



BIULETYN WAT  
VOL. LV, NR 1, 2006

## Pomiary promieniowania ludzi i obiektów za pomocą radiometru mikrofalowego

BRONISŁAW STEC, WALDEMAR SUSEK,  
ADAM KONRAD RUTKOWSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki,  
Instytut Radioelektroniki, Zakład Mikrofal,  
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

**Streszczenie.** W dziedzinie techniki zajmującej się pomiarami odebranego promieniowania wyróżnia się radiometrię szumową związaną z detekcją promieniowania o strukturze szumowej, którego widmo mieści się w pasmie mikrofalowym. Źródłem tego promieniowania są organizmy żywe oraz przedmioty i substancje, których temperatura jest wyższa od zera bezwzględnego. Pomiar tego rodzaju promieniowania jest realizowany za pomocą radiometru mikrofalowego składającego się z anteny (głowicy pomiarowej), wzmacniacza z detektorem oraz wyjściowego układu analizującego i rejestrującego. W artykule przedstawiono zasadę działania i parametry robocze radiometru modulacyjnego pracującego na częstotliwości 1,5 GHz. Opisano wybrane wyniki prac badawczych prowadzonych w Zakładzie Mikrofal IRE WEL WAT nad bezinwazyjnymi metodami lokalizacji stanów patologicznych wewnątrz organizmów żywych oraz biernymi systemami wykrywania obiektów o temperaturze fizycznej wyższej lub niższej niż temperatura ich otoczenia. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych weryfikujących przyjęte hipotezy.

**Słowa kluczowe:** radiometria, radiometr mikrofalowy, termograf mikrofalowy, detekcja promieniowania

**Symbole UKD:** 621.396.96

### 1. Wstęp

Radiometry mikrofalowe są bardzo czułymi miernikami mocy sygnałów wielkiej częstotliwości emitowanych przez substancje i przedmioty o temperaturze fizycznej  $T$  większej od 0 K. Max Planck przedstawił wzór opisujący widmową zdolność emisyjną ciała doskonale czarnego zdefiniowaną jako energia promie-

niowania elektromagnetycznego, wyemitowana w jednostce czasu, z jednostki powierzchni  $dS$ , w jednostkowym pasmie  $df$ :

$$E(f, T) = \frac{2\pi f^2}{c^2} \cdot \frac{hf}{\exp\left(\frac{hf}{kT}\right) - 1}, \quad (1)$$

gdzie:  $c$  [m/s] — prędkość światła;  $T$  [K] — temperatura ciała;  $f$  [Hz] — częstotliwość;  $h$  [Js] — stała Plancka;  $k$  [J/K] — stała Boltzmana.

Dla niższych częstotliwości promieniowania elektromagnetycznego, zdeteminowanego temperaturą fizyczną ciała, wzór Plancka upraszcza się do wzoru Rayleigha-Jeansa:

$$E(f, T) \cong \frac{2\pi f^2 kT}{c^2}. \quad (2)$$

Równanie (2) wskazuje również, iż energia wypromieniowana w jednostce czasu, z jednostki powierzchni w jednostkowym pasmie częstotliwości, jest wprost proporcjonalna do temperatury  $T$ .

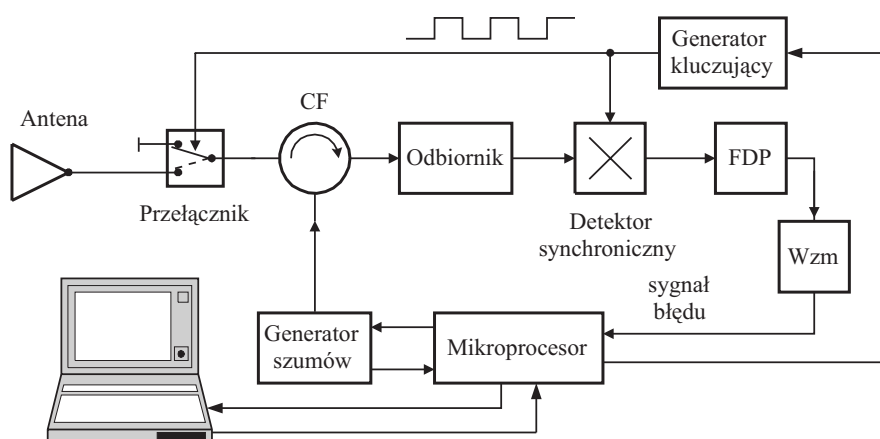
Maksymalna zdolność emisyjna ciała doskonale czarnego znajdującego się w temperaturze  $T$  przypada na zakres podczerwieni, natomiast w pasmie mikrofalowym jest około  $10^8$  razy mniejsza. Jednocześnie jednak w niektórych ośrodkach tłumienie fal bardzo krótkich jest dużo większe niż tłumienie fal dłuższych. W związku z tym radiometr mikrofalowy staje się bardzo użytecznym narzędziem detekcji obiektów „ciepłych” położonych w oddaleniu, za osłonami stałymi lub znajdujących się w środowisku zamglonym albo zadymionym. W rozumieniu niniejszego opracowania obiektem jest zarówno przedmiot o jednoznacznie zdefiniowanych kształtach i rozmiarach, jak i obszar o określonych cechach, znajdujący się na przykład w organizmie żywym. Obszarem tym może być organ wewnętrzny człowieka lub fragment organu objęty stanem patologicznym.

## 2. Struktura i zasada pracy radiometru mikrofalowego

Jednym z urządzeń służących do pomiaru w pasmie mikrofalowym promieniowania cieplnego jest miernik mocy szumów. Mierzy on całkowitą moc szumów odebranych przez antenę oraz pochodzących od samego odbiornika [1]. Małe zmiany temperatury odpowiadają bardzo małym zmianom strumienia mocy. W paśmie 1 Hz i w jednostkowym kącie bryłowym zmiana temperatury ciała doskonale czarnego o 0,1 K wywołuje zmianę mocy około  $10^{-22}$  W. Z tego względu radiometr powinien charakteryzować się szerokim pasmem przenoszenia toru mikrofalowego i dużym wzmocnieniem. Wymaganą czułość uzyskuje się przez

umieszczenie za detektorem mikrofalowym układu całkującego o dużej stałej czasowej [1, 3].

Prezentowane badania prowadzono przy użyciu radiometru modulacyjnego, którego schemat blokowy przedstawiono na rysunku 1.



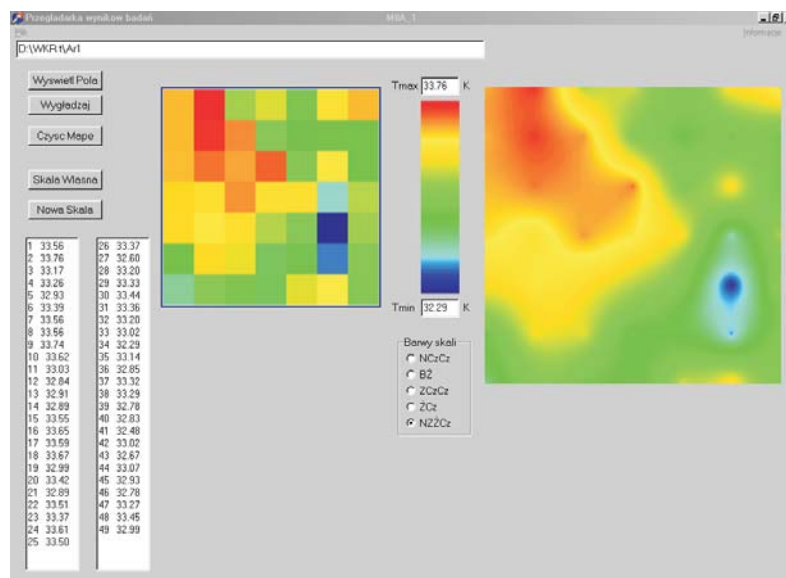
Rys. 1. Uproszczony schemat blokowy mikrofalowego radiometru modulacyjnego

Do odbiornika podłączany jest naprzemiennie sygnał pochodzący z anteny odbiorczej lub z wewnętrznego generatora szumów. Podłączanie odbywa się za pomocą przełącznika mikrofalowego sterowanego przez generator klucujący. Generator szumów, pełniący rolę stabilnego źródła odniesienia, podłączany jest nie bezpośrednio lecz poprzez odbijające zwarcie włączone do odpowiednich wrót przełącznika. Sygnały z obu torów są w odbiorniku wzmacniane i poddawane detekcji amplitudowej. W detektorze synchronicznym następuje odejmowanie napięć wyjściowych detektora, pochodzących od anteny i od źródła odniesienia. Napięcie z detektora synchronicznego zostaje poddane operacji całkowania w filtrze dolnoprzepustowym. Generator szumów jest sterowany sygnałem błędem otrzymywanym z wyjścia filtra dolnoprzepustowego FDP. Zastosowanie w stopniu wejściowym przełącznika i cyrkulatora ferrytowego pozwala zredukować wpływ niedopasowania anteny do obserwowanego środowiska [5, 6]. Zbudowanie i wykorzystanie w badaniach radiometru modulacyjnego było podyktowane tym, że charakteryzuje się on znacznym ograniczeniem wpływu zmian wzmocnienia na wyniki pomiarów. Radiometr wyposażony jest w układ mikroprocesorowy pozwalający na autonomiczną pracę urządzenia oraz na sprzężenie z komputerem zewnętrznym zapewniającym gromadzenie wyników pomiarów, ich przetwarzanie i zobrazowanie w postaci graficznej.

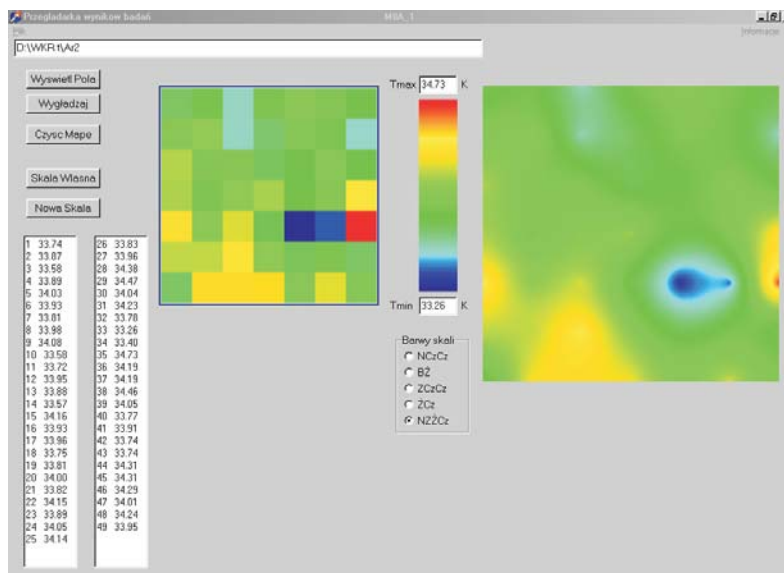
### 3. Radiometr mikrofalowy w zastosowaniach medycznych

Stany patologiczne w organizmach żywych objawiają się między innymi zmianami temperatury fizycznej całego organizmu lub niektórych jego obszarów. Zjawisko to leży u podstaw badań mających na celu wykorzystanie radiometrii mikrofalowej do wspomagania szybkich bezinwazyjnych metod wczesnego wykrywania różnych schorzeń organów wewnętrznych człowieka [8, 9]. Radiometry zbudowane przez jeden z zespołów funkcjonujących w Zakładzie Mikrofal Instytutu Radioelektroniki WEL WAT wykorzystywane były z wynikiem pozytywnym w badaniach przeprowadzonych w Centralnym Szpitalu Klinicznym Wojskowej Akademii Medycznej w Warszawie oraz w Zakładzie Profilaktyki Chorób Nowotworowych Narządu Rodnego Instytutu Matki i Dziecka w Państwowym Szpitalu Klinicznym w Białymstoku [2, 4]. Przy pomocy opracowanego radiometru mikrofalowego przeprowadzono również próby bezinwazyjnej lokalizacji ognisk zapalnych towarzyszących niektórym schorzeniom układu krwionośnego człowieka. W badaniach tych wykorzystano antenę dopasowaną impedancyjnie do ciała pacjenta.

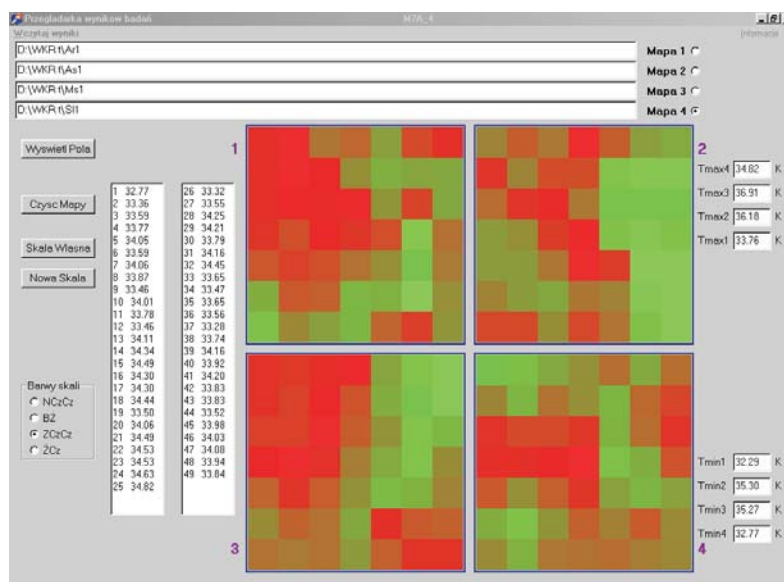
Wyniki badań poziomu promieniowania na obszarze klatki piersiowej przedstawiono na rysunkach 2-4. Zarejestrowane dane przedstawiane są w postaci tabelarycznej, w postaci mapy dyskretnej o wymiarach  $7 \times 7$  pól oraz w postaci mapy wyglądownej uzyskanej w następstwie filtracji obrazu. W pierwszym przypadku, zilustrowanym na rysunku 2, różnica mocy promieniowania na badanym



Rys. 2. Rozkład promieniowania mikrofalowego na obszarze klatki piersiowej człowieka (mężczyzna AR1)



Rys. 3. Rozkład promieniowania mikrofalowego na obszarze klatki piersiowej człowieka (powtórzenie badania mężczyzny AR1 po upływie jednej godziny)



Rys. 4. Zestawienie wyników badań rozkładów promieniowania na obszarze klatki piersiowej czterech osób

obszarze, przeliczona na temperaturę, wynosiła około 1,5 K. Miejsca o wyższym poziomie promieniowania położone były w górnej części klatki piersiowej. Stwierdzono, iż wartość i rozkład promieniowania nie są cechą stałą. Wskazują na to wyniki badania przeprowadzone u tej samej osoby po upływie około jednej godziny. W czasie pomiędzy pomiarami osoba badana spacerowała i wychodziła z pomieszczenia. Wywoływało to z pewnością przemieszczanie się narządów wewnętrznych oraz intensyfikację innych zjawisk fizjologicznych.

Oprogramowanie opracowane na potrzeby prowadzonych badań umożliwia bezpośrednie porównywanie wyników kilku serii pomiarowych. Na rysunku 4 zestawiono mapy promieniowania obszarów klatek piersiowych czterech mężczyzn. Ekstremalne wartości mocy promieniowania (lokalnych temperatur) są różne, ale jednocześnie daje się zauważyć, iż miejsca o wyższym poziomie promieniowania mieszczą się w lewej części pola pomiarowego. Należy podkreślić, że pomierzone promieniowanie mikrofalowe pochodziło zarówno z powierzchni skóry, jak również było emitowane przez organy znajdujące się wewnątrz klatki piersiowej.

Zarejestrowane mapy były gromadzone i analizowane w porozumieniu z zespołem medycznym w celu wyodrębnienia dystynktywnych cech zjawisk fizjologicznych i stanów patologicznych.

#### **4. Wykorzystanie radiometru mikrofalowego do zdalnej lokalizacji ludzi i przedmiotów**

Odpowiednio czułe radiometry mikrofalowe mogą również odgrywać nieocenioną rolę w zastosowaniach niemedycznych. Należy do nich na przykład lokalizacja ukrytych urządzeń niebezpiecznych, zamaskowanego pod względem optycznym sprzętu lub detekcja momentu pojawienia się organizmów żywych (ludzie, zwierzęta) w obszarach zasłoniętych dla promieniowania widzialnego i podczerwonego. Eksperymenty mające na celu weryfikację hipotez dotyczących tych zagadnień przeprowadzono z wykorzystaniem radiometru i klatki Faraday'a. W tej konfiguracji radiometr współpracował z anteną dwugrzbietową dopasowaną do wolnej przestrzeni. Radiometr [10], klatka ekranująca i antena [7] zostały opracowane w Zakładzie Mikrofal IRE WEL WAT.

W pierwszym etapie badań zarejestrowano wyniki pomiaru mocy sygnału odbieranego z wnętrza pustej klatki Faraday'a. W tych warunkach wskazania radiometru zdeterminowane były przede wszystkim szumami własnymi przyrządu i całego stanowiska pomiarowego. Po wejściu do wnętrza klatki Faraday'a człowieka o masie około 74 kg i zbliżeniu do anteny na odległość około 1,2 m poziom wskazań zwiększył się od -145 mV do około 367 mV. W tym przypadku człowiek był ubrany w koszulę i gruby sweter. W trakcie badań wykazano, że charakterystyka promieniowania człowieka nie jest izotropowa. W przypadku

gdy obserwowana osoba była zwrócona bokiem do anteny odbiorczej, poziom wskazań spadł do około 287 mV. Jest to z pewnością skutek zmniejszonej powierzchni emitującej promieniowanie mikrofalowe. Po zdjęciu swetra i koszuli poziom promieniowania zwiększył się minimalnie. Wskazuje to, że ubranie stanowi izolację termiczną, utrudniająca na przykład obserwację ludzi przy pomocy urządzeń termowizyjnych, natomiast pozostaje niemal bez wpływu na propagację promieniowania elektromagnetycznego.

Wykrywanie obiektów może być oparte na pomiarze mocy emitowanego promieniowania mikrofalowego (tak jak powyżej zaprezentowano) lub na ocenie spadku poziomu promieniowania innego obiektu, bądź ogólnie tła, powstającego w następstwie przesłonięcia przez dodatkowy przedmiot. Jak wiadomo, poziom promieniowania w danym pasmie częstotliwości zależy nie tylko od temperatury fizycznej ciała, ale również od tego, czy ciało to jest w stanie pochłoniąć sygnał mikrofalowy mieszczący się w tym samym pasmie częstotliwości. Przykładem są przedmioty metalowe, które wykonane są z materiału przewodzącego i odznaczają się dużą zdolnością odbijania sygnału mikrofalowego, natomiast nie pochłaniają go i dlatego emitują jego śladowe poziomy pomimo znacznego nawet podgrzania. Efekt ten zbadano poprzez porównanie poziomu promieniowania człowieka samego oraz tej samej osoby po umieszczeniu przedmiotu metalowego na wysokości jej mostka.

W przypadku przesłonięcia człowieka pakietem układu drukowanego o wymiarach 10×15 cm poziom promieniowania spadł o 14 mV. Podobnie, po przesłonięciu okolic piersi człowieka folią metalową o wymiarach 25×25 cm umieszczoną pod ubraniem, poziom wskazań radiometru zmniejszył się o 19 mV. Szczegółowe wyniki badań przedstawiono w tabeli 1.

Każdy człowiek charakteryzuje się innym poziomem promieniowania w paśmie mikrofalowym. Poziom tego promieniowania jest zdeterminowany stanem zdrowotnym i emocjonalnym człowieka. Z jednej strony można więc za pomocą radiometru określać stan badanego człowieka, a ponadto można metodą bezinwazyjną, czyli posiadającą cechy daleko posuniętej dyskrecji, poszukiwać na powierzchni ubrania obszarów „chłodniejszych”, które wskazywałyby, że osoba badana posiada ukryte elementy metalowe, które mogą być w niektórych warunkach niedozwolone lub wręcz niebezpieczne.

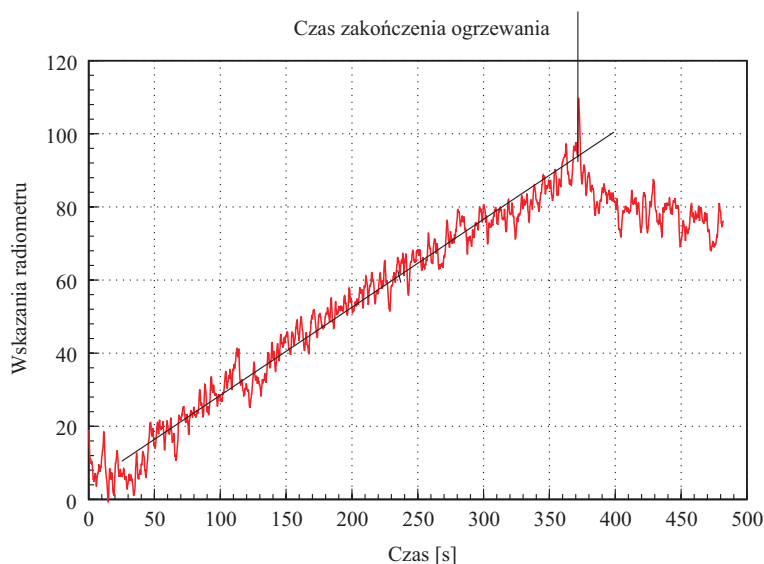
Hipotezę o możliwości zdalnego wykrywania przedmiotów zweryfikowano w trakcie badań „widzialności” zbiornika z wodą o zmienianej temperaturze. Zbiornik miał kształt walca o pojemności około 1 litra. Obserwowany obiekt znajdował się w odległości 2,5 m od anteny radiometru. Na rysunku 5 przedstawiono zarejestrowane wyniki pomiarów. W trakcie badań woda była podgrzewana od temperatury pokojowej (293 K) do około 373 K. Po czasie około 375 sekund nastąpiło wyłączenie podgrzewania. Moment ten został zarejestrowany jako wzrost wskazań powyżej 120 działek. Czas trwania tej zmiany jest bardzo krótki, a zbo-



TABELA 1

Zestawienie wyników pomiarów

Lp.	Warunki pomiaru	Poziom wskazań [mV]
1	Wnętrze pustej klatki ekranującej.	-145
2	Człowiek w ubraniu wewnątrz klatki, zwrócony przodem do anteny radiometru (odległość od anteny około 1,2 m).	367
3	Człowiek w ubraniu wewnątrz klatki, zwrócony prawym bokiem do anteny radiometru (odległość od anteny około 1,2 m).	287
4	Człowiek w ubraniu wewnątrz klatki, zwrócony tyłem do anteny radiometru (odległość od anteny około 1,2 m).	358
5	Człowiek w ubraniu wewnątrz klatki, zwrócony lewym bokiem do anteny radiometru (odległość od anteny około 1,2 m).	313
6	Człowiek bez górnej części ubrania wewnątrz klatki, zwrócony przodem do anteny radiometru (odległość od anteny około 1,2 m).	382
7	Człowiek bez górnej części ubrania wewnątrz klatki, zwrócony przodem do anteny radiometru, z zamocowanym na piersiach pakietem drukowanym w osłonie metalowej (odległość od anteny około 1,2 m).	368
8	Człowiek w ubraniu wewnątrz klatki, zwrócony przodem do anteny radiometru (odległość od anteny około 1,2 m). Wzrost wskazań poziomu promieniowania w stosunku do wyniku uzyskanego w punkcie 2 był wywołany między innymi wysiłkiem i emocjami doznawanymi przez testowaną osobę w trakcie badań.	388
9	Człowiek w ubraniu wewnątrz klatki, zwrócony przodem do anteny radiometru, pod swetrem na piersiach umieszczona cienka folia metalowa o wymiarach 25×25 cm (odległość od anteny około 1,2 m).	369



Rys. 5. Wyniki pomiaru poziomu promieniowania mikrofalowego emitowanego przez podgrzewaną wodę



cze narastające i opadające jest bardzo strome. Z całą pewnością w istniejących warunkach pomiarowych nie było możliwości tak szybkiego podgrzania, a następnie schłodzenia tak dużej masy wody. Należy więc sądzić, że promieniowanie odebrane w tym momencie nie miało podłoża wyłącznie termicznego. W następstwie dalszych analiz stwierdzono, iż ten impuls jest obrazem łuku elektrycznego powstającego w elemencie wyłączającym podgrzewanie wody.

## **5. Podsumowanie**

Przeprowadzone eksperymenty potwierdziły w praktyce możliwość wykrycia organizmów żywych i przedmiotów posiadających temperaturę inną aniżeli najbliższe otoczenie. Uzyskane wyniki badań wskazują na realną możliwość zastosowania radiometrii zakresu mikrofalowego do diagnostyki schorzeń, którym towarzyszą lokalne zmiany temperatury. Potwierdzono empirycznie przydatność radiometru mikrofalowego w szeroko rozumianej lokacji obiektów, których detekcja przy pomocy urządzeń pracujących w zakresie promieniowania widzialnego lub podczerwonego jest bardzo utrudniona lub wręcz niemożliwa. Wykazano, że za pomocą opracowanego radiometru można, w obszarze o znanych parametrach emisyjnych, wykrywać obecność ludzi, szacować ich liczbę oraz zachowanie.

W warunkach wysokiego poziomu promieniowania tła, wykrycie obiektów o słabym promieniowaniu będzie bardzo utrudnione. W tych przypadkach będzie można wykorzystywać techniki właściwe dla tak zwanych radarów biernych, oparte na analizie zjawisk przesłaniania lub odbicia sygnałów mikrofalowych występujących w sposób „naturalny” w danym środowisku. Działanie takich urządzeń polegałoby na ciągłym monitoringu przestrzeni elektromagnetycznej. W momencie wystąpienia zaburzeń byłby wyznaczany czas ich trwania i widmo oraz ewentualnie inne parametry. Wartości tych parametrów pozwalałyby odróżnić chwilowe zakłócenie od faktu pojawienia się „obcego” obiektu w obserwowanym obszarze.

Należy podkreślić, że opisane powyżej badania wskazują niezbicie, iż organizmy żywe emitują promieniowanie elektromagnetyczne, ale jednocześnie nie rozstrzygają, jakie jest podłoże tego promieniowania. Nie określono jednoznacznie, czy jest ono wywołane wyłącznie fizyczną temperaturą ciała, czy również zjawiskami biochemicznymi zachodzącymi w organizmach ludzi i zwierząt. Problemy te są jednymi z wątków badań prowadzonych w Zakładzie Mikrofal IRE WEL WAT.

W chwili obecnej w Zakładzie Mikrofal prowadzone są również prace badawcze nad termografami wielokanałowymi pozwalającymi na dokładniejszą analizę widma emisji badanych organizmów i ośrodków. Dodatkowymi wątkami tych prac będą badania poziomu oraz struktury czasowej i widmowej promienio-

wania emitowanego przez zwierzęta oraz rośliny. W oparciu o zaprezentowane powyżej wyniki dotychczasowych badań należy przypuszczać, że parametry promieniowania mikrofalowego zwierząt i roślin mają charakter osobniczy oraz są zdeterminowane między innymi ich wiekiem, porą doby i roku, czynnikami pogodowymi i klimatycznymi.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.10.2005 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w grudniu 2005 r.

#### LITERATURA

- [1] M. E. TIURI, *Radio astronomy receivers*, IEEE Transactions On Antennas And Propagation 12, 1964, pp. 930-938.
- [2] P. KNAPP, A. MAZUREK, M. J. PUCIŁOWSKA, W. KAZANOWSKA, B. STEC, *Wykorzystanie termografii mikrofalowej do oceny zmian w sutku kobiecym*, Onkologia Polska, XXV Jubileuszowy Zjazd Polskiego Towarzystwa Ginekologicznego, 1994.
- [3] F. WAIT, *The Sensitivity of the Dicke Radiometer*, Journal of Research of the National Bureau of Standards — C. Engineering and Instrumentation, vol. 71C, No. 2, April-June 1967.
- [4] B. STEC, *Termografia mikrofalowa w biologii i medycynie*, Aparatura Naukowo-Dydaktyczna 4, 1990, str. 24-31.
- [5] B. STEC, M. ŻURAWSKI, *Compensated microwave thermometer for medical applications*, Asia Pacific Microwave Conference, 17(2), Tokyo 1994, pp. 405-408.
- [6] B. STEC, W. SUSEK, *A 4.4 GHz microwave thermometer with compensation of reflection coefficient*, 13th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON'2000), Wrocław 2000, pp. 453-456.
- [7] B. STEC, A. RUTKOWSKI, *Szerokopasmowa mikrofalowa tuba grzbietowa*, Biul. WAT, nr 7, 1989.
- [8] B. STEC, A. DOBROWOLSKI, W. SUSEK, *Multifrequency microwave thermograph for biomedical applications*, IEEE Transactions On Biomedical Engineering, Vol. 51, No. 3, New York 2004, pp. 548-550.
- [9] B. STEC, A. DOBROWOLSKI, W. SUSEK, *Estimation of deep-sealed profile of temperature distribution inside biological tissues by means of multifrequency microwave thermograph*, IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS 2002), Seattle 2002, pp. 2261-2264.
- [10] W. SUSEK, *Analiza i badania radiometru mikrofalowego z kompensacją wpływu współczynnika odbicia jako miernika temperatury bezwzględnej*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 2005.

B. STEC, W. SUSEK, A. K. RUTKOWSKI

#### **Measurements of human body and objects radiation by means of microwave radiometer**

**Abstract.** Microwave thermal radiation of various objects can be used for their location and identification. Thermovision in the infrared range enables us to find temperature distribution on the object surface while microwave radiometers allow us to recognize "hot" objects placed, for instance, behind thermal shields. Microwave radiometers are used, among the others, in health

care and in so-called special applications. In medicine, they are used both in diagnostics and therapy where, for example, microwave radiometers control temperature in hypo- or hyperthermia or they can monitor pathological states of internal organs, detect pap tumour, or are used for temperature measurements of acupunctural points. Special applications of microwave radiometers focus on passive location of various equipment like tanks, planes, cars, trucks and so on. A separate group of applications deals with detection of humans or “hot” objects located behind shields. Performed experiments confirmed capability of developed radiometer to remote detection of live objects and subjects with temperatures different from the background. The tested instrument was equally effective in observation of non-shielded objects as well as for objects hidden behind dielectric shield. The principle of operation of the 1.5 GHz microwave radiometer and selected results of the experiments there were presented.

**Keywords:** radiometry, microwave radiometer, microwave thermograph, detection of radiation

**Universal Decimal Classification:** 621.396.96