

# Spis treści

Przedmowa . . . . .	13
Wykaz ważniejszych oznaczeń . . . . .	15

## Anteny

### Rozdział 1. Rola anteny w torze radiokomunikacyjnym i jej podstawowe parametry

1.1 Charakterystyka promieniowania . . . . .	19
1.2. Kierunkowość i zysk energetyczny anteny . . . . .	25
1.3. Długość skuteczna anteny . . . . .	27
1.4. Powierzchnia skuteczna anteny . . . . .	28
1.5. Impedancja wejściowa i rezystancja promieniowania anteny . . . . .	29
1.6. Temperatura szumowa anteny; współczynnik przydatności . . . . .	32

### Rozdział 2. Podstawy teorii anten

2.1. Pole elektromagnetyczne systemu prądów . . . . .	35
2.1.1. Ogólne wyrażenia dla pola wytwarzanego przez zadany rozkład prądów . . . . .	35
2.1.2. Pole anteny w strefie dalekiej (promieniowania) . . . . .	38
2.1.3. Polaryzacja . . . . .	41
2.1.4. Elementarny dipol elektryczny . . . . .	42
2.1.5. Elementarny dipol magnetyczny . . . . .	45
2.1.6. Pole dalekie liniowego rozkładu prądu . . . . .	46
2.1.7. Sumowanie pól . . . . .	47
2.1.8. Zasada wzajemności . . . . .	49
2.2. Powierzchnie falowe i promienie . . . . .	50
2.2.1. Zasada Huygensa-Fresnela . . . . .	50
2.2.2. Prawa optyki geometrycznej . . . . .	50
2.2.3. Przejście od teorii falowej pola do praw optyki geometrycznej . . . . .	54
2.2.4. Właściwości pola w przybliżeniu optyki geometrycznej . . . . .	57
2.3. Dyfrakcja fal elektromagnetycznych . . . . .	59
2.3.1. Warunki brzegowe . . . . .	60
2.3.2. Odbicie od doskonale przewodzącej płaszczyzny; zasada odbić lustrzanych . . . . .	61
2.3.3. Przybliżone metody rozwiązywania problemów dyfrakcyjnych . . . . .	63
2.3.4. Skalarny problem dyfrakcyjny . . . . .	66
2.3.5. Promieniowanie apertury prostokątnej . . . . .	71
2.3.6. Promieniowanie apertury kołowej . . . . .	75
2.3.7. Wpływ odchyłeń fazowych na charakterystykę promieniowania apertury . . . . .	77
2.4. Układy antenowe złożone z dyskretnych elementów promieniujących . . . . .	81
2.4.1. Liniowy układ antenowy . . . . .	81

2.4.2. Prostokątny układ antenowy . . . . .	89
2.4.3. Układy antenowe z nierównomiernie rozmieszczonymi elementami . . . . .	90
2.5. Ogólne zasady syntezy charakterystyki promieniowania . . . . .	92
2.5.1. Metoda przekształcenia Fouriera . . . . .	93
2.5.2. Metoda Woodwarda . . . . .	93
2.5.3. Układy antenowe Dolpha-Czebyszewa . . . . .	97
2.6. Wpływ błędów losowych na parametry anten . . . . .	99
<b>Rozdział 3. Anteny liniowe</b>	
3.1. Cienkie symetryczne anteny liniowe . . . . .	103
3.1.1. Rozkład prądu i charakterystyka promieniowania . . . . .	103
3.1.2. Impedancja promieniowania . . . . .	105
3.1.3. Antena krótka . . . . .	109
3.2. Antena dwustożkowa . . . . .	110
3.2.1. Struktura nieskończona . . . . .	110
3.2.2. Antena dwustożkowa o skończonych rozmiarach . . . . .	113
3.2.3. Antena dwustożkowa jako przybliżenie anteny cylindrycznej . . . . .	114
3.3. Antena cylindryczna . . . . .	117
3.3.1. Równanie całkowe Halléna . . . . .	117
3.3.2. Iteracyjna metoda rozwiązywania równania Halléna . . . . .	119
3.3.3. Impedancja wejściowa anteny cylindrycznej . . . . .	122
3.4. Układy anten liniowych . . . . .	124
3.4.1. Wzajemne oddziaływanie anten liniowych . . . . .	124
3.4.2. Impedancja wzajemna dwóch równoległych, nieskończenie cienkich anten półfalowych umieszczonych naprzeciw siebie . . . . .	125
3.4.3. Układ dwóch równoległych anten półfalowych zasilanych współfazowo . . . . .	127
3.4.4. Układ dwóch równoległych anten półfalowych zasilanych w przeciwfazie . . . . .	129
3.4.5. Antena liniowa nad ziemią . . . . .	130
3.4.6. Układy antenowe z elementami biernymi . . . . .	135
<b>Rozdział 4. Anteny szczelinowe</b>	
4.1. Szczelina jako dipol magnetyczny; zasada Babineta . . . . .	141
4.2. Szczelina w falowodzie . . . . .	146
4.3. Szczeliny pobudzane za pomocą niejednorodności w falowodzie . . . . .	150
4.4. Szczelina osiowa w poboczniczy kołowego cylindra . . . . .	151
<b>Rozdział 5. Anteny z falą bieżącą</b>	
5.1. Przewodnik prostoliniowy z falą bieżącą . . . . .	155
5.2. Antena rombowa . . . . .	157
5.2.1. Charakterystyka promieniowania . . . . .	157
5.2.2. Optymalizacja rozmiarów . . . . .	162
5.2.3. Impedancja wejściowa . . . . .	163
5.2.4. Współczynnik tłumienia i rezystancja promieniowania . . . . .	163
5.2.5. Kierunkowość, sprawność i zysk energetyczny . . . . .	164
5.3. Anteny z falą powierzchniową . . . . .	165
5.3.1. Fale niejednorodne . . . . .	165
5.3.2. Struktury i powierzchnie opóźniające . . . . .	167
5.3.3. Zasady projektowania anten z falą powierzchniową . . . . .	170
5.4. Anteny śrubowe . . . . .	174

<b>Rozdział 6. Anteny tubowe</b>	177
6.1. Promieniowanie otwartego końca falowodu	177
6.2. Rodzaje anten tubowych	181
6.2.1. Tuba sektorowa	182
6.2.2. Tuba piramidalna	184
6.3. Dopasowanie anten tubowych	185
<b>Rozdział 7. Anteny soczewkowe</b>	187
7.1. Ogólne właściwości anten soczewkowych i ich zastosowanie	187
7.2. Soczewki typu optycznego	187
7.3. Dielektryki sztuczne ze współczynnikiem załamania większym od jedności	191
7.4. Soczewki metalowe	192
7.5. Wpływ odchyłek fazowych i tolerancje wykonania soczewek	195
7.6. Soczewki niejednorodne	197
<b>Rozdział 8. Anteny reflektorowe</b>	
8.1. Reflektor płaski	200
8.2. Reflektor kątowy	204
8.3. Reflektor paraboliczny	206
8.3.1. Charakterystyka promieniowania	207
8.3.2. Kierunkowość	212
8.3.3. Rozkład pola w otoczeniu ogniska	215
8.4. Dwurefleksyjne układy antenowe	225
8.5. Anteny z niesymetrycznym reflektorem parabolicznym	229
<b>Rozdział 9. Anteny o zwiększonej szerokopasmowości</b>	
9.1. Anteny, których kształt jest całkowicie określony przez kąty	233
9.2. Anteny logarytmicznie-periodyczne	236
9.3. Logarytmicznie-periodyczna antena dipolowa	238
<b>Rozdział 10. Zastosowania anten</b>	
10.1. Długo- i średniofalowe anteny radiofoniczne	245
10.1.1. Antena pionowa	245
10.1.2. Anteny z kształtowaną charakterystyką promieniowania w płaszczyźnie pionowej	253
10.2. Radiokomunikacyjne i radiofoniczne anteny krótkofalowe	259
10.2.1. Dipol poziomy	261
10.2.2. Anteny ścianowe	264
10.2.3. Anteny rombów	269
10.2.4. Anteny logarytmicznie-periodyczne	271
10.3. Telewizyjne anteny nadawcze	272
10.3.1. Zysk energetyczny	274
10.3.2. Kształtowanie charakterystyki promieniowania w płaszczyźnie pionowej	275
10.3.3. Kształtowanie charakterystyki promieniowania w płaszczyźnie poziomej	280
10.3.4. Rozwiązania konstrukcyjne	281
10.3.5. Układy zasilania	285
10.4. Telewizyjne anteny odbiorcze	290
10.4.1. Połączenie anteny z odbiornikiem	293
10.4.2. Anteny dipolowe	297
10.4.3. Anteny Yagi-Uda	300
10.4.4. Układy antenowe	305

10.5. Anteny radiolokacyjne . . . . .	309
10.5.1. Anteny z wiązką szpilkową . . . . .	310
10.5.2. Anteny z wiązką płetwową . . . . .	312
10.5.3. Anteny z wiązką kształtowaną . . . . .	313
10.5.4. Anteny z szybkim przeszukiwaniem przestrzeni . . . . .	315
10.5.5. Wielowiązkowe układy antenowe . . . . .	319
10.6. Anteny dla radiokomunikacji satelitarnej . . . . .	320
<b>Rozchodzenie się fal radiowych</b>	
<b>Rozdział 11. Wstępne wiadomości o rozchodzeniu się fal radiowych</b>	
11.1. Podział widma częstotliwości radiowych na zakresy . . . . .	325
11.2. Klasyfikacja sposobów rozchodzenia się fal radiowych . . . . .	326
11.3. Propagacja fal radiowych w swobodnej przestrzeni . . . . .	328
11.4. Współczynnik osłabienia . . . . .	329
11.5. Obszar istotny dla propagacji fal; strefy Fresnela . . . . .	331
<b>Rozdział 12. Rozchodzenie się fali przyziemnej</b>	
12.1. Właściwości elektryczne powierzchniowych warstw ziemi . . . . .	335
12.2. Rozchodzenie się fali płaskiej w jednorodnym ośrodku półprzewodzącym . . . . .	337
12.3. Odbicie fal radiowych od powierzchni ziemi . . . . .	339
12.4. Rozchodzenie się fal radiowych nad płaską powierzchnią ziemi przy podniesionej antenie nadawczej i odbiorczej . . . . .	342
12.5. Rozchodzenie się fali powierzchniowej nad płaską powierzchnią ziemi . . . . .	345
12.5.1. Przybliżony warunek brzegowy Leontowicza . . . . .	345
12.5.2. Struktura pola elektromagnetycznego przy powierzchni ziemi . . . . .	347
12.5.3. Pole elementarnego dipola elektrycznego umieszczonego pionowo tuż przy powierzchni ziemi . . . . .	350
12.5.4. Propagacja fali powierzchniowej nad terenem niejednorodnym . . . . .	353
12.5.5. Refrakcja brzegowa . . . . .	355
12.6. Rozchodzenie się fali przyziemnej nad kulistą powierzchnią jednorodnej ziemi . . . . .	357
12.7. Rozchodzenie się fal radiowych nad nierówną powierzchnią ziemi . . . . .	360
12.7.1. Kryterium Rayleigha . . . . .	360
12.7.2. Wpływ nierówności ziemi na propagację fal w obszarze interferencyjnym . . . . .	361
12.7.3. Propagacja fal radiowych w obecności przeszkód na trasie . . . . .	362
<b>Rozdział 13. Wpływ troposfery na rozchodzenie się fal radiowych</b>	
13.1. Budowa i właściwości troposfery . . . . .	365
13.2. Współczynnik refrakcji troposferycznej . . . . .	366
13.3. Refrakcja fal radiowych w troposferze . . . . .	367
13.4. Zastępczy promień ziemi . . . . .	370
13.5. Klasyfikacja rozmaitych stopni nasilenia refrakcji troposferycznej . . . . .	371
13.6. Rozpraszanie fal radiowych w troposferze . . . . .	373
13.7. Tłumienie fal radiowych w troposferze . . . . .	377
<b>Rozdział 14. Wpływ jonosfery na propagację fal radiowych</b>	
14.1. Budowa jonosfery . . . . .	381
14.2. Rozchodzenie się fal radiowych w jednorodnej plazmie . . . . .	388
14.3. Rozchodzenie się fal radiowych w plazmie o budowie warstwowej . . . . .	391
14.3.1. Częstotliwość krytyczna . . . . .	391
14.3.2. Załamanie fal radiowych w płaskiej jonosferze . . . . .	393
14.3.3. Załamanie fal radiowych w kulisto-warstwowej jonosferze . . . . .	395

14.4. Wpływ pola magnetycznego ziemi na propagację fal radiowych w jonosferze . . . . .	396
14.4.1. Zależności podstawowe . . . . .	396
14.4.2. Dwójłomność . . . . .	398
14.4.3. Skręcenie płaszczyzny polaryzacji (zjawisko Faradaya) . . . . .	400
14.5. Dyspersja fal radiowych w jonosferze . . . . .	401
14.6. Absorpcja jonosferyczna . . . . .	404
<b>Rozdział 15. Zakłócenia atmosferyczne i kosmiczne</b>	
15.1. Zakłócenia atmosferyczne . . . . .	407
15.2. Prognozy zakłóceń atmosferycznych . . . . .	409
15.3. Zakłócenia kosmiczne . . . . .	410
<b>Rozdział 16. Specyfika rozchodzenia się fal radiowych różnych zakresów częstotliwości</b>	
16.1. Rozchodzenie się fal długich i bardzo długich . . . . .	413
16.2. Rozchodzenie się fal średnich . . . . .	417
16.2.1. Natężenie pola fali jonosferycznej . . . . .	418
16.2.2. Krzywe propagacji jonosferycznej fal średnich . . . . .	420
16.2.3. Zaniki na falach średnich . . . . .	424
16.2.4. Zjawiska nieliniowe w jonosferze . . . . .	428
16.3. Rozchodzenie się fal pośrednich . . . . .	429
16.4. Rozchodzenie się fal krótkich . . . . .	431
16.4.1. Regularne zmiany warunków propagacji fal krótkich . . . . .	434
16.4.2. Szczególne warunki propagacji fal krótkich . . . . .	435
16.4.3. Zaniki przy odbiorze fal krótkich . . . . .	439
16.4.4. Wyznaczanie częstotliwości roboczych dla linii radiokomunikacyjnych na falach krótkich . . . . .	441
16.5. Rozchodzenie się fal ultrakrótkich i mikrofal . . . . .	449
16.5.1. Statystyczne krzywe propagacji fal metrowych i decymetrowych . . . . .	450
16.5.2. Pozahoryzontowa propagacja troposferyczna . . . . .	454
16.5.3. Rozchodzenie się fal metrowych wskutek rozpraszania w jonosferze . . . . .	457
16.5.4. Rozchodzenie się fal ultrakrótkich przez rozproszenie na zjonizowanych śladach meteorów . . . . .	458
16.6. Propagacja światła laserowego . . . . .	458
<b>Wykaz literatury . . . . .</b>	<b>465</b>
<b>Skorowidz . . . . .</b>	<b>475</b>



DANIEL JÓZEF BEM

# **Anteny i rozchodzenie się fal radiowych**

---

WYDAWNICTWA  
NAUKOWO-TECHNICZNE

## KOMITET REDAKCYJNY

J. DRESZER, A. GÓRSKI (sekretarz), K. GRABOWSKI,  
Z. GRZEJSZCZAK, C. KULEZA, J. LENKOWSKI,  
S. OKONIEWSKI, J. OSIOWSKI, B. PASZKOWSKI,  
S. PASZKOWSKI, S. SŁAWIŃSKI (przewodniczący), M. SUSKI,  
A. WIERZBICKI, T. ZAGAJEWSKI, Z. ŻYSZKOWSKI

---

### OD KOMITETU REDAKCYJNEGO

Niniejsza seria „Wykłady Akademickie. Elektronika”, będąca kontynuacją serii „Podręczniki Akademickie. Elektronika” i opracowana przy ścisłej współpracy profesorów z politechnik Gdańskiej, Warszawskiej i Wrocławskiej, jest dostosowana do potrzeb wydziałów elektroniki tych politechnik.

Książki tej serii obejmują wykłady prowadzone na wyższych latach studiów w ramach poszczególnych specjalności.

Komitet Redakcyjny ma nadzieję, że książki tej serii zaspokoją potrzeby studentów wydziałów elektroniki, a także, że niektóre z nich będą również użyteczne dla studentów innych kierunków oraz dla osób, które ukończyły studia według dawnych programów, w których nie wszystkie obecnie wykładane przedmioty były reprezentowane.

DANIEL JÓZEF BEM

# **Anteny i rozchodzenie się fal radiowych**

WYDAWNICTWA NAUKOWO-TECHNICZNE • WARSZAWA 1973





Redaktor naukowy  
Mgr inż. JERZY CHABLOWSKI

Redaktor WNT  
ZOFIA DACKIEWICZ

Okładkę, obwolūtę i stronę tytułową projektował  
Art. plastik TADEUSZ PIETRZYK

Redaktor techniczny  
HALINA FIEĆKO



621.396.677:621.391.81

*W pierwszej części podręcznika omówiono podstawy teorii anten, rodzaje anten i ich właściwości oraz zastosowania anten w radiofonii, telewizji, radiolokacji i radiokomunikacji satelitarnej. W drugiej części przedstawiono zarys teorii rozchodzenia się fal radiowych i specyfikę propagacji fal radiowych poszczególnych zakresów częstotliwości.*

*Podręcznik jest przeznaczony dla studentów wydziałów elektroniki wyższych szkół technicznych. Mogą z niego również korzystać inżynierowie interesujący się podstawami projektowania, budowy i eksploatacji urządzeń antenowych.*

WSZELKIE PRAWA ZASTRZEŻONE

Printed in Poland

---



---

*Mojemu Nauczycielowi  
Profesorowi Tadeuszowi Tomankiewiczowi*

# PRZEDMOWA

*Podręcznik ten został opracowany na podstawie wykładu pt.: „Anteny i rozchodzenie się fal radiowych”, prowadzonego od wielu lat przez autora na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Zakres zawartego w podręczniku materiału jest obszerniejszy niż zakres ujęty w „Programie ramowym studiów magisterskich na kierunku Elektronika”. Jest to spowodowane potrzebą obsłużenia tym samym podręcznikiem zarówno kursu magisterskiego jak i inżynierskiego oraz dyplomantów. Z myślą o tych ostatnich na końcu podręcznika umieszczono bogaty wykaz literatury, ułatwiający zainteresowanym poszczególnymi zagadnieniami dotarcie do opracowań źródłowych. Pierwsza część podręcznika (rozdz. 1 do 10), obejmująca zagadnienia antenowe, jest pierwszym polskim opracowaniem tematu na poziomie akademickim. Należy więc przypuszczać, że będzie ona przydatna również dla specjalistów interesujących się zagadnieniami projektowania, budowy i eksploatacji urządzeń antenowych.*

*Pierwsza część podręcznika zawiera zarys teorii anten w nowoczesnym ujęciu (rozdz. 2), na podstawie którego dokonano w dalszych rozdziałach omówienia właściwości anten, stosując podział rodzajowy. Ostatni rozdział tej części podręcznika jest poświęcony zastosowaniom anten w radiofonii, telewizji, radiolokacji i radiokomunikacji satelitarnej.*

*Druga część podręcznika (rozdz. 11 do 16) zawiera podstawy teorii rozchodzenia się fal radiowych oraz omówienie specyfiki rozchodzenia się fal radiowych poszczególnych zakresów częstotliwości.*

*Zakłada się, że czytelnik podręcznika ma opanowany materiał z zakresu teorii pola elektromagnetycznego oraz z odpowiednich działów matematyki. W toku wykładu główny nacisk położono na stronę fizyczną zjawisk, przy ograniczeniu strony formalnej do niezbędnego minimum.*

*Mimo zwiększonej objętości podręcznika musiano zrezygnować z omówienia zagadnień miernictwa antenowego i propagacyjnego. Potraktowanie tych zagadnień skrótkowo sprowadziłoby się do powtórzenia materiału wykładanego w miernictwie radio-technicznym. Solidne opracowanie wymienionych tematów wymagałoby dalszego zwiększenia objętości podręcznika. Z tych samych względów zrezygnowano z omówienia anten aktywnych, podziemnych, rozchodzenia się fal elektromagnetycznych w kopalniach oraz zastosowań elektronicznej techniki obliczeniowej. Nie zamieszczono też kompletu międzynarodowych materiałów do obliczeń propagacyjnych, będą one bowiem w najbliższym czasie opublikowane przez Politechnikę Wrocławską.*

*Na zakończenie pragnę złożyć serdeczne podziękowania prof. dr hab. inż. Stefanowi Hahnowi z Politechniki Warszawskiej oraz prof. dr hab. inż. Leonowi Drozdowiczowi z Politechniki Gdańskiej za trud przygotowania recenzji, dzięki którym mogłem usunąć wiele niedociągnięć pierwszej redakcji podręcznika. Panu mgr inż. Jerzemu Chabłowskiemu z Przemysłowego Instytutu Telekomunikacji dziękuję za przejrzanie maszynopisu i życzliwą krytykę. Podziękowania moje należą się również Pani red. Zuzannie Grzejszczak za wiele kłopotów, jakie miała z przygotowaniem tej książki do druku.*

*Autor*

Wrocław, listopad 1972 r.