

ANALIZA SYSTEMU ZOBRAZOWANIA TEMPERATUROWEGO W ROTUJĄCYM POCISKU

Analizowano system zobrazowania temperaturowego rotującego pocisku zawierającego linijkę detektorową umieszczoną radialnie w płaszczyźnie obrazowej głowicy. Zbadano możliwość osiągnięcia dyskryminacji celu wymaganego do samonaprowadzania pocisku przy zastosowaniu detektorów $Hg_{1-x}Cd_xTe$ pracujących bez chłodzenia kriogenicznego. Wykrycie celu umożliwiają niechłodzone długofalowe fotodetektory dostępne handlowo. Dla uzyskania wyższych stopni dyskryminacji konieczne jest zastosowanie chłodzonych detektorów lub detektorów z immersją optyczną.

1. Wstęp

Rozwój zaawansowanych technologii optoelektronicznych umożliwił opracowanie samonaprowadzającej się amunicji artyleryjskiej i moździerzowej [1]. Do wykrycia i selekcji celów stosowane są różne metody, m.in. detekcja termicznego promieniowania celów [2, 3]. Naprowadzanie pocisku na cele niskotemperaturowe, charakteryzujące się niskim kontrastem temperaturowym względem otoczenia wymaga systemu zobrazowania o dużej rozdzielczości temperaturowej [4]. Wiąże się to z wieloma trudnościami. Wymagane są detektory o bardzo wysokich parametrach. Konieczne jest zachowanie wysokiej odporności na bardzo duże przyspieszenia liniowe w chwili wystrzału, zapewnienie trwałego przechowywania pocisku, oraz możliwości szybkiego jego użycia. Zwiększenie odporności na przeciążenia wymaga zastąpienia delikatnego mechanicznego układu skanującego układem ze skanowaniem elektrycznym.

Zrealizować to można za pomocą mozaiki FPA, w której skanowanie odbywa się odczytując kolejno sygnały z każdego elementu detekcyjnego mozaiki. Detektory FPA są przeważnie stosowane w nierotujących pociskach powietrze-powietrze, w których śledzenie celu odbywa się przez cały czas trwania lotu pocisku. W pociskach artyleryjskich i moździerzowych śledzenie celu odbywa się w końcowej fazie lotu. W związku z tym bardzo ważny jest mały rozrzut, który osiąga się poprzez rotację pocisków. Zastosowanie mozaiki FPA w rotujących pociskach sprawia wiele problemów. Określona przez producenta kolejność odczytu sygnałów z elementów detekcyjnych mozaiki, brak możliwości zmiany kolejności, w połączeniu z rotacją pocisku powoduje otrzymanie wirujących obrazów bardzo trudnych w analizie. Prostszy rozwiązaniem jest zastosowanie linijki detekcyjnej umieszczonej radialnie w płaszczyźnie obrazowej głowicy i wykorzystanie rotacji pocisku. Trwale przymocowana do głowicy linijka obraca się wraz z obrotem pocisku wokół jego osi wzłużnej i dokonuje skanowania obrazu pola widzenia. Powstały układ skanujący jest prosty i odporny na przeciążenia, lecz wykazuje również wadę. Szybkość przeszukiwania przestrzeni

wzrasta w miarę oddalania się od osi optycznej pocisku. Przekłada się to na zwiększenie szerokości pasma szumowego najbardziej oddalonych od osi obrotów detektorów, konsekwencją czego jest pogorszenie stosunku sygnał/szum. Występuje konieczność zastosowania detektorów o wysokich parametrach. Takimi detektorami są fotodetektory, które posiadają dużą szybkość działania i wysokie parametry, ale wymagają chłodzenia.

Chłodzenie jest naturalną i skuteczną metodą zmniejszenia szybkości termicznej generacji i rekombinacji nośników. Niestety, jest to niepraktyczna metoda. Skutkuje wysokim kosztem urządzeń chłodzących, dużą masą, długim czasem uruchamiania i innymi ograniczeniami. W konsekwencji konieczność chłodzenia detektorów jest istotną przeszkodą w szerokim zastosowaniu głowic podczerwieni dla artyleryjskich i moździerzowych pocisków samonaprowadzających się [5, 6].

Obecny stan techniki zmniejsza te ograniczenia. Poprawę czułości detektorów osiągnąć można poprzez zastosowanie technologii MOCVD umożliwiającej otrzymanie mozaikowych detektorów z mikrooptyką zintegrowaną.

2. Optymalizacja zakresu spektralnego detektora dla detekcji celów o temperaturze bliskiej do średniej temperatury powierzchni Ziemi

Rozdzielczość temperaturową głowic samonaprowadzania określa różnica temperatury równoważna szumom (NETD)

$$\text{NETD} = \frac{4F\#^2 \Delta f^{1/2}}{A^{1/2} M^*} \quad (1)$$

gdzie: $F\#$ – otwór względny optyki, Δf – szerokość pasma szumowego, A – pole powierzchni detektora, a M^* – termiczna wykrywalność detektora.

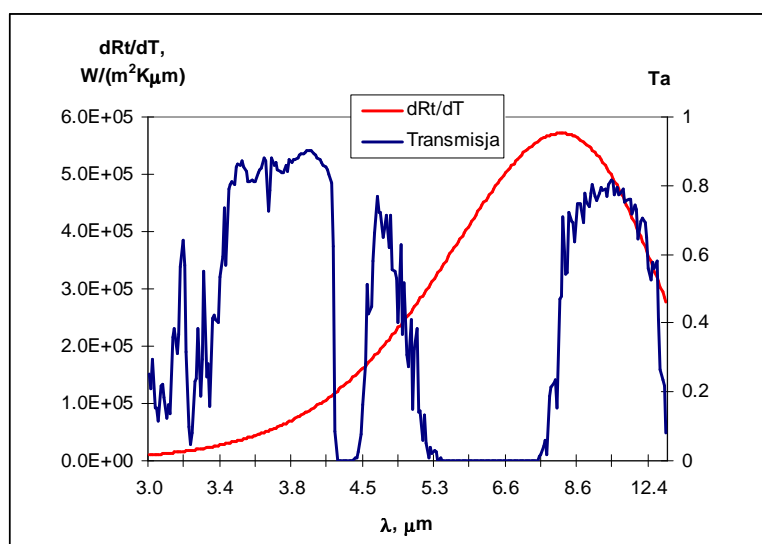
Termiczną wykrywalność detektora wyrazić można wzorem

$$M^* = \int_{\lambda} T_a(\lambda) \cdot T_o(\lambda) \cdot D^*(\lambda) \cdot \frac{\partial R(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda \quad (2)$$

gdzie: $T_a(\lambda)$ – przepuszczalność atmosfery, $T_o(\lambda)$ – przepuszczalność optyki, λ – długość fali padającego promieniowania, $D^*(\lambda)$ – widmowa wykrywalność znormalizowana, $R(\lambda, T)$ – widmowa egzytancja promieniowania celu.

Uzyskanie minimalnej wartości parametru NETD uwarunkowane jest m.in. zapewnieniem maksymalnej termicznej wykrywalności detektora. Metody minimalizacji NETD za pomocą pozostałych parametrów występujących w równaniu (1) przedstawione zostały we wcześniejszych publikacjach [7, 8].

W dalszych rozważaniach przyjmujemy, iż egzytancja termicznego promieniowania celu jest bliska do egzytancji ciała doskonale czarnego opisywanego rozkładem Plancka. Dla obiektów o temperaturze 300 K, pochodna cząstkowa po temperaturze i w temperaturze celu osiąga maksimum przy 8 μm i ma duże wartości w zakresie 3-20 μm . Jednak charakterystyki widmowe przezroczystości atmosfery sprawiają iż, interesujące dla są jedynie pasma 3÷4,2; 4,3÷5,5 i 7,8÷12 μm (Rys. 1).



Rys. 1. Charakterystyka widmowa pochodnej egzytancji ciała doskonale czarnego i charakterystyka przepuszczalności atmosfery w odległości 800 m nad terenem zurbanizowanym, położonym 45°N, przy bezchmurnym niebie, sporządzone programem Modtran

3. Wykrywalność detektorów

Wykrywalność detektora określa stosunek sygnału do szumu znormalizowany do jednostkowej powierzchni detektora, jednostkowego pasma szumowego i mocy promieniowania

$$D^* = \frac{(A \cdot \Delta f)^{1/2}}{\Phi_e} (\text{SNR}) \quad (3)$$

gdzie: A– pole powierzchni detektora, Φ_e – strumień padającego promieniowania, SNR–stosunek sygnału do szumu.

3.1. Detektor BLIP

Maksymalne wartości wykrywalności są osiągane, kiedy poziom szumu detektora i wzmacniacza jest poniżej szumu fotonowego padającego promieniowania [9]. Przyjmując, że o szumach detektora decyduje szum śrutowy spowodowany dyskretną naturą kwantów promieniowania, wykrywalność detektora ograniczona fluktuacjami strumienia fotonów promieniowania tła wynosi

$$D_{\text{BLIP}}^* = \frac{\lambda \eta^{1/2}}{hc \Phi_B^{1/2}} \quad (4)$$

gdzie h– stała Plancka, c– prędkość światła, η – wydajność kwantowa, Φ_B – całkowity strumień fotonów padający na detektor

$$\Phi_B = 2\pi c \cdot \sin^2 \theta \int_0^{\lambda_{\text{co}}} \frac{d\lambda}{\lambda^4 (e^{hc/\lambda k T_B} - 1)} \quad (5)$$

gdzie θ – kąt widzenia detektora, T_B – temperatura tła.

3.2. Granica generacyjno-rekombinacyjna wykrywalności detektorów

Przyjmując ograniczenie, że szum spowodowany jest wyłącznie statystycznymi procesami termicznej generacji i rekombinacji nośników w absorberze detektora [10]

$$D^* = \frac{\lambda}{2^{1/2} hc(G + R)^{1/2}} \cdot \left(\frac{A_o}{A_e} \right)^{1/2} \cdot \frac{\eta}{t^{1/2}} \quad (6)$$

gdzie: A_o – pole powierzchni koncentratora optycznego, A_e – pole powierzchni obszaru aktywnego detektora, G i R – szybkość termicznej generacji i rekombinacji, t – grubość detektora.

Z równania (6) wynika, że uzyskanie wysokiej wykrywalności znormalizowanej wymaga wysokiej wydajności kwantowej przy minimalnej liczbie aktów generacji i rekombinacji w jednostce czasu.

Zmniejszenie szybkości termicznej generacji i rekombinacji nośników osiągnąć można przez kriogeniczne chłodzenie detektora, które jest naturalną, bezpośrednią i radykalną metodą. Niestety, mimo ogromnego postępu w dziedzinie chłodziarek różnego typu, jest to metoda kosztowna i kłopotliwa w zastosowaniach praktycznych, w szczególności w głowicach samonaprowadzania.

Wielu tych wad pozbawione są metody chłodzenia wykorzystujące ogniwa Peltiera – chłodziarki termoelektryczne. Są one prostsze i tańsze od chłodziarek kriogenicznych, Joule-Thompsona i Stirlinga. Ponadto są odporne na duże przyspieszenia. Pozwalają schłodzić detektor poniżej 230 K i zużywają kilka watów mocy.

3.3. Możliwości poprawy parametrów bez chłodzenia

Jedną z metod poprawy parametrów detektora jest zastosowanie soczewek immersyjnych. Umożliwiają one zmniejszenie pola powierzchni obszaru aktywnego detektora przy zachowaniu jego optycznego pola powierzchni. Szum detektora jest proporcjonalny do jego objętości. Więc, zmniejszenie fizycznej objętości detektora (z $A_o \cdot t$ do $A_e \cdot t$), powoduje zmniejszenie poziomu szumu. Zysk w wykrywalności jest proporcjonalny do pierwiastka kwadratowego ze zmniejszenia objętości obszaru aktywnego.

Poprawę stosunku sygnał/szum można również osiągnąć stosując technikę TDI (Time Delay Integration), polegającą na równoczesnym śledzeniu przestrzeni obrazowej przez wiele detektorów rozmieszczonych na tej samej orbicie i dodawaniu mierzonych sygnałów synchronicznie z odpowiednim przesunięciem w czasie [11].

4. Obliczenia

Założono zastosowanie wyłącznie detektorów $Hg_{1-x}Cd_xTe$ niechłodzonych lub chłodzonych za pomocą dwustopniowej chłodziarki termoelektrycznej. Ponadto przyjęto, że detektory mogą zostać wykonane zarówno z soczewkami immersyjnymi jak i bez. Analizę przeprowadzono dla detektorów średnio i długofalowych. W zakresie długofalowym rozważono pasma: 7,8-10 μm oraz 7,8-12 μm . Zbadano, jaki wpływ na NETD ma spadek maksimum wykrywalności detektorów wraz ze wzrostem długości fali przy jednoczesnym wzroście sygnału wynikającym z poszerzenia pasma. Obliczenia wykonano przyjmując dodatkowe założenia wymienione w tabeli 1.

Tab. 1. Parametry obiektu i głowicy pocisku

Nazwa parametru	Wartość
Otwór względny optyki	1,5
Ogniskowa	100 mm
Pole widzenia	10 ⁰
Okres obrotu	0,1 s
Wymiar krytyczny celu	4,2 m
Odległość do celu	800 m
Obiekt	CDD
Temperatura celu	300 K
Temperatura detektora	300 K 230 K
Współczynnik emisyjności	1
MRTD	5 K
Transmisja optyki	100 %
Transmisja atmosfery w przyjętych pasmach	100 %
Prawdopodobieństwo dyskryminacji celu	0,8

Rozdzielczość temperaturową obliczono dla dwóch stopni dyskryminacji celu: wykrycia i rozpoznania. Rozmiar elementu detekcyjnego wyznaczono z kryterium Johnsona, a funkcję modulacji amplitudy obliczono za pomocą modelu przedstawionego w publikacji [11]. Wymaganą wartość NETD przedstawiono w tabelicy 2.

Tab. 2. Wymagane NETD dla wykrycia i rozpoznania

Stopień dyskryminacji	Liczba elementów detekcyjnych w linijce	Rozmiar pojedynczego elementu detekcyjnego μm	MTF	Wymagany NETD, mK
Wykrycie	35	250	0,44	2180
Rozpoznanie	148	60	0,39	1960

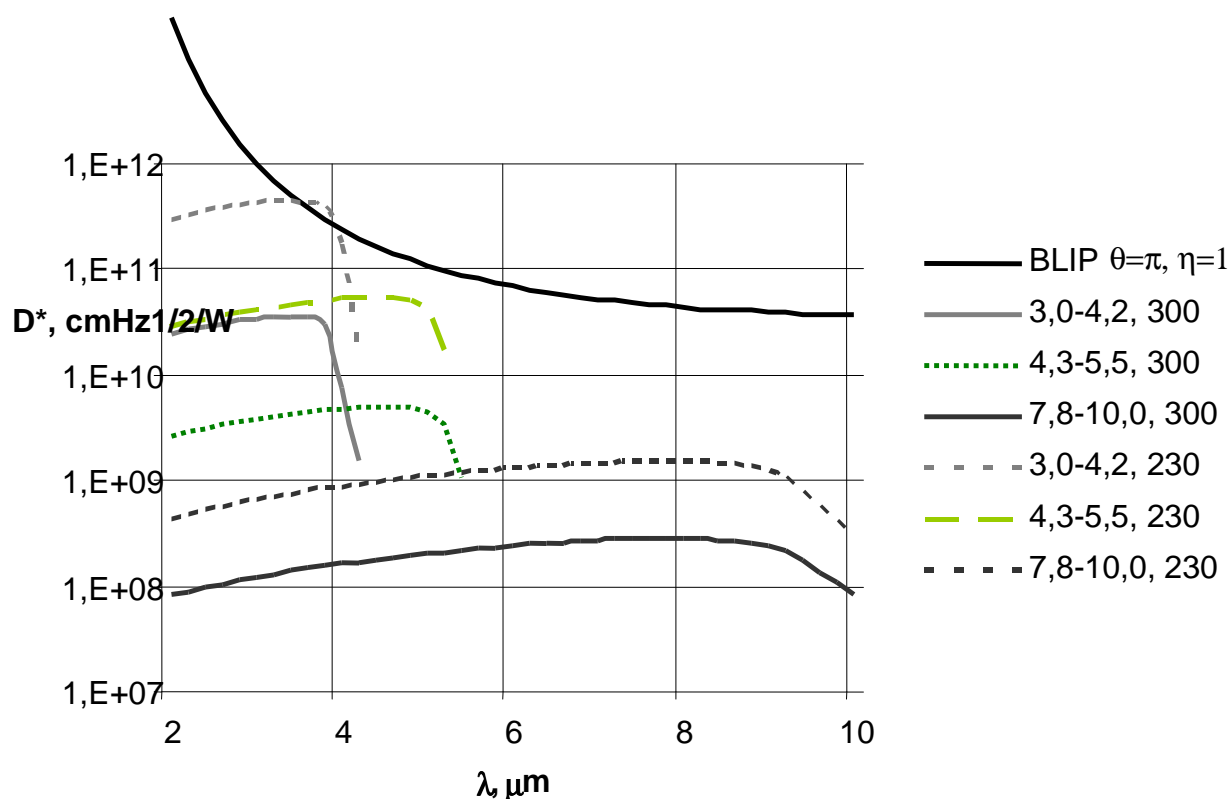
Możliwość osiągnięcia wymaganej wartości rozdzielczości przeprowadzono dla detektorów o granicznych wykrywalnościach BLIP, G-R oraz dostępnych handlowo. Wykrywalność detektorów BLIP obliczono przyjmując wydajność kwantową $\eta=1$ oraz kąt widzenia $\theta=\pi$. Wykrywalność detektorów G-R obliczono zakładając:

- jednokrotne przejście promieniowania przez absorber,
- proces generacji i rekombinacji oparty o mechanizmy Augera 1 i Augera 7,
- obliczenie współczynnika absorpcji na podstawie modelu Kane'a, z uwzględnieniem wykładniczego rozmycia długofalowej krawędzi absorpcji,
- brak odbić promieniowania od powierzchni warstwy absorpcyjnej.

Do obliczenia granicy wykrywalności G-R wyznaczono optymalne grubości warstwy absorpcyjnej, koncentracji i stopnia domieszkowania, dla minimalnego NETD. Otrzymane wyniki przedstawione zostały w tabeli 3, a charakterystyki detektorów na rysunku 2.

Tab. 3. Optymalne wartości koncentracji, domieszkowania i grubości warstwy absorpcyjnej detektorów G-R dla maksymalnej termicznej wykrywalności

Zakres widmowy, μm	Temperatura pracy, K	Koncentracja	Stopień domieszkowania („+” akceptorowego, „-” donorowego) m^{-3}	Grubość warstwy absorpcyjnej, μm	Wykrywalność znormalizowana, $\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$	Długość fali dla maks. Wykrywalności, μm
3÷4,2	300	0,315	-1,20E+21	4,1E-06	3,6E+10	3,37
	230	0,323	-1,20E+21	4,0E-06	4,5E+11	3,40
4,3÷5,5	300	0,257	1,90E+22	5,2E-06	5,0E+09	4,47
	230	0,274	-1,20E+21	5,5E-06	5,5E+10	4,42
7,8÷10	300	0,181	1,09E+23	1,1E-05	2,8E+08	7,80
	230	0,199	3,00E+22	9,8E-06	1,5E+09	7,84
7,8÷12	300	0,175	1,39E+23	1,1E-05	2,3E+08	8,18
	230	0,195	3,80E+22	9,6E-06	1,3E+09	8,09



Rys. 2. Charakterystyki wykrywalności znormalizowanej detektorów G-R wyznaczone na podstawie danych z Tab. 3 oraz granica wykrywalności detektorów BLIP

W tabelach 4÷9 umieszczono wyniki obliczeń NETD dla rozważanych detektorów G-R, BLIP i dla detektorów dostępnych handlowo [12, 13]. Wyniki zostały pogrupowane według stopnia dyskryminacji celu oraz rodzaju detektora, z optyką immersyjną lub bez optyki. Tabele 4÷7 przedstawiają wyniki uzyskane dla pojedynczej linijki, natomiast tabele 8 i 9 dla czterech linijek pracujących w modzie TDI.

Tab. 4. Rozdzielczość temperaturowa (wykrycie, pojedyncza linijka, $\Delta f=1$ kHz, $l=250$ μm , immersja)

Zakres widmowy, μm	Temperatura pracy, K	Detektor G-R	Detektor BLIP	Detektor dostępny handlowo
		NETD, mK	NETD, mK	NETD, mK
3÷4,2	300	18	5,2	26
	230	1,7		2,5
4,3÷5,5	300	27	3,2	40
	230	2,9		4,3
7,8÷10	300	60	2,3	150
	230	13		20
7,8÷12	300	40	1,4	130
	230	13		32

Tab. 5. Rozdzielczość temperaturowa (wykrycie, pojedyncza linijka, $\Delta f=1$ kHz, $l=250$ μm , bez immersji)

Zakres widmowy, μm	Temperatura pracy, K	Detektor G-R	Detektor BLIP	Detektor dostępny handlowo
		NETD, mK	NETD, mK	NETD, mK
3÷4,2	300	88	5,2	132
	230	6,7		10
4,3÷5,5	300	107	3,2	160
	230	11		17
7,8÷10	300	420	2,3	1060
	230	83		124
7,8÷12	300	360	1,4	918
	230	77		192

Tab. 6. Rozdzielczość temperaturowa (rozpoznanie, pojedyncza linijka, $\Delta f=4,5$ kHz, $l=60$ μm , immersja)

Zakres widmowy, μm	Temperatura pracy, K	Detektor G-R	Detektor BLIP	Detektor dostępny handlowo
		NETD, mK	NETD, mK	NETD, mK
3÷4,2	300	150	46	230
	230	15		22
4,3÷5,5	300	240	29	350
	230	25		39
7,8÷10	300	530	20	1340
	230	120		180
7,8÷12	300	360	12	1150
	230	110		280

Tab. 7. Rozdzielczość temperaturowa (rozpoznanie, pojedyncza linijka, $\Delta f=4,5$ kHz, $l=60$ μm , bez immersji)

Zakres widmowy, μm	Temperatura pracy, K	Detektor G-R	Detektor BLIP	Detektor dostępny handlowo
		NETD, mK	NETD, mK	NETD, mK
3÷4,2	300	780	46	1200
	230	60		90
4,3÷5,5	300	950	29	1400
	230	100		150
7,8÷10	300	3700	20	9300
	230	730		1100
7,8÷12	300	3200	12	8100
	230	680		1700

Tab. 8. Rozdzielczość temperaturowa (rozpoznanie, 4 linijki, TDI, $\Delta f=4,5$ kHz, $l=60$ μm , immersja)

Zakres widmowy, μm	Temperatura pracy, K	Detektor G-R	Detektor BLIP	Detektor dostępny handlowo
		NETD, mK	NETD, mK	NETD, mK
3÷4,2	300	75	46	120
	230	7,5		10
4,3÷5,5	300	120	29	170
	230	12		20
7,8÷10	300	265	20	700
	230	60		90
7,8÷12	300	180	12	600
	230	55		140

Tab. 9. Rozdzielczość temperaturowa (rozpoznanie, 4 linijki, TDI, $\Delta f=4,5$ kHz, $l=60$ μm , bez immersji)

Zakres widmowy, μm	Temperatura pracy, K	Detektor G-R	Detektor BLIP	Detektor dostępny handlowo
		NETD, mK	NETD, mK	NETD, mK
3÷4,2	300	390	46	600
	230	30		45
4,3÷5,5	300	475	29	700
	230	50		75
7,8÷10	300	1750	20	4650
	230	365		550
7,8÷12	300	1600	12	4000
	230	340		850

Określone wartości NETD odnoszą się do sytuacji, gdy cel znajduje się na jednorodnym tle. W paśmie średniofalowym tło jest niejednorodne m.in. za sprawą kontrastów termicznych.

Sygnal generowany przez promieniowanie słoneczne jest duży, porównywalny z sygnałem celu powodując jego maskowanie. Natomiast w paśmie długofalowym udział promieniowania słonecznego w sygnale docierającym do detektora jest bardzo słaby i nie zakłóca sygnału celu. Stanowi to dogodniejsze warunki do jego wykrycia.

W tabeli 2 przedstawione zostały wymagane wartości rozdzielczości temperaturowej do wykrycia i rozpoznania celu. Wykrycie celu wymaga osiągnięcia rozdzielczości lepszej od 2,2 K. Wyniki obliczeń zamieszczone w tabeli 4 i 5 wskazują, że obecnie produkowane detektory średnio i długofalowe umożliwiają uzyskanie wymaganej rozdzielczości bez konieczności zastosowania chłodzenia czy mikrooptyki. Umożliwiają uzyskanie, co najmniej dwukrotnie lepszej rozdzielczości temperaturowej od wymaganej. Obliczenia wykonane zostały przyjmując szereg uproszczeń. Dla konkretnego przypadku konieczne jest przeprowadzenie dokładniejszej analizy uwzględniającej temperaturę i emisyjność obiektu, przepuszczalność atmosfery i optyki, uwzględnienie szumu wzmacniacza.

Zwiększenie stopnia dyskryminacji celu do poziomu rozpoznania przy zachowaniu rozmiaru pola widzenia głowicy pocisku wymaga zmniejszenia rozmiaru elementu detekcyjnego z 250 μm do 60 μm przy jednoczesnym zwiększeniu ich ilości w linii detektorowej z 35 do 148. Zmniejszenie rozmiaru elementu detekcyjnego skutkuje wzrostem pasma szumowego z 1 kHz do 4,5 kHz, które zależy odwrotnie proporcjonalnie od wielkości elementu. Pogarsza to rozdzielczość temperaturową, co zobrazowane zostało w tabeli 6 i 7. Z otrzymanych obliczeń wynika, że nie osiągnie się wymaganego NETD stosując obecnie produkowane niechłodzone detektory długofalowe bez immersji. Wartości NETD uzyskane dla obecnie produkowanych detektorów są gorsze od obliczonych. Wynikają z wielu czynników, głównie z czystości materiałów i procesów technologicznych. Jednakże nawet osiągnięcie granicy wykrywalności G-R nie przyniesie oczekiwanych efektów.

Zastosowanie techniki TDI umożliwia zwiększenie rozdzielczości, jednak jest to poziom ciągle za mały do rozpoznania. Konieczne jest zastosowanie chłodzenia detektorów i/lub immersji optycznej. Jednak stwarza to pewne problemy.

Proces produkcyjny detektorów mozaikowych z soczewkami immersyjnymi nie jest jeszcze dostatecznie dopracowany, obecnie soczewki montuje się tylko w pojedynczych detektorach. Natomiast chłodziarki TE wymagają kilka sekund na uzyskanie roboczej temperatury. Często robocza temperatura może nie zostać osiągnięta przed rozpoczęciem skanowania.

5. Wnioski

Analizowano system zobrazowania temperaturowego głowicy samonaprowadzania rotującego pocisku, w którym do przeszukiwania przestrzeni wykorzystano wirującą liniijkę detekcyjną. Zbadano możliwość osiągnięcia dyskryminacji celu wymaganego dla samonaprowadzania pocisku przy zastosowaniu detektorów $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ pracujących bez chłodzenia kriogenicznego.

Ze względu na duży wpływ promieniowania słonecznego w zakresie średniofalowym, w przeciwnopancernych pociskach samonaprowadzających się powinny być zastosowane detektory długofalowe lub dwubarwowe. Wówczas do działania w dzień wykorzystywane byłyby detektory długofalowe, a w nocy w średniofalowe.

Wykazano, że wykrycie celu można osiągnąć za pomocą pojedynczej liniijki detekcyjnej obecnie produkowanych niechłodzonych detektorów średnio i długofalowych, nawet bez optyki immersyjnej.

Zwiększenie stopnia dyskryminacji celu do poziomu rozpoznania przy zachowaniu rozmiaru pola widzenia głowicy pocisku wymaga zmniejszenia rozmiaru elementu detekcyjnego, czego konsekwencją jest zwiększenie ilości detektorów w linii i ich

szerokości pasma szumowego. Zwiększa się wówczas NETD. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że jest zbyt duży w przypadku zastosowania niechłodzonych detektorów długofalowych. Nawet polepszenie wykrywalności tych detektorów do poziomu określonego granicą G-R w dalszym ciągu byłyby niewystarczające.

Zastosowanie techniki TDI umożliwia zwiększenie rozdzielczości, jednak jest to poziom ciągły za mały do rozpoznania.

Wymaganą rozdzielczość osiągnąć można za pomocą chłodzenia lub stosując immersję optyczną. Proces technologiczny dwuwymiarowych detektorów mozaikowych z immersją optyczną nie jest jeszcze w pełni opanowany. Natomiast dwustopniowe chłodziarki termoelektryczne posiadają zbyt długi czas osiągania roboczej temperatury.

Literatura

- [1] S. Stępnia, „Potrzeby i możliwości wyposażenia artylerii w amunicję samonaprowadzającą”, Rozprawa doktorska, Akademia Obrony Narodowej (2005).
- [2] The Infrared & Electrooptical Systems Handbook, SPIE, Bellingham (1993).
- [3] J. Piotrowski, praca zbiorowa „Detektory podczerwieni do zastosowań w rotujących pociskach amunicji inteligentnej”, raport MNIi (2004).
- [4] W. Świdorski, J. Piotrowski, D. Szabra „Infrared homing head for rotating missile”, proceedings QIRT'2004-057, C.8.1-C.8.6
- [5] J. Piotrowski. “ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ Infrared Photodetectors,” in Infrared Photodetectors, 391-494, Ed. by A. Rogalski, SPIE, Bellingham (1995).
- [6] J. Piotrowski and M. Razeghi, “Improved performance of IR photodetectors with 3D gap engineering”, Proc. SPIE, 2397, 180-192 (1995).
- [7] J. Piotrowski, D. Szabra, „Koncepcja zaawansowanego detektora podczerwieni dla głowic samonaprowadzania pocisków rotujących”, Problemy Techniki Uzbrojenia, 84, 31-36 (2002).
- [8] J. Piotrowski, D. Szabra „Detektory podczerwieni dla głowic samonaprowadzania rotujących pocisków amunicji inteligentnej”, PTUiR, 91, 73-86, 2004
- [9] Z. Bielecki, A. Rogalski „Detekcja sygnałów optycznych”, WNT, Warszawa 2001
- [10] J. Piotrowski „Recent advances in uncooled of IR photodetectors”, Photonics Spectra 2004
- [11] J. Piotrowski, D. Szabra „Prawdopodobieństwo dyskryminacji celów przez głowice samonaprowadzania rotujących pocisków z niechłodzonymi detektorami średniej i dalekiej podczerwieni”, PTUiR, 92, 33-42, 2004
- [12] www.vigo.com.pl
- [13] www.judsontechnologies.com