

RADAROWY MIERNIK ODLEGŁOŚCI DO PRZESZKODY DLA ŚMIGŁOWCÓW RATOWNICZYCH

mgr inż. **Andrzej MIODUSZEWSKI**
Instytut Lotnictwa

W artykule opisano radarowy miernik odległości będący częścią systemu zapewniającego bezpieczne wykonywanie operacji ratowniczych z wysokich budynków przy pomocy śmigłowców. Zasygnalizowano podstawowe równanie techniki radarowej, i zależności pomiaru odległości przy modulacji FM/CW. Podano podstawowe parametry modułu mikrofalowego 24 GHz i jego sygnały. Szczegółowo opisano metody eliminacji sygnału modulacji FM i uzyskania użytecznego sygnału odległości. Zaprezentowano schemat blokowy miernika odległości do przeszkody Radar Obstacle Detector ROD-08 i zasadę jego działania. Omówiono główne ograniczenia warunkujące prawidłowe jego funkcjonowanie. Omówiono wyniki badań funkcjonalnych miernika odległości przeprowadzone na różnych etapach projektowania. Zaprezentowano doraźne rozwiązanie umożliwiające pomiar odległości do najbliższego obiektu. Przedstawiono wnioski dotyczące problemów pomiaru odległości do przeszkód w postaci kilku budynków i kierunków rozwoju konstrukcji z zastosowaniem FFT.

1. TECHNIKA RADAROWA W POMIARACH ODLEGŁOŚCI

Użytkowanie śmigłowców podczas akcji ratowniczych w pobliżu wysokich budynków, doprowadziło do wniosku o potrzebie posiadania systemu pokładowego zapewniającego bezpieczne wykonywanie operacji w tych szczególnych warunkach. Jednym z elementów tego systemu, jest układ radarowej oceny odległości śmigłowca od ścian otaczających budynków, potrzebny szczególnie w przypadku niemożności oceny wzrokowej np. przy zadymieniu strefy operacji. Założono włączenie do systemu mikrofalowego radarowego miernika odległości do przeszkody, który mierzyłby odległość od końca łopat wirnika do ściany budynku, a opracowanie tego przyrządu powierzono mojej skromnej osobie. Na wstępie kilka uwag o technice radarowej i właściwościach mikrofal. Możliwości detekcji obiektów przez radar wyznacza równanie:

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{g^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi^2)^3 \cdot D^4} \quad (1)$$

gdzie:

- P_R – moc sygnału odbieranego,
- P_T – moc sygnału nadawanego,
- G – zysk anteny,
- λ – długość fali sygnału nadawanego (12 mm przy 24 GHz),
- σ – efektywna powierzchnia odbijająca obiektu,
- D – odległość do obiektu.

Tak więc moc sygnału odbieranego jest odwrotnie proporcjonalna do czwartej potęgi odległości i jest wprost proporcjonalna do efektywnej powierzchni odbijającej obiektu. Przy częstotliwości 24 GHz efektywna powierzchnia odbijająca przykładowych obiektów wynosi:

- człowiek lub zgnieciona puszka po napojach ok. 0,5 m²,
- samochód w zależności od kierunku 1 do 5 m²,
- płyta metalowa o powierzchni 1 m² > 100 m².

Należy przypomnieć że mikrofałe ze względu na małą długość fali zachowują się jak światło, to znaczy ulegają ugięciu, całkowitemu odbiciu, odbiciu w innym kierunku, interferencji, a poza tym są przez różne materiały przepuszczone lub pochłaniane. Zjawiska te kształtują obraz radarowy obiektu. Zastosowanie techniki radarowej do lokalizacji wysokich budynków, które są konstrukcjami żelbetonowymi z dużą ilością zewnętrznych, płaskich, powierzchni szklanych jest obarczone pewną niewiadomą. Niepewność polega na możliwości odbicia się wiązki mikrofalowej od powierzchni tafli szklanej w przestrzeń lub prześwietlenia tafli szklanej i odbiciu się dopiero od struktur wewnętrznych budynku. Nadzieję że tak nie będzie i wiązka radarowa odbije się od elementów zewnętrznych ściany budynku i wróci do anteny odbiorczej dając elementy metalowe jak ramy i sama stalowa konstrukcja budynku. Uwarunkowania powyższe zostały uwzględnione przy konstrukcji radarowego miernika odległości do przeszkody.

Dla detekcji obiektów stacjonarnych na odległościach do kilku kilometrów powszechnie stosuje radary wykorzystujące technikę fali ciągłej modulowanej częstotliwościowo FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave). W przypadku modulacji częstotliwości nadajnika przebiegiem trójkątnym obowiązuje następująca zależność:

$$f_D = D \cdot \frac{4\Delta f}{c} \cdot f_m \quad (2)$$

przy czym:

- f_D – częstotliwość różnicowa,
- D – odległość obiektu,
- Δf – dewiacja częstotliwości nadajnika,
- f_m – częstotliwość przebiegu modulującego,
- c_0 – prędkość światła.

Utrzymując stałą wartość dewiacji częstotliwości i stałą częstotliwość przebiegu modulującego uzyskujemy układ pomiarowy gdzie miarą odległości do obiektu jest częstotliwość różnicowa.

$$f_D = D \cdot K \quad (3)$$

gdzie K jest stałą miernika odległości.

Układ ten zastosowano w mierniku odległości do budynków opisanym poniżej.

2. RADAROWY MIERNIK ODLEGŁOŚCI DO PRZESZKODY

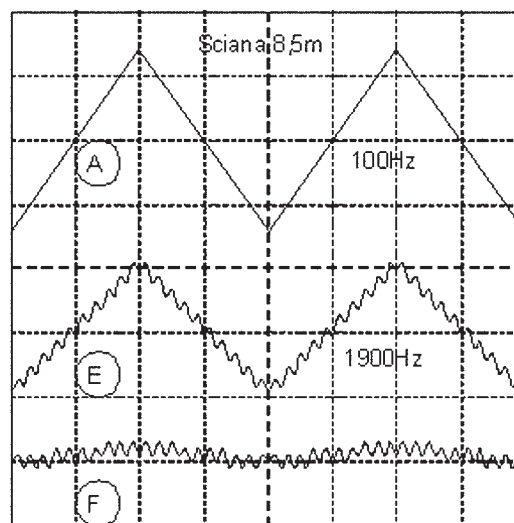
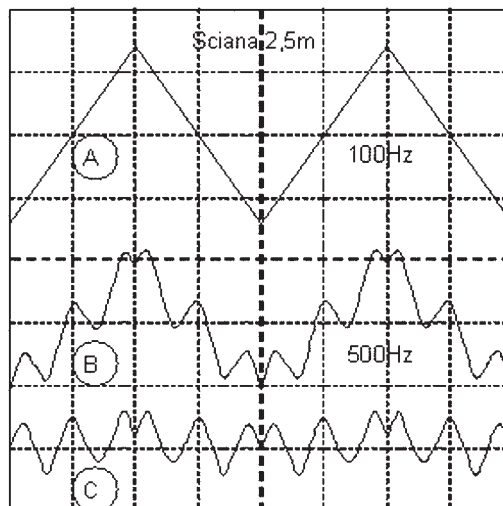
Radarowy miernik odległości do przeszkody (Radar Obstacle Detektor) ROD-08 jest częścią systemu pokładowego zapewniającego bezpieczne wykonywanie akcji ratowniczych z wysokich budynków przy pomocy śmigłowców. Miernik ROD-08 jest miniaturowym radarem mierzącym odległość do przeszkody w zakresie od 5 m do 55 m (od końca łopaty wirnika śmigłowca do 50 m). Radar pracuje w paśmie częstotliwości 24,000÷24,250 GHz wykorzystując technikę falą ciągłej modulowanej częstotliwościowo (FMCW).

Głównym zespołem miernika jest mikrofalowy moduł nadawczo-odbiorczy K-Band VCO Transceiver IVS-148 firmy Innocent. Zawiera on generator VCO umożliwiający pracę w trybie CW/FSK/FMCW i może być przestrajany w zakresie większym niż 24,0÷24,5 GHz przy napięciu przestrajającym 0 V÷8 V. Efektywna moc promieniowana (z uwzględnieniem zysku antenowego) wynosi +20 dBm – 100 mW i emitowana jest przez 30 elementową antenę mikropaskową. Szerokość wiązki w azymucie wynosi 12°, a w elewacji 25°. Druga identyczna antena usytuowana tuż obok anteny nadawczej służy do odbioru sygnałów odbitych od obiektów. Moduł może pracować w zakresie temperatur -40 do +85°C i przy zasilaniu +5 V pobiera 60 mA.

Nadajnik modułu mikrofalowego modulowany jest przebiegiem trójkątnym o częstotliwości 100 Hz o wartości około 3V_{pp}, tak dobranej aby uzyskać dewiację częstotliwości VCO równą ±75 MHz. Napięcie stałe około 2,5 V ustala wartość częstotliwości środkowej nadajnika na 24,125 GHz. Tak dobrane parametry modulacji wyznaczają stałą miernika równą 200 Hz/m zgodnie ze wzorem (2). Oznacza to, że zmiana odległości mierzonej o 1 m spowoduje zmianę częstotliwości sygnałów wyjściowych odbiornika I/Q o 200 Hz. Rozdzielczość pomiaru odległości przy takich parametrach modulacji wynosi 1 m.

Odbiornik modułu mikrofalowego posiada mieszacz kwadraturowy na którego wyjściu dostępne są dwa sygnały I/Q przesunięte w fazie względem siebie o 90°. Umożliwia to wykrycie kierunku ruchu obiektu w przypadku zastosowania modułu do pomiaru prędkości. Sygnały I/Q są wstępnie

wzmacniane 30dB w paśmie 50 Hz ÷ 100 kHz, przy czym składowa stała na wyjściu wzmacniacza wynosi 2,5 V. Typowe kształty sygnałów pokazano na rysunku 1. Sygnał B powstaje przy odbiciu od ściany odległej o 2,5 m, a sygnał D przy odbiciu od obiektu odległego o 8,5 m. Sygnały I/Q nałożone są na przebieg A sygnału modulacji 100 Hz o poziomie około 0,5 V_{pp}, który pojawia się wskutek skończonej izolacji mieszaczy odbiornika dla sygnałów nadajnika. Widocznym jest, że odzyskanie sygnału użytecznego jest trudne i wymaga skutecznego odfiltrowania przebiegu modulującego i jego harmonicznym.



Rys. 1. Typowe kształty sygnałów modułu mikrofalowego przy pomiarze odległości 2,5 m i 8,5 m

Uzyskano to stosując kilka sposobów.

- Pierwszy polegał na odwróceniu znaku sygnału I i zsumowaniu z sygnałem Q. Zredukowano w ten sposób o >20 dB przebieg modulujący 100 Hz i uzyskano sygnały odległości C i F, jak na rysunku 1.
- Drugim sposobem było odfiltrowanie sygnału modulującego 100 Hz przez górnoprzepustowy filtr LC o częstotliwości granicznej 800 Hz i tłumieniu > 36 dB częstotliwości mniejszych od 400 Hz.
- Trzecim sposobem było zastosowanie ogniwa różniczkującego RC wprowadzającego tłumienie 6 dB na oktawę poniżej częstotliwości 14 kHz. Tłumienie sygnałów 100 Hz wynosi około 40 dB.

- Filtr LC o częstotliwości granicznej 15 kHz i nachyleniu około 40 dB na oktawę odcina szumy i sygnały odległości większych niż 70 m.

Uzyskanie wartościowego sygnału użytecznego było podstawą do poprawnego działania miernika odległości. Wyklucza to jednak możliwość pomiaru odległości mniejszych od 4 m.

Poziom sygnałów I/Q przy pomiarze odległości do ściany oddalonej o 5 m wynosi ok. 100 mV_{pp} przy czym składowa modulacji 100 Hz wynosi 0,5 V_{pp}, powierzchnia opromieniana ma wymiary około 1m x 2 m. Przy większych odległościach mierzonych i takiej samej skutecznej powierzchni odbijającej moc sygnału odległości maleje proporcjonalnie do czwartej potęgi odległości, tak więc przy odległości 50 m będzie ona 10⁴ razy mniejsza, czyli napięcie sygnału wyniesie około 1 mV_{pp}. Jednakże powierzchnia opromieniana wynosi wtedy 10 m x 20 m i moc sygnału odbieranego może być tylko 100 mniejsza, czyli napięcie sygnału wyniesie 10 mV. Liniowe wzmocnienie sygnału odległości do poziomu 24 V_{pp} wymaga wzmocnienia toru około 68 dB przy częstotliwości 10 kHz i 48 dB przy częstotliwości 1kHz. Zastosowana korekta wzmocnienia 6dB / oktawę wydaje się być optymalna. Zmiany skutecznej powierzchni odbijającej wywołane materiałem i strukturą obiektu założono na poziomie 20 dB (10x) takie jak w przypadku radio-wysokościomierzy lotniczych. Poziom sygnału odległości na wyjściu wzmacniacza będzie zawarty w granicach 24 V_{pp} – 2,4 V_{pp}. Ogranicznik diodowy normalizuje amplitudę sygnału odległości na poziomie 2,4 V_{pp}.

Tak wyfiltrowany sygnał wysokości w postaci impulsów o częstotliwości proporcjonalnej do wysokości podawany jest na scalony przetwornik częstotliwość – napięcie TC 9402. Częstotliwości od 800 Hz do 12 000 Hz są przetwarzane liniowo w napięcie stałe 0,4 do 6,0 V tworząc sygnał wyjściowy odległości sterujący wskaźnikiem. Pracą toru przetwarzania częstotliwości na napięcie steruje układ detektora poziomu sygnału, który odłącza wejście przetwornika przy spadku sygnału poniżej 0,8 V_{pp} i przełącza go na sygnał 11,0 kHz (55 m) z generatora Testu / prze-

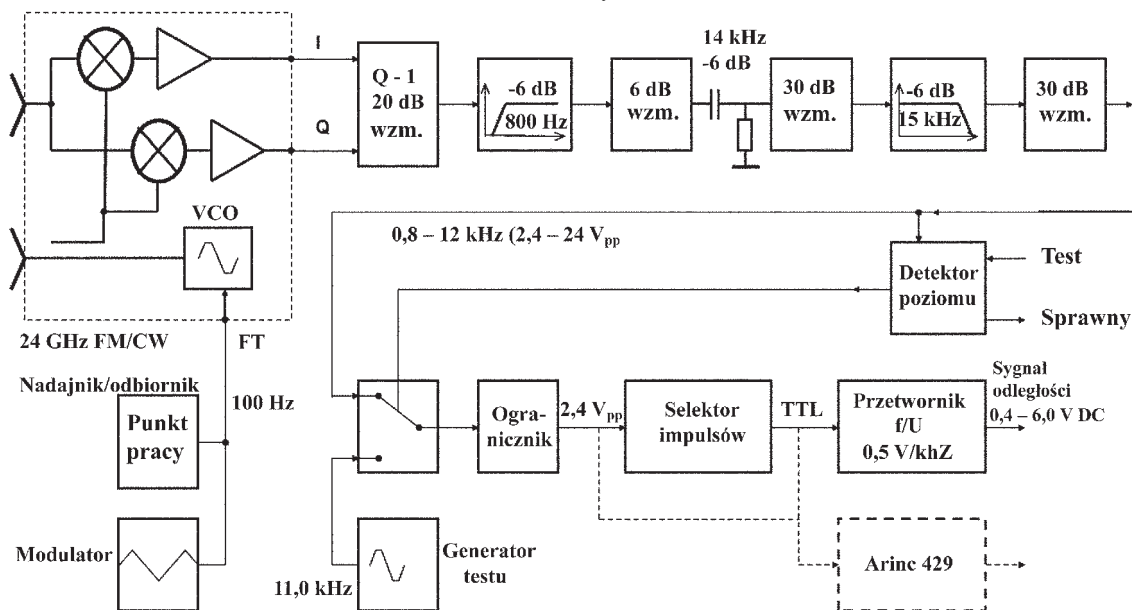
kroczenia zakresu odległości. Powoduje to, że w przypadku braku sygnału lub jego spadku poniżej użytecznego poziomu przyrząd wskazuje wysokość 50 m (zero wskaźnika na 5 m), a wskaźnik sygnalizuje odpowiedni stan. Schemat blokowy miernika odległości do przeszkody ROD-08 pokazano na rysunku 2.

3. WSKAŹNIK

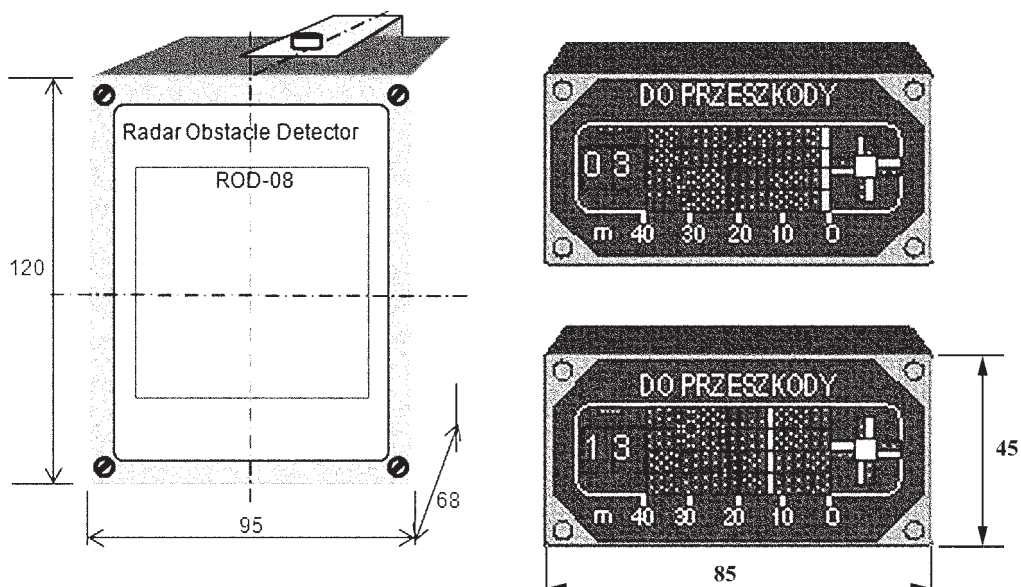
Wskaźnik miernika odległości do przeszkody prezentuje odległość do przeszkody analogowo i cyfrowo. Z prawej strony wskaźnika znajdują się symboliczna sylwetka śmigłowca z czterema zielonymi łopatomy z diod świecących. Kolor łopat zmienia się na czerwony przy odległości mniejszej niż 4 m.

Zero wskaźnika odpowiada końcom łopat wirnika i jest regulowane i ustawiane dla danego typu śmigłowca. Przesuwający się ruchomy słupek o wysokości 20 mm i grubości 2 mm z czterech diod luminescencyjnych obrazuje przeszkodę (ścianę budynku). Jego odległość od symbolicznej sylwetki śmigłowca pokazuje odległość do przeszkody. Słupek zmienia swoje położenie co 2 m. Słupek pierwszy zaświeci się przy odległości 2 m i będzie świecił aż do 4 m kiedy zaświeci się słupek drugi. Słupek dwudziesty zaświeci się przy 40 m i będzie się świecił przy każdej odległości większej niż 40 m, np. 43 m, 56 m, o ile tylko przyrząd mierzy daną odległość. Słupki są zróżnicowane kolorystycznie i tak odległości od 2 m do 8 m sygnalizowane są kłosem czerwonym, odległości od 8 m do 12 m kolorem pomarańczowym, odległości od 12 m do 22 m kolorem żółtym, a odległości od 22 m do 42 m kolorem zielonym. Zakres pomiarowy przyrządu ograniczony jest do około 60 m (miernik wchodzi w nasycenie). Odległości większe niż około 42 m, będą skutkowały świeceniem się słupka 40 m i wartością wyświetlacza odpowiadającą mierzonej odległości ile sygnał odbity od przeszkody będzie wystarczająco silny.

Równoległe do wskazań analogowych odległości do przeszkody prezentowana jest w zakresie do 60 m z rozdzielczością 1 m na żółtym wyświetlaczu cyfrowym. Spadek sygnału poniżej poziomu użytecznego sygnalizowany jest czerwoną diodą nad wyświetlaczem cyfrowym i wyświetlaną wysokością 50 m.



Rys. 2. Schemat blokowy miernika odległości do przeszkody ROD-08



Rys. 3. Miernik odległości do przeszkody ROD-08 – gabaryty

Układ elektroniczny wykorzystuje układ przetwornika napięcie –cyfra ICL7107 i 2 sterowniki liniiki diodowej LM3914. Próby funkcjonalne pokazały, że rozdzielczość liniiki diodowej jest wystarczająca.

4. PRÓBY FUNKCJONALNE ROD-08

Przeprowadzono próby działania przyrządu w pomieszczeniach zamkniętych i w terenie otwartym na różnych etapach projektowania. Początkowo napotkano trudności z osiągnięciem rozwiązania które zapewniało jednoznaczny stan wyłączenia w przypadku braku przeszkody (np. anteny skierowane w niebo) w połączeniu z dużą czułością wykrywania. Skuteczne rozwiązanie problemu było możliwe po zastosowaniu wspomnianych wcześniej czterech metod eliminacji sygnału modulacji.

Przy próbach niezastąpiony okazał się analizator widma. Szybko potwierdził się fakt, że sygnał wysokości zawiera w swoim widmie informację o wszystkich obiektach bliższych i dalszych dających odbicie radarowe. Nawet w stosunkowo czystym eksperymencie kiedy z okna budynku na trzecim piętrze mierzono odległość 20 m do budynku po drugiej stronie ulicy analizator widma pokazywał silne i wąskie widmo obiektu ale także dużo słabsze $>26\text{dB}$ rozmyte widmo sygnału podwójnej odległości między budynkami. Nie wpływało to znacząco na wynik pomiaru. Dużo groźniejsze zjawisko występowało w sytuacji kiedy mierzono odległość ok. 20m do narożnika lub ostatniego piętra budynku za którym stał wyższy lub większy budynek. Widmo echa radarowego budynku dalszego było o 10 dB słabsze ale znacznie szersze i wyraźnie wpływało na wynik pomiaru, który był średnią odległością do budynków. Z powodu słabego tłumienia listków bocznych zauważalny był wpływ obiektów odległych o kilka metrów poza głównym kierunkiem promieniowania, których echo potrafiło wpłynąć na wynik pomiaru. Potwierdziło się istnienie wszystkich szkodliwych zjawisk właściwych technice FM/CW znanych konstruktorom i występujących przy eksploatacji radiowysokościomierzy lotniczych.

Eksperymenty potwierdziły zasadność stosowania analizy FFT, która pozwoliłaby rozróżnić odległości do kilku obiektów. Prace w tym kierunku są prowadzone w Instytucie Lotnictwa.

Doraźnie zdecydowano się na zastosowanie rozwiązań opianowanych. Zaadaptowano układ stosowany w radiowysokościomierzach i objęty patentem Ilot, znany pod nazwą selektora impulsów. Jest to układ analogowo-cyfrowy, który z widma sygnału przekształconego na ciąg impulsów o różnej długości potrafi wyeliminować wszystkie impulsy krótsze niż połowa impulsów odpowiadających częstotliwości środkowej widma. Układ ma właściwości dolnoprzepustowego filtru śledzącego przestrajającego się w zakresie częstotliwości 100 : 1. Zastosowanie układu wyraźnie osłabiło wpływ echa obiektów na wynik pomiaru odległości obiektów bliższych. Miernik w tej konfiguracji może służyć skutecznie do pomiaru odległości śmigłowca do ścian wysokich budynków podczas akcji ratowniczych.

5. WNIOSKI

1. Wykonany prototyp radarowego miernika odległości od ścian otaczających budynków podczas akcji ratowniczych przy pomocy śmigłowców został sprawdzony funkcjonalnie podczas prób naziemnych i działa zgodnie z założeniami. Pomiary odległości przeprowadzono z okien trzypiętrowego budynku do budynków sąsiednich.
2. Pomiar odległości do najbliższego budynku jest prawidłowy o ile wyższy budynek w tle jest w odległości około dwukrotnie większej, co zwykle ma miejsce.
3. Sygnał echa radarowego zawiera informacje o wszystkich obiektach opromieniowanych przez wiązkę nadajnika o szerokości 25° w azymucie i 12° w elewacji w zakresie odległości od 5 do 50 m. W szczególnych przypadkach widoczne są dwa budynki stojące w podobnych odległościach. Miernik poda wtedy średnią odległość do budynków.

4. Rozróżnienie odległości do kilku obiektów położonych w różnych odległościach możliwe jest w przypadku analizy sygnału przy wykorzystaniu Szybkiej Transformy Fouriera. Prowadzone są prace w tym kierunku.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Innocent Innovative Sensor Technology*. Standard Products. Version; 2008-01-29.
- [2] **Dziubiński J.:** *Prędkościomierz opadania samolotu podczas lądowania*. Journal of Aeronautica Integra 1/2008.
- [3] **Marcisz J. Zakrent A.:** *Radiowysokościomierz nowej generacji AA-2500*. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej z.45, I Konferencja Awioniki Jawor 95.

A. Mioduszewski

RADAR DISTANCE TO OBSTACLE METER FOR RESCUE HELICOPTERS

Summary

This paper describes the radar distance meter that is the element of a system to ensure safe performance of rescue operations from the high-rise buildings with the help of helicopters. Indicated is the basic equation of radar technology and dependence of the distance measurement with the FM/CW modulation. Given are the basic parameters of the 24GHz microwave module and its signals. The methods of the FM signal modulation elimination are described in detail and the ways to obtain useful distance signal. Presented is a block diagram of the distance to the obstacle meter, named: „Obstacle Radar Detector ROD-08” and the principle of its operation. Discussed are the main constraints to ensure a proper instrument functioning. Discussed are also the results of distance meter functional studies carried out at the various stages of its design. Presented is the ad hoc solution to the nearest object distance measurement. The conclusions concerning the problems of measuring the distance to obstacles in the form of a group of buildings and directions of the instrument structure development using FFT algorithm are given.

A. Медушевски

РАДАРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ РАСТОЯНИЯ ДО ПРЕГРАДЫ ДЛЯ ВЕРТОЛЕТОВ СЛУЖБЫ СПАСЕНИЯ

Резюме

В статье описан радарный измеритель расстояния, который является частью системы, которая гарантирует безопасное выполнение операций служб спасения с высоких зданий с использованием вертолетов. Описано основные уравнения радарной техники, и математические зависимости измерения расстояния при модуляции FM/CM. Представлено основные параметры микроволнового модуля 24 GHz и его сигналы. Детально описан метод элиминации сигнала модуляции FM и получения пригодного сигнала расстояния. Показано принципиальную схему измерителя расстояния до преграды Radar Obstacle Detektor ROD-08 и принцип его работы. Оговорено основные ограничения обуславливающие исправное его функционирование. Оговорено результаты функциональных исследований измерителя расстояния проведенных на разных этапах проектирования. Представлено временное решение дающее возможность измерения расстояния к ближайшему объекту. Представлено также заключающие выводы касающиеся проблем измерения расстояния до преграды в виде нескольких зданий и направлений развития конструкций с использованием FFT.