



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	

Honorary Life Members

A. C. BECK
S. B. COHN
T. ITOH

K. TOMIYASU
L. YOUNG

Distinguished Lecturers

R. DIXIT
P. HERCZFELD
W. MENZEL

Past Presidents

R. E. BRYAN (1997)
J. W. WASSEL (1996)
E. D. COHEN (1995)

S-MTT Chapter Chairmen

Albuquerque: E. G. FARR
Atlanta: G. D. HOPKINS
Baltimore: J. MOELLERS, B. SEQUEIRA
Beijing: Y.-R. ZHONG
Benelux: K. VAN'T KLOOSTER, B. NAUWELAERS
Buffalo: M. R. GILLETTE, H. MORRISON
Bulgaria: H. D. HRISTOV, P. I. PHILIPPOV
Central Iowa/Cedar Rapids: J. C. COZZIE, S. BURNS
Central New England/Boston: P. CARR, P. MCCLAY
Central & South Italy: P. PAOLO, P. STEFANO
Chicago: E. G. BOGUS, J. P. PHILLIPS
Cleveland: K. B. BHASIN, M. TABIB-AZAR
College Station: R. NEVELS, C. NGUYEN
Columbus: R. LEE, H. SHAMANSKY
Czechoslovakia: M. ZEMAN, J. SVACINA
Dallas: C. LEE, S. PIERCE
Dayton: G. SIMPSON, R. LAYDEN
Denver-Boulder: R. G. GEYER
Egypt: O. L. EL-SAYED
Finland: A. H. SIHVOLA, J. E. AURINSALO
Florida West Coast: M. SMITH, H. HILL
Foothills: S. M. SAAD, K. SCHOEDER
France: R. F. ADDE, H. BAUDRAND
Germany: N. KEEN, J. D. BUCHS
Greece: G. KIRIAKIDIS
Hong Kong: K. K. MEI
Houston: J. T. WILLIAMS, S. A. LONG
Hungary: I. FRIGYES, T. BERCELI
Huntsville: H. L. BENNETT, C. PLANT
India: K. S. CHARI, M. H. KORI
Indonesia: D. SIRAT
Israel: A. MADJAR, S. AUSTER

Ithaca: R. C. COMPTON, N. KOLIAS
Kitchener-Waterloo: Y. L. CHOW
Korea: D. C. PARK
Los Angeles: R. STURDIVANT, E. W. RAY
Milwaukee: J. RICHIE, D. MISRA
Minsk Belarus: S. A. MALYSHEV
Montreal: G. L. YIP, C. C. HUANG
Moscow: V. E. LYUBCHENKO
Nanjing: W. X. ZHANG
New Hampshire: D. L. BACON
New Jersey Coast: A. PAOLELLA, M. MIZAN
New South Wales: T. S. BIRD, C. WILSON
New York/Long Island: F. WINTER, R. POMIANER
Nizhny Novgorod: Y. I. BELOV
North Italy: C. V. NALDI
North Jersey: C. GUPTA, W. SCHMIDT
Novosibirsk: B. KAPILEVICH
Orlando: T. IVANOV
Ottawa: D. H. REEKIE
Philadelphia: W. D. JEMISON, E. HOLZMAN
Phoenix: C. A. GAW, J. T. ABERLE
Poland: W. GWAREK, E. SEDEK
Portland: V. K. TRIPATHI, E. GODSHALK
Princeton/Central Jersey: W. R. CURTICE, A. KATZ
Rio de Janeiro/Brazil: J. R. BERGMANN, F. J. HASSELMANN
Russia: V. LIOUTCHENKO
San Diego: P. YU, S. HARTS
San Fernando Valley: J. WEILER, JR., H. C. BELL
Santa Clara Valley/San Francisco: S. F. WETENKAMP
Sao Paulo: A. O. M. ANDRADE, E. D. LAGRIMAS, D. CONSONI

Saratov/Penza: M. V. DAVIDOVICH
Schenectady: R. J. GUTMANN
Seattle: W. CHARCZENKA, M. CHEN
Singapore: M. S. LEONG-SENG, S. P. YEO
South Africa: D. B. DAVIDSON, J. CLOETE
South Australia: B. D. BATES, A. J. PARFITT
South Brevard Indian River: T. E. DURHAM, M. THURSBY
Southeastern Michigan: J. W. BURNS, T. GROTHORN
Spain: M. SALAZAR-PALMA, L. DEHARO
Springfield: K. M. LAU
St. Louis: G. J. SCHMITT, M. STINSON
St. Petersburg: S. TRETYAKOV
Sweden: J. JOHANSSON, S. HAGELIN
Switzerland: L. PROST, W. BACHTOLD
Syracuse: T. SARKAR, W. SONG
Taiwan: S. H. HSU, J. L. LIUANG
Tbilisi: D. KARKASHADZE
Thailand: N. YOOTHANOM
Tokyo: T. NISHIKAWA
Toronto: T. E. VAN DEVENTER
Tucson: H. C. KOHLBACHER, R. J. FINGER
Turkey: A. BUYULKALSOY
Twin Cities: M. J. GAWRONSKI, J. LARSON
Ukraine East: A. I. NOSICH
Ukraine Kiev: Y. M. POPLAVKO
Ukraine West: N. N. VOITOVICH
United Kingdom/Ireland: N. WILLIAMS, A. A. REZAZADEH
Venezuela: A. N. BIANCHI, R. SANCHES
Virginia Mountain: H. P. SINGH
Washington DC/Northern Virginia: E. FUNK
Winnipeg: H. MOHEB, M. BARAKAT
Yugoslavia: B. S. JOCANOVIC, O. BORIC

IEEE TRANSACTIONS® ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES

Editor

JAMES W. MINK
North Carolina State Univ.
Dept. of Elect. and Computer Eng.
232 Daniels Hall
Box 7911
Raleigh, NC 27695-7911
Phone: (919) 513-1803
Fax: (919) 513-1803
email: j.mink@ieee.org

WOLFGANG J. R. HOEFER
(*Electromagnetics/Guided Waves*)
Univ. of Victoria
P. O. Box 3055
Victoria, British Columbia
Canada V8W 3P6
Phone: +1 (250) 721-6030
Fax: +1 (250) 721-6030
email: whoefer@eee.uvic.ca
email: w.hoefer@ieee.org

Associate Editors

FAZAL ALI
(*Applications, Tutorial, and Review*)
Nokia Mobile Phones
R&D Center
9605 Scranton Rd.
Suite 450
San Diego, CA 92121
Phone: (619) 450-4020, ext. 331
Fax: (619) 677-7980
email: fazal.ali@nmp.nokia.com

LINDA KATEHI
(*Special Issues and Invited Papers*)
University of Michigan
EECS Department
3240 EECS Bldg
1301 Beal Avenue
Ann Arbor, MI 48109-2122
Phone: (313) 747-1796
Fax: (313) 747-2106
email: katehi@eecs.umich.edu

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC.

1997 Officers

CHARLES K. ALEXANDER, *President*
JOSEPH BORDOGNA, *President-Elect*
PAUL Y. S. CHEUNG, *Secretary*
HOWARD L. WOLFMAN, *Treasurer*
JERRY R. YEARGAN, *Vice President, Educational Activities*

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

Executive Staff

DANIEL J. SENESE, *Executive Director*

DANIEL R. BENIGNI, *Vice President, Professional Activities*
FRIEDOLF M. SMITS, *Vice President, Publication Activities*
RAYMOND D. FINDLAY, *Vice President, Regional Activities*
DONALD C. LOUGHRY, *Vice President, Standards Activities*
LLOYD A. MORLEY, *Vice President, Technical Activities*

DONALD CURTIS, *Human Resources*
ANTHONY J. FERRARO, *Publications*
CECELIA JANKOWSKI, *Regional Activities*
PETER A. LEWIS, *Educational Activities*
ANDREW G. SALEM, *Standards Activities*

RICHARD D. SCHWARTZ, *Business Administration*
W. THOMAS SUTTLE, *Professional Activities*
MARY WARD-CALLAN, *Technical Activities*
JOHN WITSKEN, *Information Technology*

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	S. K. Chaudhuri	J. L. Freeman	R. J. Hwu	D. K. Linkhart	D. P. Nyquist	M. N. O. Sadiku	M. Tsuji
J. D. Adam	C.-H. Chen	R. Froelich	T. Itoh	J. Litva	D. E. Oates	P. K. Saha	M. Tsutsumi
M. G. Adlerstein	S. H. Chen	K. Fukui	D. Jablonski	O. Llopis	J. Obregon	J. N. Sahalos	R. S. Tucker
K. K. Agarwal	Z. Chen	G. Gabriel	C. Jackson	R. Luebbers	M. Odnienic	J. Sakai	C. W. Turner
C. S. Aitchison	W. C. Chew	R. J. Gagne	D. R. Jackson	W. G. Lyons	H. Ogawa	A. A. M. Saleh	T. Uchida
M. Akaike	C.-K. Chou	Z. Galani	R. W. Jackson	S. A. Maas	K. Ohata	A. J. Sangster	A. Uhlir
Y. Akaiwa	K. R. Chu	F. E. Gardiol	A. F. Jacob	R. H. MacPhie	F. Okada	T. K. Sarkar	T. ul Haq
M. I. Aksun	M. Claassen	C. M. Gee	N. Jain	A. Madjar	Y. Okamura	R. Sato	F. T. Ulaby
N. G. Alexopoulos	R. E. Collin	B. Gelmont	G. L. James	S. Maeda	A. A. Oliner	G. Saulich	N. K. Uzunoglu
S. Amari	B. Colpitts	G. G. Gentili	R. Janaswamy	S. F. Mahmoud	A. D. Olver	J. O. Scanlan	R. Vahldieck
I. Angelov	R. C. Compton	M. Geshiro	J. M. Jarem	M. L. Majewski	F. Olyslager	D. H. Schaubert	M. Valtonen
R. E. Anholt	G. Conciauro	W. Geyi	A. Jelenski	M. Makimoto	A. S. Omar	M. Schetzen	P. M. van den Berg
W. J. Anklam	H. M. Cronson	F. M. Ghannouchi	S. K. Jeng	T. Manabe	K. Osafune	B. Schiek	A. VanderVost
J. W. Archer	T. W. Crowe	G. Ghione	J. Jin	R. R. Mansour	R. W. Paglione	M. Schindler	V. V. Varadan
F. Arndt	C. W. Crowley	A. J. Giarola	W. T. Joines	S. Marchetti	S.-G. Pan	L. P. Schmidt	G. D. Vendelin
H. Ashoka	A. L. Cullen	R. J. Gilmore	J. S. Joshi	L. Marchildon	A. Paoletta	M. V. Schneider	C. Vittoria
A. E. Atia	W. R. Curtice	A. W. Glisson	K. Joshin	R. B. Marks	R. Parry	W. Schroeder	R. H. Volker
N. F. Audeh	L. C. da Silva	J. Goel	A. Jostingmeier	R. Marques	M. Pastorino	K. F. Schunemann	R. W. Vogel
Y. Ayasli	S. D'Agostino	P. F. Goldsmith	E. B. Joy	L. Martens	C. R. Paul	J. E. Schutt-Aine	J. Volakis
I. J. Bahl	A. S. Daryoush	K. Goossen	S. Kagami	R. G. Martin	K. E. Paulsen	S. E. Schwarz	V. Volman
A. J. Bahr	N. K. Das	A. Gopinath	D. Kajfez	K. D. Marx	D. Pavlidis	F. K. Schwing	P. Waldow
S. N. Bajpai	M. Davidovitz	N. Goto	M. Kanda	A. Materka	J. A. Pearce	A. J. Seeds	J. L. B. Walker
J. Baker-Jarvis	J. B. Davies	C. Gough	A. Karp	G. L. Matthaei	R. Pengelly	A. K. Sharma	K. Wang
C. A. Balanis	L. E. Davis	R. Goyal	T. Kashiwa	D. S. Matthews	J. A. Pereda	H. Shigesawa	N. L. Wang
J. W. Bandler	D. Dawson	J. Graffeuil	L. P. B. Katehi	J. R. Mautz	A. F. Peterson	T. Shiozawa	S. Watanabe
I. Bardi	H. De Los Santos	R. D. Graglia	F. Kauffman	S. R. Mazumder	C. Pichot	N. V. Shuley	R. Waugh
F. S. Barnes	A. A. De Salles	M. Guglielmi	S. Kawakami	J. Mazur	W. F. Pickard	M. Shur	D. Webb
J. T. Barr	D. De Zutter	P. Guillon	R. Keam	R. W. McMillan	A. R. Pinchuk	A. H. Sihvola	J. P. Webb
P. P. Barsony	J. E. Degenford	K. C. Gupta	R. T. Kemerley	F. Medina	W. Platte	N. R. S. Simons	K. J. Webb
T. E. Batchman	G. Y. Delisle	M. S. Gupta	P. C. Kendall	K. K. Mei	R. D. Pollard	R. N. Simons	R. M. Weikle
B. D. Bates	E. J. Denlinger	R. J. Gutmann	P. Kennis	W. Menzel	G. E. Ponchak	C. E. Smith	S. Weinreb
H. Baudrand	A. J. Devaney	F. K. Gwarek	A. R. Kerr	F. Merat	Z. Popovic	G. S. Smith	J. A. Weiss
B. Beker	R. Diaz	P. R. Haddad	P. J. Khan	F. Mesa	M. Pospieszalski	C. M. Snowden	A. Weisshaar
I. Bennion	N. Dib	D. Halchin	J.-F. Kiang	J. S. Metcalfe	D. M. Pozar	A. W. Snyder	C. P. Wen
T. M. Benson	A. R. Djordjevic	M. A. K. Hamid	R. W. P. King	R. Minasian	P. Pramanick	R. V. Snyder	R. J. Wenzel
J. Berenz	J. Doane	V. F. Hanna	R. J. King	J. W. Mink	S. Prasad	R. A. Soares	J. Whitaker
P. A. Bernard	J. Dobrowolski	G. W. Hanson	T. Kitazawa	R. Mittra	R. Pregla	H. Sobol	J. F. White
A. Beyer	L. Dunleavy	W. Harth	R. H. Knerr	M. Miyagi	A. C. Priou	V. Sokolov	K. W. Whites
K. Bhasin	S. L. Dvorak	H. L. Hartnagel	Y. Kobayashi	K. Mizuno	R. A. Pucel	K. Solbach	W. Wiesbeck
M. E. Bialkowski	M. Dydyk	J. Harvey	T. Koike	S. Mizushima	R. Quere	M. N. Solomon	A. E. Williams
R. M. Biernacki	J. East	M. Hashimoto	A. Koksai	C. I. Mobbs	C. J. Railton	P. Staecker	A. G. Williamson
G. L. Bilbro	H. Eisele	E. E. Hassan	E. L. Kollberg	A. H. Mohammadian	C. Rauscher	B. Stallard	J. C. Wiltse
J. R. Birch	R. L. Eisenhart	H. A. Haus	J. J. Komik	J. P. Mondal	J. Rautio	D. D. Stancil	F. Winter
O. Biro	S. El-Ghazaly	Y. Hayashi	J. A. Kong	M. Mongiardo	G. M. Rebeiz	J. P. Starski	H. W. Wintroub
D. Blackham	A. Z. Elsherbeni	W. Heinrich	A. Konrad	C. R. Moore	J. M. Rebolgar	M. B. Steer	I. Wolff
J. Bormemann	N. Engheta	G. L. Heiter	M. Koshiba	J. Morente	C.-L. Ren	K. D. Stephan	K.-L. Wong
R. G. Bosio	W. J. English	J. Helszajn	N. H. L. Koster	N. Morita	S. R. Rengarajan	M. S. Stern	T. Wong
J. Braunstein	N. R. Erickson	P. R. Herczfeld	S. K. Koul	A. Mortazawi	J. D. Rhodes	E. W. Strid	G. S. Woods
K. Brennan	L. Escotte	N. Herscovici	A. W. Kraszewski	M. Muraguchi	G. P. Riblet	S. S. Stuchly	K. Wu
M. Bressan	R. D. Esman	D. A. Hill	J. G. Kretschmar	Y. Naito	H. J. Riblet	C.-C. Su	R.-B. Wu
T. M. Brookes	C. Eswarappa	K. Hirai	C. M. Krowne	M. Nakajima	A. N. Riddle	S. E. Sussman-Fort	S.-C. Wu
R. E. Brown	H. J. Eul	W. J. R. Hoefer	J. Krupka	A. Nakatani	C. L. Rino	J. Svedin	Y. S. Wu
M. Bujatti	G. W. Ewell	R. K. Hoffmann	W. Kruppa	M. S. Nakhla	P. Rizzi	D. G. Swanson	H. Yabe
C. Buntschuh	M. Faber	A. J. Holden	C. M. Kudsia	C. U. Naldi	V. Rizzoli	C. Swift	E. Yamashita
D. P. Butler	N. Fache	K. Hongo	E. Kuhn	S. Nam	G. P. Rodrigue	W. Tabbara	H.-Y. Yang
J. Butler	D. G. Fang	W. E. Hord	H. J. Kuno	E. A. Navarro	M. J. W. Rodwell	M. Tabib-Azar	K. Yashiro
A. C. Cangellaris	J. Fang	D. Hombuckle	A. Lakhtakia	A. Navarro	U. L. Rohde	A. Taflove	K. Yasumoto
S. Caorsi	D. A. Fathy	M. Horno	P. Lampariello	E. H. Newman	D. E. Root	C. T. Tai	K. S. Yee
A. Cappy	M. Feldman	J. B. Horton	P. A. A. Laura	M. Ney	A. Rosen	Y. Takimoto	T. S. Yeo
L. Carin	A. Fernandez	M. C. Horton	J.-F. Lee	K. T. Ng	J. A. Roumeliotis	S. H. Talisa	K. S. Yngvesson
J. W. Carlin	A. Ferrero	B. Houshmand	D. Levine	C. Nguyen	G. Roussy	K. Tomiyasu	T. Yoneyama
J. E. Carroll	S. J. Fiedziuszko	H. How	R. Levy	K. B. Niclas	H. E. Rowe	S. Tretyakov	R. A. York
R. H. Caverly	J. G. Fikioris	H. Howe	G.-C. Liang	Y. Nikawa	T. E. Rozzi	R. J. Trew	N. Yoshida
Z. J. Cendes	C. A. Flory	M. J. Howes	L. P. Ligthart	W. T. Nisbet	P. Russer	G. P. Tricoles	A. M. Young
C. H. Chan	V. A. Flyagin	C.-W. Hsue	J. C. Lin	T. Nishikawa	D. Rutledge	V. K. Tripathi	K. A. Zaki
K. Chang	K. R. Foster	F. P. Hunsberger	I. V. Lindell	M. Norgren	A. Rydberg	A. Truitt	C. Zuffada
W. Charczenko	G. Franceschetti	J. C. M. Hwang	H. Ling	D. Novak	D. Rytting	J. L. Tsalamengas	