

Daniel Józef Bem
Politechnika Wrocławska
Instytut Telekomunikacji i Akustyki

UKŁAD ANTENOWY W RADIOWYM CENTRUM NADAWCZYM SOLEC KUJAWSKI (POLSKIE RADIO S.A.)

Radiofoniczne stacje długofalowe cieszą się nadal dużym zainteresowaniem mimo ogromnego rozwoju sieci nadajników UKF-FM. Wynika to z faktu, że jedna radiostacja jest w stanie objąć swym zasięgiem obszar kraju średniej wielkości, np. Polski. W referacie przypomniano kryteria, którymi kierowano się podczas wyboru lokalizacji i parametrów anteny w Radiowym Centrum Nadawczym Konstantynów. Zwrócono uwagę na nieoptymalne położenie nowej radiostacji długofalowej Polskiego Radia S.A. i wynikające stąd konsekwencje. Przedstawiono proces optymalizacji właściwości kierunkowych układu antenowego oraz podano wstępne wyniki pomiaru zasięgu radiostacji.

1. Wprowadzenie

Radiofoniczne stacje długofalowe cieszą się nadal dużym zainteresowaniem mimo ogromnego rozwoju sieci nadajników UKF-FM. Wynika to z faktu, że jedna radiostacja jest w stanie objąć swym zasięgiem obszar kraju średniej wielkości, np. Polski. W Polsce dodatkowo zainteresowanie falami długimi jest spowodowane emitowaniem na tych falach - cieszącego się dużym uznaniem - I Programu Polskiego Radia. Jest więc zrozumiałe, że w Polsce powinna być centralna radiostacja długofalowa, obejmująca swym zasięgiem cały kraj. W latach 1974 - 1991 rolę takiej radiostacji pełniło Radiowe Centrum Nadawcze Konstantynów, zlokalizowane w okolicy Gąbina i wyposażone w najwyższy na świecie maszt antenowy [1,2]. Po katastrofie "gąbińskiego kolosa" emisję I Programu Polskiego Radia przejęła radiostacja w Raszynie, która jednak nie była w stanie objąć swym zasięgiem całego kraju. Powstał więc problem odbudowy masztu w Konstantynowie lub budowy nowej radiostacji w innej lokalizacji. Po licznych sporach, burzliwych dyskusjach i niezbyt konsekwentnych działaniach powstało wreszcie nowe Radiowe Centrum Nadawcze Solec Kujawski, uroczyste otwarte 4 września 1999 roku.

2. Propagacja fal długich

Fale elektromagnetyczne radiofonicznego zakresu długofalowego (częstotliwości 148,5 - 283,5 kHz) rozchodzą się pod postacią fal powierzchniowych i fal jonosferycznych [3]. Fala powierzchniowa jest promieniowana przez antenę umieszczoną tuż przy powierzchni Ziemi i rozchodzi się wzdłuż tej powierzchni. Warunki propagacji fali powierzchniowej zależą tylko od parametrów elektrycznych powierzchniowych warstw Ziemi, jej krzywizny i pokrycia terenowego, są więc prawie niezmiennie w czasie. Zasięg radiostacji długofalowej określony przez warunki propagacji fali powierzchniowej uważa się za zasięg podstawowy. Jest on niezależny od pory doby i pory roku.

W niewielkiej odległości od anteny (poniżej 10 km) natężenie pola elektrycznego fali powierzchniowej jest odwrotnie proporcjonalne do odległości (powierzchnię Ziemi można wówczas traktować jako doskonały przewodnik). W miarę zwiększania odległości obserwuje się wpływ skończonej konduktywności gruntu, a przy bardzo dużych odległościach - również wpływ krzywizny powierzchni Ziemi. Do inżynierskich obliczeń rozkładów natężenia pola fali

powierzchniowej stosuje się tzw. krzywe propagacji CCIR [3,4]. Określają one natężenie pola elektrycznego w funkcji odległości i częstotliwości nad powierzchnią jednorodnej Ziemi bez przeszkód terenowych. Do obliczeń rozkładu natężenia pola fali powierzchniowej wzdłuż trasy złożonej z pewnej liczby odcinków jednorodnych o różnych konduktywnościach gruntu stosuje się metodę Millingtona [4]. Podstawowy zasięg radiostacji długofalowej o mocy 1 MW wyposażonej w antenę ćwierćfalową wynosi od 300 do 400 km, w zależności od konduktywności gruntu.

Fala jonosferyczna powstaje wskutek refrakcji fal elektromagnetycznych w jonosferze, zjonizowanej części atmosfery zalegającej na wysokościach powyżej 60 km nad powierzchnią Ziemi. Podstawowym źródłem jonizacji atmosfery jest Słońce, innymi czynnikami jonizującymi są: promieniowanie gwiazd, promieniowanie kosmiczne, pył kosmiczny i meteory. Wskutek różnej intensywności czynników jonizujących oraz różnicy ciśnienia atmosferycznego na różnych wysokościach, rozkład gęstości elektronowej jonosfery jest nierównomierny. W ciągu dnia wyróżnia się cztery obszary, tradycyjnie zwane warstwami, są to: warstwa D rozciągająca się na wysokościach od 60 do 90 km, warstwa E - na wysokościach od 100 do 120 km, warstwa F_1 - na wysokościach od 180 do 240 km (występuje tylko w porze letniej), warstwa F_2 - na wysokościach od 230 do 400 km. W nocy warstwa D znika, a warstwy F_1 i F_2 zlewają się, tworząc warstwę F.

Fale długie ulegają refrakcji w warstwie D (w dzień) i w warstwie E (w nocy). Warunki jonizacji ulegają ciągłym zmianom, powodując ustawiczne fluktuacje gęstości elektronowej jonosfery, co prowadzi do zmienności warunków propagacji fali jonosferycznej. W określonym punkcie obserwacji i przy ustalonych parametrach radiostacji (moc nadajnika, częstotliwość, zysk energetyczny i charakterystyka promieniowania anteny) natężenie pola fali jonosferycznej jest funkcją: pory doby, pory roku i aktywności słonecznej. Natężenie pola fali jonosferycznej może więc być opisane tylko w sposób statystyczny, na przykład przez podanie mediany, czyli wartości przekraczanej w ciągu 50% czasu i wartości quasimaksymalnej, czyli wartości przekraczanej w ciągu 95% czasu. Jakość odbioru sygnałów radiofonicznych na fali jonosferycznej jest na ogół mierna. Niemniej jednak w pewnych przypadkach jonosferyczny zasięg radiostacji długofalowej może mieć duże znaczenie.

Sygnały jonosferyczne należy jednak traktować przede wszystkim jako sygnały zakłócające. Powodują one zakłócenia w pracy innych współ- i sąsiedniokanałowych radiostacji, a także ograniczają zasięg podstawowy radiostacji. W dostatecznie dużej odległości od radiostacji natężenie pola fali powierzchniowej maleje w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości (mierzonej wzdłuż powierzchni Ziemi); natężenie pola fali jonosferycznej natomiast - odwrotnie proporcjonalnie do długości trajektorii fali. Występuje więc obszar, w którym natężenia pola obu fal: powierzchniowej i jonosferycznej, są porównywalne. Fale te interferują ze sobą, a wskutek dużej zmienności warunków propagacji fali jonosferycznej wynik interferencji jest różnorodny: od interferencji pozytywnej do interferencji destruktywnej. W tym obszarze obserwuje się więc duże fluktuacje wypadkowego natężenia pola, znacznie pogarszające lub wręcz uniemożliwiające poprawny odbiór nadawanych sygnałów. Własna fala jonosferyczna powoduje więc ograniczenie zasięgu podstawowego radiostacji długofalowej. Głębokie zaniki sięgające 30 dB występują tylko w porze nocnej i trwają przez kilka dziesiątych procentu czasu obserwacji. Na terenie Polski strefa zaników interferencyjnych rozpoczyna się w odległości około 300 km od radiostacji i rozciąga się do około 460 km; najgłębsze i najdłużej trwające zaniki obserwuje się w odległości około 380 km [5].

3. Optymalna lokalizacja radiostacji długofalowej

W przypadku Polski, której granice są zbliżone do okręgu, optymalną lokalizacją dla radiostacji długofalowej jest geometryczny środek Polski. Po uwzględnienie zagadnień logistycznych Radiowe Centrum Nadawcze (RCN) zlokalizowano w latach siedemdziesiątych w Konstancynie koło Gębina [1,2]. RCN wyposażono w nadajnik o mocy 2 MW i antenę w postaci pojedynczego masztu o wysokości 645,4 m. Wysokość anteny (około połowy długości promieniowanej fali) była podyktowana chęcią przesunięcia strefy zaników spowodowanych interferencją fali

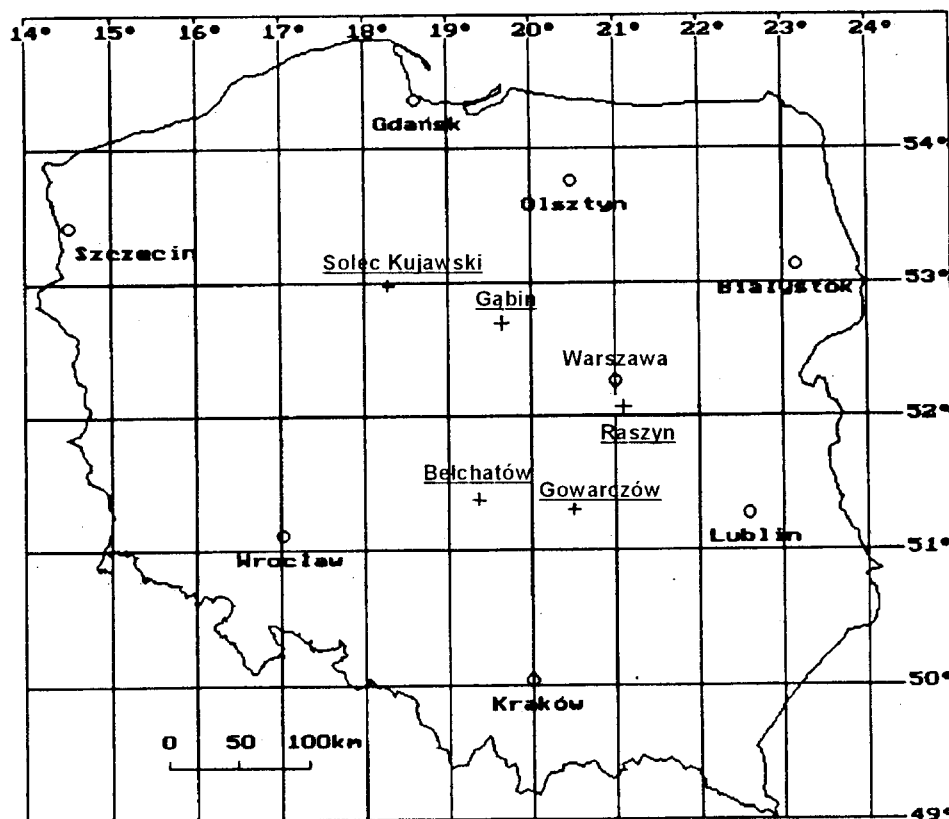
powierzchniowej i fali jonosferycznej poza granice kraju. Z propagacyjnego punktu widzenia było to rozwiązanie pod każdym względem optymalne. RCN uroczyście otwarto 22 lipca 1974 roku. I Program Polskiego Radia był doskonale odbierany w całej Polsce (na fali powierzchniowej) oraz - ze znacznie gorszą jakością - prawie w całej Europie, na Bliskim Wschodzie i w Północnej Afryce (na fali jonosferycznej).

8 sierpnia 1971 roku, wskutek błędu popełnionego podczas konserwacji masztu, runął maszt RCN Konstantynów. Emisję I Programu Polskiego Radia podjęła radiostacja w Raszynie. Ze względu na nieoptymalne położenie i mniejszą moc nie była ona jednak w stanie skutecznie zastąpić Radiowego Centrum Nadawczego Konstantynów.

4. Wybór lokalizacji nowej radiostacji długofalowej

Już w 1992 roku rozpoczęto działania zmierzające do odbudowy anteny w RCN Konstantynów z uwzględnieniem nowych rozwiązań dotyczących izolacji masztu (eliminacja izolatora u podstawy poprzez zasilanie bocznikowe) oraz izolatorów dzielących liny odciągowe na krótkie elektryczne odcinki (liny odciągowe stanowią część struktury promieniującej) [6].

Zdecydowany sprzeciw mieszkańców okolicznych wiosek, którzy założyli nawet *Stowarzyszenie Ochrony Życia Ludzi przy Najwyższym Maszcie Europy*, uniemożliwił odbudowę masztu antenowego w Konstantynowie. W tej sytuacji Polskie Radio S.A. podjęło w 1996 roku decyzję o budowie całkowicie nowego obiektu nadawczego w innej - z konieczności nieoptymalnej - lokalizacji. Biuro Studiów i Projektów Radia i Telewizji zaproponowało do rozważenia trzy nowe lokalizacje radiostacji długofalowej w okolicach: Bełchatowa, Gowarczowa i Solca Kujawskiego (rys. 1).



Rys. 1. Proponowane lokalizacje nowej radiostacji długofalowej

Instytut Telekomunikacji i Akustyki (ITA) Politechniki Wrocławskiej (PWr) dokonał analizy wskazanych lokalizacji z punktu widzenia zasięgu radiostacji i jej oddziaływania na środowisko. W wyniku tej analizy [7] dokonano następujących ustaleń.

- Ze względu na możliwość zakłócania urządzeń telekomunikacyjnych, informatycznych i aparatury automatyki przemysłowej, znajdujących się na terenie Kopalni Węgla Brunatnego Bełchatów i Elektrowni Bełchatów, budowa radiostacji o mocy 1 MW na haldzie bełchatowskiej nie jest wskazana.

- Pozostałe dwie lokalizacje, w okolicach Solca Kujawskiego i Gowarczowa, nie stwarzają zagrożenia dla środowiska.

- Objęcie zasięgiem radiostacji całego kraju wymaga zastosowania w obu lokalizacjach anteny kierunkowej, składającej się z odpowiednio pobudzanych co najmniej dwóch masztów o wysokości około 300 metrów.

Względy logistyczne, a także stanowisko władz lokalnych zdecydowały o wyborze lokalizacji w pobliżu Solca Kujawskiego. Teren pod nową radiostację wybrano na niezabudowanym obszarze byłego poligonu wojskowego *Kabat*, położonego w rejonie leśniczówki Jeziorce, 7 km na południowy-wschód od Solca Kujawskiego (rys. 2).



Rys. 2. Lokalizacja Radiowego Centrum Nadawczego Solec Kujawski (Polskie Radio S.A.); krzyżykiem zaznaczono środek elektryczny układu antenowego; współrzędne geograficzne: 018E1600, 53N0100

5. Jakość odbioru radiowego

Jakość odbioru radiowego jest uwarunkowana stosunkiem mocy sygnału użytecznego do mocy szumu i zakłóceń na wejściu odbiornika. Moc sygnału użytecznego zależy od mocy nadajnika, zysku energetycznego anteny oraz strat na trasie propagacji fali. W zakresie fal długich decydującymi czynnikami zakłócającymi odbiór radiowy są: szum atmosferyczny i zakłócenia przemysłowe. Na obszarach o małej gęstości zaludnienia przeważa szum atmosferyczny o poziomie zależnym od położenia geograficznego, pory doby i pór roku. Metoda obliczania poziomu szumu atmosferycznego jest dobrze znana i opisana m.in. w [4]. Źródłem zakłóceń przemysłowych są – w mniejszym lub większym stopniu – wszystkie urządzenia elektryczne. Jest intuicyjnie wyczuwalne, że zakłócenia te są tym większe, im więcej indywidualnych źródeł zakłóceń występuje jednocześnie, oraz im większa jest zdolność zakłócania każdego z nich. Zakłócenia przemysłowe są więc decydującym czynnikiem określającym jakość odbioru radiowego w dużych aglomeracjach. Nie ma niestety skutecznej metody obliczania poziomu zakłóceń przemysłowych, którego niejednorodność rozkładu może być bardzo duża nawet na niewielkim obszarze. Nie ma więc możliwości obliczeniowego określenia wartości stosunku mocy sygnału użytecznego do mocy zakłóceń na wejściu odbiornika. W tej sytuacji jedynym słusznym postępowaniem jest subiektywna ocena jakości odbioru w funkcji natężenia pola elektrycznego dla przeciętnego odbiornika. Badania takie przeprowadzono w ITA PWr, przy współpracy Państwowej Inspekcji Radiowej (PAR), w pierwszym okresie pracy radiostacji w Konstantynowie. Wyniki tych badań podano w tabeli 1.

Tabela 1

Subiektywna ocena jakości odbioru radiofonicznej stacji długofalowej

Jakość odbioru	Natężenie pola elektrycznego			
	Obszary dużych miast		Obszary niezurbanizowane	
	[mV/m]	[dB(μV/m)]	[mV/m]	[dB(μV/m)]
Bardzo dobra	25	87,96	20	86,02
Dobra	15	83,52	10	80,00
Zadawalająca	10	80,00	5	73,98
Wartość chroniona ^{*)}	7,08	77,00	7,08	77,00

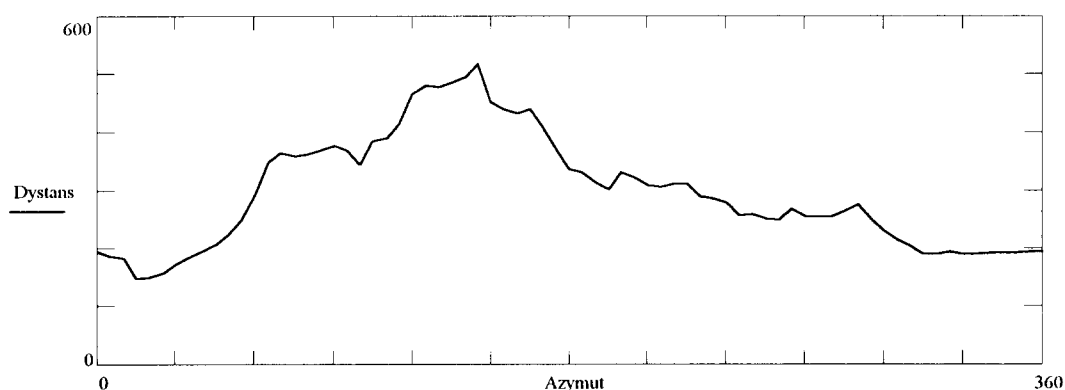
^{*)} ITU-R (dawniej CCIR)

Polskie Radio S.A. przyjmuje, zgodnie z zaleceniami ITU-R (dawniej CCIR), jako wartość chronioną natężenie pola o poziomie 77,00 dB(μV/m), tzn. 7,08 mV/m, co odpowiada w przybliżeniu dobrej jakości odbioru na obszarach niezurbanizowanych.

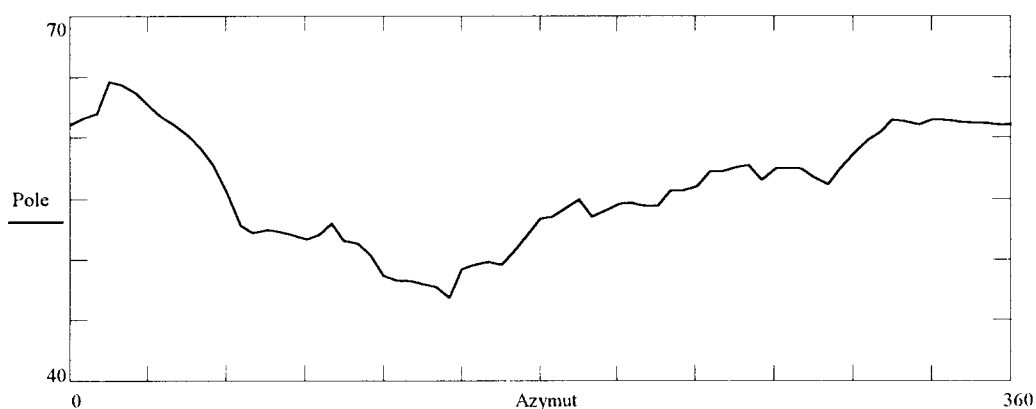
6. Optymalizacja charakterystyki promieniowania układu antenowego

Optymalny układ antenowy [8] powinien zapewniać stałą wartość natężenia pola elektrycznego wzdłuż granicy kraju, nie mniejszą niż wartość chroniona. Ze względu na niesymetryczne położenie, odległość od radiostacji do granicy kraju zmienia się w przedziale od 147 do 518 kilometrów (rys. 3).

Antena dookólna promieniująca moc 1 kW wytworzy na granicy Polski pole o natężeniu przedstawionym na rysunku 4.

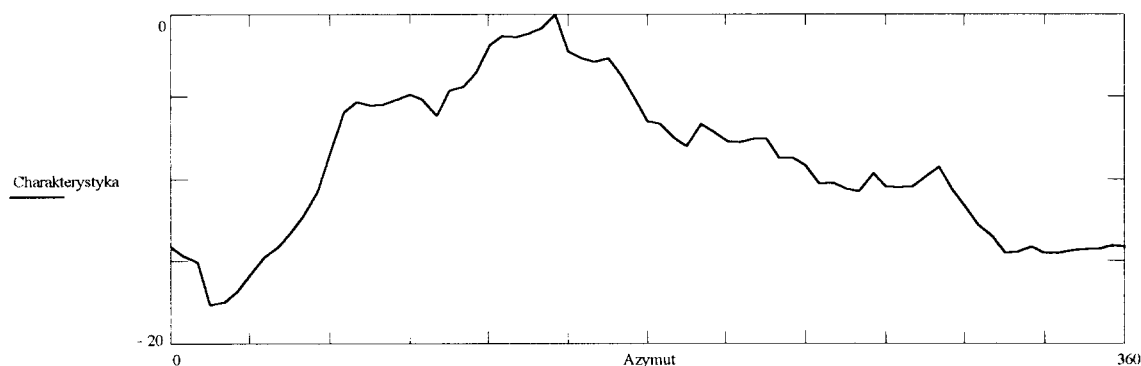


Rys.3. Odległość (w kilometrach) od RCN Solec Kujawski do granicy Polski



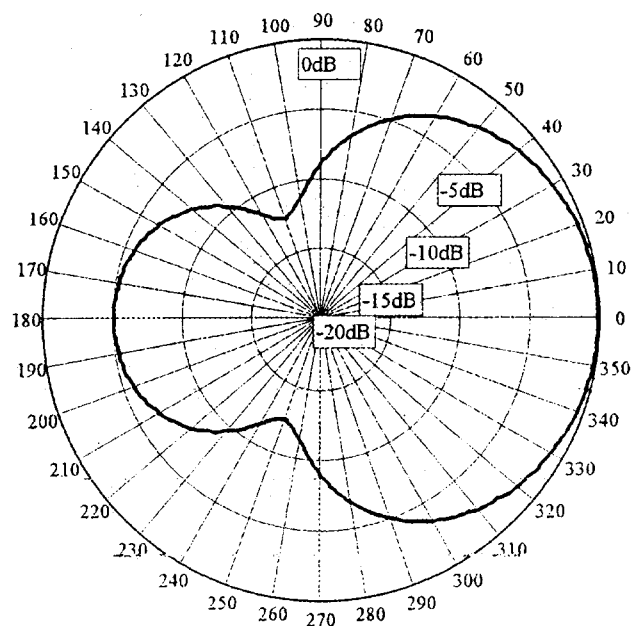
Rys. 4. Natężenie pola elektrycznego [dB(μ V/m)] wytwarzane na granicy Polski przez antenę dookólną promieniującą moc 1 kW

Najmniejsza wartość natężenia pola, około 47 dB(μ V/m), występuje w azymucie 145° . Optymalna charakterystyka promieniowania układu antenowego powinna więc mieć maksimum na azymucie około 145° i kształt będący dopełnieniem (w decybelach) rozkładu natężenia pola wzdłuż granicy (rys. 5).



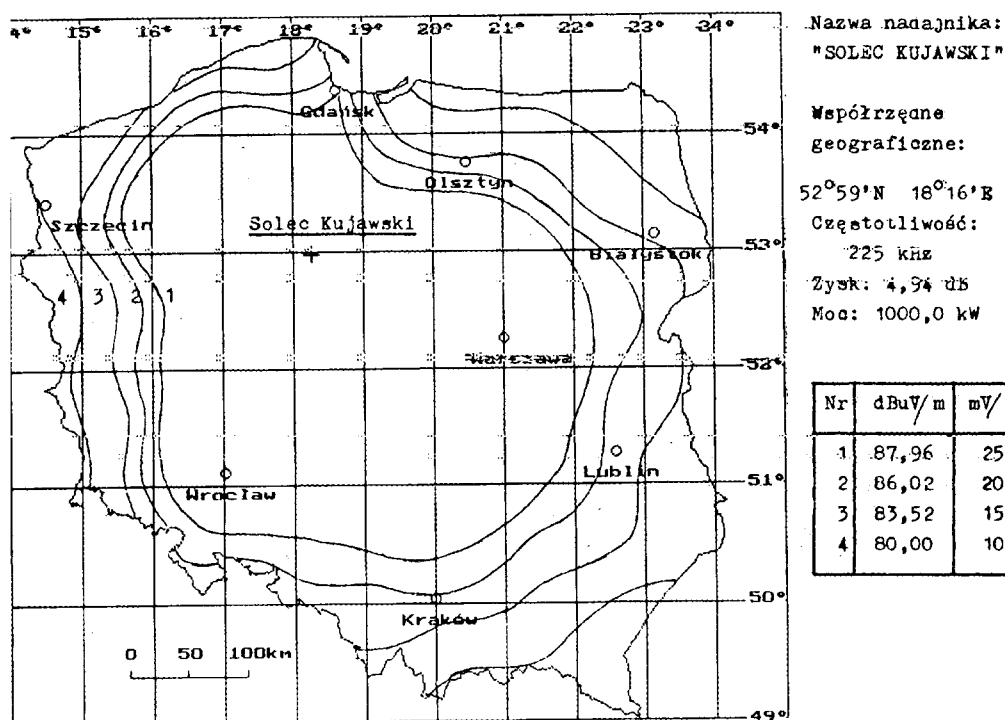
Rys. 5. Charakterystyka promieniowania anteny zapewniająca równomierny rozkład natężenia pola wzdłuż granicy Polski

Praktyczna realizacja charakterystyki promieniowania według rysunku 5 byłaby bardzo kłopotliwa i kosztowna. Uznano, że układ antenowy powinien składać się z dwóch masztów. Można brać pod uwagę układ złożony z masztu aktywnego i masztu biernego (w postaci reflektora lub direktora) oraz układ złożony z dwóch masztów aktywnych. Układ złożony z dwóch masztów aktywnych uznano za najlepszy, zapewnia on bowiem dużą elastyczność kształtowania charakterystyki promieniowania. Optymalną charakterystykę promieniowania dwumasztowego, aktywnego układu antenowego pokazano na rysunku 6 [8].



Rys. 6. Pozioma charakterystyka promieniowania zoptymalizowana z punktu widzenia równomiernego pokrycia kraju; kierunek maksymalnego promieniowania odpowiada azymutowi 140°

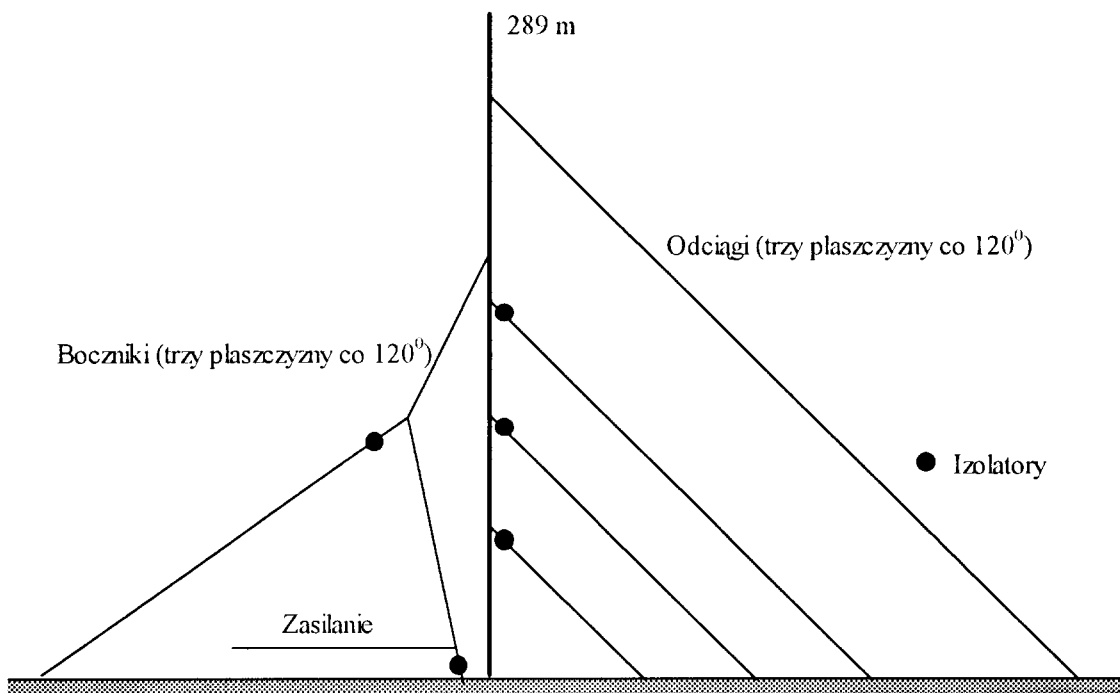
Na rysunku 7 pokazano krzywe równego natężenia pola fali powierzchniowej generowanego przez antenę o charakterystyce promieniowania pokazanej na rysunku 6, do której doprowadzono moc 1 MW [8]. Kierunek maksymalnego promieniowania odpowiada azymutowi 140° . Na obszarze całej Polski natężenie pola elektrycznego przewyższa wartość chronioną $77 \text{ dB}(\mu\text{V/m})$.



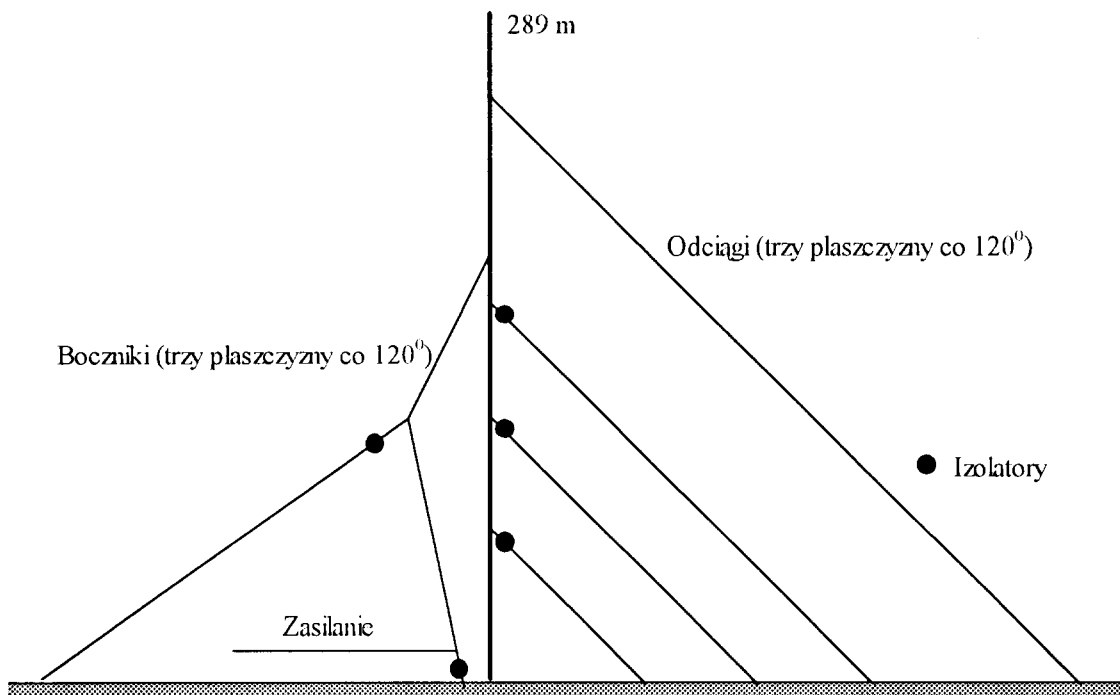
Rys. 7. Krzywe równego natężenia pola fali powierzchniowej generowanego przez antenę o charakterystyce promieniowania pokazanej na rysunku 6, do której doprowadzono moc 1 MW; kierunek maksymalnego promieniowania odpowiada azymutowi 140°

7. Układ antenowy

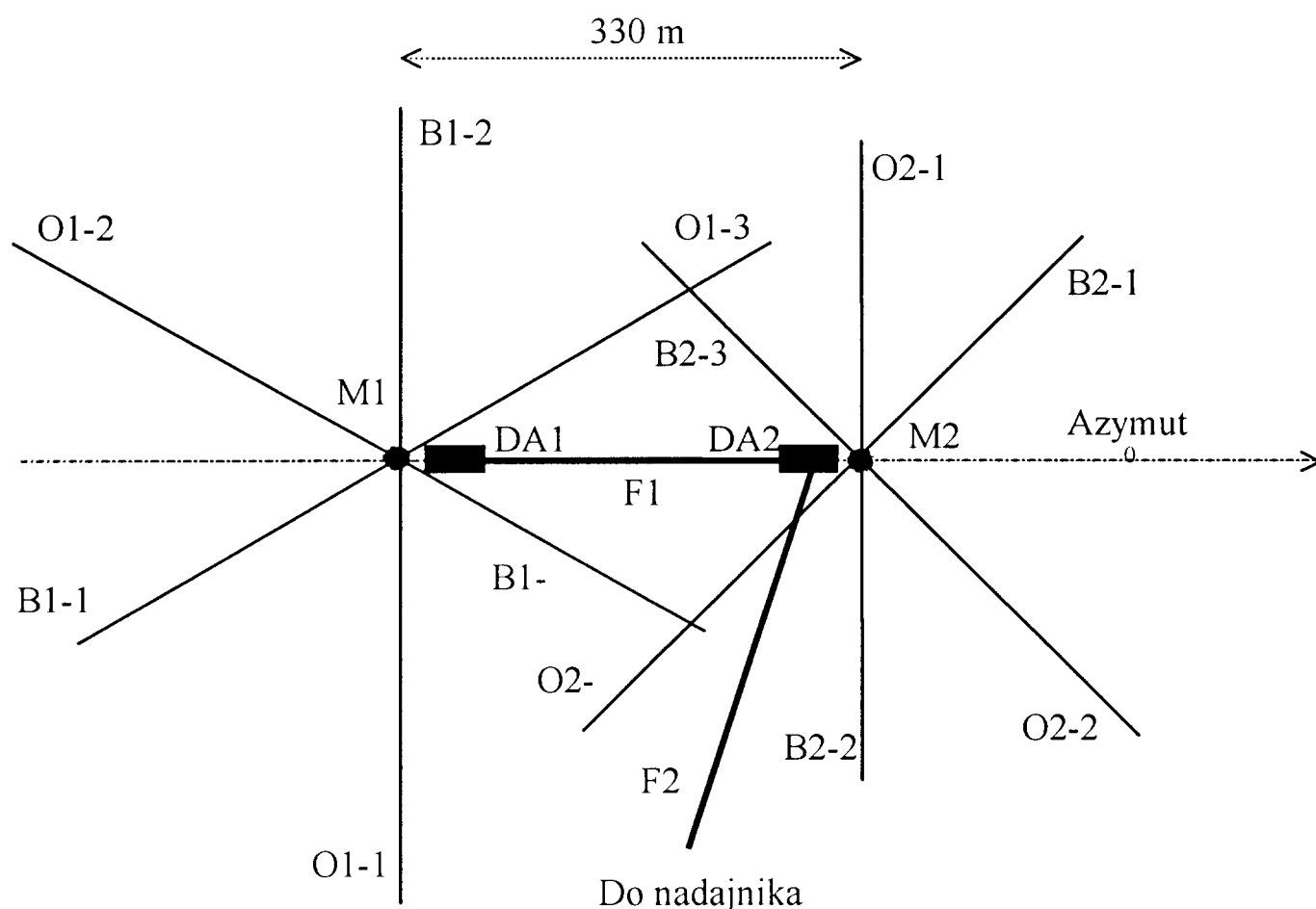
Układ antenowy tworzą dwa uziemione u podstaw maszty: M1 (rys. 8) o wysokości 330 m ($0,248\lambda$) i M2 (rys.9) o wysokości 289 m ($0,217\lambda$). Maszty są rozstawione w odległości 330 m (rys. 10).



Rys. 8. Szkic masztu M1



Rys. 9. Szkic masztu M2



Rys. 10. Rozstawienie masztów: O1-1, O1-2, O1-3 - płaszczyzny odciągów utrzymujących w pionie maszt M1; O2-1, O2-2, O2-3 - płaszczyzny odciągów utrzymujących w pionie maszt M2; B1-1, B1-2, B1-3 - boczniki zasilające maszt M1; B2-1, B2-2, B2-3 - boczniki zasilające maszt M2; DA1, DA2 - domki antenowe zawierające układy dopasowujące maszty M1 i M2; F1, F2 - linie zasilające o impedancji charakterystycznej 120Ω

Maszty są utrzymywane w pionie za pomocą czterech poziomów odciągów. Odciąg najwyższego poziomu są w górnych częściach połączone galwanicznie z masztem i uziemione w dolnych częściach. Odciąg pozostałych poziomów są izolowane od masztu w górnych częściach i uziemione w dolnych. Cała struktura antenowa jest więc uziemiona, dzięki czemu w poszczególnych jej częściach nie indukują się ładunki elektrostatyczne. Warto przypomnieć, że liny odciągowe masztu w Konstantynowie były podzielone izolatorami na elektrycznie krótkie odcinki. Pod wpływem elektryczności atmosferycznej odcinki te ładowały się do wysokich potencjałów, co często powodowało zapalenie się łuku w.c.z., bardzo szkodliwego dla izolatorów. Zgaszenie łuku wymagało znacznego obniżenia mocy nadajnika.

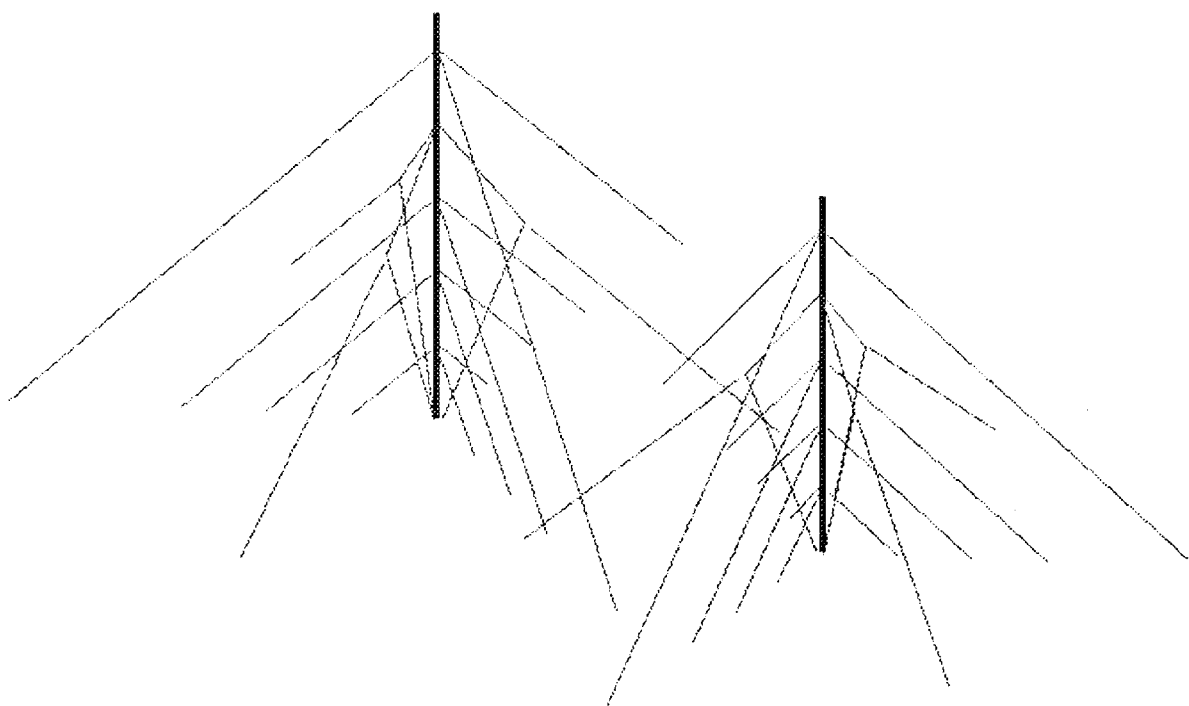
Maszty w Solcu Kujawskim są zasilane bocznikowo. Każdy maszt jest zasilany przez trzy boczniki rozmieszczone symetrycznie co 120° między płaszczyznami odciągów. Energia wielkiej częstotliwości z nadajnika do masztów jest przekazywana za pomocą dwóch odcinków pseudowspółosiowej linii zasilającej o impedancji charakterystycznej 120Ω .

Istotnym elementem układu antenowego jest instalacja uziemiająca. Jej zadaniem jest zmniejszenie strat energii wielkiej częstotliwości w gruncie o skończonej konduktywności, a tym samym zapewnienie dużej sprawności układu antenowego [9]. W omawianym przypadku wykonano odrębne instalacje uziemiające dla każdego z masztów, a ponadto dla każdego z sześciu górnych odciągów. Instalacja uziemiająca każdego z masztów jest utworzona przez 120 zakopanych w ziemi

(na głębokości 30-40 cm) przewodów miedzianych o średnicy 3 mm i długości 300 m, ułożonych promieniście co 3^0 . Instalacje uziemiające górnych odcinków tworzą również zakopane w ziemi przewody miedziane o średnicy 3 mm. Każda instalacja składa się z 18 przewodów o długości 50 m ułożonych promieniście co 20^0 .

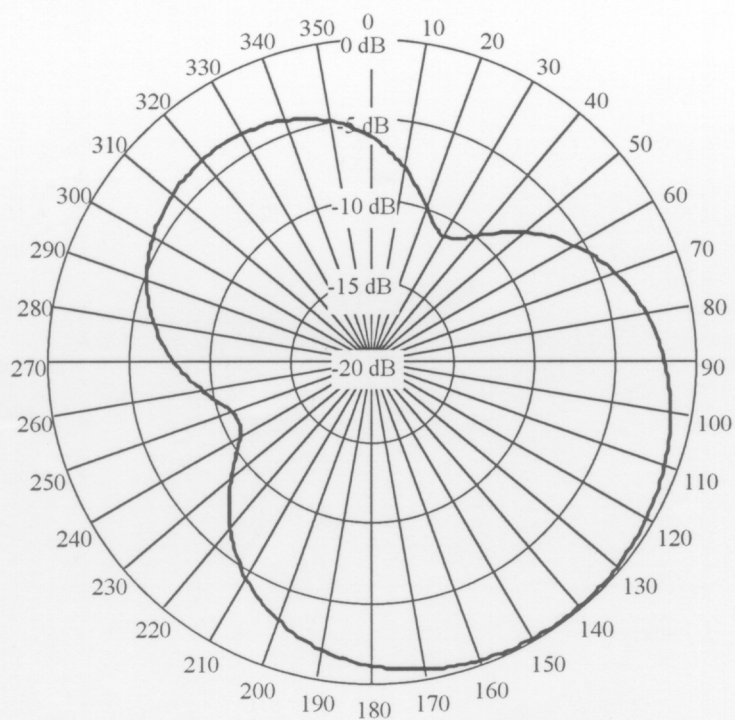
Prądy wielkiej częstotliwości płyną zarówno wzdłuż masztów, jak i wzdłuż lin odciągowych i boczników. Mamy więc do czynienia ze skomplikowaną strukturą promieniującą. W latach 70. kiedy projektowano antenę w RCN Konstantynów nie było narzędzi do teoretycznej analizy tak skomplikowanych struktur promieniujących. Jedyną możliwością było modelowanie fizyczne [2]. Dzisiaj dysponujemy profesjonalnym oprogramowaniem i komputerami dużej mocy umożliwiającymi modelowanie elektromagnetyczne skomplikowanych struktur.

Do analizy układu antenowego w RCN Solec Kujawski z uwzględnieniem odciągów i boczników zastosowano metodę momentów, polegającą na numerycznym rozwiązywaniu równań dwupotencjałowych opisujących rozkład prądów wzdłuż osi przewodów tworzących strukturę promieniującą. Model układu antenowego przyjęty do obliczeń pokazano na rysunku 11.



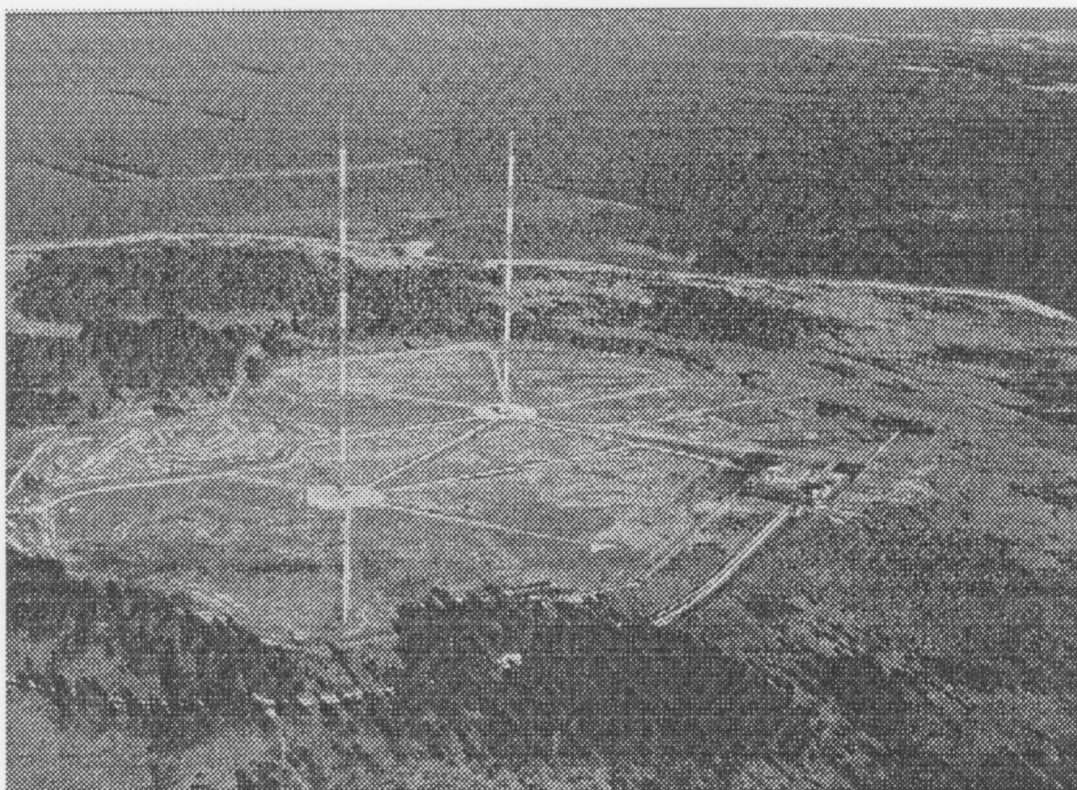
Rys. 11. Model układu antenowego w RCN Solec Kujawski

Obliczenia wykonano przy założeniu, że układ antenowy jest umieszczony nad doskonale przewodzącą płaszczyzną. Jest to w pełni usprawiedliwione założenie w zakresie fal długich, zwłaszcza wobec istnienia instalacji uziemiającej. Znajomość rozkładu prądu wzdłuż wszystkich przewodów modelujących układ antenowy umożliwia obliczenie jego parametrów obwodowych (przebieg impedancji wejściowej każdego z masztów w funkcji częstotliwości) i parametrów polowych (zysk energetyczny i charakterystyki promieniowania w funkcji częstotliwości). Obliczoną, przy częstotliwości 225 kHz, charakterystykę promieniowania w płaszczyźnie poziomej układu antenowego pokazano na rysunku 12. Charakterystyka promieniowania w płaszczyźnie pionowej jest zbliżona do charakterystyki pojedynczej anteny ćwierćfalowej. Zysk energetyczny wynosi 8,5 dBi. Współczynnik fali stojącej na wejściu linii zasilającej w zakresie częstotliwości 225 ± 2 kHz nie przekracza wartości 1,2, a w zakresie częstotliwości $225 \pm 4,5$ kHz – wartości 1,35.



Rys. 12. Obliczona charakterystyka promieniowania w płaszczyźnie poziomej przy częstotliwości 225 kHz

Widok z lotu ptaka wybudowanego układu antenowego przedstawiono na rysunku 13. Wszystkie elementy stalowe są zabezpieczone przed korozją powłoką cynkową nakładaną na gorąco. Liny odciągowe są dodatkowo pokryte woskową farbą ochronną. Masa obu masztów wynosi 304 tony.



Rys. 13. Widok z lotu ptaka układu antenowego w RCN Solec Kujawski

8. Nadajnik

W wyniku postępowania przetargowego ogłoszonego w październiku 1996 roku przez Polskie Radio S.A. wyłoniona została francuska firma THOMCAST (wywodząca się z koncernu Thomson) jako kompleksowy dostawca nadajnika i układu antenowego wraz z linią zasilającą. Nadajnik jest półprzewodnikowym urządzeniem najnowszej generacji typu 7HP-LW składającym się z trzech bloków, każdy o mocy 400 kW, oraz układu sumowania mocy. Każdy z bloków zawiera 256 półprzewodnikowych wzmacniaczy (modułów), zbudowanych na tranzystorach MOSFET w układzie mostkowym. Opatentowany przez firmę THOMCAST system MPM-p3 uzyskiwania modulacji amplitudy, polega na komputerowym sterowaniu kluczowania pracy modułów, tak by po zsumowaniu amplitud sygnałów wyjściowych uzyskać obwiednię amplitudy sygnału wielkiej częstotliwości odpowiadającą amplitudzie sygnału modulującego o częstotliwości akustycznej. W celu poprawy sprawności ogólnej nadajnika zastosowano system dynamicznej regulacji poziomu fali nośnej (DCC – *Dynamical Carrier Control*). System modulacyjny MPM-p3 w przyszłości będzie mógł być zaadoptowany do nadawania cyfrowego. Wzmacniacze mocy są chłodzone cieczą, przy czym sposób rozwiązania chłodzenia umożliwia szybką wymianę uszkodzonego modułu bez konieczności demontażu układu hydraulicznego.

Modułowe rozwiązanie układu nadajnika zapewnia dużą niezawodność pracy. Uszkodzenie nawet kilku modułów nie powoduje przerwy w pracy nadajnika, a zmniejszenie zasięgu radiostacji jest znikome. Nawet uszkodzenie jednego z trzech bloków nie powoduje wyłączenia nadajnika, a jedynie pewne pogorszenie jakości odbioru na krańcach zasięgu.

Cały nadajnik jest objęty wyrafinowanym system zabezpieczeń przeciwporażeniowych, a także rozbudowanym komputerowym układem sterująco-kontrolnym. Możliwy jest też zdalny dozór i sterowanie pracą radiostacji.

9. Pomiar zasięgu radiostacji

W trakcie odbioru technicznego nadajnika i systemu antenowego w Radiofonicznym Centrum Nadawczym w Solcu Kujawskim uznano, że pożądane jest obiektywne określenie zasięgu radiostacji. Ustalono, że przed oficjalnym otwarciem Centrum zostaną wykonane pomiary wstępne na trasie Wrocław - Przemyśl - Solec Kujawski - Wrocław. Przemyśl leży na kierunku maksymalnego promieniowania systemu antenowego i jest najbardziej odległą od Solca Kujawskiego większą miejscowością. Założono, że pomiary wstępne umożliwią ocenę skuteczności wielomilionowej inwestycji i wskażą kierunek dalszych badań zasięgu. Pomiary przeprowadzono w dniach od 31 sierpnia do 4 września 1999 roku. Do pomiarów użyto wozu pomiarowego Państwowej Agencji Radiokomunikacyjnej, wyposażonego w odpowiednią aparaturę pomiarową, tzn. kalibrowaną ramową antenę pomiarową, miernik natężenia pola typ LMZ firmy INCO oraz odbiornik GPS, umożliwiający określenie współrzędnych geograficznych punktów pomiarowych. Punkty pomiarowe wybrano w okolicy większych miejscowości, tak aby spełnione były wymagania odnośnie do warunków pomiaru, tzn. teren możliwie otwarty, bez linii energetycznych i telekomunikacyjnych. W każdym punkcie pomiarowym dokonano pomiaru natężenia pola elektrycznego oraz subiektywnej oceny jakości odbioru. Łącznie pomiary wykonano w 18 miejscowościach [10]. W niektórych miejscowościach pomiary wykonano dwukrotnie. Ponadto dokonano pomiarów na terenie Obserwatorium Radioastronomicznego w Piwnicach pod Toruniem w celu potwierdzenia badań symulacyjnych przeprowadzonych w roku 1998, mających na celu sprawdzenie oddziaływania radiostacji w Solcu Kujawskim na urządzenia i systemy pracujące w Obserwatorium [11]. Wykonano również kilka pomiarów w Solcu Kujawskim z punktu widzenia zagrożenia elektromagnetycznego dla ludzi.

Tabela 2

Wyniki pomiaru natężenia pola wytwarzanego przez RCN Solec Kujawski w wybranych punktach na terenie Polski

Miejscowość	Współrzędne geograficzne		Odległość [km]	Azymut	Natężenie pola [dB(μV/m)]
	Długość	Szerokość			
Wrocław	17° 02' 08,0"	51° 06' 17,0"	229,4	201,9°	91,0
Brzeg	17° 25' 08,7"	50° 51' 36,6"	247,6	193,8°	91,0
Opole	17° 58' 45,8"	50° 38' 28,3"	265,8	184,3°	91,0
Katowice 1	18° 56' 52,2"	50° 20' 40,7"	301,9	170,7°	88,5
Katowice 2	18° 59' 18,0"	50° 20' 17,9"	303,0	170,2°	88,0
Kraków 1	19° 53' 02,0"	50° 08' 06,0"	340,5	160,1°	85,0
Kraków 2	20° 02' 45,8"	50° 00' 34,3"	357,5	159,0°	85,5
Tarnów 1	20° 57' 13,6"	49° 59' 23,2"	385,7	150,0°	86,5
Tarnów 2	21° 03' 11,2"	50° 00' 30,2"	387,3	148,9°	86,5
Rzeszów 1	21° 57' 25,9"	50° 03' 32,6"	417,4	140,7°	81,0
Rzeszów 2	21° 58' 43,9"	50° 04' 49,3"	416,4	140,4°	81,0
Przemyśl 1	22° 47' 08,7"	49° 49' 08,7"	475,0	136,8°	82,5
Przemyśl 2	22° 45' 56,5"	49° 47' 57,4"	475,8	137,1°	80,5
Zamość	23° 17' 18,1"	50° 41' 39,8"	431,9	124,9°	83,0
Lublin	22° 37' 65,0"	51° 13' 25,4"	359,7	122,1°	85,0
Radom	21° 13' 23,3"	51° 24' 57,1"	269,8	130,4°	90,5
Warszawa	20° 59' 18,9"	52° 09' 26,3"	208,1	116,5°	93,5
Łódź 1	19° 27' 56,4"	51° 51' 06,9"	153,9	147,4°	101,0
Łódź 2	19° 21' 26,5"	51° 55' 42,0"	142,7	148,2°	99,0
Włocławek	19° 03' 32,0"	52° 39' 17,1"	67,5	127,1°	106,0
Toruń	18° 35' 38,9"	52° 57' 46,8"	23,3	106,5°	112,5
Solec Kujawski	18° 13' 37,4"	53° 05' 01,4"	7,1	161,4°	122,5
Poznań	17° 05' 28,7"	52° 15' 07,3"	116,7	223,1°	96,0
Leszno	16° 37' 00,4"	51° 52' 00,1"	170,3	221,6°	92,0

Na podstawie wykonanych pomiarów wydaje się, że rozsądnym jest przyjęcie założenia, iż średnia konduktywność gruntu na terenie Polski jest stała i równa około 10 mS/m. We wszystkich punktach pomiarowych zmierzono wartość natężenia pola nie mniejszą niż 80 dB(μV/m), tzn. o 3 dB większą niż wartość chroniona według CCIR (obecnie ITU-R), tzn. 77 dB(μV/m). Wartość graniczna - 77 dB(μV/m) - występuje w odległości około 650 km od Solca Kujawskiego, tzn. Lwów jest w zasięgu radiostacji. Do tej odległości można się spodziewać stabilnych, w dzień i w nocy, warunków odbioru. Warunki odbioru w innych kierunkach wymagają dalszych badań.

W każdym punkcie pomiarowym dokonano subiektywnej oceny jakości odbioru za pomocą konwencjonalnego przenośnego odbiornika radiofonicznego. Skalę ocen podano w tabeli 3. Oceny subiektywnej dokonywały niezależnie trzy osoby, a następnie obliczano wartość średnią. We wszystkich punktach pomiarowych uzyskano wynik - 5.

Tabela 3

Skala ocen subiektywnych

Ocena liczbowa	Ocena słowna	Jakość odbioru
5	Odbiór bardzo dobry	Nie słyszeć zakłóceń
4	Odbiór dobry	Zakłócenia słyszalne, ale tolerowalne
3	Odbiór mierny	Zakłócenia wyraźnie słyszalne
2	Odbiór zły	Zakłócenia utrudniające odbiór
1	Odbiór nieakceptowalny	Poziom zakłóceń porównywalny z poziomem sygnału

W celu sprawdzenia stopnia zagrożenia ludności w Solcu Kujawskim przez RCN Solec Kujawski wykonano pomiary natężenia pola elektrycznego w kilku miejscach (rys. 14). Wyniki pomiarów podano w tabeli 4.

Tabela 4

Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego w Solcu Kujawskim

Punkt pomiarowy	Natężenie pola	
	dB(μ V/m)	V/m
Rynek	122,5	1,3
Ratusz	121,5	1,2
Hotel Leśny	123,5	1,5
Leśniczówka	129,0	2,8

W każdym punkcie natężenie pola jest znacznie mniejsze od wartości dopuszczalnej (20 V/m).



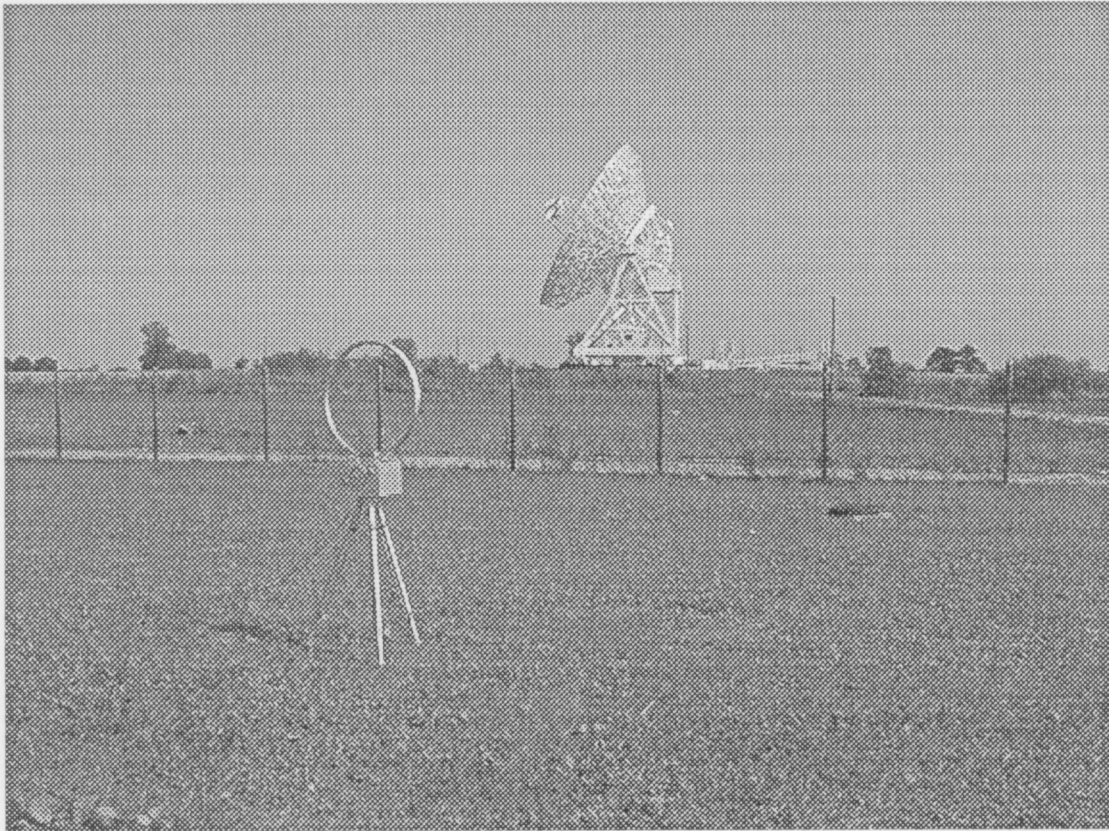
Rys. 14. Pomiar natężenia pola w pobliżu ratusza w Solcu Kujawskim

W celu potwierdzenia wyników badań teoretycznych i doświadczalnych wykonanych w 1998 roku mających na celu określenie oddziaływania pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez RCN Solec Kujawski na aparaturę zainstalowaną w Obserwatorium Radioastronomicznym Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu (Piwnice) wykonano pomiary natężenia pola elektrycznego. Wyniki pomiarów podano w tabeli 5.

Tabela 5

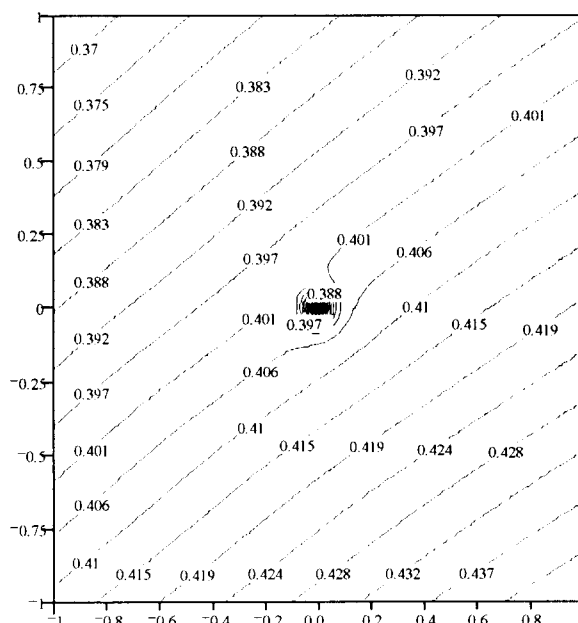
Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego na terenie
 Obserwatorium Radioastronomicznego
 Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu (Piwnice)

Punkt pomiarowy	Natężenie pola	
	DB(μ V/m)	V/m
Radioteleskop	114,5	0,531
Budynek 1a	114,5	0,531
Budynek 1b	114,0	0,501
Wjazd	112,0	0,398



Rys. 15. Pomiar natężenia pola na terenie Obserwatorium Radioastronomicznego
 Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu (Piwnice)

Wyniki obliczeń natężenia pola (metodą momentów) pokazano na rysunku 16. Zgodność wyników obliczeń i wyników pomiarów jest wprost idealna. Przed uruchomieniem radiostacji w Solcu Kujawskim wykonano eksperyment polegający na wytworzeniu lokalnie pola elektromagnetycznego o natężeniu zbliżonym do wartości obliczonych. Nie stwierdzono destrukcyjnego wpływu wytworzonego pola elektromagnetycznego na pracę urządzeń radioastronomicznych. Nie ma też sygnałów o wpływie pola elektromagnetycznego na pracę tych urządzeń po uruchomieniu Radiofonicznego Centrum Nadawczego w Solcu Kujawskim.



Rys. 16. Wyniki obliczeń rozkładu natężenia pola elektrycznego na terenie Obserwatorium Radioastronomicznego Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu (Piwnice)

10. Uzgodnienia międzynarodowe

Każda radiostacja musi być skoordynowana z innymi radiostacjami współ- i sąsiednikanałowymi w tym sensie, aby nie powodowała zakłócania ich pracy. W przypadku radiostacji długofalowej źródłem zakłóceń jest fala jonosferyczna. Radiostacja w Konstantynowie była skoordynowana. Wystarczyło więc tylko zbadać wpływ zmiany lokalizacji radiostacji (przeniesienie z Konstantynowa do Solca Kujawskiego) na zasięg radiostacji współ- i sąsiednikanałowych. W odległości nie większej niż 3300 km od Solca Kujawskiego znajdują się cztery radiostacje pracujące przy częstotliwości 216 kHz (Baku, Monte Carlo, Oslo Bastoe, Oslo Kloefta) osiem radiostacji pracujących przy częstotliwości 225 kHz (Barcelona, Bilbao, Linares, Lugo, Abis, Droitwich, Nizhniy Tagil, Van) i osiem radiostacji pracujących przy częstotliwości 234 kHz (Yerevan, Jefren, Junglinster, Kishinev, Arkhangelsk, Tobolsk, Ulyanovsk). Obliczenia wykonano dla dwóch miesięcy: grudnia i czerwca, charakteryzujących się odpowiednio najdłuższą i najkrótszą nocą, oraz dla różnych godzin czasu UT, w tym dla godzin wschodu i zachodu Słońca.

Przeniesienie polskiej radiostacji długofalowej, pracującej przy częstotliwości 225 kHz, z Konstantynowa do Solca Kujawskiego spowoduje znikome skutki w odniesieniu do zagranicznych stacji współ- i sąsiednikanałowych (z uwzględnieniem anteny kierunkowej w Solcu Kujawskim). Jedyne w sporadycznych przypadkach można się spodziewać nieznacznego pogorszenia warunków pracy radiostacji zakłócanych przez stację w Solcu Kujawskim. W najgorszym przypadku będzie to zmniejszenie zasięgu o niespełna 10 km w odniesieniu do stacji Barcelona o godzinie 20.10 i 22.50 UT w czerwcu.

Literatura

1. Bem D. J., *Antenna of the Warsaw Central Broadcasting Station*, Telecommunication Journal, Vol. 43, 1976, pp. 676-682.
2. Bem D. J., *Analiza teoretyczna i badania modelowe anteny Warszawskiej Radiostacji Centralnej*, Prace Instytutu Łączności nr 84, s. 3-72, Warszawa 1978.
3. Bem D. J., *Anteny i rozchodzenie się fal Radiowych*, WKiŁ, Warszawa 1974.

4. Bem D. J., *Materiały pomocnicze do obliczeń propagacyjnych*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1974.
5. Bem D. J., *Zaniki spowodowane interferencją fali jonosferycznej i fali powierzchniowej*, Raport ITA PWr nr I-28/S-008/99.
6. Bem D. J., Krzysztofik W. J., *Studium odbudowy anteny w RCN Konstantynów*, Raport ITA PWr nr I-28/S-033/92.
7. Bem D. J., Krzysztofik W. J., Kucharski A. A., Więckowski T.W., *Studium wyboru nowej lokalizacji radiostacji długofalowej na terytorium Polski*, Raport ITA PWr nr I-28/SPR-007/97.
8. Bem D. J., Krzysztofik W. J., Kucharski A. A., Więckowski T. W., *Studium wyboru układu antenowego dla radiostacji długofalowej w Solcu Kujawskim*, Raport ITA PWr nr I-28/SPR-032/97.
9. Bem D. J., Krzysztofik W. J., Kucharski A. A., Więckowski T. W., *Studium optymalizacji instalacji uziemiającej z punktu widzenia sprawności anteny i minimalizacji zajmowanego obszaru*, Raport ITA PWr nr I-28/SPR-048/97.
10. Bem D. J., Jósiewicz, Więckowski T. W., *Wstępna analiza zasięgu Radiofonicznego Centrum Nadawczego w Solcu Kujawskim*, Raport ITA PWr nr I-28/S-060/99.
11. Bem D. J. (praca zbiorowa), *Oddziaływanie radiostacji długofalowej w Solcu Kujawskim na Obserwatorium Radioastronomiczne w Piwnicach*, Raport ITA PWr nr I-28/SPR-044/97.
12. Bem D.J., Dusiński A., Wielowieyska E. Więckowski W.W., *Analiza sytuacji interferencyjnej radiostacji długofalowej w Solcu Kujawskim z punktu widzenia koordynacji międzynarodowej*, Raport ITA PWr nr I-28/S-060/98.