



KOŁO NAUKOWE  
**OPTYKI I FOTONIKI**

University of Warsaw  
OSA-SPIE-EPS Student Chapters

Raport z Zespołowego Projektu Studenckiego pt.:

# LIDAR

## BUDOWA I PRZYGOTOWANIE POKAZÓW POPULARNONAUKOWYCH

Członkowie zespołu:

Michał Chrzanowski, Jędrzej Mijas, Maciej Nytko, Uliana Pylypenko

Opiekun zespołu:

mgr Filip Sośnicki

Szczególne podziękowania dla prof. Tadeusza Stacewicza za użyczenie elementów konstrukcyjnych lidaru oraz doradztwo merytoryczne w trakcie trwania projektu.

Niniejszy zespołowy projekt studencki został wykonany we współpracy z Kołem Naukowym Optyki i Fotoniki na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

# Spis treści

<b>1 Lidar</b>	<b>3</b>
1.1 Zasada działania i typowe konstrukcje . . . . .	3
1.2 Zastosowania . . . . .	3
1.3 Budowa lidarów do pokazów popularnonaukowych . . . . .	3
1.3.1 Budowa mechaniczna . . . . .	3
1.3.2 Emisja i wykrycie światła . . . . .	5
1.3.3 Elektronika . . . . .	5
1.4 Pomiar . . . . .	6
1.4.1 Pomiar odległości i prędkości światła . . . . .	6
1.4.2 Wykrycie pary wodnej . . . . .	7
<b>2 Pokazy popularnonaukowe z zastosowaniem lidarów</b>	<b>7</b>
2.1 Ograniczenia . . . . .	7
2.2 Procedura uruchamiania układu . . . . .	8
2.3 Procedura wyłączania układu . . . . .	9
2.4 Scenariusze pokazów . . . . .	9
2.4.1 Pomiar odległości . . . . .	9
2.4.2 Pomiar prędkości światła . . . . .	10
2.4.3 Wykrycie aerozolu . . . . .	11
2.4.4 Odbijanie światła ultrafioletowego kremem przeciwsłonecznym . . . . .	12
<b>3 Dalsze plany</b>	<b>12</b>

# 1 Lidar

## 1.1 Zasada działania i typowe konstrukcje

Lidary są urządzeniami wykorzystującymi odbicie lub rozproszenie światła od różnorodnych obiektów do pomiaru odległości między nimi a samym lidarem. Nazwa LIDAR jest połączeniem słów light i radar, co wskazuje na zasadę działania podobną jak w klasycznym radarze, jednak wykorzystującą światło. Głównymi częściami lidaru są: nadajnik, który jest laserem impulsowym z odpowiednią optyką, oraz odbiornik, składający się z zespołu teleskopu i detektorów. Laser emituje światło w pożądanym kierunku, które następnie ulega odbiciu lub rozproszeniu i powraca do lidaru, gdzie jest zebrane przez odbiornik. Sygnał elektryczny z detektora jest następnie analizowany przez odpowiednią elektronikę. Dodatkowo konieczny jest system dający sygnał referencyjny, który służy za wyzwalacz sygnału właściwego i pozwala na zmierzenie czasu przelotu impulsu światła od nadajnika do miejsca rozproszenia i z powrotem do odbiornika. Mając czas przelotu można wyznaczyć odległość obiektu rozpraszającego do lidaru. Typowo stosowane są lasery impulsowe w zakresie długości fal od UV do bliskiej podczerwieni. Konstrukcja teleskopu zależy od pożądanego zasięgu, dokładności i zastosowania. Detektorami światła mogą być fotodiody lawinowe, fotopowielacze lub np. kamery CCD.

## 1.2 Zastosowania

Lidar w swojej najprostszej formie jest stosowany jako dalmierz laserowy. Bardziej zaawansowane systemy znajdują szerokie zastosowanie w wielu naukach. Lidary są ważnym narzędziem w badaniach aerozoli atmosferycznych, ich profilowania i wpływu na atmosferę, a co za tym idzie, na zmiany klimatu. Systemy takie są wykorzystywane również w biologii i rolnictwie do łatwiejszego profilowania formacji roślinnych. Znane są także zastosowania systemów lidarowych w archeologii, jako pomocne w znajdowaniu ukrytych formacji antropogenicznych, takich jak ruiny budowli czy dawnych osad. Ostatnimi czasy żywiłowo rozwijają się zastosowania miniaturowych lidarów w trójwymiarowym profilowaniu otoczenia. Potencjalnie najpoważniejszą aplikacją takich pomiarów są autonomiczne maszyny i samochody. W związku z tym tematyka pomiarów lidarowych jest bardzo interesująca ze względu na jej aktualność i zastosowania w dziedzinach, przed którymi stoją obecnie największe wyzwania.

## 1.3 Budowa lidaru do pokazów popularnonaukowych

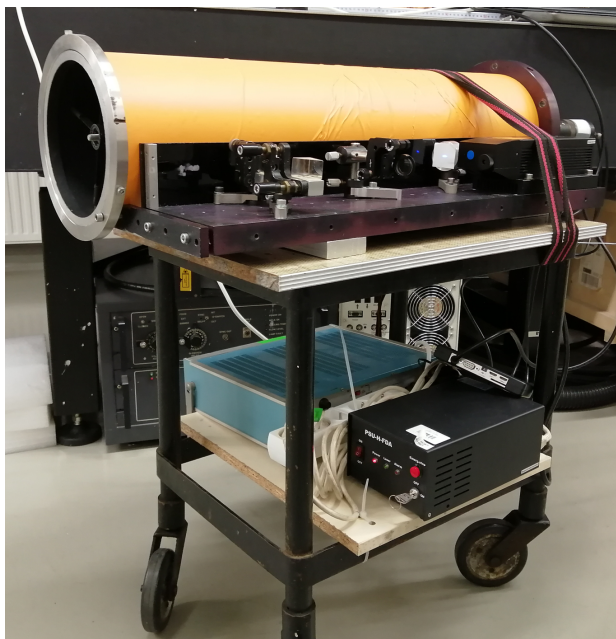
Uważamy, że ze względu na coraz częstsze i poważniejsze zastosowania lidarów w nauce i przemyśle, konieczne jest zrozumienie dokładnej zasady działania tych systemów. Stąd pojawił się pomysł zbudowania prostego systemu lidarowego, który służyć mógłby do przeprowadzania pokazów dla dzieci i młodzieży, prezentację zasad działania i zaznajamianie ich z techniką pomiarów lidarowych. Docelową publicznością pokazów są osoby niemające dużych doświadczeń z fizyką. Ważne więc było, aby układ był jak najprostszy i bez zbędnych elementów optycznych.

Bezpośrednim impulsem do budowy lidaru była chęć przygotowania w ramach Koła Naukowego Optyki i Fotoniki UW pokazów na Piknik Naukowy oraz Festiwal Nauki w Warszawie. Ideą stojącą za tymi wydarzeniami jest wykorzystanie sprzętu obecnego w laboratoriach Wydziału Fizyki i dostosowanie go do pokazów. W związku z tym do budowy lidaru wykorzystano głównie sprzęt będący na stanie Laboratorium Lidarowego, prowadzonego przez prof. Tadeusza Stacewicza. Pokazy docelowo przeprowadzane są przy udziale publiczności, trzeba więc zadbać o bezpieczeństwo ludzi biorących udział w pokazie poprzez zastosowanie odpowiedniego źródła światła, a także odpowiednią, bezpieczną konfigurację układu doświadczalnego.

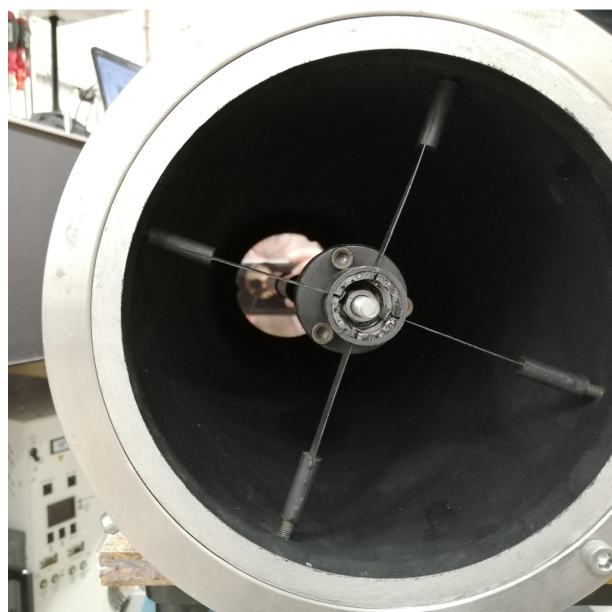
### 1.3.1 Budowa mechaniczna

Podstawą do zbudowania lidaru został teleskop typu Cassegrain, wykorzystywany niegdyś do pomiarów depolaryzacyjnych cząstek lodu w atmosferze. Ze względu na zastosowanie zwierciadeł, które nieczule są na padającą długość fali, teleskop ten był odpowiedni do przeróbki do naszych zastosowań. Potencjalne wady optyczne, które są powodowane przez taką konfigurację teleskopu, nie grają w naszym układzie dużej roli, ponieważ jego celem nie są precyzyjne pomiary, a zilustrowanie zasady działania i praw fizycznych.

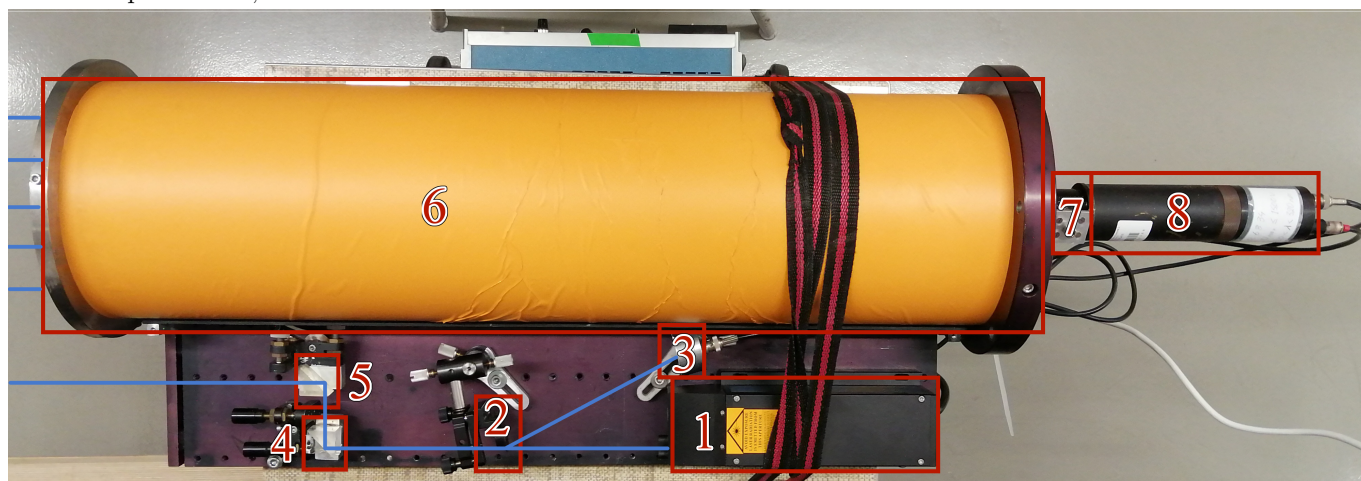
Do tego celu teleskop ten jest wystarczający. Ze względu na swój niewielki rozmiar (długość i średnica tu-  
by wynoszą odpowiednio 75 cm i 20 cm) i masę, teleskop nadaje się do częstego przenoszenia, co ważne  
jest w przeprowadzaniu pokazów. Oryginalnie teleskop przykręcony został do niewielkiej płyty metalowej z  
rastrem optycznym, na której znajdowały się elementy optyczne nadajnika. W naszym projekcie płyta zo-  
stała wykorzystana do umieszczenia całego nadajnika, jak i systemu wyzwalania sygnału. Teleskop posiadał  
oryginalnie zaprojektowane mocowanie detektora, które również zostało wykorzystane w projekcie. Całość  
została następnie zamocowana na dwóch sztabkach aluminium, które pozwalają ustawić układ równoległe  
do podłoża. Zdjęcia układu pokazano na rysunku 1.



(a) Zdjęcie całego układu. Na górze znajduje się optyka (opisana dokładniej na rysunku 1c), a na dole – elektronika. Niebieskie urządzenie – to wzmacniacz fotopowielacza, a – czarne wzmacniacz lasera.



(b) Zdjęcie wnętrza teleskopu.



(c) Zdjęcie układu z góry. Na czerwono oznaczone: 1 – laser, 2 – płytka światłodzielnąca, 3 – fotodioda, 4 i 5 – pryzmaty, 6 – teleskop, 7 – przesłona i filtr wąskopasmowy, 8 - fotopowielacz. Na niebiesko pokazany jest bieg wiązki laserowej.

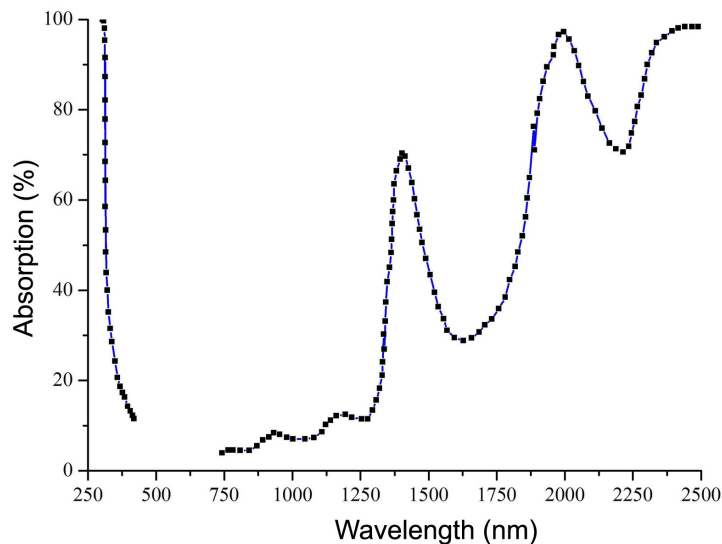
Rysunek 1: Zdjęcia układu.

Układ umieszczony został na wózku, by zapewnić możliwość wygodnego transportu na miejsce poka-  
zu. Na wózku zmieścił się zarówno układ nadajnik-odbiornik, czyli teleskop wraz z płytą optyczną, jak i  
potrzebna do przeprowadzania pomiarów elektronika.

### 1.3.2 Emisja i wykrycie światła

W układzie użyliśmy lasera impulsowego MPL o czasie trwania impulsu 5 ns i długości fali emitowanego światła 266 nm. Użyta długość fali światła zalicza się do bezpiecznych dla oczu, ponieważ rogówka silnie absorbuje fotony o tej energii. Dzięki temu o dużo mniejsza moc promieniowania dostaje się do bardziej wrażliwej na uszkodzenia siatkówki [1]. Zależność absorpcji rogówki od długości fali światła przedstawiliśmy na rysunku 2. Laser ten ma moc 1 mW (jak w powszechnie używanego wskaźnika laserowego), co dodatkowo zmniejsza ryzyko. Ponadto użycie światła UV pozwala na dobranie detektora niewrażliwego na promieniowanie słoneczne, co ogranicza szумы.

Po wyjściu z lasera (1 na rysunku 1c) około 10% światła odbijane jest na płycie kwarcowej (2) zamocowanej na uchwycie kinematycznym, dzięki czemu odbita wiązka jest kierowana do fotodiody (3). Służy ona do wyzwolenia sygnału zbieranego przez teleskop, a co za tym idzie, ustalenia wartości "0" na skali czasu. Do fotodiody przyklejono białą kartkę papieru. W ten sposób otrzymany sygnał jest większy, dzięki fluorescencji barwników znajdujących się w papierze. Pozostałe 90% mocy kierujemy na dwa pryzmaty (4 i 5) przymocowane do uchwytów kinematycznych. Za ich pomocą możemy regulować kąt i pozycję wyjścia wiązki światła z układu, co pozwala na zmaksymalizowanie ilości światła wpadającego do teleskopu. Pryzmaty zostały użyte, ponieważ dla światła UV mają one o wiele mniejsze straty na odbicia niż dostępne w laboratorium lustra. Postanowiliśmy nie używać żadnych dodatkowych elementów w celu kolimacji wiązki światła. Jej jakość po wyjściu z układu jest wystarczająca na potrzeby prostych pokazów.



Rysunek 2: Zależność absorpcji światła przez rogówkę od długości fali światła [2].

Po wyjściu z układu światło dociera do badanego obiektu, na którym rozprasza się bądź od niego odbija. Następnie odbite światło trafia do teleskopu (6). Po przejściu przez teleskop światło pada na regulowaną aperturę (7), której zadaniem jest zmniejszenie natężenia światła docierającego do detektora, w celu uniknięcia nasycenia detektora. Kolejnym elementem jest filtr wąskopasmowy (7) dopasowany do długości fali 266 nm, przez który nie przechodzą sygnały świetlne pochodzące z otoczenia. Po przejściu przez filtr światło pada na fotopowielacz Hamamatsu R6834 (8). Fotopowielacz jest przystosowany do zakresu długości fal 160-320 nm, co wyklucza szумы pochodzące od światła słonecznego i pozwala wykorzystywać układ również w pokazach na świeżym powietrzu. Mocowanie filtra zostało wykonane samodzielnie w warsztacie, gdzie dostosowano również uchwyt fotopowielacza.

### 1.3.3 Elektronika

Fotopowielacz wymaga zasilania wysokim napięciem, do 1500 V. Dla optymalnej pracy ustaliliśmy wartość napięcia zasilania na poziomie 1200 V. Napięcie takiej wartości może być niebezpieczne przy nie-

ostrożnym użytkowaniu. Do przyszłych pokazów z udziałem publiki zostanie więc zbudowane odpowiednie zabezpieczenie np. w postaci płytki przezroczystej wykonanej z pleksiglasu, odgradzającej tą część układu od widzów.

Oba detektory podłączone są za pomocą kabli BNC do oscyloskopu cyfrowego TiePie HS6, który używany był do odczytu i przetwarzania sygnałów elektrycznych. Oscyloskop jest podłączony za pomocą kabla USB do komputera. Oscyloskop ten został wybrany ze względu na niewielkie rozmiary i prostotę obsługi. Nie wymaga (choć jest taka możliwość, jeśli znajdzie potrzeba) dodatkowego zasilania - wystarcza podłączenie do komputera. TiePie ma mniejszą rozdzielczość czasową niż inne dostępne w laboratorium oscyloskopy, ale producent dostarcza do niego dedykowane oprogramowanie komputerowe, dzięki któremu można na bieżąco oglądać i analizować zmierzone wartości. Uznaliśmy, że możliwość lepszej prezentacji wyników ma większe walory edukacyjne niż ich duża precyzja.

## 1.4 Pomiary

W celu sprawdzenia układu zrobiliśmy kilka prostych testów mających naśladować możliwe pokazy.

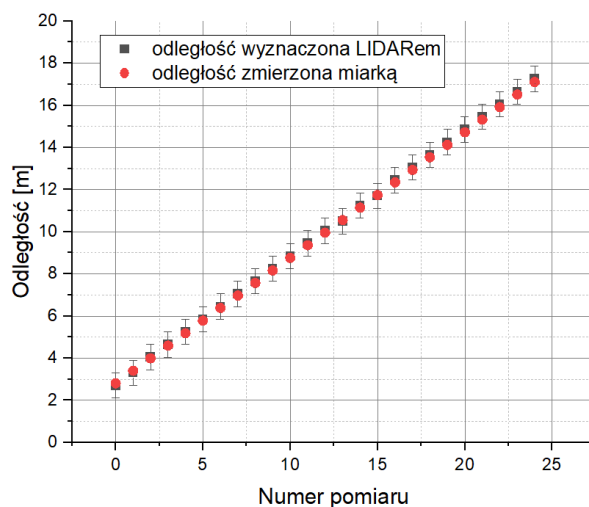
Rzeczywiście mierzonymi wartościami były: czas, po jakim impuls laserowy trafia do fotopowielacza – dokładność odczytu  $s_t = 2$  ns, natężenie sygnału  $s_v = 5$  mV, odległość zmierzona miarką  $s_s = 0,1$  m.

Znając wartość  $t_0$  dla konkretnej odległości  $s_0$  możemy wyznaczyć względną odległość między tym punktem, a dowolnym innym ze wzoru  $\Delta s = \frac{c\Delta t}{2}$ , gdzie  $\Delta t$  to różnica wskazań czasów z oscyloskopu dla tych dwóch położań, a  $c$  prędkość światła. Z kolei mierząc miarką odległość  $\Delta s$  możemy wyznaczyć prędkość światła. Iloczyn  $c\Delta t$  podzielony jest przez 2, ponieważ światło emitowane przez laser pokonuje odległość układ-mierzony punkt dwukrotnie.

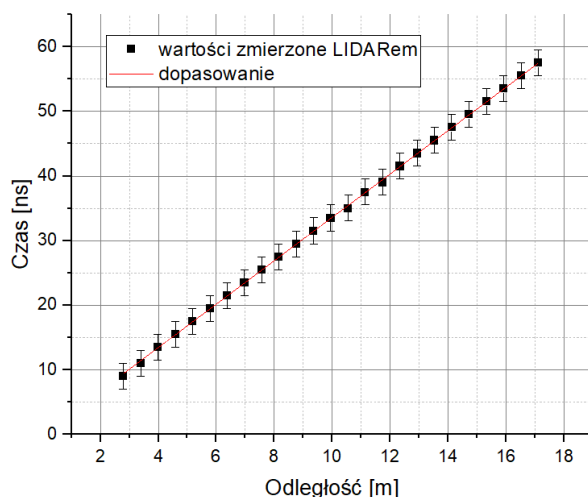
Odległość  $s_0 = 0,5 \pm 0,01$  m (mniejszej nie udało się zmierzyć, ponieważ wiązka laserowa wychodzi zbyt daleko od osi optycznej teleskopu) wyznaczyliśmy raz dla wszystkich pomiarów i używaliśmy jej do obliczania względnej odległości od teleskopu. Dzięki użyciu światła UV oraz filtra wąskopasmowego przed fotopowielaczem nie zauważyliśmy żadnego wpływu światła słonecznego czy sztucznego oświetlenia na zmierzone wartości.

### 1.4.1 Pomiar odległości i prędkości światła

Wybraliśmy 24 punkty odległe o coraz większe wartości od układu. Zmierzyliśmy miarką odległość każdego punktu od układu. Następnie po kolei w każdym z tych punktów ustawiliśmy płytkę pokrytą białą farbą, tak aby odbijała światło lasera do teleskopu, i spisaliśmy otrzymane na oscyloskopie wartości  $\Delta t$ . Zakładając prędkość światła  $c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$  wyznaczyliśmy ze wzoru  $\Delta s = \frac{c\Delta t}{2}$  odległości, w jakich znajdowała się płytka. Otrzymane wartości przedstawiono na rysunku 3.



Rysunek 3: Porównanie zmierzonych i wyznaczonych LIDARem odległości.



Rysunek 4: Wyznaczona prędkość światła.

Przyjmując wartości zmierzone miarką za prawdziwe, do zmierzonych czasów  $\Delta t$  dopasowaliśmy prostą  $y = \frac{2x}{A}$ , co pokazano na rysunku 4. Dopasowany współczynnik  $A = (2,977 \pm 0,001) * 10^8 \frac{m}{s}$  jest wyznaczoną prędkością światła.

Otrzymane wartości pokazują, że używając nawet prostego układu, można wyznaczyć zarówno odległość, jak i prędkość światła z zadowalającymi dokładnościami. Z pewnością pomoże to przekonać widzów o użyteczności zaawansowanych urządzeń typu LIDAR w tego typu pomiarach.

#### 1.4.2 Wykrycie pary wodnej

Kolejnym testem była próba wykrycia pary wodnej. W tym celu użyliśmy prostego nawilżacza powietrza ustawionego w odległości  $s = (5,2 \pm 0,1)$  m od teleskopu. Nawilżacz tworzył chmurę pary wodnej o długości wzdłuż wiązki laserowej  $l = (0,0025 \pm 0,0025)$  m. Na oscyloskopie pojawiło maksimum od fotopowielacza  $V = (40 \pm 5)$  mV dla czasu odpowiadającego odległości około 5,2 m.

W celu detekcji pary wodnej z zadowalającą dokładnością musieliśmy ustawić 16 razy dłuższe uśrednianie sygnału, niż w przypadku pomiarów odległości. Było to spowodowane faktem, że w zależności od niewielkich ruchów powietrza na korytarzu chmura pary wodnej potrafiła w różnych momentach podwoić swoją długość wzdłuż biegu wiązki laserowej, a czasami praktycznie w całości zniknąć. Była ona jednak wykrywalna, co ilustruje, w jaki sposób lidary używane są do badania atmosfery.

## 2 Pokazy popularnonaukowe z zastosowaniem lidar

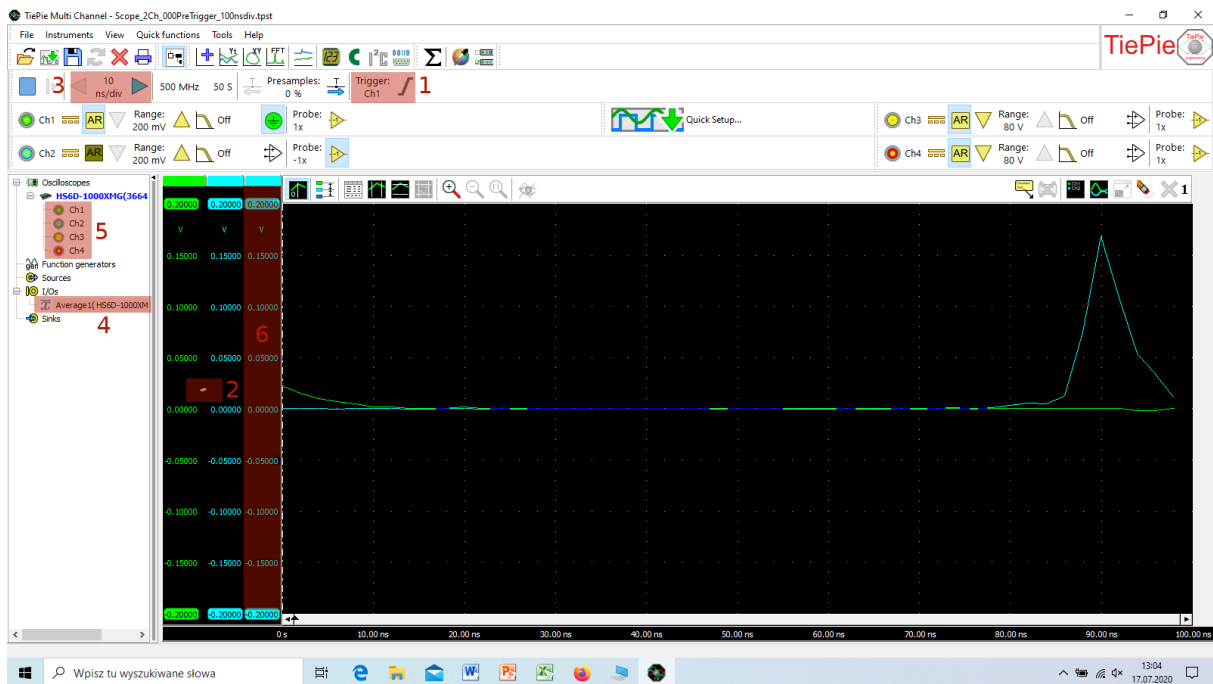
### 2.1 Ograniczenia

W związku z planowanym aktywnym udziałem publiczności w pokazach konieczne było wzięcie pod uwagę bezpieczeństwa źródła światła. Laser zastosowany w układzie ma niewielką moc (rzędu powszechnie używanego wskaźnika laserowego), a dodatkowo długość fali emitowana przez laser jest w większości pochłaniana przez rogówkę oka (patrz 1.3.2). Dzięki temu nawet przypadkowe spojrzenie na wiązkę światła nie zakończy się uszkodzeniem siatkówki. Naturalnie przy organizacji pokazu z udziałem publiczności należy zapobiegać nawet takim sytuacjom poprzez odpowiednie umiejscowienie barier, a także dokładny instruktaż osób wchodzących w wiązkę lasera.

Innym ważnym ograniczeniem w przygotowywaniu pokazów jest brak przestrzeni na prezentację podczas różnego rodzaju festiwali. Lidar udało się zaprojektować tak, że wymagane jest 5-20 m wolnego miejsca na propagację wiązki. Jest to ilość możliwa do osiągnięcia na większości pokazów, nawet tych przeprowadzanych wewnątrz budynków czy sal. Dodatkowo upakowanie sprzętu na pojedynczym wózku i ograniczenie ilości odbiorników prądu zdecydowanie poprawiają mobilność pokazu i możliwości jego wystawienia.

## 2.2 Procedura uruchamiania układu

1. Upewnić się, że zasilacz lasera (czarny) i fotopowielacza (niebiesko-biały) są podłączone do listwy, a ta – do gniazdka z prądem.
2. Upewnić się, że fotodioda (3 na rysunku 1c) i fotopowielacz (8 na rysunku 1c) są za pomocą kabli BNC podłączone do oscyloskopu TiePie: fotodioda do kanału CH1, a fotopowielacz do kanału CH2.
3. Uruchomić laser: przełącznik na zasilaczu lasera przestawić na pozycję "on", a następnie kluczyk przekręcić na "on". Laser potrzebuje kilku sekund do rozpoczęcia właściwej pracy. Wstawić białą kartkę w bieg wiązki – powinna być widoczna niebieska plamka światła.
4. Uruchomić fotopowielacz: ustawić napięcie zasilacza w zakresie do 1200V, a następnie przycisk "power" przełączyć na "on".
5. Oscyloskop TiePie podłączyć do komputera za pomocą kabla USB. Kabel ten wystarcza jako zasilanie urządzenia, ale w przypadku problemów można również użyć dostarczonego zasilacza.
6. Usunąć przesłonę z przodu teleskopu.
7. Na komputerze uruchomić program "TiePie - pokaz lidar", który powinien znajdować się na pulpicie. Zrzut ekranu otworzonego pliku pokazano na rysunku 5. Na czerwono zaznaczone użyteczne opcje.



Rysunek 5: Zrzut ekranu programu komputerowego do prezentacji danych z oscyloskopu TiePie.

8. Ustawić opcję "trigger" (1 na powyższym rysunku) na "Ch1". W tym momencie na ekranie powinien pojawić się sygnał od wyzwalacza (fotodioda). Jeśli sygnał się nie pojawia, sprawdzić wszystkie połączenia kabli i za pomocą uchwyty 2 na rysunku 1c pokierować odbitą część wiązki laserowej na fotodiode. Za pomocą elementu oznaczonego 2 na rysunku 5 można również zmienić wartość sygnału potrzebnego uzyskania do wartości "0".
9. Upewnić się, że fotopowielacz działa. W tym celu należy wstawić kartkę papieru w bieg wiązki laserowej w odległości kilku metrów od układu. Na ekranie powinno pojawić się maksimum sygnału fotopowielacza (na kanale 2) jak pokazane na niebiesko na rysunku 5. Jeśli sygnał się nie pojawia, można spróbować zmienić wartości osi czasu (3 na rysunku 5) i napięcia (6 na rysunku 5).



10. Po otrzymaniu sygnału należy go zoptymalizować. Wstawić kartkę w odległości, w jakiej zamierzamy robić pomiary. Następnie używając uchwytów pryzmatów (4 i 5 na rysunku 1c) należy znaleźć maksimum sygnału. W tym celu należy kręcić dolnymi pokrętłami, aż mierzone wartości napięcia będą największe. Można również użyć górnych pokręteł, ale jest to niezalecane, ponieważ zmieniają one bieg wiązki w pionie.
11. Dodatkowa konfiguracja:
  - klikając prawym przyciskiem myszy na napis opisany liczbą 4 na rysunku 5, a następnie "average" można zmienić ilość zliczeń. Jeśli pomiar nie wymaga ciągłych ruchów mierzonego obiektu najlepiej ustawić to na wyższą wartość np. 32. W przeciwnym razie dobrać wartość tak, aby wyświetlane wartości miały zadowalająco szybką responsywność.
  - jeśli wartości sygnału z fotopowielacza nie są satysfakcjonujące, można zmienić przymknięcie irysa. Za pomocą klucza poluzować śrubę znajdującą się pod liczbą 7 na rysunku 1c. Następnie nie wyciągając fotopowielacza delikatnie kręcić nim w prawo lub lewo. Powinno w zauważalny sposób zmieniać to wartość sygnału od fotopowielacza. Po osiągnięciu zadowalającej wartości dokręcić z powrotem śrubę mocującą.
  - w celu zwiększenia amplitudy wykrywanego sygnału możliwe jest zwiększenie czułości fotopowielacza poprzez zwiększenie wartości napięcia zasilania do 1300-1400 V. Zalecaną wartością jest jednak 1200 V.
  - tworzenie nowych wskazań na wykresie (np. wartość referencyjna) robi się poprzez kliknięcie prawym przyciskiem myszy w miejscu opisanym liczbą 5 na rysunku 5 i wybraniem odpowiedniej funkcji (np. reference).

### 2.3 Procedura wyłączenia układu

1. Wyłączyć zasilacz fotopowielacza – przełącznik "power" na "off".
2. Wyłączyć zasilacz lasera – kluczyk przekręcić na "off", przełącznik na "off".
3. Wyłączyć program "TiePie – pokaz lidar". Wyłączyć komputer.
4. Założyć pokrywę z przodu teleskopu.

### 2.4 Scenariusze pokazów

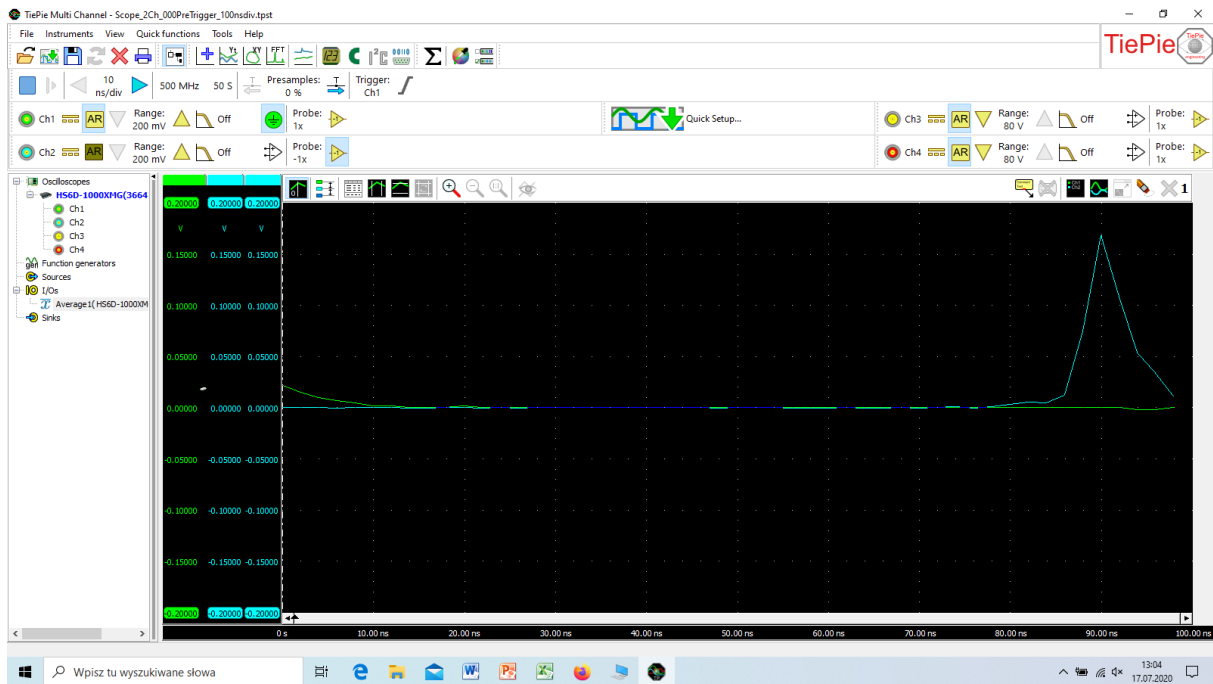
Poniżej przedstawiono cztery scenariusze przykładowych pokazów możliwych do przeprowadzenia za pomocą zbudowanego lidar. Scenariusze mogą być modyfikowane w zależności od wieku i doświadczenia publiczności, a także warunków przeprowadzania. Ze względu na zapewnienie bezpieczeństwa widowni, znaczną część pokazów można zaadaptować do własnoręcznego wykonania przez uczestników, np. dla celów zajęć studentów (pracowni).

#### 2.4.1 Pomiar odległości

**Dodatkowe wyposażenie:** nieprzezroczysty ekran, metr, tablica, kreda/marker, kalkulator.

**Czas pokazu:** 10-15 minut

1. Ustawić ekran jak najbliżej do drogi wiązki laserowej na sztywno, czyli tak, żeby odległość od niego do lidar się nie zmieniała i żeby jego płaszczyzna była prostopadła do wiązki w czasie całego pokazu.
2. Zmierzyć odległość od lidar do ekranu metrem, powiadomić ją widzom i zapisać.
3. Uruchomić lidar, podłączyć do niego oscyloskop.
4. Wyjaśnić publiczności, co widzą na ekranie oscyloskopu. Skala pozioma jest skalą czasu, pionowa – skalą napięcia sygnału, który przyjmuje teleskop. Ważne jest wspomnieć, że czas jest równy zero w momencie, kiedy laser emituje impuls.



Rysunek 6: Przykładowy wygląd ekranu oscyloskopu

5. Jeśli ekran jest ustawiony właściwie, na oscyloskopie będziemy obserwować zwiększenie napięcia przyjętego sygnału, jak na rysunku 6. Wyjaśnić, że jest to napięcie sygnału lasera, odbitego ekranem. Czas, odpowiadający największemu napięciu, jest odstępem czasowym między wysłaniem i przyjęciem sygnału, czyli takim, w którym impuls lasera przechodzi odległości lidar-ekran i ekran-lidar.
6. Powiadomić widzom i zapisać czas, odpowiadający największemu napięciu.
7. Wyjaśnić widzom, jak skonwertować czas przyjęcia największego sygnału w odległość od lidar do ekranu. Można przy tym korzystać z tablicy. Wprowadzić prosty wzór na szukaną odległość:

$$l = \frac{c\Delta t}{2} \quad (1)$$

$c$  tutaj jest prędkością światła ( $c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ ), czyli prędkością emitowanego impulsu laserowego,  $\Delta t$  – odstępem czasu między wysłaniem i przyjęciem sygnału. Iloczyn tych wielkości jest dzielony na 2, aby nie dublować odległości od lidar do ekranu.

8. Wstawić odpowiednie wartości do wzoru 1. Wykonać proste działania matematyczne za pomocą kalkulatora. Otrzymana liczba jest odległością od lidar do ekranu, zmierzona lidarem. Oznajmić wynik publiczności.
9. Porównać odległości zmierzone miarką i lidarem. Jeśli demonstracja została właściwie przeprowadzona, te wartości powinny być sobie bardzo bliskie, lecz nie równe.
10. Wyjaśnić, dlaczego odległości zmierzone miarką i lidarem, nie są równe. Wpływają na to głównie przybliżona wartość prędkości światła  $c$  i obciążony znacznym błędem odczyt z oscyloskopu odstepu czasu  $\Delta t$ .
11. Powyższy pomiar można wykonać ponownie po uprzednim przestawieniu ekranu, aby pokazać, że powyższa zależność jest utrzymana.

## 2.4.2 Pomiar prędkości światła

**Dodatkowe wyposażenie:** nieprzezroczysty ekran, metr, tablica, kreda/marker, kalkulator.

**Czas pokazu:** 10-15 minut

1. Ustawić ekran jak najbliżej do drogi wiązki laserowej na sztywno, czyli tak, żeby odległość od niego do lidaru się nie zmieniała i żeby jego płaszczyzna była prostopadła do wiązki w czasie całego pokazu.
2. Zmierzyć odległość od lidaru do ekranu metrem, powiadomić ją widzom i zapisać.
3. Uruchomić lidar, podłączyć do niego oscyloskop.
4. Wyjaśnić publiczności, co widzą na ekranie oscyloskopu. Skala pozioma jest skalą czasu, pionowa – skalą napięcia sygnału, który przyjmuje teleskop. Ważne jest wspomnieć, że czas jest równy zero w momencie, kiedy laser emituje impuls.
5. Jeśli ekran jest ustawiony właściwie, na oscyloskopie będziemy obserwować zwiększenie napięcia przyjętego sygnału, jak na rysunku 6. Wyjaśnić, że jest to napięcie sygnału lasera, odbitego ekranem. Czas, odpowiadający największemu napięciu, jest odstępem czasowym między wysłaniem i przyjęciem sygnału, czyli takim, w którym impuls lasera przechodzi odległości lidar-ekran i ekran-lidar.
6. Powiadomić widzom i zapisać czas, odpowiadający największemu napięciu.
7. Wprowadzić prosty wzór na prędkość światła

$$c = \frac{2l}{\Delta t}, \quad (2)$$

gdzie  $l$  – to zmierzona miarką odległość, a  $\Delta t$  – czas zczytany z oscyloskopu. Wyjaśnić widzom, że odległość jest pomnożona przez 2, ponieważ wiązka laserowa pokonuje tę drogę dwukrotnie.

8. Wstawić odpowiednie wartości do powyższego wzoru. Wykonać proste działania matematyczne za pomocą kalkulatora. Oznajmić wynik publiczności. Otrzymana wartość jest wyznaczoną prędkością światła.
9. Porównać otrzymaną wartość z przybliżoną wartością światła w próżni  $c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ . Jeśli pokaz został właściwie przeprowadzony, te wartości powinny być do siebie bardzo zbliżone, lecz nie równe.
10. Wyjaśnić, dlaczego wartości te nie są sobie równe. Wpływa na to przede wszystkim dokładność wykonanego pomiaru odległości oraz rozdzielczość czasowa używanego oscyloskopu.

### 2.4.3 Wykrycie aerozolu

**Dodatkowe wyposażenie:** czarny nieprzezroczysty ekran, woda, nawilżacz powietrza.

**Czas pokazu:** 15-20 minut

1. Ustawić ekran jak najbliżej do drogi wiązki laserowej na odległości 2-6 m od lidaru.
2. Uruchomić lidar, podłączyć do niego oscyloskop.
3. Wyjaśnić publiczności, co widzą na ekranie oscyloskopu. Skala pozioma jest skalą czasu, pionowa – skalą napięcia sygnału, który przyjmuje teleskop. Ważne jest wspomnieć, że czas jest równy zero w momencie, kiedy laser emituje impuls.
4. Na oscyloskopie może być widoczne małe powiększenie napięcia sygnału. Wyjaśnić widzom, że jest to światło, odbite od ekranu. Czas, odpowiadający największemu napięciu, jest odstępem czasowym między wysłaniem i przyjęciem sygnału.
5. Rozprzestrzenić parę wodną na drodze wiązki laserowej, tworząc dość gęstą chmurkę.
6. Na ekranie oscyloskopu musi pojawić się jeszcze jedno miejsce zwiększenia wartości przyjętego sygnału o mniejszym odstępem czasowym niż w ekranu. Sygnał, odbity od ekranu, powinno się zmniejszyć. Innymi słowy, na oscyloskopie muszą się pojawić dwa maksima.

7. Opowiedzieć, że na podobnej zasadzie działają lidary atmosferyczne. Zazwyczaj mają bardziej skomplikowaną konstrukcję niż zbudowany podczas wykonania niniejszego projektu. Pozwala ona nie tylko wykrywać aerozole, ale także badać ich skład, gęstość, temperaturę itp., analizując spektrum odbitego od nich światła.
8. Odległość do chmury aerozolu można zmierzyć analogicznym sposobem jak opisany w podpunktach 5-8 podrozdziału 2.4.1.

#### 2.4.4 Odbijanie światła ultrafioletowego kremem przeciwsłonecznym

**Dodatkowe wyposażenie:** Krem przeciwsłoneczny, ręka ochotnika.

**Czas pokazu:** 10-15 minut

1. Uruchomić lidar, podłączyć do niego oscyloskop.
2. Zwrócić uwagę publiczności na ekran oscyloskopu. Wyjaśnić, że pozioma skala oscyloskopu jest skalą czasu, pionowa – skalą napięcia sygnału, który przyjmuje teleskop, oraz że czas jest równy zero w momencie, kiedy laser emituje impuls.
3. Opowiedzieć o wpływie światła słonecznego na człowieka. Wyjaśnić, że duże ilości światła ultrafioletowego są niebezpieczne dla człowieka oraz że główną rolą kremu przeciwsłonecznego jest odbijanie tego światła.
4. Jeden z wykonujących demonstrację lub ochotnik z publiczności wstawi rękę na drogę wiązki laserowej.
5. Na oscyloskopie powinno pojawić się miejsce o powiększonym sygnale. Wyjaśnić, że jest to napięcie sygnału lasera, odbitego ręką. Czas, odpowiadający największemu napięciu, jest odstępem czasowym między wysłaniem i przyjęciem sygnału.
6. Powiadomić widzom i zapisać wartość napięcia sygnału, odbitego ręką.
7. Jeden z wykonujących demonstrację lub ochotnik z publiczności nakłada krem przeciwsłoneczny na swoją rękę i znowu stawia ją na drogę wiązki laserowej.
8. Sygnał, odbity od ręki z kremem, powinien być zauważalnie większy niż od czystej ręki.
9. Powiadomić widzom wartość napięcia sygnału, odbitego ręką z kremem. Porównać ją z zapisaną wartością dla czystej ręki.

### 3 Dalsze plany

Projekt zakończył się zbudowaniem i uruchomieniem układu lidarowego, a także przygotowaniem scenariuszy pokazów z wykorzystaniem gotowego układu. Lidar został przetestowany tak, by zapewnić jego niezawodne działanie. Ze względu na epidemię koronawirusa niestety nie doszło do skutku wystawienie pokazów na Pikniku Naukowym. W planach jest jednak realizacja pokazów w formie zdalnej na Festiwalu Nauki 2020 we wrześniu. Ze względu na potencjał do przeprowadzania pokazów w nadchodzących latach, planujemy w nadchodzącym czasie dalsze usprawnienie układu. Dla zapewnienia bezpieczeństwa publiczności i większej możliwości pokazywania działania i poszczególnych elementów planujemy wykonać osłonę z przezroczystego tworzywa na elementy nadajnika, jak i na tubę fotopowielacza. Dodatkowo w planach jest wykonanie planszy, ilustrującej przebieg światła wewnątrz tuby teleskopu. Ponadto wykonany zostanie nowy wózek z profili aluminiowych, do którego zamocowany będzie układ wraz z konieczną elektroniką.

Wierzmy, że tak przygotowany układ będzie mógł służyć do pokazów na różnego rodzaju imprezach i festiwalach, a być może również na pracowniach Wydziału Fizyki czy podczas wykładów.

## Literatura

- [1] R. Paschotta. [https://www.rp-photonics.com/eye\\_safe\\_lasers.htm](https://www.rp-photonics.com/eye_safe_lasers.htm).
- [2] [http://www.optique-ingenieur.org/en/courses/OPI\\_ang\\_M01-C02/co/Contenu\\_05.html](http://www.optique-ingenieur.org/en/courses/OPI_ang_M01-C02/co/Contenu_05.html).