



IEEE MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES SOCIETY

The Microwave Theory and Techniques Society is an organization, within the framework of the IEEE, of members with principal professional interests in the field of microwave theory and techniques. All members of the IEEE are eligible for membership in the Society and will receive this TRANSACTIONS upon payment of the annual Society membership fee of \$8.00 plus an annual subscription fee of \$13.00. For information on joining, write to the IEEE at the address below. *Member copies of Transactions/Journals are for personal use only.*

ADMINISTRATIVE COMMITTEE

R. D. POLLARD, <i>President</i>		E. A. REZEK, <i>Vice President</i>		S. WETENKAMP, <i>Secretary</i>		J. T. BARR IV, <i>Treasurer</i>	
J. T. BARR	K. HONJO	R. T. KEMERLEY	R. D. POLLARD	E. A. REZEK	M. B. STEER	G. R. THOREN	
S. J. FIEDZIUSZKO	C. M. JACKSON	J. S. KENNEY	J. W. RA	M. J. SCHINDLER	R. W. SUDBURY	R. J. TREW	
K. C. GUPTA		J. K. MCKINNEY		R. SORRENTINO		K. VARIAN	
<i>Honorary Life Members</i>		<i>Distinguished Lecturers</i>		<i>Past Presidents</i>			
A. C. BECK	A. A. OLINER	K. TOMIYASU	R. DIXIT	C. RAUSCHER	R. E. BRYAN (1997)		
S. B. COHN	T. S. SAAD	L. YOUNG	P. HERCZFELD	A. ROSEN	J. W. WASSEL (1996)		
T. ITOH			W. MENZEL	J. WAKINO	E. D. COHEN (1995)		

S-MTT Chapter Chairmen

Albuquerque: D. P. MCLEMORE	Ithaca: R. C. COMPTON, N. KOLIAS	Saratov/Penza: M. V. DAVIDOVICH
Atlanta: G. D. HOPKINS	Kitchener-Waterloo: Y. L. CHOW	Schenectady: R. J. GUTMANN
Baltimore: J. MOELLERS, B. SEQUEIRA	Korea: D. C. PARK	Seattle: W. CHARCZENKA, M. CHEN
Beijing: W. G. LIN, W. X. ZHANG	Los Angeles: R. STURDIVANT, E. W. RAY	Singapore: M. S. LEONG-SENG, S. P. YEO
Benelux: K. VAN'T KLOOSTER, B. NAUWELAERS	Milwaukee: J. RICHIE, D. MISRA	South Africa: D. B. DAVIDSON, J. CLOETE
Buffalo: M. R. GILLETTE, H. MORRISON	Minsk Belarus: S. A. MALYSHEV	South Australia: B. D. BATES, A. J. PARFITT
Bulgaria: H. D. HRISTOV, P. I. PHILIPOV	Montreal: G. L. YIP, C. C. HUANG	South Brevard Indian River: T. E. DURHAM, M. THURSBY
Central Iowa/Cedar Rapids: J. C. COZZIE, S. BURNS	Moscow: V. E. LYUBCHENKO	Southeastern Michigan: J. W. BURNS, T. GROTHORN
Central New England/Boston: S. D. MITTLEMAN	Nanjing: W. X. ZHANG	Spain: M. SALAZAR-PALMA, L. DE-HARO
Central & South Italy: P. BERNARDI	New Hampshire: D. L. BACON	Springfield: K. M. LAU
Chicago: E. G. BOGUS, J. P. PHILLIPS	New Jersey Coast: A. PAOLELLA, M. MIZAN	St. Louis: S. TRETAKOV
Cleveland: K. B. BHASIN, M. TABIB-AZAR	New South Wales: T. S. BIRD, C. WILSON	St. Petersburg: S. TRETAKOV
College Station: R. NEVELS, C. NGUYEN	New York/Long Island: M. HANCZOR	Sweden: J. JOHANSSON, S. HAGELIN
Columbus: R. LEE, H. SHAMANSKY	Nizhny Novgorod: Y. I. BELOV	Switzerland: L. PROST, W. BACHTOLD
Czechoslovakia: P. PECHAC	North Italy: C. N. NALDI	Syracuse: T. SARKAR, W. SONG
Dallas: C. LEE, S. PIERCE	North Jersey: C. GUPTA, W. SCHMIDT	Taiwan: S. H. HSU, J. L. LIUANG
Dayton: G. SIMPSON, R. LAYDEN	Novosibirsk: B. KAPILEVICH	Tbilisi: D. KARKASHADZE
Denver-Boulder: R. G. GEYER	Orlando: T. IVANOV	Thailand: N. YOTHANOM
Egypt: O. L. EL-SAYED	Ottawa: D. H. REEKIE	Tokyo: T. NISHIKAWA
Finland: A. H. SIHVOLA, J. E. AURINSALO	Philadelphia: W. D. JEMISON, E. HOLZMAN	Toronto: T. E. VAN DEVENTER
Florida West Coast: M. SMITH, H. HILL	Phoenix: A. C. REYES	Tucson: H. C. KOHLBACHER, R. J. FINGER
Foothills: S. M. SAAD, K. SCHOEDER	Poland: W. GWAREK, B. LEVITAS, S. A. MALYSHEV	Turkey: A. BUYULKALSOY
France: R. F. ADDE, H. BAUDRAND	Portland: V. K. TRIPATHI, E. GODSHALK	Twin Cities: M. J. GAWRONSKI, J. LARSON
Germany: N. KEEN, J. D. BUCHS	Princeton/Central Jersey: W. R. CURTICE, A. KATZ	Ukraine East: A. I. NOSICH
Greece: G. KIRIAKIDIS	Rio de Janeiro/Brazil: J. R. BERGMANN, F. J. HASSELMANN	Ukraine Kiev: Y. M. POPLAVKO
Hong Kong: K. K. MEI	Russia: V. LIOUBTCHENKO	Ukraine West: N. N. VOITOVICH
Houston: J. T. WILLIAMS, S. A. LONG	San Diego: P. YU, S. HARTS	United Kingdom/Ireland: N. WILLIAMS, A. A. REZAZADEH
Hungary: I. FRIGYES, T. BERCELI	San Fernando Valley: J. WEILER, JR., H. C. BELL	Venezuela: A. N. BIANCHI, R. SANCHES
Huntsville: H. L. BENNETT, C. PLANT	Santa Clara Valley/San Francisco: L. M. BURNS	Virginia Mountain: H. P. SINGH
India: K. S. CHARI, M. H. KORI	Sao Paulo: A. O. M. ANDRADE, E. D. LAGRIMAS, D. CONSONI	Washington DC/Northern Virginia: S. F. DALA, S. N. BAIJAI
Indonesia: D. SIRAT		Winnipeg: L. SHAFAI
Israel: A. MADJAR, S. AUSTER		Yugoslavia: B. S. JOCANOVIC, O. BORIC

IEEE TRANSACTIONS® ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES

Associate Editors

Editor			
JAMES W. MINK	WOLFGANG J. R. HOEFER	FAZAL ALI	LINDA KATEHI
North Carolina State Univ.	(<i>Electromagnetics/Guided Waves</i>)	(<i>Applications, Tutorial, and Review</i>)	(<i>Special Issues and Invited Papers</i>)
Dept. of Elect. and Computer Eng.	Univ. of Victoria	Nokia Mobile Phones	University of Michigan
232 Daniels Hall	P. O. Box 3055	R&D Center	EECS Department
Box 7911	Victoria, British Columbia	9605 Scranton Rd.	3240 EECS Bldg.
Raleigh, NC 27695-7911	Canada V8W 3P6	Suite 450	1301 Beal Avenue
Phone: (919) 513-1803	Phone: +1 (250) 721-6030	San Diego, CA 92121	Ann Arbor, MI 48109-2122
Fax: (919) 513-1803	Fax: +1 (250) 721-6030	Phone: (619) 450-4020, ext. 331	Phone: (313) 747-1796
email: j.mink@ieee.org	email: whoefer@eee.uvic.ca	Fax: (619) 677-7980	Fax: (313) 747-2106
	email: w.hoefer@ieee.org	email: fazal.ali@nmp.nokia.com	email: katehi@eecs.umich.edu

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC.

Officers

JOSEPH BORDOGNA, <i>President</i>	FRIEDOLF M. SMITS, <i>Vice President, Publication Activities</i>
KENNETH R. LAKER, <i>President-Elect</i>	DANIEL R. BENIGNI, <i>Vice President, Regional Activities</i>
ANTONIO C. BASTOS, <i>Secretary</i>	L. JOHN RANKINE, <i>Vice President, Standards Association</i>
BRUCE A. EISENSTEIN, <i>Treasurer</i>	LLOYD A. MORLEY, <i>Vice President, Technical Activities</i>
ARTHUR WINSTON, <i>Vice President, Educational Activities</i>	JOHN R. REINERT, <i>President, IEEE USA</i>

WILLIAM G. DUFF, *Director, Division IV—Electromagnetics and Radiation*

Executive Staff

DANIEL J. SENESE, *Executive Director*

DONALD CURTIS, <i>Human Resources</i>	RICHARD D. SCHWARTZ, <i>Business Administration</i>
ANTHONY J. FERRARO, <i>Publications</i>	W. THOMAS SUTTLE, <i>Professional Activities</i>
JUDITH GORMAN, <i>Standards Activities</i>	MARY WARD-CALLAN, <i>Technical Activities</i>
CECELIA JANKOWSKI, <i>Regional Activities</i>	JOHN WITSKEN, <i>Information Technology</i>
PETER A. LEWIS, <i>Educational Activities</i>	

IEEE Periodicals

Transactions/Journals Department

Staff Director: FRAN ZAPPULLA

Editorial Director: VALERIE CAMMARATA

Production Director: ROBERT SMREK

Transactions Manager: GAIL S. FERENC

Electronic Publishing Manager: TOM BONTRAGER

Managing Editor: MONA MITTRA

Associate Editor: CHRISTINA M. REZES

IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES (ISSN 0018-9480) is published monthly by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Responsibility for the contents rests upon the authors and not upon the IEEE, the Society/Council, or its members. **IEEE Corporate Office:** 345 East 47 Street, New York, NY 10017-2394. **IEEE Operations Center:** 445 Hoes Lane, P.O. Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331. **NJ Telephone:** 732-981-0060. **Price/Publication Information:** Individual copies: IEEE Members \$10.00 (first copy only), nonmembers \$20.00 per copy. (Note: Add \$4.00 postage and handling charge to any order from \$1.00 to \$50.00, including prepaid orders.) Member and nonmember subscription prices available upon request. Available in microfiche and microfilm. **Copyright and Reprint Permissions:** Abstracting is permitted with credit to the source. Libraries are permitted to photocopy for private use of patrons, provided the per-copy fee indicated in the code at the bottom of the first page is paid through the Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923. For all other copying, reprint, or republication permission, write to Copyrights and Permissions Department, IEEE Publications Administration, 445 Hoes Lane, P.O. Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331. Copyright © 1998 by The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved. Periodicals Postage Paid at New York, NY and at additional mailing offices. **Postmaster:** Send address changes to IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, IEEE, 445 Hoes Lane, P.O. Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331. GST Registration No. 125634188. Printed in U.S.A.

MTT-S TECHNICAL COMMITTEE CHAIRMEN

Coordinating Chairman: F. J. SULLIVAN, JR.

Computer-Aided Design

K. C. GUPTA
C. M. SNOWDEN

Microwave Acoustics

B. R. MC AVOY
R. WEIGEL

Lightwave Technology

R. KNERR
P. R. HERCZFELD

Submillimeter-Wave Techniques

G. REBEIZ

Microwave High-Power Techniques

J. GOEL
D. W. REID

Microwave and Millimeter-Wave Integrated Circuits

F. ALI

Microwave and Millimeter-Wave Solid-State Devices

H. J. KUNO
M. S. GUPTA

Filters and Passive Components

R. V. SNYDER

Digital Signal Processing

C. T. M. CHANG
J. B. Y. TSUI

Biological Effects and Medical Applications

A. ROSEN
A. VANDERVORST

Microwave Measurements

R. E. HAM
J. T. BARR, IV
S. F. ADAM

Microwave and Millimeter Wave Packaging/Manufacturing

R. STURDIVANT
V. TRIPATHI

Microwave Ferrites

J. M. OWENS
J. D. ADAM

Microwave Low Noise Techniques

J. J. WHELEHAN, JR.

Microwave Field Theory

J. W. MINK
W. J. HOEFER

Microwave Systems

K. D. BREUER
G. HEITER

Microwave Systems

Phased and Active Arrays

D. C. ZIMMERMAN
Transportation Systems
R. DIXIT, L. E. RAFFAELLI

HF-UHF Technology

F. H. RAAB
H. C. BELL

Microwave Superconductivity

M. NISENOFF
G. LIANG

Microwave Technology Business Issues

VACANT

Wireless Communication

B. D. GELLER
J. B. HORTON

EDITORIAL BOARD

Editor: J. W. MINK

M. D. Abouzahra
J. D. Adam
M. G. Adlerstein
K. K. Agarwal
C. S. Aitchison
M. Akaike
Y. Akaiwa
M. I. Aksun
N. G. Alexopoulos
S. Amari
I. Angelov
R. E. Anholt
W. J. Anklam
J. W. Archer
F. Arndt
H. Ashoka
A. E. Atia
N. F. Audeh
Y. Ayasli
I. J. Bahl
A. J. Bahr
S. N. Bajpai
J. Baker-Jarvis
C. A. Balanis
J. W. Bandler
I. Bardi
F. S. Barnes
J. T. Barr
P. P. Barsony
T. E. Batchman
B. D. Bates
H. Baudrand
B. Beker
I. Bennion
T. M. Benson
J. Berenz
P. A. Bernard
A. Beyer
K. Bhasin
M. E. Bialkowski
R. M. Biernacki
G. L. Bilbro
J. R. Birch
O. Biro
D. Blackham
J. Bormemann
R. G. Bosio
J. Braunstein
K. Brennan
M. Bressan
T. M. Brookes
R. E. Brown
M. Bujatti
C. Buntschuh
D. P. Butler
J. Butler
A. C. Cangellaris
S. Caorsi
A. Cappy
L. Carin
J. W. Carlin
J. E. Carroll
R. H. Caverly
Z. J. Cendes
C. H. Chan
K. Chang
W. Charczenko

S. K. Chaudhuri
C.-H. Chen
S. H. Chen
Z. Chen
W. C. Chew
C.-K. Chou
K. R. Chu
M. Claassen
R. E. Collin
B. Colpitts
R. C. Compton
G. Conciauro
H. M. Cronson
T. W. Crowe
C. W. Crowley
A. L. Cullen
W. R. Curtice
L. C. da Silva
S. D'Agostino
A. S. Daryoush
N. K. Das
M. Davidovitz
J. B. Davies
L. E. Davis
D. Dawson
H. De Los Santos
A. A. De Salles
D. De Zutter
J. E. Degenford
G. Y. Delisle
E. J. Denlinger
A. J. Devaney
R. Diaz
N. Dib
A. R. Djordjevic
J. Doane
J. Dobrowolski
L. Dunleavy
S. L. Dvorak
M. Dydyk
J. East
H. Eisele
R. L. Eisenhart
S. El-Ghazaly
A. Z. Elsherbeni
N. Engheta
W. J. English
N. R. Erickson
L. Escotte
R. D. Esman
C. Eswarappa
H. J. Eul
G. W. Ewell
M. Faber
N. Fache
D. G. Fang
J. Fang
D. A. Fathy
A. Feldman
A. Fernandez
A. Ferrero
S. J. Fiedziuszko
J. G. Fikioris
C. A. Flory
C. H. Flyagin
K. R. Foster
G. Franceschetti

J. L. Freeman
R. Froelich
K. Fukui
G. Gabriel
R. J. Gagne
Z. Galani
F. E. Gardiol
C. M. Gee
B. Gelmont
G. G. Gentili
M. Geshiro
W. Geyi
F. M. Ghannouchi
G. Ghione
A. J. Giarola
R. J. Gilmore
A. W. Glisson
J. Goel
P. F. Goldsmith
K. Goossen
A. Gopinath
N. Goto
C. Gough
R. Goyal
J. Graffeul
J. D. Graglia
M. Guglielmi
P. Guillon
K. C. Gupta
M. S. Gupta
R. J. Gutmann
W. K. Gwarek
P. R. Haddad
D. Halchin
M. A. K. Hamid
V. F. Hanna
G. W. Hanson
W. Harth
H. L. Hartnagel
J. Harvey
M. Hashimoto
E. E. Hassan
H. A. Haus
Y. Hayashi
W. Heinrich
G. L. Heiter
J. Helszajn
P. R. Herczfeld
N. Herscovici
D. A. Hill
K. Hirai
W. J. R. Hoefer
R. K. Hoffmann
A. J. Holden
K. Hongo
W. E. Hord
D. Hombuckle
M. Horno
J. B. Horton
M. C. Horton
B. Houshmand
H. How
H. Howe
M. J. Howes
C.-W. Hsue
F. P. Hunsberger
J. C. M. Hwang

R. J. Hwu
T. Itoh
D. Jablonski
C. Jackson
D. R. Jackson
R. W. Jackson
A. F. Jacob
N. Jain
G. L. James
R. Janaswamy
J. M. Jarem
A. Jelenski
S. K. Jeng
J. Jin
W. T. Joines
J. S. Joshi
K. Joshin
A. Jostingmeier
E. B. Joy
S. Kagami
D. Kajfez
M. Kanda
A. Karp
T. Kashiwa
L. P. B. Katehi
F. Kauffman
S. Kawakami
R. Keam
R. T. Kemerley
P. C. Kendall
P. Kennis
A. R. Kerr
P. J. Khan
J.-F. Kiang
R. W. P. King
R. J. King
T. Kitazawa
R. H. Knerr
Y. Kobayashi
T. Koike
A. Koksai
E. L. Kollberg
J. J. Komiak
J. A. Kong
A. Konrad
M. Koshiba
N. H. L. Koster
S. K. Koul
A. W. Kraszewski
J. G. Kretschmar
C. M. Krowne
J. Krupka
W. Kruppa
C. M. Kudsia
E. Kuhn
H. J. Kuno
A. Lakhtakia
P. Lampariello
P. A. A. Laura
J.-F. Lee
D. Levine
R. Levy
G.-C. Liang
L. P. Ligthart
J. C. Lin
I. V. Lindell
H. Ling

D. K. Linkhart
J. Litva
O. Llopi
R. Luebbers
W. G. Lyons
S. A. Maas
R. H. MacPhie
A. Madjar
S. Maeda
S. F. Mahmoud
M. L. Majewski
M. Makimoto
T. Manabe
R. R. Mansour
S. Marchetti
L. Marchildon
R. B. Marks
R. Marques
L. Martens
R. G. Martin
K. D. Marx
A. Materka
G. L. Matthaei
D. S. Matthews
J. R. Mautz
S. R. Mazumder
J. Mazur
R. W. McMillan
F. Medina
K. K. Mei
W. Menzel
F. Merat
F. Mesa
J. S. Metcalfe
R. Minasian
J. W. Mink
R. Mittra
M. Miyagi
K. Mizuno
S. Mizushima
C. I. Mobbs
A. H. Mohammadian
J. P. Mondal
M. Mongiardo
C. R. Moore
J. Morente
N. Morita
A. Mortazawi
M. Muraguchi
Y. Naito
M. Nakajima
A. Nakatani
M. S. Nakhla
C. U. Naldi
S. Nam
E. A. Navarro
A. Navarro
E. H. Newman
M. Ney
K. T. Ng
C. Nguyen
K. B. Niclas
Y. Nikawa
W. T. Nisbet
T. Nishikawa
M. Norgren
D. Novak

D. P. Nyquist
D. E. Oates
J. Obregon
M. Odyniec
H. Ogawa
K. Ohata
F. Okada
Y. Okamura
A. A. Oliner
A. D. Olver
F. Olyslager
A. S. Omar
K. Osafune
R. W. Paglione
S.-G. Pan
A. Paoletta
R. Parry
M. Pastorino
C. R. Paul
S. E. Paulsen
D. Pavlidis
J. A. Pearce
R. Pengelly
J. A. Pereda
A. F. Peterson
C. Pichot
W. F. Pickard
A. R. Pinchuk
W. Platte
R. D. Pollard
G. E. Ponchak
G. S. Smith
M. Pospieszalski
D. M. Pozar
P. Pramanick
S. Prasad
R. Pregla
A. C. Priou
R. A. Pucel
R. Quere
J. Railton
C. Rauscher
J. Rautio
G. M. Rebeiz
J. M. Rebolgar
C.-L. Ren
S. R. Rengarajan
J. D. Rhodes
G. P. Riblet
H. J. Riblet
A. N. Riddle
C. L. Rino
P. Rizzi
V. Rizzoli
G. P. Rodrigue
M. J. W. Rodwell
U. L. Rohde
D. E. Root
A. Rosen
J. A. Roumeliotis
G. Roussy
H. E. Rowe
T. E. Rozzi
P. Russer
D. Rutledge
A. Rydberg
D. Rytting

M. N. O. Sadiku
P. K. Saha
J. N. Sahalos
J. Sakai
A. A. M. Saleh
A. J. Sangster
T. K. Sarkar
R. Sato
G. Saulich
J. O. Scanlan
D. H. Schaubert
M. Schetzen
B. Schiek
M. Schindler
L. P. Schmidt
M. V. Schneider
W. Schroeder
K. F. Schunemann
J. E. Schutt-Aine
S. E. Schwarz
F. K. Schwing
A. J. Seeds
A. K. Sharma
H. Shigesawa
T. Shiozawa
N. V. Shuley
M. Shur
A. H. Sihvola
N. R. S. Simons
R. N. Simons
C. E. Smith
G. S. Smith
C. M. Snowden
A. W. Snyder
R. V. Snyder
R. A. Soares
H. Sobol
V. Sokolov
K. Solbach
M. N. Solomon
P. Staecker
B. Stallard
D. D. Stancil
J. P. Starski
M. B. Steer
K. D. Stephan
M. S. Stern
E. W. Strid
S. S. Stuchly
C.-C. Su
S. E. Sussman-Fort
J. Svedin
D. G. Swanson
C. Swift
W. Tabbara
M. Tabib-Azar
A. Taflove
C. T. Tai
Y. Takimoto
S. H. Talisa
K. Tomiyasu
S. Tretyakov
R. J. Trew
G. P. Tricoles
V. K. Tripathi
A. Truitt
J. L. Tsalamengas

M. Tsuji
M. Tsutsumi
R. S. Tucker
C. W. Turner
T. Uchida
A. Uhler
T. ul Haq
F. T. Ulaby
N. K. Uzunoglu
R. Vahldieck
M. Valtonen
P. M. van den Berg
A. VanderVost
V. V. Varadan
G. D. Vendelin
C. Vittoria
R. H. Voelker
R. W. Vogel
J. Volakis
V. Volman
P. Waldow
J. L. B. Walker
K. Wang
N. L. Wang
S. Watanabe
R. Waugh
D. Webb
J. P. Webb
K. J. Webb
R. M. Weikle
S. Weinreb
J. A. Weiss
A. Weisshaar
C. P. Wen
R. J. Wenzel
J. Whitaker
J. F. White
K. W. Whites
W. Wiesbeck
A. E. Williams
A. G. Williamson
J. C. Wiltse
F. Winter
H. W. Wintroub
I. Wolff
K.-L. Wong
T. Wong
G. S. Woods
K. Wu
R.-B. Wu
S.-C. Wu
Y. S. Wu
H. Yabe
E. Yamashita
H.-Y. Yang
K. Yashiro
K. Yasumoto
K. S. Yee
T. S. Yeo
K. S. Yngvesson
T. Yoneyama
R. A. York
N. Yoshida
A. M. Young
K. A. Zaki
C. Zuffada