

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA
im. Jarosława Dąbrowskiego

INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI



ROZPRAWA DOKTORSKA

„OPTYMALIZACJA
OPTOELEKTRONICZNEGO MODUŁU DETEKCYJNEGO
DO SYSTEMU OSTRZEGANIA O PROMIENIOWANIU
LASEROWYM”

Autor:
mjr mgr inż. Marcin JAKUBASZEK

Promotor:
prof. dr hab. inż. Zygmunt MIERCZYK

Promotor pomocniczy:
dr inż. Marek ZYGMUNT

W a r s z a w a 2021

SPIS TREŚCI

1	WSTĘP	11
2	CEL PRACY	14
3	ANALIZA ŹRÓDEŁ PROMIENIOWANIA LASEROWEGO NA WSPÓŁCZESNYM POLU WALKI	15
	3.1 <i>Dalmierze laserowe</i>	15
	3.2 <i>Podświetlacze laserowe</i>	17
	3.3 <i>Układy naprowadzania w wiązce laserowej</i>	18
	3.4 <i>Oświetlacze laserowe</i>	19
	3.5 <i>Wskaźniki laserowe</i>	20
	3.6 <i>Olśniewacze laserowe</i>	21
	3.7 <i>Podsumowanie</i>	22
4	SYSTEMY OSTRZEGANIA O PROMIENIOWANIU LASEROWYM	24
	4.1 <i>Przegląd rozwiązań w zakresie systemów ostrzegania o promieniowaniu laserowym</i>	26
	4.2 <i>Podsumowanie</i>	37
5	METODY POMIARU KĄTA PADANIA PROMIENIOWANIA OPTYCZNEGO	39
	5.1 <i>Przegląd metod określania kąta padania światła</i>	39
	5.2 <i>Podsumowanie</i>	50
6	KONCEPCJA MODUŁU OPTOELEKTRONICZNEGO O WYSOKIEJ ROZDZIELCZOŚCI KĄTOWEJ I CZUŁOŚCI WIDMOWEJ	51
	6.1 <i>Oszacowanie poziomu natężenia napromienienia od reprezentatywnych źródeł promieniowania laserowego</i>	51
	6.2 <i>Wymagania dotyczące modułu detekcyjnego</i>	54
	6.3 <i>Koncepcja modułu detekcyjnego</i>	54
	6.4 <i>Oszacowanie wymiarów mechanicznych sensora</i>	67
	6.5 <i>Analiza wpływu założonej rozdzielczości na wymiary mechaniczne modułu</i>	78
	6.6 <i>Określenie parametrów kluczowych elementów toru detekcyjnego</i>	79
	6.7 <i>Określenie SNR na wyjściu toru detekcyjnego</i>	89
	6.8 <i>Analiza zakresu dynamicznego odbieranych sygnałów optycznych</i>	105
	6.9 <i>Podsumowanie</i>	114

7	BUDOWA MODUŁU OPTOELEKTRONICZNEGO.....	116
7.1	<i>Konstrukcja części opto-mechanicznej</i>	<i>116</i>
7.2	<i>Konstrukcja układów elektronicznych - część analogowa.....</i>	<i>120</i>
7.3	<i>Konstrukcja układów elektronicznych - część cyfrowa.....</i>	<i>123</i>
7.4	<i>Komunikacja modułu z urządzeniami zewnętrznymi</i>	<i>125</i>
8	BADANIA LABORATORYJNE MODELU MODUŁU OPTOELEKTRONICZNEGO.....	129
8.1	<i>Wyniki pomiarów.....</i>	<i>132</i>
8.2	<i>Podsumowanie</i>	<i>136</i>
9	WNIOSKI.....	138
10	Bibliografia i źródła	141
11	Załącznik nr 1. Zestawienie źródeł promieniowania elektromagnetycznego	154
12	Załącznik nr 2. Zbiorcze zestawienie charakterystyk systemów wykrywania i ostrzegania oferowanego na rynku	158
13	Załącznik nr 3. Opis ruchu kąтового na stanowisku pomiarowym	161
14	Załącznik nr 4. Plik symulacyjny stopnia wejściowego (LTSpice)	163
15	Załącznik nr 5. Moduł w wersji prototypowej i jego badania	164

STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Rozprawa p.t. „*Optymalizacja optoelektronicznego modułu detekcyjnego do systemu ostrzegania o promieniowaniu laserowym*” dotyczy problematyki konstrukcji głównego podzespołu systemu ostrzegania o promieniowaniu laserowym. Jest to istotne zagadnienie, ponieważ w wyniku procesu analitycznego powstaje koncepcja urządzenia, które może zostać zastosowane do konstrukcji systemu ostrzegania.

We wstępie skupiono się na ogólnych uwarunkowaniach, dla których podjęto się tego zagadnienia. Wskazany został sposób zastosowania promieniowania laserowego na polu walki, zostało także wskazane w ogólnym zarysie tło historyczne dotyczące systemów ostrzegania.

Rozdział drugi stanowi cel i zakres pracy. Zostały w nim postawione tezy rozpatrywane w pracy oraz cele jakie powinny zostać zrealizowane podczas jej realizacji. W trzecim rozdziale pracy omówiono źródła promieniowania jakie występują na polu walki. Poza ich systematycznym podzieleniem wynikającym z przeznaczenia, wyszczególniono zakresy parametrów nadajników laserowych zastosowanych w tych urządzeniach. Rozdział kończy się krótkim podsumowaniem, gdzie przedstawiono główne charakterystyki parametrów promieniowania laserowego.

„Systemy Ostrzegania o Promieniowaniu Laserowym” omówione zostały w czwartym rozdziale pracy. W pierwszej części tego rozdziału zostały zdefiniowane podstawowe parametry takich systemów. W drugiej części dokonano przeglądu wybranych systemów firm polskich i zagranicznych. Wskazano podstawowe, deklarowane przez producentów, parametry techniczno-operacyjne. Rozdział kończy się podsumowaniem.

Piąty rozdział dotyczy metod określania kierunku padania promieniowania laserowego dostępnych w różnych źródłach literaturowych. Przedstawiono w nim przegląd koncepcji konstrukcyjnych, układów detekcyjnych stosowanych do określania kąta padania promieniowania. Skupiono się przede wszystkim na metodach, które mają duży potencjał implementacyjny.

Rozdział szósty stanowi główny rozdział analityczny pracy. W pierwszej części zawiera on opis matematyczny przyjętej konstrukcji oraz założenia, według których będzie dokonywana optymalizacja. W dalszej części wskazano wpływ poszczególnych parametrów technicznych na rozwiązanie konstrukcyjne. Dokonana analiza wyznacza

optymalną średnicę detektora pod względem maksymalizacji czułości i minimalizacji wymiarów mechanicznych. W tym rozdziale dokonano także analizy zakresu dynamicznego pracy sensora. W podsumowaniu przedstawiono podzespoły i parametry sensora uznanego za optymalny.

Siódmy rozdział pracy jest opisem konstrukcji powstałej w oparciu o analizy z rozdziału szóstego. Konstrukcja powstała w ramach realizacji projektu „*Laserowe Systemy Broni Skierowanej Energii, Laserowe Systemy Broni nieśmiertelności – PSOB/16-064/WAT*” finansowanego przez NCBIR. Przedstawione zostały podstawowe rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne dotyczące modułu detekcyjnego.

Badania modułu detekcyjnego przedstawionego w rozdziale 7 zostały opisane w rozdziale 8. Przedstawiono w nim podejście metodologiczne do badań oraz zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych. Tak jak uprzednio rozdział kończy się podsumowaniem zawierającym omówienie otrzymanych wyników.

Ostatnią częścią pracy są wnioski dotyczące przeprowadzonej analizy i uzyskanych wyników. Wyszczególniono w niej zakres opracowanych analiz, wyników badań laboratoryjnych i poligonowych oraz przedstawiono wnioski dotyczące kierunków dalszych prac rozwojowych.

W pięciu załącznikach do pracy zostały przedstawione zestawienia parametrów urządzeń laserowych, systemów ostrzegania o promieniowaniu oraz badania laboratoryjne i terenowe prototypu.

ABSTRACT OF THE DOCTORAL DISSERTATIONS

The dissertations „*Optimalizations of optoelectronic module for a laser warning system*” concerns the construction of the main module in a laser warning system. This is important part, of the analytical process, which creates a detailed concept of the warning system.

The introduction is focused on general reasons, for initiating this work start. The way the lasers devices are used on a battlefield have also been discussed. Historical background of laser warning systems have been presented as well.

The second chapter contain the main targets of the dissertation. In this was detailed the milestones to achieved are shortly presented.

Third chapter deals with laser sources available on a battlefield. They are classified according to their purpose and the basic range of parameters. The chapter ends with a short summary, where the main characteristics of a laser beam parameter are considered.

Laser warning systems are described in the fourth chapter. The first part of this chapter provides definitions of basic parameters of such systems. The second part gives a review of systems which are offered by Polish and foreign manufactures. Basic parameters declared by the manufactures have been discussed. At the end of this chapter as last, summary is included.

The ideas of methods to determine incidence angle of light, which are available in literature are described at the fifth chapter. It provided a review of conceptions of constructions, detections modules architectures which are used to determine incidence angle of light. Focus was set on methods which have a high implementation potentials.

The sixth chapter is a main analytical chapter. At the first part mathematical is presented as well as the main optimization criteria. Next the impact of particular technical parameters on the performance is discussed. Analysis which has been done, shows the optimal photodiode diameter with respect to sensitivity maximization and overall compactness. In this chapter a dynamic range of detection module was also analyzed. In the summary all the components and parameters which were considered optimal are presented.

At the seventh chapter, results of real implementations are discussed. The module was built during the realisation of the project „Laserowe Systemy Broni Skierowanej

Energii, Laserowe Systemy Broni Nieśmiercionośnej- PSOB16-064/WAT” which was financed by NCBIR. Technical solutions of detection module was presented.

The experimental results are presented in eighth chapter. At first the testing methodology was presented. Next, the obtained results was presented. As in the previous chapters short summary is provided at the end.

At the last part of the dissertations the main conclusions are presented. The details of all analysis and experimental results are specified. At the end a future research directions.

In the attachments all essential are gathered outlined. Those of lasers, of warning systems, and also the results obtained in the on laboratory and terrain of the constructed laser warning system prototype.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I OZNACZEŃ

S_{λ}	-	Czułość prądowa elementu detekcyjnego dla długości fali λ [$\frac{A}{W}$]
$S_f(\lambda)$	-	Czułość prądowa elementu detekcyjnego w funkcji długości fali λ [$\frac{A}{W}$]
P	-	Moc [W]
P_s	-	Moc na powierzchni detekcyjnej
SOPL	-	System Ostrzegania o Promieniowaniu Laserowym
SKO	-	System Kierowania Ogniem
LWR	-	[ang.] <i>Laser Warning Reciver</i>
MWR	-	[ang.] <i>Missle Warning Reciver</i>
LWS	-	[ang.] <i>Laser Warning System</i>
MWS	-	[ang.] <i>Missle Warning System</i>
SKO	-	System Kierowania Ogniem
BMS	-	[ang.] <i>Battlefield Management System</i>
GBW	-	[ang.] <i>Gain Bandwidth Product</i>
LD	-	[ang.] <i>Laser Designator (podświetlacz laserowy)</i>
IL	-	[ang.] <i>Illuminator, (oświetlacz laserowy)</i>
LRF	-	[ang.] <i>Laser Range Finder (dalmierz laserowy)</i>
LP	-	[ang.] <i>Laser Pointer (wskaznik laserowy)</i>
LBR	-	[ang.] <i>Laser Beam Rider (naprowadzanie w wiązce laserowej)</i>
LDZ	-	[ang.] <i>Laser Dazzler (oślniewacz laserowy)</i>
S_D	-	Powierzchnia detekcyjna [m^2]
G_m	-	Natężenie napromienienia [$\frac{W}{m^2}$]
V_r	-	Napięcie polaryzujące fotodiodę [V]
q	-	Ładunek elementarny (ładunek elektronu) $1,602 \times 10^{-19} C$

k	-	Stała Boltzmana $1,380 \times 10^{-23} [\frac{J}{K}]$
h	-	Stała Plancka $6,626 \cdot 10^{-34} [J \cdot s]$
s	-	Długość mechaniczna [m]
d	-	Średnica (w doniesieniu do powierzchni detekcyjnej) [μm]
VCC	-	Stałe napięcie zasilające o potencjale dodatnim [V]
VEE	-	Stałe napięcie o potencjale ujemnym [V]
I_{ph}	-	Fotoprąd indukowany padającym promieniowaniem optycznym [A]
FOV	-	[<i>ang.</i>] <i>Field of View (pole widzenia)</i>
ρ	-	Współczynnik odbicia
α	-	Kąt azymutu
β	-	Kąt elewacji
θ	-	Kąt konstrukcyjny określający rozdzielczość (w odniesieniu do modułu detekcyjnego)

1 WSTĘP

Cechą współczesnych konfliktów zbrojnych jest precyzyjne rażenie przeciwnika. Pozwala to na eliminację lub neutralizację obiektów, urządzeń lub systemów stanowiących istotne zagrożenie dla realizacji zakładanych celów taktycznych, operacyjnych bądź strategicznych [1]. Użycie precyzyjnych środków rażenia, oprócz zakładanych korzyści militarnych, pozwala minimalizować liczbę ofiar cywilnych oraz straty w infrastrukturze. Broń precyzyjnego rażenia może także odgrywać istotną rolę propagandową osłabiającą morale przeciwnika.

Do naprowadzania i korygowania ognia mogą być stosowane źródła emitujące promieniowanie elektromagnetyczne (z zakresu radiowego, radarowego lub optycznego). Jako nadajniki promieniowania optycznego stosowane są źródła emitujące promieniowanie laserowe, które ma mniejszy kąt rozbieżności niż wiązka promieniowania z zakresu radiowego czy radarowego.

W aplikacjach militarnych źródła laserowe stosowane są do określania odległości, do naprowadzania środków rażenia na cel, wskazywania punktów celowania broni ręcznej lub pokładowej. Innym zastosowaniem źródeł promieniowania laserowego są układy transmisji danych w otwartej przestrzeni [2], układy oświetlające, czy też laserowe systemy broni skierowanej energii i laserowe systemy olśniewające [3÷6]. Główną rolę jednak odgrywają dalmierze, które są zintegrowane z systemami kierowania ogniem (SKO) oraz systemy służące do naprowadzania pocisków, rakiet czy bomb. Są one także jednym z podstawowych narzędzi służących do rozpoznania wojsk przeciwnika przez pododdziały rozpoznawcze.

Rozwój technologii w zakresie wytwarzania efektywnych źródeł promieniowania laserowego spowodował spadek ich cen. W efekcie wzrosła ilość urządzeń emitujących tego typu promieniowanie na polu walki. Wykrywanie takiego promieniowania, namierzanie, analiza jego parametrów jest jednym z istotnych aspektów utrzymania żywotności bojowej sprzętu i ochrony wojsk własnych. W tym celu powstało szereg systemów realizujących zadania z zakresu detekcji promieniowania laserowego i przeciwdziałania ewentualnym skutkom jego użycia.

Od lat 70-tych XX wieku trwają na całym świecie prace nad Systemami ostrzegania o promieniowaniu Laserowym (SOPL). Prace nad takimi systemami realizowane były także w Wojskowej Akademii Technicznej. W Instytucie Elektroniki Kwantowej powstał pierwszy system ostrzegania dla czołgów T55 „Bobrawa”

(instalowany razem z systemem kierowania ogniem (SKO) „Merida”). W momencie rozpoczęcia produkcji przez Przemysłowe Centrum Optoelektroniki, system ten był pierwszym systemem ostrzegania o promieniowaniu laserowym w Układzie Warszawskim. Składał się z czterech głowic detekcyjnych umieszczonych na wieży czołgu, systemu alarmowego oraz układu zobrazowania [7].

W dalszych pracach prowadzonych w Wojskowej Akademii Technicznej powstał system „OBRA”, którego kolejne modyfikacje w dalszym ciągu produkowane są przez Przemysłowe Centrum Optoelektroniki i są montowane na kołowych transporterach opancerzonych (KTO Rosomak), czołgach oraz eksportowane do innych krajów [8].

W Instytucie Optoelektroniki WAT, przy współpracy z firmą KenBit powstał system sygnalizujący o promieniowaniu laserowym montowany na wozie dowodzenia - SOL-1. Był to jeden z pierwszych polskich systemów integrujący informację z czujników optoelektronicznych, radarowych, rozpoznania skażeń chemicznych, czy radiacyjnych [9]. Na zlecenia WZE Zielonka powstał system o kryptonimie LWR-H, montowany na śmigłowcu W-3 [10].

System ostrzegania o promieniowaniu laserowym powinien realizować podstawową funkcję, jaką jest wykrycie promieniowania, określenie kierunku na źródło i przekazanie informacji o tym fakcie do systemu zarządzania walką. Bardziej zaawansowane technicznie systemy, poza detekcją promieniowania i alarmowaniem, realizują pomiary parametrów przychodzącego promieniowania, a wyniki analizy sygnałów mogą być porównywane z bazą danych. W ten sposób można dokonać klasyfikacji źródła promieniowania, przydzielić go do danej grupy oraz ustalić realne zagrożenie dla platformy. Do tego celu konieczne jest stosowanie odpowiednich technik pomiarowych charakteryzujących się określoną dokładnością i rozdzielczością.

Pomiar kąta padania promieniowania elektromagnetycznego na polu walki realizowany jest dla wszystkich zakresów długości fal elektromagnetycznych. W przypadku fal z zakresu UKF, KF stosowane są namierniki radiowe, natomiast w przypadku fal radarowych takie funkcje realizują specjalistyczne stacje rozpoznania promieniowania radiolokacyjnego[11]. W takich systemach wykorzystuje się zależności fazowe promieniowania padającego na zespół anten odbiorczych lub też na kierunkowości charakterystyk anten odbiorczych [12].

Ciągłe prace owocujące nowymi technologiami i rozwiązaniami technicznymi, przyczyniają się do udoskonalania parametrów systemów ostrzegania o promieniowaniu

elektromagnetycznym, w tym laserowym. Powstają urządzenia o coraz większej czułości i dokładności określania kąta, a systemy oferują nowe funkcjonalności.

2 CEL PRACY

TEZA NR 1: Zastosowanie zoptymalizowanych elementów konstrukcyjnych komory pomiarowej umożliwia uzyskanie wysokich rozdzielczości i dokładności pomiaru kąta padania promieniowania przy minimalizacji wymiarów mechanicznych sensora.

TEZA NR 2: Zastosowanie zwierciadła oraz odpowiedniej struktury komory pomiarowej umożliwia zmniejszenie liczby elementów detekcyjnych bez zmniejszenia pola widzenia przy zachowaniu dynamiki detekowanych sygnałów optycznych.

Cel nr 1 Opracowanie i optymalizacja układu detekcyjnego o wysokiej czułości widmowej.

Cel nr 2 Uzyskanie wysokiej rozdzielczości określania kąta azymutu i elewacji.

3 ANALIZA ŹRÓDEŁ PROMIENIOWANIA LASEROWEGO NA WSPÓŁCZESNYM POLU WALKI

3.1 Dalmierze laserowe

Dalmierze laserowe (ang. *Rangefinder*, LRF) są urządzeniami służącymi do określania odległości, pomiarów kątów między obiektami, określania rozmiarów obiektów. Wskazania dalmierzy stanowią podstawę do podawania koordynat dla środków ogniowych, szczególnie artyleryjskich. Przykładowy dalmierz został przedstawiony na rysunku nr 3.1.

W dalmierzach laserowych przeznaczonych do użycia w warunkach bojowych stosowane są źródła laserowe emitujące promieniowanie impulsowe na długościach fal 850 nm, 905 nm, 1064 nm, 1510 nm÷1550 nm. Wymienione długości fal wynikają z konstrukcji emiterów promieniowania laserowego. Mogą być stosowane zarówno półprzewodnikowe źródła promieniowania laserowego (półprzewodnikowe diody laserowe), jak i lasery na ciele stałym.

Dalmierze laserowe można podzielić ze względu na poziom mocy emitowanego promieniowania na dalmierze o małym jak i o dużym poziomie mocy wyjściowej. Do dalmierzy o małym poziomie mocy można zaliczyć te, których moc maksymalna nie przekracza kilkudziesięciu watów. Dalmierze o dużym poziomie mocy to takie, w których moc w szczycie impulsu jest nie mniejsza niż kilka kW.

Poziom mocy wyjściowej promieniowania laserowego ma wpływ na poziom sygnału użytecznego rozproszonego od obiektu, do którego mierzona jest odległość. Wartość sygnału odebranego przez odbiornik może określać sposób i algorytm wyznaczania odległości. Jeśli stosunek sygnału do szumu w torze odbiorczym jest wystarczający, możliwe jest stosowanie odbioru bezpośredniego i detekcji progowej. Przekroczenie pewnej, ustalonej wartości przez sygnał z odbiornika, powoduje zatrzymanie liczników czasu uruchomionych w trakcie emisji impulsu laserowego. Na podstawie odstępu czasu między emisją impulsu laserowego a odbiorem sygnału i przy znanej prędkości światła w ośrodku, możliwe jest wyznaczenie odległości do obiektu.

W przypadku, gdy stosunek sygnału do szumu nie jest wystarczający, używane są algorytmy, które mają za zadanie „wydobyć” sygnał z szumu. Do tego celu może być stosowana metoda polegająca na synchronicznym sumowaniu sygnału pochodzącego od echa optycznego, pozwalająca na poprawę stosunku sygnału do szumu o pierwiastek

z ilości sumowań [13]. Urządzenia tego typu określane są mianem dalmierzy „podsumowych”.

Poziom mocy i odstęp między wartością sygnału a wartością szumu ma znaczący wpływ na czas pomiaru i ilość emitowanych impulsów laserowych. W przypadku gdy emitowany jest impuls laserowy o dużej mocy, oczekiwany poziom echa optycznego może być odpowiedni dla odbioru bezpośredniego. Wówczas określenie odległości następuje przy pomocy jednego impulsu. W przypadku gdy dalmierze stosują jako nadajniki źródła emitujące niewielkie moce (np. półprzewodnikowe diody laserowe), pomiar może być powtarzany wielokrotnie, a zatem emitowane są serie impulsów o określonej częstotliwości. W zależności od zastosowanego lasera w nadajniku, częstotliwość powtarzania impulsów może być w granicach od pojedynczych Hz do częstotliwości około 30 kHz.

W korelacji z mocą impulsu pozostaje czas jego trwania. Promieniowanie o dużym poziomie mocy ma czasy trwania impulsów rzędu od 1 ns do 20 ns, natomiast źródła o mniejszej mocy mają czasy trwania w granicach od 30 ns do 500 ns.

Zasięg pomiaru zależy w sposób bezpośredni od mocy nadajnika. Podawane przez producentów maksymalne możliwe do pomierzenia odległości mieszczą się w zakresie od kilku kilometrów dla dalmierzy małej mocy, do 20 km dla dużych mocy.

Kolejnym parametrem źródeł promieniowania laserowego emitowanego przez dalmierz jest kąt rozbieżności wiązki promieniowania. Parametr ten jest skorelowany z zasięgiem dalmierza, a jego wartości mieszczą się w zakresie od 0,1 mrad do 3 mrad.



Rys. 3.1 Dalmierz firmy Safran [14]

3.2 Podświetlacze laserowe

Mały kąt rozbieżności wiązki promieniowania laserowego może być wykorzystany do naprowadzania środków rażenia na cel. W dalmierzu, nadajnik promieniowania laserowego i odbiornik promieniowania rozproszonego od celu znajdują się w tym samym urządzeniu. W układach naprowadzania nadajnik znajduje się na innym urządzeniu niż odbiornik.

Podświetlacze (ang. *Laser Designator*, LD) są urządzeniami generującymi wiązkę promieniowania laserowego wskazującego konkretny obiekt. Promieniowanie rozproszone od celu dociera do układu detekcyjnego umieszczonego na bojowym środku rażącym. Układy sterowania lotem pocisku, bomby czy rakiety, na podstawie danych z układu detekcyjnego tak zmieniają tor ruchu, aby uderzenie nastąpiło w miejsce oświetlone promieniowaniem laserowym. Cel jest „podświetlany” dla środka rażącego obiekt.

Emitery promieniowania laserowego w układach podświetlaczy generują impulsy laserowe o długości fali 1064 nm (rzadziej 1540 nm) i czasach trwania od 5 ns do 30 ns, z repetycją do kilkudziesięciu Hz. Moc impulsów nadajników laserowych podświetlaczy sięgają rzędu kilku MW. Promieniowanie laserowe emitowane przez układ nadajnika jest modulowane (modulacja PPM [15]) przy użyciu odpowiedniego kodu. Zadaniem tego zabiegu jest utrudnienie optoelektronicznego zakłócania naprowadzanego środka rażenia i maskowania obiektu.

Urządzenia podświetlające cel mogą stanowić wyposażenie platform powietrznych, lądowych, morskich oraz wyposażenie żołnierzy działających w określonej formacjach bojowych.

Na rysunku 3.2 przedstawiony został podświetlacz zaprezentowany przez firmę Northrop Grumman, który może być obsługiwany przez odpowiednio wyszkolonych operatorów.

Podświetlacz wskazuje cel dla środków rażenia będących na wyposażeniu własnej platformy lub miotanych elementów militarnego ugrupowania wojsk własnych. Zasięg operacyjny takiego pocisku mieści się w granicach do kilku kilometrów, natomiast zasięg taktyczny samego podświetlacza osiąga wartości do 20 km. Oznacza to, iż operator podświetlacza nie musi znajdować się w bezpośrednim kontakcie z celem, jednakże obiekt podświetlany musi być widoczny. Przy tak dużych zasięgach, kąt rozbieżności

wiązki laserowej nadajnika podświetlacza, musi być bardzo mały, tak aby jednoznacznie i precyzyjnie wskazywać cel. Wartość tego kąta często nie przekracza wartości 0.5 mrad.



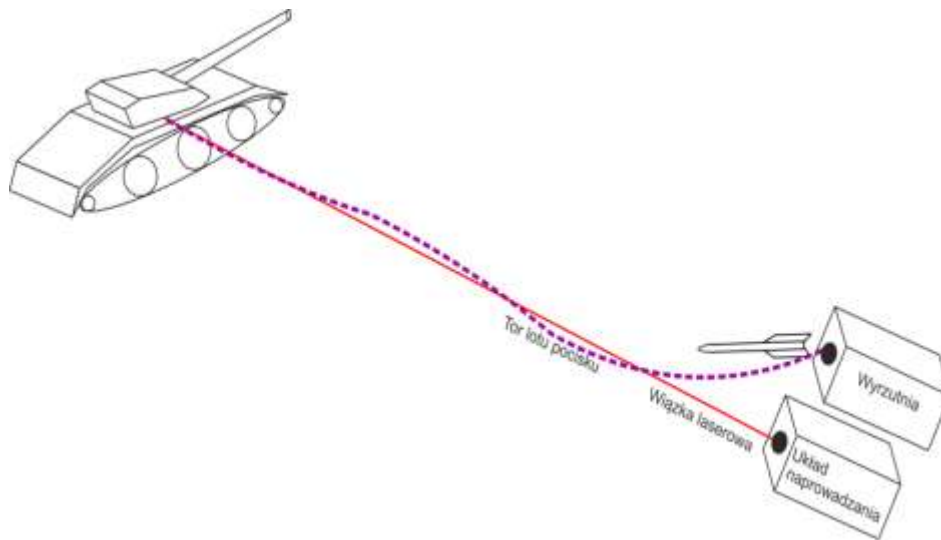
Rys. 3.2 Podświetlacz laserowy firmy Northrop Grumman [16]

3.3 Układy naprowadzania w wiązce laserowej

Układy naprowadzania w wiązce laserowej (ang. *Laser Beam Rider*, LBR) służą do aktywnego prowadzenia środka rażenia na cel. Wiązka laserowa jest odpowiednio kodowana i oświetla tylną część naprowadzanego urządzenia. Układ automatycznego określania położenia pocisku względem wiązki promieniowania wprowadza korekty do trajektorii lotu w taki sposób, aby pocisk zawsze był w środku wiązki. Dodatkowo może być określana odległość pocisku od wyrzutni (lub od celu). Stwarza to możliwości aktywnej zmiany toru ruchu i naprowadzenie środka rażącego na cel w ostatniej fazie lotu. Ze względu na bardzo krótkie czasy ekspozycji plamy laserowej na celu oraz ze względu na małe moce nadajników, układy naprowadzania w wiązce są niezwykle trudne do wykrycia. Idea działania układu naprowadzania w wiązce została przedstawiona na rysunku 3.3.

Kąt rozbieżności wiązki promieniowania laserowego w systemach naprowadzania jest zmienny i zależy od odległości. Celowym jest taka jego zmiana aby wymiary geometryczne przekroju poprzecznego wiązki były stałe i niezależne od odległości. W związku z tym kąt rozbieżności wiązki zmienia się od kilku stopni do kilku miliradianów.

Jako źródła promieniowania laserowego do tego typu układów stosowane są emitery pracujące na długościach fal 905 nm, 1064 nm lub 1550 nm z częstotliwościami sięgającymi kilkudziesięciu kHz. Moc generowanego promieniowania mieści się w granicach od kilku do kilkunastu watów. Wyższy poziom mocy emitowanego promieniowania nie jest konieczny, ze względu na fakt, że odbiornik znajduje się w wiązce laserowej i detektory są oświetlone bezpośrednio.



Rys. 3.3 Idea zasady działania systemu z naprowadzaniem w wiązce

3.4 Oświetlacze laserowe

Urządzenia służące do oświetlania scenarii dla przyrządów noktowizyjnych lub kamer noszą nazwę oświetlaczy (ang. *Illuminator*, *IL*). W oświetlaczach laserowych stosowane są źródła CW pracujące na długościach fal od 850 nm do około 1 μm . Moce tych źródeł mieszczą się w zakresie od 50 do 200mW, a nadajniki mogą mieć regulowany kąt rozbieżności wiązki wyjściowej od 0,35 mrad do 960 mrad.

W niektórych przypadkach, oświetlacze i urządzenia noktowizyjne połączone są z kamerami pracującymi w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni, a do użytkownika dociera informacja będąca fuzją informacji z obu tych przyrządów. Użycie oświetlacza przez operatora zostało pokazane na rysunku 3.4.



Rys. 3.4 Przykład zastosowania oświetlacza i wskaźnika laserowego (widok z noktowizora) [17]

3.5 Wskaźniki laserowe

Wskaźniki laserowe (ang. *laser pointer, LP*) to urządzenia zintegrowane z bronią osobistą żołnierza bądź bronią pokładową. Głównym zadaniem jest wskazanie punktu celowania, a zatem służą do prowadzenia ognia bez użycia przyrządów celowniczych. Punkt celowania wyznaczony jest przez środek wiązki laserowej na obiekcie.

Tego typu urządzenia laserowe można stosować do wskazywania celów innym operatorom. W przypadku większej ilości celów stosuje się modulację częstotliwościową wiązki laserowej. Wówczas do każdej z częstotliwości przydzielani są poszczególni operatorzy. W większości przypadków urządzenie może być dodatkowym wyposażeniem broni osobistej (urządzenie przedstawione na rysunku nr 3.5), jednakże w zależności od okoliczności, może być stosowane jako element zewnętrzny.

Ze względu na fakt, że elementem detekującym promieniowanie ze wskaźnika laserowego jest oko lub urządzenie noktowizyjne, wykorzystuje się promieniowanie koloru zielonego, czerwonego lub bliską podczerwień. Kąt rozbieżności wiązek laserowych mieści się w zakresach od 0,1 do 0,5 mrad. Jako źródła laserowe do tego typu urządzeń stosowane są emiterzy o mocach od 50 do 250 mW. Promieniowanie wyjściowe nadajnika wskaźnika może mieć charakter ciągły lub modulowany o częstotliwości od 1 do 10 Hz.



Rys. 3.5 Wskaźnik laserowy AN/PEQ-15 [18]

3.6 Olśniewacze laserowe

Olśniewacz laserowy (ang. *laser dazzler*) służy do nietrwałego porażania narządów wzroku siły żywej przeciwnika lub nasycania elementów detekcyjnych kamer i urządzeń obrazujących. W tego typu urządzeniach stosowane są lasery generujące promieniowanie o barwie zielonej lub czerwonej. Kąt rozbieżność wiązki takich układach wynosi od 0,5 mrad do 960 mrad. Olśniewacze laserowe mogą być stosowane jako elementy stacjonarne (rysunek 3.6) oraz jako elementy ruchome montowane na pojazdach (rysunek 3.7).



Rys. 3.6 Olśniewacz laserowy Sealase II [19]



Rys. 3.7 Zastosowanie olśniewacza zamontowanego na pojeździe [20]

3.7 Podsumowanie

Systemy występujące na polu walki i wykorzystujące promieniowanie laserowe mogą mieć różne przeznaczenie. Głównie są one zintegrowane z elementami systemów kierowania ogniem i naprowadzania środków bojowych na cel. Wykrycie promieniowania laserowego i jego określenie podstawowych parametrów pozwala przypisać źródło do danej klasy urządzeń. Znajomość możliwości wykorzystania danej klasy urządzeń w działaniach bojowych pozwala prognozować zagrożenia, i stwarza warunki do podjęcia skutecznego przeciwdziałania.

Na podstawie analizy dostępnych informacji na temat urządzeń laserowych można stwierdzić, że urządzenia stowarzyszone ze środkami rażącymi emitują promieniowanie impulsowe w zakresie bliskiej podczerwieni od 800 nm do 1550 nm. Wyjątkiem są wskaźniki laserowe (CW) pracujące w paśmie widzialnym lub bliskiej podczerwieni, które są zintegrowane najczęściej z bronią ręczną (pokładową).

Czasy trwania impulsów laserowych dla źródeł emitujących promieniowanie tego typu mieszczą się w zakresie od 1 ns do około 500 ns. Źródła o krótkich czasach trwania emitują promieniowanie o znacznym poziomie mocy i z repetycją od pojedynczych impulsów do kilkudziesięciu Hz.

Główne zakresy parametrów dla danych klas urządzeń, zostały zestawione w tabeli 3.1.

Tabela 3.1 Zestawienie parametrów systemów wykorzystujących promieniowanie laserowe w zastosowaniach militarnych

Klasa urządzenia	Zakres długości fal	Reżim pracy	Czas trwania impulsu	Repetycja impulsów	Zakres mocy	Kąt rozbieżności wiązki
Dalmierze	850 nm-1550 nm	impulsowy	1 ns-500 ns	Poj. Impuls – 30 kHz	0,5 W – 7×10^6 W	0,1 mrad – 3 mrad
Podświetlacze	1604nm,	impulsowy	1 ns-20 ns	1-10 Hz	Kilka 1×10^6 W	$\leq 0,5$ mrad
Układy naprowadzania w wiązce	905-1064 nm	impulsowy	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.

Szczegółowe dane dotyczące parametrów źródeł promieniowania laserowego zostały przedstawione w załączniku nr 1.

4 SYSTEMY OSTRZEGANIA O PROMIENIOWANIU LASEROWYM

Producenci Systemów Ostrzegania o Promieniowaniu Laserowym (SOPL), przedstawiają swoje produkty tak, aby były one atrakcyjne dla potencjalnych użytkowników, na tle innych systemów. Powoduje to różnorodność opisów i kart katalogowych prezentujących systemy oraz urządzenia służące do wykrywania i ostrzegania o promieniowaniu laserowym. W celu porównywania urządzeń produkcji różnych firm między sobą, konieczne jest standaryzacja poszczególnych parametrów i określenie ich jednostek. W przypadku cech budzących wątpliwości co do ich wartości, powinny być określone warunki, w jakich te parametry zostały zmierzone.

Podstawowym atrybutem określającym jakość systemu ostrzegania o promieniowaniu jest jego czułość. Parametr ten określa poziom natężenia napromienienia, powyżej którego zostanie wygenerowany alarm. Jednostką czułości jest W/m^2 lub też jednostki pochodne takie jak mW/cm^2 czy $\mu W/cm^2$.

W innych systemach, w celu podkreślenia oryginalności produktu, może być podawana czułość dla różnego typu źródeł promieniowania. Przedstawiane są zazwyczaj czułości dla wykrywania dalmierzy laserowych, podświetlaczy, czy układów naprowadzania w wiązce laserowej.

Czułość zależy także od funkcji realizowanej przez urządzenie. Jeżeli głowica systemu służy do wykrycia promieniowania i określenia jego kąta padania, podawane wówczas mogą być wartości natężenia napromienienia określające czułość dla wykrycia i czułość dla poprawnej detekcji kąta padania promieniowania. Jeśli natężenie napromienienia na urządzeniu detekcyjnym systemu ostrzegania o promieniowaniu laserowym przekracza poziom czułości określony dla pomiaru kąta, powinno oznaczać to, że kąt zostanie zmierzony z deklarowaną dokładnością.

Istotnymi parametrami służącymi do opisu głowic wykrywających promieniowanie laserowe są miary określające dokładność pomiaru kąta. Rozdzielczość i dokładność określania kierunku na źródło promieniowania często są podawane zamiennie. Nie znaczy to, że te parametry są tożsame. W większości przypadków jednak dokładność pomiaru jest ograniczona rozdzielczością i ten parametr uznawany jest za dominujący. W przypadku niektórych systemów, dokładność pomiaru kąta podawana jest z parametrem określającym dokładność pomiaru. Najczęściej podawane są dokładności na poziomie σ , 2σ lub 3σ .

Niektóre systemy ostrzegania o promieniowaniu laserowym oferują detekcję kąta padania tylko w jednej płaszczyźnie. Rozdzielczość wówczas podawana jest tylko dla płaszczyzny, w której dokonywany jest pomiar. Dla płaszczyzny ortogonalnej podawane jest pole widzenia.

Ważnym parametrem opisującym system ostrzegający o promieniu laserowym jest współczynnik fałszywych alarmów. Określa on ilość fałszywych zdarzeń informujących o wystąpieniu opromieniowania systemu na określony czas pracy. Współczynnik fałszywych alarmów ma szczególne znaczenie, jeśli SOPL ma pracować w automatycznym układzie wraz z aktywnymi systemami przeciwdziałania. Przypadkowe zadziałanie systemu, może spowodować reakcję innych autonomicznych systemów np. odpalenie grantów dymnych. W trakcie ćwiczeń stanowi to zagrożenie dla ćwiczących, natomiast w czasie działań militarnych zdecydowanie zmniejsza żywotność bojową sprzętu.

Producenci systemów SOPL nie podają warunków w jakich mierzony był współczynnik fałszywych alarmów. W niektórych notach katalogowych nie jest on podawany sposób jawny lub w ogóle jest pomijany.

Zakres spektralny pracy determinuje rodzaje źródeł, które można wykryć przy pomocy danego systemu. Najczęściej podawany jest przedział od 800 nm do 1600 nm. Głównym czynnikiem decydującym o tym parametrze jest materiał i technologia wykonania detektorów kształtująca charakterystyki czułości spektralnej. Należy zaznaczyć, że w tym przedziale znajdują się praktycznie wszystkie źródła promieniowania laserowego stosowane w urządzeniach militarnych.

Poprzez pole widzenia (pokrycie kątowe) rozumie się kąt w płaszczyźnie poziomej (azymutu) oraz pionowej (elewacji), z którego system może wykrywać promieniowanie laserowe. W przypadku platform lądowych, pokrycie kątowe w azymucie najczęściej wynosi 360°, natomiast w elewacji ma ono zakres od około -5° do 85°. Dla platform powietrznych pokrycie kątowe systemu powinno wynosić 360° zarówno w azymucie jak i elewacji.

Do parametrów systemów SOPL można zaliczyć podawane przez producentów pole widzenia pojedynczej głowicy. Wówczas to, użytkownik decyduje o sposobie rozmieszczenia głowic detekcyjnych i ich ilości tak, aby pokryć ochroną odpowiednie sektory nosiciela systemu. W wielu przypadkach to zamawiający system powinien dokonać analizy kątów krytycznych dla danej platformy bojowej i wybrać najbardziej

odpowiedni. W niektórych przypadkach zasadne jest wykonywanie SOPL dedykowanego dla danej platformy, jak to ma miejsce w przypadku platform latających.

W systemach ostrzegających o promieniowaniu laserowym podawany jest parametr określany jako czas reakcji. Oznacza on odcinek czasu jaki upłynął między wystąpieniem opromieniowania detektorów w systemie, a wygenerowaniem alarmu. W systemach o bardzo niskim współczynniku fałszywych alarmów istnieją zaawansowane metody oceny sygnału pod względem jego poprawności oraz po pomiarze podstawowych parametrów takich, jak czas trwania impulsów, częstotliwość, długość fali itd., może następować klasyfikacja źródła. Zabieg ten wydłuża czas reakcji systemu, jednak nigdy ten czas nie przekracza 500 ms.

Prawdopodobieństwo detekcji podawane jest w procentach. Określa ono procent sygnałów o poziomach porównywalnych z czułością urządzenia, które zostały poprawnie wykryte. Dla zaawansowanych systemów jest to liczba większa niż 95%.

Parametrami opisującymi SOPL są też parametry ilościowe, wynikające z wewnętrznej budowy głowic detekcyjnych, pola widzenia i konfiguracji. Głównie zalicza się do nich ilość potrzebnych głowic detekcyjnych do pokrycia wymaganego kąta bryłowego oraz masę i wymiary mechaniczne urządzenia.

Z kolei parametry systemowe określają warunki jakie muszą zostać spełnione, aby system był skonfigurowany poprawnie i komunikował się z otoczeniem. Należą do nich:

- pobór mocy i napięcie zasilania,
- kompatybilność z innymi systemami,
- interfejs komunikacyjny.

W broszurach reklamowych podawane są parametry, uznane przez producentów za szczególnie ważne. Często pojawiają się egzotyczne, nigdzie niezdefiniowane parametry, których głównym celem jest wyróżnienie produktu na tle innych.

4.1 Przegląd rozwiązań w zakresie systemów ostrzegania o promieniowaniu laserowym

Systemy Ostrzegania o Promieniowaniu Laserowym (SOPL) występują na wyposażeniu armii różnych państw od połowy lat 70 dwudziestego wieku. Służą one głównie do ochrony platform mobilnych, takich jak czołgi, wozy bojowe, śmigłowce i samoloty. Mogą występować w postaci pojedynczych dedykowanych systemów służących jedynie do informowania o promieniowaniu lub systemów bardziej złożonych.

Poniżej zostaną omówione przykładowe rozwiązania Systemów Ostrzegania o Promieniowaniu Laserowym.

Firma Elbit opracowała system ostrzegania o promieniowaniu laserowym, który został wdrożony w armii izraelskiej do ochrony czołgów MERKAVA (w wersji II i III) [21]. Składa się on z głowic detekcyjnych zawierających szereg detektorów umieszczonych w odpowiednich miejscach na platformie oraz centrali kontrolno-informacyjnej. Ze względu na dużą czułość oraz możliwość dokładnego określenia kąta padania promieniowania, system jest w stanie dokładnie określić kierunek na źródło promieniowania optycznego oraz przeprowadzić analizę parametrów sygnału. W efekcie można dokonać klasyfikacji źródła.

Według danych producenta system jest odporny na refleksy od obiektów w pobliżu, promieniowanie powstałe podczas wystrzałów, oświetlenie zastane (dienne), promieniowanie powstałe podczas spalania się różnych substancji.

System ostrzegania o promieniowaniu laserowym firmy ELBIT oferowany jest w dwóch wersjach:

- ELAWSII, system składający się z 4 głowic detekcyjnych montowanych niezależnie na platformie,
- MTDS, system składający się z jednej głowicy dookólnej.

Parametry systemu (z rozróżnieniem wersji) zostały przedstawione w tabeli 4.1 natomiast na rysunku 4.1 zostały przedstawione obie wersje systemu.

Tabela 4.1 Parametry systemu firmy ELBIT [21]

Cecha	ELAWSII	MTDS
Kątowy zakres pracy urządzenia w azymucie	Pokrycie pełnego kąta 360 ⁰ przy użyciu 4 sensorów	360 ⁰
Kątowy zakres pracy urządzenia w elewacji	-20 ⁰ ÷ 90 ⁰	-15 ⁰ ÷ 85 ⁰
Dokładność wyznaczania kąta padania promieniowania	±1 ⁰ w azymucie ±2.5 ⁰ w elewacji (na poziomie - 2σ)	±3 ⁰ w azymucie 3 sektory w elewacji; (na poziomie - 2σ)
Możliwości wykrywania źródeł promieniowania laserowego	Dalmierze laserowe Podświetlacze laserowe – od 2 do 50 Hz Układy naprowadzania w wiązce 2-70 kHz Oświetlacze pracujące w paśmie podczerwieni (Oświetlacze wykrywane są, jeśli poziom natężenia promieniowania przekroczy 1 mlux)	
Spektralny zakres pracy	Dalmierze i podświetlacze - 600 nm ÷ 1600 nm Układy naprowadzania w wiązce 900 nm ÷ 1100 nm oświetlacze IR – 950 nm ÷ 1100 nm	

Współczynnik fałszywych alarmów	Mniejszy niż 1 na 18 h
Czułość sensorów określona w poziomie natężenia napromienienia na czujniku	Dalmierze laserowe lub układy naprowadzania w wiązce o dużym poziomie mocy: Detekcja – 1 W/m ² Kąt padania promieniowania – 5 W/m ² Układy naprowadzania w wiązce o małym poziomie mocy: Detekcja – 0.003- 0.01 W/ m ² Kąt padania promieniowania – 0.05 W/ m ²
Prawdopodobieństwo detekcji	99.9%
Czas reakcji	Określenia kąta padania: 80 ms Wykrycie zagrożenia: 100 ms Klasyfikacja zagrożenia: 300 ms
Pomiar czasu trwania impulsu laserowego	Dalmierz i podświetlacz: - większy niż 5 ns Układy naprowadzania w wiązce: - większy niż 100 ns



ELAWS



TDS



mLWS



MTDS

Rys. 4.1 Systemy ostrzegania o promieniowaniu laserowym firmy Elbit [21]

Systemem ostrzegającym o promieniowaniu laserowym wprowadzonym na wyposażenie armii Stanów Zjednoczonych Ameryki Północnej jest produkt o oznaczeniu AN/AAR-47 [22]. W przeciwieństwie do systemu produkowanego przez firmę ELBIT służy on nie tylko do wykrywania promieniowania laserowego. Dodatkowo wykrywa pociski napędzane silnikiem odrzutowym i określa ich trajektorię. Głównym nosicielem tego systemu są samoloty np. C-130 [23].

W skład systemu wchodzi:

- cztery sensory usytuowane na nosicielu w taki sposób, aby możliwa była ochrona obiektu w 360° w azymucie,
- jednostki centralnej analizującej zagrożenie wykryte przez sensory,
- systemu alarmowego informującego o zagrożeniu i służącego także do sterowania urządzeniem z możliwością wyświetlenia informacji z RWR APR-39,
- systemu ostrzegania służącego do automatycznego przeciwdziałania (odpalenie flar). Elementy systemu AN/AAR-47 zostały przedstawione na rysunku 4.2.



Rys. 4.2 System realizujący funkcję ostrzegania o promieniowaniu laserowym AN/AAR-47 [23]

Oprócz systemów będących na wyposażeniu sił zbrojnych różnych armii, na rynku można dostrzec wiele firm oferujących SOPL spełniające normy wojskowe. Przykładem takiego systemu jest RALM-02 produkowany przez włoską firmę Leonardo Company [24] (system przedstawiony na rysunku nr 4.3). Przewidziany jest on do montażu na pojazdach opancerzonych. Według noty katalogowej może być instalowany na czołgach, opancerzonych wozach bojowych, środkach artylerii raketowej. Poszczególne komponenty łączone są ze sobą przy pomocy połączeń światłowodowych

[25]. Uodparnia to system na zakłócenia elektromagnetycznie, a tym samym może obniżać prawdopodobieństwo fałszywych alarmów.

Urządzenie może wykrywać impulsy laserowe i inne źródła światła. System buduje własną bazę danych zapisywaną w pamięci nieulotnej, kasowalnej i łatwo modyfikowalnej. Stwarza to warunki do wgrywania odpowiednich baz danych zależnych od scenariusza działań oraz umożliwia klasyfikację źródeł promieniowania.

Dla wyżej wymienionego systemu istnieje możliwość podłączenia go bezpośrednio do wyrzutni granatów dymnych lub innych urządzeń przeciwdziałania. Parametry techniczne systemu zostały przedstawione w tabeli 4.2.

Tabela 4.2 Wybrane parametry systemu RALM02 [25]

Pomiarowy zakres spektralny	500 nm-1.8 μ m
Pole widzenia	360 ⁰ x 40 ⁰ (AxE)
Dokładność kątowna	\pm 22,5 ⁰ (16 ⁰ RMS)
Współczynnik fałszywych alarmów	< 1 na 16 h
Czas reakcji	100 ms RMS

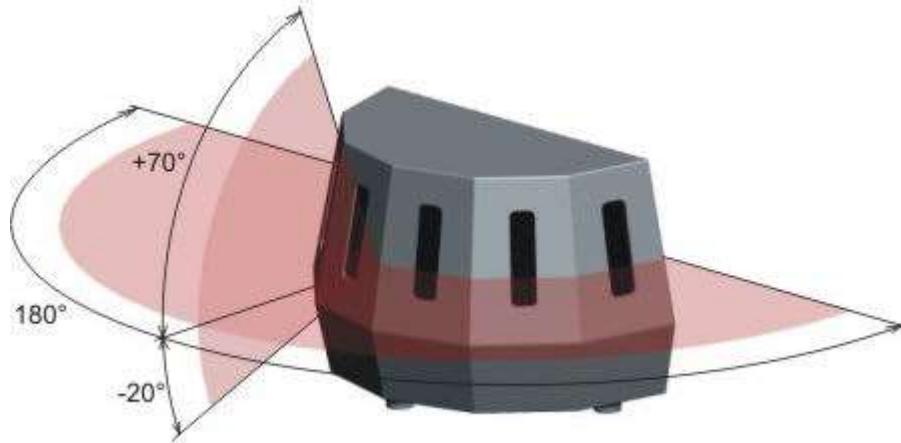


Rys. 4.3 System ostrzegania o promieniowaniu laserowym RALM 02 [25]

Przykładem systemu SOPL dla okrętów marynarki wojennej jest system LAWREC produkowany przez słowacką firmę METRODAT [26]. Jest to system pracujący w czasie rzeczywistym, składający się w zależności od wersji z pojedynczych detektorów (wersja Hexoculus) lub odpowiednio przygotowanych głowic detekcyjnych z linijkami detektorów (głowice typu Octoculus oraz Quadroculus) [27]. W zależności od zastosowanej wersji głowic, skonfigurowany system ma różne parametry operacyjne. Główne cechy systemu zostały przedstawione w tabeli 4.3. Przykładowy moduł detekcyjny tego systemu został przedstawiony na rysunku 4.4.

Tabela 4.3 Parametry systemów firmy LAWREC [27]

		Hexoculus	Octoculus	Quadroculus
Czułość		10 W/m ²	1 W/m ²	10 W/ m ²
Rozdzielczość kątowna	Azymut	15 ⁰	3 ⁰	1 ⁰
	Elewacja	90 ⁰	13 ⁰	1 ⁰
Pełny kąt widzenia	Azymut	180 ⁰ (±90 ⁰ od linii centralnej)	180 ⁰ (±90 ⁰ od linii centralnej)	180 ⁰ (±90 ⁰ od linii centralnej)
	Elewacja	90 ⁰ (-20 ⁰ ,+70 ⁰) od linii centralnej	80 ⁰ (-10 ⁰ ,+70 ⁰) od linii centralnej	90 ⁰ (-10 ⁰ ,+80 ⁰) od linii centralnej
Maksymalna częstotliwość impulsów laserowych		40 kHz	40 kHz	40 kHz
Czas trwania impulsów		5÷500 ns	5÷500 ns	5÷500 ns
Prawdopodobieństwo wykrycia		99% dla pojedynczego impulsu >99% dla wielu impulsów	99% dla pojedynczego impulsu >99% dla wielu impulsów	99% dla pojedynczego impulsu >99% dla wielu impulsów
Temperatura pracy		-30 ⁰ C÷+70 ⁰ C	-30 ⁰ C÷+70 ⁰ C	-30 ⁰ C÷+70 ⁰ C
Ilość detektorów		6	10 linii	4 linie kodowane
Zakres spektralny		700÷1700 nm (400 – 2200 nm opcja)	700÷1700 nm Podzielone na 3 zakresy	500 nm ÷1650 nm podzielone na 3 zakresy



Rys. 4.4 Głowica systemu HEXOCULUS firmy Metrodat [27]

Modernizacje istniejącego sprzętu wojskowego stwarzają możliwości rozszerzenia istniejących systemów o urządzenia typu SOPL. W wyniku decyzji rządu niemieckiego podjętej w 2016 r. armia niemiecka dokona modernizacji czołgów typu LEOPARD 2A4 do modelu 2A7 [28]. Rozpoczęcie prac nad udoskonalaniem wyżej wymienionych środków rażenia rozpoczęło się z początkiem 2017 roku. W trakcie modernizacji będą one sukcesywnie wyposażane w systemy elektroniczne, włącznie z systemami rozpoznania optoelektronicznego. Prawdopodobnie będzie to system, który jest już na wyposażeniu czołgów Leopard 2A5 oraz wozów PUMA i FENNEK. Jest to system o nazwie handlowej MUSS (*Multifunctional Self Protections System*) [29], a jego elementy zostały przedstawione na rysunku 4.5.

W skład systemu MUSS wchodzi [30]:

- czujnik ostrzegający o pociskach bazujący na detekcji ultrafioletu pokrywający pole widzenia $95^{\circ} \times 70^{\circ}$ z rozdzielczością $\pm 1,5^{\circ}$ (może on także wykrywać promieniowanie laserowe),
- jednostka centralna realizująca funkcje informacyjne i sterujące,
- system przeciwdziałania (np. flary, granaty dymne) realizujące zadania minimalizujące prawdopodobieństwo trafienia platformy przez pocisk.



Rys. 4.5 Elementy systemu MUSS [31]

Modernizacje marynarki wojennej Niemiec doprowadziły do zainstalowania na okrętach systemów wykrywających promieniowanie laserowe. Są to urządzenia produkcji szwedzkiej firmy SAAB, o oznaczeniu NLWS (*Navy Laser Warning System*) [32]. System ten realizuje detekcję promieniowania laserowego w paśmie $500\text{ nm} \div 1.7\text{ }\mu\text{m}$. Zastosowanie odpowiedniej ilości głowic pozwala na obserwację optoelektroniczną przestrzeni w kącie bryłowym 360° w azymucie oraz 70° w elewacji, z rozdzielczością $7,5^{\circ}$. System tego typu jest stosowany także w Marynarce Wojennej Zjednoczonych Emiratów Arabskich [33]. Przykładowa głowica detekcyjna systemu NLWS przedstawiona została na rysunku nr 4.6.



Rys. 4.6 Głowica detekcyjna systemu NLWS [34]

Systemy ostrzegania o promieniowaniu laserowym, są na wyposażeniu Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej (SZ RP). Głównie służą do ochrony platform mobilnych, w szczególności wozów bojowych (w tym KTO „ROSOMAK”), wozów dowodzenia, moździerzy samobieżnych „RAK”, czołgów T72 oraz kilku śmigłowców. W przypadku platform, takich jak C-130 oraz CASA, systemy ostrzegające o promieniowaniu laserowym są dostarczane w wersji zintegrowanej z nosicielem przez producenta.

Krajowymi producentami systemów SOPL są firmy krajowe takie, jak Przemysłowe Centrum Optoelektroniki (PCO), KENBIT oraz Wojskowe Zakłady Elektroniczne w Zielonce.

System SSP-1 „OBRA-3” produkowany przez PCO [35] jest systemem przeznaczonym do wykrywania opromieniowania pojazdów bądź obiektów wojskowych przez dalmierze impulsowe lub podświetlacze laserowe. Umożliwia on podjęcie działań mających na celu przeciwdziałanie możliwym skutkom użycia takich urządzeń, polegającym na postawieniu zasłon dymnych na kierunku, z którego wystąpiło promieniowanie. Producent deklaruje następujące funkcje systemu [36]:

- zdolność aktualizacji kierunku, z którego pada promieniowanie z uwzględnieniem ruchu pojazdu lub jego wieży,
- eliminacja promieniowania odbitego,
- komunikacja z systemem kierowania ogniem lub innymi elementami pojazdu,
- sygnalizacja optyczna i akustyczna oświetlenia platformy przez wiązkę laserową,
- rodzaj środka urządzenia generującego promieniowanie,

- czas od wykrycia promieniowania,
- możliwość odpalenia granatów dymnych (automatycznie jak i ręcznie),
- czułość systemu na poziomie 300 W/m^2 .

Podstawnymi parametrami techniczno-operacyjnymi są:

- przedział widmowy wykrywanego promieniowania 600 nm do $11 \mu\text{m}$,
- kąt obserwacji w elewacji (-6° do $+30^\circ$),
- kąt obserwacji w azymucie -360° ,
- liczba wykrywanych kierunków - 20 sektorów po 18 stopni.

Główce detekcyjne systemu SSP-1 „OBRA” są montowane na kadłubie pojazdu w miejscu wskazanym przez producenta platformy. Liczba montowanych głowic zależy od konstrukcji pojazdu. System OBRA został przedstawiony na rysunku 4.7.



Rys. 4.7 System SSP1- „OBRA-3” [36]

W odróżnieniu od pojazdów bojowych na pojazdach dowodzenia montowany jest system rozpoznania przez firmę KENBIT o oznaczeniu SOL-1 [37]. W skład tego systemu wchodzi:

- główce detekcyjne,

- blok monitora – wyświetlacza,
- bloku sterowania z interfejsem RS-232.

System SOL-1 umożliwia detekcję promieniowania laserowego przy pomocy głowic detekcyjnych umieszczonych na zewnętrznym pokryciu platformy. Informacja o detekcji promieniowania laserowego przekazywana jest do bloku monitora i tam zobrazowywana. Blok sterowania jest odpowiedzialny za kontrolę i prawidłową pracę systemów przeciwdziałania. Elementy systemu SOL zostały przedstawione na rysunku 4.8.

Dane techniczno-operacyjne przedstawiają się następująco [37]:

- zakres wykrywanych długości fal – 800 nm – 1700 nm,
- rozdzielczość kątowa w elewacji wynika z ilości zastosowanych głowic.

System SOL-1 jest częścią składową większego systemu ostrzegania o zagrożeniach, takich jak radiacyjne, chemiczne czy też radiolokacyjne opromieniowanie platformy.



Rys. 4.8 Elementy systemu SOL-1 [37]

System przewidziany dla środków latających (helikoptery) jest produkowany przez WZE w Zielonce i posiada oznaczenie handlowe LWR-H [38]. Przykładową prezentację systemu przedstawiono na rysunku 4.9.

Spektralny zakres pracy urządzenia pokrywa szerokie widmo, w którym mieszczą się praktycznie wszelkie dostępne źródła laserowe pracujące w podczerwieni i wykorzystywane na polu walki. Niestety czułość urządzenia jest stosunkowo mała i wynosi 1000 W/m^2 co uniemożliwia wykrycie źródeł pracujących z małymi poziomami

mocy, takich jak dalmierze „podszumowe” czy układy naprowadzania w wiązce. Parametry operacyjne systemu zostały przedstawione w tabeli 4.4.

Tabela 4.4 Parametry systemu LWR-H

Nazwa	Producent	Pokrycie		Zakres spektralny	Dokładność		Czułość
		Azymut	Elewacja		Azymut	Elewacja	
LWR-H	WZE	360 ⁰	±45 ⁰	0,8-11 μm	15 ⁰	30 ⁰	1000 W/m ²



Rys. 4.9 System LWR-H [38]

4.2 Podsumowanie

Algorytm i metoda jaka została zastosowana do wykrywania kierunku padania światła jest tajemnicą handlową producentów i nie jest podawana w sposób jawny. Analizując możliwości systemu, jego parametry można wnioskować o przyjętych rozwiązaniach konstrukcyjnych. Szczegółowe zestawienie parametrów systemów SOPL zostało przedstawione w załączniku nr 2.

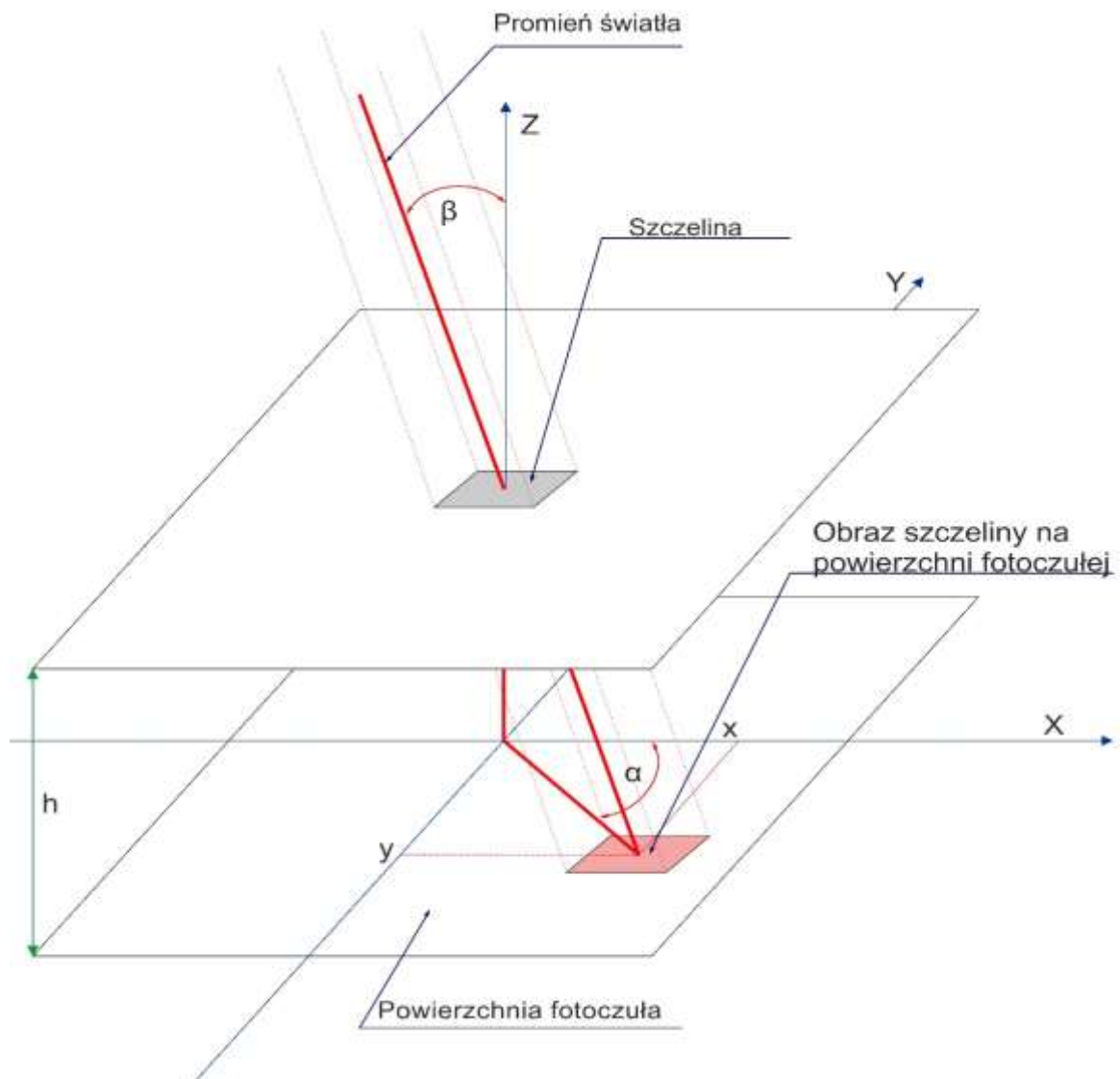
Należy zaznaczyć, że nie istnieje żaden uniwersalny system ostrzegania o promieniowaniu laserowym. Każdorazowo przyjmowane są pewne założenia do konstrukcji urządzeń tego typu, a wykonawca dysponując odpowiednimi możliwościami technologicznymi stara się je spełnić. Założenia do projektowania generowane są przez zamawiających, którzy znając możliwości i potrzeby ochranianej platformy, przedstawiają wymagania dla danego systemu.

Analizując czułość urządzeń i systemów ostrzegania o promieniowaniu, można stwierdzić, że obecnym trendem są prace mające na celu „zwiększanie” tego parametru. Powodem takich działań jest duża dostępność półprzewodnikowych źródeł laserowych (generujących małe moce promieniowania) używanych w dalmierzach z odbiorem „podszumowym”. Należy zaznaczyć, aby system był konkurencyjny na tle innych, powinien odbierać promieniowanie o natężeniu napromienienia rzędu kilku W/m^2 z czasami trwania od pojedynczych nanosekund od kilkuset nanosekund, oraz repetycjami rzędu kilkudziesięciu kHz.

5 METODY POMIARU KĄTA PADANIA PROMIENIOWANIA OPTYCZNEGO

5.1 Przegląd metod określania kąta padania światła

Metody określania kąta padania światła głównie bazują na właściwościach prostoliniowego rozchodzenia się fal optycznych. Zakłada się w tej metodzie, iż pęk promieni optycznych jest równoległy i pada na szczelinę (układ szczelin). Promieniowanie po przejściu przez szczelinę, pada na powierzchnię z elementami fotoczułymi. Znając przesunięcie obrazu szczeliny względem rzutu normalnego oraz znajomość zależności geometrycznych szczeliny względem powierzchni detekcyjnej, możliwe jest określenie kąta, z którego zostało wyemitowane promieniowanie. Sposób wyznaczania kąta padania promieniowania został przedstawiony na rysunku nr 5.1



Rys. 5.1 Idea określania kąta padania promieniowania

Kąty azymutu (α) i elewacji (β) są wyznaczone na podstawie pomiaru parametrów przesunięcia rzutu szczeliny na płaszczyznę XY będącą jednocześnie płaszczyzną światłoczułą. Z zależności trygonometrycznych można zapisać, że:

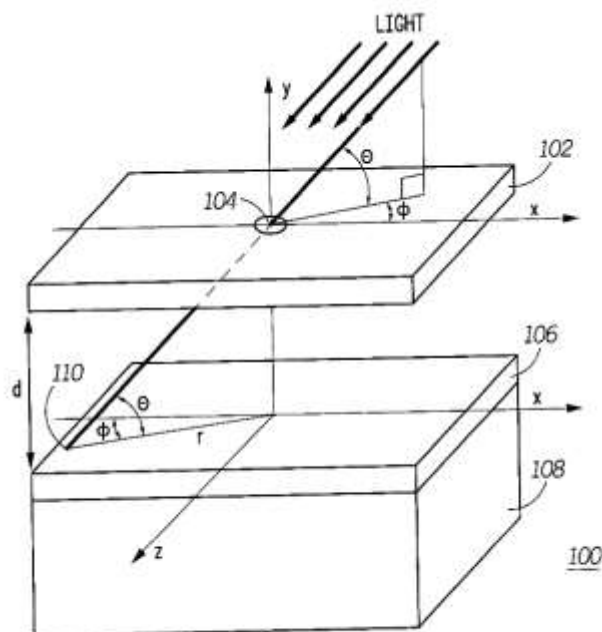
$$\frac{y}{x} = \tan(\alpha) \quad (5.1)$$

oraz:

$$\frac{\sqrt{y^2 + x^2}}{h} = \tan(\beta) \quad (5.2)$$

Powyzsza zasada działania czujnika została zastrzeżona w zgłoszeniu patentowym nr US20030128355A1 [39] z 2002 roku.

W cytowanym przypadku do określania kierunku padania promieniowania stosuje się metodę wyznaczania położenia oświetlonej części matrycy fotoczułej. Promieniowanie optyczne uprzednio przechodzi przez szczelinę o kształcie koła, która jest umieszczona w znanej odległości (d) od powierzchni elementu detekcyjnego. Analizując wzajemne położenie szczeliny i oświetlonego miejsca na matrycy możliwe jest wyznaczenie kierunku padającego promieniowania, zgodnie z wyżej wymienionymi zależnościami. Zastrzeżoną w przytoczonym dokumencie ideę przedstawiono na rysunku 5.2.

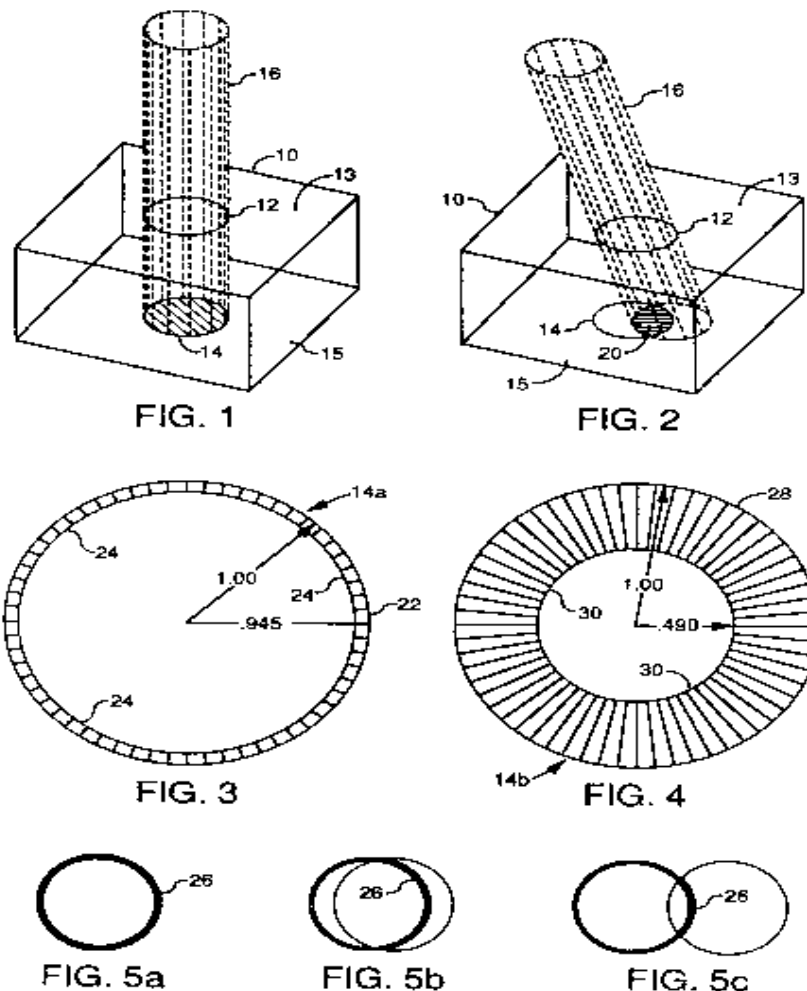


Rys. 5.2 Idea określenia kierunku padania światła według patentu

US20030128355A1 [39]

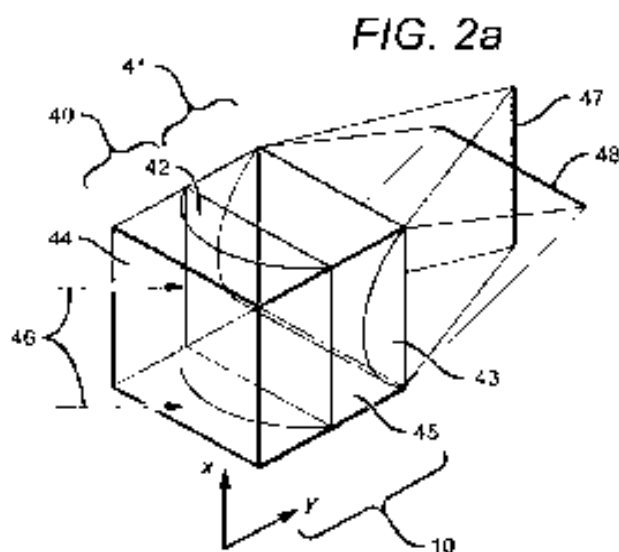
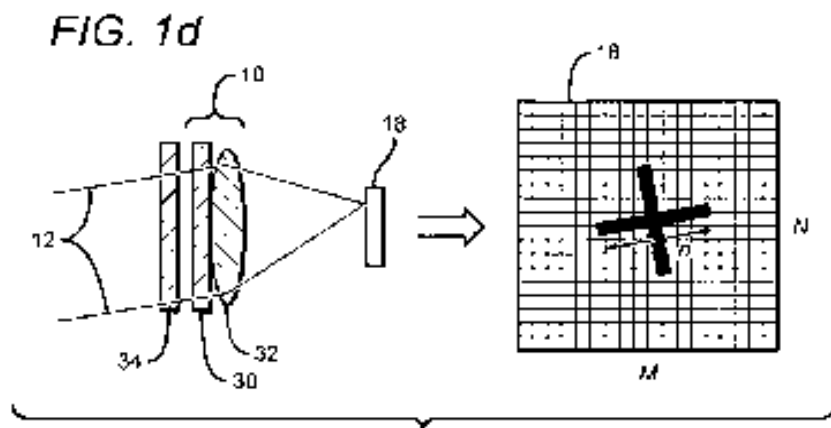
Podobną zasadę zastrzeżono w zgłoszeniu patentowym US5319188A [40]. Do określenia kierunku padania promieniowania służy układ z przesłoną w postaci systemu szczelin ułożonych pierścieniowo w nieprzezroczystym materiale. W określonej odległości od systemu szczelin (diafragm) znajdują się detektory ułożone na okręgu o promieniu równym promieniowi układu szczelin. Wiązka promieniowania optycznego po przejściu przez układ szczelin oświetla detektory ułożone w pierścieniu. Liczba i położenie opromieniowanych detektorów zależy od kąta padania światła. Idea ta została przedstawiona na rysunku 5.3. Patent ten został opublikowany w 1993 r.

U.S. Patent June 7, 1994 Sheet 1 of 3 5,319,188



Rys. 5.3 Idea określania kierunku padania światła według patentu US5319188A [40]

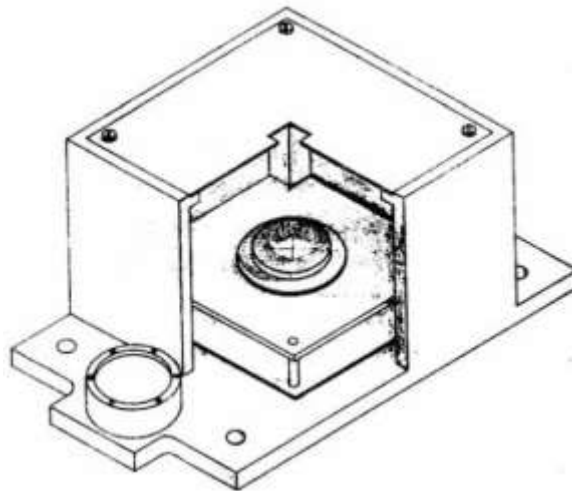
W patencie o numerze US8334499B2 [41] idea także bazuje na określeniu położenia obrazu na matrycy fotoczułej. Do wytworzenia obrazu stosuje się układ optyczny, którego głównymi elementami są dwie soczewki cylindryczne (wykonane z materiału dwójłomnego), których osie ustawione są prostopadle w stosunku do siebie. Promieniowanie po przejściu przez taki układ optyczny zostaje uformowane w dwa prostopadłe do siebie prostokąty o wspólnym środku geometrycznym. Z analizy położenia uformowanej w ten sposób wiązki optycznej na matrycy, można wyznaczyć kąt padania promieniowania optycznego. Koncepcja przedstawiona w patencie nr US8334499B2 została przedstawiona na rysunku 5.4.



Rys. 5.4 Idea określenia kierunku padania światła według patentu US8334499B2 [41]

Układy określania kierunku padania światła są jednymi z czujników sztucznych satelitów wysyłanych w kosmos. Służą one jako element informujący o położeniu nosiciela względem słońca lub innego ciała niebieskiego.

Prace nad takimi czujnikami trwały od samego początku lotów kosmicznych. Przykładem może być publikacja dotycząca czujnika położenia słońca względem satelity [42], której wynikiem jest układ przedstawiony na rysunku 5.5. Jako detektor został zastosowany detektor kwadrantowy. Możliwości wykorzystania tego typu detektorów do detekcji kąta padania światła zostały przedstawione w pracy opublikowanej w *Optics* 2013 r. [43].



Rys. 5.5 Czujniki położenia słońca względem satelity [42]

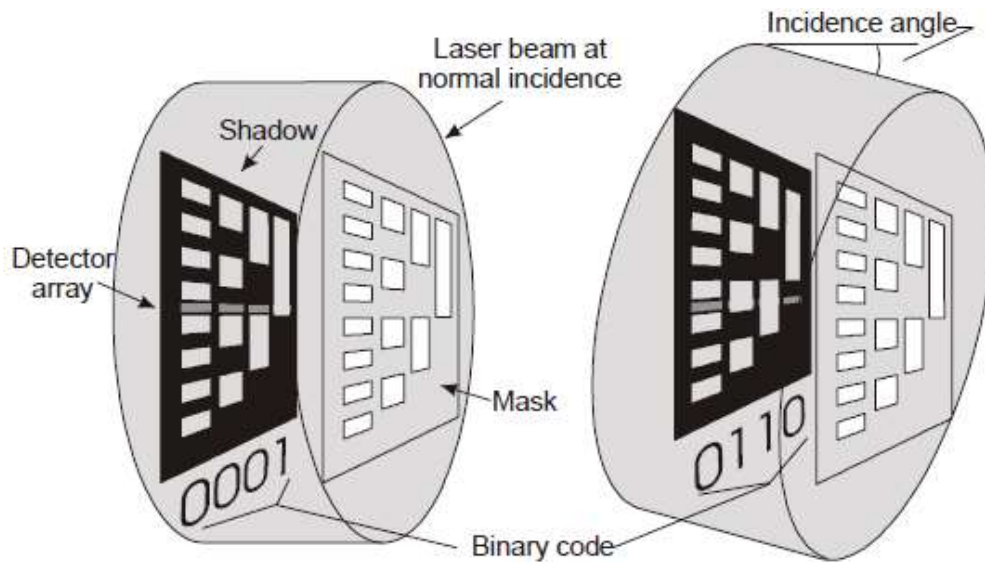
Inne podejście do omawianego zagadnienia zostało zaprezentowane podczas 18 Sympozjum Techniki Laserowej w Jastarni [44]. Przedstawiona metoda zakłada, że promieniowanie pada na detektory ułożone względem siebie według określonych reguł. Analizując poziom padającego promieniowania na poszczególnych detektorach i znając ustawienie detektorów względem siebie, istnieje możliwość określenia kąta padania promieniowania. Opracowany sensor przedstawiono na rysunku 5.6.



Rys. 5.6 Sensor kąta padania promieniowania (skala w cm)

Przykładem systemu określającego kąt padania promieniowania optycznego przy pomocy układu szczelin i linijki światłoczułej jest system HARLID (ang. *High-Angular-Resolution Laser Irradiation Detectors*) [45, 46]. Publikacje dotyczące tego systemu ukazały się w 1997 r. [46]. Jest to system detekcji promieniowania optycznego z jednoczesnym (hardwareowym) określaniem kierunku padania światła. Rozwiązanie tego typu zostało przedstawione na rysunku 5.7.

Zasada działania opiera się o detekcję obrazu oświetlonego układu szczelin na linijce detektorów. Poprzez odpowiednie ułożenie szczelin, możliwe jest uzyskanie informacji o kącie padania światła, bez konieczności dokonywania obliczeń zmiennoprzecinkowych [47]. Wadą takiego rozwiązania jest konieczność stosowania dwóch takich układów, aby w pełni określać kierunek w przestrzeni oraz to, że jego czułość będzie zależała od kąta padania promieniowania.



Rys. 5.7 Zasada działania systemu HARLID [48]

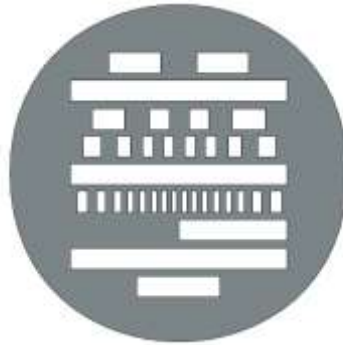
Czujniki tego typu oferowane są w obudowach zbliżonych rozmiarami do TO-8. Zasada działania sensora HARLID została użyta przez firmę Exelitas Technologies [49] do produkcji czujnika kąta o oznaczeniu EXACTD-362 (Angle-of-Arrival Photodiode Module) [50].

Sensor w tego typu obudowie przedstawiony na rysunku 5.8.



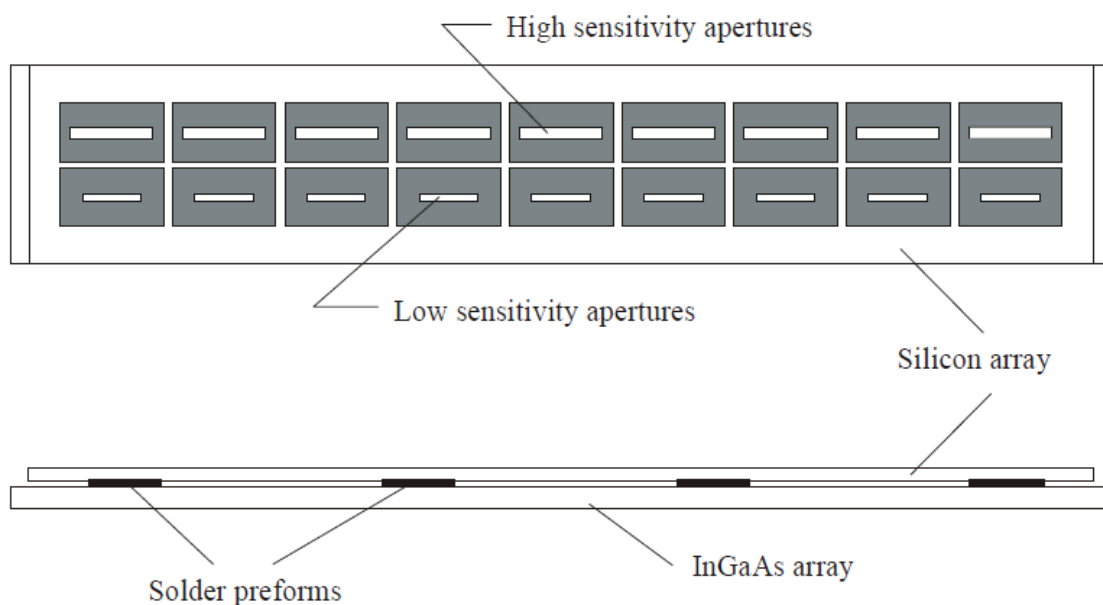
Rys. 5.8 Sensor EXACTD-362 [50]

W celu poprawy rozdzielczości, może być stosowana diafragma z większą ilością specjalnie przygotowanych otworów, jak zostało to przedstawione na rysunku 5.8. Pozwala to w sposób bezpośredni uzyskać informację o kącie padania promieniowania z odpowiednią rozdzielczością.



Rys. 5.9 Układ diafragm w systemie HARLID [50]

Wartość natężenia napromienienia padającego promieniowania może zmieniać się od kilku $\mu\text{W}/\text{m}^2$ do wartości kW/m^2 . W przedstawionym rozwiązaniu jako element detekcyjny zostały zastosowane linijki detektorów zarówno krzemowych jak i wykonanych z InGaAs o różnej czułości. Tego typu zabieg, oprócz zwiększenia zakresu dynamicznego urządzenia, rozszerza zakres odbieranych długości fal optycznych. Budowę detektora systemu *Harlid* przedstawiono na rysunku 5.10



Rys. 5.10 Budowa linijek detektorów systemu HARLID [50]

Inne podejście do detekcji kąta padającego promieniowania zostało zaprezentowane w pracy [51] wygłoszonej podczas VII Międzynarodowej Konferencji poświęconej sygnałom, mowie i przetwarzaniu obrazów w Pekinie 2007 r. W tej metodzie wykorzystuje się zdolność fal elektromagnetycznych do dyfrakcji. W tym celu układ optyczny musi być wyposażony w element dyfrakcyjny. Proponowany przez autorów układ przedstawiony został na rysunku 5.11.

Układ przedstawiony na rysunku 5.11 składa się z sinusoidalnej siatki dyfrakcyjnej, z której obraz podawany jest na matrycę CCD. Sygnał elektryczny pobrany z matrycy detekcyjnej jest przetwarzany przez procesor DSP, celem określenia kąta padania oraz długości padającej fali [52]. Kąty pod jakimi uginają się prążki rzędu pierwszego można określić jako [53, 54]:

$$\sin(\beta_+) = \sin(\alpha) + \frac{\lambda}{d} \quad (5.3)$$

$$\sin(\beta_-) = \sin(\alpha) - \frac{\lambda}{d} \quad (5.4)$$

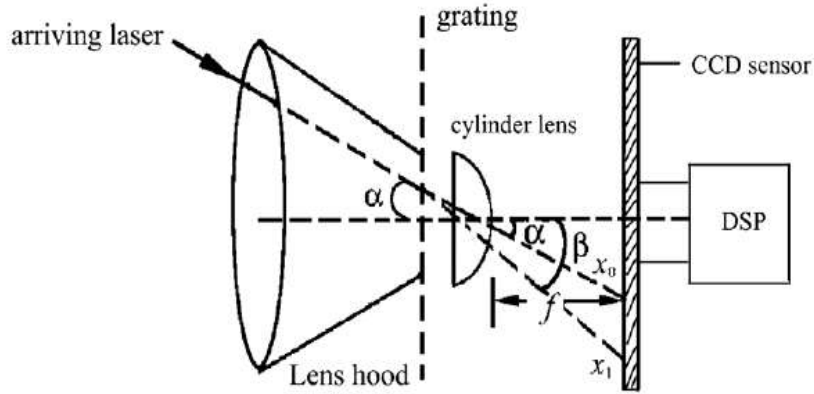
Przesunięcie względem prostej normalnej do CCD poszczególnych produktów dyfrakcyjnych można opisać zależnościami:

$$\begin{cases} x_0 = f \tan(\alpha) \\ x_+ = f \tan(\beta_+) \\ x_- = f \tan(\beta_-) \end{cases} \quad (5.5)$$

Z zależności 5.5 wynika wzór służący do wyliczania długości fali.

$$\lambda = d \left[\sin \left(\arctan \left(\frac{x_0}{f} \right) \right) + \sin \left(\arctan \left(\frac{x_1}{f} \right) \right) \right] \quad (5.6)$$

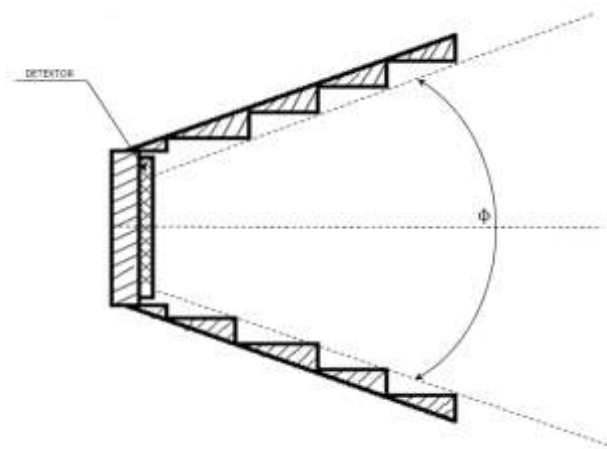
Kąt padania promieni laserowych, określany jest na podstawie przesunięcia prążka rzędu zerowego względem prostej normalnej do liniiki detektorów. Długość fali, określa się, badając przesunięcie pomiędzy prążkiem rzędu zerowego a prążkiem rzędu pierwszego. W celu poprawy dokładności obliczeń długości fali, można wynik uśrednić poprzez pomiary odległości między prążkami zerowym a pierwszym i minus pierwszym.



Rys. 5.11 Układ do automatycznego określania kąta padania z użyciem metody dyfrakcyjnej

W układach, gdzie nie jest konieczna duża dokładność kąta padania promieniowania, mogą być stosowane metody polegające na mechanicznych modyfikacjach przestrzennej charakterystyki czułości detektora. Stosuje się wówczas elementy ograniczające przestrzenny zakres roboczy pojedynczego detektora w postaci odpowiednio wykonanych przesłon i specjalnych pałapek blokujących promieniowanie rozproszone. Idea takiego układu została przedstawiona na rysunku 5.12.

W celu zwiększenia pola roboczego głowicy (zwiększenia pola widzenia), w której użyto detektorów o modyfikowanym polu widzenia, stosuje się kilka detektorów ułożonych w taki sposób, aby sumaryczny kąt obserwacji był możliwie jak najszerszy i pozbawiony stref martwych.



Rys. 5.12 Układ mechanicznych modyfikacji przestrzennej charakterystyki kątowej czułości detektora

Metody detekcji kąta padania promieniowania polegające na określeniu przesunięcia obrazu względem szczeliny wymagają stosowania powierzchni fotoczułych. Jako takie elementy detekcyjne mogą zostać zastosowane matryce CCD, matryce powstałe z dyskretnych elementów detekcyjnych (fotodiod, fotorezystorów) lub elementy PSD.

Użycie powierzchni detekcyjnej danego typu wiąże się zarówno z korzyściami jak i z ograniczeniami wynikającymi z właściwości tego elementu. Matryce CCD, mimo że oferują bardzo gęsto ułożone pixele o sprawności przetwarzania fotonów na światło rzędu nawet do 70%, to konieczne jest sekwencyjne odczytywanie informacji o poziomie z określoną częstotliwością [55]. Ze względu na małe powierzchnie elementów detekcyjnych, konieczne jest stosowanie odpowiednio długich czasów ekspozycji, tak aby uzyskać mierzalne poziomy sygnału w przypadku wymuszeń o małych energiach.

Elementy detekcyjne, z których w sposób sekwencyjny jest pozyskiwana informacja o promieniowaniu, są nieskuteczne w przypadku gdy padające promieniowanie ma charakter impulsowy. W skrajnych przypadkach, gdy natężenie napromienienia na detektorze ma niski poziom, a promieniowanie generowane jest w postaci pojedynczych impulsów o czasach trwania rzędu kilku nanosekund, prawdopodobieństwo wykrycia takiego impulsu jest bardzo małe.

Matryce złożone z dyskretnych elementów detekcyjnych, posiadają pola martwe. Wynika to z faktu, iż powierzchnia fotoczuła detektora nie zajmuje całej powierzchni przeznaczonej do ekspozycji. Konieczne jest także zapewnienie przerw technologicznych między detektorami. Z tego powodu, określanie kąta padania promieniowania z zastosowaniem dedykowanej matrycy obarczone jest błędem wynikającym z dyskretności elementów detekcyjnych.

Należy zaznaczyć, iż dyskretny elementy detekcyjne wymagają dodatkowych torów elektronicznych konwertujących światło na sygnały elektroniczne. Im więcej elementów detekcyjnych, tym większa liczba elementów elektronicznych i większa liczba sygnałów do cyfrowego przetworzenia.

Matryce PSD mogą odczytywać informację o położeniu oświetlonego miejsca na powierzchni fotoczułej z bardzo dużą rozdzielczością. Związane jest to z analogową zasadą działania [56]. Niestety duże powierzchnie elementów detekcyjnych tego typu, związane są z dużymi pojemnościami pasożytniczymi, a zatem zastosowanie tego typu

elementów ogranicza się do pomiaru kąta padania promieniowania o CW lub modulowanego sygnałami o niewielkim paśmie.

5.2 Podsumowanie

Metody wykrywania kierunku padania promieniowania mogą być różne. Bazują one na właściwościach promieniowania optycznego takich jak prostoliniowa propagacja czy też zdolność do dyfrakcji. W większości przypadków podstawą detekcji kąta padania promieniowania jest określenie obrazu szczeliny na powierzchni fotoczułej i pomiarze przesunięcia tego obrazu względem rzutu normalnego. Metody bazujące na dyfrakcji promieniowania optycznego są trudne do zastosowania w warunkach rzeczywistych.

Dokładność określania kąta padania promieniowania zależy przede wszystkim od dokładności określania położenia obrazu na powierzchni detekującej promieniowanie. Parametr ten zaś wynika z rodzaju zastosowanej powierzchni, stopnia jej dyskretności oraz przyjętych algorytmów służących do określenia przesunięcia obrazu od rzutu normalnego.

Rodzaj powierzchni detekcyjnej determinuje nie tylko dokładność określania kąta padania, ale także pasmo odbieranego sygnału. Powierzchnie o gęstym ułożeniu elementów detekcyjnych ze względu na swoją budowę wewnętrzną lub zasadę działania nie są w stanie odebrać pojedynczych impulsów.

Istotna także jest budowa czujnika kąta. Ze względu na dużą dynamikę sygnału wejściowego istnieje ryzyko odbić (lub rozproszenia) promieni wewnątrz, fałszujących informację o faktycznym kącie padania światła. Konieczne jest wówczas stosowanie specjalnych materiałów i konstrukcji mechanicznych służących tłumieniu promieniowania odbitego wewnątrz komory pomiarowej.

Systemy ostrzegania o promieniowaniu laserowym muszą mieć zdolności określania kierunku padania promieniowania impulsowego w szerokim zakresie spektralnym o małych poziomach natężenia napromienienia. Zasadnym wydaje się wykonanie dedykowanego układu szczelin i odpowiednio ukształtowanej powierzchni detekcyjnej, aby uzyskać wymaganą rozdzielczość pomiaru oraz czułość detekcji. Poprzez odpowiednie zaprojektowanie komory pomiarowej możliwe jest wykorzystanie metody bazującej na prostoliniowej propagacji światła do urządzeń typu SOPL.

6 KONCEPCJA MODUŁU OPTOELEKTRONICZNEGO O WYSOKIEJ ROZDZIELCZOŚCI KĄTOWEJ I CZUŁOŚCI WIDMOWEJ

Urządzenia systemu ostrzegania o promieniowaniu laserowym najczęściej mają budowę modułową. Podstawowym elementem takiego systemu jest moduł optoelektroniczny realizujący funkcję detekcji oraz określania kąta padania promieniowania laserowego w założonym kącie pola widzenia, często nazywany głowicą detekcyjną. Moduł optoelektroniczny, w zależności od potrzeb, zawiera jeden lub więcej sensorów realizujących detekcję i określanie kąta przychodzącego promieniowania.

6.1 Oszacowanie poziomu natężenia napromienienia od reprezentatywnych źródeł promieniowania laserowego

Wskazane w poprzednich rozdziałach źródła promieniowania laserowego występujące na polu walki emitują promieniowanie CW lub impulsowe. Urządzenia wyposażone w źródła CW najczęściej emitują promieniowanie z zakresu widzialnego i z tego względu nie ma konieczności ich wykrywania przez system ostrzegania o promieniowaniu.

Lasery używane w sprzęcie wojskowym, emitują promieniowanie impulsowe o parametrach przytoczonych w podsumowaniu rozdziału 1. Natężenie napromienienia na obiekcie można obliczyć z następującej zależności:

$$G_S(\gamma, R) = \frac{P_0 \cdot e^{-\gamma R}}{\pi \cdot R^2 \cdot \left(\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2} \left[\frac{W}{m^2}\right] \quad (6.1)$$

gdzie:

P_0 – moc na wyjściu nadajnika [W],

R – odległość od nadajnika [m],

γ – współczynnik ekstynkcji atmosferycznej [1/m],

θ – kąt rozbieżności wiązki [rad].

Powyższa zależność zakłada, że przekrój poprzeczny wiązki laserowej ma kształt koła. W wielu przypadkach, przekrój poprzeczny wiązki promieniowania laserowego można przybliżyć prostokątem (np. lasery półprzewodnikowe), w tym przypadku natężenie napromienienia można obliczyć przy pomocy zależności:

$$G_S(\gamma, R) = \frac{P_0 \cdot e^{-\gamma R}}{4R^2 \cdot \tan\left(\frac{\theta_X}{2}\right) \cdot \tan\left(\frac{\theta_Y}{2}\right)} \left[\frac{W}{m^2}\right] \quad (6.2)$$

gdzie:

θ_X – rozbieżność wiązki w osi X [rad],

θ_Y – rozbieżność wiązki w osi Y [rad].

Zależności 6.1 oraz 6.2 zależą od współczynnika ekstynkcji będącej miarą rozpraszania i absorpcji promieniowania na drodze jego propagacji przez składniki atmosfery. Wartość tego parametru silnie zależy od przejrzystości aerozolu, jego składu, ciśnienia i wysokości nad poziomem morza [57]. W celu oszacowania poziomu natężenia napromienienia od źródeł laserowych przyjęto założenie, że widzialność jest duża (23 km). Stosując oprogramowanie HITRAN [58], wyznaczono współczynniki ekstynkcji atmosferycznej dla wybranych długości fal, a wyniki zostały przedstawione w tabeli 6.1.

Tabela 6.1 Wartości współczynnika ekstynkcji atmosferycznej dla wybranych długości fal

Lp.	Długość fali [nm]	Współczynnik ekstynkcji atmosferycznej $\left[\frac{1}{km}\right]$
1	905	0,295
2	1064	0,003
3	1540	0,043
4	1550	0,015

Stosując zależność (6.1) istnieje możliwość wyznaczania natężenia napromienienia pochodzącego od reprezentatywnych źródeł dla zadanej odległości. Współczynnik ekstynkcji atmosferycznej dla danej długości fali przyjęto zgodnie z tabelą 6.1. Wyniki takiego oszacowania zostały przedstawione w tabeli 6.2. Wyróżniona czcionka w tabeli oznacza średni zasięg pomiarowy urządzenia tej klasy.

Przedstawione wartości natężenia napromienienia są wartościami obliczonymi, przy wymienionych powyżej warunkach propagacji promieniowania oraz założeniu, że rozkład mocy w wiązce jest jednorodny w całym przekroju poprzecznym.

Tabela 6.2 Wartości natężenia napromienienia pochodzące od reprezentatywnych źródeł

Urządzenie	Moc nadajnika [W]	Kąt rozbieżności wiązki [rad]	Natężenie napromienienia $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ w określonej odległości [km]						
			0,5	1	2	3	5	10	20
Dalmierz	15	$3 \cdot 10^{-3}$	7,3	1,5	0,3	0,1	10^{-2}	10^{-3}	$1,5 \cdot 10^{-5}$
905									
Dalmierz	5	$1 \cdot 10^{-3}$	25,3	6,2	1,5	0,7	0,2	510^{-2}	$1 \cdot 10^{-2}$
1550									
Dalmierz, podświetlacz	5×10^6	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^9$	$6,3 \cdot 10^8$	$1,6 \cdot 10^8$	$7 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^7$	$6,1 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^6$
1064									
Dalmierz	7×10^6	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^9$	$8,5 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^8$	$8 \cdot 10^7$	$2,9 \cdot 10^7$	$5,7 \cdot 10^6$	$9,4 \cdot 10^5$
1540									

W rzeczywistości, wiązki promieniowania nie są jednorodne. Wynika to zarówno z budowy lasera, który generuje wiązki laserowe o różnych rozkładach często zmiennych w czasie [59] oraz z turbulencji atmosfery zmieniających rozkład mocy w przekroju w funkcji odległości [60, 61]. W efekcie prowadzi to do powstania lokalnych maksimów i minimów natężenia napromienienia, które mogą w pewnych warunkach zwiększać prawdopodobieństwo detekcji promieniowania od źródeł, pomimo że wartość ta, wynikająca z parametrów takich jak moc źródła, jego kąt rozbieżności, odległość od źródła, wydaje się być poniżej progu detekcji.

6.2 Wymagania dotyczące modułu detekcyjnego

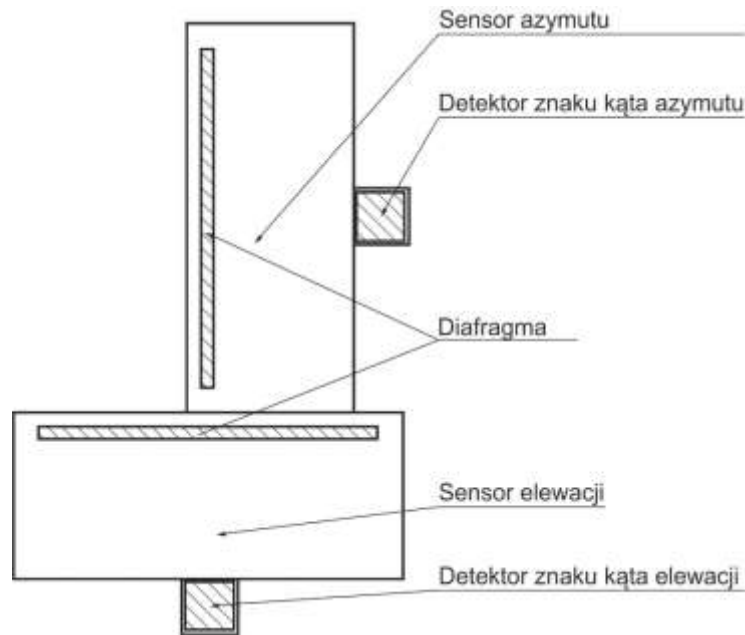
Z analiz przeprowadzonych powyżej wynikają następujące wymagania dotyczące modułu detekcyjnego. Powinien on:

- a) wykrywać promieniowanie optyczne w zakresie 850 nm – 1600 nm,
- b) wykrywać promieniowanie impulsowe o czasach trwania impulsu od 5 ns do 500 ns,
- c) wykrywać impulsy pojedyncze i generowane z częstotliwością sięgającą do kilkuset kHz,
- d) wykrywać sygnały o natężeniu napromienienia ok. 1 W/m²,
- e) pole widzenia modułu detekcyjnego powinno mieć wartość co najmniej 90⁰ w azymucie i elewacji,
- f) pracować poprawnie w obecności naturalnego lub sztucznego promieniowania tła,
- g) poprawnie określać kąta padania promieniowania z rozdzielczością ok. 1⁰,
- h) powinien mieć możliwie małe wymiary mechaniczne, tak aby była możliwość jego implementacji na różnych platformach mobilnych,
- i) koszty wytworzenia układów powinny być możliwie niskie.

Powyższe wymagania są zbieżne z założeniami projektowymi postawionymi w ramach projektu „*Laserowe Systemy Broni Skierowanej Energii, Laserowe Systemy Broni nieśmiercionośnej – PSOB/16-064/WAT*” finansowanego przez NCBiR. Przedstawione w pracy rozwiązania zostały zastosowane podczas realizacji projektu.

6.3 Koncepcja modułu detekcyjnego

Moduł detekcyjny służący do określenia kąta padania promieniowania w określonym kącie pola widzenia, składa się z dwóch wzajemnie prostopadłych sensorów kierunku, z których jeden określa azymut a drugi elewację. Koncepcja budowy modułu detekcyjnego została przedstawiona na rysunku 6.1.

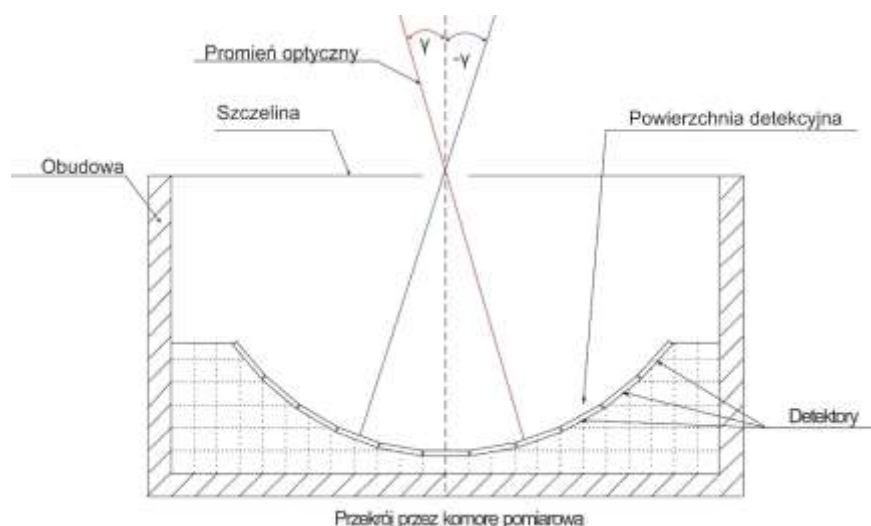


Rys. 6.1 Koncepcja modułu detekcyjnego składającego się z dwóch sensorów

Zastosowane sensory mają identyczne wymiary mechaniczne i tożsame charakterystyki, a zasada działania pojedynczego sensora została przedstawiona poniżej.

6.3.1 Idea działania pojedynczego sensora

Zasada działania sensora bazuje na detekcji promieniowania przechodzącego przez diafragmę (szczelinę) i padającego do wnętrza komory pomiarowej. Detektory promieniowania optycznego są ułożone wewnątrz komory na powierzchni o kształcie walca w taki sposób, aby środek każdego z nich był w takiej samej odległości względem punktu określającego środek szczeliny. Każdy z detektorów posiada własny tor elektroniczny binarnie określający czy poziom padającego na niego promieniowania przekracza założony próg. Analizując zależności geometryczne oraz numer oświetlonego detektora, istnieje możliwość wyznaczenia kąta pod jakim pada promieniowanie. Ogólna idea została przedstawiona na rysunku 6.2.



Rys. 6.2 Idea działania sensora określającego kąt padania promieniowania

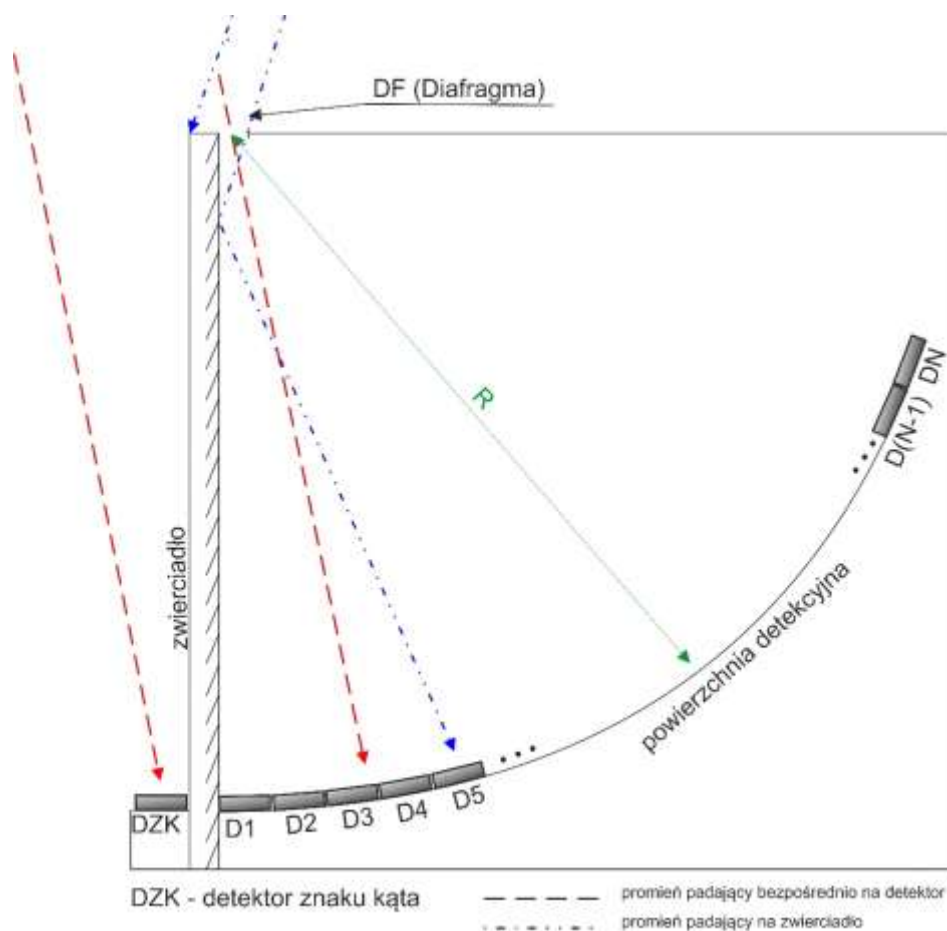
W przedstawionej na rysunku 6.2 koncepcji przyjęto założenie, że liczba detektorów jest odpowiednio duża, tak aby możliwa była detekcja promieniowania padającego z dodatnich jak i ujemnych zakresów kątów. Oznacza to, że w zależności od przyjętej rozdzielczości występuje potrzeba stosowania odpowiedniej liczby detektorów. Każdy użyty detektor podnosi koszty wykonania urządzenia, w związku z tym dąży się do minimalizacji ich liczby.

Sposobem na zmniejszenie liczby detektorów jest zastosowanie zwierciadła w komorze pomiarowej jak to zostało pokazane na rysunku 6.3. Powierzchnia zwierciadła skierowana jest do wnętrza komory pomiarowej i jest ustawiona prostopadle do powierzchni szczeliny. Krawędź zwierciadła jest dłuższą krawędzią szczeliny. Szerokość powierzchni odbijającej jest taka, aby z rozmiarem powierzchni detekcyjnej utrzymać zakładaną rozdzielczość i pole widzenia.

Promieniowanie padające do wnętrza komory pomiarowej przez szczelinę trafia na detektory według dwóch możliwych dróg:

- bezpośrednio,
- po odbiciu od zwierciadła.

Detektory będące na powierzchni detekcyjnej, wykrywają promieniowanie z dodatnich jak i ujemnych zakresów kątów. Pozyskując informację tylko z nich, nie ma możliwości określenia znaku kąta. W tym celu dodano zewnętrzny detektor (DZK) służący tylko do określenia znaku kąta przychodzącego promieniowania.



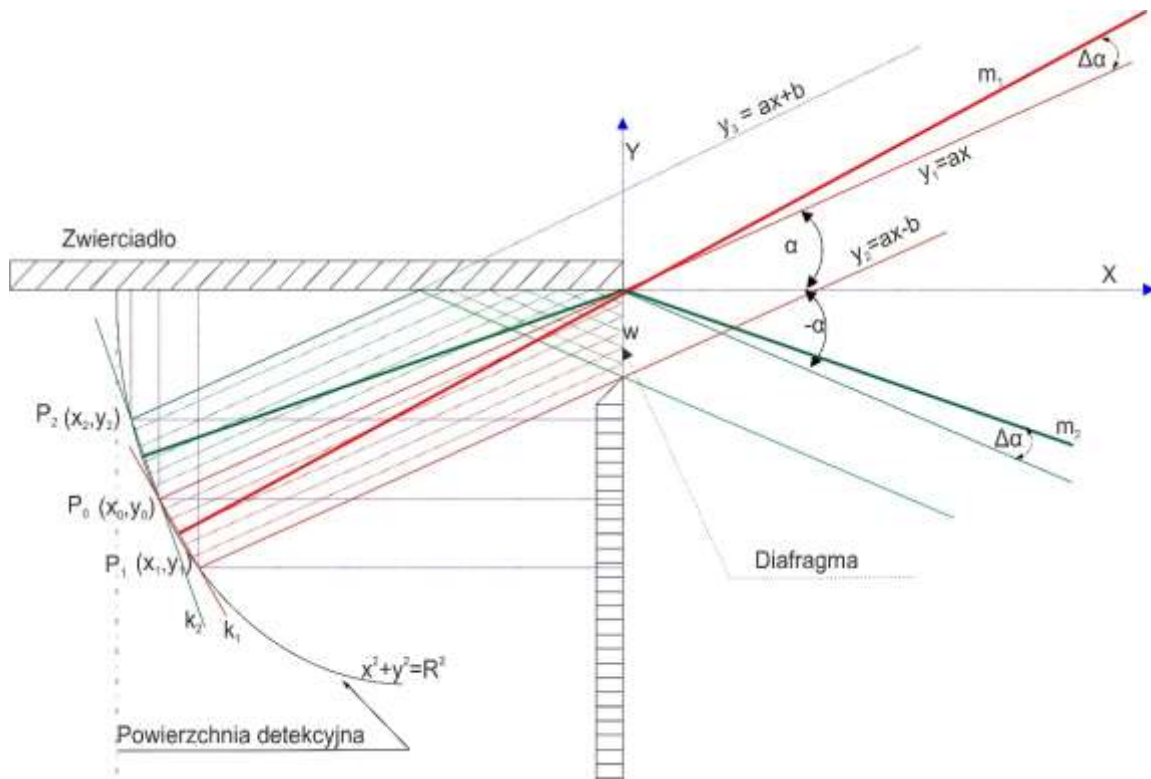
Rys. 6.3 Przekrój przez komorę pomiarową

6.3.2 Analiza wpływu zwierciadła na błąd pomiaru kąta

Zmniejszenie liczby detektorów poprzez wprowadzenie zwierciadła do komory pomiarowej oraz zastosowanie szczeliny o określonej szerokości wprowadza błąd podczas pomiaru. Wynika to z przesunięcia obrazu szczeliny na powierzchni detekcyjnej w funkcji kąta padania. Dla ujemnych kątów obraz szczeliny jest przesunięty bliżej zwierciadła. Sytuację obrazuje rysunek 6.4 będący graficzną interpretacją sposobu powstawania błędów oraz zobrazowaniem modelu matematycznego służącego do określenia wartości błędów.

Z założenia przyjmowane jest promieniowanie, w którym poszczególne promienie są wzajemnie równoległe. Istnieje wówczas możliwość, że każdy promień może zostać opisany funkcją liniową której parametry zależą od kąta padania i jego położenia względem szczeliny.

Do analizy błędu określania kąta padania promieniowania konieczne jest wyznaczenie położenia środka oświetlonej części powierzchni detekcyjnej.



Rys. 6.4 Graficzna interpretacja powstawania błędów podczas określania kąta padania przez sensor

Wyznaczenie punktów P_0, P_1, P_2 , możliwe jest z rozwiązania układu równań opisujących promienie i krzywą na której ułożone są środki detektorów:

$$\begin{cases} y = ax + b \\ y = \sqrt{R^2 - x^2} \end{cases} \quad (6.3)$$

W układzie równań (6.3) funkcja liniowa opisuje promienie przechodzące przez szczelinę, natomiast druga funkcja opisuje położenie środków detektorów w przestrzeni. Przyjmując, że promienie przechodzą przez punkty określające krawędzie szczeliny otrzymuje się dwa równania prostych.

Rozwiązaniem układu równań (6.3.) są współrzędne opisujące trzy punkty w przestrzeni, stanowiące informację o rozmiarze oświetlonej części elementu detekcyjnego. Dla promieni przechodzących przez środek układu współrzędnych, punkt (x_0, y_0) jest tożsamy dla promieni padających pod kątem α , jak i pod kątem do niego przeciwnym $-\alpha$.

W zależnościach przedstawionych w (6.3) konieczne jest określenie współczynników R , a , b w równaniach. Oczywiście jest, że R jest promieniem powierzchni detekcyjnej a jego wymiar zależy od przyjętej rozdzielczości i wymiarów mechanicznych detektora. Współczynniki a i b są wartościami jednoznacznie definiującymi poszczególne promienie.

Dla promieniowania z zakresu dodatnich wartości kątów współczynnik a jest tożsamy z tangensem kąta α . Dla ujemnych zakresów wartość współczynnika jest równa:
 $a = -\tan(\alpha)$.

Wartość współczynnika b , określającego przesunięcie promienia względem środka układu współrzędnych jest równa wartości szerokości szczeliny i przyjmuje wartość $-w$ dla dodatnich wartości kątów α oraz w dla ujemnych.

Dla tak określonych wartości można obliczyć współrzędne punktów P_0, P_1, P_2 , rozwiązując układ równań 6.3. Wyznaczone punkty „ P ” we wszystkich przypadkach znajdują się na okręgu o promieniu R , który ma środek w początku układów współrzędnych.

Znając pary punktów P_2 i P_0 oraz P_0 i P_1 , istnieje możliwość wyznaczenia równań prostych (k_1 i k_2) przechodzących przez te pary punktów. Równanie tych prostych można zapisać w postaci [62]:

$$k_1 : y - y_1 = \frac{x_1 - x_0}{y_1 - y_0} (x - x_1) \quad (6.4)$$

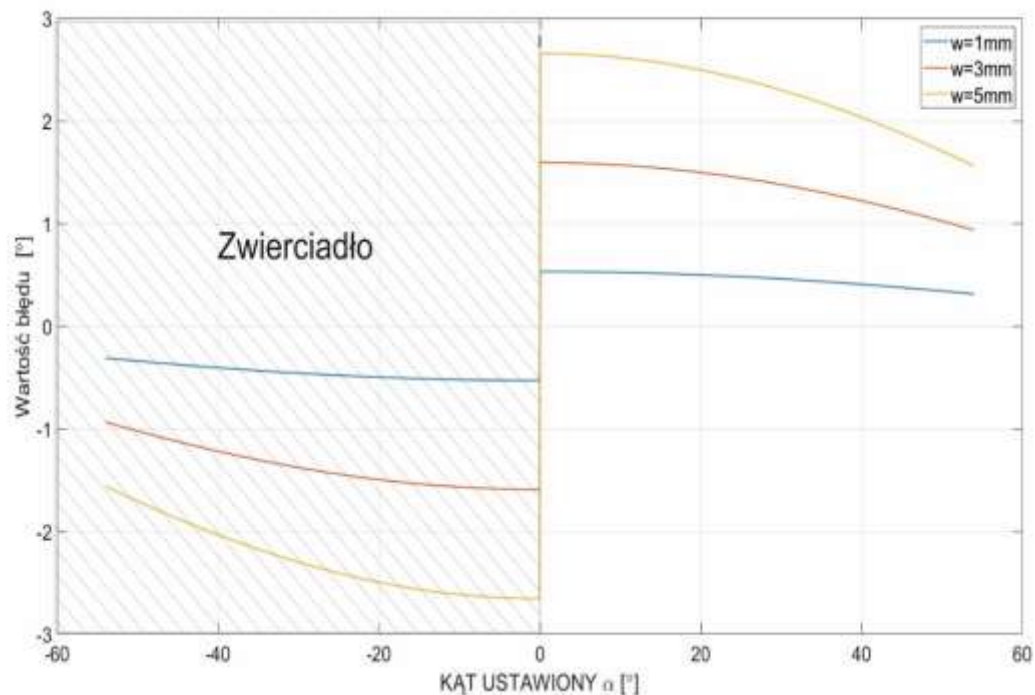
$$k_2 : y - y_0 = \frac{x_0 - x_2}{y_0 - y_2} (x - x_0) \quad (6.5)$$

Równania prostych k_1 oraz k_2 opisują proste, z których odcinki $|P_1P_0|$ oraz $|P_2P_0|$ są cięciwami na okręgu o promieniu R . Wówczas prosta przechodząca przez środek oświetlonego obszaru na powierzchni detekcyjnej oraz środek układu współrzędnych (np. m_1) jest prostopadła do prostej k . Oznacza to, że znając współczynnik kierunkowy prostych określonych jako k , istnieje możliwość określenia współczynnika kierunkowego prostych m_1 oraz m_2 [63].

Współczynnik kierunkowy prostych „ m ” informuje o wskazaniu kąta (a_s) odczytanego przez sensor zgodnie z zależnością:

$$a_s = \tan(\alpha \pm \alpha\Delta) \quad (6.6)$$

Różnicę $\Delta\alpha$ pomiędzy kątem wskazanym przez sensor a kątem, z którego przychodzi promieniowanie (α) dla pojedynczego sensora przedstawiono na rysunku 6.5



Rys. 6.5 Wartość błędów podczas określania kąta padania promieniowania dla różnych wartości szerokości szczelin

6.3.3 Model matematyczny działania modułu

Model matematyczny został opracowany przy następujących założeniach:

promienie optyczne docierające do urządzenia są wzajemnie równoległe,

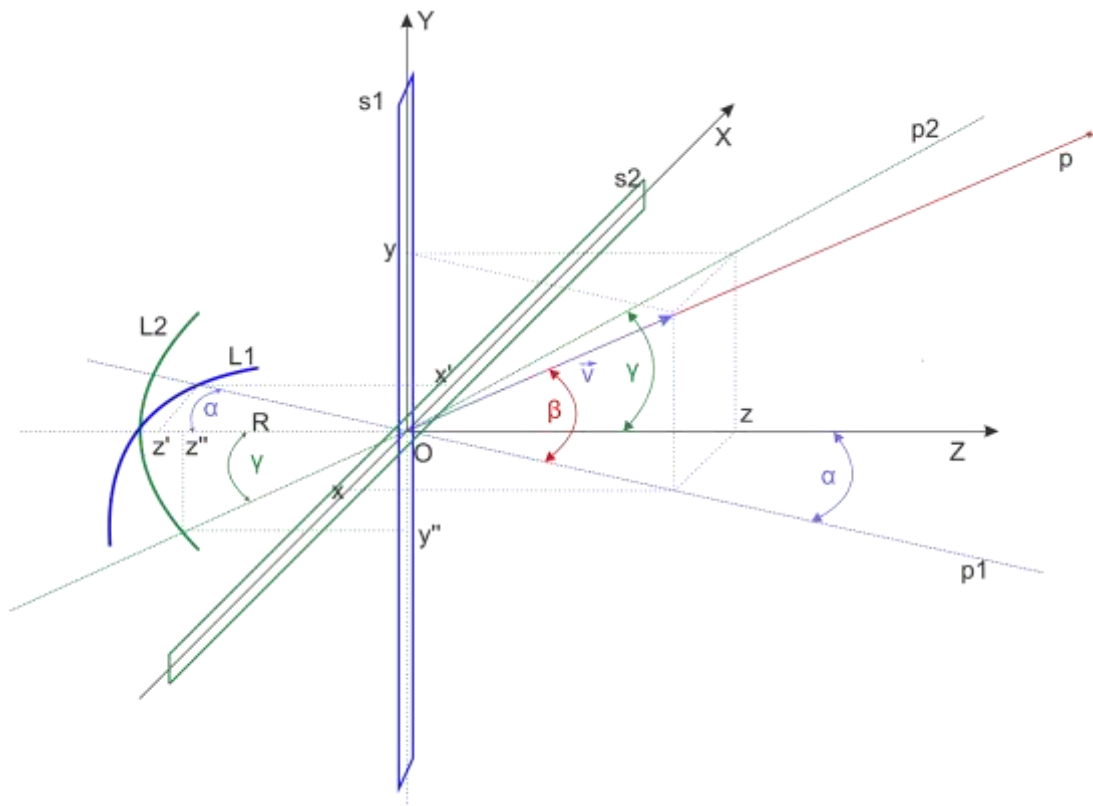
- 1) promienie optyczne docierające do urządzenia są wzajemnie równoległe,
- 2) promieniowanie pada na szczeliny sensorów kąta,
- 3) w modelu matematycznym zwierciadło nie będzie implementowane, jego wpływ został wskazany w punkcie 6.3.2.

Sensory kąta są umieszczone wzajemnie prostopadle we wspólnym układzie współrzędnych, co zostało zobrazowane na rysunku 6.6.

Azymut jest określany przez sensor złożony ze szczeliny $s1$ oraz powierzchni detekcyjnej, której środki detektorów tworzą łuk $L1$ o promieniu R względem środka układu współrzędnych.

Elementami składowymi sensora elewacji jest szczelina $s2$ oraz powierzchnia detekcyjna $L2$. Tak jak w przypadku sensora azymutu, promień R określa odległość

środków geometrycznych powierzchni detekcyjnych od geometrycznego środka szczeliny.



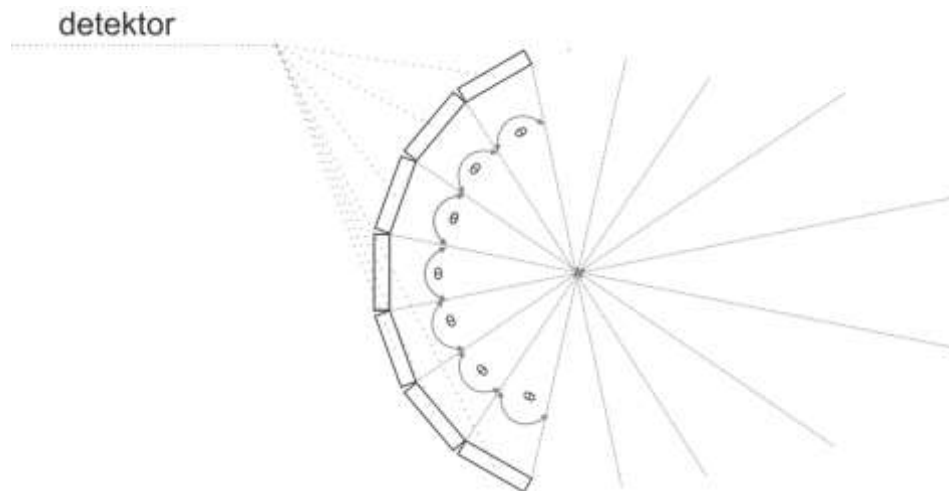
Rys. 6.6 Idea określania kierunku na źródło emitujące promieniowanie laserowe przez moduł detekcyjny

Osie X , Y , Z stanowią układ współrzędnych kartezjańskich zorientowanych zgodnie z geometrią modułu detekcyjnego.

Promieniowanie optyczne po przejściu przez szczeliny $s1$ oraz $s2$, pada na detektory ułożone na powierzchni walca o promieniu R , oznaczone jako $L1$ (detektory służące do określenia azymutu) oraz $L2$ (detektory służące do wyznaczenia elewacji). Wszystkie detektory mają takie same wymiary, a ich środki geometryczne znajdują się na płaszczyźnie OZX dla detektorów określonych na $L1$, oraz płaszczyźnie OYZ dla $L2$.

Ze względu, na środki detektorów, które znajdują się na łuku o promieniu R , oraz na skończone wymiary fizyczne, dzielą one kąt określony przez promień łuku i środek układu współrzędnych na N jednakowych części równych θ . Kąt ten jest zależny od wymiaru detektora oraz odległości od środka szczeliny. Ze względu na zależności tego kąta od wymiaru detektora oraz przyjętej rozdzielczości kątowej, kąt ten będzie

nazywany kątem konstrukcyjnym określającym rozdzielczość. Powyższa sytuacja została zobrazowana na rysunku 6.7 .

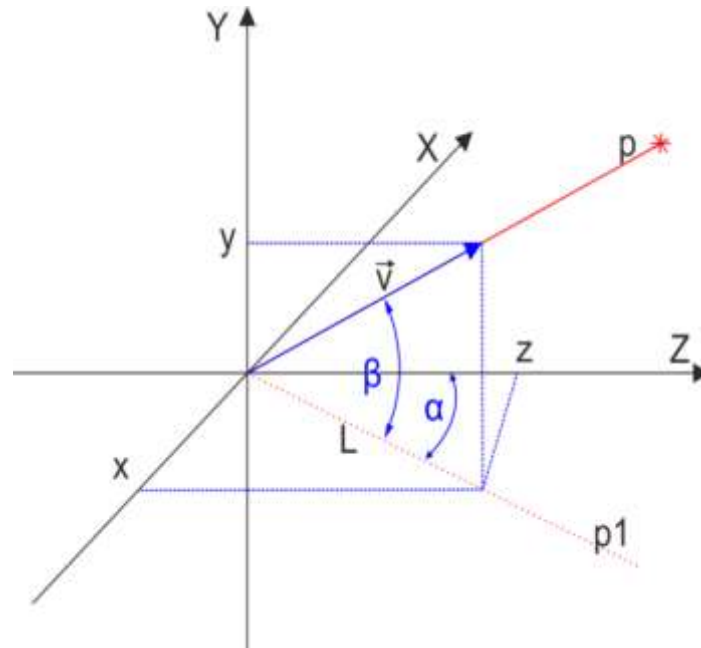


Rys. 6.7 Graficzne zobrazowanie kąta konstrukcyjnego θ

W celu analizy zależności kątowych i określenia sposobu obliczeń kąta padania promieni optycznych wprowadzony zostaje wektor jednostkowy (wersor \vec{v}), o kierunku zgodnym z kierunkiem padania promieni optycznych i zwrocie skierowanym na źródło. Oznaczony jest jako:

$$\vec{v} = [-x, y, z] \quad (6.7)$$

Ze względu na tożsamość kątów wersora z padającym promieniowaniem, można zatem wyrazić współrzędne x, y, z wektora \vec{v} jako funkcje kątów azymutu i elewacji padającego promieniowania. Powyższą sytuację ilustruje rysunek numer 6.8.



Rys. 6.8 Geometryczna interpretacja kątów azymutu i elewacji w odniesieniu do \vec{v}

Współrzędne wersora \vec{v} spełniają równanie [64]:

$$|\vec{v}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = 1 \quad (6.8)$$

Zatem:

$$\frac{y}{|\vec{v}|} = \sin(\beta) \rightarrow y = \sin(\beta) \quad (6.9)$$

Rzut wektora \vec{v} na płaszczyznę XZ ma długość L i jest zależny od kąta elewacji:

$$\frac{L}{|\vec{v}|} = \cos(\beta) \rightarrow L = \cos(\beta) \quad (6.10)$$

Współrzędne z oraz x są powiązane zależnościami z kątem α w następujących relacjach:

$$\frac{x}{L} = \sin(\alpha) \rightarrow x = L \sin(\alpha) = \sin(\alpha) \cos(\beta) \quad (6.11)$$

$$\frac{z}{L} = \cos(\alpha) \rightarrow z = L \cos(\alpha) = \cos(\alpha) \cos(\beta) \quad (6.12)$$

Zatem można zapisać wersor \vec{v} jako:

$$\vec{v} = [-\sin(\alpha) \cos(\beta), \sin(\beta), \cos(\alpha) \cos(\beta)] \quad (6.13)$$

W celu wyznaczenia azymutu, promień pochodzący od źródła pada przez szczelinę sI na detektory zamontowane na łuku LI . Rzut promienia p na płaszczyznę OZX , pI , zwiernia informację o azymucie, z którego pada promieniowanie. Ponieważ łuk LI oraz promień pI znajdują się na jednej płaszczyźnie, można zapisać, że:

$$\tan(\alpha) = \frac{-x}{z} = \frac{x'}{-z'} \quad (6.14)$$

Liczba detektorów wynosi N i są ponumerowane od 0 do $N-1$, przy czym środek detektora o numerze 0 jest umieszczony w punkcie $[R,0,0]$. Informacja o numerze detektora odbierającego promieniowanie podawana jest w postaci liczby całkowitej określającej jego numer (n_a). Wynika z tego, że:

$$x' = R \cdot \cos(n_a \theta) \quad (6.15)$$

oraz

$$z' = R \cdot \sin(n_a \theta) \quad (6.16)$$

$$\tan(\alpha) = \frac{x'}{-z'} = \frac{R \cdot \cos(n_a \theta)}{R \cdot \sin(n_a \theta)} = \cot(n_a \theta) \quad (6.17)$$

$$\tan(\alpha) = \cot(n_a \theta) \quad (6.18)$$

$$\alpha = n_a \theta \quad (6.19)$$

Z powyższej zależności wynika, iż aby określić kąt azymutu, należy uzyskać informację o położeniu oświetlonego detektora. Określenie kąta azymutu nie wymaga znajomości kąta elewacji.

W celu wyznaczenia kąta elewacji, konieczne jest określenie numeru oświetlonego detektora na łuku $L2$, n_e . Na tej podstawie istnieje możliwość wyznaczenia kąta γ pomiędzy osią OZ a prostą $p2$, będącą rzutem prostej p na płaszczyznę OZY .

Ponieważ:

$$\frac{y}{z} = \tan(\gamma) = \frac{-y''}{-z''} = \tan(n_e \theta) \quad (6.20)$$

Uwzględniając wartości współrzędnych y , z oraz wektora \vec{v} uzyskuje się:

$$\frac{y}{z} = \frac{\sin(\beta)}{\cos(\alpha) \cos(\beta)} = \tan(n_e \theta) \quad (6.21)$$

$$\tan(n_e \theta) \cos(\alpha) = \tan(\beta) \quad (6.22)$$

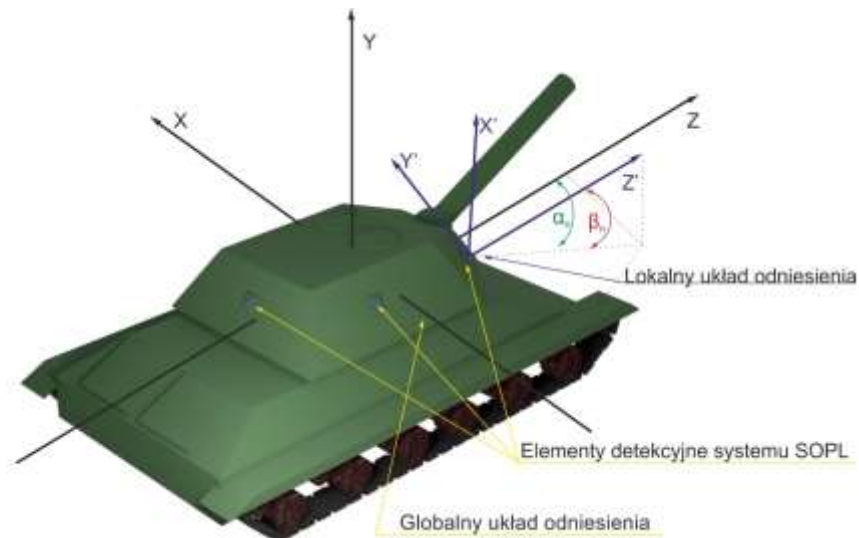
$$\beta = \text{atan}(\tan(n_e \theta) \cos(\alpha)) \quad (6.23)$$

Z zależności (6.19) oraz (6.23) wynika, że określanie kątów azymutu i elewacji określonych według układu współrzędnych pokazanym na rysunku 6.6, musi odbywać się sekwencyjnie. W pierwszym kroku wyznaczany jest kąt azymutu według zależności (6.19), a jego wynik jest użyty do obliczeń według zależności (6.23).

Elementy systemu SOPL umieszczone są zazwyczaj na określonym nosicielu. Ich liczba i rozmieszczenie są zależne od pola widzenia oraz założonej strategii ochrony danej platformy. W przypadku określenia kierunku na źródło, kąty podawane przez system

SOPL odniesione są do układu współrzędnych modułów detekcyjnych zwanych lokalnymi.

Ze względu na fakt, iż moduły umieszczone są na nosicielu, konieczne jest podawanie kąta padania promieniowania laserowego względem ściśle określonego układu współrzędnych (nazywanego globalnym) związanego z nosicielem (rysunek 6.9).



Rys. 6.9 Idea działania systemu SOPL w globalnym układzie odniesienia

Sposób określania kąta padania promieniowania względem globalnego układu współrzędnych opiera się na następujących założeniach:

- 1) Padające promienie świetlne są wzajemnie równoległe, zatem przesunięcie liniowe położenia początku lokalnego układu współrzędnych względem początku globalnego układu współrzędnych, nie zmienia zależności kątowych pomiędzy promieniami optycznymi a lokalnym układem współrzędnych;
- 2) Konieczna jest znajomość o jaki kąt został obrócony moduł detekcyjny względem początku układu współrzędnych. Obrótu dokonuje się względem globalnej osi OX (kąt β_n), który może oznaczać konstrukcyjne pochylenie modułu detekcyjnego na ścianie pojazdu. Drugiego obrótu dokonuje się wokół względem globalnej osi OY (kąt α_n), który może oznaczać obrót wieży lub całego pojazdu w płaszczyźnie poziomej.

Niech $\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}$ będzie wektorem określonym w lokalnym układzie współrzędnych przez

wyznaczone kąty padania promieniowania α_L oraz β_L . Analogicznie do zależności 6.13 można zapisać, że:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\alpha_L) \cos(\beta_L) \\ \sin(\beta_L) \\ \cos(\alpha_L) \cos(\beta_L) \end{bmatrix} \quad (6.24)$$

Macierze obrotu R_x oraz R_y są zdefiniowane jako:

R_y – jest macierzą obrotu wokół osi y o kąt α_n .

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_n) & 0 & \sin(\alpha_n) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\alpha_n) & 0 & \cos(\alpha_n) \end{bmatrix} \quad (6.25)$$

R_x – jest macierzą obrotu wokół osi x o kąt β_n (kąt konstrukcyjny pochylenia modułu detekcyjnego)

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta_n) & -\sin(\beta_n) \\ 0 & \sin(\beta_n) & \cos(\beta_n) \end{bmatrix} \quad (6.26)$$

Można zapisać, że wektor $\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}$ jest wektorem wynikowym po obrocie globalnego

układu współrzędnych o kąty α_n, β_n i co można zapisać jako:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R_y R_x \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (6.27)$$

W celu obliczenia współrzędnych oryginalnych wektora w globalnym układzie współrzędnych należy dokonać mnożenia przez macierze odwrotne do R_x oraz R_y

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R_x^{-1} R_y^{-1} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (6.28)$$

Gdzie R_x^{-1} jest macierzą odwrotną do R_x , a R_y^{-1} macierzą odwrotną do R_y . Dla macierzy obrotu, słuszne jest założenie, że macierze odwrotne do macierzy obrotów są równoważne macierzom transponowanym stąd:

$$R_x^{-1} = R_x^T \quad (6.29)$$

$$R_y^{-1} = R_y^T \quad (6.30)$$

zatem:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{R}_x^T \mathbf{R}_y^T \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (6.31)$$

Ponieważ dla wersora o współrzędnych $\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$ istnieją następujące związki trygonometryczne wynikające z poprzedniej analizy:

$$x = \sin(\alpha_g) \cos(\beta_g) \quad (6.32)$$

$$y = \sin(\beta_g) \quad (6.33)$$

$$z = \cos(\alpha_g) \cos(\beta_g) \quad (6.34)$$

gdzie α_g oraz β_g są kątami promieniowania w globalnym układzie współrzędnych.

Na podstawie powyższych zależności można wyznaczyć kąty na źródło promieniowania względem globalnego układu odniesienia:

$$\frac{x}{z} = \tan(\alpha_g) \quad (6.35)$$

$$\alpha_g = \text{atan}\left(\frac{x}{z}\right) \quad (6.36)$$

$$\frac{y}{z} = \tan(\beta_g) \frac{1}{\cos(\alpha_g)} \quad (6.37)$$

$$\beta_g = \text{atan}\left(\frac{y \cos(\alpha_g)}{z}\right) \quad (6.38)$$

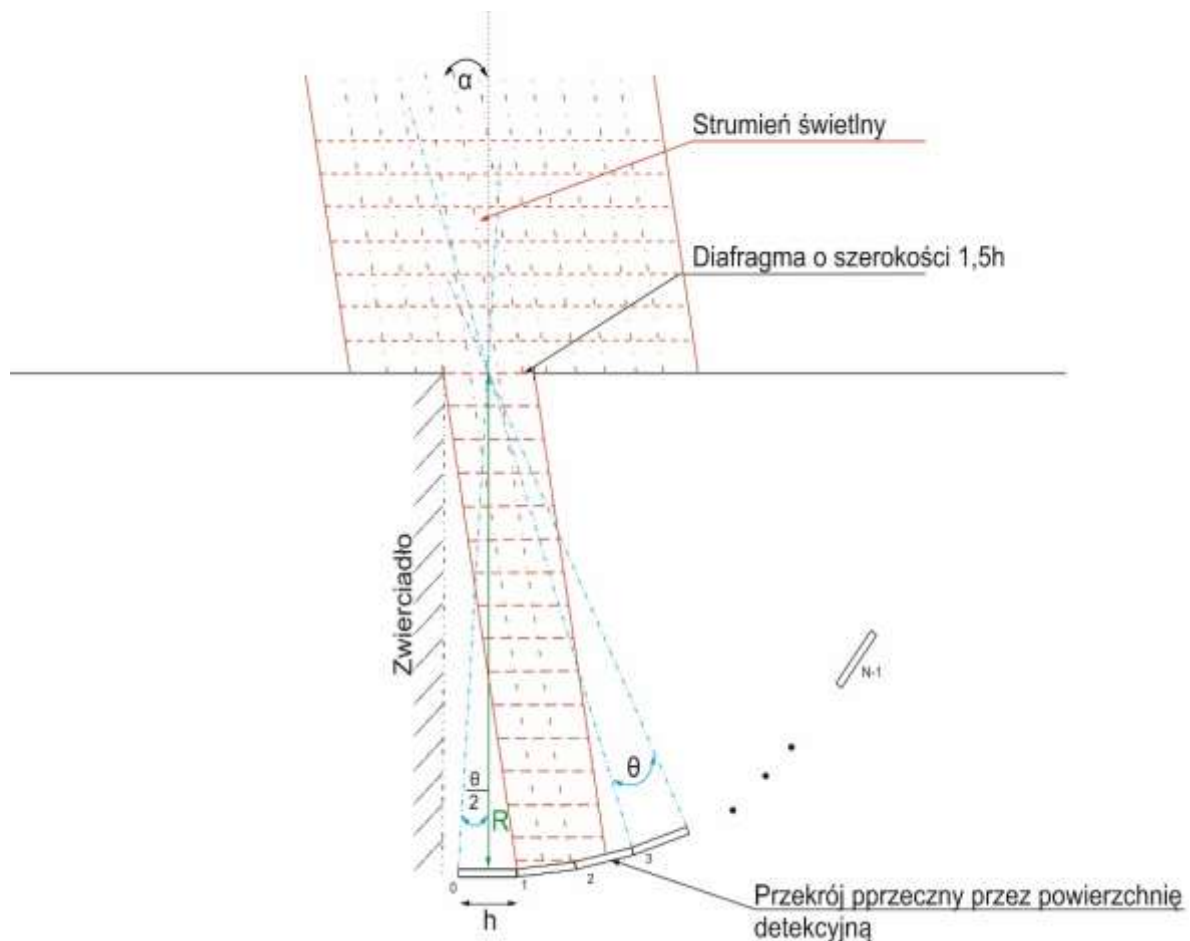
W celu określenia kąta padania promieniowania w globalnym układzie współrzędnych, konieczna jest znajomość kątów jakie tworzą osie modułów detekcyjnych z osiami układu, względem którego dokonuje się pomiaru. Dla każdego takiego modułu konieczne jest wówczas niezależne określenie kątów azymutu i elewacji według zależności (6.19) oraz (6.23) a następnie dokonanie obliczeń według zależności (6.28), (6.36), (6.38).

6.4 Oszacowanie wymiarów mechanicznych sensora

Wpływ na gabaryty sensora mają wymiary detektora, założona rozdzielczość i przyjęte pole widzenia. W związku z powyższym istnieje konieczność dobrania tych elementów w taki sposób, aby osiągnąć założoną czułość przy możliwie najmniejszej objętości bryły.

6.4.1 Wymiar detektora

Średnica powierzchni detekcyjnej determinuje nie tylko poziom odbieranej mocy promieniowania. Wpływa także na wymiary mechaniczne komory pomiarowej. Związane jest to z relacją pomiędzy promieniem powierzchni detekcyjnej (R) a rozdzielczością kątową θ uzależnioną od wymiarów liniowych detektora (rysunek 6.10). Szerokość szczeliny determinuje liczbę oświetlonych detektorów.



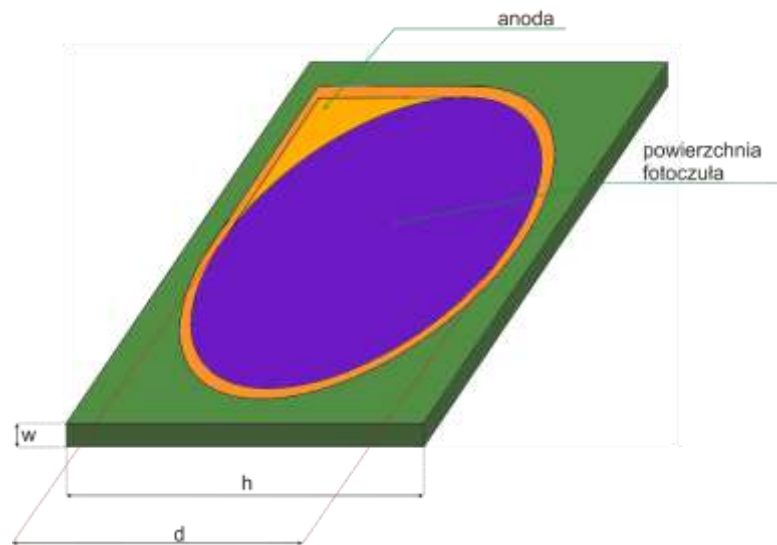
Rys. 6.10 Interpretacja geometryczna wpływu szerokości szczeliny na liczbę oświetlonych detektorów

Promień łuku, na którym znajdują się środki detektorów determinuje jednocześnie minimalne wymiary mechaniczne komory pomiarowej. Z kątem konstrukcyjnym θ oraz wymiarem detektora h wiąże go zależność:

$$R = \frac{h}{2 \operatorname{tg} \left(\frac{\theta}{2} \right)} \quad (6.39)$$

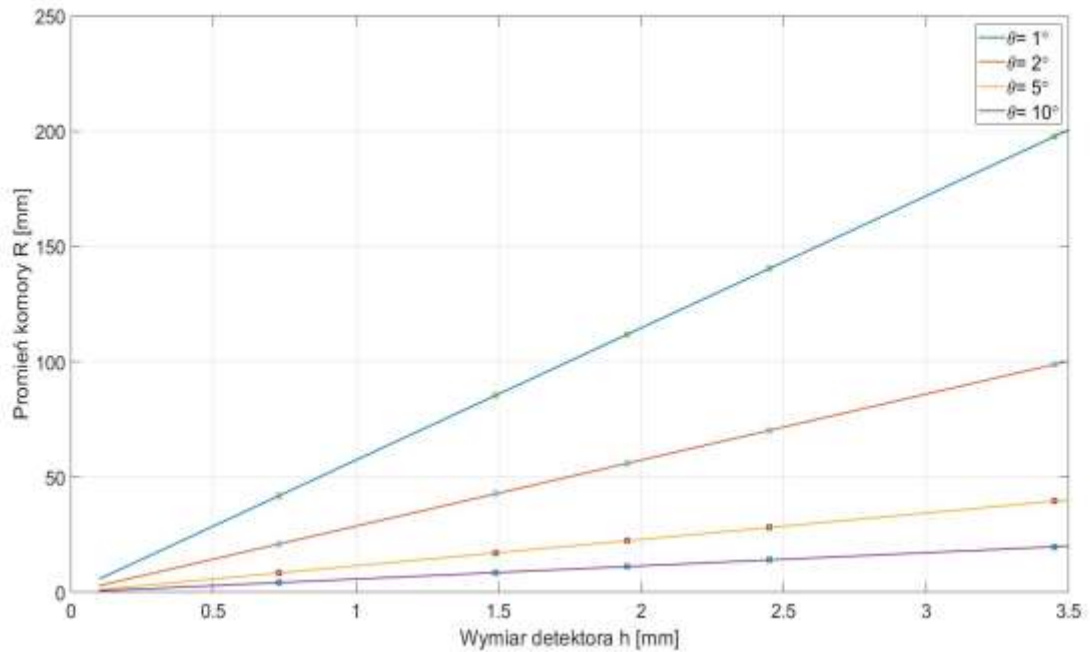
Przedstawione w nocie katalogowej [65, 66] charakterystyki detektorów mają okrągłą powierzchnię detekcyjną nie wypełniającą w całości powierzchni detektora. Przykładowy

rysunek detektora opracowany na podstawie noty katalogowej został przedstawiony na rysunku 6.11.



Rys. 6.11 Rysunek przedstawiający detektor

Na podstawie danych katalogowych dotyczących wymiarów mechanicznych detektorów, zostały obliczone z zależności (6.39) minimalne wymiary promienia powierzchni detekcyjnej. Wyniki obliczeń dla różnych kątów konstrukcyjnych zostały zaprezentowane na rysunku 6.12. Przedstawione wartości długości promienia konstrukcyjnego komory pomiarowej są wartościami teoretycznymi. Przy pomocy znaczników zaznaczono wymiar promienia dla wymiarów dostępnych detektorów.



Rys. 6.12 Wartość promienia powierzchni detekcyjnej w funkcji wymiaru detektora

Technologicznie jest możliwe ułożenie detektorów obok siebie tak, aby odległość między nimi była mniejsza niż $10 \mu\text{m}$. Takie ułożenie nie jest jednak korzystne z punktu widzenia termicznego współczynnika rozszerzalności materiału fotodiody. W skrajnie niekorzystnych warunkach temperaturowych może dojść do naprężeń, wynikających z wzajemnego nacisku na siebie dwóch sąsiednich detektorów, co może skutkować mechanicznymi uszkodzeniami. W celu przeciwdziałania temu zjawisku pomiędzy detektorami pozostawia się przerwy technologiczne wynoszące $100 \mu\text{m}$. Rozmiar przerwy technologicznej ułatwia także montaż detektorów.

6.4.2 Szerokość szczeliny

Szerokość szczeliny została ustalona na podstawie wymiarów detektora. Przyjęto, iż zmiana kąta o 1° powinna generować informację o przekroczeniu progu na sąsiednim detektorze. Jest to możliwe do osiągnięcia poprzez dobranie szerokości szczeliny w taki sposób, aby promieniowanie przechodzące przez nią padało na powierzchnie detekcyjne większej liczby detektorów (rys. 6.10).

Zwiększanie szerokości szczeliny powoduje, że liczba oświetlonych detektorów jest większa. Konieczne jest wówczas opracowanie algorytmu decyzyjnego, który na podstawie numerów przypisanych do detektorów, obliczy faktyczny środek oświetlonej części detekcyjnej.

Szerokość szczeliny determinuje jaka moc optyczna (pochodząca zarówno od sygnału użytecznego, jak i tła oraz zakłóceń), dotrze do wnętrza komory pomiarowej. Przy większych wartościach natężenia napromienienia, promieniowanie rozproszone wewnątrz komory pomiarowej będzie powodować powstanie fałszywej informacji o położeniu i liczbie oświetlonych detektorów. W szczególnych przypadkach może dojść „do olśnienia” torów detekcyjnych, przez co sensor może stracić możliwość określania kąta padania.

6.4.3 Długość szczeliny

Pole widzenia sensora FOV (*ang. field of view*) jest określane jako maksymalny zakres kątów w azymucie i elewacji pod jakim promieniowanie będzie padać na detektory. Regulacji pola widzenia można dokonywać poprzez zmianę liczby detektorów oraz ustalanie długości diafragmy. Obydwie wartości są ze sobą powiązane i wpływają na ostateczny wynik.

W celu określenia kątów granicznych sensora należy rozpatrzyć następujące przypadki.

- 1) promieniowanie pada na sensor określający elewację z maksymalnego azymutu określonego przez długość diafragmy,
- 2) promieniowanie pada na sensor określający azymut z maksymalnej elewacji wynikającej z długości diafragmy.

Ze względu na zależność (6.21) wiążącą ze sobą kąt azymutu i elewacji, pomiędzy kątem konstrukcyjnym ułożenia detektorów w sensorze elewacji i kątami określającymi azymut i elewację dla przychodzącego promieniowania istnieje zależność:

$$\tan(N\theta) = \frac{\tan(\beta)}{\cos(\alpha)} \quad (6.40)$$

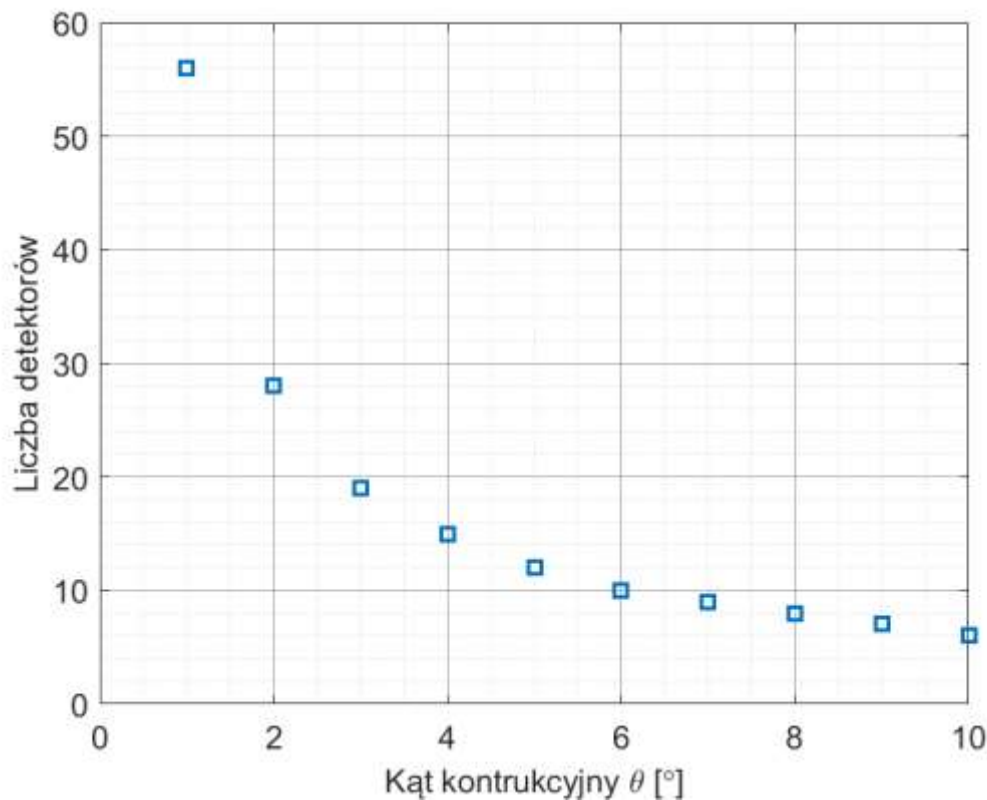
gdzie N oznacza maksymalny numer detektora.

Z tej zależności można oszacować liczbę niezbędnych detektorów, aby zapewnić pole widzenia sensora na określonym poziomie. W założeniach konstrukcji modułu przyjęto, że moduł ma reagować na promieniowanie padające pod kątem 45° w azymucie

i elewacji jednocześnie. Na podstawie zależności (6.40) można oszacować minimalną liczbę detektorów o określonym kącie konstrukcyjnym. Jeśli przyjęte zostanie pole widzenia pojedynczego sensora $\pm 45^\circ$, to z zależności 6.40 można wyznaczyć minimalną liczbę detektorów potrzebną do realizacji sensora w postaci :

$$N = \frac{\text{atan}(\sqrt{2})}{\theta} \quad (6.41)$$

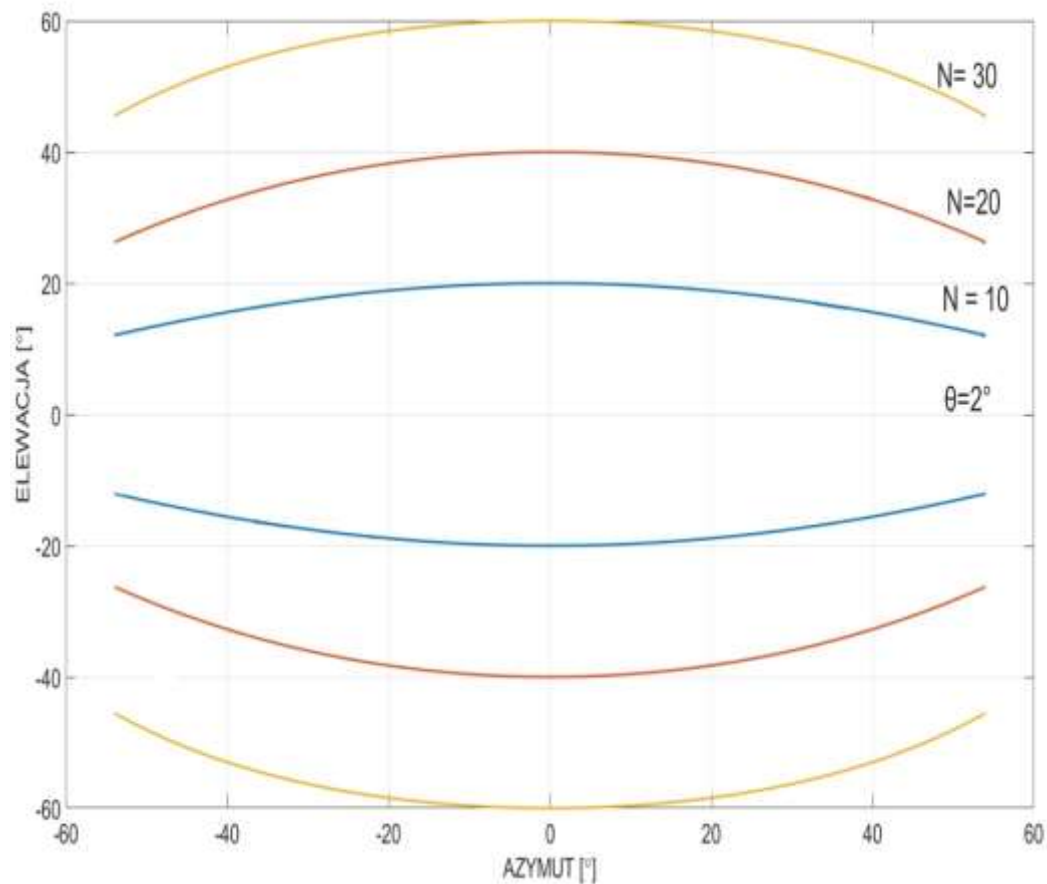
Faktyczna liczba detektorów w układach detekcyjnych sensora jest o jeden większa, ze względu na to, że pierwszy detektor służy do detekcji promieniowania padającego pod kątem 0° . Liczba detektorów konieczna do utrzymania pola widzenia na poziomie 45° dla kilku określonych kątów konstrukcyjnych została przedstawiona na rysunku 6.13.



Rys. 6.13 Liczba detektorów koniecznych do utrzymania określonego ($\pm 45^\circ$) pola widzenia modułu detekcyjnego

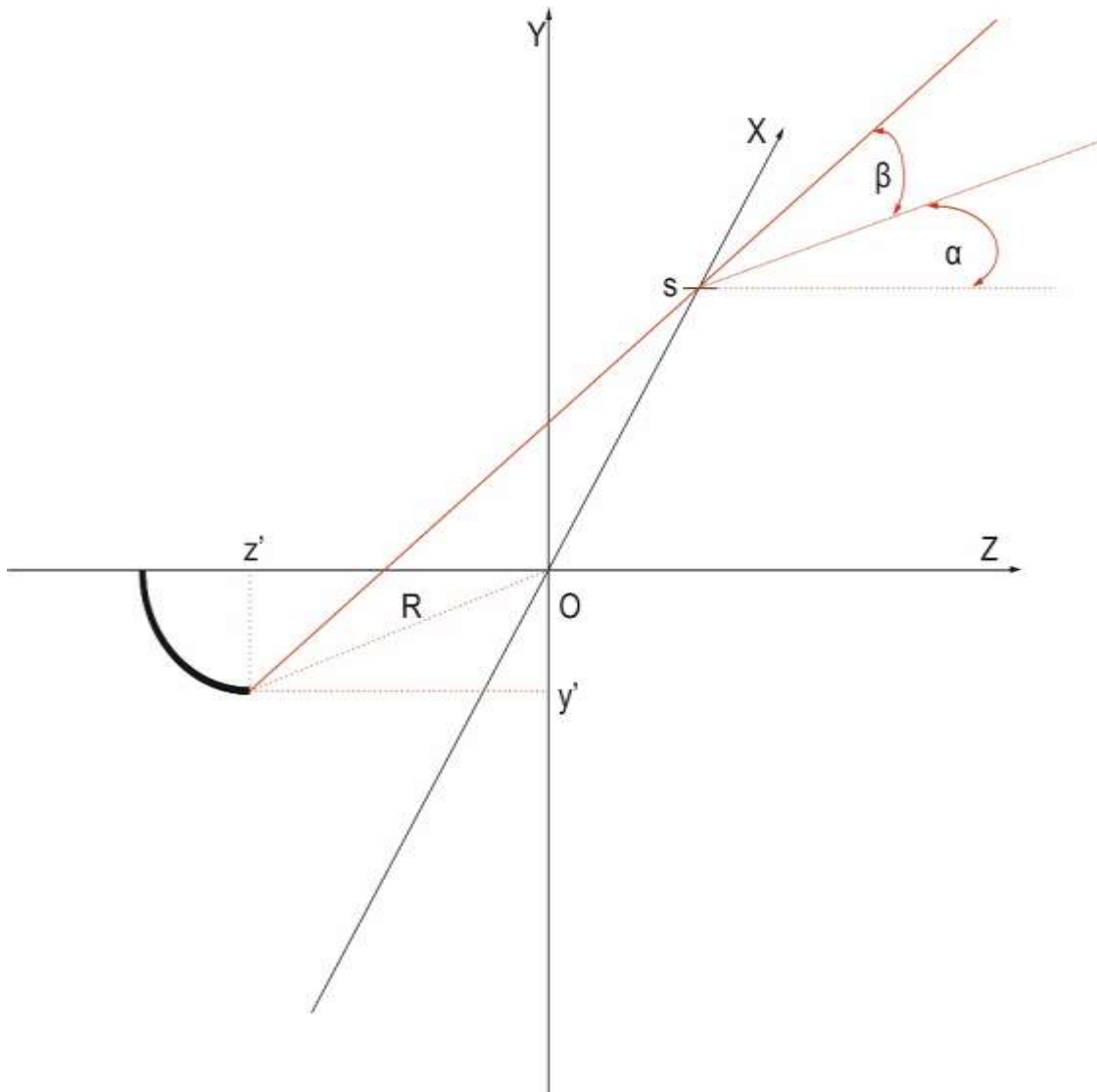
W przypadku, gdy kąt azymutu jest równy 0° , maksymalny kąt elewacji odpowiada kątowi konstrukcyjnemu pomnożonemu przez liczbę detektorów. Jeśli natomiast sensor azymutu określi maksymalny kąt azymutu (α_{gr}), to kąt elewacji będzie mniejszy. Dla kąta konstrukcyjnego $\theta=2^\circ$ przeprowadzono analizę kąta granicznego

elewacji w funkcji liczby detektorów i kąta azymutu według zależności (6.38). Wyniki zostały przedstawione na rysunku 6.14.



Rys. 6.14 Pole widzenia sensora elewacji w funkcji liczby detektorów oraz kąta azymutu

W celu analizy maksymalnych wartości kątów padania promieniowania w azymucie i elewacji konieczna jest analiza sytuacji przedstawionej na rysunku 6.14. Promieniowanie optyczne po przejściu przez szczelinę w punkcie $[s, 0, 0]$ pada na ostatni detektor z powierzchni detekcyjnej o numerze N . Ze względu na to, że detektory umieszczone są na łuku o promieniu R i każdy ma rozmiar kątowy θ , współrzędne tego detektora można zapisać jako $[0, -R\sin(N\theta), -R\cos(N\theta)]$.



Rys. 6.15 Układ analityczny do oszacowania kątów granicznych azymutu i elewacji w sensorze elewacji

Wprowadzając wektor \vec{w} skierowany na źródło promieniowania można na podstawie zależności pomiędzy współrzędnymi wektora a kątami α i β oszacować kąty graniczne azymutu i elewacji.

$$\vec{w} = [w_x, w_y, w_z] = [s, R \sin(N\theta), R \cos(N\theta)] \quad (6.42)$$

Na podstawie właściwości trygonometrycznych można zapisać, że:

$$\sin(\beta_{gr}) = \frac{w_y}{|\vec{w}|} = \frac{R \sin(N\theta)}{\sqrt{s^2 + R^2 (\sin(N\theta))^2 + R^2 (\cos(N\theta))^2}} = \frac{R \sin(N\theta)}{\sqrt{s^2 + R^2}} \quad (6.43)$$

oraz

$$\tan(\alpha_{gr}) = \frac{w_x}{w_z} = \frac{s}{R \cos(N\theta)} \quad (6.44)$$

Uwzględniając zależność pomiędzy średnicą detektora i kątem konstrukcyjnym a promieniem R:

$$R = \frac{d}{2 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (6.45)$$

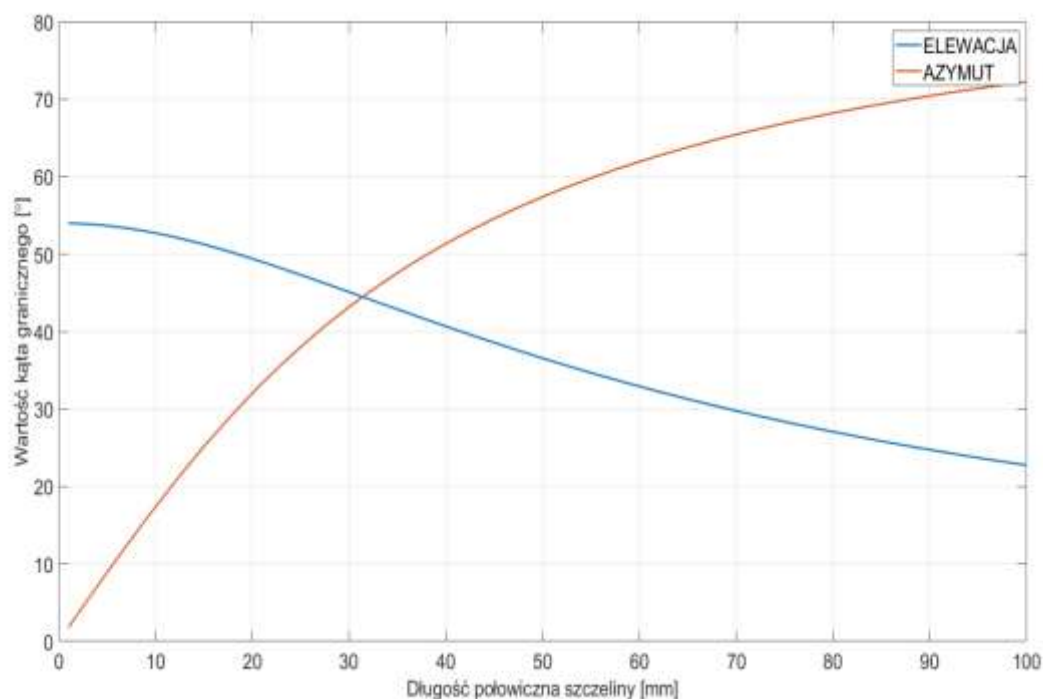
otrzymuje się:

$$\sin(\beta_{gr}) = \frac{d \cdot \sin(N\theta)}{\sqrt{4s^2 \left(\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2 + d^2}} \quad (6.46)$$

$$\tan(\alpha_{gr}) = \frac{2s \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d \cdot \cos(N\theta)} \quad (6.47)$$

Zależności (6.46) oraz (6.47) odnoszą się do dodatnich wartości kątów. Aby sensor poprawnie działał dla ujemnych wartości kątów, konieczne jest zwiększenie długości szczeliny dwukrotnie.

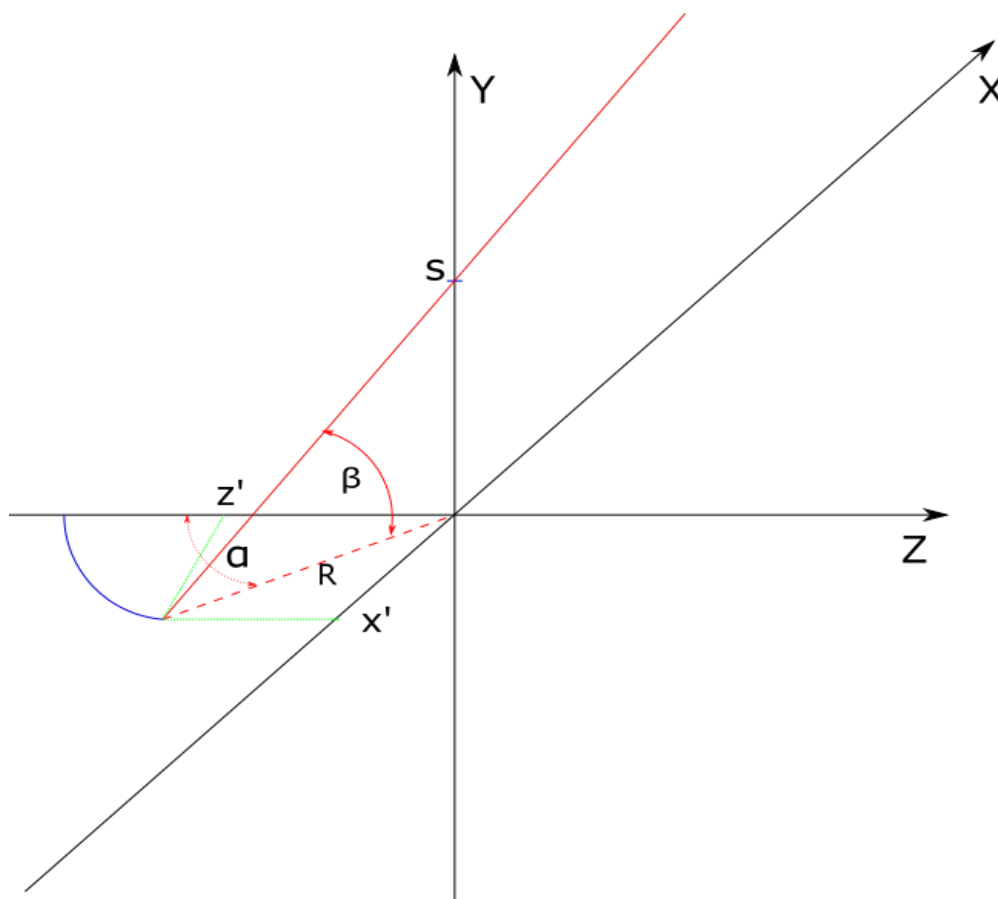
Według powyższych zależności otrzymuje się wykresy kątów granicznych azymutu i elewacji w funkcji długości szczeliny dla sensora określającego elewację przedstawione na rysunku 6.16. Do obliczeń przyjęto detektor o średnicy powierzchni aktywnej 1,3 mm (wymiar detektora 1,96 mm) i kącie konstrukcyjnym 2°.



Rys. 6.16 Wartości kątów granicznych w funkcji długości szczeliny dla sensora elewacji.

Długość szczeliny w sensorze elewacji powinna być dobrana tak, aby możliwe było określenie elewacji z założonego kąta azymutu. Wartość długości szczeliny zależy od liczby detektorów, kąta konstrukcyjnego oraz średnicy powierzchni detekcyjnej.

Na rysunku 6.17 przedstawiona graficzna interpretacja kątów granicznych dla sensora azymutu.



Rys. 6.17 Graficzna interpretacja kątów granicznych dla sensora azymutu.

Dla sensora azymutu graniczny kąt azymutu wynika z liczby detektorów i przyjętej rozdzielczości kątowej (kąta konstrukcyjnego). Graniczna elewacja wynika natomiast z długości diafragmy i promienia łuku R .

$$\beta_{gr} = \operatorname{atan}\left(\frac{S}{R}\right) \quad (6.48)$$

$$\beta_{gr} = \operatorname{atan}\left(\frac{2s \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d}\right) \quad (6.49)$$

Przy zadanej rozdzielczości oraz określonym kącie granicznym określającym pole widzenia sensora, można określić, że szczelina powinna mieć długość równą:

$$s = \frac{d \cdot \tan(\beta_{gr})}{tg\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (6.50)$$

Należy zaznaczyć, że β_{gr} musi zostać określone przez sensor elewacji. Dla kąta azymutu 0° , maksymalny kąt określony jest przez liczbę detektorów sensora elewacji N_E oraz kąt konstrukcyjny (θ_E). Połowę długości szczeliny można zatem wyrazić jako:

$$s = \frac{d \cdot \tan(N_E \theta_E)}{2tg\left(\frac{\theta_A}{2}\right)} \quad (6.51)$$

gdzie:

N_E – liczba detektorów w sensorze elewacji

θ_E – kąt konstrukcyjny sensora elewacji

θ_A – kąt konstrukcyjny sensora azymutu

Jeśli sensor azymutu i elewacji ma taką samą konstrukcję, to wzór (6.49) przyjemnie postać

$$s = \frac{d \cdot \tan(N\theta)}{2tg\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (6.52)$$

Według zależności (6.41) wyznaczono minimalną liczbę detektorów konieczną, aby dla danego kąta konstrukcyjnego pole widzenia sensora zawierało stożek o kącie rozwarcia 90° . Liczba detektorów niezbędnych do utrzymania pola widzenia i ich kąt konstrukcyjny określa maksymalną wartość kąta elewacji jaki może zostać odebrany przez sensor azymutu. Uwzględniając wartości liczby detektorów sensora elewacji i ich kąta konstrukcyjnego w zależności (6.52) uzyskuje się minimalną wartość długości szczeliny sensora azymutu zapewniającej odpowiednie pole widzenia. Wyniki analizy zostały przedstawione w tabeli 6.3.

Tabela 6.3 Minimalna wartość długości szczeliny sensora azymutu zapewniającej odpowiednie pole widzenia

Lp.	Średnica powierzchni detekcyjnej d (μm)	Wymiar detektora h (mm)	Długość szczeliny s sensora azymutu koniecznej do utrzymania pola widzenia 45° (mm)			
			$\theta = 1^\circ$	$\theta = 2^\circ$	$\theta = 5^\circ$	$\theta = 10^\circ$
1	250	0,73	119,5	57,6	23,9	9,9
2	500	1,49	243,8	117,5	48,7	20,3
3	1000	1,49	243,8	117,5	48,7	20,3
4	1300	1,95	319,1	153,8	63,9	26,6
5	2000	2,45	400,9	193,2	80,1	3,4
6	3000	3,45	564,6	272	112,8	47

6.5 Analiza wpływu założonej rozdzielczości na wymiary mechaniczne modułu

Założona rozdzielczość wpływa na całkowite wymiary mechaniczne urządzenia. Wymiar detektora wpływa na wartość długości promienia łuku, na którym jest on położony. Te same wymiary odnoszą się do określenia szczeliny i utrzymania kątów granicznych. W związku z tym minimalna objętość, w której zamknie się moduł detekcyjny jest określona przez promień R oraz długość szczeliny. Przyjęto, że długość szczeliny sensorów, zarówno azymutu jak i elewacji, będzie taka, aby zapewnić pole widzenia w elewacji co najmniej 45° . Wyniki analizy zostały przedstawione w tabeli 6.4.

Podczas szacowania objętości bryły modułu detekcyjnego dokonano następujących założeń:

- moduł detekcyjny składa się z dwóch sensorów kąta padania światła umieszczonych prostopadle do siebie jeden nad drugim,
- dla jednego sensora przyjęto wymiary następujące: długość równa długości szczeliny sensora azymutu, szerokość i wysokość równa promieniowi łuku, na którym umieszczone są detektory.

Tabela 6.4 Minimalna objętość bryły modułu detekcyjnego

Lp.	Średnica powierzchni detekcyjnej d (μm)	Wymiar detektora h (mm)	Minimalna objętość bryły V_{min} (dcm^3)			
			$\theta = 1^\circ$	$\theta = 2^\circ$	$\theta = 5^\circ$	$\theta = 10^\circ$
1	250	0,73	0,35	0,04	<0,01	<0,01
2	500	1,49	2,98	0,35	0,02	<0,01
3	1000	1,49	2,98	0,35	0,02	<0,01
4	1300	1,95	6,68	0,78	0,05	<0,01
5	2000	2,45	13,26	1,55	0,11	0,01
6	3000	3,45	37,02	4,32	0,29	0,03

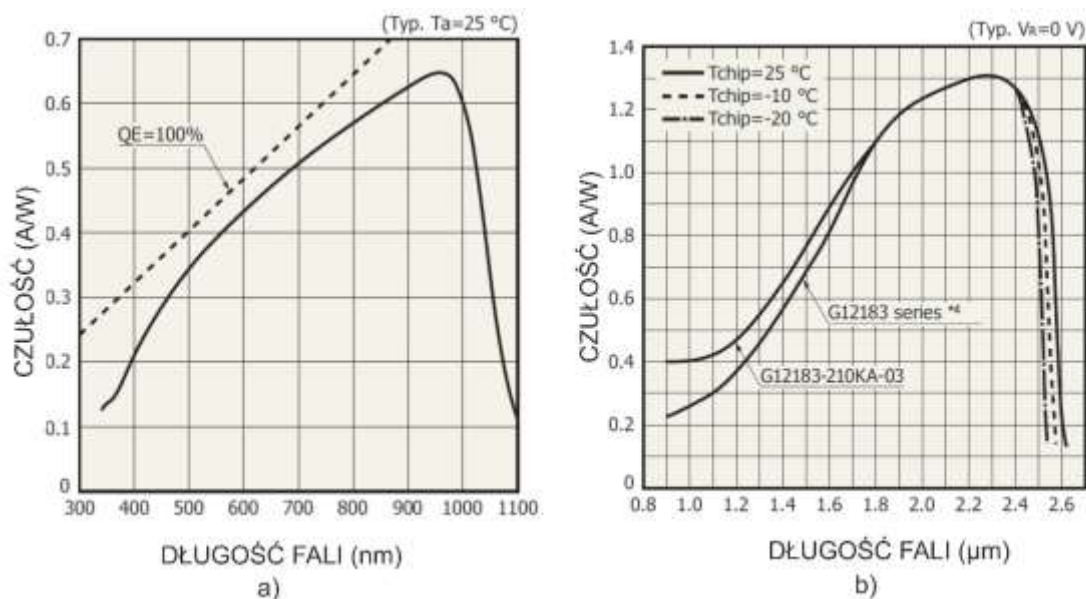
Należy zaznaczyć, iż przedstawione wymiary mają wartości orientacyjne a rzeczywiste wartości wymiarów geometrycznych zależą od technologii wykonania użytych materiałów, przyjętej rozdzielczości oraz wymiaru detektora. Większość z wymienionych powyżej czynników jest uzależniona od kosztów wykonania oraz wymagań stawianych systemowi przez użytkowników.

6.6 Określenie parametrów kluczowych elementów toru detekcyjnego

6.6.1 Dobór detektora

Detektor promieniowania optycznego jest istotnym elementem każdego systemu SOPL. Jego głównym zadaniem jest przetworzenie padającego na niego promieniowania optycznego na sygnał elektryczny. Elementami detekcyjnymi mogą być fotodiody wykonane z materiałów półprzewodnikowych takich jak Si czy InGaAs.

W rozpatrywanym zakresie długości fal tj. 780 nm do 1600 nm pracują detektory wykonane na bazie krzemu (Si) oraz InGaAs. Typowe charakterystyki czułości dla fotodiód wykonanych takich materiałów, zostały przedstawione na rysunku 6.18.



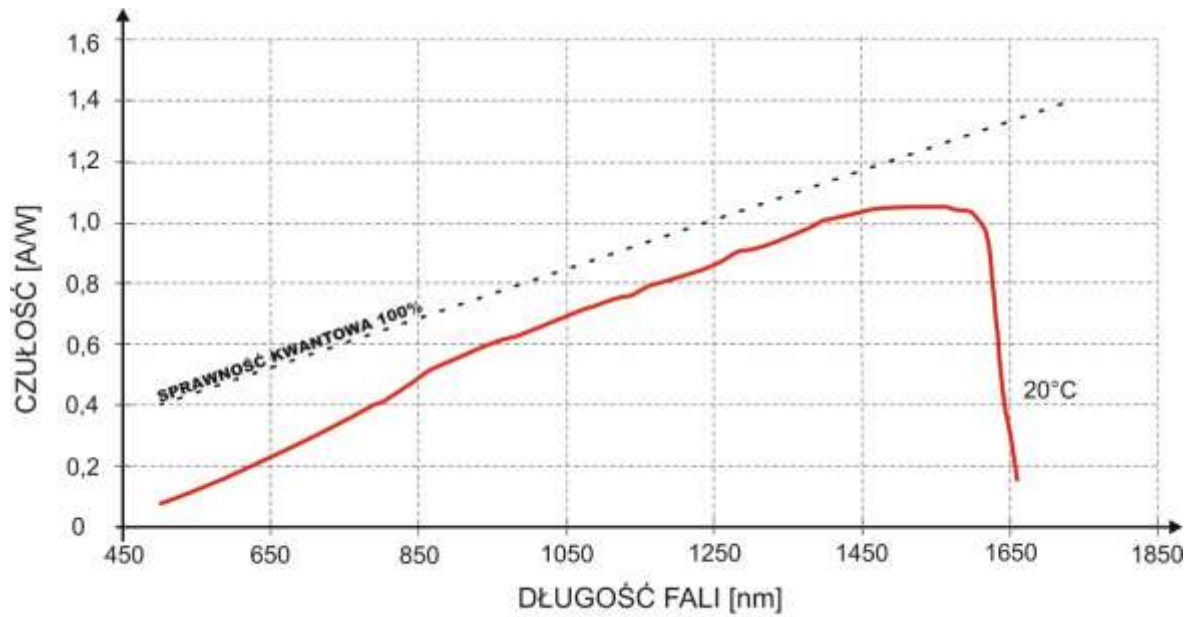
Rys. 6.18 Charakterystyki czułości spektralnej detektorów [67, 68]

a) na bazie krzemu i b) fotodiody InGaAs

W celu minimalizacji liczby detektorów, a co z tym się wiąże liczby torów analogowych, optymalnym rozwiązaniem byłoby zastosowanie detektora o widmowej charakterystyce czułości będącej sumą charakterystyk czułości spektralnej fotodiody krzemowej i fotodiody InGaAs.

Przykładem może być fotodiody IG17 oferowana przez firmę Laser Components [69]. Użycie tego komponentu do budowy sensora zmniejsza ilość koniecznych detektorów i związanych z nimi torów analogowych. Mniejsza liczba komponentów pozytywnie wpływa na wymiary mechaniczne, pobór energii ze źródła zasilania, koszty wykonania układu.

Charakterystyka spektralna czułości wyżej wymienionego detektora została przedstawiona na rysunku 6.19. Detektor o takiej charakterystyce posiada wystarczającą czułość, aby zastosować go do detekcji wszystkich rozpatrywanych źródeł promieniowania laserowego.



Rys. 6.19 Charakterystyka czułości widmowej detektora IG17

6.6.2 Konfiguracja układu pracy fotodiody

Fotodioda PIN może pracować w następujących trybach:

- foto konduktywnym;
- fotowoltaicznym.

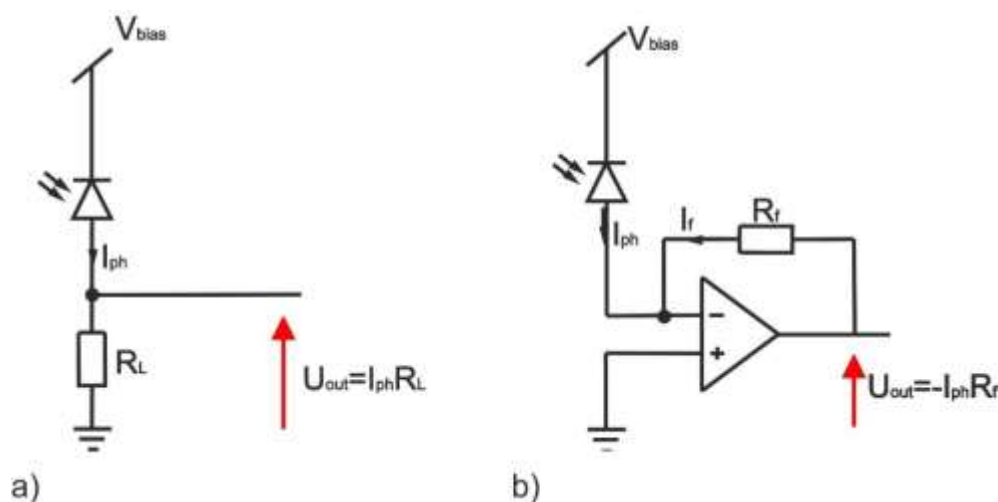
Zaletą trybu fotowoltaicznego jest brak prądu ciemnego detektora [70]. Umożliwia to detekcję sygnałów optycznych na niskim poziomie. Ze względu na dużą rezystancję wewnętrzną fotodiody oraz dużą pojemność wynikającą z braku napięcia polaryzującego, pasmo pracy takiego układu jest zależne od rezystancji obciążenia fotodiody. W celu uzyskania szerokiego pasma konieczne byłoby stosowanie rezystorów o małych wartościach rezystancji a tym samym zmniejszanie czułości napięciowej układu detekcji. Mimo że, fotowoltaiczny tryb pracy umożliwia detekcję promieniowania o niskim poziomie mocy, to jego pasmo pracy jest wąskie. W układach detekcyjnych SOPL, konieczna jest detekcja sygnałów w szerszym paśmie częstotliwości. W związku z powyższym taki tryb pracy detektora nie jest odpowiedni do układów detekcyjnych czujnika kąta padania promieniowania.

Tryb foto konduktywny realizowany jest z przedpięciem roboczym fotodiody mającym na celu zmniejszyć pojemność złączową fotodiody. W tym trybie pracy fotodioda zawsze spolaryzowana jest w kierunku zaporowym. Implikuje to konieczność

filtracji napięcia polaryzacji oraz uwzględnianie w parametrach szumowych czynnika szumu pochodzącego od prądu ciemnego.

Praktyczna realizacja tego trybu pracy detektora może odbywać się na dwa sposoby [55] przedstawione na rysunku 6.20:

- z pasywnym obciążeniem,
- w układzie wzmacniacza transimpedancyjnego,



Rys. 6.20 Układy pracy fotodiody a)układ fotodiody z pasywnym obciążeniem, b) układ z wzmacniaczem transimpedancyjnym

Pasywne obciążenie polega na podłączeniu szeregowego rezystora do fotodiody i pomiarze napięcia na nim, wywołanego przez fotoprąd. Należy zauważyć, iż stały poziom promieniowania padającego na powierzchnię aktywną, spowoduje przepływ stałego prądu i pojawienie się napięcia na rezystorze obciążającym. Wynikiem jest zmniejszenie napięcia przyłożonego do fotodiody a tym samym zmianę punktu pracy tego elementu. Zmniejszanie napięcia polaryzacji fotodiody PIN, może prowadzić w efekcie do wzrostu pojemności złączonej, w wyniku czego pasmo przenoszenia całego układu jest węższe.

Zastosowanie obciążenia aktywnego realizuje się poprzez podłączenie spolaryzowanej fotodiody do wejścia odwracającego wzmacniacza operacyjnego przy wejściu nieodwracającym podłączonym do potencjału masy. Z zasady działania wzmacniacza operacyjnego [71] wynika, iż na tym wejściu utrzymywany jest potencjał z wejścia nieodwracającego. Jest to potencjał stały na poziomie od kilku μV do kilku mV (zależny od typu wzmacniacza operacyjnego i temperatury pracy). Jego wartość

nie wpływa znacząco na zmianę napięcia polaryzującego fotodiode. W tej konfiguracji napięcie polaryzujące nie zależy od prądu generowanego przez fotodiode.

Fotoprąd wpływający do wejścia odwracającego wzmacniacza operacyjnego jest równoważony przez prąd generowany przez źródło napięciowe wyjścia wzmacniacza. Ponieważ, suma prądów wpływających do wejścia odwracającego jest równa 0 to napięcie na wyjściu wzmacniacza jest równe:

$$U_{out} = -R_f I_{ph} [V] \quad (6.53)$$

Porównując pasma układów z nr 6.20, które są następujące:

$$f_{-3db} = \frac{1}{2\pi R_L C_D} \text{ dla układu „a” rys. 6.20} \quad (6.54)$$

$$f_{-3db} = \sqrt{\frac{GBW}{2\pi R_f (C_D + C_{in})}} \text{ dla układu „b” rys. 6.20} \quad (6.55)$$

przy założeniu, że $C_D + C_{in} \approx C_D$ (gdzie C_d to pojemność fotodiody, C_{in} pojemność wejściowa wzmacniacza), uzyskuje się :

$$R_f = 2\pi GBW R_L^2 C_D [\Omega] \quad (6.56)$$

Oznacza to, że układy transimpedancyjne z zastosowaniem wzmacniacza operacyjnego pozwalają uzyskać pasmo równoważne układowi z biernym obciążeniem przy użyciu znacznie większej rezystancji, co przekłada się na wzrost czułości napięciowej.

Fotodiode jest jednym z kluczowych elementów proponowanego systemu SOPL. W założonej metodzie pomiarowej konieczna będzie detekcja określonego poziomu natężenia napromienienia padającego promieniowania. Stosowanie konfiguracji detektora z wzmacniaczem transimpedancyjnym generuje konieczność postawienia wymagań na wzmacniacz operacyjny. Najistotniejszymi parametrami wzmacniaczy operacyjnych są:

- 1) pole wzmocnienia wzmacniacza GBW,
- 2) impedancja wejściowa (pojemność wejściowa wzmacniacza oraz wartość rezystancji),
- 3) wartość prądów wejściowych wzmacniacza,
- 4) napięcie zasilania wzmacniacza,
- 5) wartości parametrów szumowych wzmacniacza.

Pole wzmocnienia ma wpływ na wartość rezystancji w pętli sprzężenia zwrotnego wzmacniacza transimpedancyjnego. Większe GBW przekłada się na większą wartość

rezystancji a tym samym na większą wartość sygnału. Wartość ta nie może jednak być zbyt duża ze względu na jej bezpośredni wpływ na pasmo szumów.

Parametry obwodów wejściowych wzmacniacza wpływają na charakterystykę częstotliwościową układu transimpedancyjnego. Rezystancja i pojemność wejściowa zależą od technologii wykonania elementów pary różnicowej w stopniu wejściowym wzmacniacza operacyjnego. Układy wykonane w technologii CMOS lub FET mają znacząco większe rezystancje wejściowe oraz zdecydowanie mniejsze prądy wpływające (wypływające) do wejścia. Z tego względu są bardziej korzystne w zastosowaniu jako wzmacniacze transimpedancyjne [72].

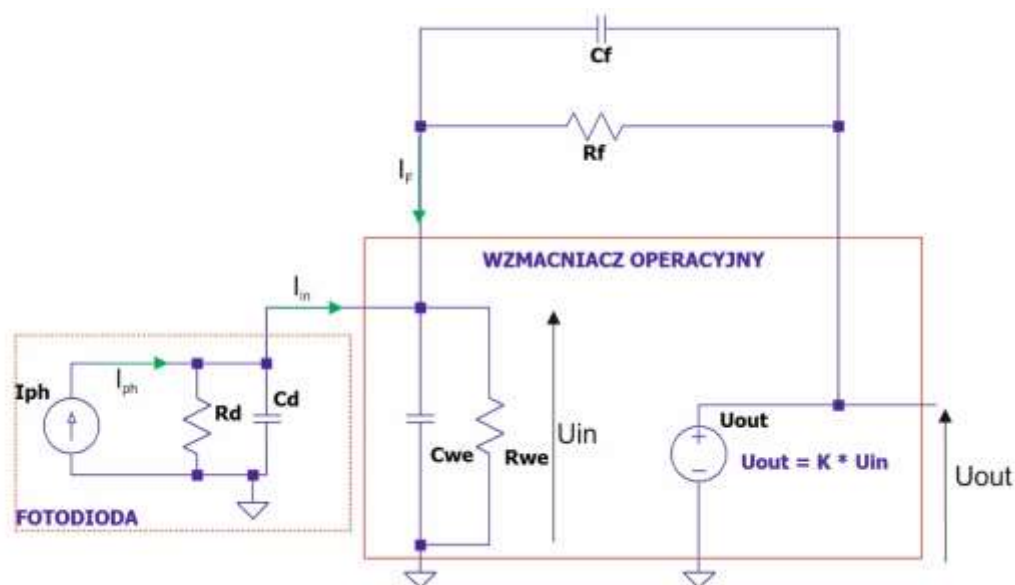
Pojemność wejściowa wzmacniacza jest istotnym elementem, ponieważ w połączeniu równoległym z pojemnością fotodiody stanowi o parametrach częstotliwościowych współczynnika transimpedancji. W przypadku wybranych uprzednio fotodiod serii IG17 wartość ich pojemności zależy od powierzchni i zmienia się w zakresie od kilku do kilkuset pikofaradów. Stosując wzmacniacz operacyjny o pojemności wejściowej rzędu kilku piko faradów głównym czynnikiem pojemnościowym będzie fotodioda.

Wartości parametrów szumowych wzmacniacza mają istotny wpływ na wartość skuteczną szumu na wyjściu. Celowym jest wybieranie wzmacniaczy o możliwej najniższej wartości współczynników szumowych. Widmowa gęstość szumów prądowych wpływa tylko w paśmie sygnału na wartość skuteczną szumu na wyjściu. Napięciowa widmowa gęstość szumów przenosi się na wyjście w innym paśmie niż pasmo sygnału. Pasma przenoszenia wymienionego powyżej szumu zależy w dużym stopniu od wartości pojemności wejściowych i pojemności w sprzężeniu zwrotnym.

Odpowiedni zakres napięć wyjściowych jest potrzebny ze względu na sposób sprzężenia fotodiody oraz wzmacniacza operacyjnego. Jest to układ stało prądowy, pracujący w obecności wolno zmiennego tła. Wartość fotoprądu pochodzącego od tła powoduje spadek napięcia na rezystancji sprzężenia zwrotnego. Jeśli napięcie na tym rezystorze osiąga wartości porównywalne z napięciem zasilania układ nie będzie pracował w zakresie liniowym.

Wzmacniacz transimpedancyjny jest zespołem złożonym z dwóch komponentów, fotodiody i wzmacniacza operacyjnego. Każdy z tych komponentów posiada wartości parametrów rozproszonych. W celu analizy wpływu poszczególnych komponentów na charakterystykę częstotliwościową modułu transimpedancji, konieczne jest określenie podstawowych komponentów i ich wartości w analizowanym obwodzie.

W rozpatrywanym przypadku ograniczono się do analizy parametrów rezystancyjnych i pojemnościowych przyjmując założenie, że wartości indukcyjności zarówno szeregowych jak i wzajemnych są bardzo małe i można je pominąć. Na podstawie tych założeń został opracowany model wzmacniacza transimpedancyjnego przedstawiony na rysunku 6.21.



Rys. 6.21 Model wzmacniacza transimpedancyjnego

Zastępując elementy elektroniczne układu transimpedancyjnego ekwiwalentnymi impedancjami wynikającymi z wartości parametrów rozproszonych, uzyskuje się obwód jak na rysunku 6.22, z którego można wyznaczyć zespolony współczynnik transimpedancji. Podczas uproszczenia przyjęto, że:

$$Z_F(s) = \frac{R_F}{1 + sR_FC_F} \quad (6.57)$$

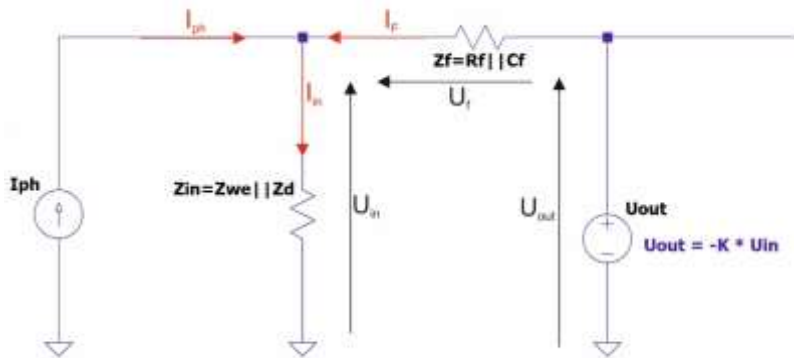
$$Z_D(s) = \frac{R_D}{1 + sR_DC_D} \quad (6.58)$$

$$Z_{we}(s) = \frac{R_{we}}{1 + sR_{we}C_{we}} \quad (6.59)$$

$$Z_{in}(s) = \frac{Z_{we}(s)Z_D(s)}{Z_D(s) + Z_{we}(s)} \quad (6.60)$$

Ponieważ wartości rezystancji fotodiod wykonanych z InGaAs są bardzo duże (powyżej 10 MΩ) a wzmacniacz operacyjny powinien mieć bardzo mały prąd wejściowy (bardzo duża rezystancja wejściowa) to zależność (6.60) można przybliżyć jako:

$$Z_{in}(s) = \frac{1}{s(C_{we} + C_d)} \quad (6.61)$$



Rys. 6.22 Uproszczony model wzmacniacza transimpedancyjnego.

Na podstawie następujących założeń przedstawionych na rysunku 6.22:

$$I_{ph}(s) + I_F(s) = I_{in}(s) \quad (6.62)$$

$$U_{in}(s) + U_F(s) - U_{out}(s) = 0 \quad (6.63)$$

oraz

$$U_{out}(s) = -U_{in}(s)K(s) \quad (6.64)$$

można wykazać, że współczynnik transimpedancji jest równy:

$$Z_T(s) = \frac{U_{out}(s)}{I_{ph}(s)} = \frac{-K(s)Z_{in}(s)Z_f(s)}{K(s)Z_{in}(s) + Z_{in}(s) + Z_f(s)} \quad (6.65)$$

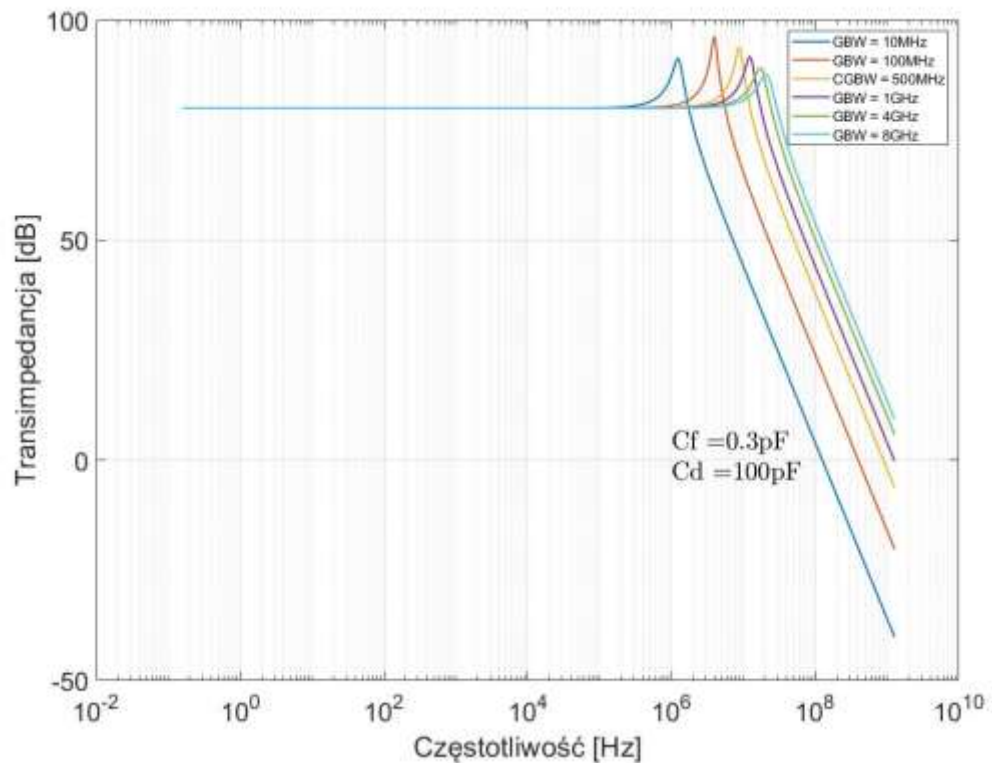
Współczynnik wzmocnienia $K(s)$ wzmacniacza operacyjnego zależy jest od pola wzmocnienia wzmacniacza, czyli od jego wzmocnienia stała prądowego z otwartą pętlą i częstotliwości granicznej [73]:

$$K(s) = \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_0}} \quad (6.66)$$

Gdzie A_0 jest wzmocnieniem stałoprądowym a ω_0 pulsacją graniczną wzmacniacza operacyjnego. Pulsację graniczną ω_0 można wyznaczyć z zależności [73, 74]:

$$\omega_0 = 2\pi \frac{GBW}{A_0} \quad (6.67)$$

Na podstawie zależności 6.65 istnieje możliwość uzyskania informacji o wpływie poszczególnych komponentów na charakterystykę modułu transimpedancji w funkcji częstotliwości. Dla przykładowych wartości (R_f równe $10 \text{ k}\Omega$ oraz pojemność fotodiody $C_d = 100 \text{ pF}$) przedstawiono wpływ pola wzmocnienia wzmacniacza operacyjnego na charakterystykę modułu transimpedancji.



Rys. 6.23 Charakterystyka częstotliwościowa modułu transimpedancji wzmacniacza transimpedancyjnego dla różnych wartości pola wzmocnienia wzmacniacza operacyjnego

Moduł transimpedancji w funkcji częstotliwości zależy także od współczynnika GBW. Wraz z wzrostem wartości pojemności rośnie pasmo przenoszenia. Dodatkowo można zauważyć, że moduł transimpedancji posiada lokalne maksimum umieszczone w zakresie wysokich częstotliwości. Podbicie amplitudy sygnału na wyjściu wzmacniacza dla tej częstotliwości wraz z przesunięciem fazy może skutkować niestabilnością układu.

Wzmacniacz operacyjny z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego ma pasmo przenoszenia zależne nie tylko od własnych parametrów częstotliwościowych, ale także od obwodów wejściowych i ustawionego wzmocnienia [75]. W przypadku wzmacniacza skonfigurowanego z fotodiodą jako moduł transimpedancyjny pasmo to jest równe [76]:

$$f_{-3dB} = \sqrt{\frac{GBW}{2\pi R_f (C_d + C_{in})}} [Hz] \quad (6.68)$$

gdzie:

GBW – pole wzmocnienia wzmacniacza

R_f – rezystancja w sprzężeniu zwrotnym

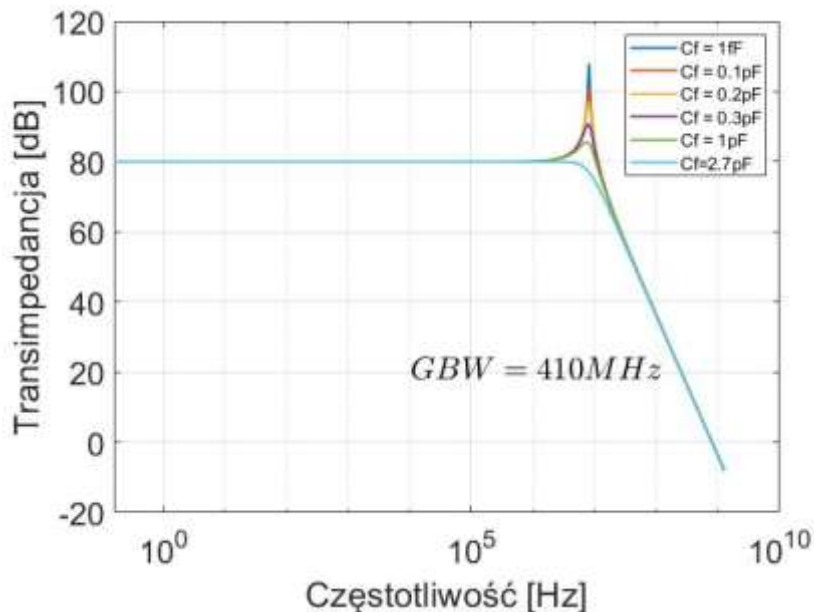
C_d – pojemność fotodiody

C_{in} – pojemność wejściowa wzmacniacza widziana z wejścia odwracającego

W celu zapewnienia stabilności wzmacniacza poprzez zmniejszenie efektu podbicia wzmocnienia w zakresie wysokich częstotliwości konieczne jest ograniczenie wzmocnienia. W tym celu stosuje się pojemność połączoną równoległe z rezystancją sprzężenia zwrotnego. Jej wartość można wyznaczyć z zależności:

$$C_f = \frac{1}{2\pi R_f f_{-3dB}} [F] \quad (6.69)$$

Zastosowanie pojemności w sprzężeniu zwrotnym pozwala na zmniejszenie efektu „Gain Peaking” i ustabilizowanie punktu pracy wzmacniacza operacyjnego. Przykładowe charakterystyki częstotliwościowe modułu transimpedancji zostały przedstawione na rysunku 6.24.



Rys. 6.24 Wpływ wartości pojemności kompensującej na charakterystykę częstotliwościową modułu transimpedancji

Pojemności fotodiody przy określonym przepięciu roboczym będą decydować o charakterystyce częstotliwościowej transimpedancji. Parametry wzmacniacza operacyjnego muszą być tak dobrane, aby nie zniekształcały tej charakterystyki. Pole wzmocnienia wzmacniacza powinno mieć wartość odpowiednią, aby uzyskać wymagane pasmo wynikające z założonego pasma sygnału.

Wzmacniacze operacyjne z napięciowym sprzężeniem zwrotnym, o dużym GBW (wyższym niż 1 GHz) zazwyczaj mają napięcie zasilania o maksymalnym napięciu różnicowym 5 V. W przypadku wzmacniaczy pracujących z napięciami zasilania ± 5 V wartości GBW nie przekraczają 1 GHz. W tej grupie wzmacniaczy, te o najmniejszych współczynnikach szumowych oraz najmniejszych prądach wejściowych mają GBW na poziomie do 500 MHz np. ADA4817 [77].

6.7 Określenie SNR na wyjściu toru detekcyjnego

6.7.1 Określenie pasma sygnału

Pasmo sygnału użytecznego jest zdefiniowane przez kształt impulsu fotoprądu. Przyjmując, że kształt impulsu jest przybliżony krzywą dzwonową, to pasmo jest określone jako [78]:

$$BW = \frac{1}{2\tau_i} [Hz] \quad (6.70)$$

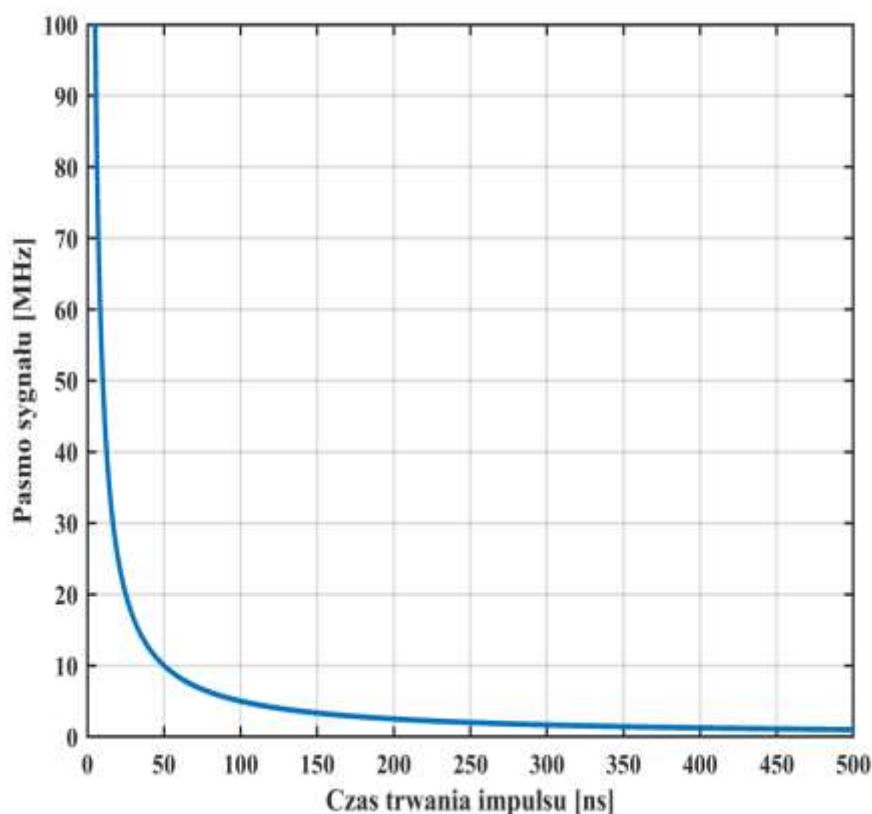
gdzie:

τ_i – jest czasem trwania impulsu na połowie wartości maksymalnej;

Powyższa zależność prowadzi do wyników, które zostały przedstawione na rysunku 6.25.

Źródłami emitującymi najniższe moce są dalmierze, w których zastosowano półprzewodnikowe diody laserowe. Czas trwania impulsów dla tych źródeł mieści się w zakresie od 30 ns do 500 ns, co odpowiada zakresowi częstotliwości od 1 MHz do 16,7 MHz.

Dalmierze i podświetlacze zbudowane w oparciu o lasery wykonane na ciałach stałych emitują bardzo duże moce. Czas trwania impulsów laserowych generowanych przez takie urządzenia zawiera się w przedziale od kilku do dwudziestu nanosekund. Pasmo układów detekcyjnych dla takich sygnałów powinno wynosić ok. 500 MHz.



Rys. 6.25 Pasmo impulsu o kształcie krzywej dzwonowej określonej przez czas trwania impulsu na połowie wartości maksymalnej

Szerokie pasmo odbiornika (jak to zostanie wykazane w dalszej części pracy) powoduje pogorszenie stosunku sygnału do szumu podczas odbioru impulsów o paśmie znacznie węższym. W przypadkach gdy natężenie napromienienia pochodzące od źródła emitującego impulsy o małej mocy i długim czasie trwania, jest mała (np. z odległości będącej zasięgiem pomiarowym np. dalmierza „podszumowego”), odbiorniki systemu SOPL pracujące w szerokim paśmie mogą nie wykryć przychodzących impulsów laserowych, gdyż będą one poniżej poziomu szumów.

Wartości natężenia napromienienia od dalmierzy i podświetlaczy z laserami na ciele stałym są bardzo duże (tabela 6.2). Nawet w przypadku, gdy pasmo odbiornika SOPL jest węższe to poziom sygnału od takich źródeł jest na tyle duży, że jego detekcja jest możliwa.

Zasadnym jest ustalenie pasma torów odbiorczych tak aby pasmo odbiornika było jak najbardziej zbliżone do pasma impulsów laserowych o niewielkich mocach i czasach trwania od 50 ns do 500 ns. Zatem pasmo układu odbiornika może wynosić ok. 10MHz.

6.7.2 Oszacowanie poziomu promieniowania tła

Systemy SOPL pracują w warunkach zewnętrznych z zastanymi warunkami oświetleniowymi. Głównym, naturalnym, źródłem światła jest słońce. W zależności od pory roku, szerokości geograficznej i warunków związanych z atmosferą, ilość energii jaka pada na powierzchnię jednostkową nie jest stała [79].

Urządzenie SOPL powinno poprawnie pracować nawet przy maksymalnej ekspozycji na promieniowanie słoneczne. Oznacza to, że powierzchnia detektora oświetlona jest w całości promieniowaniem słonecznym padającym prostopadle.

Przyjmując, że słońce zachowuje się jak ciało doskonale czarne w temperaturze 5900K [80] z maksimum emisyjności znajdującym się w pobliżu długości fali ok. 490 nm (na powierzchni ziemi 530 nm). Widmowy rozkład gęstości mocy promieniowania słonecznego posiada liczne maksima i minima lokalne. Wynika to z absorpcji atmosfery, której to składniki pochłaniają określone długości fal powodując powstawanie okien transmisyjnych [55].

Promieniowanie tła jest promieniowaniem wolnozmiennym, powodującym stały przepływ prądu przez detektor. W wyniku tego występują dwa zjawiska, które w negatywny sposób wpływają na parametry układów detekcyjnych.

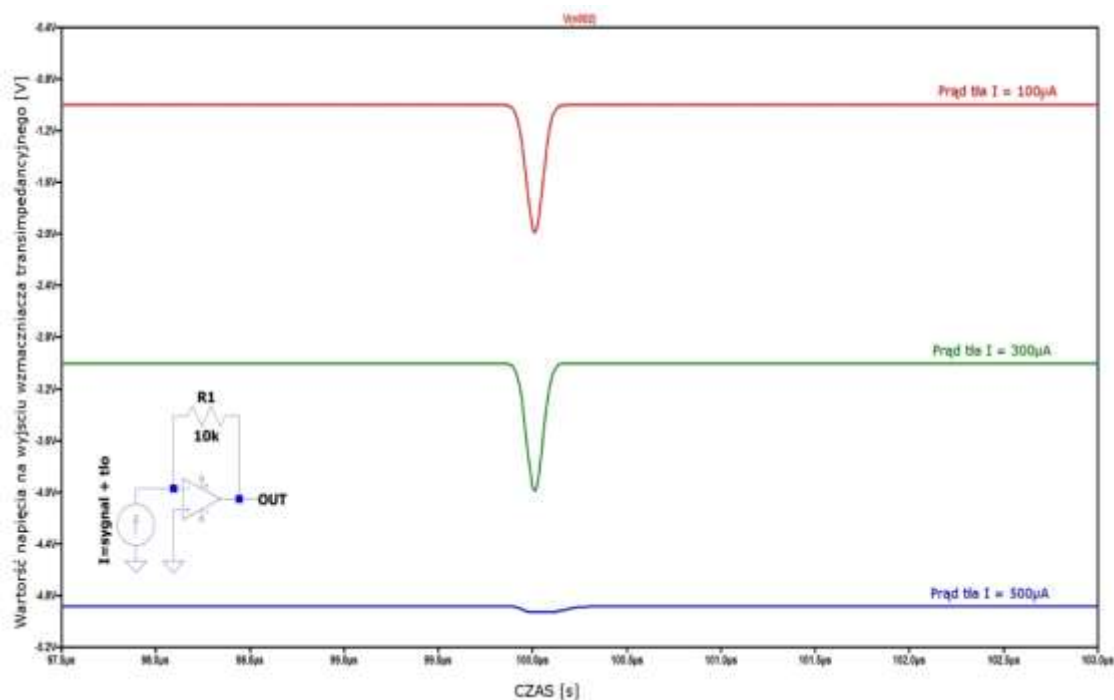
Stały przepływ prądu przez detektor powoduje powstanie dodatkowego szumu o wartości skutecznej [81]:

$$i_{sz} = \sqrt{2qI_{tla}BW} [A] \quad (6.71)$$

Gdzie: q jest ładunkiem elektronu, I_{tla} jest prądem wywołanym przez oświetlenie zastane a BW jest pasmem sygnału.

Stały poziom promieniowania padającego na detektor powoduje powstanie stałego napięcia na wyjściu wzmacniacza transimpedancyjnego.

Wpływ fotoprądu pochodzącego od tła zostanie omówiony w dalszej części. W przypadku zbyt dużych prądów i zbyt dużej wartości rezystancji w sprzężeniu zwrotnym, stopień wyjściowy wzmacniacza operacyjnego będzie pracował w zakresie bliskim ujemnym napięciom zasilania. W skrajnym przypadku wzmacniacz może ulec „nasyceciu”. Jest to zjawisko negatywne, gdyż zmniejsza ono zakres dynamiczny odpowiedzi układu transimpedancyjnego. Powyższą sytuację ilustruje rysunek 6.26, gdzie na wejście układu podano sumę sygnału użytecznego oraz pewien poziom stały reprezentujący promieniowanie tła.



Rys. 6.26 Symulacja obrazująca zmniejszenie zakresu dynamicznego na wyjściu wzmacniacza transimpedancyjnego dla sygnału o wartości maksymalnej $100 \mu\text{A}$ i prądu tła

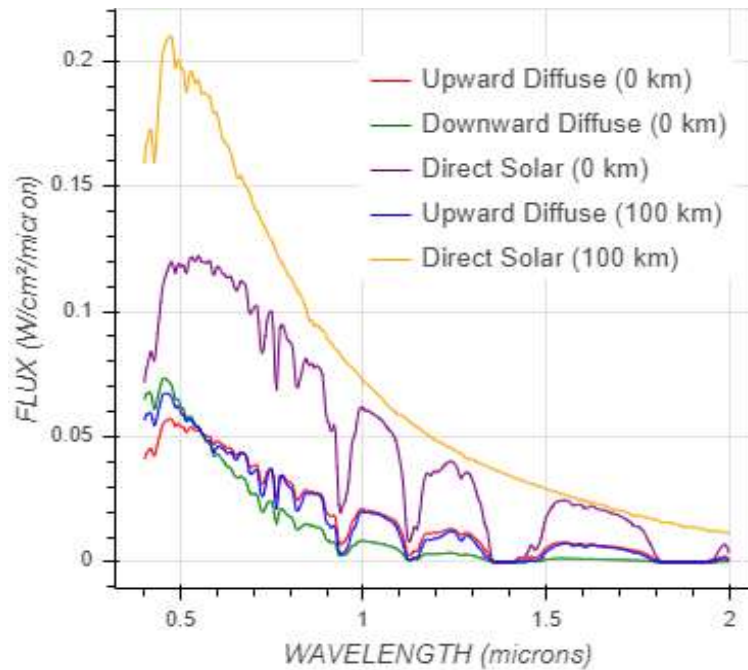
Aby ograniczyć szkodliwy wpływ promieniowania tła należy zaprojektować odpowiednie filtry optyczne oraz zastosować sprzężenie pojemnościowe pomiędzy stopniami wzmacniającymi.

Do tego celu konieczna jest analiza wartości fotoprądu generowanego przez naturalne oświetlenie. Widmową charakterystykę natężenia napromienienia słońca dla określonych warunków atmosferycznych można pozyskać przy pomocy programu MODTRAN [82].

Przy założonych warunkach:

- aerozol wiejski,
- widzialność 23 km,
- pora roku letnia (średnia szerokość geograficzna).

Uzyskano wartości strumienia świetlnego słońca na powierzchni 1 cm^2 . W nawiązaniu do założenia, że promieniowanie pochodzące od słońca pada bezpośrednio do analiz przyjęto krzywą oznaczoną kolorem fioletowym. Spektralną charakterystykę promieniowania tła ilustruje rysunek 6.27.



Rys. 6.27 Iradiancja słońca w funkcji długości fali uzyskana przy pomocy programu MODTRAN

Poziom prądu generowanego przez fotodiodeę pochodzącego od promieniowania tła zależy od wielkości jej powierzchni fotoczułej, spektralnej charakterystyki czułości oraz charakterystyki spektralnej natężenia napromienienia. W najmniej korzystnym przypadku należy założyć, iż cała powierzchnia detektora oświetlona będzie promieniowaniem słonecznym.

Wartość fotoprądu będzie wówczas równa:

$$I_{photo} = \int_0^{\infty} S_f(\lambda) I_{sol}(\lambda) S_D d\lambda \quad [A] \quad (6.72)$$

gdzie:

$S_f(\lambda)$ - czułość fotodiody w funkcji długości fali $[\frac{A}{W}]$,

$I_{sol}(\lambda)$ - spektralna charakterystyka natężenia napromienienia słońca $[\frac{W}{m^2 \cdot \mu m}]$,

S_D - powierzchnia fotodiody $[m^2]$.

Ponieważ czułość fotodiody $S_f(\lambda)$ jest określona w zakresie λ_1 do λ_2 (a w pozostałym zakresie bardzo mała) wyrażenie na wartość fotoprądu pochodzącego od tła przyjmuje postać:

$$I_{ph_{tlo}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_f(\lambda) I_{sol}(\lambda) S_D d\lambda [A] \quad (6.73)$$

Dla tak zdefiniowanych warunków oszacowane wartości fotoprądu dla różnych powierzchni detekcyjnych zostały przedstawione w tabeli 6.5:

Tabela 6.5 Wartość prądu generowanego przez tło.

Lp	Średnica powierzchni detekcyjnej (μm)	Wartość fotoprądu tła (A)
1	250	$13,8 \cdot 10^{-6}$
2	500	$55,5 \cdot 10^{-6}$
3	1000	$222 \cdot 10^{-6}$
4	1300	$375 \cdot 10^{-6}$
5	2000	$888 \cdot 10^{-6}$
6	3000	$2000 \cdot 10^{-6}$

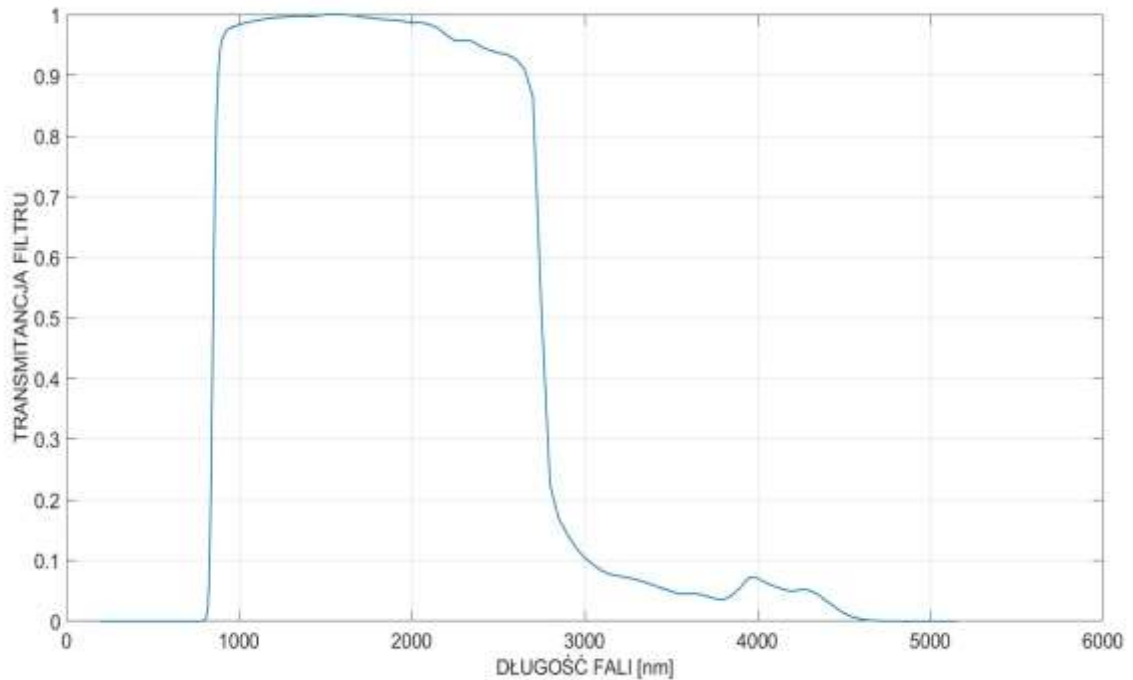
6.7.3 Charakterystyka transmisyjna filtru optycznego sensora

W celu minimalizacji wpływu promieniowania tła zdecydowano się na zastosowanie odpowiednio dobranego filtru optycznego. Jego zadaniem jest ograniczenie przepuszczanego pasma optycznego do przedziałów, w których pracują źródła promieniowania laserowego występujące na polu walki.

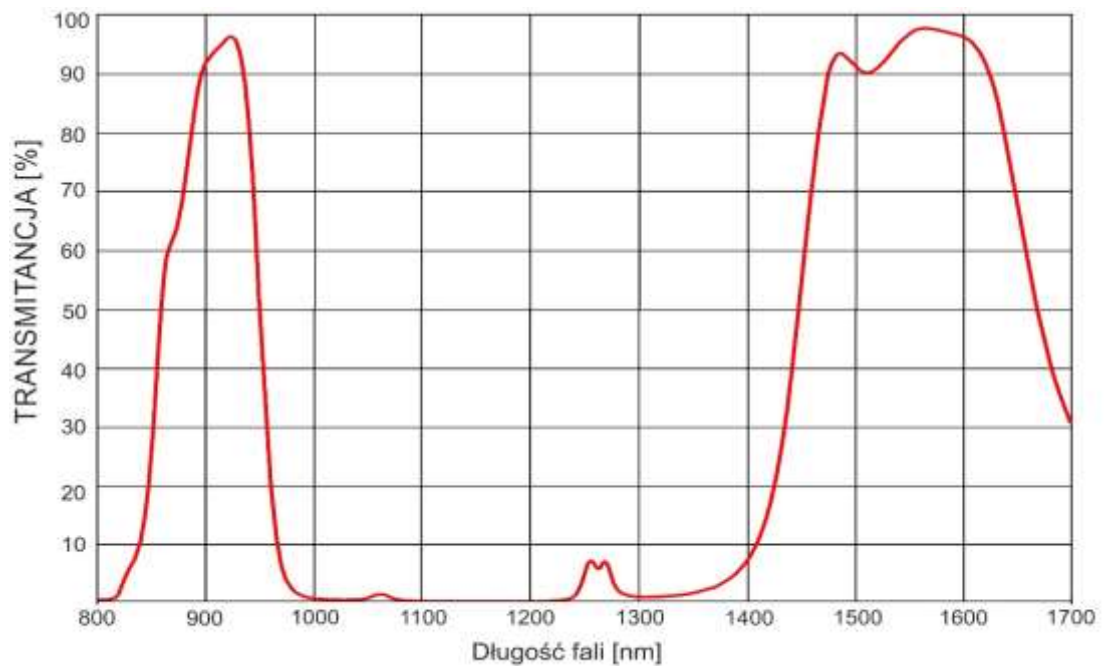
Spektralna charakterystyka filtru, który posiada odpowiednią wartość współczynnika transmisji w zakładanym paśmie optycznym została przedstawiona na rysunku 6.28. Jest to filtr objętościowy, wykonany ze szkła barwnego RG850 firmy Schott [83] o grubości 3 mm.

Dalszej minimalizacji wpływu poziomu tła można dokonać poprzez modyfikację charakterystyki filtru RG850. Polega ona na nałożeniu odpowiednich warstw na podłoże wykonane z wymienionego wyżej materiału, a mających na celu minimalizację

składowych z widma promieniowania tła, nieużytecznych z punktu widzenia detekcji promieniowania od źródeł wojskowych. Wynikową charakterystykę transmisyjną przedstawiono na rysunku 6.29.



Rys. 6.28 Charakterystyka transmisji filtra wykonanego ze szkła barwnego RG850



Rys. 6.29 Wynikowa charakterystyka transmisyjna filtra .

Uwzględniając wynikową spektralną charakterystykę transmisji filtra, spektralną charakterystykę czułości detektora oraz charakterystykę moc promieniowania tła uzyskuje się wartości fotoprądu przedstawione w tabeli 6.6.

Tabela 6.6 Wartości fotoprądu pochodzącego od tła z zastosowaniem filtra optycznego

Lp.	Średnica powierzchni detekcyjnej [μm]	Bez filtra optycznego Wartość fotoprądu tła [μA]	Z filtrem optycznym Wartość fotoprądu tła [μA]
1	250	13,8	4,1
2	500	55,5	16,4
3	1000	222	65,7
4	1300	375	111
5	2000	888	263
6	3000	2000	592

Przedstawione w tabeli 6.6 wartości pozwalają stwierdzić, że zastosowanie filtra optycznego zmniejsza fotoprąd pochodzący od tła ponad trzykrotnie.

6.7.4 Określenie stosunku sygnał szum na wyjściu wzmacniacza pierwszego stopnia

Każdy element elektroniczny występujący w układzie detekcyjnym jest źródłem szumów. W zależności od miejsca w układzie oraz roli jaką pełni, jego udział jest mniejszy lub większy. Pierwszym elementem wpływającym na szum jest fotodioda, generująca szumy śrutowe o wartości skutecznej określonej zależnością:

$$i_{sz} = \sqrt{2q(I_d + I_{ph} + I_{tla})BW} [A] \quad (6.74)$$

gdzie:

q - ładunek elementarny

I_d - prąd ciemny

I_{ph} - fotoprąd pochodzący od sygnału użytecznego

I_{tla} - wartość fotoprądu pochodzącego od tła.

W tabeli 6.7 przedstawione zostały wartości typowych parametrów fotodiod PIN (serii IG17) mających wpływ na wartość pasmo układu detekcji oraz prąd szumów.

Tabela 6.7 Zależność prądu ciemnego fotodiody od jej pola powierzchni detekcyjnej

Lp.	Średnica powierzchni detekcyjnej (μm)	Pojemność fotodiody (pF) (V _r = 5V)	Prąd ciemny (nA) (V _r = 5V)	
		Typ	Typ	Max
1	250	6	0,1	1
2	500	15	0,3	2
3	1000	70	1	10
4	1300	100	2	20
5	2000	220	3	30
6	3000	500	7	75

Na podstawie tabeli nr 6.6 zawierającej wartości prądu pochodzącego od tła oraz tabeli 6.7 zawierającej wartości prądu ciemnego fotodiody można określić widmową gęstość prądu szumów według zależności:

$$i_{sz} = \sqrt{2q(I_d + I_{ph} + I_{tla})} \left[\frac{A}{\sqrt{Hz}} \right] \quad (6.75)$$

Wyniki obliczeń dla fotodiod o różnych powierzchniach zostały przedstawione w tabeli 6.8. Do analizy przyjęto maksymalną wartość prądu ciemnego.

Tabela 6.8 Widmowa gęstość prądu szumów fotodiody

Lp.	Średnica powierzchni detekcyjnej (μm)	Widmowa gęstość prądu szumów fotodiody ($\frac{A}{\sqrt{Hz}}$)
1	250	$2,10 \times 10^{-12}$
2	500	$2,29 \times 10^{-12}$
3	1000	$4,59 \times 10^{-12}$
4	1300	$5,96 \times 10^{-12}$
5	2000	$9,18 \times 10^{-12}$
6	3000	$1,38 \times 10^{-11}$

Wartość skuteczną napięcia szumów pochodzącą od prądu szumów fotodiody (uwzględniając ekwiwalentne pasmo szumowe [84]) można obliczyć z zależności:

$$u_{dsz} = R_f i_{sz} \sqrt{\frac{\pi}{2} BW} [V] \quad (6.76)$$

gdzie BW jest rozpatrywanym pasmem sygnału.

W wzmacniaczu transimpedancyjnym, podstawowym źródłem szumu termicznego jest rezystor w sprzężeniu zwrotnym. Wartość tego szumu jest określana przy pomocy zależności [85]:

$$u_{szth} = \sqrt{2\pi kTR_f BW} [V] \quad (6.77)$$

gdzie:

k - stała Boltzmana [J/K]

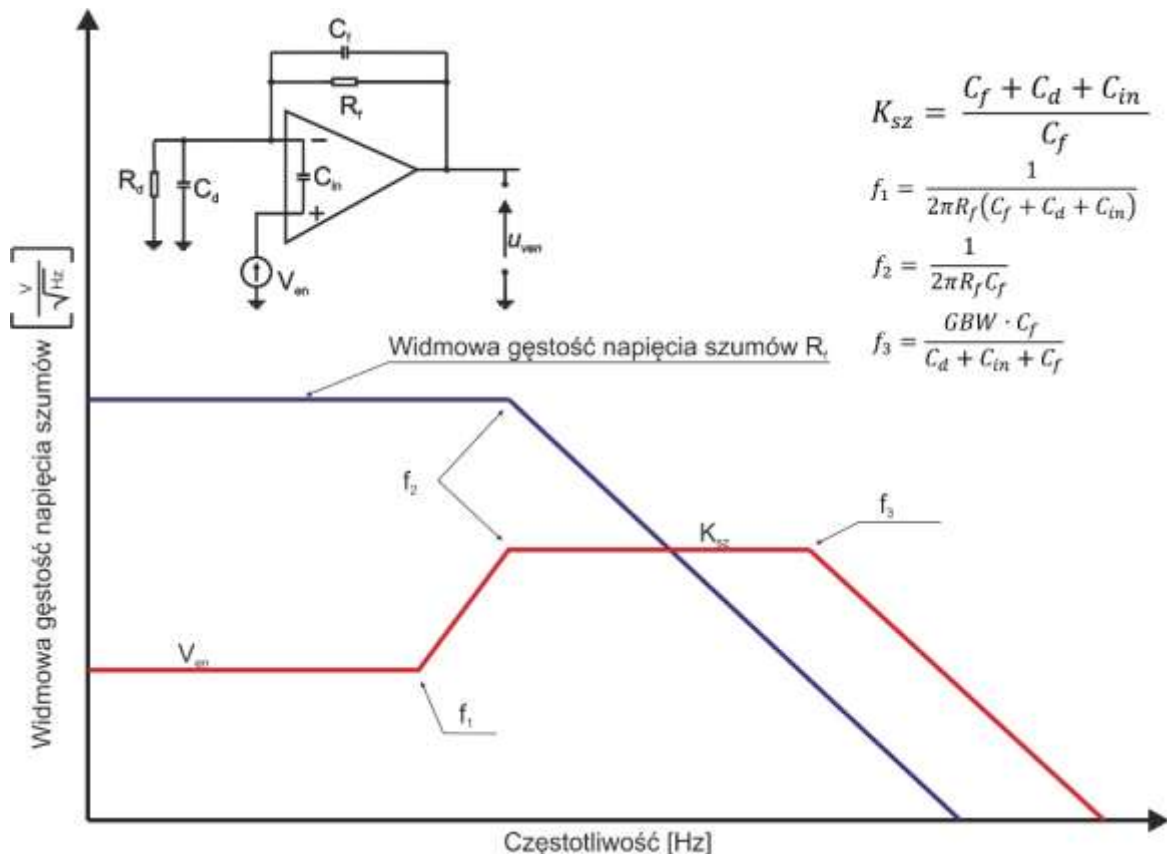
T – temperatura [K]

Wzmacniacz operacyjny także jest źródłem szumu. W kartach katalogowych podawane są parametry szumowe wzmacniacza opisujące widmową gęstość napięcia i prądu szumów.

Pasmo szumu we wzmacniaczu transimpedancyjnym jest inne niż pasmo sygnału [86]. Wynika to z faktu, iż napięciowe źródło szumu wzmacniacza jest odniesione do wejścia nieodwracającego. Dla tego źródła elementy sprzężenia zwrotnego wraz

z elementami rozproszonymi fotodiody konfigurują wzmacniacz operacyjny jako wzmacniacz nieodwracający. Wartość rezystancji fotodiody jest bardzo duża w porównaniu z wartością rezystancji sprzężenia zwrotnego, zatem w zakresie niskich częstotliwości szum napięciowy nie jest wzmacniany. W przypadku częstotliwości wyższych, ujawnia się wpływ pojemności fotodiody, wejściowych wzmacniacza oraz pojemności w sprzężeniu zwrotnym.

Przykładowa charakterystyka spektralna została przedstawiona na rysunku 6.30.



Rys. 6.30 Szumowa charakterystyka spektralna wzmacniacza transimpedancyjnego

Na rysunku 6.31 zaznaczone zostały częstotliwości graniczne. Wynikają one z konstrukcji wzmacniacza transimpedancyjnego oraz pojemności łączowej fotodiody i obwodów wejściowych wzmacniacza operacyjnego.

Częstotliwość graniczna f_1 , jest częstotliwością, powyżej której szumy napięciowe wzmacniacza są mnożone przez wzmocnienie wzmacniacza w konfiguracji nieodwracającej. Współczynnik wzmocnienia wartości szumów powyżej tej częstotliwości jest głównie zależny od wartości pojemności fotodiody, pojemności sprzężenia zwrotnego oraz pojemności wejściowych. Dla częstotliwości większych niż częstotliwości f_1 , wartość wzmocnienia szumu zaczyna narastać do wartości K_{sz} . Wartości

parametrów f_1 oraz K_{sz} można obliczyć z zależności przedstawionych w równaniach (6.78) oraz (6.79).

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R_f (C_f + C_d + C_{in})} [Hz] \quad (6.78)$$

oraz

$$K_{sz} = \frac{C_f + C_d + C_{in}}{C_f} \quad (6.79)$$

Poniżej częstotliwości f_1 wzmacniacz operacyjny przenosi szumy napięciowe na wyjście bez wzmocnienia.

Częstotliwość graniczna f_2 determinuje pasmo szumu termicznego oraz określa częstotliwość, przy której wzmocnienie szumu K_{sz} osiąga maksimum. Wartość określająca wymieniony powyżej parametr można wyznaczyć z następującej zależności:

$$f_2 = \frac{1}{2\pi R_f C_f} [Hz] \quad (6.80)$$

Częstotliwość graniczna wzmocnienia szumu f_3 może znajdować się poza pasmem transimpedancji. Wyznacza ona punkt na charakterystyce wzmocnienia szumu, w którym to współczynnik określający wzmocnienie szumu spada o -3dB względem wartości maksymalnej. Wartość częstotliwości f_3 określana jest z zależności:

$$f_3 = \frac{GBW \cdot C_f}{C_d + C_{in} + C_f} [Hz] \quad (6.81)$$

W zależności (6.81) wskazano kluczowe parametry mające wpływ na częstotliwość (-3dB) określającą pasmo wzmocnienia szumu. Współczynnik wzmocnienia określony został w zależności (6.79).

Pasmo transimpedancji określone jest wzorem (6.82) i jest tożsame z częstotliwością f_2

$$f_{-3dB} = \sqrt{\frac{GBW}{2\pi R_f (C_d + C_{in})}} [Hz] \quad (6.82)$$

gdzie:

R_f – wartość rezystancji w sprzężeniu zwrotnym

C_d – pojemność fotodiody przy napięciu polaryzującym V_r

C_{in} – pojemność wejściowa wzmacniacza operacyjnego

GBW – pole wzmocnienia wzmacniacza

Na podstawie powyższych założeń można uzyskać poszczególne składowe szumowe układu transimpedancyjnego pochodzące od wzmacniacza:

$$u_{ien} = I_{en} R_f \sqrt{\frac{\pi}{2} f_2} [V] \quad (6.83)$$

gdzie:

u_{ien} - wartość skuteczna napięcia szumów na wyjściu wzmacniacza [V]

I_{en} - widmowa gęstość prądu szumów odniesiona do wejścia odwracającego wzmacniacza operacyjnego [$\frac{A}{\sqrt{Hz}}$]

$$u_{ven} = V_{en} K_{sz} \sqrt{\frac{\pi}{2} f_3} [V] \quad (6.84)$$

gdzie:

u_{ven} - wartość skuteczna napięcia szumów na wyjściu wzmacniacza pochodząca z szumów napięciowych wzmacniacza [V]

V_{en} - widmowa gęstość napięcia szumów odniesiona do wejścia nieodwracającego wzmacniacza operacyjnego [$\frac{V}{\sqrt{Hz}}$]

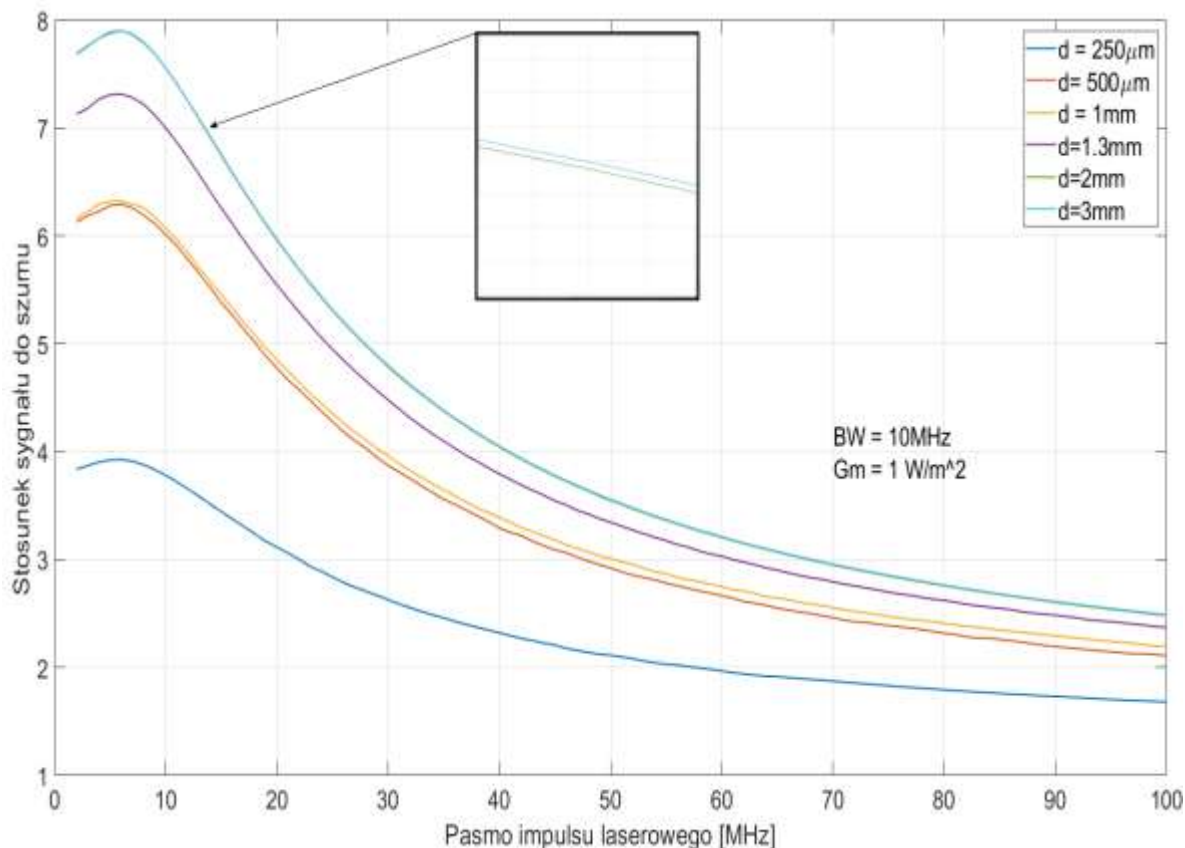
Wartość skuteczna napięcia szumów na wyjściu wzmacniacza operacyjnego jest równa:

$$u_{szum} = \sqrt{u_{dsz}^2 + u_{szth}^2 + u_{ien}^2 + u_{ven}^2} [V] \quad (6.85)$$

Według powyższych założeń dokonano analizy stosunku sygnału do szumu na wyjściu wzmacniacza operacyjnego w funkcji pasma impulsu wejściowego. Uzyskaną miarą jest iloraz wartości maksymalnej do skutecznego napięcia szumów na wyjściu.

$$SNR = \frac{\max(|U_{out}|)}{u_{szum}} \quad (6.86)$$

Wyniki uzyskane przy pomocy środowiska LTSpice [87] zostały zaprezentowane na rysunku 6.31. Program symulacyjny został zamieszczony w załączniku nr 4.



Rys. 6.31 Wykres SNR w funkcji pasma sygnału

W przyjętym modelu służącym do określenia stosunku sygnału do szumu zastosowano wzmacniacz operacyjny ADA4817. Analizę przeprowadzono dla czułości fotodiody IG17 typowej dla długości fali 905 nm (0.45 A/W). Ze względu na wzrost czułości dla długości fali 1550 nm, wartości SNR będą dwukrotnie większe.

Maksima dla charakterystyk SNR wynikają z charakterystyki częstotliwościowej wzmacniacza transimpedancyjnego. Dobry według zależności (6.68) kondensator w pętli sprzężenia zwrotnego zapobiega oscylacjom, jednakże jego wartość jest zbyt mała by uniknąć podbicia charakterystyki. Zjawisko to nie wpływa negatywnie na pracę układów detekcji, gdyż pozyskiwana jest informacja o przekroczeniu określonego progu natężenia napromienienia, a zniekształcenia sygnału związane z nierównomiernym przenoszeniem poszczególnych częstotliwości nie odgrywają większej roli.

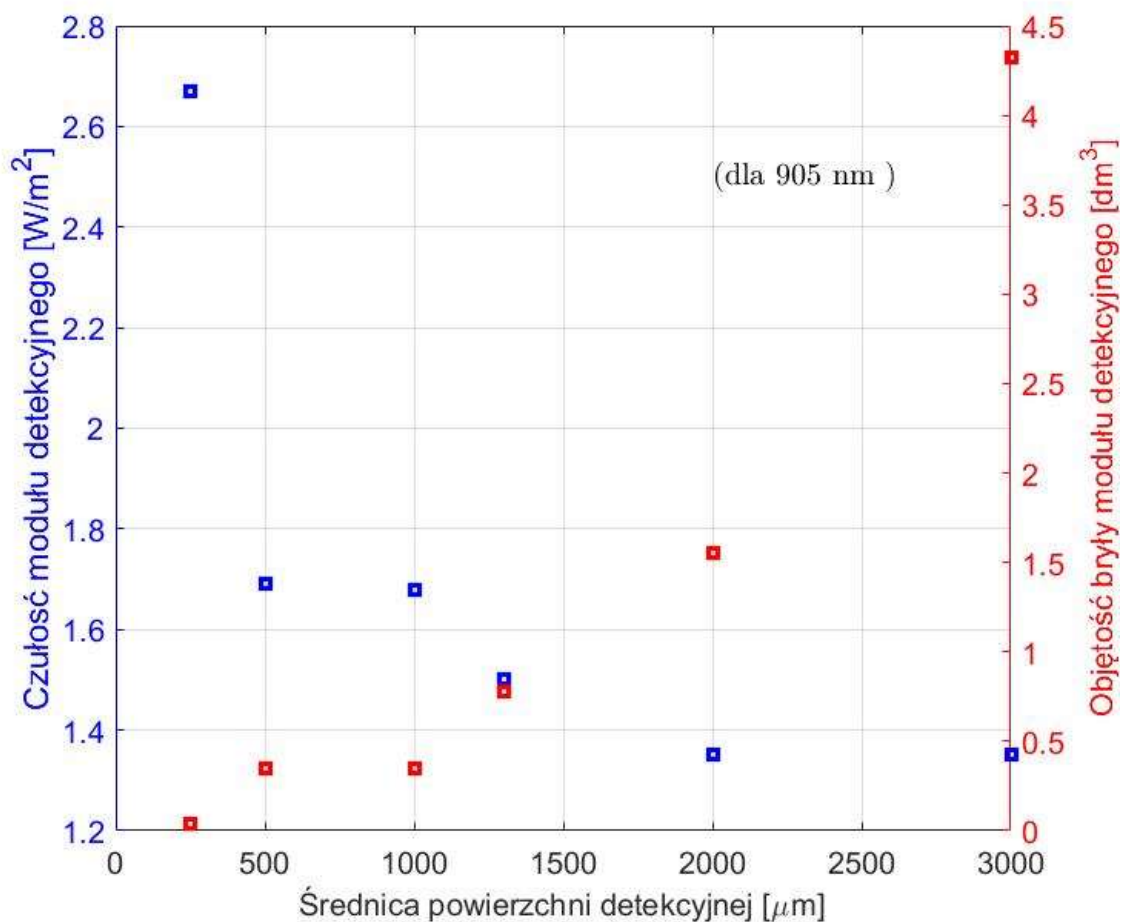
Wartość stosunku sygnału do szumu jest pomocna do określenia czułości urządzenia rozumianej jako minimalny poziom natężenia napromienienia, na który ma reagować sensor. Aby zminimalizować ryzyko wystąpienia fałszywego alarmu należy ustawić próg powyżej 3σ szumu. Oznacza to, że stosunek sygnału do szumu musi być powyżej 10, aby prawdopodobieństwo fałszywego alarmu było minimalne.

Zakładając, że poziom szumów jest niezmienny, określono minimalną wartość natężenia napromienienia, przy którym uzyskano SNR równy 10. Wyniki oszacowanej czułości układu detekcji zostały przedstawione w tabeli 6.9

Tabela 6.9 Wartość oszacowanej czułości modułu detekcyjnego

Średnica detektora (μm)	Czułość [W/m^2]			
	905 nm ($\tau = 50$ ns)	1064 nm ($\tau = 5$ ns)	1550 nm	
			($\tau = 50$ ns)	($\tau = 5$ ns)
250	2,67	3,83	1,34	2,98
500	1,69	3,04	0,85	2,37
1000	1,68	2,92	0,84	2,27
1300	1,5	2,71	0,72	2,11
200	1,35	2,59	0,67	2,01
3000	1,35	2,58	0,67	2,00

Na rysunku 6.32. przedstawiono zależność czułości i objętości bryły sensora w funkcji średnicy powierzchni detekcyjnej detektora.



Rys. 6.32 Czułość modułu i jego objętość w funkcji średnicy detektora

W celu spełnienia założeń dąży się do utrzymania jak najwyższej czułości wyrażonej w najniższych wartościach iradiancji odbieranego promieniowania. Minimalna wartość natężenia napromienienia określająca próg detekcji modułu, maleje wraz ze wzrostem średnicy detekcyjnej.

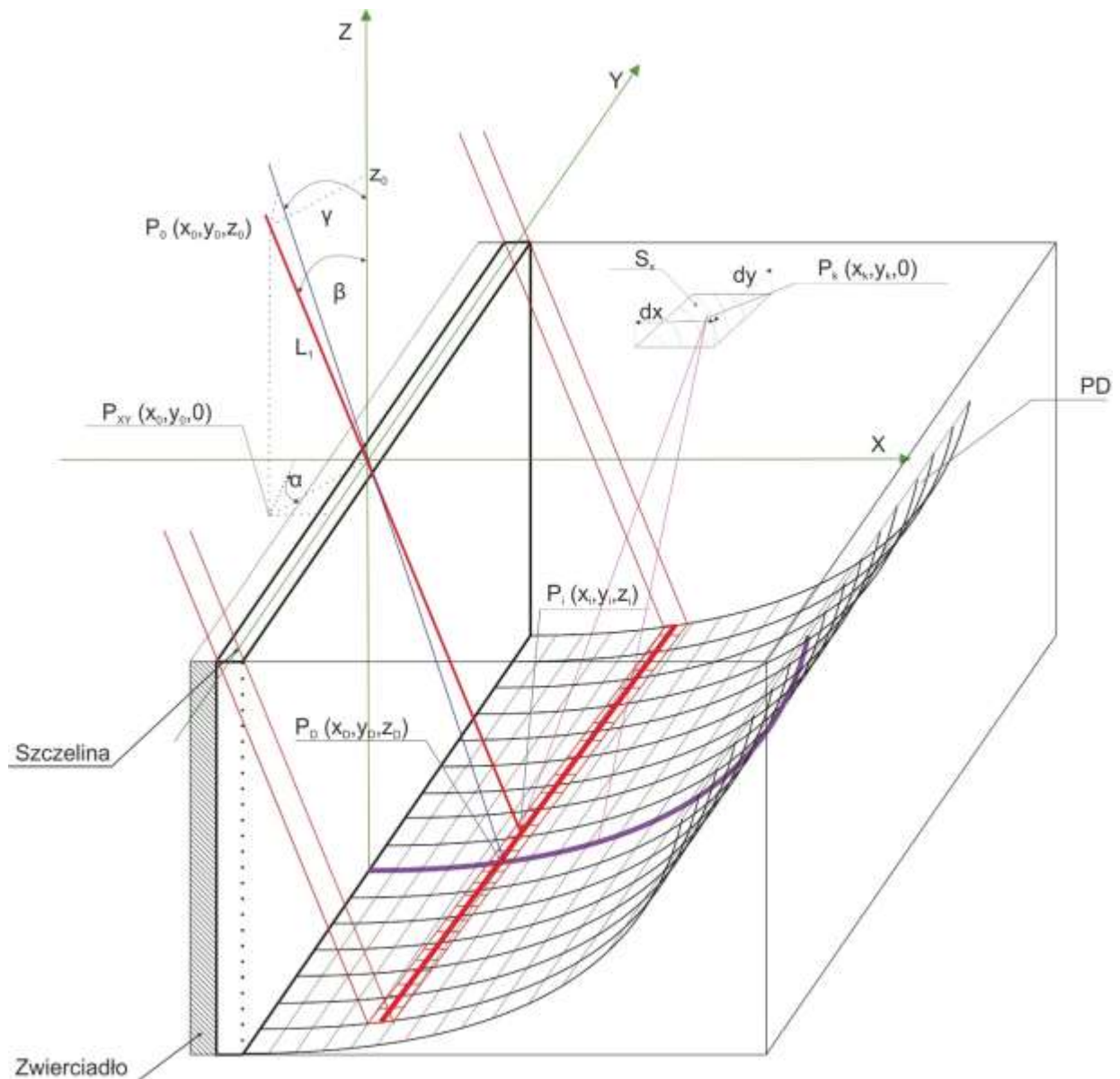
Objętość modułu rośnie wraz ze wzrostem średnicy powierzchni detekcyjnej detektora. Dla detektorów o dużych (2 mm, 3 mm) powierzchniach, osiąga wartość przekraczającą 1 dm^3 .

Przyjmując, że moduł ma mieć minimalną objętość przy maksymalnej czułości należy uznać, że **optymalnym** rozwiązaniem jest zastosowanie detektora o średnicy powierzchni detekcyjnej 1,3 mm.

6.8 Analiza zakresu dynamicznego odbieranych sygnałów optycznych

Źródłem sygnału użytecznego w komorze pomiarowej jest promieniowanie optyczne, przechodzące przez szczelinę i filtry, bezpośrednio (ewentualnie odbite od zwierciadła) padające na detektor. Promieniowanie padające poza powierzchnię detekcyjną rozpraszane jest do wnętrza komory z materiału o współczynniku odbicia równym ρ . Poziom promieniowania rozproszonego jest wprost proporcjonalny do poziomu natężenia napromienienia. Promienie rozproszone mogą trafić na inne detektory a ich poziom może przekraczać poziom ustalony jako próg detekcji. Wówczas wskazanie kąta padania promieniowania będzie obarczone błędem lub w ogóle nie będzie możliwe.

W celu analizy poziomu promieniowania rozproszonego przyjęto model przedstawiony na rysunku 6.33. Szczelina jest rzutowana na powierzchnię *PD* (wynikającą z konstrukcji komory pomiarowej). Proste normalne do geometrycznych środków detektorów przechodzą przez początek układu współrzędnych. Oznacza to, że każdy promień odbity zwierciadlanie od powierzchni detektora trafia na szczelinę. Pozostałe punkty na powierzchni *PD* rozpraszają promieniowanie w pełną półsferę. Promieniowanie rozproszone od tej powierzchni jest rzutowane na powierzchnię pokrywy górnej, powierzchnie boczne oraz powierzchnię zwierciadła, a część tego promieniowania rozproszona od tych powierzchni i odbita od zwierciadła pada na powierzchnie detekcyjne wszystkich detektorów zwiększając poziom natężenia napromienienia pochodzącego od sygnału. Jeśli ten poziom przekroczy przyjęty próg, to układ zadziała podając kierunek obarczony błędem.



Rys. 6.33 Układ do analizy promieniowania rozproszonego wewnątrz komory pomiarowej

W celu oszacowania poziomu sygnału od promieniowania rozproszonego przyjęto następujące założenia:

- 1) powierzchnia (ekran) dla rzutu szczeliny jest powierzchnią walca o promieniu równym promieniowi konstrukcyjnemu krzywej na której ułożone są detektory. Posiada ona współczynnik odbicia ρ i rozprasza równomiernie w całą półsferę,
- 2) środki detektorów znajdują się na płaszczyźnie OXZ o wartości $y = 0$; Wymiar powierzchni detekcyjnej określony jest przez średnicę detektora d ,
- 3) przyjęty współczynnik odbicia dla zwierciadła jest równy 1,

- 4) wewnątrz komory pomiarowej ma współczynnik odbicia ρ ,
- 5) detektory, ze względu na swoje położenie w komorze pomiarowej są bardziej podatne na promieniowanie rozproszone od płaszczyzny górnej (płaszczyzny, na której znajduje się szczelina) oraz zwierciadła,
- 6) liczbę powierzchni rozpraszających ograniczono do dwóch: powierzchni PD oraz powierzchni górnej;
- 7) odbicie od detektora nie będzie rozpatrywane,
- 8) zakłada się, że szczelina oraz optyczny filtr pasmowy nie, wpływają na poziom mocy docierającej do powierzchni PD .

Promieniowanie (promień reprezentatywny L_l) pada na szczelinę pod kątem α oraz β (rysunek 6.33). Szczelina ma wymiary s – szerokość $[m]$ i d – długość $[m]$. Pada na nią promieniowanie o natężeniu napromienienia $G_m [W/m^2]$. Pole powierzchni szczeliny ma oznaczenie S_{Diaf} i ma wymiar:

$$S_{Diaf} = sd [m^2] \quad (6.87)$$

W przypadkach kiedy promieniowanie pada pod niezerowym kątem β , należy uwzględnić cosinus kąta pomiędzy padającym promieniowaniem a powierzchnią diafragmy.

$$S_{SK} = S_{Diaf} \cos(\beta) [m^2] \quad (6.88)$$

Poziom mocy w komorze pomiarowej ma wartość:

$$P_{Diaf} = G_m S_{Diaf} \cos(\beta) [W] \quad (6.89)$$

W celu uproszczenia przyjęto, że na powierzchni PD punktami referencyjnymi (emitującymi promieniowanie) są punkty odpowiadające rzutowi promieni przechodzących przez środek diafragmy. Przyjmuje się także, że cała moc znajduje się na punktach referencyjnych P_i . Długość odcinka L_{ref} odpowiada długości diafragmy. Dokonując dyskretyzacji linii L_{ref} na N_i przedziałów przyjmuje się, że moc padająca na każdy punkt ma wartość:

$$P_{xyz} = \frac{P_{Diaf}}{N_i} [W] \quad (6.90)$$

Każdy z punktów P_i staje się źródłem światła wnoszącym swój udział na wycinku S_x powierzchni OXY przy $z = 0$. Dowolny fragment powierzchni S_x o wymiarach $dx dy$ jest oświetlony przez źródło z punktu P_i oddalonego o promień R_p , który jest równy:

$$R_p = |P_i P_k| = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 + (0 - z_i)^2} [m] \quad (6.91)$$

Natężenie napromienienia pochodzące od źródła P_i w odległości od promienia R_p ma wartość:

$$I_k = \frac{P_{xyz}\rho}{\pi R_p^2} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (6.92)$$

Promieniowanie padające na powierzchnię S_x tworzy z powierzchnią kąt, którego wartość można wyrazić poprzez iloczyn skalarny dwóch wektorów. Jeden jest wektorem normalnym do powierzchni S_x (\vec{v}_{Sx}), drugi jest wektorem równoległym do promienia R_p (\vec{v}_{Rp}).

$$\vec{v}_{Sx} = [0, 0, -1] \quad (6.93)$$

$$\vec{v}_{Rp} = \left[\frac{x_k - x_i}{R_p}, \frac{y_k - y_i}{R_p}, \frac{-z_i}{R_p} \right] \quad (6.94)$$

Ponieważ długości wektorów są równe 1, to ich iloczyn skalarny jest równy kosinusowi kąta pomiędzy nimi. Umożliwia to wniesienie poprawki związanej z wzajemnym kątem padającego promieniowania a powierzchnią, na której dokonuje się pomiaru. Wynika z tego, że moc na powierzchni S_x jest równa:

$$P_{Sx} = \frac{S_x P_{xyz} \rho (\vec{v}_{Sx} \cdot \vec{v}_{Rp})}{\pi R_p^2} [W] \quad (6.95)$$

Do powierzchni S_x docierają promienie pochodzące od wszystkich punktów P_i . Wartości współrzędnych wektora \vec{v}_{Rp} zależą od współrzędnych punktów P_k , zatem całkowita moc na powierzchni S_x jest równa:

$$P_{total} = \frac{S_x P_{xyz} \rho}{\pi} \sum_{i=1}^N \frac{(\vec{v}_{Sx} \cdot \vec{v}_{Rpi})}{R_{pi}^2} [W] \quad (6.96)$$

Przyjmując, że powierzchnia S_x jest źródłem nowego promieniowania z którego część dociera do detektora o środku powierzchni detekcyjnej z punkcie $(x_D, 0, z_D)$. Odległość tego punktu od powierzchni S_x jest równa:

$$R_k = \sqrt{(x_D - x_k)^2 + (0 - y_k)^2 + (z_D - 0)^2} [m] \quad (6.97)$$

Współrzędne określające środek detektora powiązane są z promieniem R numerem oświetlonego detektora n oraz kątem konstrukcyjnym θ .

$$x_D = R \sin(n\theta) \quad (6.98)$$

$$z_D = R \cos(n\theta) \quad (6.99)$$

Stosując metodę iloczynu skalarnego, istnieje możliwość wyznaczenia kąta jaki tworzy promieniowanie pochodzące od powierzchni S_x z powierzchnią detekcyjną S_x . Wersor normalny do powierzchni detekcyjnej ma współrzędne:

$$\vec{v}_{sd} = [\sin(n\theta), 0, \cos(n\theta)] \quad (6.100)$$

natomiast wersor równoległy do promienia padającego na środek powierzchni ma współrzędne:

$$\vec{v}_{Rk} = \left[\frac{x_D - x_k}{R_k}, \frac{-y_k}{R_k}, \frac{z_D}{R_k} \right] \quad (6.101)$$

Moc docierając do detektora o numerze n z powierzchni S_x o numerze k jest równa:

$$P_{Sx} = \frac{S_d P_{total} \rho (\vec{v}_{sd} \cdot \vec{v}_{Rk})}{\pi R_k^2} [W] \quad (6.102)$$

Ponieważ do detektora dociera promieniowanie z M niezależnych powierzchni zatem całkowita moc na detektorze jest równa :

$$P_{Det} = \frac{S_d P_{total} \rho}{\pi} \sum_{i=1}^M \frac{(\vec{v}_{Sd} \cdot \vec{v}_{Rk})}{R_k^2} [W] \quad (6.103)$$

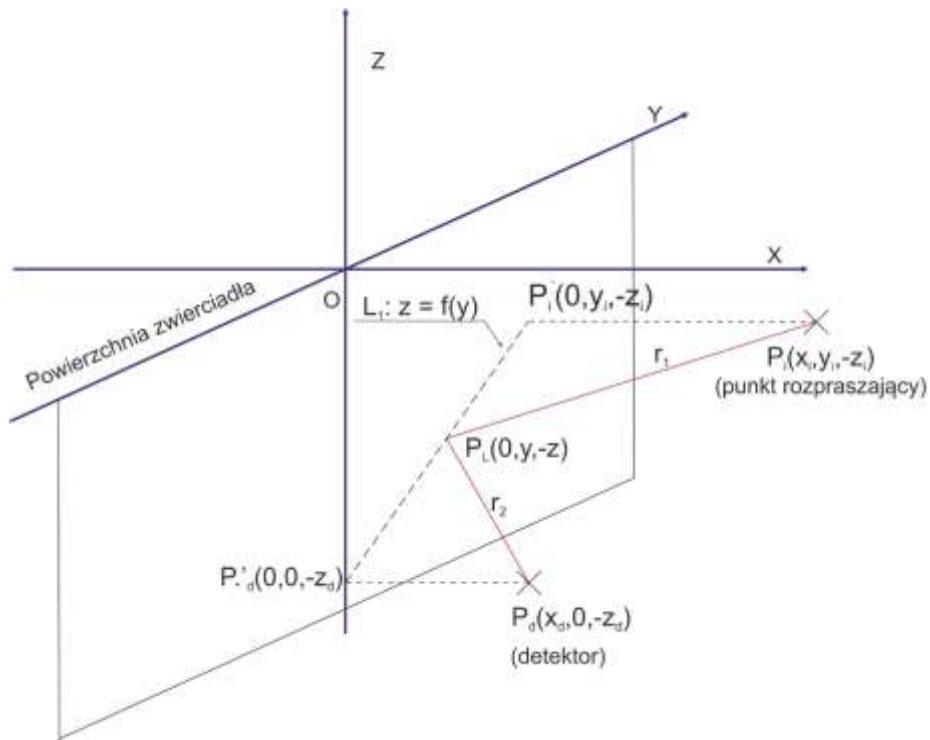
Zatem natężenie napromienienia na detektorze o numerze n pochodząca od powierzchni S_k jest równa:

$$G_{mDet} = \frac{P_{total} \rho}{\pi} \sum_{i=1}^M \frac{(\vec{v}_{Sd} \cdot \vec{v}_{Rk})}{R_k^2} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (6.104)$$

Natężenie napromienienia pochodzące od promieniowania rozproszonego od powierzchni jest proporcjonalne do kwadratu współczynnika odbicia danej powierzchni.

Promieniowanie optyczne rozproszone od powierzchni detekcyjnej, pada także na zwierciadło. Część odbitych od niego promieni, dociera do powierzchni detekcyjnych detektorów.

Źródłem promieniowania jest, tak jak w poprzednim przypadku, oświetlona część powierzchni ekranu. W przypadku odbicia od zwierciadła rozpatrywany jest tylko promień. Schemat przyjęty do obliczeń został przedstawiony na rysunku 6.34



Rys. 6.34 Schemat do analizy promieni rozproszonych, odbitych od powierzchni zwierciadła

Powierzchnia zwierciadła jest położona w płaszczyźnie OYZ. Punktem rozpraszającym padające promieniowanie jest punkt P_i o współrzędnych (x_i, y_i, z_i) . Tak jak w poprzednim przypadku promieniowanie rozpraszane jest w pełną półsferę z materiału o współczynniku odbicia ρ . Część promieniowania po przebyciu drogi optycznej r_1 ulega odbiciu w kierunku punktu P_d o współrzędnych $(x_d, 0, z_d)$ odległego od punktu odbicia o r_2 . Całkowita droga przebyta przez ten promień wynosi $r_1 + r_2$. Promienie r_1 oraz r_2 znajdują się na jednej płaszczyźnie a ich rzut na płaszczyznę OYZ wyznacza odcinek L_1 . Punkt odbicia P_L promienia od zwierciadła znajduje się na odcinku $|P'_d P'_i|$ i należy do odcinka L_1 . Punkty P'_d oraz P'_i są rzutami prostokątnymi punktów P_d oraz P_i na powierzchnię zwierciadła. Promienie r_1 oraz r_2 mają wartość minimalną, co odpowiada równym kątom padania i odbicia, jeśli jest spełniony warunek:

$$\frac{|P_d P'_d|}{|P_L P'_d|} = \frac{|P_i P'_i|}{|P'_i P'_d| - |P_L P'_d|} \quad (6.105)$$

Przekształcając równanie (6.105) otrzymuje się zależność:

$$|P_L P'_d| = \frac{|P_d P'_d| |P'_i P'_d|}{|P'_i P'_i| + |P_d P'_d|} \quad (6.106)$$

Uwzględniając współrzędne punktów otrzymuje się wartość odległości między punktami P_L i P'_d :

$$|P_L P'_d| = \frac{|x_d| \sqrt{y_i^2 + (z_d - z_i)^2}}{|x_i| + |x_d|} \quad (6.107)$$

Odległość $|P_L P'_d| = R_L$ oznacza promień okręgu z punktem środkowym w P'_d .

Prosta L_i jest wyznaczana przez punkty P'_d oraz P'_i i zawiera się w płaszczyźnie OYZ .

Równanie opisujące tę prostą ma postać:

$$z = \frac{z_d - z_i}{y_i} y - z_d \quad \text{dla } y_i \neq 0 \quad (6.108)$$

W szczególnym przypadku, jeśli $y_i = 0$ to punkt P_L ma współrzędne

$$\left[0, 0, \frac{|x_d| |z_d - z_i|}{|x_i| + |x_d|} \right] \quad (6.109)$$

W pozostałych przypadkach współrzędne punktu P_L wynikają z rozwiązania układu równań:

$$\begin{cases} z = \frac{z_d - z_i}{y_i} y - z_d \\ R_L^2 = y^2 + (z + z_d)^2 \end{cases} \quad (6.110)$$

Znając współrzędne punktu P_L istnieje możliwość wyznaczenia długości promieni $r_1 + r_2$.

Moc odniesiona do punktu P_i ma wartość P_{xyz} . Można przyjąć, że natężenie napromienienia od punktu P_i na pojedynczym dowolnym detektorze ma wartość:

$$G_{sd} = \frac{P_{xyz} \rho \vec{v}_{sd} \cdot \vec{v}_{r2}}{\pi(r_1 + r_2)^2} \quad (6.111)$$

gdzie $\vec{v}_{sd} \cdot \vec{v}_{r2}$ oznacza iloczyn skalarny wektorów, normalnego do detektora oraz wektora równoległego do promienia r_2 , określonego jako:

$$\vec{v}_{r2} = \left[\frac{-x_d}{r_2}, \frac{y}{r_2}, \frac{z_d - z}{r_2} \right] \quad (6.112)$$

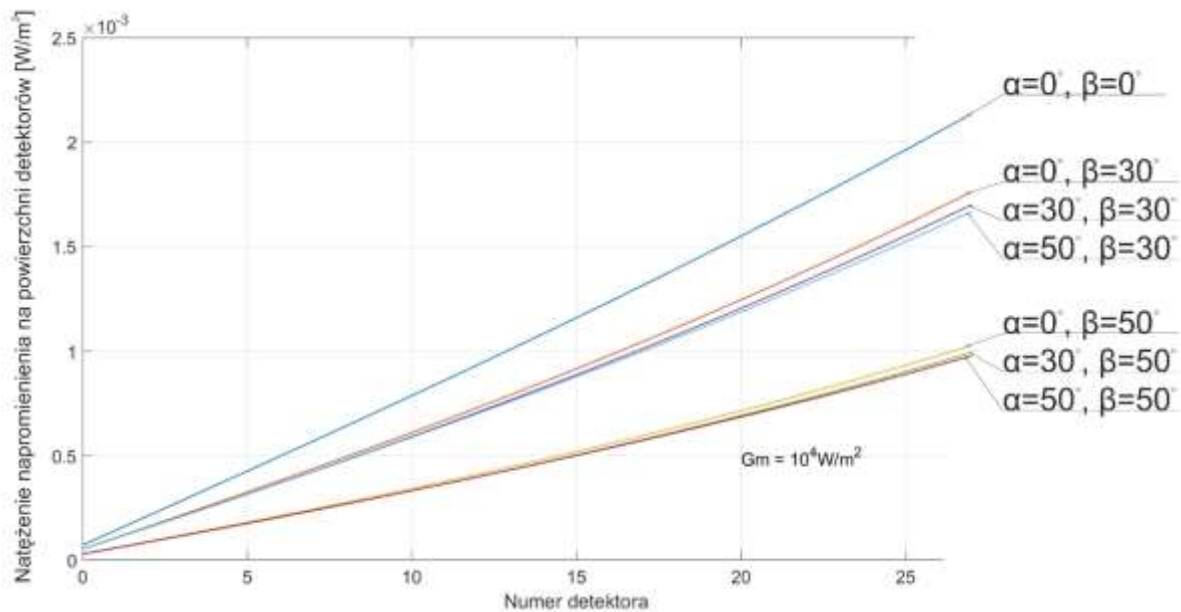
Do danego detektora dociera promieniowanie od wszystkich punktów P_i

$$G_{sd_{total}} = P_{xyz} \rho \sum_i^N \frac{\vec{v}_{sd} \cdot \vec{v}_{r2i}}{\pi(r_{1i} + r_{2i})^2} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (6.113)$$

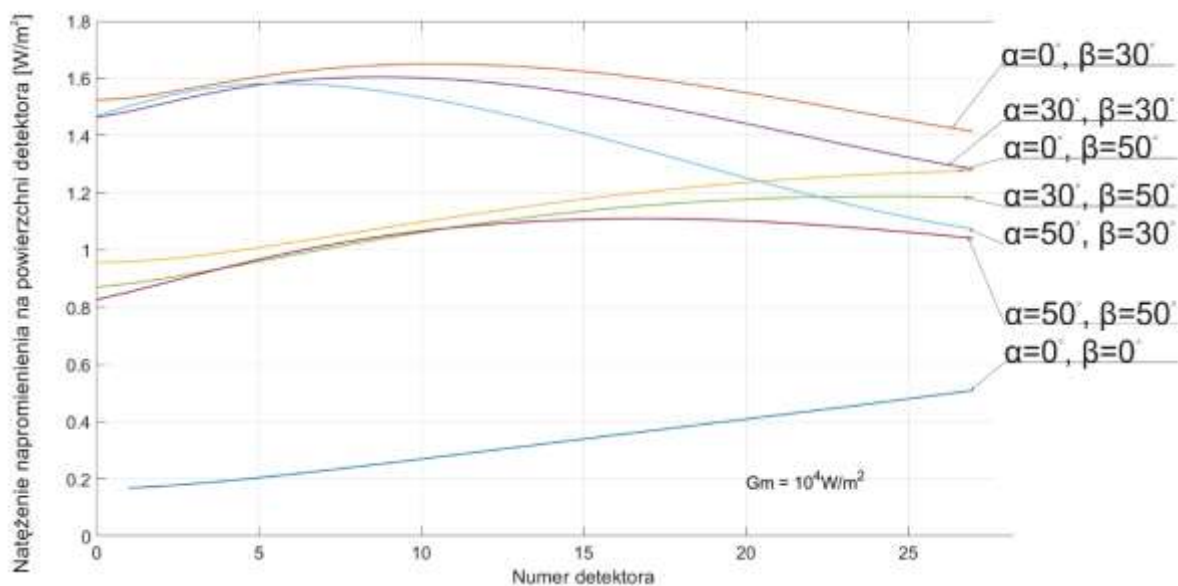
Na podstawie przedstawionych powyżej zależności, został zbudowany model matematyczny opisany przy pomocy środowiska MATLAB [88], służący do analizy poziomu sygnału pochodzącego od promieni rozproszonych w komorze pomiarowej. Do analizy przyjęto:

- wymiar szczeliny - 3x150 mm,
- promień łuku powierzchni detekcyjnych – 54 mm,
- kąt konstrukcyjny (wynikający z wymiarów detektora 2°),
- wymiar górnej powierzchni rozpraszającej 50x150 mm,
- natężenie napromienienia na powierzchni czujnika 10^4 W/m^2 .

Wyniki symulacji zaprezentowano na rysunkach od 6.35-6.36.

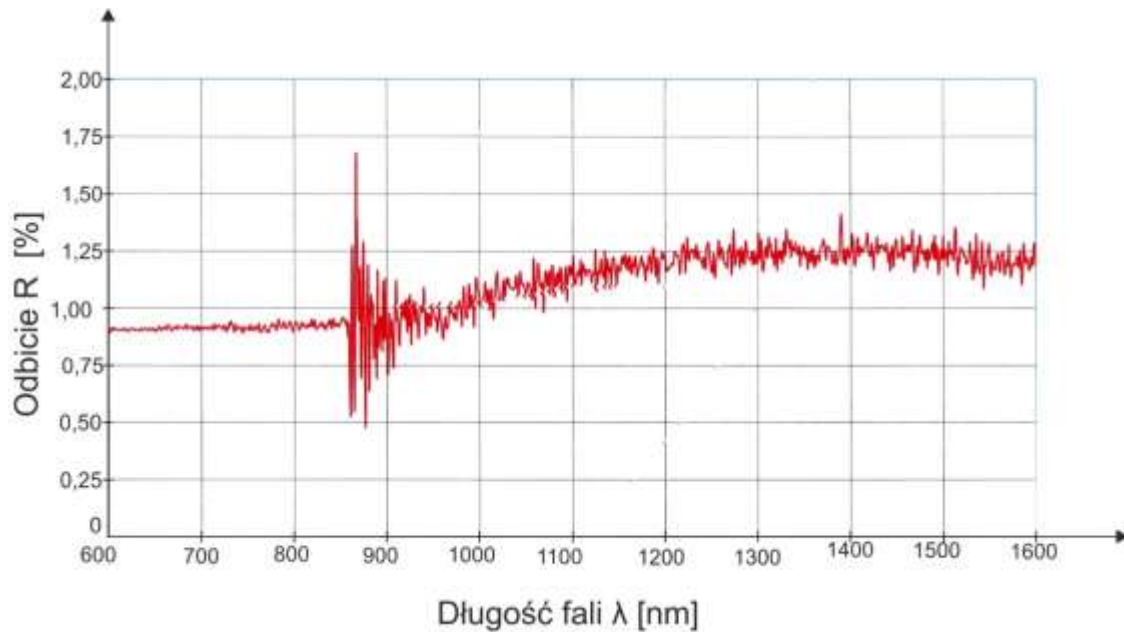


Rys. 6.35 Natężenie napromienienia na powierzchni detektorów pochodzące od promieni rozproszonych w komorze pomiarowej od powierzchni górnej dla różnych kątów padania promieniowania (α, β)



Rys. 6.36 Natężenie napromienienia na powierzchni detektorów pochodzące od promieni odbitych od zwierciadła dla różnych kątów padania promieniowania (α, β).

Jedną z metod zmniejszania tego zjawiska jest ograniczenie wpływu tego rozproszenia poprzez minimalizację współczynnika odbicia. W przedstawionym modelu założono najniższy możliwy współczynnik odbicia. Jednym z takich materiałów jest odpowiednio przygotowana folia wykonana z aluminium, której powierzchnia została w specyficzny sposób aktywowana i rozwinięta w celu obniżenia współczynnika odbicia [89]. Pomiary całkowitego współczynnika odbicia zostały wykonane w Laboratorium Akredytowanym Instytutu Optoelektroniki WAT, a ich wyniki zostały przedstawione na rysunku nr 6.37.



Rys. 6.37 Współczynnik odbicia foli Acktar

Zmniejszenie wpływu promieniowania rozproszonego wewnątrz komory pomiarowej można zrealizować poprzez zwiększanie odległości między elementami konstrukcyjnymi lub poprzez skuteczniejsze tłumienie promieniowania rozproszonego. Z przedstawionych analiz wynika, że dla progu detekcji ok 1.7 W/m^2 zakres dynamiczny modułu detekcyjnego powinien być rzędu 10^4 W/m^2 .

6.9 Podsumowanie

Przedstawione w rozdziale 6 rozważania pozwalają na określenie parametrów konstrukcyjnych modułu detekcyjnego (sensora), które są optymalne i spełniają postawione wymagania. W tym celu przeanalizowano wpływ parametrów mechanicznych i elektronicznych fotodiody tak, aby uzyskać maksymalną czułość przy najmniejszych wymiarach geometrycznych. W wyniku analizy uznano, że optymalnym rozwiązaniem jest układ w którym:

- liczba detektorów przy założonej rozdzielczości i polu widzenia będzie równa 28,
- detektorem będzie fotodioda InGaAs o czułości widmowej obejmującej zakres długości fal od 850 nm do $1.6 \mu\text{m}$,

- zastosowanie zewnętrznego filtra optycznego pozwala zmniejszyć poziom promieniowania tła dostającego się do wnętrza komory pomiarowej, przez co obniża się poziom szumów,
- średnica detektora powinna mieć wartość 1,3 mm, co pozwala uzyskać najmniejszą objętość bryły modułu detekcyjnego przy założonej czułości i rozdzielczości,
- szczelina powinna mieć wymiary: szerokość 3 mm, długość 154 mm,
- detektor powinien pracować w trybie fotokonduktywnym w konfiguracji ze wzmacniaczem transimpedancyjnym,
- pasmo transimpedancji układu powinno być równe 10 MHz;
- zastosowanie odpowiedniego materiału tłumiącego promieniowanie rozproszone wewnątrz komory pomiarowej umożliwi zwiększenie zakresu dynamicznego odbieranych sygnałów optycznych.

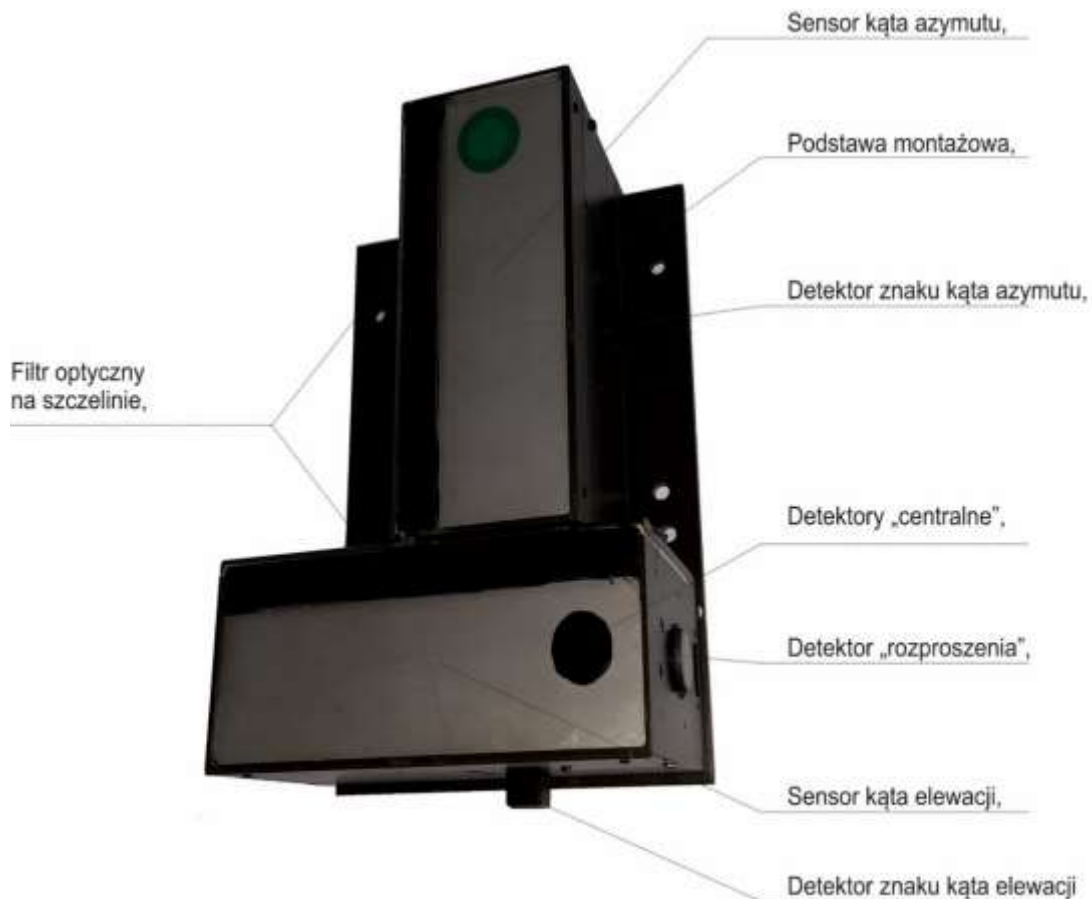
7 BUDOWA MODUŁU OPTOELEKTRONICZNEGO

7.1 Konstrukcja części opto-mechanicznej

Wnioski wynikające z analiz przedstawionych w rozdziale 6, zostały zastosowane do określania wymagań na poszczególne elementy komory pomiarowej. Na podstawie tych założeń zostały opracowane rozwiązania techniczne oraz wyszczególnione niezbędne elementy procesów technologicznych koniecznych do budowy proponowanego rozwiązania.

Wykonany moduł detekcyjny przedstawiony został na rysunku 7.1. Położenie detektorów znaku kąta zostało tak zaprojektowane, aby zmiana kąta o 1° powodowała przesłanianie detektora przez obudowę. W wyniku tego uzyskuje się zmianę stanu logicznego na wyjściu toru elektronicznego sprzężonego z tym detektorem, a tym samym możliwe jest określenie, czy padające promieniowanie zostało odbite od zwierciadła, czy też oświetla detektor bezpośrednio. Przedstawiony na rysunku 7.1 moduł detekcyjny oprócz podstawowych funkcjonalności, takich jak określanie kierunku na źródło promieniowania, posiada inne bloki funkcjonalne rozszerzające jego możliwości. Należą do nich:

- a) detektory centralne służące do określania charakterystyk czasowych przychodzącego promieniowania laserowego oraz rozróżniania przedziału zakresów fal. Zakres długości fal określany jest przy pomocy detektorów PIN wykonanych z krzemu oraz InGaAs. Do parametrów czasowych, które mogą być określane, należy czas trwania impulsu (na poziomie progu), częstotliwość powtarzania impulsów itd.
- b) detektory służące do detekcji promieniowania rozproszonego. Służą do detekcji promieniowania, które zostało rozproszone na elementach w bezpośrednim otoczeniu modułu.



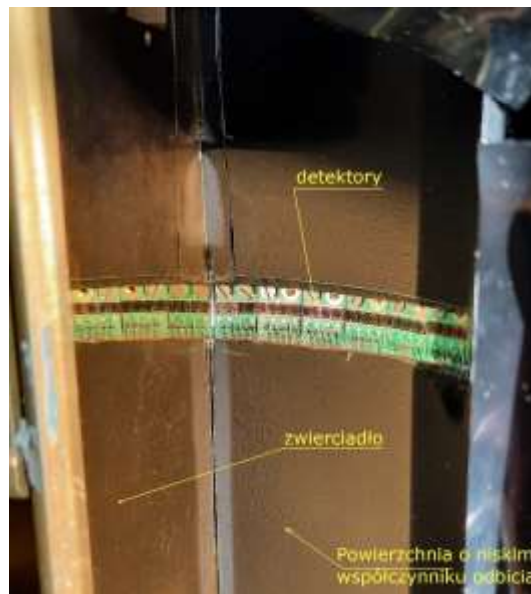
Rys. 7.1 Moduł detekcyjny

W przedstawionym rozwiązaniu technicznym, głównym elementem jest komora pomiarowa. Jej fragment został przedstawiony na rysunku 7.2. Na zamieszczonej fotografii można wyróżnić fotodiody, powierzchnię o niskim współczynniku odbicia oraz zwierciadło.

W module detekcyjnym do konstrukcji zwierciadła została wykorzystana jedna ze ścian bocznych. Jest to odpowiednio przygotowana powierzchnia z naniesioną warstwą złota. Za użyciem tego materiału przemawia jego duża odporność na warunki środowiskowe i niska reaktywność chemiczna oraz duży współczynnik odbicia dla fal z zakresu bliskiej podczerwieni.

W założeniu materiał o niskim współczynniku odbicia światła, powinien przykryć całe wnętrze komory pomiarowej poza zwierciadłem i powierzchnią detekcyjną detektorów. Okazało się to trudne w realizacji praktycznej. Część powierzchni obwodów drukowanych, na których montowane są detektory, jest nieprzysłonięta. Powodem, dla

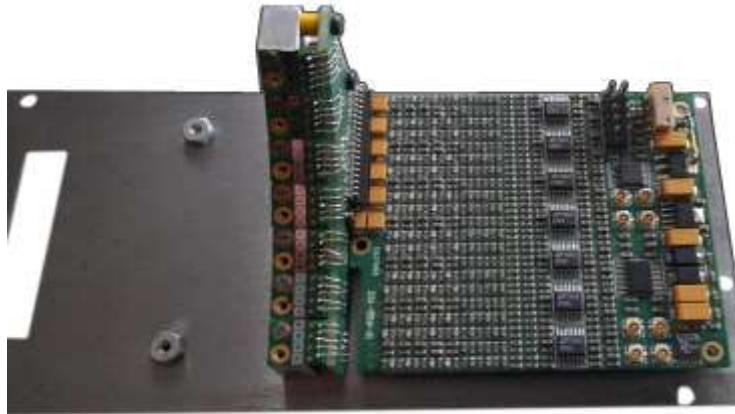
którego zdecydowano się na takie rozwiązanie jest duże ryzyko uszkodzenia przewodów montowanych do elektrod fotodiody. Współczynnik odbicia takiej powierzchni jest duży (ma wartość około 75%). Dla dużych wartości natężenia napromienienia padającego promieniowania mogą wystąpić odbicia promieni do wnętrza komory pomiarowej. W efekcie wynik pomiaru może być obarczony błędem.



Rys. 7.2 Fragment wnętrza komory pomiarowej

Fotodiody PIN zostały ułożone na specjalnie przygotowanej podstawie. Jest ona zbudowana w ten sposób, aby możliwe było ułożenie detektorów oraz ich elektryczne połączenie z resztą układu. Widok podstawy wraz z zamontowanymi elementami detekcyjnymi został przedstawiony na rysunku 7.3.

Ze względów technologicznych nie było możliwości ułożenia detektorów pojedynczo. Zdecydowano się pogrupować je w zespoły czteroelementowe. Wprowadza to dodatkowy błąd związany z ułożeniem detektorów, gdyż kąt konstrukcyjny θ zależy od miejsca położenia detektora na zespole montażowym. W celu jego eliminacji konieczne jest wprowadzanie korekty związanej z położeniem detektora.

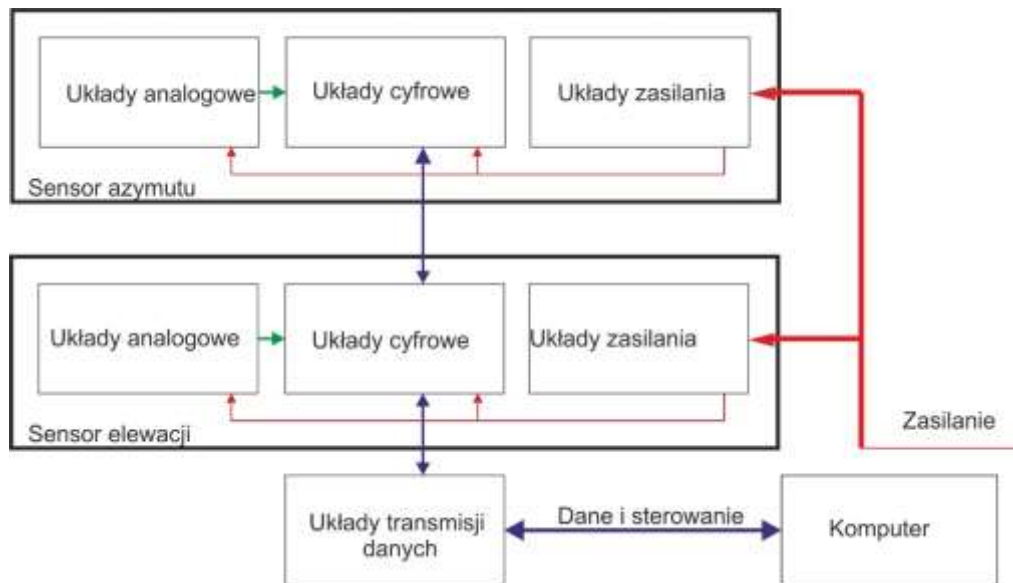


Rys. 7.3 Widok elementów detekcyjnych i układów analogowych

W prezentowanym rozwiązaniu detektory od wejść nieodwracających wzmacniaczy operacyjnych dzieli pewna odległość wynikająca z przyjętego rozwiązania mechanicznego. Długie połączenia elektryczne oraz wysoka impedancja wejściowa wzmacniaczy implikuje konieczność skutecznego ekranowania elektromagnetycznego w celu minimalizacji poziom zakłóceń. Jako ekran wykorzystana została powłoka minimalizująca poziom promieniowania wewnątrz komory pomiarowej, gdyż jest ona naniesiona na folię aluminiową. Elektryczne przyłączenie jej do poziomu masy układów elektronicznych, zmniejszyło skutecznie ilość zakłóceń indukowanych w obwodach wejściowych.

Schemat funkcjonalny modułu detekcyjnego został przedstawiony na rysunku nr 7.4 i można wyróżnić w nim:

- 1) tory analogowe,
- 2) układy cyfrowe,
- 3) układy zasilania,
- 4) układy transmisji danych.



Rys. 7.4 Schemat funkcjonalny modułu detekcyjnego

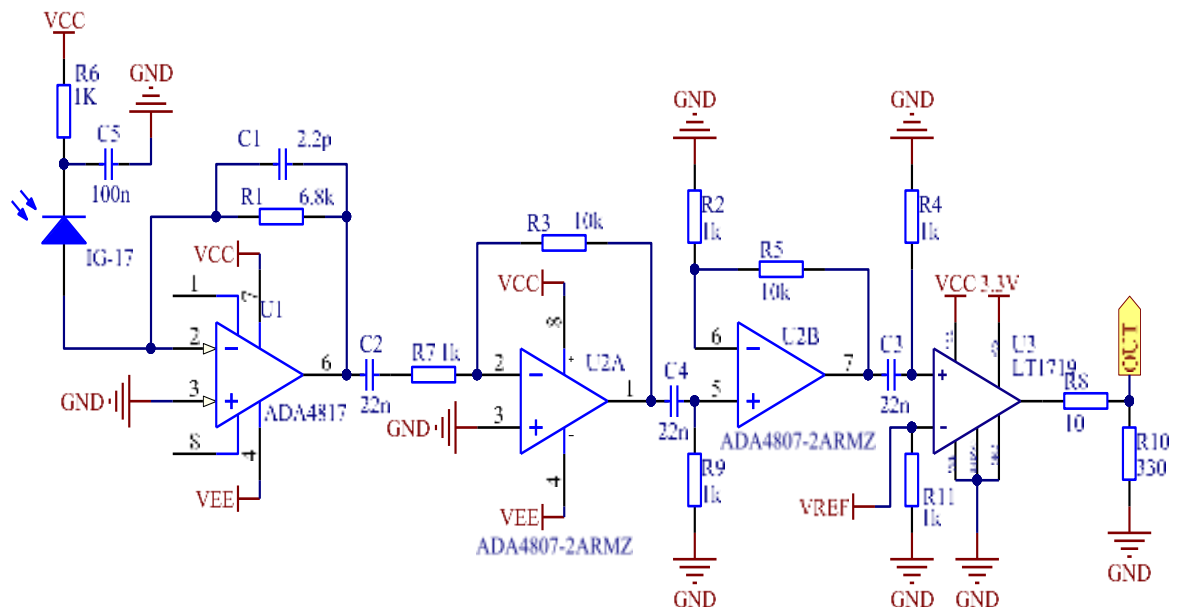
7.2 Konstrukcja układów elektronicznych - część analogowa

Podstawowym elementem toru detekcyjnego jest fotodioda wykonana z InGaAs (fotodioda IG17) o średnicy powierzchni aktywnej 1,3 mm bez obudowy mechanicznej. Podłączona jest ona do wzmacniacza operacyjnego będącego konwerterem foto prądu na napięcie. W skład łańcucha pomiarowego wchodzi także wzmacniacze o wzmocnieniach odpowiednio -10 oraz 10.

Analogowy tor pomiarowy (rysunek 7.6) zakończony jest komparatorem. Sygnał wyjściowy (OUT) układu porównującego jest podawany na układy cyfrowe wykonujące wszelkie niezbędne obliczenia.

Fotodioda jest spolaryzowana dodatnim napięciem równym 5 V. Rezystor R6 oraz kondensator C5 stanowią filtr minimalizujący ilość szumów pochodzących od źródła zasilania. Wartość rezystancji R6 jest tak dobrana, aby nie zmieniać punktu znacząco pracy fotodiody (nie zmieniać jej pojemności) gdy jest opromieniowana stałym promieniowaniem o dużej wartości natężenia napromienienia pochodzącym od tła. Napięcie polaryzujące fotodiodę ustawione na 5V pozwala uzyskać wartości pojemności fotodiody rzędu 100 pF. Pojemność wejściowa wzmacniacza operacyjnego jest o dwa rzędy wielkości mniejsza i mieści się w zakresie do 5pF. Należy zatem uznać, że główną pojemnością decydującą o szerokości odbieranego pasma jest pojemność fotodiody. Wartość rezystancji w sprzężeniu zwrotnym wzmacniacza transimpedancyjnego (R1) została dobrana według analiz przedstawionych w rozdziale 6. Użycie rezystora

o wartości $6.8 \text{ k}\Omega$ pozwala otrzymać pasmo układu odbiorczego rzędu 10 MHz . Pojemność $C1$ służy do stabilizacji częstotliwościowej układu i eliminacji zjawiska „gain peaking”.



Rys. 7.5 Projekt układu analogowego

Sygnal na wyjściu wzmacniacza operacyjnego ma ujemną polaryzację co wynika z dodatniego napięcia polaryzacji fotodiody. W celu odwrócenia fazy zastosowano wzmacniacz odwracający o wzmocnieniu równym -10 . Sprzężenie między stopniami wzmacniającymi realizowane jest poprzez pojemność. Ma to za zadanie odizolować sąsiednie stopnie od siebie i eliminować wpływ składowej stałej.

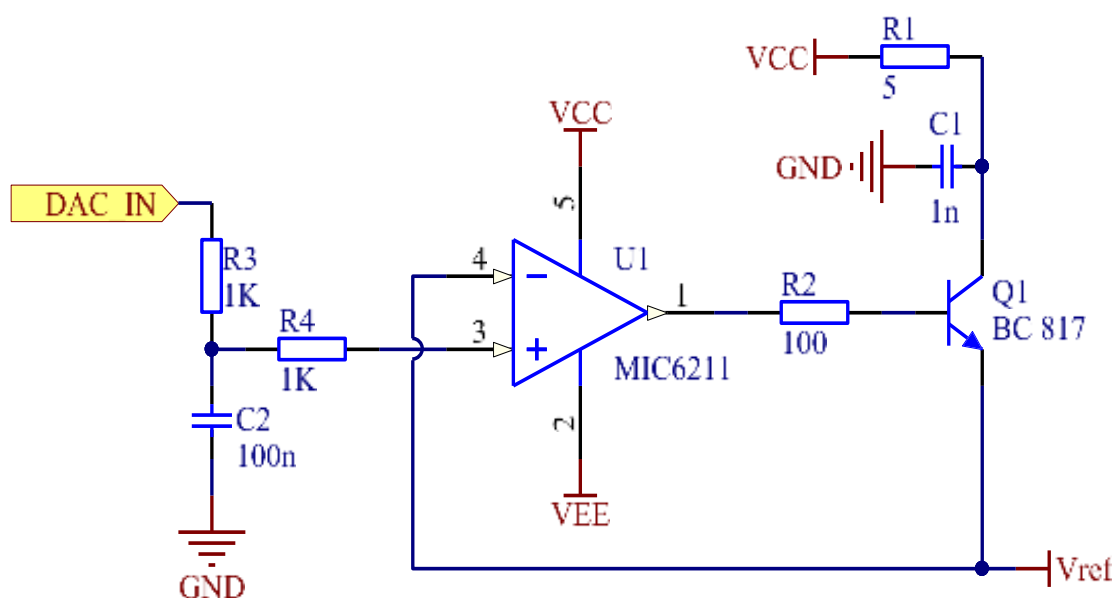
Drugi stopień wzmacniający, użyty jest w celu zwiększenia wartości sygnału, tak aby komparator porównywał sygnał na poziomie setek miliwoltów z napięciem odniesienia (przy natężeniu napromienienia rzędu pojedynczych W/m^2). Użycie wzmacniacza w konfiguracji nieodwracającej, stanowi także bufor pomiędzy komparatorem a poprzednim stopniem wzmacniającym.

Ze względu na to, że układ ma wykrywać promieniowanie przekraczające pewien określony próg, wzmacniacze w torach wzmacniających nie muszą pracować tylko w liniowym zakresie. Wejście w zakres nieliniowy spowodowany zbyt dużym poziomem sygnału użytecznego nie ma wpływu na poprawność działania układu, który to binarnie ma określić wystąpienie wymuszania przekraczającego próg komparacji. Warunkiem jest, aby czas potrzebny na wyjście z zatkania wzmacniacza był krótszy niż minimalny

odstęp między kolejnymi impulsami laserowymi. W prezentowanym rozwiązaniu, czas wyjścia z zatkania wynosi ok 5 μs (przy wejściowym natężeniu napromienienia 10^4 W/m^2 dla długości fali 905 nm).

W przedstawionym na rysunku 7.5 układzie detekcyjnym, zastosowano szybki komparator firmy Analog Devices o symbolu LT1719 [90]. Dodatkowym atutem, dla którego zdecydowano się na ten komparator są różne poziomy napięć wejściowych i wyjściowych. W związku z tym wejście komparatora jest zasilane z napięcia +5 V, natomiast wyjście podłączone jest do cyfrowego napięcia zasilania wynoszącego +3.3 V.

Istotnym jest także napięcie odniesienia V_{ref} i sposób jego wytwarzania. Konieczne jest, aby ono było stabilne i miało dokładnie taką samą wartość na wszystkich torach detekcyjnych. Ze względu na konieczność dopasowania spadków napięć (pochodzących od prądów wejściowych komparatora) na rezystorach obniżających R4 oraz R1 konieczne jest stosowanie elementów rezystancyjnych o tych samych wartościach rezystancji. Z założonego pola widzenia czujnika wynika, iż torów analogowych jest tyle samo co detektorów czyli 28. W związku z tym, że źródło wytwarzające napięcie referencyjne jest obciążone rezystancją 35,7 Ω . W celu utrzymania stałego napięcia na małej rezystancji zdecydowano się na zastosowanie układu stabilizacji prądu. Schemat tego układu został przedstawiony na rysunku 7.7.



Rys. 7.6 Układ stabilizacji napięcia odniesienia

Elementem wykonawczym jest tranzystor bipolarny BC817. Pozwala on na regulację prądu do kilkuset mA. Zmierzone napięcie V_{ref} jest porównywane z napięciem

z przetwornika DAC. Różnica tych napięć podawana jest na bazę tranzystora, który ustala prąd emitera w taki sposób, aby napięcie V_{ref} oraz wyjściowe z przetwornika cyfrowo analogowego miało taką samą wartość. Tego typu rozwiązanie jest niewrażliwe na zmieniające się obciążenie (zależne od termicznych zmian rezystancji i termicznej zmiany parametrów tranzystora).

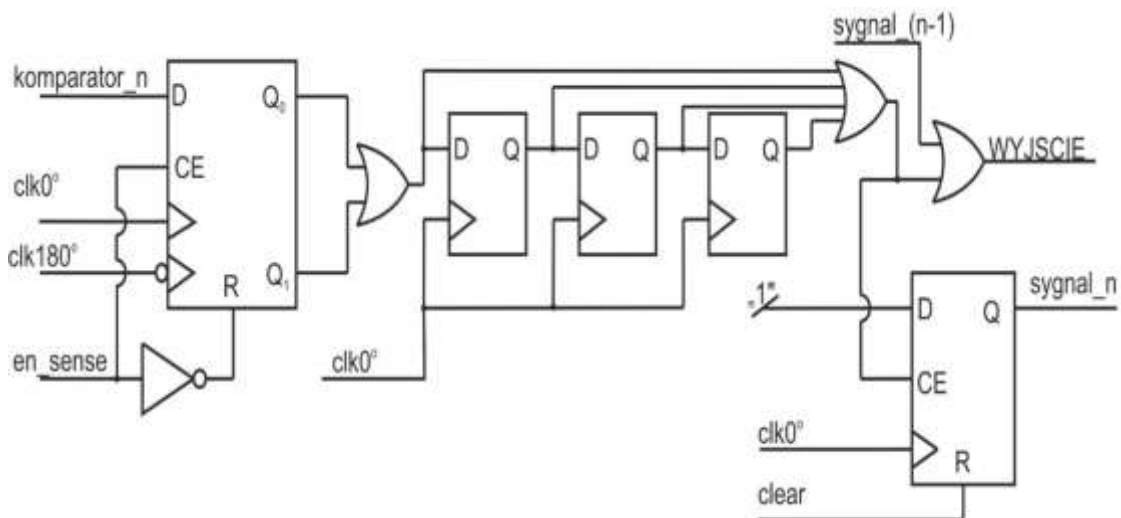
7.3 Konstrukcja układów elektronicznych - część cyfrowa

Układy cyfrowe realizują funkcje przetwarzania informacji z torów analogowych sensora kąta padania promieniowania. Zostały one zrealizowane z użyciem układu programowalnego, (FPGA) firmy Xilinx [91] serii SPARTAN-6 o oznaczeniu XC6SLX25 [92].

Do podstawowych funkcji układów cyfrowych należy:

- pozyskanie informacji z każdego kanału detekcyjnego,
- obliczenie położenia rzutu obrazu szczeliny na detektorach,
- obliczenie kąta azymutu i elewacji,
- transmisja danych do komputera.

Odbiór informacji z torów analogowych jest kluczowym elementem do pozyskania informacji o kierunku padającego promieniowania. Programowa konstrukcja torów wejściowych zaimplementowana w układzie FPGA została przedstawiona na rysunku nr 7.7.



Rys. 7.7 Tor wejściowy w układzie FPGA (1 kanał)

Sygnal wyjściowy z komparatora jest podawany na wejście D przerzutnika DDR (*Double Data Rate*). Wejście jest próbkowane dwoma zegarami o tej samej częstotliwości (25 MHz) przesuniętymi w fazie o 180° . Zaimplementowane rozwiązanie przedstawione powyżej umożliwia wykrycie impulsów rzędu kilku nano sekund. Sygnal z wyjść przerzutnika jest sumowany i podawany na linię złożoną z kilku przerzutników *D* taktowanych tym samym zegarem. Z wyjść przerzutników sygnał jest sumowany. Powoduje to czterokrotne wydłużenie czasu trwania impulsu. Zwiększenie czasu trwania impulsu jest konieczne, aby został on zapamiętany w rejestrze („*sygnal_n*” na wyjściu przerzutnika).

Podczas jednej sekwencji pomiarowej, kilka detektorów może informować o tym, że pada na nie promieniowanie przekraczające próg. W celu rozpoczęcia procesu pomiaru konieczne jest uzyskanie informacji o takim zdarzeniu a następnie odczytanie stanów na wyjściach przerzutników *D*. Aby uzyskać jeden sygnał wyzwalający, sygnały z sumatora logicznego linii opóźniającej są sumowane z sygnałami z sąsiednich torów. Rozwiązanie wskazane na rysunku 7.7 umożliwia wyzwolenie procesu pomiarowego od krótkiego impulsu pochodzącego od dowolnego toru detekcyjnego. Zastosowanie zatrząsków z możliwością resetu umożliwia ustawienie czasu zbierania informacji z torów analogowych, a tym samym zmniejsza wymagania na szybkość transmisji danych.

Układy cyfrowe powinny określać kierunek na źródło promieniowania według zależności (6.18) oraz (6.22). Należy zaznaczyć, że obliczenia dokonywane wewnątrz układu FPGA, mogą zajmować znaczną liczbę cykli zegarowych. Czas potrzebny na realizację operacji matematycznych jest tym dłuższy, im więcej mnożeń jest koniecznych do uzyskania wyniku.

W celu uproszczenia algorytmu obliczeniowego, zdecydowano się na stabilizowanie wyników pomiarów z dokładnością 1° , co odpowiada odczytowi miejsca oświetlonego na powierzchni detekcyjnej z dokładnością równą połowie powierzchni detekcyjnej. Stabilizowaniu podlegają wartości mieszczące się tylko w pierwszej ćwiartce kąta bryłowego. Wszystkie pozostałe wartości można określić z detektorów informujących, czy promieniowanie wewnątrz komory pomiarowej jest odbite od zwierciadła czy pada bezpośrednio.

Zastosowanie statycznej tablicy danych wymaga odpowiedniej ilości pamięci. Każda wartość kąta jest zapisana na jednym bajcie. Aby dokładność określania kąta padania nie była gorsza niż 1° , konieczne jest zapisanie tablicy z rozdzielczością co

najmniej 1 stopnia. Wówczas otrzymuje się 784 bajty. Wprawdzie, tablica zajmuje znaczną część pamięci i wymusza stosowanie układów FPGA o dużej liczbie komórek, to zysk jest widoczny w czasie koniecznym na określenie kąta elewacji.

7.4 Komunikacja modułu z urządzeniami zewnętrznymi

W celu określenia podstawowych parametrów modułu detekcyjnego, musi on komunikować się z otoczeniem zewnętrznym. Komunikacja odbywa się poprzez interfejs szeregowy z następującymi parametrami transmisji: 115200kb/s bez bitu parzystości i jednym bitem stopu. Układem realizującym transmisję jest dedykowany sterownik do transmisji szeregowych firmy Future Technology Devices International [93] z serii FTD232RL [94]

W celu zabezpieczenia danych i zautomatyzowanie procesu transmisji zdecydowano się na odpowiedni układ ramki. Układ bajtów w ramce został zaprezentowany poniżej.

Podstawowy układ bajtów w ramce protokołu transmisyjnego składa się z :

STX	Nagłówek Ramki	Dane	ETX
1B [0x02]	4B	LEN	1B [0x03]

STX – jeden bajt o wartości 0x02 będący informacją o początku ramki,
nagłówek ramki– cztery bajty określające właściwości danych, wersji protokołu oraz typ przesyłanych danych o strukturze:

CTRL	LEN	Komenda/Typ danych
1B	2B	1B

CTRL– bajt zawierający informację o strukturze ramki i zawartości pola danych,
LEN– dwa bajty określające wielkość pola „Dane” (w konwencji młodszy-starszy),
Komenda/Typ danych – bajt określający typ przesyłanych danych – informujący o sposobie interpretacji danych zawartych w ramce,
Dane– Bajty danych o zmiennej ilości, wyrażonej wartością liczby z pola „LEN”, zawartego w „Nagłówku Ramki”,
ETX – jeden bajt o wartości 0x03 stanowiący wyróżnik końca ramki.

W celu zabezpieczenia się przed występowaniem w ciągu danych wartości STX i ETX (0x02 i 0x03) oraz wartości 0xFF powodującej przerwanie transmisji przez układy sterowników magistrali szeregowej, zdecydowano zastosować procedurę zamiany ich

na dwa bajty. Do tego celu wyróżniono jeszcze jedną wartość 0x05, którą nazwano ENQ. Przed nadaniem danych zawartych w ramce (przekazaniem do medium transmisyjnego), w procedurze softwarowego nadajnika analizowana jest zawartość ramki i każdy bajt o wartości STX, ETX, FFH i ENQ zamieniany jest na dwa bajty: ENQ oraz następujący po nim oryginalny bajt poddany sumowaniu modulo 2 z wartością 0x55 bit po bicie. Po stronie odbiorczej dokonuje się tej samej operacji pozwalającej odzyskać oryginalne wartości bajtów. W tym celu usuwa się wszystkie bajty o wartości ENQ a na następującym po nim bajcie dokonywana jest operacja sumowania modulo 2 z wartością 0x55 w celu odzyskania oryginalnej wartości.

Informacja o oświetlonych detektorach jest przesyłana binarnie, tzn. jest przesyłana informacja czy dany detektor jest oświetlony czy też nie. Informację tą umieszcza się na poszczególnych miejscach bitów w bajcie. W ten sposób minimalizuje się liczbę koniecznych do przesłania bajtów. Schemat ustawienia bitów odpowiadających poszczególnym detektorom z pojedynczego sensora kąta został przedstawiony na rysunku nr 7.8.



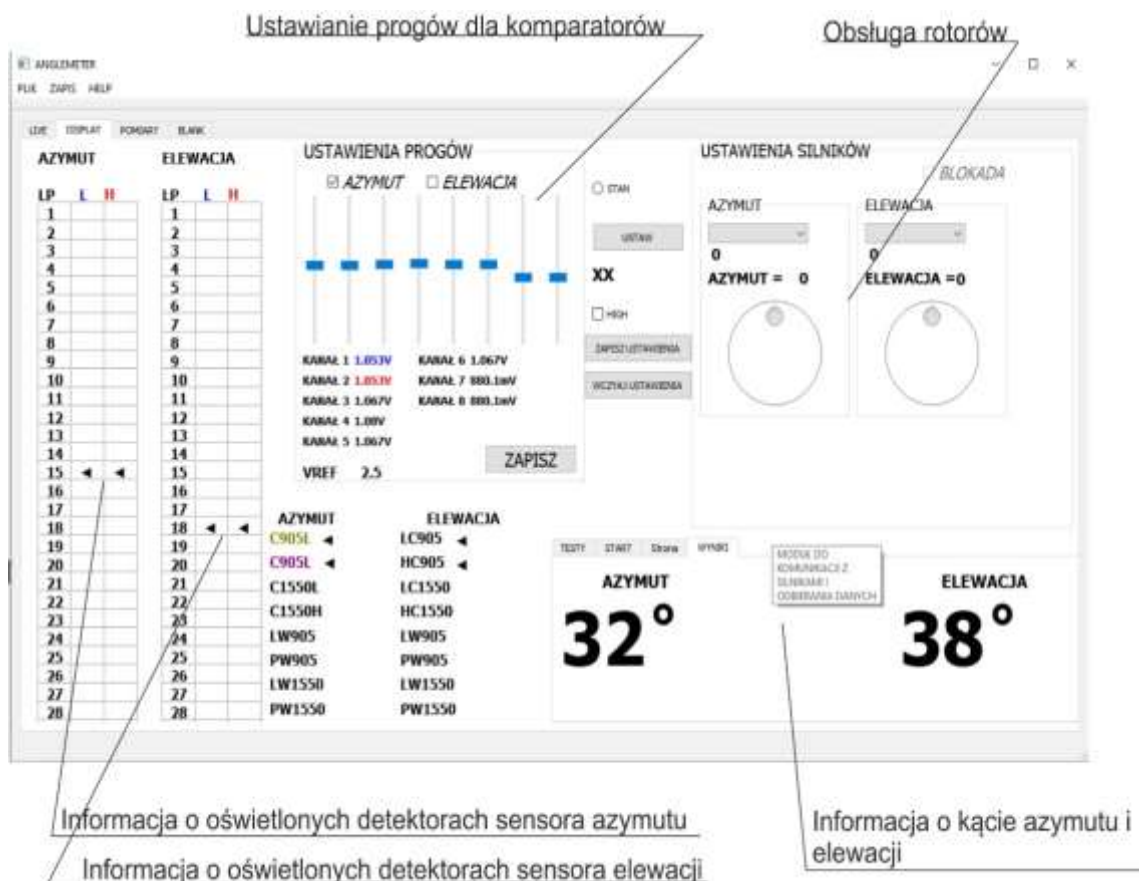
Rys. 7.8 Układ bitów w bajcie w ramce transmisyjnej.

Dla 28 detektorów, potrzebne są 4 bajty aby przesłać pełną informację z sensora. Na pustych polach (oznaczonych jako X na rys. 7.8) kodowana jest informacja z detektorów określających znak kąta.

Do analizy informacji wysyłanych przez moduł detekcyjny i ich prezentacji dla użytkownika, obsługi zewnętrznych rotorów na stanowisku pomiarowym, został stworzony przy pomocy języka C++ zewnętrzny program komputerowy. Środowiskiem programistycznym było zintegrowane środowisko IDE - Qt [95]. Interfejs programu został przedstawiony na rysunku 7.9.

Program spełnia następujące funkcje:

- 1) realizuje wymianę danych pomiędzy modułem detekcyjnym a komputerem,
- 2) kontroluje przy użyciu interfejsu szeregowego parametry dotyczące rotorów (kąt wychylenia, prądy podtrzymania itd.) obsługujących poszczególne osie obrotowe,
- 3) poprzez interfejs użytkownika informuje o opromieniowaniu modułu oraz obliczonych kątach,
- 4) realizuje zapis danych do pliku według wymagań,
- 5) ustawianie na przetwornikach DAC wartości napięć referencyjnych dla komparatorów.



Rys. 7.9 Interfejs użytkownika

Zastosowanie techniki programowania wielowątkowego pozwoliło uzyskać responsywny interfejs aplikacji. Program działa w trybie „master” dla rotorów komunikujących się poprzez magistralę RS-232 oraz „slave” dla modułu detekcyjnego.

Funkcjonalności te uzyskano, poprzez obsługę zdarzeń generowanych w systemie Windows.

W wyniku realizacji projektu powstała wersja prototypowa optoelektronicznego modułu detekcyjnego. Została ona przedstawiona w załączniku nr 5.

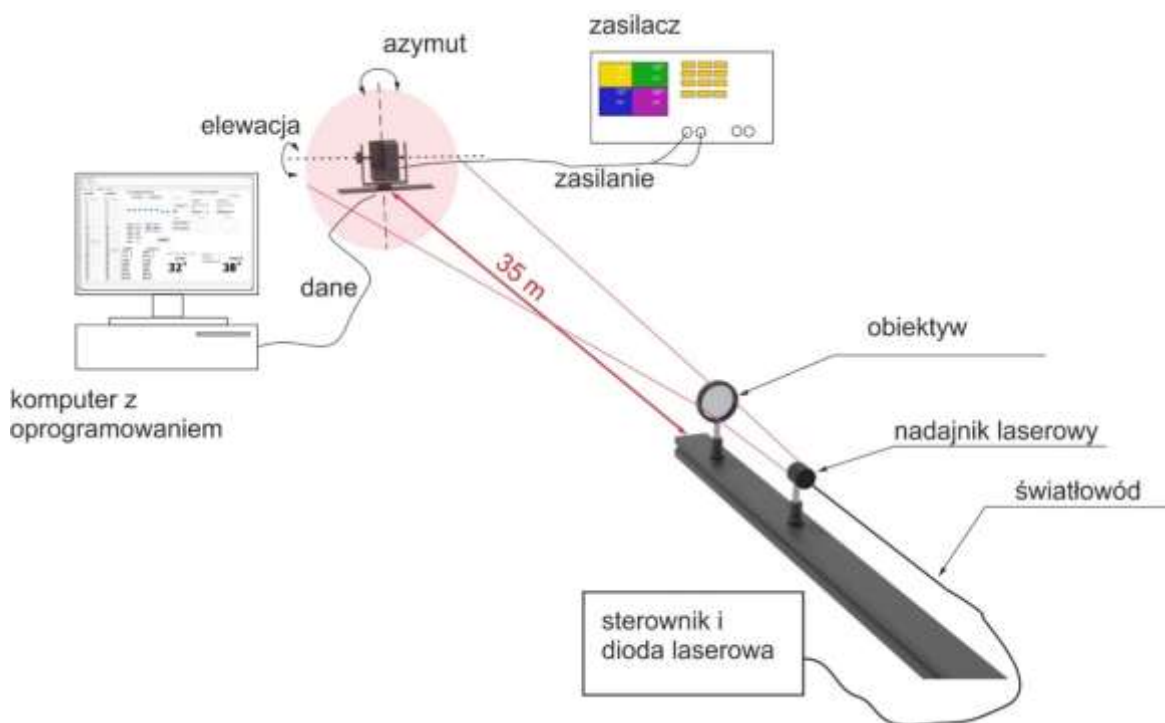
8 BADANIA LABORATORYJNE MODELU MODUŁU OPTOELEKTRONICZNEGO

Celem badań laboratoryjnych modelu jest potwierdzenie, czy spełnione zostały warunki wynikające z założeń dotyczące czułości i dokładności kąta padania promieniowania.

Do określenia wymienionych parametrów modułów detekcyjnych mierzących kąt padania promieniowania zostało opracowane stanowisko pomiarowe zawierające następujące elementy:

- ruchomą platformę pomiarową umożliwiającą zmianę kąta położenia modułu detekcyjnego w azymucie i elewacji,
- jednostki kontrolno-sterującej w postaci komputera z zainstalowanym specjalizowanym oprogramowaniem,
- źródła laserowego o zmiennej mocy i czasie trwania impulsu oraz regulowanym kącie rozbieżności wiązki, pracującego na długości fali 905 nm.

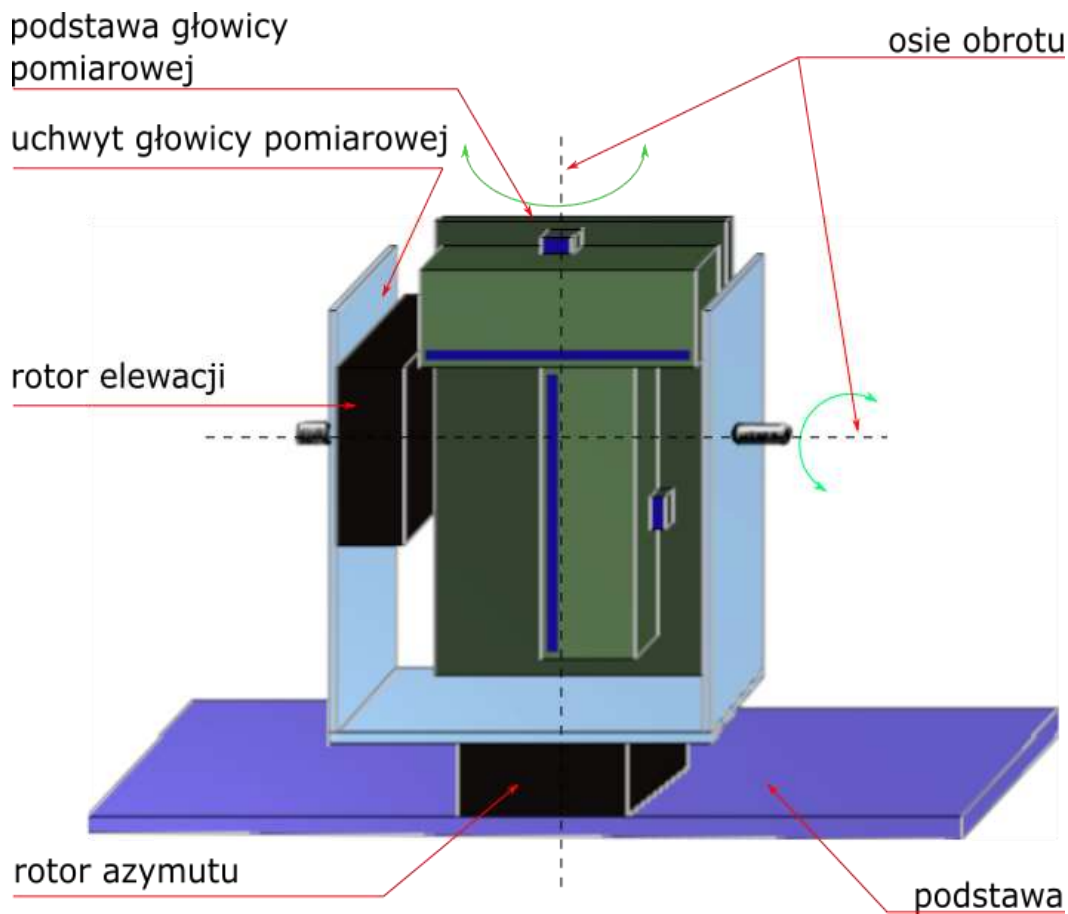
Schemat stanowiska pomiarowego została przedstawiona na rysunku 8.1.



Rys. 8.1 Schemat stanowiska pomiarowego

Na rysunku 8.2 przedstawiona została ruchoma część stanowiska pomiarowego. Moduł detekcyjny jest montowany do specjalnie przygotowanego stelaża. Zastosowanie

rotorów firmy ZABER [96] o symbolach XA-805RW [97] umożliwia precyzyjną zmianę kąta zarówno w azymucie jak i elewacji. Komunikacja z rotorami odbywa się poprzez interfejs szeregowy.



Rys. 8.2 Ruchoma część stanowiska pomiarowego

Źródłem promieniowania laserowego jest laser półprzewodnikowy pracujący impulsowo. Konstrukcja sterownika umożliwia przełączanie czasu trwania impulsu od 10 ns do 500 ns oraz zmianę częstotliwości od pojedynczych herców do 10 kHz. Zmianę mocy nadajnika realizuje się poprzez regulację napięcia zasilania podawanego na sterownik lasera.

W stanowisku pomiarowym ruch wykonywany jest przez moduł detekcyjny. Oznacza to, że ruch kątowy modułu na stanowisku nie jest tożsamy z ruchem źródła wokół modułu. Można wykazać (Załącznik nr 3), iż w takim układzie konieczne jest określenie elewacji jako pierwszej a następnie azymutu. Obliczenie kątów realizuje się przy pomocy wzorów (8.1) oraz (8.2).

$$\beta = n_{\beta}\theta \quad (8.1)$$

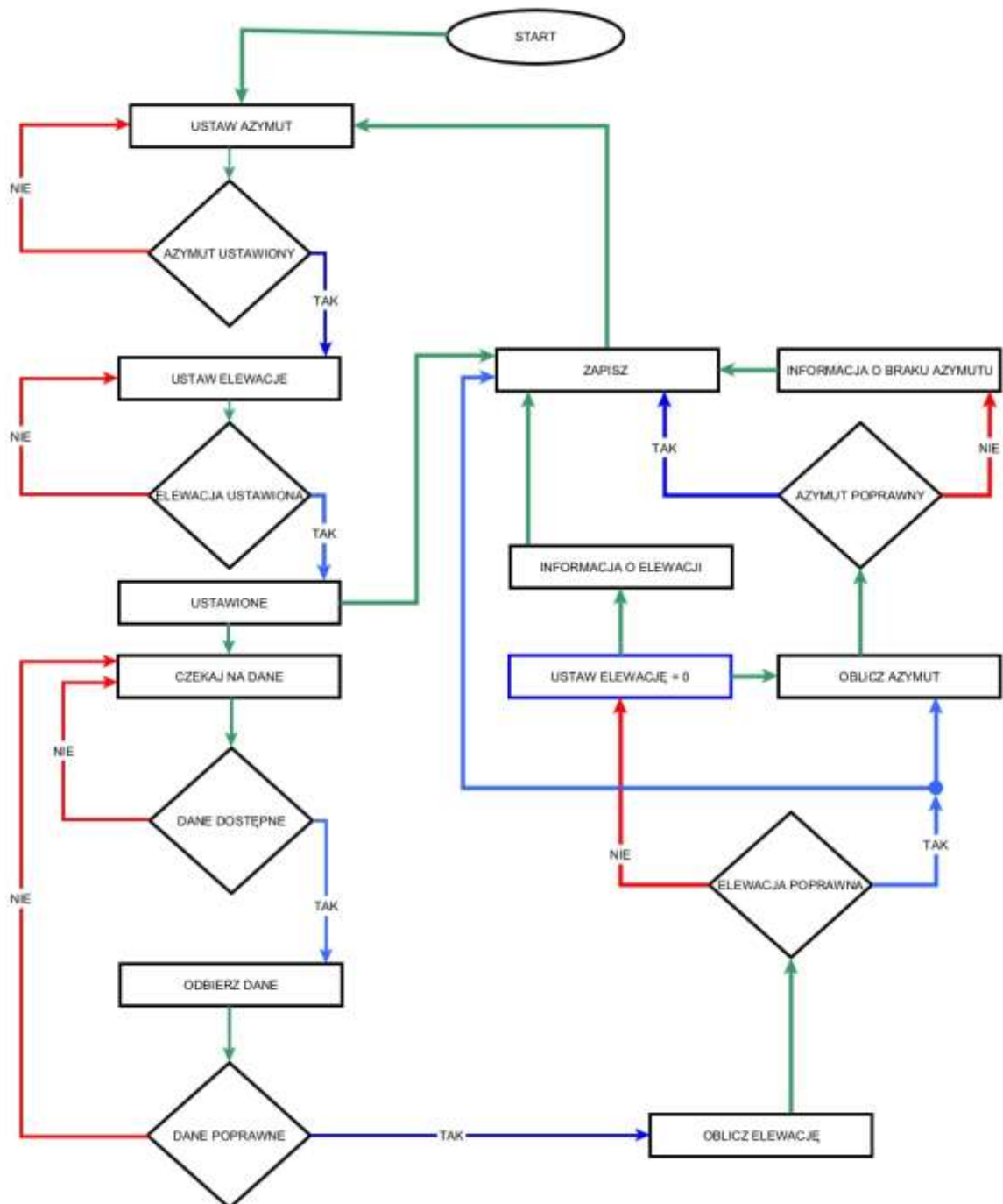
$$\alpha = \text{atan}(\tan(n_{\alpha}\theta)\cos(\beta)) \quad (8.2)$$

gdzie:

n_β, n_α to numery oświetlonych detektorów w sensorach azymutu i elewacji.

Program pomiarowy obsługujący stanowisko został opisany w 7.4. W trakcie realizacji scenariusza pomiarowego działa on według algorytmu przedstawionego na rysunku n 8.3.

Opracowanie wyników pomiarów i ich graficzna prezentacja odbywa się przy pomocy skryptów napisanych w środowisku MATLAB.



Rys. 8.3 Algorytm pomiarowy.

8.1 Wyniki pomiarów

Pomiary dokładności i określenie czułości zostały przeprowadzone na stanowisku pomiarowym przedstawionym na rysunku 8.1. Moduł detekcyjny na stanowisku został przestawiony na rysunku 8.4.



Rys. 8.4 Moduł detekcyjny na stanowisku pomiarowym

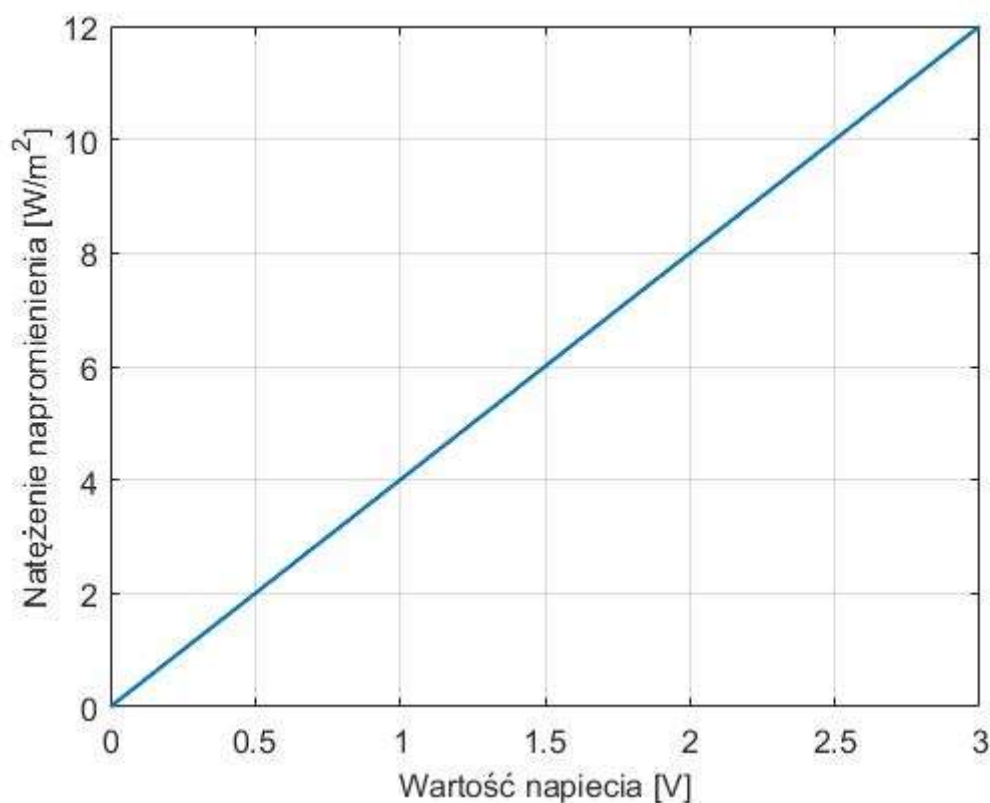
a) Wyniki pomiarów czułości

Pomiar czułości torów realizowano przy pomocy:

- detektora FDS100CAL – firmy Thorlabs [98],
- wzmacniacza,
- oscyloskopu.

Na podstawie odczytanej z oscyloskopu wartości napięcia impulsu laserowego w szczycie dokonywano przeliczenia na poziom natężenia napromienienia według charakterystyki przedstawionej na rysunku 8.5.

Pomiaru czułości dokonywano dla skrajnych ustawień kąta położenia głowicy wynikających z jej pola widzenia. Za próg czułości przyjęto taki poziom padającej mocy, przy którym moduł detekcyjny wysłał informację, że został opromieniowany.



Rys. 8.5 Charakterystyka wartości iradiancji w funkcji napięcia na wyjściu układ pomiarowego

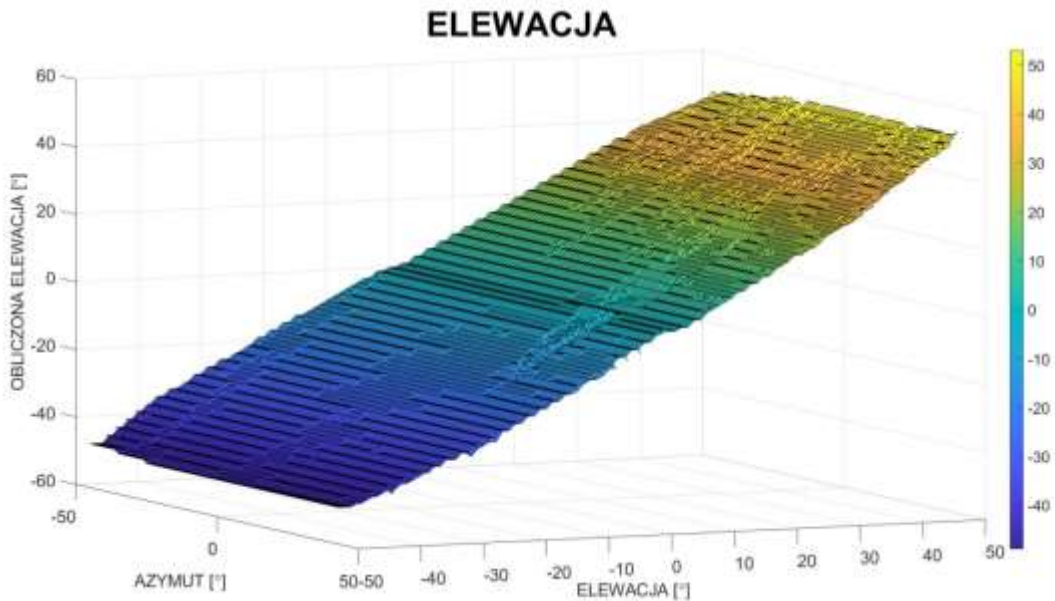
Uzyskane dane, pozwoliły obliczyć czułość modułu z uwzględnieniem czułości detektora dla długości fali 1550 nm. Wyniki pomiarów zostały zaprezentowane w tabeli 8.1.

Tabela 8.1 Wyniki pomiarów czułości.

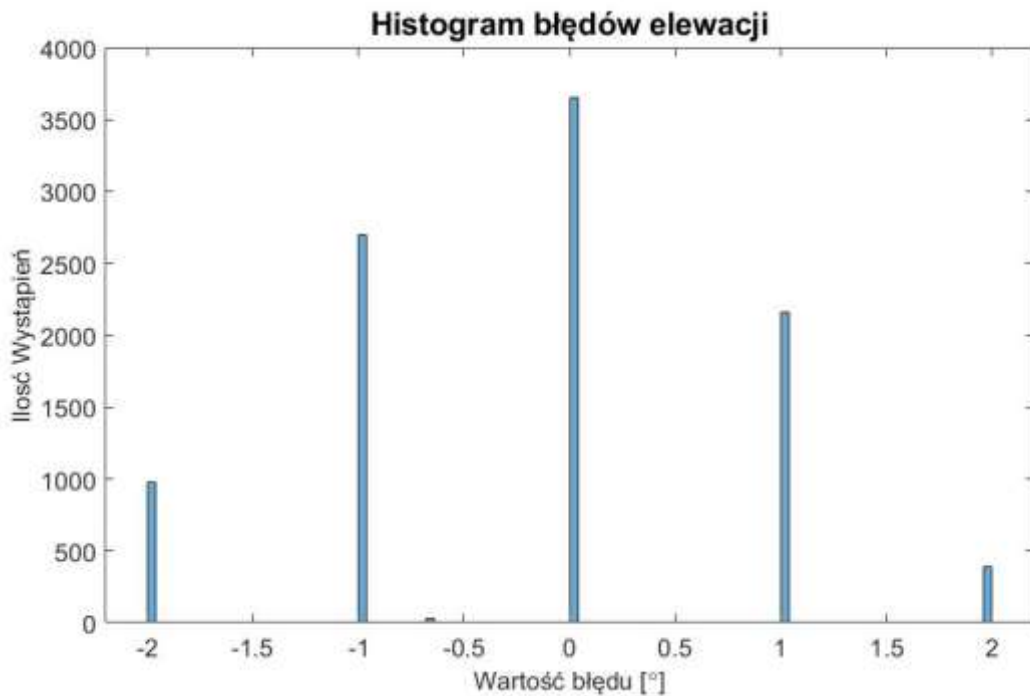
Czułość układu (W/m ²)	
$\lambda = 905 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$
3	1.5

b) Wyniki pomiarów dokładności określania kąta azymutu i elewacji dla modułu detekcyjnego

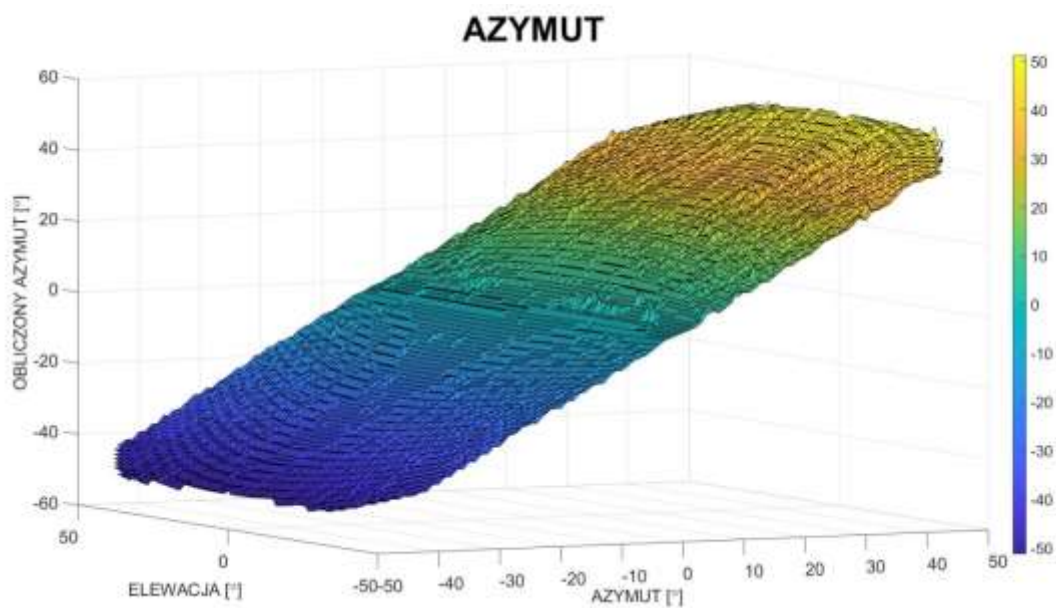
W przedziale kątów $-50^{\circ} \div 50^{\circ}$ w azymucie i elewacji dokonywano zmian ustawień co 1° . Pozyskaną informację o kątach padania promieniowania porównywano z ustawionymi wartościami a ich różnice określano jako błąd. Na podstawie zapisanych danych przy pomocy środowiska MATLAB [88] wykreślono charakterystyki określające azymut i elewację. Wyniki zostały przedstawione na rysunkach 8.6 ÷ 8.11.



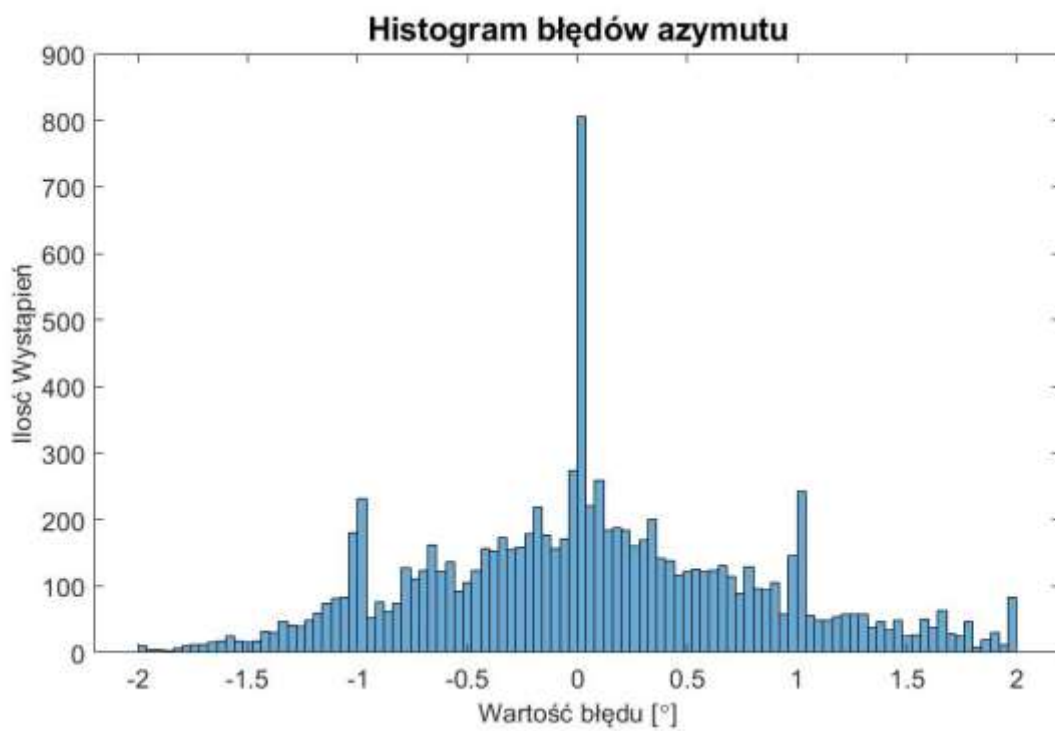
Rys. 8.6 Elewacja wyznaczona przez moduł detekcyjny



Rys. 8.7 Histogram częstości występowania wartości błędów elewacji dla modułu detekcyjnego



Rys. 8.8 Azymut wyznaczony przez moduł detekcyjny



Rys. 8.9 Histogram częstości występowania wartości błędów azymutu dla modułu detekcyjnego

a) Wyniki pomiarów zakresu dynamicznego

Moduł detekcyjny na stanowisku pomiarowym został opromieniowany promieniowaniem impulsowym o czasie trwania rzędu 100 ns. Natężenie napromienienia zostało dobrane tak aby przekraczało wartość 10^4 W/m^2 . Dla różnych pochyleń modułu detekcyjnego badano liczbę oświetlonych detektorów. Jeśli była ona większa niż wynikająca z zasady działania modułu detekcyjnego obniżano wartość natężenia napromienienia, a następnie sprawdzano czy moduł pracuje poprawnie. Za zakres dynamiczny przyjęto maksymalną wartość iradiancji, przy której moduł detekcyjny wskazywał poprawny kąt dla wszystkich wychyleń.

Stwierdzono, że moduł pracuje poprawnie dla wartości natężenia napromienienia nie przekraczającego 8 kW/m^2 .

8.2 Podsumowanie

Zmierzona wartość czułości jest niższa niż wynikająca z obliczeń. Określenie czułości przedstawione w rozdziale 6 odbyło się przy założeniu, że promieniowanie pada na powierzchnię detekcyjną prostopadle. W rzeczywistych przypadkach konieczne jest uwzględnienie kosinusa kąta pomiędzy normalną do powierzchni detekcyjnej a padającym promieniowaniem. W przypadku, gdy azymut (lub elewacja) jest ustawiona na 50° to poziom mocy na powierzchni detekcyjnej jest mniejszy (o około 42%).

Przedstawione na rysunkach 8.6 ÷ 8.9 wyniki pomiarów zostały zrealizowane dla natężenia napromienienia powyżej 3 W/m^2 . Wartość ta wynika z konieczności zapewnienia jak największej jednorodności w całym przekroju poprzecznym wiązki. Wykreślone charakterystyki wykazują, że moduł detekcyjny określa kąt w azymucie i elewacji z dokładnością $\pm 2^\circ$. Zakres błędu wynika z zasady określania kąta przez moduł.

Na rysunku 8.6 przedstawiono zależność pomierzonej zmiennej elewacji w funkcji ustawionych kątów azymutu i elewacji. Z zasady określania kąta przez sensor elewacji wynika, że będzie on obliczany z dyskretnością wynikającą z kąta konstrukcyjnego oraz średniego numeru oświetlonego detektora. Dla azymutu poziom dyskretności będzie większy gdyż jest określany według zależności (8.2), a ta uwzględnia już elewację. Błąd, zarówno w przypadku azymutu i elewacji zawiera się przedziale $\pm 2^\circ$.

W przypadku elewacji 84% błędów zawiera się w przedziale $\pm 1^\circ$. W analogicznym przedziale dla sensora azymutu znajduje się 78% wyników.

Zmierzony zakres dynamiczny jest mniejszy niż wynikający z analiz teoretycznych. Wynika to z tego, że konstrukcja komory nieznacznie odbiega od założonego modelu matematycznego.

Detektory są montowane na podstawach PCB, a te są montowane do korpusu całego modułu przy pomocy wkrętów. Zarówno PCB, jak i mechaniczne elementy mocujące są niezastłonięte, zatem podnoszą poziom promieniowania rozproszonego wewnątrz.

9 WNIOSKI

Systemy SOPL służą do ochrony platform poprzez informowanie o promieniowaniu laserowym. Informacja o takim fakcie jest podstawą do podjęcia działań mających na celu ochronę lub przeciwdziałanie możliwym następstwom użycia danego środka.

Komplet danych dostarczanych przez elementy systemu SOPL powinien zawierać precyzyjne informacje o kierunku na źródło promieniowania. Jest to o tyle istotne, iż część systemów przeciwdziałania, czy też sieciocentryczne zarządzanie polem walki takich informacji wymaga.

Oczywistym jest, że kierunek powinien być określony z odpowiednią dokładnością i rozdzielczością aby ta informacja była użyteczna dla wszystkich elementów z niej korzystających. Dla przykładu można podać, że rozmiar kątowy KTO Rosomak na 1000 m jest mniejszy niż 1° . Dokładność określania kąta kierunku na źródło ma znaczenie jeśli konieczna jest jego lokalizacja.

Celem pracy była optymalizacja modułu detekcyjnego systemu SOPL, przy założonych kryteriach dotyczących czułości, rozdzielczości, pola widzenia oraz minimalizacji wymiarów mechanicznych.

Osiągnięcie założonego celu zrealizowane zostało poprzez:

1. przeanalizowanie źródeł generujących promieniowanie laserowe na polu walki,
2. przegląd stanu technologii w zakresie systemów SOPL oraz zdefiniowanie ich podstawowych parametrów,
3. przegląd metod określania kąta padania promieniowania,
4. analizę matematyczną określania kątów padania promieniowania w zaproponowanym układzie geometrycznym,
5. opracowanie modelu matematycznego działania sensora oraz optoelektronicznego modułu detekcyjnego,
6. opracowanie modelu matematycznego działania systemu złożonego z kilku modułów,
7. przeprowadzenie analizy wpływu poszczególnych parametrów zarówno układów elektronicznych jak i wymiarów detektora na podstawowe parametry mechaniczne komory pomiarowej,
8. analizę poziomego promieniowania rozproszonego wewnątrz komory pomiarowej;

9. optymalizację modułu detekcyjnego - czułości względem wymiarów geometrycznych.
10. zaprojektowanie torów analogowych,
11. opracowanie koncepcji obliczania kątów azymutu i elewacji przy pomocy układów cyfrowych;
12. opracowanie protokołów transmisji danych z modułu;
13. wykonanie oprogramowania sterującego stanowiskiem pomiarowym i zbierającym dane;
14. wykonanie algorytmów i skryptów w środowisku MATLAB do analizy danych pomiarowych;
15. wykonanie sterownika lasera impulsowego o zmiennym czasie trwania impulsu oraz zmiennej mocy wyjściowej.
16. przeprowadzenie badań laboratoryjnych i poligonowych modułu detekcyjnego oraz analiza wyników.

Uzyskane wyniki pomiarów, określające dokładność wyznaczania kąta wskazują, że w całym polu widzenia moduł detekcyjny wskazuje kierunek na przychodzące promieniowanie z błędem nie większym niż $\pm 2^\circ$. Większość pomiarów określona jest z błędem $\pm 1^\circ$ (84% wartości błędów elewacji, oraz 78% błędów azymutu). W odniesieniu od prezentowanych komercyjnych systemów jest to wartość, która wpisuje się w obecne trendy projektowania urządzeń.

Optoelektroniczny moduł detekcyjny posiada czułość 3 W/m^2 . Oznacza to, że system zawierający takie moduły, pod względem czułości, można porównywać z najlepszymi rozwiązaniami dostępnymi na rynku.

Zakres dynamiczny modułu detekcyjnego ma wartość 8 kW/m^2 . Modyfikacje, polegające na całkowitym pokryciu elementów rozpraszających promieniowanie, materiałem o niskim współczynniku odbicia zwiększą wartość tego parametru. Zostaną one zaimplementowane w module detekcyjnym w wersji prototypowej.

Dalszy rozwój technik wytwarzania laserów, szczególnie źródeł półprzewodnikowych skutkuje spadkiem cen. Należy się spodziewać, że na współczesnym polu walki coraz więcej źródeł będzie wyposażonych w emitery tego typu. W związku z tym dąży się do maksymalizacji czułości elementów detekcyjnych SOPL, aby wykrywać promieniowanie od takich źródeł.

Powyższy wniosek nie znaczy, że lasery wykonane na ciele stałym nie będą stosowane w urządzeniach wojskowych. W dalszym ciągu istnieć będą dalmierze monoimpulsowe oraz podświetlacze laserowe emitujące promieniowanie o wysokich mocach. Konieczne jest zatem prowadzenie prac mających na celu zwiększanie zakresu dynamicznego pracy systemów SOPL przy jednoczesnej maksymalizacji ich czułości.

Dokładność określania kąta padania promieniowania jest niezwykle istotna, jeśli informacja z systemu SOPL jest wykorzystywana przez inne systemy podejmujące akcję automatycznego przeciwdziałania. Dalszy rozwój badań w tym obszarze, będzie się skupiał na maksymalizacji dokładności określania położenia źródła promieniowania.

10 Bibliografia i źródła

- [1] IOE-WAT, „*PBS Optoelektroniczne rozpoznanie pola walki*,” IOE WAT, Warszawa, 2016.
- [2] T. Drozd, M. Zygmunt, P. Knysak i J. Wojtanowski, „*Analysis of data transmission technique based on pulsed laser*,” *Opto-Electronics Review*, tom 20, nr 1, 2012.
- [3] IOE WAT, „*Broń skierowanej energii – podsumowanie wyników Programu Strategicznego*,” [Online]. Available: <http://www.ioe.wat.edu.pl/aktualnosci3/bron-skierowanej-energii-podsumowanie-wynikow-programu-strategicznego/>.
- [4] NCBIR, „*Założenia do projektów w Konkursie nr 1/PS/2014*,” [Online]. Available: https://archiwum.ncbr.gov.pl/fileadmin/user_upload/import/other/zalozenia_energia_2014.pdf.
- [5] WNP, „*BROŃ SKIEROWANEJ ENERGII*,” [Online]. Available: <https://www.wnp.pl/przemysl-obronny/dzialo-elektromagnetyczne-bron-laserowa-trwaja-prace-testow-na-ludziach-nie-bylo,328442.html>.
- [6] Lockheed-Martin, „*Laser Weapon Systems*,” [Online]. Available: <https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/rms/documents/directed-energy/Lockheed-Martin-Laser-Weapon-Systems.pdf>.
- [7] IOE-WAT. [Online]. Available: <http://www.ztl.wat.edu.pl/index.php/o-instytucie-optoelektroniki/iek-samodzielnajednostka-w-ramach-wat>.
- [8] Defence24. Obra. [Online]. Available: <https://www.defence24.pl/system-pc-na-nowym-indonezyjskim-czolgu>.
- [9] Kenbit. SOL. [Online]. Available: <https://www.kenbit.pl/sol-1/>.
- [10] WZE. [Online]. Available: <https://www.wze.com.pl/systemypowietrzne/>.
- [11] Defence24. MSR-W. [Online]. Available: <https://www.defence24.pl/wojskowe-zaklady-elektroniczne-wespra-systemy-rozpoznania-radarowego>.

- [12] T. Prokic, *Antenna Design for Angle of Arrival Measurement in Access Control Applications*, Sztokholm, 2019.
- [13] M. Zygmunt, *Rozprawa doktorska*, Warszawa: Wojskowa Akademia Techniczna, 2002r.
- [14] Safran. [Online]. Available: www.safran-vectronix.com.
- [15] L. Thomas E. BaystonRoy C. Weidler, „*Method and system for pulse interval modulation*”. USA Patent US5026156A, 1972.
- [16] NorthropGrumman, „NorthropGrumman,” [Online]. Available: <https://news.northropgrumman.com/news/releases/photo-release-northrop-grumman-receives-128-million-contract-to-supply-army-with-lightweight-laser-designator-range-finders>.
- [17] M. Cox, „Military.Com,” [Online]. Available: <https://www.military.com/daily-news/2013/11/01/army-close-to-breakthrough-in-night-marksmanship.html>.
- [18] EoTechnic, „eotechinc,” [Online]. Available: <https://www.eotechinc.com/advanced-target-pointer-illuminator-aiming-laser-at-pial-standard-power-an-peq-15>.
- [19] „Lasersec-systems,” [Online]. Available: <http://www.lasersec-systems.com/assets/sealase-ii-datasheet.pdf>.
- [20] „BeamQ,” [Online]. Available: <https://www.beamq.com/vehicle-laser-dazzlers-portable-lang-range-laser-system-3km-p-1059.html?zenid=efhrhulspm76s70u6nurqr77u1>.
- [21] „Elbit,” [Online]. Available: www.elbit.com.
- [22] NorthropGrumman, [Online]. Available: <https://www.northropgrumman.com/advanced-weapons/>.
- [23] Global Security, [Online]. Available: <https://www.globalsecurity.org/military/library/budget/fy2001/dote/navy/01mlws.html>.
- [24] Leonardo Company, [Online]. Available: <https://www.leonardocompany.com/en/products/ralm02-1>.

- [25] Leonardo Company, [Online]. Available: https://www.leonardocompany.com/documents/20142/3149429/Copia_di_RA_LM02_v2_LQ_mm08402_.pdf?t=1538987453110.
- [26] Metrodat, [Online]. Available: <http://www.metrodat.eu/lw5.htm>.
- [27] Metrodat, „*Laser system*,” [Online]. Available: <http://www.metrodat.eu/slwds.htm>.
- [28] Defence24, [Online]. Available: <https://www.defence24.com/germany-modernization-of-the-leopard-tanks-to-begin-in-2017-ministry-of-defence-rejects-the-rumors-present-within-the-media>.
- [29] HENSOLDT Optronic, „*MUSS*,” [Online]. Available: https://www.hensoldt.net/fileadmin/HENSOLDT_2019/Products/Optronics/Vehicle_Optronics/0746_17_MUSS_brochure_E_intranet.pdf.
- [30] HENSOLDT Optronics, „*MUSS*,” [Online]. Available: <https://www.hensoldt.net/products/optronics/muss-multifunctional-self-protection-for-vehicles/>.
- [31] Wikipedia, „*Muss*,” [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/MUSS_\(countermeasure\)](https://en.wikipedia.org/wiki/MUSS_(countermeasure)).
- [32] Saab, „*NLWS*,” [Online]. Available: <https://www.saab.com/products/nlws-naval-laser-warning-system>.
- [33] EngineeringNews, „*NWLS in UEA Navy*,” [Online]. Available: <https://www.engineeringnews.co.za/article/uae-navy-to-buy-sa-laserwarning-system-2004-12-09>.
- [34] Defense.ru, „*NWLS Defence.ru*,” [Online]. Available: <https://saab-ab.defence.ru/article/1070/>.
- [35] PCO, „*PSCO S.A.*,” [Online]. Available: https://pcosa.com.pl/wp-content/uploads/2018/07/Profil_spolki_2017.pdf.
- [36] PCO S.A., „*OBRA PCO*,” [Online]. Available: https://pcosa.com.pl/wp-content/uploads/2018/07/web_OBRA1.pdf.
- [37] KENBIT, „*SOL-1 KENBIT*,” [Online]. Available: <https://www.kenbit.pl/sol-1/>.
- [38] Wojskowe Zakłady Elektroniczne, „*Systemy Powietrzne*,” [Online]. Available: <https://wze.com.pl/systemypowietrzne/>.

- [39] M. P.-H. L. Patwari, „*Two-dimensional angle of arrival detection device*”. USA Patent US20030128355A1, 2002.
- [40] E. O. Cole, „*Collimated light direction sensor system*”. USA Patent US5319188A, 1993.
- [41] J. M. K. Winker, „*Optical angle of arrival measurement system and method*”. USA Patent US8334499B2, 2009.
- [42] M. P. Philip i Y. K. Jain, „*Fine sun sensors for APPLE Satelite*,” *Indian Journal of Radio & Space Physics*, pp. 13-17, 12 02 1983.
- [43] Z. Barbaraić, „*Sensitivity of a position sensitive detector with quadrant*,” *Optics*, pp. 38-44, 02 04 2013.
- [44] M. Jakubaszek , J. Wojtanowski, M. Zygmunt i A. Młodzianko , „*Sensor of light incidence angle*,” *PROCEEDINGS OF SPIE*, 04 12 2018.
- [45] A. C. M. G. Jaques Duobis, „*Analog high resolution laser irradiation detector (HARLID)*”. USA Patent US5604695A, 1995.
- [46] A. Cantin, J. Dubois, . D. Pomerleau, M. Altman i P. P. Webb, „*Miniaturized digital high-angular-resolution laser irradiation detectors (HARLID) for laser warning receivers (LWR)*,” *SPIE 3061, Infrared Technology and Applications XXIII*, p. 11, 13 08 1997.
- [47] P. Webb, S. Soltesz, A. Cantin, J. Fortin i D. Pomerleau, „*Improved miniaturized HARLID for laser warning systems having high angular resolution*,” *PROCEEDINGS OF SPIE*, pp. 94-200, 10 10 2001.
- [48] Areospace&Defense Technology, „*Harlid*,” 01 04 2012. [Online]. Available: <https://www.aerodefensetech.com/component/content/article/adt/features/articles/13339>.
- [49] Exelitas Technologies, „*Exelitas Technologies*,” [Online]. Available: <https://www.excelitas.com>.
- [50] Excelitas, „*EXACTD-362 Angle-of-Arrival Photodiode Module*,” [Online]. Available: <https://www.excelitas.com/product/exactd-362-angle-arrival-photodiode-module>.

- [51] L. Xiao, Z. Jilong, T. Erming, Z. Yue i W. Zhibin, „A new design for Laser Warning System,” w *Proceeding of 7th WSEAS International on Signal, Speech and Image Processing*, Pekin, 2007r..
- [52] S. Ping, N. Yanxiong, L. Daqian, Z. Jianjun, L. Yina, Z. Chao, N. Haisha i Y. Shi, „Design and implementation of grating diffraction laser warning system based on DSP,” *Infrared and Laser Engineering*, tom 42, nr 3, pp. 643-646, 3 03 2013.
- [53] E. Hecht, *Optyka*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2012, pp. 483-487.
- [54] L. FU i Z. G. HONG, „Design of laser warning receiver based on DSP,” *IEE*, pp. 325-328, 01 11 2009.
- [55] A. Rogalski i Z. Bielecki, *Detekcja Sygnałów Optycznych*, M. Kasperska, Red., Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN SA, 2020, pp. 55, 455-459, 531-555.
- [56] Hamamatsu, „PSD HAMAMATSU,” [Online]. Available: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s1880_s2044_kpsd1015e.pdf.
- [57] V. E. Zuev, „Propagation of Visible and Infrared Waves in the Atmosphere (Rasprostranenie Vidimyykh i Infrakrasnykh Voln v Atmosfere),” , 1972. [Online]. Available: <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getrecord&metadataprefix=html&identifier=ad0753974>. [Data uzyskania dostępu: 9 2 2021].
- [58] HITRAN, „Hitran,” [Online]. Available: <https://hitran.org/>.
- [59] A. E. Siegman, *Laser*, Oxford: Oxford University Press, 1986, pp. 53-54.
- [60] M. Zygmunt i K. Kopczyński, „Laser warning system as an element of optoelectronic battlefield surveillance,” *PROCEEDINGS OF SPIE*, 11 02 2020.
- [61] J. K. Jabczyński i P. Gontar, „Impact of atmospheric turbulence on coherent beam combining for laser weapon systems,” *Defence Technology*, 2020.
- [62] P. Zbiorowa, *Poradnik Matematyczny Część 1*, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1985, pp. 198-197.
- [63] М. Яковлевич Выгодский, *Справчник по высшей математике*, Москва: Издательство „НАУКА”, 1966, p. 32.

- [64] R. Leitner, *Zarys matematyki wyższej dla studentów cz I*, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo Techniczne, 1995, p. 119.
- [65] Laser Components, „*IG17 Photodiode Series*,” [Online]. Available: https://www.lasercomponents.com/fileadmin/user_upload/home/Datasheets/lc-ingaas/ig17-series.pdf.
- [66] Laser Components, „*Package Drawings*,” [Online]. Available: https://www.lasercomponents.com/fileadmin/user_upload/home/Datasheets/lc-ingaas/ingaas-photodiodes-package-drawings.pdf.
- [67] Hamamatsu, „*S12915 photodiode*,” [Online]. Available: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s12915_series_kspd1086e.pdf.
- [68] Hamamatsu, „*G12183 photodiode*,” [Online]. Available: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/g12183_series_kird1119e.pdf.
- [69] Laser Components, „*IG17 photodiode*,” [Online]. Available: https://www.lasercomponents.com/fileadmin/user_upload/home/Datasheets/lc-ingaas/ig17-series.pdf.
- [70] Hamamatsu Photonic, „*Handbook Si Photodiode*,” [Online]. Available: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e02_handbook_si_photodiode.pdf.
- [71] W. Hill i P. Horowitz, *Sztuka elektroniki T1,T2*, Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2006r..
- [72] Texas Instruments, *Transimpedance amplifier circuit*, https://www.ti.com/lit/an/sboa268a/sboa268a.pdf?ts=1615143681148&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.pl%252F.
- [73] M. Nadachowski i Z. Kulka, *Analogowe Układy Scalone*, Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1985, pp. 134-135.
- [74] U. Tietze i C. Schenk, *Układy Półprzewodnikowe*, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo Techniczne Sp. z.o.o, 2009, pp. 547-548.
- [75] B. Carter i R. Mancini, *Wzmacniacze operacyjne teoria i praktyka*, Legionowo: Wydawnictwo BTC, 2011.

- [76] Brisebois, Glen, Analog Devices, „*Analog Devices Design Ideas*,” [Online]. Available: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/tech-articles/lt-journal-article/LT1806_0501_Mag.pdf.
- [77] Analog Devices, „*ADA 4817*,” [Online]. Available: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADA4817-1_4817-2.pdf.
- [78] F. W. Byron i R. W. Fuller, *Matematyka w fizyce klasycznej i kwantowej*, tom I, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1973, pp. 241-242.
- [79] S. K. Solanki i Y. C. Unruh, „*Solar Irradiance Variability*,” *arXiv: Solar and Stellar Astrophysics*, tom , nr , p. , 2012.
- [80] R. Józwicki i . L. Wawrzyniuk, *Technika Podczerwieni*, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2014, p. 37.
- [81] E. L. Dereniak i G. D. Boreman, *Infrared Detectors and Systems*, New York: Jonh Wiley & Sons, Inc, 1996, p. 277.
- [82] MODTRAN, „*ModtranOnline*,” [Online]. Available: http://modtran.spectral.com/modtran_home.
- [83] Schoot, „*Schoot- RG850*,” [Online]. Available: <https://microsites.schott.com/d/us-lidar/14f1d508-b8d6-4d8f-bd38-e4c6c68c916b/20190920085634/schott-microsites-optical-filter-glass-for-lidar-applications-english-20092019.pdf>.
- [84] T. J. Sobering, „*Equivalent Noise Bandwidth*,” [Online]. Available: <https://www.k-state.edu/edl/docs/pubs/technical-resources/Technote1.pdf>.
- [85] M. Vargas i R. Pallas-Areny, „*Comments on "on resistor-induced thermal noise in linear circuits"*,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, tom 51, nr 2, pp. 398-398, 2002.
- [86] C. Ciofi, F. Crupi, C. Pace i G. Scandurra, „*How to enlarge the bandwidth without increasing the noise in OP-AMP-based transimpedance amplifier*,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, tom 55, nr 3, pp. 814-819, 2006.
- [87] Analog Devices, „*LT Spice*,” [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>.

- [88] MathWorks, „*Matlab*,” [Online]. Available: https://uk.mathworks.com/?s_tid=gn_logo.
- [89] Actar, „*Metal Velvet*,” [Online]. Available: <https://www.acktar.com/wp-content/uploads/2017/12/Metal-Velvet-foil-data-sheet-June-2014-rev-1.pdf>.
- [90] Analog Devices, „*LT 1719*,” [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1719fa.pdf>.
- [91] Xilinx, „*Strona Oficjalna*,” [Online]. Available: <https://www.xilinx.com/>.
- [92] Xilinx, „*Spartan-6*,” [Online]. Available: https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds160.pdf.
- [93] FTDI Chip, „*Oficjalna Strona*,” [Online]. Available: <https://ftdichip.com/>.
- [94] Future Technology Devices International, „*FTD232RL*,” [Online]. Available: https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf.
- [95] QT Company, „*Strona Oficjalna*,” [Online]. Available: <https://www.qt.io/>.
- [96] Zaber Technologies Inc., „*Strona oficjalna*,” [Online]. Available: <https://www.zaber.com/>.
- [97] Zaber Technologies Inc., „*X-RSW*,” [Online]. Available: <https://www.zaber.com/products/rotary-stages/X-RSW>.
- [98] Thorlabs, „*Photodiodes*,” [Online]. Available: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=2822.

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 3.1 Dalmierz firmy Safran [14]	16
Rys. 3.2 Podświetlacz laserowy firmy Northrop Grumman [16]	18
Rys. 3.3 Idea zasady działania sytemu z naprowadzaniem w wiązce	19
Rys. 3.4 Przykład zastosowania oświetlacza i wskaźnika laserowego	20
Rys. 3.5 Wskaźnik laserowy AN/PEQ-15 [18]	21
Rys. 3.6 Olśniewacz laserowy Sealase II [19].....	21
Rys. 3.7 Zastosowanie olśniewacza zamontowanego na pojeździe [20].....	22
Rys. 4.1 Systemy ostrzegania o promieniowaniu laserowym firmy Elbit [21]	28
Rys. 4.2 System realizujący funkcję ostrzegania o promieniowaniu	29
Rys. 4.3 System ostrzegania o promieniowaniu laserowym RALM 02 [25]	30
Rys. 4.4 Głowica systemu HEXOCULUS firmy Metrodat [27]	32
Rys. 4.5 Elementy systemu MUSS [31]	33
Rys. 4.6 Głowica detekcyjna systemu NLWS [34]	34
Rys. 4.7 System SSP1- „OBRA-3” [36].....	35
Rys. 4.8 Elementy systemu SOL-1 [37]	36
Rys. 4.9 System LWR-H [38].....	37
Rys. 5.1 Idea określania kąta padania promieniowania.....	39
Rys. 5.2 Idea określenia kierunku padania światła według patentu US20030128355A1 [39]	40
Rys. 5.3 Idea określania kierunku padania światła według patentu US5319188A [40].	41
Rys. 5.4 Idea określenia kierunku padania światła według patentu US8334499B2 [41]	42
Rys. 5.5 Czujniki położenia słońca względem satelity [42]	43
Rys. 5.6 Sensor kąta padania promieniowania (skala w cm).....	44
Rys. 5.7 Zasada działania systemu HARLID [48].....	45
Rys. 5.8 Sensor EXACTD-362 [50]	45
Rys. 5.9 Układ diafragm w systemie HARLID [50]	46
Rys. 5.10 Budowa linijek detektorów systemu HARLID [50].....	46
Rys. 5.11 Układ do automatycznego określania kąta padania z użyciem metody dyfrakcyjnej.....	48
Rys. 5.12 Układ mechanicznych modyfikacji przestrzennej charakterystyki kątowej czułości detektora	48

Rys. 6.1	Koncepcja modułu detekcyjnego składającego się z dwóch sensorów	55
Rys. 6.2	Idea działania sensora określającego kąt padania promieniowania	56
Rys. 6.3	Przekrój przez komorę pomiarową	57
Rys. 6.4	Graficzna interpretacja powstawania błędów podczas określania kąta padania przez sensor	58
Rys. 6.5	Wartość błędu podczas określania kąta padania promieniowania dla różnych wartości szerokości szczelin	60
Rys. 6.6	Idea określania kierunku na źródło emitujące promieniowanie laserowe przez moduł detekcyjny.....	61
Rys. 6.7	Graficzne zobrazowanie kąta konstrukcyjnego θ	62
Rys. 6.8	Geometryczna interpretacja kątów azymutu i elewacji w odniesieniu do v	63
Rys. 6.9	Idea działania systemu SOPL w globalnym układzie odniesienia.....	65
Rys. 6.10	Interpretacja geometryczna wpływu szerokości szczeliny na liczbę oświetlonych detektorów	68
Rys. 6.11	Rysunek przedstawiający detektor	69
Rys. 6.12	Wartość promienia powierzchni detekcyjnej w funkcji wymiaru detektora...	70
Rys. 6.13	Liczba detektorów koniecznych do utrzymania określonego ($\pm 45^\circ$) pola widzenia modułu detekcyjnego	72
Rys. 6.14	Pole widzenia sensora elewacji w funkcji liczby detektorów oraz kąta azymutu	73
Rys. 6.15	Układ analityczny do oszacowania kątów granicznych azymutu i elewacji w sensorze elewacji	74
Rys. 6.16	Wartości kątów granicznych w funkcji długości szczeliny dla sensora elewacji.	75
Rys. 6.17	Graficzna interpretacja kątów granicznych dla sensora azymutu.	76
Rys. 6.18	Charakterystyki czułości spektralnej detektorów [67, 68].....	80
Rys. 6.19	Charakterystyka czułości widmowej detektora IG17	81
Rys. 6.20	Układy pracy fotodiody a)układ fotodiody z pasywnym obciążeniem, b) układ z wzmacniaczem transimpedancyjnym	82
Rys. 6.21	Model wzmacniacza transimpedancyjnego	85
Rys. 6.22	Uproszczony model wzmacniacza transimpedancyjnego.....	86
Rys. 6.23	Charakterystyka częstotliwościowa modułu transimpedancji wzmacniacza transimpedancyjnego dla różnych wartości pola wzmocnienia wzmacniacza operacyjnego.....	87

Rys. 6.24 Wpływ wartości pojemności kompensującej na charakterystykę częstotliwościową modułu transimpedancji.....	88
Rys. 6.25 Pasma impulsu o kształcie krzywej dzwonowej określonej przez czas trwania impulsu na połowie wartości maksymalnej	90
Rys. 6.26 Symulacja obrazująca zmniejszenie zakresu dynamicznego na wyjściu wzmacniacza transimpedancyjnego dla sygnału o wartości maksymalnej 100 μ A i prądu tła	92
Rys. 6.27 Iradiancja słońca w funkcji długości fali uzyskana przy pomocy programu MODTRAN.....	93
Rys. 6.28 Charakterystyka transmisji filtra wykonanego ze szkła barwnego RG850....	95
Rys. 6.29 Wynikowa charakterystyka transmisyjna filtra	95
Rys. 6.30 Szumowa charakterystyka spektralna wzmacniacza transimpedancyjnego ...	99
Rys. 6.31 Wykres SNR w funkcji pasma sygnału	102
Rys. 6.32 Czułość modułu i jego objętość w funkcji średnicy detektora	104
Rys. 6.33 Układ do analizy promieniowania rozproszonego wewnątrz komory pomiarowej.....	106
Rys. 6.34 Schemat do analizy promieni rozproszonych, odbitych od powierzchni zwierciadła	110
Rys. 6.35 Natężenie napromienienia na powierzchni detektorów pochodzące od promieni rozproszonych w komorze pomiarowej od powierzchni górnej dla różnych kątów padania promieniowania (α, β).....	112
Rys. 6.36 Natężenie napromienienia na powierzchni detektorów pochodzące od promieni odbitych od zwierciadła dla różnych kątów padania promieniowania (α, β).113	
Rys. 6.37 Współczynnik odbicia foli Acktar	114
Rys. 7.1 Moduł detekcyjny	117
Rys. 7.2 Fragment wnętrza komory pomiarowej.....	118
Rys. 7.3 Widok elementów detekcyjnych i układów analogowych	119
Rys. 7.4 Schemat funkcjonalny modułu detekcyjnego.....	120
Rys. 7.5 Projekt układu analogowego	121
Rys. 7.6 Układ stabilizacji napięcia odniesienia.....	122
Rys. 7.7 Tor wejściowy w układzie FPGA (1 kanał)	123
Rys. 7.8 Układ bitów w bajcie w ramce transmisyjnej.....	126
Rys. 7.9 Interfejs użytkownika	127
Rys. 8.1 Schemat stanowiska pomiarowego.....	129

Rys. 8.2 Ruchoma część stanowiska pomiarowego	130
Rys. 8.3 Algorytm pomiarowy.....	131
Rys. 8.4 Moduł detekcyjny na stanowisku pomiarowym	132
Rys. 8.5 Charakterystyka wartości iradiancji w funkcji napięcia na wyjściu układ pomiarowego	133
Rys. 8.6 Elewacja wyznaczona przez moduł detekcyjny.....	134
Rys. 8.7 Histogram częstości występowania wartości błędów elewacji dla modułu detekcyjnego	134
Rys. 8.8 Azymut wyznaczony przez moduł detekcyjny	135
Rys. 8.9 Histogram częstości występowania wartości błędów azymutu dla modułu detekcyjnego	135
Rys. 15.1 Widok modułu detekcyjnego w prototypowej.....	164
Rys. 15.2 Azymut wyznaczony przez moduł detekcyjny w wersji prototypowej.	165
Rys. 15.3 Błąd azymutu wyznaczonego przez moduł detekcyjny w wersji prototypowej..	165
Rys. 15.4 Histogram częstości występowania wartości błędów azymutu modułu detekcyjnego w wersji prototypowej.....	166
Rys. 15.5 Elewacja wyznaczona przez moduł detekcyjny w wersji prototypowej.....	166
Rys. 15.6 Błąd elewacji dla modułu detekcyjnego w wersji prototypowej	167
Rys. 15.7 Histogram częstości występowania wartości błędów elewacji dla modułu detekcyjnego w wersji prototypowej	167
Rys. 15.8 System podczas badań poligonowych.....	168
Rys. 15.9 Histogram rozkładu ilości błędów podczas określania azymutu w badaniach terenowych.....	169
Rys. 15.10 Histogram rozkładu ilości błędów podczas określania elewacji w badaniach terenowych.....	170

SPIS TABEL

Tabela 3.1 Zestawienie parametrów systemów wykorzystujących promieniowanie laserowe w zastosowaniach militarnych	23
Tabela 4.1 Parametry systemu firmy ELBIT [17]	27
Tabela 4.2 Wybrane parametry systemu RALM02 [21]	30
Tabela 4.3 Parametry systemów firmy LAWREC [23].....	31
Tabela 4.4 Parametry systemu LWR-H.....	37
Tabela 6.1 Wartości współczynnika ekstynkcji atmosferycznej dla wybranych długości fal.	52
Tabela 6.2 Wartości natężenia napromienienia pochodzące od reprezentatywnych źródeł.	53
Tabela 6.3 Minimalna wartość długości szczeliny sensora azymutu zapewniającej odpowiednie pole widzenia.....	78
Tabela 6.4 Minimalna objętość bryły modułu detekcyjnego.....	79
Tabela 6.5 Wartość prądu generowanego przez tło.....	94
Tabela 6.6 Wartości fotoprądu pochodzącego od tła z zastosowaniem filtra optycznego	96
Tabela 6.7 Zależność prądu ciemnego fotodiody od jej pola powierzchni detekcyjnej .	97
Tabela 6.8 Widmowa gęstość prądu szumów fotodiody	98
Tabela 6.9 Wartość oszacowanej czułości modułu detekcyjnego	103
Tabela 8.1 Wyniki pomiarów czułości.	133

11 Załącznik nr 1. Zestawienie źródeł promieniowania elektromagnetycznego

L.p	Nazwa	przeznaczenie	Długość fali (nm)	Energia	Moc (W)	Częstotliwość powtarzania (Hz)	Czas trwania impulsu	Rozbieżność	Producent	Uwagi
1	LUNA	pointer	445		2		CW	1.2 mrad		
2	SPARTAN	pointer	447		1		CW			
3	SWOT-BX	pointer	473		0,005		CW			
4		pointer	532		0,8		CW	-		
5		dazzler	532		0,15-0,25		CW	1.2x12 mrad		
		dazzler	532		0,3-0,5		CW	1.2x12 mrad		
6	Green Laser Dazzler 600-700mw	dazzler	532		0,6-0,7		CW	1.2x12 mrad		
7	ND5	iluminator	532		0,02		CW			
8	DABAL-A ²	laser pointer	532		0,05		CW			
9	POLAR	pointer	589		0,1		CW			
10	AN/PEQ-15A	laser pointer	635		0,003		CW	0.5x1.5 mrad		

11	LASER WAND	pointer	635		0,5		CW			
12	AN/APQ-2	laser pointer	635		0,05		CW	3 mrad	Insight technology Incorporated	
13	DABAL-A ²	laser pointer	635		0,005		CW			
14		pointer	650		1		CW			
15		pointer	660		0,2		CW			
16		pointer	808		Do 1		CW	-		
17	IR Laser Magma Series	pointer	808		3		CW			
18	AN/APQ-2	laser illuminator	830		0,15		CW	>10°	Insight technology Incorporated	
19	AN/APQ-2	pointer	830		0,15		CW	3 mrad	Insight technology Incorporated	
20	CLIP	illuminator	830		0,6		CW		FLIR	
20	FLIR EOC MLP Vis/NIR/SWIR	pointer	830		0,02		CW		FLIR	
21	IR Laser Magma Series	pointer	830		2		CW			
22		laser illuminator	835		0,05		CW			
23		laser illuminator	835		0,2		CW			

24	AN/PEQ-15A	laser illuminator	835		0,035			1x6 mrad		
25	AN/PEQ-15A	pointer	835		0,035			0.5x1 mrad		
26	OV-3 GEN III	laser illuminator	850		0,06		CW			
27	NIR	illuminator	850		0,04		CW	2°-5°	FLIR	
28	PLRF10	laser rangefinder	905		I class				Vectronix	
29	High power NIR	illuminator	975		1		CW		FLIR	
30	IR Laser Magma Series	pointer	980		3		CW			
31	GAVRAN GV04Y	laser rangefinder	1064	50mJ		12 ppm			Metrodat	
32	AN/PED-1	laser designator	1064			1 Hz lub NATO code			Northrop Grumman	
33	IR Laser Magma Series	pointer	1064		1,5	-	CW			
34	LF28A	laser designator	1064	>70mJ		20 Hz		<300 µrad	THALES	
35	TYR	laser designator	1064	>70mJ		20 Hz		<300 µrad	THALES	
36	DHY307	laser designator	1064	>80mJ		bd			Cilas	
37	3L-ALST	laser designator	1064	>75mJ		8-20 Hz		<250 µrad	Advanced Laser Technology	

38	3L-ALST	laser designator	1064	>125mJ		8-20 Hz		<200 μ rad	Advanced Laser Technology	
39	GLDT-III	laser designator	1064	80mJ				300 μ rad	Northrop Grumman	
40	NIR	illuminator	1064		0,1		CW	2°-5°	FLIR	
41	FLIR EOC MLP Vis/NIR/SWIR	pointer	1064		0,02		CW		FLIR	
42	High power NIR	illuminator	1064		4		CW		FLIR	
43	MLR-2K	rangefinder	1535	0,1mJ		5 Hz	2 ns		FLIR	
44	MLR-10K	rangefinder	1535	1mJ		1 Hz	6 ns		FLIR	
45	3L-ALST	rangefinder	1535	<8mJ		1 Hz		<500 μ rad	Advanced Laser Technology	
46	GARVAN GV04	laser rangefinder	1540	8mJ		6 ppm			Metrodat	
47	DLEM 1k	laser rangefinder	1550		I classs				Jenoptik	
48	PLRF15	laser rangefinder	1550		I class				Vectronix	
49	FLIR EOC MLP Vis/NIR/SWIR	pointer	1550		0,015		CW		FLIR	
50	FLIR CLI-3	illuminator	1064		30		pulse		FLIR	

12 Załącznik nr 2. Zbiorcze zestawienie charakterystyk systemów wykrywania i ostrzegania oferowanego na rynku

Nazwa systemu	Producent	Kraj	Parametry operacyjne								Uwagi
			FOV		Rozdzielczość		Zakres spektralny	Czułość	Współczynnik fałszywych alarmów	Czas reakcji	
			(azymut)	(elewacja)	azymut	elewacja					
LWR-H	WZE Zielonka	Polska	360°	±45°	15°	30°	0,8-11μm	1000W/m ²			System na helikopter W-3
RALM02	Lenoardo	Włochy	360°	40°	±22,5° (16° RMS)	-	500nm-1.8μm	-	< 1 na 16h	100ms RMS	
STDIO09.-1.7	Sec Technologies	Słowacja	90°	50°	-	-	900nm – 1.7μm	100W/m ²		2(s) – pojedynczy impuls	
ELAWSII	Elbit	Izrael	360°	-20° - +90°	±1° (na poziomie 2σ)	±2.5° (na poziomie 2σ)		Dalmierze laserowe lub układy naprowadzania w wiązce o dużym poziomie mocy: Podświetlacze - 600nm – 1600nm Układy naprowadzania w wiązce 900 nm do 1100nm Oświetlacze IR – 950nm – 1100nm			LRF/LD : - czas trwania impulsu większy niż 5ns BR: - większy niż 100ns Dalmierze laserowe – pojedyncze impulsy Podświetlacze laserowe – od 2 do 50 Hz Układy naprowadzania w wiązce 2-70KHz Oświetlacze pracujące w paśmie podczerwieni (Oświetlacze wykrywane są jeśli poziom natężenia promieniowania przekroczy 1 mlux)
MTDS	Elbit	Izrael	360°	-15° +85°	±3° (na poziomie 2σ)	3- sektory		Dalmierze i Podświetlacze - 600nm – 1600nm Układy naprowadzania w wiązce 900 nm do 1100nm Oświetlacze IR – 950nm – 1100nm	<1na18h <1na18h	Wykrycie zagrożenia : 100ms Określenia kąta padania : 80ms Klasyfikacja zagrożenia: 300ms	
LAWAREC Hexoculus	METRODAT	Słowacja	180° (±90 od linii centralnej)	90° (-20°, +70° od linii centralnej)	15°	90°	700-1700nm (400 – 2200 nm opcja)	10W/m ²	-	-	Maksymalna częstotliwość impulsów laserowych – 40kHz
LAWAREC Octoculus	METRODAT	Słowacja	180° (±90 od linii centralnej)	80° (-10°, +70° od linii centralnej)	3°	13°	700-1700nm Podzielone na 3 zakresy	1W/m ²	-	-	Czas trwania impulsów - 5-500ns

LAWAREC Quadroculus	METRODAT	Słowacja	180° (±90 od linii centralnej)	90° (-10°, +80° od linii centralnej))	1°	1°	500nm – 1650 nm podzielone na 3 zakresy	10W/ m ²	-	-	
SOL-1	Kenbit	Polska	360	-	-	-	800-1700 nm	1W/m ²	-	-	Element szerszego systemu
SSP-1 „OBRA”	PCO	Polska	360°	-6° do +30°	18°	-	600nm do 11µm	300W/ m ²	-	-	System KTO - ROSOMAK
AN/AAR-47	-	USA	360°	-	-	-	-	-	-	-	SYSTEM MWS realizujący funkcje LWR
SZTORA-1		Rosja	360°	-5° do +25°	3.5°-5°	-	-	-	-	-	Aktywny system zakłócający
AN/AVR-2		USA	360°	±45°							Helikoptery AH-64AD, MH47E, MH-60K, OH-58D,EH-60A
LWS	Thales UK	Wielka Brytania	195°	-12°-+90°	+/-15°	-	400nm-1540nm	-		0.2s	
NLWS	Saab	Szwecja	360°	70°	7.5°		500nm - 1.7µm	-	-	-	German Navy UAE Navy (zjednoczone emiraty arabskie) Baza danych zagrożeń
LIAS	Aselsan	Turcja	360°	70°	Pasmo I – II <+/-1° (rms) Pasmo I – II <+/-10° (rms) PasmoIV<+/-22.5° (rms)	?	Pasmo I – 500nm – 1100nm Pasmo II – 1.1µm – 1.65µm Pasmo II – 0,8µm – 1.1µm Pasmo IV – 8-12µm (opcjonalne)	-	-	-	-
SAPLAS 4C-10L-6G	Electro Optics Component	Rumunia	360°	-5°-90°	30°	?	900nm – 1700nm	-	-	0.5s	Repetycja impulsów 2-200Hz
SAPLAS 1C-13L-6G	Electro Optics Component	Rumunia	360°	-5°-90°	15°	?	400nm-1700nm	-	-	0.5s	24 detektory max Repetycja impulsów 2-200Hz
SAPLAR 4C-22L-6R-6G	Electro Optics Component	Rumunia	360°	-5°-90°	15°	-	900nm – 1700nm	-	-	0.5s	24 detektory max ZINTEGROWNY Z SYSTEMEM RWR (33-37GHz)

SAPLAS 2C-8L	Electro Optics Component	Rumunia	360°	-5°-90°	30°	-	900nm – 1700nm	-	-	0.5s	Max 12 detektorów
LIRD 4B	Fotona	Słowenia	360°	-	18°	-	400nm-1700nm	-	-	-	-

13 Załącznik nr 3. Opis ruchu kąowego na stanowisku pomiarowym

Jeśli w nieruchomym układzie współrzędnych obracany będzie układ pomiarowy wówczas :

wektory określające układ współrzędnych modułu detekcyjnego to :

$$\text{Oś X } \vec{x} = [1,0,0]$$

$$\text{Oś Y } \vec{y} = [0,1,0]$$

$$\text{Oś Z } \vec{z} = [0,0,1]$$

Zatem po obrocie o kąt α_n wokół osi X i kąt β_n wokół osi Y osie X', Y' i Z' będą miały wektory kierunkowe utożsamiane z osiami :

$$\vec{x}' = \begin{vmatrix} \cos(\alpha_n) & \sin(\alpha_n)\sin(\beta_n) & \sin(\alpha_n)\cos(\beta_n) \\ 0 & \cos(\beta_n) & -\sin(\beta_n) \\ -\sin(\alpha_n) & \cos(\alpha_n)\sin(\beta_n) & \cos(\alpha_n)\cos(\beta_n) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(\alpha_n) \\ 0 \\ -\sin(\alpha_n) \end{vmatrix}$$
$$\vec{y}' = \begin{vmatrix} \cos(\alpha_n) & \sin(\alpha_n)\sin(\beta_n) & \sin(\alpha_n)\cos(\beta_n) \\ 0 & \cos(\beta_n) & -\sin(\beta_n) \\ -\sin(\alpha_n) & \cos(\alpha_n)\sin(\beta_n) & \cos(\alpha_n)\cos(\beta_n) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sin(\alpha_n)\sin(\beta_n) \\ \cos(\beta_n) \\ \cos(\alpha_n)\sin(\beta_n) \end{vmatrix}$$
$$\vec{z}' = \begin{vmatrix} \cos(\alpha_n) & \sin(\alpha_n)\sin(\beta_n) & \sin(\alpha_n)\cos(\beta_n) \\ 0 & \cos(\beta_n) & -\sin(\beta_n) \\ -\sin(\alpha_n) & \cos(\alpha_n)\sin(\beta_n) & \cos(\alpha_n)\cos(\beta_n) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sin(\alpha_n)\cos(\beta_n) \\ -\sin(\beta_n) \\ \cos(\alpha_n)\cos(\beta_n) \end{vmatrix}$$

Zatem wektor

$$\vec{v} = [0,0,1]$$

tworzy z osiami OX', OY', OZ' następujące kąty a ich obliczenie możliwe jest z własności iloczynu skalarnego :

$$\vec{x}' \cdot \vec{v} = |\vec{x}'||\vec{v}|\cos(\gamma_x)$$

$$\vec{y}' \cdot \vec{v} = |\vec{y}'||\vec{v}|\cos(\gamma_y)$$

$$\vec{z}' \cdot \vec{v} = |\vec{z}'||\vec{v}|\cos(\gamma_z)$$

$$\vec{x}' \cdot \vec{v} = -\sin(\alpha_n) \rightarrow \cos(\gamma_x) = -\sin(\alpha_n)$$

$$\vec{y}' \cdot \vec{v} = \cos(\alpha_n)\sin(\beta_n) \rightarrow \cos(\gamma_y) = \cos(\alpha_n)\sin(\beta_n)$$

$$\vec{z}' \cdot \vec{v} = \cos(\alpha_n)\cos(\beta_n) \rightarrow \cos(\gamma_z) = \cos(\alpha_n)\cos(\beta_n)$$

Zatem współrzędne na osiach X', Y', Z' przyjmują wartość :

$$x' = -\sin(\alpha_n)$$

$$y' = \cos(\alpha_n) \sin(\beta_n)$$

$$z' = \cos(\alpha_n) \cos(\beta_n)$$

Zatem rzut

$$\operatorname{tg}(\alpha') = \frac{x'}{z'} = \frac{-\sin(\alpha_n)}{\cos(\alpha_n) \cos(\beta_n)} =$$

$$\operatorname{tg}(\beta') = \frac{y'}{z'} = \frac{\sin(\beta_n)}{\cos(\beta_n)} = \operatorname{tg}(\beta_n)$$

14 Załącznik nr 4. Plik symulacyjny stopnia wejściowego (LTSpice)

Lp (μm)	Średnica powierzchni detekcyjnej Wartość fotoprądu	
tia (Typ) (μA)		
1	250	4,1
2	500	16,4
3	1000	65,7
4	1300	111
5	2000	263
6	3000	592

Lp (μm)	Średnica powierzchni detekcyjnej Pojemność fotodiody			
(pF)	Prąd ciemny			
(Vr = 5V)	Typ	Typ	Max	
(nA)				
(Vr = 5V)				
1	250	6	0,1	1
2	500	15	0,3	2
3	1000	70	1	10
4	1300	100	2	20
5	2000	220	3	30
6	3000	500	7	75

```
.param R=2m .param f=10Meg
.param Cd=220p .param GBW = 410Meg
.param Id=30n .param Cin = 1.5p
.param Itla=263u
.param Rf = GBW/(2*pi*(f**2)*(Cd+Cin))
.param fl = 1/(2*pi*Rf*Cf)
```

```
.param q = 1.602e-19
.param IdSz = sqrt(2*q*(Id+Itla+A0)*f1)
.param Ien = 2.5f
.param Ven = 4n
.param k = 1.38e-23
.param T = 273+25
.param Urt = sqrt(4*k*T*r*f1)
.param Uid = Rf*IdSz
.param f3 = (GBW*Cf)/(Cf+Cd+Cin)
.param Ulen = Ien*Rf*sqrt(f1*pi/2)
.param Uuen = (Ven*(Cd+Cin+Cf)/(Cf))*sqrt(f3*pi/2)
.param Utot = sqrt(Uuen**2+Ulen**2+Uid**2+Urt**2)
```

```
.param Cf= sqrt((Cd+Cin)/(2*pi*GBW*Rf))
```

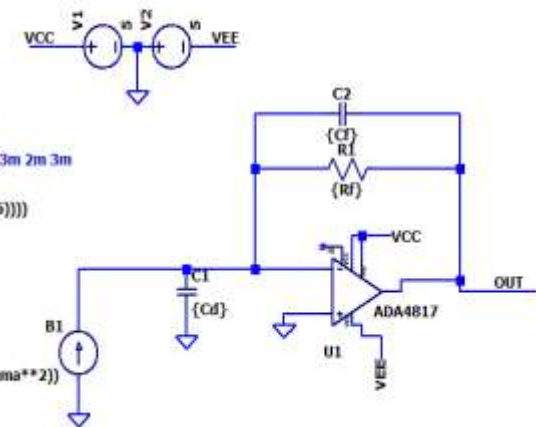
```
.meas TRAN WARTOSC MIN V(OUT)
.meas TRAN KOND PARAM Cf
.meas TRAN PASMO PARAM fl
.meas TRAN SZUMFOTODIODY PARAM IdSz
.meas TRAN SZUM PARAM Utot
```

```
.meas TRAN SNR PARAM abs((WARTOSC)-0.499m)/SZUM
.meas TRAN PASMO_IMPULSU PARAM BW
```

```
.param BW=50Meg
.step param BW 1Meg 100Meg 1Meg
.param tou = 1/(2*BW)
.step param R lst 0.25m 0.5m 1m 1.3m 2m 3m
.param tou=10n
.param sigma=tou/(2*(sqrt(-2*ln(0.5))))
.param GM=1
.param Sd=pi**((R/2)**2)
.param Si=0.45
.param A0 = Si*Sd*Gm
.param u = 100u
```

```
I=A0*exp((-1*(time-u)**2)/(2*sigma**2))
```

```
.tran 0 110u 90u 0.5n
```



15 Załącznik nr 5. Moduł w wersji prototypowej i jego badania

Na podstawie doświadczeń wynikłych podczas badań konstrukcji modułu detekcyjnego w wersji I został opracowany moduł wersji II (prototypowej) o nazwie projektowej OBRA++. Widok modułu detekcyjnego wraz z opisanymi podzespołami został przedstawiony na rysunku 15.1.



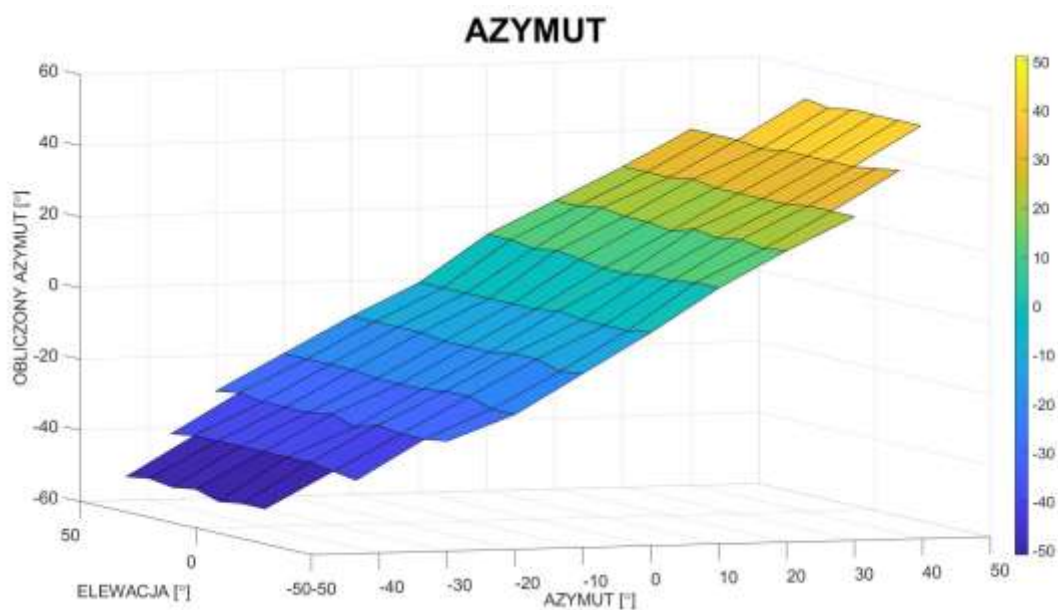
Rys. 15.1 Widok modułu detekcyjnego w prototypowej.

W stosunku do poprzedniej wersji zmieniono:

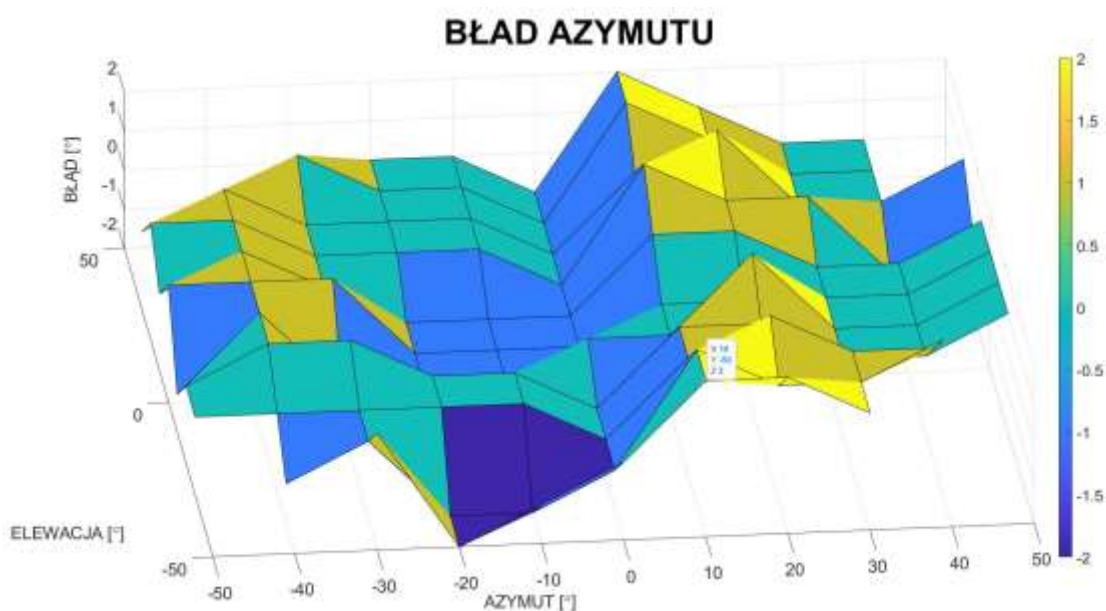
- wprowadzono sensory o małej i dużej czułości,
- poprawiono poziom wyczernienia wewnątrz,
- zmieniono wymiary geometryczne,
- zmieniono sposób wykonania i montażu zwierciadła.

Badania modułu w wersji prototypowej

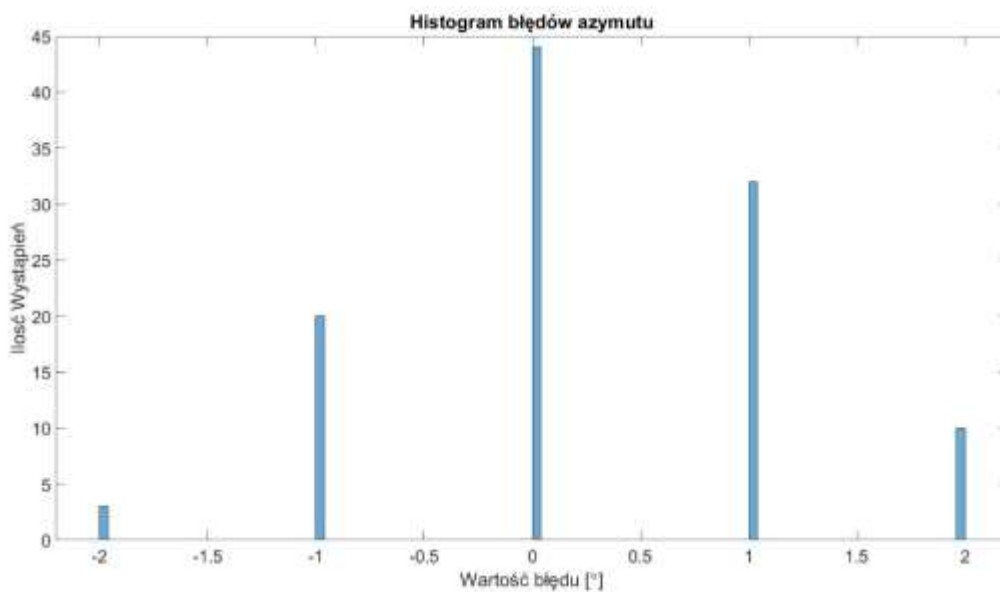
Przedstawione wyniki badań dla modułu w wersji prototypowej wskazują, że zmiany w stosunku do pierwszej wersji przyniosły zamierzony efekt. Błąd w zakresie $\pm 2^\circ$, jest uzyskiwany podczas pracy modułu we wszystkich ustawianych kątach azymutu i elewacji.



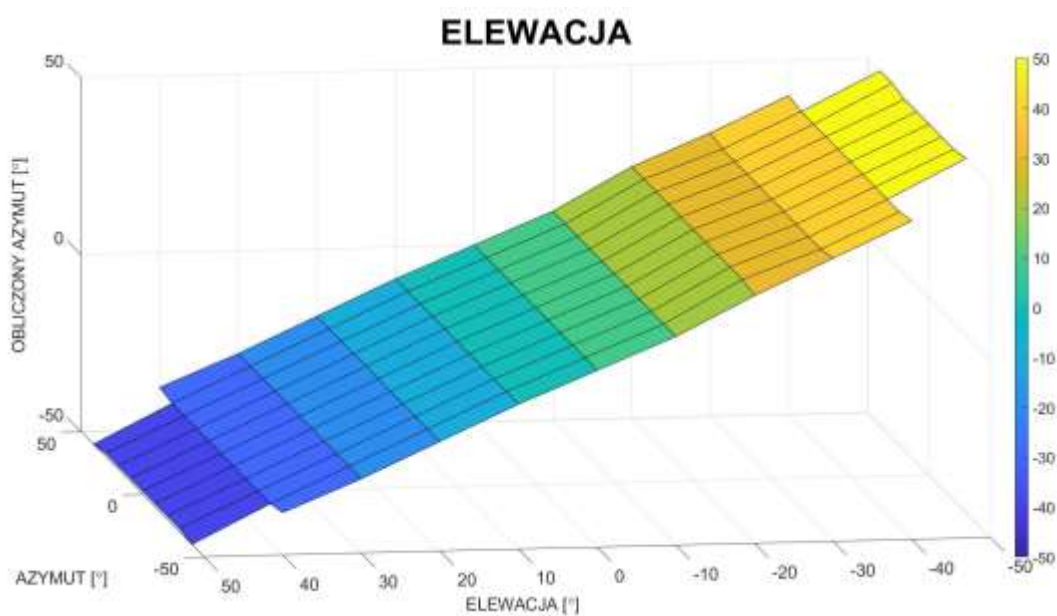
Rys. 15.2 Azymut wyznaczony przez moduł detekcyjny w wersji prototypowej.



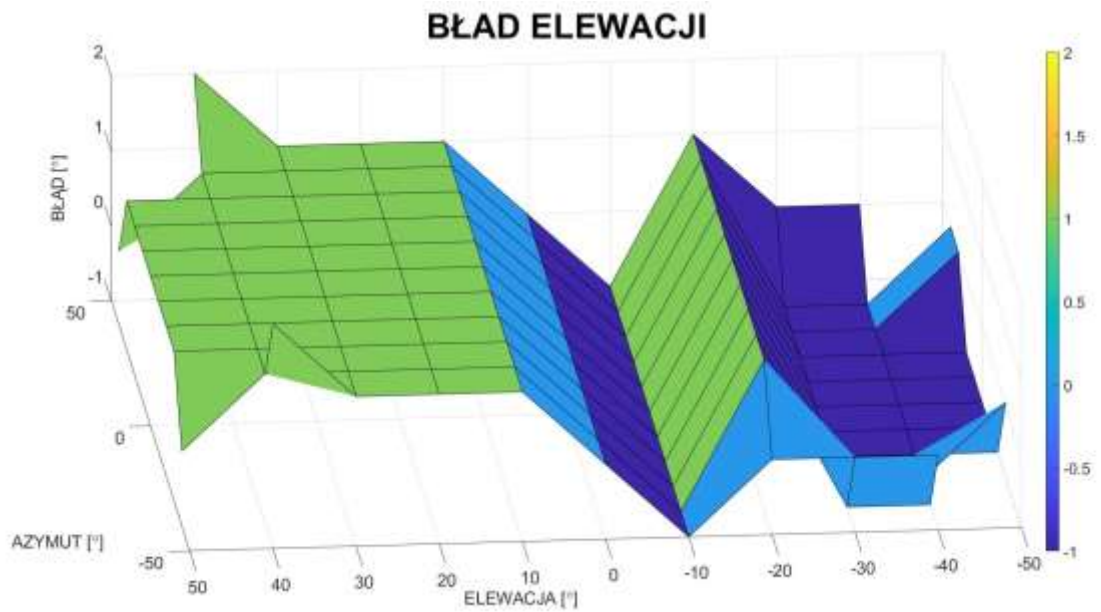
Rys. 15.3 Błąd azymutu wyznaczonego przez moduł detekcyjny w wersji prototypowej..



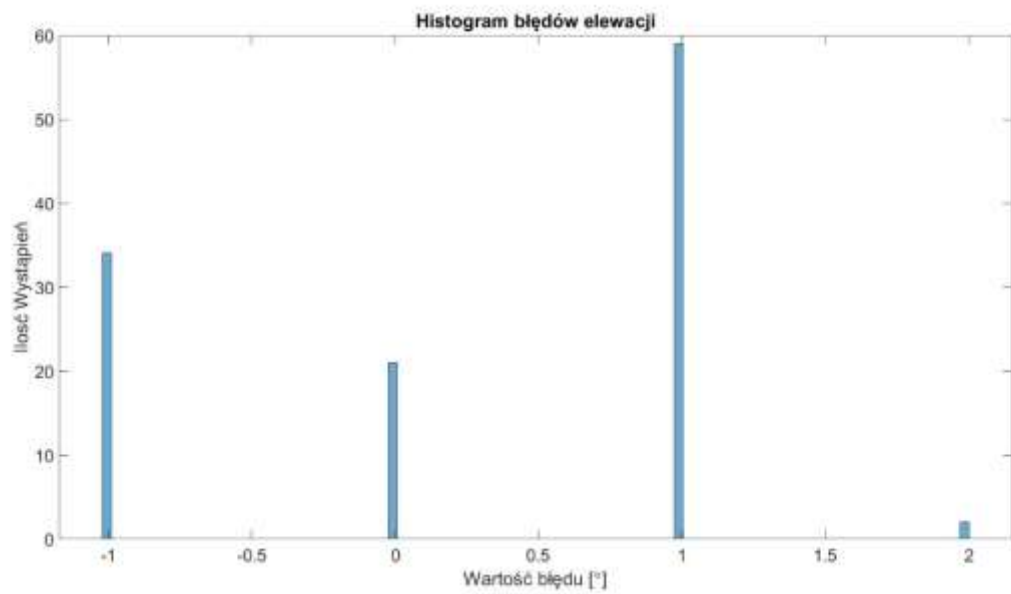
Rys. 15.4 Histogram częstości występowania wartości błędów azymutu modułu detekcyjnego w wersji prototypowej.



Rys. 15.5 Elewacja wyznaczona przez moduł detekcyjny w wersji prototypowej.



Rys. 15.6 Błąd elewacji dla modułu detekcyjnego w wersji prototypowej



Rys. 15.7 Histogram częstości występowania wartości błędów elewacji dla modułu detekcyjnego w wersji prototypowej

Wyniki pomiarów terenowych.



Rys. 15.8 System podczas badań poligonowych

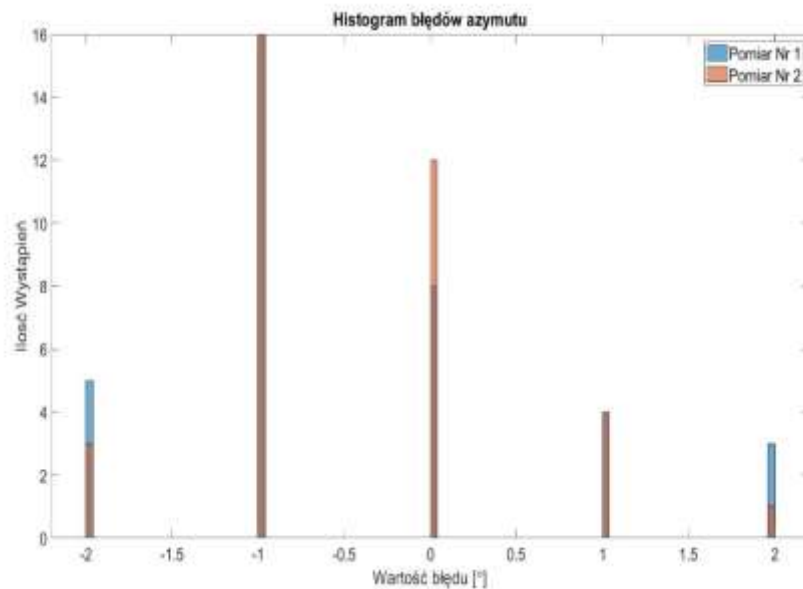
Badania terenowe odbyły się na pasie lotniska w Sochaczewie. Celem tych badań było potwierdzenie słuszności podjętych rozwiązań konstrukcyjnych w warunkach rzeczywistych. Źródłem promieniowania laserowego był dalmierz Vector 21 umieszczony w odległości 2,5km od systemu, w skład którego wchodziły 4 moduły detekcyjne (przedstawione na rysunku 15.8).

Warunki pomiarowe przedstawiały się następująco:

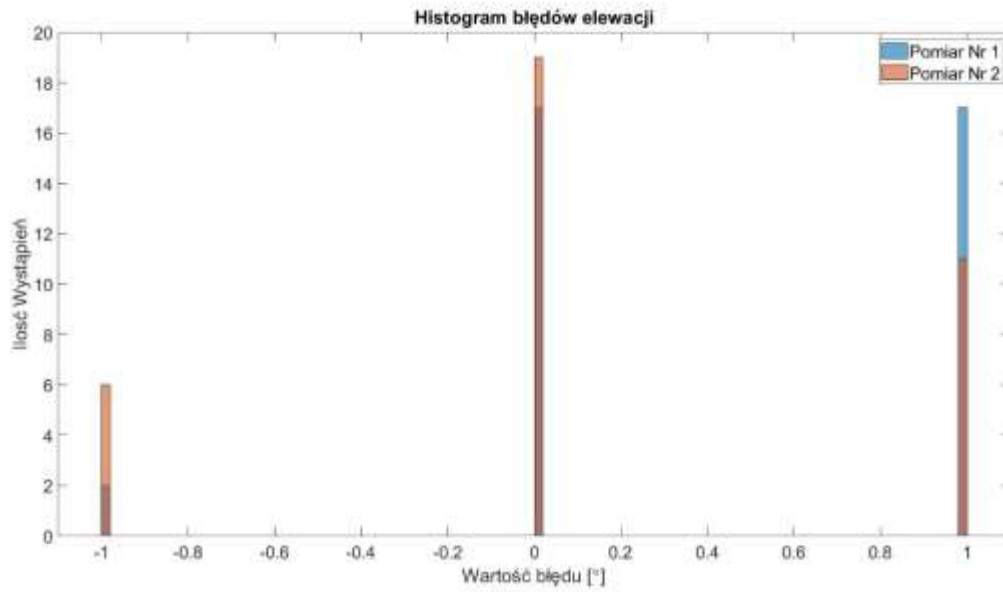
- dzień,
- zachmurzenie – brak,
- temperatura – ok 26°C,

- widoczność – powyżej 3 km,
- liczba modułów detekcyjnych w wersji v2- 4 szt,
- odległość nadajnika od systemu 2,5 km,
- nadajnik dalmierz Vector 21,
- zakres regulacji kąta azymutu 0÷360°.

Na podstawie otrzymanych wyników wykreślone zostały histogramy rozkładu błędów. Zostały one przedstawione na rysunkach nr 15.9 oraz 15.8. Kąty azymutu i elewacji w warunkach terenowych określano z dokładnością $\pm 2^\circ$ w azymucie, oraz $\pm 1^\circ$ w elewacji.



Rys. 15.9 Histogram rozkładu ilości błędów podczas określania azymutu w badaniach terenowych



Rys. 15.10 Histogram rozkładu ilości błędów podczas określania elewacji w badaniach terenowych