakcji ulega ona stopniowemu poszerzaniu wraz z drogą propagacji. Ponieważ poprzeczny rozkład natężenia w wiązce podstawowej ma profil gaussowski (bez ostrych granic), jej średnicę D definiuje się standardowo na poziomie $1/e^2$ maksymalnego natężenia w środku plamki. Odpowiada to spadkowi natężenia promieniowania do około 13,5% wartości szczytowej i obejmuje około 86,5% całkowitej mocy wiązki.

Znając średnice plamki D_1 oraz D_2 zmierzone w dwóch różnych odległościach z_1 i z_2 od źródła, pełny kąt dywergencji θ w polu dalekim można wyznaczyć z zależności geometrycznej:

$$\theta = 2\arctan\left(\frac{D_2 - D_1}{2(z_2 - z_1)}\right) \approx \frac{D_2 - D_1}{z_2 - z_1} \tag{3}$$

Ponieważ typowa rozbieżność wiązek stosowanych w lidarach wynosi od ułamków miliradiana do kilku miliradianów, stosowanie przybliżenie małych kątów ($\tan\alpha \approx \alpha$ dla kąta wyrażonego w radianach) jest w pełni uzasadnione.

3. Wykonanie pomiarów

3.1. Wyposażenie

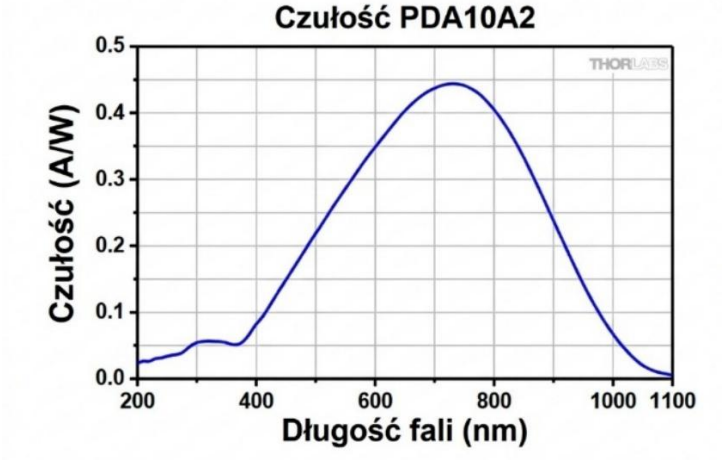
Masz do dyspozycji:

- ruchomy twardy cel,
- taśmę mierniczą,
- papier milimetrowy,
- białą kartkę papieru oraz
- uproszczony system lidarowy.

3.2. Układ doświadczalny

W ćwiczeniu wykorzystywany jest uproszczony system lidarowy przedstawiony schematycznie na Rys. 1. **Układ emisji** impulsów świetlnych obejmuje: a) ultrafioletowy laser na ciele stałym pompowany diodą laserową, b) płytkę światłodzielącą, która przepuszcza większość promieniowania, a jedynie niewielką jego część kieruje na fotodiodę oraz c) fotodiodę krzemową ze wzmacniaczem (PD) typu PDA10A2 (Thorlabs). Laser emituje impulsy świetlne o czasie trwania około 5 ns i długości fali 266 nm, z częstotliwością powtarzania 1 - 4 kHz. Energia pojedynczego impulsu zawiera się w przedziale 0,1 - 0,3 µJ. **Uwaga! Jest to laser klasy 4, co oznacza że jego promieniowanie jest wysoce niebezpieczne**. Powierzchnia efektywna fotodiody wynosi 0,8 mm^2, a czas narastania sygnału jest równy 2,3 ns. Detektor pracuje w zakresie długości fal 200 - 1100 nm (na Rys. 3 przedstawiono wykres jego czułości w zależności od długości fali). Fotodioda wyposażona jest w standardowy zasilacz, o napięciu ±12 V, a jej stałe wzmocnienie transimpedacyjne jest równe 5kV/A.

Układ detekcji, odpowiadający za odbieranie sygnału rozproszonego wstecznie przez medium i/lub badane obiekty, tworzą: a) teleskop Newtona o ogniskowej 60 cm, b) fotopowielacz (PMT) typu R6834 z dedykowanym zasilaczem wysokonapięciowym oraz c) oscyloskop UNI-T UTD2082C. Powierzchnia efektywna fotopowielacza wynosi 25 mm^2, a czas narastania sygnału jest równy 4 ns. Fotopowielacz ten pracuje w zakresie długości fal 160 - 320 nm. Maksymalne napięcie zasilania fotopowielacza wynosi 1500 V (**Uwaga! Nie wolno przekraczać tej wartości w przeciwnym wypadku fotopowielacz ulegnie uszkodzeniu**). Sygnały elektryczne pochodzące z fotopowielacza oraz z fotodiody przesyłane są do oscyloskopu, który je przetwarza, digitalizuje i rejestruje dane.



Rys. 3. Wykres czułości fotodiody w zależności od padającej długości fali. Zmodyfikowano za Thorlabs (https://www.thorlabs.com/item/PDA10A2)

3.3. Uruchomienie i justowanie układu pomiarowego

Procedura uruchomienia układu pomiarowego składa się z kilku kroków:

1. Podłącz system do źródła prądu.
2. Włącz **zasilacze fotodiody** (przełącznik na obudowie zasilacza z napisem Thornlabs) oraz **lasera** (Fot. 1, ustaw czerwony przełącznik w pozycji ON, na tym etapie nie dotykaj kluczyka. Odczekaj ok. 5 minut, aż system się rozgrzeje).
3. Zdejmij obudowę ochronną fotodiody (Fot. 2) i uruchom ją poprzez przełączenie włącznika ‘Power’ do pozycji I.
4. Sprawdź połączenie kabli BMC fotodiody i fotopowielacza do oscyloskopu.
5. Zdejmij pokrywę teleskopu.
6. Włącz zasilanie fotopowielacza - najpierw ustaw przełącznik w pozycji ON (Fot. 3), a następnie obróć pokrętła, aby podtrzymać napięcie. Odczekaj, aż elektronika się rozgrzeje. **UWAGA!** Nie przekraczaj napięcia zasilania powyżej zalecanego limitu dla zastosowanego fotopowielacza (1500 V).
7. Ustaw w pewnej odległości przed urządzeniem ruchomy cel (ok. 2 m), tak by wyemitowana przez laser wiązka w niego trafiła.
8. Włącz oscyloskop. Zauważ jak sygnał się zmienia podczas włączania pozostałych komponentów (Fot. 4).
9. Poinformuj asystenta o gotowości do włączenia lasera.
10. Włącz laser – w tym celu przekręć kluczyk o 90° w prawo (Fot. 1). Zapalenie się zielonej diody LED oznacza, że laser zaczął działać.
11. Sprawdź ustawienie układu emisji. Aby prześledzić bieg wiązki lasera należy użyć białego, matowego papieru. Wybielacz użyty do uzyskania białego koloru kartki fluoryzuje na niebiesko pod wpływem światła ultrafioletowego emitowanego przez laser. Zadbaj o to, by wiązka lasera padała na fotodiodę, ale tylko częściowo, by sygnał od światła nie wysycił diody.
12. Za pomocą oscyloskopu zaobserwuj sygnały z obu detektorów. Ustaw skalę odczytu do zalecanych wartości tj. 2 V dla kanału fotodiody, 500 mV dla kanału fotopowielacza, a rozdzielczość czasową na 20 ns.

Tak sprawdzony i przygotowany układ pomiarowy jest gotowy do wykonywania pomiarów.



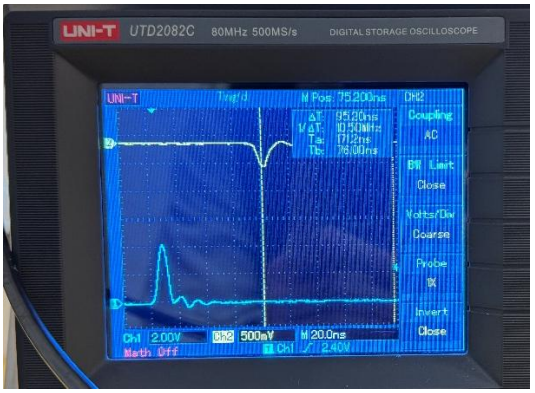
Fot. 1. Zasilacz lasera. Włącznik po lewej stronie uruchamia zasilacz. Przekręcenie kluczyka powoduje uruchomienie lasera, co wiąże się z emisją promieniowania.



Fot. 2. Fotodioda w systemie emisji. Czerwonym kołem zaznaczono obudowę ochronną detektora



Fot. 3. Zasilacz wysoko-napięciowy dla fotopowielacza. Zwróć uwagę na pokrętła służące do ustawienia napięcia i ich zakresy zmian wartości.



Fot. 4. Spodziewany obraz sygnałów w oscyloskopie. Pik niebieski pochodzi od fotodiody (sygnał referencyjny) zaś pik żółty od fotopowielacza (zarejestrowany powrót impulsu)

3.4. Kwestie bezpieczeństwa

Promieniowanie o długości fali 266 nm znajduje się w zakresie nadfioletu (UV-C) i może spowodować uszkodzenie oczu, nawet po krótkiej ekspozycji. Dlatego:

- nigdy nie patrz bezpośrednio na wiązkę ani jej odbicia;
- zawsze noś okulary ochronne z filtrem UV, przeznaczone do fal UV-C;
- miarę możliwości używaj osłon wiązki, aby uniknąć ekspozycji;
- zawsze wyłączaj laser podczas przesuwania ruchomego celu;
- zawsze przestrzegaj procedur bezpieczeństwa dotyczących lasera lub promieniowania UV obowiązujących w laboratorium;
- nie dotykaj elementów optycznych (zwierciadła teleskopu, płytka światłodzieląca, światłoczuła część fotodiody) ponieważ elementy te mogą ulec zabrudzeniu bądź zarysowaniu, co znacznie obniża ich sprawność.

3.5. Planowanie pomiarów

Przed wykonaniem pomiarów zastanów się nad następującymi zagadnieniami:

a) jakie najmniejsze odległości jest w stanie zmierzyć układ pomiarowy? Zakładając prędkość światła w powietrzu oblicz jakie przesunięcie czasowe osiągniemy zmieniając położenie ruchomego celu o 10, 20 i 50 cm.
b) czy i jeśli tak, to jak różne wartości napięcia zasilania przykładanego do fotopowielacza wpływają na sygnał?

3.6. Pomiar odległości i opóźnienia czasowego

Ustaw ruchomy cel w kilku (co najmniej 6 - 8) różnych odległościach od układu lidarowego, obejmujących cały dostępny zakres pomiarowy stanowiska. Dla każdego położenia celu zmierz za pomocą taśmy mierniczej rzeczywistą odległość z_t pomiędzy lidarem, a powierzchnią celu. Uruchom laser i zaobserwuj na ekranie oscyloskopu dwa piki odpowiadające impulsowi referencyjnemu z fotodiody (PD) oraz sygnałowi powrotnemu z fotopowielacza (PMT). Przełącz oscyloskop w tryb pomiarów ręcznych za pomocą kursorów (Cursor → tryb Manual). Następnie dla każdego ustawienia celu zatrzymuj akwizycję pojedynczych przebiegów (przyciskiem Run/Stop lub Single), ustaw kursory czasowe na maksimach (pikach) obu impulsów i odczytaj przesunięcie czasowe Δt. Zarejestruj w ten

sposób około 10 niezależnych pomiarów dla kolejnych impulsów laserowych. Pozwoli to uwzględnić fluktuacje układu oraz oszacować niepewność pomiarową.

3.7. Badanie strefy martwej (martwego pola) układu

Umieść silnie odbijający ruchomy cel w minimalnej odległości od teleskopu i stopniowo zwiększając odległość drobnymi krokami (np. co kilka - kilkanaście centymetrów), wykonaj serię pomiarów sygnału powrotnego odbieranego przez fotopowielacz. W trakcie całej serii pomiarowej utrzymuj stałe napięcie zasilania fotopowielacza. Dla każdego położenia celu zmierz taśmą jego odległość od lidaru oraz zarejestruj maksymalną wartość (amplitudę) sygnału. Zwróć uwagę na to, jak zmienia się moc rejestrowanego sygnału wraz ze wzrostem odległości, oraz wyznacz obszar, w którym sygnał powrotny jest całkowicie niewykrywalny.

3.8. Wyznaczanie dywergencji (rozbieżności) wiązki laserowej

W dwóch wyraźnie oddalonych od siebie odległościach z_1 oraz z_2 od wyjścia lasera umieść prostopadle do osi wiązki kartkę papieru milimetrowego. Zaznacz wyraźnie granice plamki laserowej w obu położeniach. Zmierz średnice D_1 oraz D_2 zaznaczonych plamek i na podstawie tych pomiarów spróbuj oszacować dywergencje wiązki lasera w układzie.

3.9. Wyłączanie układu

1. Przekręć klucz w zasilaczu lasera o 90º w lewo (Fot. 1, pozycja off) i następnie wyłącz zasilacz lasera.
2. Wyłącz zasilanie fotopowielacza - najpierw przekręć pokrętła na zero, poczekaj, aż wskaźnik napięcia wskaże 0 V, a następnie wyłącz przełącznik.
3. Wyłącz fotodiodę oraz jej zasilacz.
4. Jeśli na oscyloskopie nie ma sygnału, wyłącz go. Jeśli nadal widzisz sygnał, zgłoś to prowadzącemu.
5. Zamontuj osłony teleskopu i fotodiody.

4. Analiza danych

4.1. Wyznaczenie prędkości światła w powietrzu i opóźnienia własnego układu

Dla każdego położenia ruchomego celu oblicz średnie opóźnienie czasowe $\overline{\Delta t}$ oraz jego odchylenie standardowe $s_{\Delta t}$ na podstawie zebranych odczytów położenia pików [11]. Następnie sporządź wykres zależności średniego opóźnienia czasowego $\overline{\Delta t}$ i odległości zmierzonej taśmą z_t. **Samodzielnie zdecyduj, którą z tych wielkości przyjąć jako zmienną niezależną (na osi odciętych *x*), a którą jako zmienną zależną (na osi rzędnych *y*)** i krótko uzasadnij swój wybór w sprawozdaniu, biorąc pod uwagę sposób przeprowadzenia pomiaru oraz niepewności obu wielkości. Dopasuj do punktów pomiarowych prostą regresji liniowej postaci $y = ax + b$. Następnie przekształć równanie (2) do postaci odpowiadającej wybranemu układowi osi, a następnie z wyznaczonych parametrów prostej oblicz doświadczalną prędkość światła w powietrzu c_{pd} oraz stałe opóźnienie własne układu pomiarowego t_u. Oszacuj niepewności obu parametrów i porównaj otrzymaną wartość c_{pd} z wartością tablicową.

Korzystając z wyznaczonego opóźnienia t_u oraz prędkości c_{pd}, oblicz dla każdego punktu pomiarowego odległość zarejestrowaną przez lidar, korzystając ze wzoru $z_{\text{lidar}} = \frac{c_{pd}(\overline{\Delta t} - t_u)}{2}$. Następnie porównaj uzyskane wartości z_{lidar} z odległościami z_t i oceń dokładność pomiarową badanego systemu.

4.2. Wyznaczenie strefy martwej układu

Sporządź wykres maksymalnej wartości odbieranego sygnału (amplitudy napięcia na PMT) w funkcji odległości celu od lidaru. Określ na podstawie wykresu zasięg strefy martwej,

czyli graniczną odległość, poniżej której układ nie rejestruje sygnału rozproszonego oraz odległość, przy której następuje pełne przekrycie wiązki laserowej z polem widzenia teleskopu (maksimum sygnału).

4.3. Obliczenie dywergencji wiązki laserowej

Korzystając ze wzoru (3) oraz na podstawie zmierzonych średnic plamki D_1 i D_2 w odległościach z_1 oraz z_2 oblicz pełny kąt rozbieżności (dywergencję) wiązki θ (w radianach oraz miliradianach). Oszacuj niepewność pomiarową wyznaczonej dywergencji metodą przenoszenia niepewności [11] i przedyskutuj główne źródła błędów (np. subiektywną ocenę granicy fluorescencji na papierze).

5. Dodatkowe uwagi odnośnie do raportu

W raporcie zamieść, w stosownie dobranych tabelach, wszystkie surowe wyniki wykonanych pomiarów tak, aby sięgając jedynie do raportu i bez potrzeby odwoływania się do protokołu z doświadczenia można było wykonać pełną i niezależną analizę Twych danych. Zadbaj o wierne przeniesienie zmierzonych wartości do raportu.

Nim przygotujesz raport, zaznajom się z uwagami zawartymi w opracowaniu Instrukcja - Jak pisać raport końcowy oraz z przykładową realizacją tych uwag w postaci Przykładowy raport końcowy. Materiały te zamieszczone są na stronie http://anipw.igf.fuw.edu.pl Pracowni wstępnej. Wymagania ukazane w tych opracowaniach będą bezwzględnie egzekwowane przy sprawdzaniu Twego raportu. W szczególności pamiętaj o konwencji odnoszącej się do precyzji przedstawiania niepewności, a co za tym idzie, również wartości wielkości zmierzonej.

Absolutnie zalecane jest świadome przyjrzenie się redakcji tekstu, tabel, rysunków i wzorów, sposobów ich numerowania, tytułowania i opisywania w dowolnym, ale wydanym przez uznane wydawnictwo, akademickim podręczniku do fizyki, jak również zajrzenie do kilku publikacji w różnych czasopismach naukowych, co może ułatwić podjęcie decyzji co do podziału Twego raportu na części.

6. Literatura źródłowa

[1] Weitkamp, C. (Ed.). (2005). *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere* (Springer Series in Optical Sciences, Vol. 102). Springer. DOI: 10.1007/b106786 *(rozdział 1: Wandinger, U., „Introduction to Lidar", s. 1–18)*.

[2] Pappalardo, G., Amodeo, A., Apituley, A., Comeron, A., Freudenthaler, V., Linné, H., Ansmann, A., Bösenberg, J., D'Amico, G., Mattis, I., Mona, L., Wandinger, U., Amiridis, V., Alados-Arboledas, L., Nicolae, D., & Wiegner, M. (2014). *EARLINET: towards an advanced sustainable European aerosol lidar network.* Atmospheric Measurement Techniques, 7(8), 2389–2409. DOI: 10.5194/amt-7-2389-2014

[3] Baars, H., Kanitz, T., Engelmann, R., Althausen, D., Heese, B., Komppula, M., Preißler, J., Tesche, M., Ansmann, A., Wandinger, U., Lim, J.-H., Ahn, J. Y., Stachlewska, I. S., Amiridis, V., Marinou, E., … & Zamorano, F.: An overview of the first decade of PollyNET: an emerging network of automated Raman-polarization lidars for continuous aerosol profiling, Atmos. Chem. Phys., 16, 5111–5137, https://doi.org/10.5194/acp-16-5111-2016, 2016.

[4] Sorooshian, A., Anderson, B., Bauer, S. E., Braun, R. A., Cairns, B., Crosbie, E., ... & Tselioudis, G. (2019). *Aerosol–Cloud–Meteorology Interaction Airborne Field Investigations: Using Lessons Learned from the U.S. West Coast in the Design of ACTIVATE off the U.S. East Coast*. Bulletin of the American Meteorological Society, 100(8), 1511–1528. DOI: 10.1175/BAMS-D-18-0100.1

[5] Stevens, B., Bony, S., Farrell, D., Ament, F., Blyth, A., Fairall, C., ... & Zöger, M. (2021). *EUREC4A*. Earth System Science Data, 13(8), 4067–4119. DOI: 10.5194/essd-13-4067-2021

[6] Groß, S., Ewald, F., Stevens, B., Wirth, M., Dekoutsidis, G., Ehrlich, A., ... & Rapp, M. (2026). *Persistent EarthCARE underflight studies of the ITCZ and organized convection (PERCUSION): contribution to EarthCARE validation*. Atmospheric Measurement Techniques, 19(11), 3933–3959. DOI: 10.5194/amt-19-3933-2026

[7] Winker, D. M., Pelon, J., Coakley, J. A., Ackerman, S. A., Charlson, R. J., Colarco, P. R., ... & Wielicki, B. A. (2010). *The CALIPSO Mission: A Global 3D View of Aerosols and Clouds*. Bulletin of the American Meteorological Society, 91(9), 1211–1230. DOI: 10.1175/2010BAMS3009.1

[8] Illingworth, A. J., Barker, H. W., Beljaars, A., Ceccaldi, M., Chepfer, H., Clerbaux, N., ... & van Zadelhoff, G.-J. (2015). *The EarthCARE Satellite: The Next Step Forward in Global Measurements of Clouds, Aerosols, Precipitation, and Radiation*. Bulletin of the American Meteorological Society, 96(8), 1311–1332. DOI: 10.1175/BAMS-D-12-00227.1

[9] Garde, E. A., Escobar, I., Ramírez-Vázquez, R., Franco, T., & Beléndez, A. (2020). *An indirect measurement of the speed of light in a General Physics Laboratory*. Journal of King Saud University - Science, 32, 2797-2802, https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.06.017

[10] Klett, J. D. (1981). *Stable analytical inversion solution for processing lidar returns.* Applied Optics, t. 20, nr 2, s. 211–220.

[11] Zięba, A. (2013). *Analiza danych w naukach ścisłych i technice*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2013.