

dr inż. Izabela Krzysztofik
 mgr inż. Adam Rozenau
 Politechnika Świętokrzyska

BADANIA EKSPERYMENTALNE MODULATORA OPTYCZNEGO

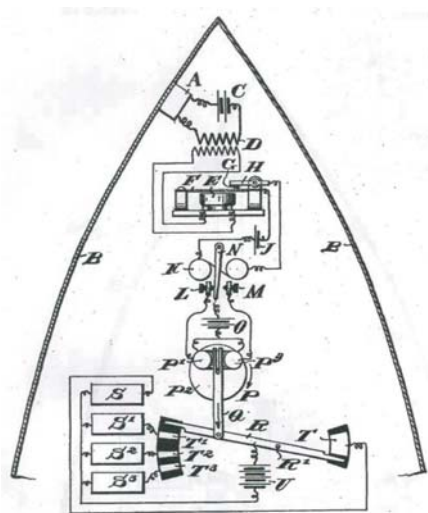
W pracy zaprezentowano nowy wzór modulatora optycznego stosowanego w głowicach samonaprowadzających się pocisków raketowych. Przedstawiono wyniki pomiarów uzyskane z badań eksperymentalnych oraz wypływające z nich wnioski i uwagi końcowe.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF OPTICAL MODULATOR

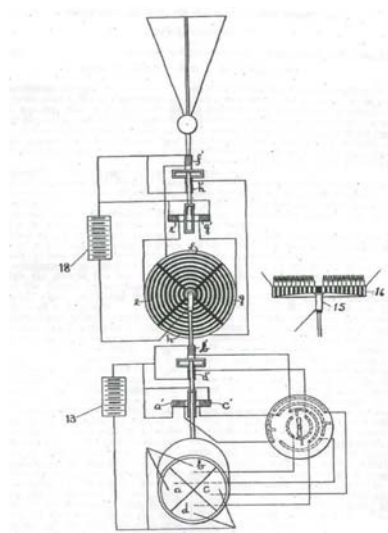
The paper presents a new pattern of optical modulator. It can be applied in the heads of self-guided missiles. There are results of experimental research and conclusions.

1. WPROWADZENIE

Historia układów oraz urządzeń do wykrywania i określania położenia celu stosowanych obecnie w głowicach samonaprowadzających się pocisków raketowych sięga lat dwudziestych XX wieku. Inspiracją do pierwszych prac w tym kierunku było urządzenie opatentowane przez J. Gardnera w roku 1909 służące do wykrywania źródeł fal dźwiękowych w środowisku wodnym – protoplasta dzisiejszego sonaru (rys. 1).

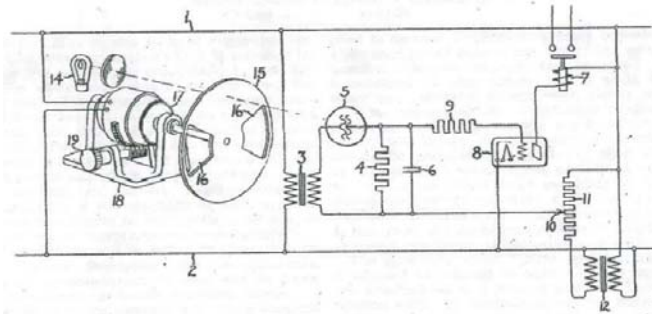


Rys. 1. Patent US 913372

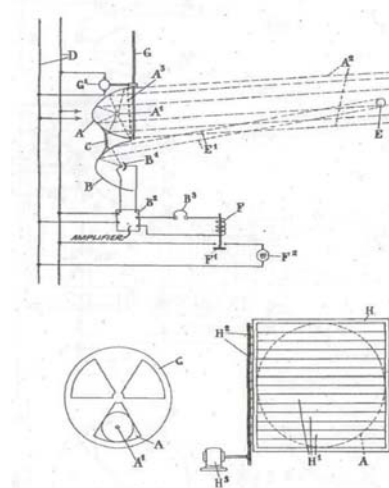


Rys. 2. Patent US 1388932

W 1916 r. H. Centervall prezentuje układ analizy sygnału „torpedy lotniczej”(rys. 2). W roku 1932 H. W. Lord przedstawił kołowy sterownik światła, co było początkiem rozwoju znanych obecnie modulatorów optycznych (rys. 3).

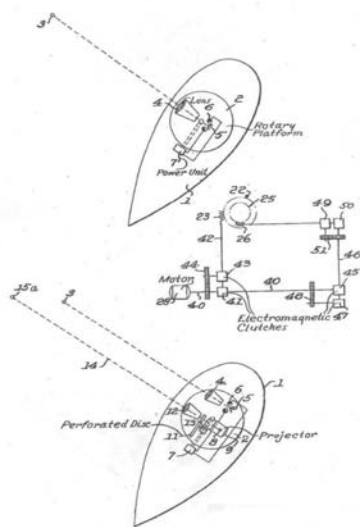


Rys. 3. Patent US 1971191

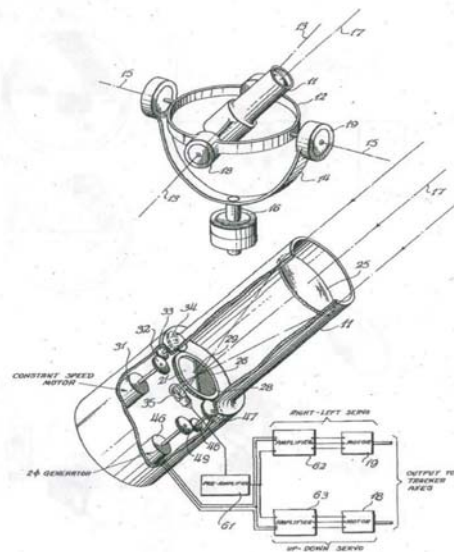


Rys. 4. Patent US 2237193

I tak w 1938 r. E.G.H. Mobsby zaprojektował pierwszy układ detekcji obiektów przy wykorzystaniu już promieniowania elektromagnetycznego (rys. 4) a w roku 1941 P.M.G. Tulon przedstawił złożony system orientacji (rys. 5).

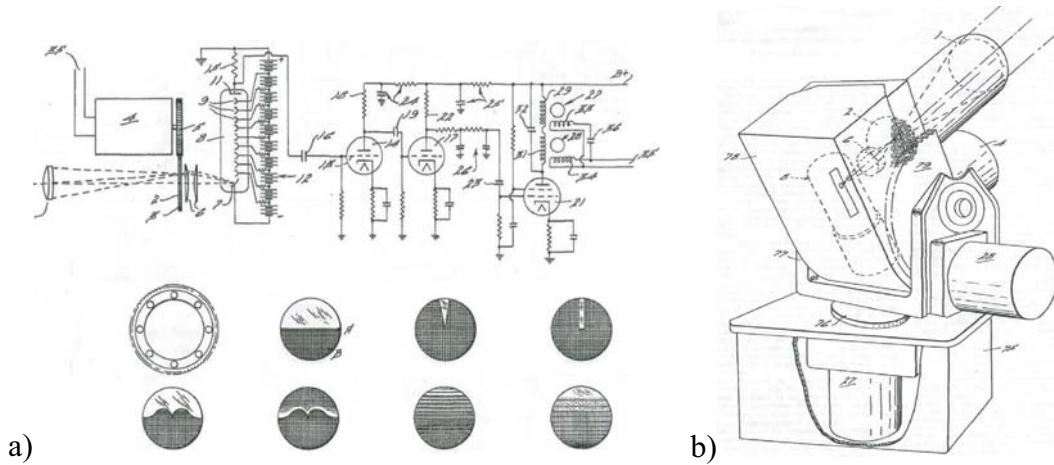


Rys. 5. Patent US 2369622



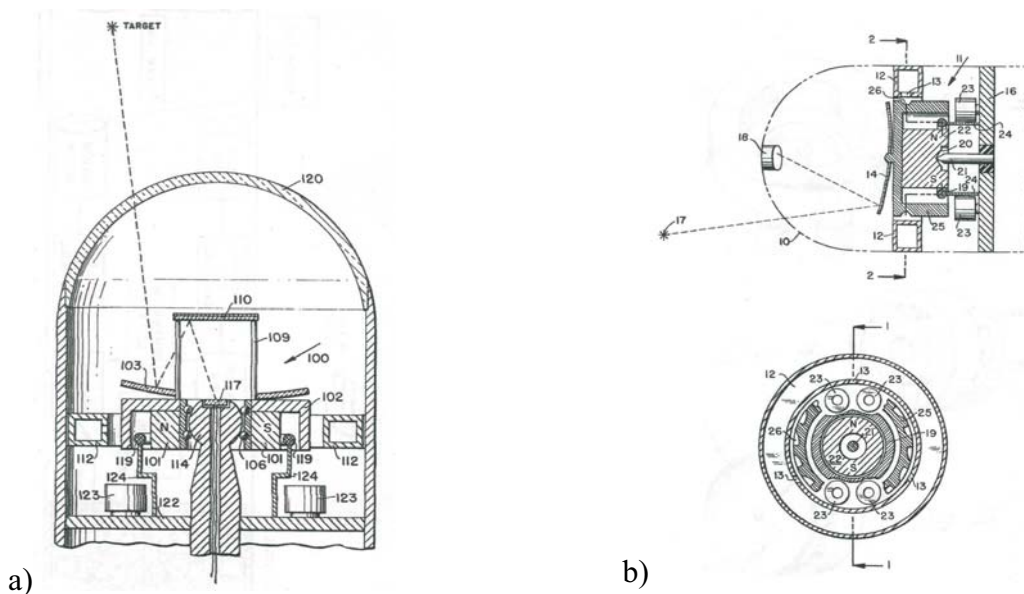
Rys. 6. Patent US 2513367

W latach następnych pojawiły się: optyczne urządzenie do modulowania sygnału L. Cranberg'a z roku 1945 [patent US 2,468,042], układ sterowania bomby lotniczej W. Shockley'a z roku 1948 [patent US 2,884,540] oraz układ śledzenia L.B. Scott'a z roku 1948 (rys. 6). Na szczególną uwagę zasługuje patent H.J. Eckweiler'a z roku 1949, w którym to zaprezentowano układ śledzenia celu razem z przykładowymi wzorami tarcz modulacyjnych (rys. 7a, b).



Rys. 7. Patent US 2713134

Rozwój optycznych układów wykrywania i lokalizacji źródła promieniowania stosowanych w samonaprowadzających się pociskach rakietowych nastąpił po drugiej wojnie światowej. Początkiem był wynalazek Wiliama McLean'a z 1956 r. a był to giroskopowy układ wyszukiwania celu (rys. 8a, b). Nowe ulepszone wzory modulatorów pojawiały się: po pierwsze wraz z rozwojem elektroniki, który umożliwiał zastosowanie coraz bardziej wyrafinowanych metod przetwarzania sygnału, po drugie, aby eliminować wpływ zakłóceń zewnętrznych na dokładność wyznaczania położenia celu.



Rys. 8. Patent US 4093154

W pracy prezentujemy nowy wzór modulatora, który wykazuje dobrą odporność na różnego rodzaju zakłócenia sygnału a przede wszystkim umożliwia równoczesne określenie położenia wielu źródeł promieniowania znajdujących się w polu widzenia głowicy pocisku rakietowego.

$$\beta_c = \beta_1 + \beta_2, r_c = R\beta_2 / \alpha \quad (1)$$

Przy stałej prędkości kątowej modulatora zachodzą zależności:

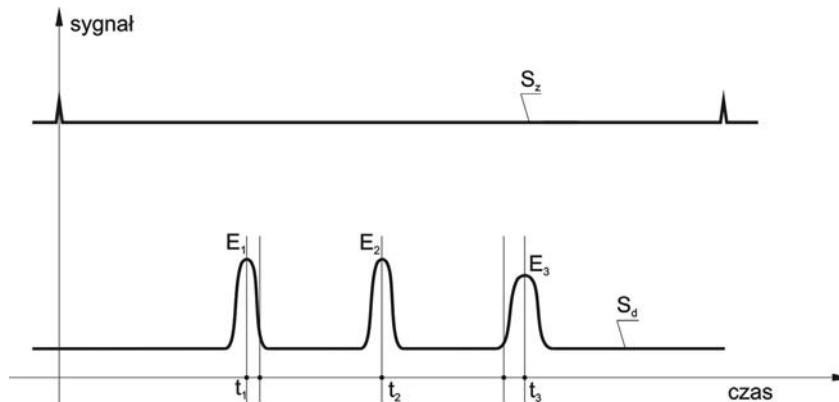
$$\beta_1 = t_1\omega_m, \beta_2 = (t_2 - t_1)\omega_m \quad (2)$$

więc można też wyznaczyć współrzędne położenia celu ze wzorów:

$$\beta_c = t_2\omega_m, r_c = R\omega_m(t_2 - t_1)/\alpha$$

Położenie celu można więc określić albo mierząc kąty obrotu modulatora β_1, β_2 albo przez pomiar czasów t_1, t_2 mierzonych od położenia odniesienia modulatora.

Jeśli źródło promieniowania będzie miało wymiary skończone, nieregularny kształt i zmieniające się w czasie natężenie promieniowania wtedy z detektora otrzymamy zamiast trzech jednakowych impulsów prostokątnych, jakie występowały przy źródle punktowym, sygnał zawierający w każdym okresie trzy „garby” o różnym kształcie jak to jest pokazane na rys. 12. Wystąpią trzy lokalne maksima E_1, E_2 i E_3 w chwilach czasu t_1, t_2 i t_3 .



Rys. 12.

W takim przypadku korzystanie ze wzorów (1) lub (2) prowadzi do wyznaczania współrzędnych pewnego punktu należącego do celu, którego położenie zależy od wzoru modulatora, kształtu powierzchni emitującej promieniowanie oraz rozkładu natężenia promieniowania z tej powierzchni a także zmian w czasie tego natężenia.

Do wyznaczania tak rozumianego „położenia celu” można też zastosować wzory:

$$\beta_c = \frac{t_3 + t_1}{2}\omega_m, r_c = \frac{R\omega_m}{\alpha} \frac{t_3 - t_1}{2} \quad (3)$$

Gdy w polu widzenia koordynatora znajduje się więcej niż jeden cel, w każdym okresie sygnału pojawi się $3n$ maksimów lokalnych (n – liczba celów). Aby trzy maksima pochodziły od tego samego celu punkowego musi być spełniony warunek:

$$(t_2 - t_1) - (t_3 - t_2) = 0$$

czyli

$$2t_2 - t_1 - t_3 = 0 \quad (4)$$

W warunkach rzeczywistych, gdy cel ma skończone wymiary, porusza się, emituje zmienne w funkcji czasu promieniowanie, pewnymi błędami obarczone jest określenie czasów, w których występuje maksimum lokalne i warunek (4) należy zmodyfikować do postaci:

$$\Delta = |2t_2 - t_1 - t_3| \leq \Delta_{gr} \quad (5)$$

gdzie Δ_{gr} jest wielkością określoną doświadczalnie zależną od wyżej wspomnianych czynników.

Jeżeli w polu widzenia koordynatora jest n źródeł promieniowania to w sygnale pojawi się $n_E = 3n$ maksimów lokalnych w każdym okresie. W celu dobrania trzech maksimów odpowiadających każdemu z celów trzeba sprawdzić warunek (5) dla $C_{n_E}^3$ kombinacji bez powtórzeń. Na przykład dla trzech celów będzie to ($n_E = 9$):

$$C_9^3 = \frac{9!}{3!(9-3)!} = 84 \text{ kombinacji.}$$

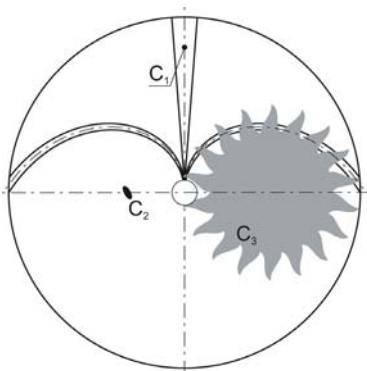
W praktyce, po znalezieniu pierwszej trójki czasów spełniających warunek (5) pozostanie do sprawdzenia liczba kombinacji:

$$C_6^3 = \frac{6!}{3!3!} = 20$$

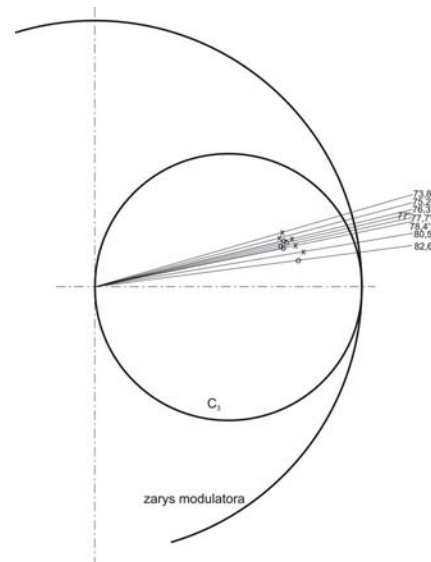
poniejszona o ilość kombinacji sprawdzonych wcześniej przy poszukiwaniu pierwszej trójki.

3. OPIS EKSPERYMENTU

Na stanowisku [2] użyty został modulator pokazany na rys. 13, w którym $\alpha = 87,5^\circ$, $2\delta_1 = 2\delta = 5^\circ$, $R/r_0 = 14$. Zarejestrowane zostały sygnały z detektora oddzielnie dla każdego z trzech źródeł promieniowania pokazanych na rys. 13 oraz dla wszystkich trzech źródeł równocześnie. Źródło C_1 było źródłem prawie punktowym, źródło C_2 było źródłem w postaci niewielkiej plamki o eliptycznym kształcie natomiast źródło C_3 było plamką kołową o średnicy równej połowie średnicy modulatora i nierównomiernym natężeniu promieniowania. Zarejestrowano sygnały z 6 obrotów modulatora. Przykładowe fragmenty sygnałów z jednego okresu pokazano na rys. 15.



Rys. 13.



Rys. 14.

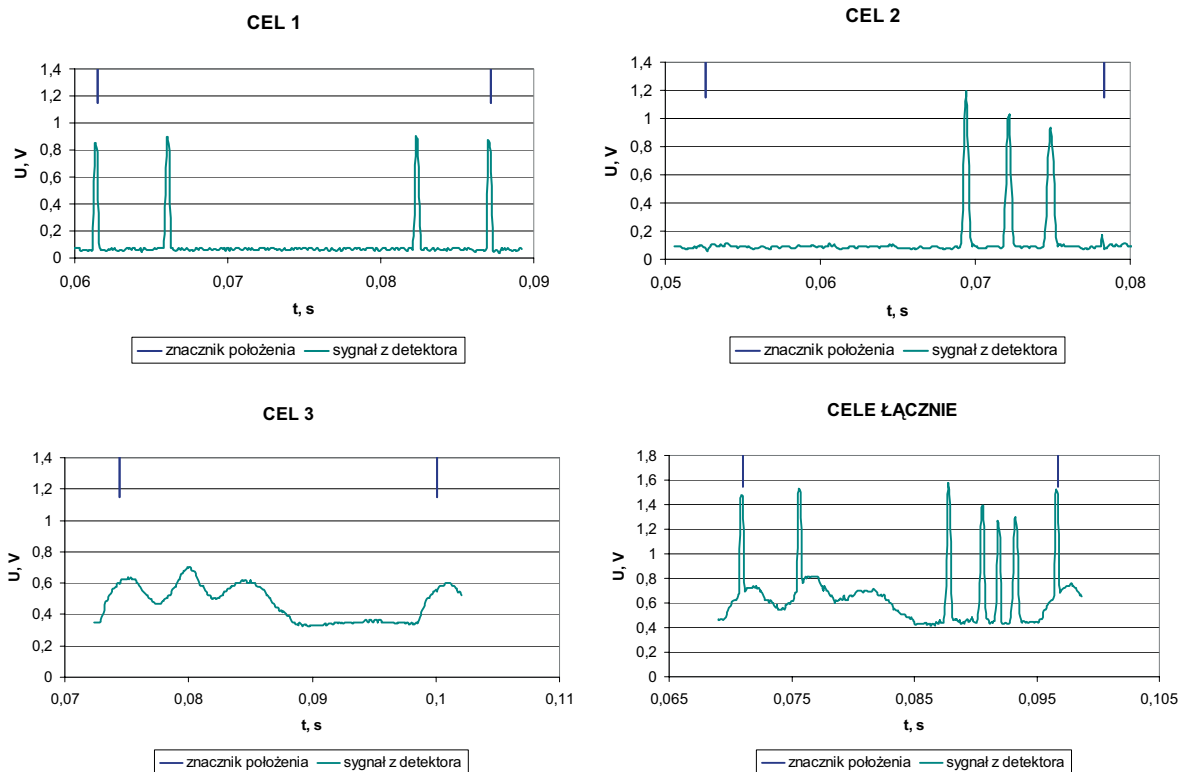
Odczytane zostały czasy, przy których występowały lokalne maksima sygnałów podczas każdego obrotu modulatora. Wyniki zestawiono w tab. 1. W oparciu o te wyniki ze wzoru 3 określone zostały współrzędne β_c i r_c dla każdego ze źródeł oddzielnie i wszystkich trzech łącznie. Wyniki zestawiono w tab. 2. Ze względu na niewielką liczbę powtórzeń nie przeprowadzona została ich pełniejsza analiza statystyczna. Obliczone zostały jedynie wartość średnia (kolumna 6 w tab. 2), wartość procentowa największego odchylenia od wartości średniej (kolumna 7 w tab. 2) oraz wielkość Δ ze wzoru (5) (tab. 3).

Kolumna 7 w tab. 2 wskazuje, że najmniejszy rozrzut wyników otrzymano dla celu najbardziej zbliżonego do punktowego (cel 1) a największy dla celu w postaci dużej plamy kołowej o nierównomiernym natężeniu promieniowania (cel 3).

Dla lepszego zilustrowania wyników otrzymanych dla celu 3 przedstawiono je na tle modulatora i celu 3 (wiersze 5 i 6 oraz 11 i 12 z kolumn 1-5 tab. 2). Widać, że wszystkie wyniki wskazują punkty należące do celu i wykazują dobre skupienie na jego powierzchni (rys. 14).

Tab. 1.

		Numer okresu											
		T,s	1	T,s	2	T,s	3	T,s	4	T,s	5	T,s	6
CEL 1	0,0257	0,0045	0,0257	0,0045	0,0257	0,0046	0,0257	0,0046	0,0256	0,0045	0,0257	0,0046	
		0,0208		0,0208		0,0209		0,0208		0,0209			
		0,0255		0,0256		0,0255		0,0255		0,0256		0,0256	
CEL 2	0,0257	0,0168	0,0256	0,0167	0,0257	0,0168	0,0257	0,0168	0,0256	0,0168	0,0257	0,0168	
		0,0196		0,0195		0,0196		0,0195		0,0195		0,0196	
		0,0222		0,0222		0,0223		0,0223		0,0222		0,0223	
CEL 3	0,0257	0,0008	0,0256	0,0009	0,0257	0,0007	0,0257	0,0008	0,0256	0,0007	0,0257	0,0009	
		0,0055		0,0055		0,0056		0,0056		0,0055		0,0056	
		0,0104		0,0098		0,0102		0,0107		0,0098		0,0105	
CELE ŁĄCZNIE	0,0257	0,0011	0,0257	0,0011	0,0257	0,0009	0,0257	0,0011	0,0257	0,0009	0,0257	0,0010	
		0,0046		0,0046		0,0046		0,0046		0,0046		0,0046	
		0,0056		0,0056		0,0054		0,0053		0,0058		0,0055	
		0,0101		0,0100		0,0101		0,0107		0,0100		0,0104	
		0,0168		0,0168		0,0168		0,0168		0,0168		0,0168	
		0,0196		0,0196		0,0196		0,0196		0,0195		0,0195	
		0,0209		0,0209		0,0208		0,0208		0,0208		0,0208	
		0,0224		0,0223		0,0223		0,0223		0,0223		0,0222	
		0,0256		0,0256		0,0256		0,0256		0,0256		0,0256	



Rys. 15.

Tab. 2.

Numer odczytu		Położenie celu					Wartość średnia	Odchylenie max w %	
		1	2	3	4	5			
Nr kolumny		1	2	3	4	5	6	7	
CELE OSOBNO	CEL1	β_c, deg	357,2	357,2	357,2	357,2	358,6	357,48	0,31
		r_c / R	0,752	0,760	0,760	0,752	0,755	0,7558	0,56
	CEL 2	β_c, deg	273,2	273,5	273,9	273,9	274,2	273,74	0,17
		r_c / R	0,432	0,442	0,440	0,440	0,434	0,4376	1,28
	CEL 3	β_c, deg	78,4	75,2	76,3	80,5	73,8	76,84	4,76
		r_c / R	0,768	0,715	0,760	0,792	0,731	0,7532	5,15
CELE ŁĄCZNIE	CEL 1	β_c, deg	358,6	358,6	357,9	357,9	357,9	358,18	0,12
		r_c / R	0,752	0,760	0,760	0,760	0,760	0,7584	0,21
	CEL 2	β_c, deg	274,5	273,9	273,9	273,9	273,9	274,02	0,18
		r_c / R	0,448	0,440	0,440	0,440	0,440	0,4416	1,45
	CEL 3	β_c, deg	78,4	77,7	77,0	82,6	76,3	78,40	5,36
		r_c / R	0,720	0,712	0,736	0,768	0,728	0,7328	4,80

Tab. 3.

Numer odczytu		Wartość Δ , s				
		1	2	3	4	5
CELE OSOBNO	CEL 1	0,0000	0,0002	0,0001	0,0001	0,0002
	CEL 2	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000
	CEL 3	0,0002	0,0003	0,0003	0,0003	0,0005
CELE ŁĄCZNIE	CEL 1	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001
	CEL 2	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
	CEL 3	0,0000	0,0001	0,0002	0,0012	0,0007

4. UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI

Na podstawie opisanych wstępnych badań modulatora można stwierdzić, że:

- zastosowane parametry modulatora ($\alpha = 87,5^\circ$, $2\delta_1 = 2\delta = 5^\circ$, $R/r_0 = 14$) oraz warunki eksperymentu (próbkowanie z częstotliwością 10 kHz, rozdzielczość przetwornika A/D 12 bitów, okres $T = 0,0257s$) pozwoliły na wyznaczenie położenia celów punktowych z bardzo dobrą dokładnością a celu o dużych rozmiarach i nierównomiernych promieniowaniu ze swej powierzchni z dokładnością wystarczającą,
- dalszą poprawę dokładności określania położenia celów można uzyskać (przy pozostałych warunkach eksperymentu nie zmienionych) przez poddanie analizie sygnału z detektora przefiltrowanego filtrem dolnoprzepustowym usuwającym szybkozmienne zakłócenia, które miały największy wpływ na błąd w wyznaczeniu położenia celu 3,
- zastosowana w eksperymencie częstotliwość próbkowania wydaje się wystarczająca – 257 próbek na jeden obrót modulatora czyli próbkowanie co 1,4 deg obrotu modulatora co daje 3,6 próbki na impuls od celu punktowego,
- 12-bitowa rozdzielczość przetwornika A/D wydaje się zupełnie wystarczająca,
- w celu określenia miarodajnej wartości Δ_{gr} , która mogłaby być podstawą zastosowania w pełni zautomatyzowanego systemu wyznaczania położenia celów w czasie rzeczywistym przez komputer należy przeanalizować dłuższe rekordy sygnałów – przeprowadzone przez autorów wcześniej badania [3] wskazują, że statystyczne parametry sygnałów (wartość średnia, wariancja, itp.) stabilizują się po ok. 20 okresach.

5. LITERATURA

1. Koruba Z., Osiecki J.: Budowa, dynamika i nawigacja pocisków raketowych bliskiego zasięgu. Skrypt PŚk Nr 348, Kielce 1999.
2. Krzysztofik I., Rozenau A.: Układ pomiarowy do wyznaczania położenia punktowego źródła światła. Pomiary Automatyka Robotyka 2/2008, Warszawa 2008, s. 773-782.
3. Krzysztofik I., Rozenau A.: A preliminary analysis of resistance to external interference of optical modulators. Aviation Transport. Riga 2008.