



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

J. W. WASSEL, *President*

R. E. BRYAN, *Vice President*

R. E. LEHMANN, *Secretary*

D. G. SWANSON, *Treasurer*

J. T. BARR
R. E. BRYAN
S. J. FIEDZIUSZKO

Honorary Life Members

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

R. T. KEMERLEY
R. D. POLLARD

K. TOMIYASU
L. YOUNG

E. A. REZEK
M. J. SCHINDLER
R. W. SUDBURY

Distinguished Lecturers

M. V. SCHNEIDER
R. DIXIT

C. M. JACKSON
D. J. SWANSON
J. -W. RA

Past Presidents

E. D. COHEN (1995)
E. J. CRESCENZI (1994)
P. W. STAECKER (1993)

S-MTT Chapter Chairmen

Albuquerque: D. D. MCLEMORE
Atlanta: G. D. HOPKINS
Baltimore: H. B. SEQUEIRA
Beijing: W. G. LIN
W. X. ZHANG
Benelux: K. VAN'T KLOOSTER
Buffalo: M. R. GILLETTE
Bulgaria: H. D. HRISTOV
Central Iowa/Cedar Rapids: J. C. COZZIE
Central & South Italy: P. BERNARDI
Central New England/Boston: C. P. MCCLAY
Central Virginia: S. H. JONES
Chicago: J. DAVALOS
Cleveland: K. B. BHASIN
College Station: R. NEVELS
Columbus: R. LEE
Czechoslovakia: M. ZEMAN
Dallas: S. R. NELSON
Dayton: K. NAISHADHAM
Denver-Boulder: R. G. GEYER
Egypt: I. A. SALEM
Finland: A. H. SIHVOLA
Florida West Coast: M. SMITH
Foothill: K. SCHROEDER
France: R. A. ADDE
Germany: F. ARNDT
Greece: N. K. UZUNOGLU
Houston: J. T. WILLIAMS
R. D. NEVELS
Hong Kong: K. K. MEI
Hungary: I. FRIGYES

Huntsville: H. L. BENNETT
India: K. S. CHARI
Indonesia: S. NATANAGARA
Israel: A. MADJAR
Kitchener-Waterloo: Y. L. CHOW
A. NATHAN
Korea: D. C. PARK
Los Angeles: J. A. VERKADE
Milwaukee: J. RICHIE
Montreal: G. L. YIP
New Hampshire: R. O. GEOFFROY
New Jersey Coast: A. PAOLELLA
New South Wales: T. S. BIRD
New York/Long Island: M. HANCZOR
M. E. KNOX
North Italy: C. U. NALDI
North Jersey: C. GUPTA
Oregon: V. K. TRIPATHI
Orlando: C. CHRISTODOULOU
Ottawa: D. H. REEKIE
Philadelphia: W. D. JEMISON
Phoenix: C. A. GAW
Poland: J. W. MODELSKI
B. LEVITAS
Princeton/Central Jersey: W. R. CURTISE
Rio de Janeiro/Brazil: J. R. BERGMANN
Russia: Y. I. BELOV
S. TRETYAKOV
M. V. DAVIDOVICH
V. LIOUBTCHENKO

San Diego: K.-L. P. YU
San Fernando Valley: M. M. RADMANESH
Santa Clara Valley/San Francisco: S. F. WETENKAMP
Schenectady: R. J. GUTMANN
Seattle: J. MCCANDLESS
Singapore: L. MOOK-SENG
South Africa: D. B. DAVIDSON
South Australia: B. D. BATES
South Brazil: A. O. M. ANDRADE
Southeastern Michigan: J. W. BURNS
Spain: M. SALAZAR-PALMA
Springfield: J. B. MEAD
St. Louis: R. W. KIEFEL
Sweden: P. T. LEWIN
Switzerland: W. BACHTOLD
Syracuse: T. SARKAR
Taipei: G.-L. LIU
Tokyo: Y. KOBAYASHI
Toronto: T. E. VAN DEVENTER
Tucson: H. C. KOHLBACHER
Turkey: A. ALTINTAS
Twin Cities: M. J. GAWRONSKI
Ukraine: N. N. VOITOVICH
United Kingdom/Ireland: T. H. OXLEY
Venezuela: A. N. BIANCHI
Virginia Mountain: H. P. SINGH
Washington D.C./Northern Virginia: S. BAJPAI
Winnipeg: L. SHAFAI
Yugoslavia: B. S. JOCANOVIC

IEEE TRANSACTIONS® ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES

Editor

R. J. TREW
Case Western Reserve Univ.
EEAP Department
516 Glennan Bldg.
Cleveland, OH 44106-7221
Phone: (216) 368-4089/4088
Fax: (216) 368-2668
email: r.trew@ieee.org

Associate Editors

EIKICHI YAMASHITA
(*Electromagnetics/Guided Waves*)
The University of Electro-Communications
Department of Electronic Engineering
1-5-1 Chofugaoka
Chofu-shi
Tokyo 182 JAPAN
Phone: +81-424-83-2161, ext. 3321
Fax: +81-424-41-2588
email: yama@wave.ee.uec.ac.jp

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.

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*

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*

Executive Staff

DANIEL J. SENESE, *Executive Director*

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*
JOHN WITSKEN, *Information Technology*

IEEE Periodicals

Transactions/Journals Department

Staff Director: FRAN ZAPPULLA
Transactions Manager: GAIL S. FERENC
Editorial Manager: VALERIE CAMMARATA
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:** 908-981-0060. **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 © 1997 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

Submillimeter-Wave Techniques

M. FRERKING

Microwave and Millimeter-Wave Solid-State Devices

H. J. KUNO

M. S. GUPTA

Microwave Ferrites

J. M. OWENS

J. D. ADAM

Manufacturing Technology

C. HUANG

Microwave Systems

K. D. BREUER

G. L. HEITER

Phased and Active Arrays

D. ZIMMERMAN

Vehicular Technology

R. SPARKS

Communication

B. GELLER

Microwave Superconductor Applications

M. NISENOFF

Filters and Passive Components

H. C. BELL

R. V. SNYDER

Microwave Acoustics

B. MC AVOY

Microwave High-Power Techniques

J. GOEL

D. W. REID

Biological Effects and Medical Applications

A. ROSEN

Microwave Low Noise Techniques

J. J. WHELEHAN JR.

Digital Signal Processing

C. CHANG

J. B. Y. TSUI

Lightwave Technology

P. R. HERCZFELD

N. R. DIETRICH

Microwave and Millimeter-Wave Integrated Circuits

F. ALI

Microwave Measurements

S. F. ADAM

R. E. HAM

J. T. BARR IV

Microwave Field Theory

J. W. MINK

W. J. HOEFER

Microwave and Millimeter Wave Packaging

J. S. PAVIO

Microwave Technology Business Issues

B. BERSON

EDITORIAL BOARD

Editor: R. J. TREW

M. D. Abouzahra	K. Chang	D. G. Fang	M. C. Horton	D. K. Linkhart	H. Ogawa	R. Sato	M. Tsutsumi
J. D. Adam	W. S. C. Chang	J. Feinstein	H. How	J. Litva	F. Okada	G. Saulich	R. S. Tucker
M. G. Adlerstein	C. Chao	A. Fernandez	H. Howe	A. J. Lowery	Y. Okamura	J. O. Scanlan	A. Uhler
C. S. Aitchison	H. F. Chapell	A. Ferrero	C-W. Hsue	S. Lucyszyn	A. D. Olver	M. Schetzen	T. ul Haq
Y. Akaiwa	W. Charczenko	S. J. Fiedziuszko	D. A. Huebner	R. Luebbers	F. Olyslager	B. Schiek	F. T. Ulabay
M. I. Aksun	S. K. Chaudhuri	J. G. Fikioris	F. P. Hunsberger	S. A. Maas	A. S. Omar	M. Schindler	T. Uwano
B. Albinsson	C. H. Chen	C. A. Flory	H. Ikuno	R. H. MacPhie	Ra. Padman	L. P. Schmidt	R. Vahldieck
N. G. Alexopoulos	S. H. Chen	V. A. Flyagin	T. Itoh	A. Madjar	R. W. Paglione	M. V. Schneider	M. Valtonen
F. Ali	Z. Chen	G. Franceschetti	D. Jablonski	S. Maeda	S-G. Pan	K. F. Schunemann	P. M. van den Berg
S. Amari	W. C. Chew	J. L. Freeman	D. R. Jackson	S. F. Mahmoud	A. Paoletta	J. E. Schutt-Aine	R. L. Van Tuyl
I. Angelov	C.-K. Chou	R. Froelich	R. W. Jackson	M. L. Majewski	S. Papatheodorou	S. E. Schwarz	V. V. Varadan
W. J. Anklam	C. Christopoulos	K. Fukui	A. F. Jacob	M. Makimoto	R. Parry	F. K. Schwing	G. D. Vendelin
J. W. Archer	K. R. Chu	R. J. Gagne	G. L. James	R. R. Mansour	C. R. Paul	A. J. Seeds	C. Vittoria
F. Arndt	S. L. Chuang	Z. Galani	R. Janaswamy	L. Marchildon	K. Paulsen	A. K. Sharma	R. H. Voelker
R. G. Arnold	M. Claassen	F. E. Gardiol	J. M. Jarem	R. B. Marks	D. Pavlidis	H. Shigesawa	R. W. Vogel
H. Ashoka	S. T. Clegg	C. M. Gee	A. Jelenski	R. Marques	R. Pengelly	T. Shiozawa	J. Volakis
A. E. Atia	R. E. Collin	B. Gelmont	J. Jin	L. Martens	J. A. Pereda	N. V. Shuley	V. Volman
N. F. Audeh	B. Colpitts	G. G. Gentili	W. T. Joines	R. G. Martin	A. F. Peterson	A. H. Sihvola	D. F. Wait
I. Awai	R. C. Compton	W. Geyi	J. S. Joshi	A. Materka	A. R. Pinchuk	R. N. Simon	P. Waldow
Y. Ayasli	G. Conciauro	G. Ghione	A. Jostingmeier	G. L. Matthaei	R. D. Pollard	N. R. S. Simons	J. L. B. Walker
T. L. Bagwell	H. M. Cronson	A. J. Giarola	E. B. Joy	D. S. Matthews	Z. Popovic	C. E. Smith	N. L. Wang
I. J. Bahl	T. W. Crowe	J. P. Gilb	S. Kagami	R. W. McMillan	A. Portis	G. S. Smith	D. Webb
S. N. Bajpai	C. W. Crowley	R. J. Gilmore	T. Kashiwa	G. E. Meddaugh	D. M. Pozar	C. M. Snowden	K. J. Webb
J. Baker-Jarvis	W. R. Curtice	J. Goel	L. P. B. Katehi	F. Medina	P. Pramanick	A. W. Snyder	R. M. Weikle
C. A. Balanis	S. D'Agostino	M. Goldfarb	S. Kawakami	M. D. Meehan	S. N. Prasad	R. V. Snyder	S. Weinreb
J. V. Balbastre	L. C. da Silva	K. Goossens	R. Keam	K. K. Mei	S. Prasad	R. A. Soares	J. A. Weiss
J. W. Bandler	N. Dagli	A. Gopinath	P. C. Kendall	F. Merat	R. Pregla	H. Sobol	A. Weisshaar
I. Bardi	N. S. Daryoush	C. Gough	P. Kennis	F. Mesa	A. C. Priou	K. Solbach	M. J. Wengler
F. S. Barnes	N. K. Das	R. Goyal	P. J. Khan	J. S. Metcalfe	R. A. Pucel	M. N. Solomon	R. J. Wenzel
J. T. Barr	M. Davidovitz	J. Graffeuil	J.-F. Kiang	R. Mittra	R. Raghuram	R. A. Speciale	M. Werner
P. P. Barsony	J. B. Davies	M. Guglielmi	R. J. King	M. Miyagi	C. J. Railton	B. E. Spielman	J. F. White
T. E. Batchman	L. E. Davis	P. Guillon	R. W. P. King	C. I. Mobbs	A. Raisanen	P. Staecker	K. W. Whites
B. D. Bates	D. Dawson	K. C. Gupta	T. Kitazawa	A. H. Mohammadian	C. Rauscher	B. Stallard	W. Wiesbeck
H. Baudrand	H. De Los Santos	R. J. Gutmann	R. H. Knerr	J. P. Mondal	J. Rautio	J. P. Starks	N. Williams
B. Beker	D. De Zutter	W. K. Gwarek	E. L. Kollberg	M. Mongiardo	G. M. Rebeiz	P. E. Stauffer	J. C. Wiltse
I. Bennis	D. R. Decker	D. Halchin	J. J. Komiak	C. R. Moore	C.-L. Ren	M. B. Steer	F. Winter
T. M. Benson	G. Y. Delisle	V. F. Hanna	J. A. Kong	J. Morente	G. P. Riblet	K. D. Stephan	H. W. Wintroub
A. Beyer	E. J. Denlinger	G. W. Hanson	A. Konrad	N. Morita	H. J. Riblet	M. S. Stern	K.-L. Wong
K. Bhasin	R. Diaz	H. L. Hartnagel	M. Koshiba	A. Mortazawi	L. Riggs	E. W. Strid	T. Wong
M. E. Bialkowski	N. Dib	J. Harve	N. H. L. Koster	J. E. Mulholland	C. L. Rino	S. S. Stuchly	G. S. Woods
R. M. Biernacki	A. R. Djordjevic	M. Hashimoto	J. S. Kot	K. Naishadham	P. Rizzi	R. Sturdivant	R.-B. Wu
G. L. Bilbro	J. Dobrowolski	E. E. Hassan	S. K. Koul	A. Nakatani	M. J. W. Rodwell	C.-C. Su	S.-C. Wu
O. Biro	R. Dyczij-Edlinger	H. A. Haus	A. W. Kraszewski	M. S. Nakhla	D. A. Rogers	C. Sun	Y. S. Wu
R. R. Bonetti	M. Dydyk	C. Hearn	J. G. Kretzschmar	C. U. Naldi	U. L. Rohde	S. E. Sussman-Fort	H. Yabe
R. G. Bosio	J. East	W. Heinrich	C. M. Krowne	E. A. Navarro	D. E. Root	J. Svachina	E. Yamashita
J. Braunstein	L. F. Eastman	G. L. Heiter	W. Krupp	A. Rosen	P. Russer	H.-Y. Yang	K. S. Yee
M. Bressan	R. L. Eisenhart	J. Helszajn	C. M. Kudsia	E. H. Newman	G. Roussy	D. G. Swanson	K. Yashiro
R. E. Brown	S. El-Ghazaly	P. R. Herczfeld	E. F. Kuester	M. Ney	H. E. Rowe	M. Tabib-Azar	K. Yasumoto
R. E. Bryan	E. El-Sharawy	N. Herscovici	E. Kuhn	K. T. Ng	P. Russer	A. Taflove	K. S. Yee
R. L. Camisa	A. Z. Elsherbeni	D. A. Hill	A. Lakhtakia	C. Nguyen	D. Rutledge	C. T. Tai	T. S. Yeo
S. Caorsi	A. F. Emery	J. H. Hinken	P. Lampariello	K. B. Niclas	A. Rydberg	S. H. Talisa	K. S. Yngvesson
A. Cappy	N. Engheta	K. Hirai	J.-F. Lee	J. S. Nielsen	D. Rytting	W. R. Tinga	N. Yoshida
L. Carin	W. J. English	W. J. R. Hoefer	R. Levy	W. T. Nisbet	M. N. O. Sadiku	K. Tomiyasu	A. M. Young
J. W. Carlin	N. R. Erickson	R. K. Hoffmann	S. Li	T. Nishikawa	P. K. Saha	B. S. Tremblay	B. Young
J. E. Carroll	C. Eswarappa	K. Hongo	L. P. Ligthart	M. Norgren	J. N. Sahalos	S. Tretjakov	K. A. Zaki
R. G. Carter	H. J. Eul	D. Hornbuckle	J. C. Lin	D. Novak	J.-I. Sakai	R. J. Trew	M. Zoboli
Z. J. Cendes	G. W. Ewell	M. Horno	I. V. Lindell	D. Novak	A. A. M. Saleh	J. L. Tsalamengas	C. Zuffada
C. H. Chan	M. Faber	J. B. Horton	H. Ling	J. Obregon	A. J. Sangster	M. Tsuji	