

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 \$15.00. 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. T. BARR IV, *President*

J. T. BARR IV
M. P. DE LISIO
S. M. EL-GHAZALY

M. J. SCHINDLER, *Vice President*

K. C. GUPTA
M. HARRIS
J. HAUSNER
K. HONJO
L. KATEHI
J. S. KENNEY

D. LOVELACE, *Secretary*

J. MODELSKI
V. J. NAIR
B. PERLMAN
J. M. POND
M. J. SCHINDLER
W. SHIROMA

J. S. KENNEY, *Treasurer*

R. SORRENTINO
G. THOREN
R. J. TREW
K. VARIAN
S. WETENKAMP

Honorary Life Members

A. C. BECK
S. B. COHN
T. ITOH
A. A. OLINER
T. S. SAAD
K. TOMIYASU
L. YOUNG

Distinguished Lecturers

F. ALI
P. ASBECK
R. COMPTON
H. J. DE LOS SANTOS
A. KATZ
T. LEE
C. SCHAE
A. J. SEEDS
R. WEIGEL
G. REBEIZ

Past Presidents

C. M. JACKSON (2001)
R. W. SUDBURY (2000)
E. A. REZEK (1999)

MTT-S Chapter Chairs

Albuquerque: C. COURTNEY
Atlanta: J. FORDHAM
Austria: R. WEIGEL
Baltimore: H. N. FUDEM
Beijing: Y.-R. ZHONG
Benelux: B. NAUWELAERS
Buffalo: M. R. GILLETTE
Bulgaria: F. FILIPOV
Central Iowa/Cedar Rapids:
D. JOHNSON
Central New England/Boston:
J. D. KENNEDY
Central & South Italy: P. BERNARDI
Chicago: H. VALENZUELA
Cleveland: M. TABIB-AZAR
College Station: R. D. NEVELS
Columbus: S. ELLINGSON
Croatia: J. BARTOLIC
Czechoslovakia: P. BEZOUSEK
Dallas: P. WINSON
Dayton: A. TERZOULI, JR.
Denver-Boulder: C. L. HALLOWAY
Egypt: I. A. SALEM
Finland: J. J. TUOVINEN
Florida West Coast: E. W. GRIMES

Foothill: C. ANTONIAK
France: D. PASQUET
Germany: W. S. MENZEL
Greece: I. XANTHAKIS
Hong Kong: K. M. LUK
Houston: J. T. WILLIAMS
Hungary: T. BERCELI
India: K. S. CHARI
Israel: A. MADJAR
Japan: K. MIZUNO
Kitchener-Waterloo: R. R. MANSOUR
Korea: S.-W. YUN
Lithuania: B. LEVITAS
Long Island/New York: M. HANCZOR,
M. KNOX
Los Angeles: J. A. VERKADE
Milwaukee: G. HANSON
Minsk Belarus: S. A. MALYSHEV
Mohawk Valley: E. P. RATAZZI
Montreal: K. WU
Moscow: V. A. KALOSHIN
Nanjing: W. X. ZHANG
New Hampshire: T. L. PERAGINE
New Jersey Coast: C. ALVAREZ
New South Wales: K. P. ESELLE
North Italy: C. U. NALDI

Nizhny Novgorod: Y. I. BELOV
North Jersey: K. DIXIT
Novosibirsk: B. KAPILEVICH
Oregon: R. HAMILTON, D. FERWALT
Orlando: P. WAHID
Ottawa: D. H. M. REEKIE
Philadelphia: J. LAW
Phoenix: D. VASILESKA
Poland: J. K. PIOTROWSKI
Portugal: J. COSTA FREIRE
Princeton/Central Jersey: W. R. CURTICE,
A. KATZ
Rio de Janeiro/Brazil: J. R. BERGMANN
Saint Louis: J. BORNHOLDT
Saint Petersburg: S. V. ZAGRIADSKI
San Diego: U. DHALIWAL
San Fernando Valley: J. WEILER
Santa Clara Valley/San Francisco:
S. BROZOVICH
Saratov/Penza: M. V. DAVIDOVICH
Schenectady: R. J. GUTMANN
Seattle: T. RASCHKO
Singapore: C. S. TECK
South Africa: J. JOUBERT
South Australia: H. J. HANSEN
South Brazil: H. FIGUEROA

Southeastern Michigan: L. M. ANNEBERG
Spain: L. DE-HARO
Springfield: S. C. REISING
Sweden: J. JOHANSSON
Switzerland: R. VAHLDIECK
Syracuse: E. ARVAS
Taipei: D.-C. CHANG
Thailand: N. YOOTHANOM
Toms: O. V. STOUKATCH
Toronto: R. ABHARI
Tucson: J. PAPAPOLYMEROU
Turkey: L. GUREL
Twin Cities: M. J. GAWRONSKI
Ukraine: P. MOLCHANOV
Ukraine East: Y. M. KULESHOV
Ukraine Kiev: Y. POPLAVKO
Ukraine Rep. of Georgia: R. S. ZARIDZE
Ukraine West: M. I. ANDRIYCHUK
United Kingdom/Ireland: A. REZAZADEH
Venezuela: A. N. BIANCHI
Victorian: R. B. WATERHOUSE
Virginia Mountain: D. MILLER
Washington DC/Northern Virginia:
H. S. NEWMAN
Winnipeg: L. SHAFAI
Yugoslavia: A. MARINCIC

IEEE TRANSACTIONS® ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES

Editor

DAVID RUTLEDGE
Dept. Elect. Eng.
(MS 136-93)
California Inst. Technol.
Pasadena, CA 91125
Phone: +1 626 395 4806
Fax: +1 626 395 2137
email: rutledge@caltech.edu

Associate Editors

GABRIEL REBEIZ
(MEMS, RF ICs and Antennas)
Elect. Eng. Comput. Sci. Dept.
1301 Beal Ave.
Univ. Michigan
Ann Arbor, MI 48109-2122
Phone: +1 734 647 1793
Fax: +1 734 647 2106
email: rebeiz@eecs.umich.edu

JENS BORNEMANN
(Microwave Modeling and CAD)
Dept. Elect. & Comput. Eng.
Univ. of Victoria
P.O. Box 3055
Victoria, B.C.
Canada V8W 3P6
Phone: +1 250 721 8666
Fax: +1 250 7216230 or 6052
email: jbornema@ece.uvic.ca
email: j.bornemann@ieee.org

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC.

Officers

RAYMOND D. FINDLAY, *President*
MICHAEL S. ADLER, *President-Elect*
HUGO M. FERNANDEZ VERSTEGEN, *Secretary*
DALE C. CASTON, *Treasurer*
JOEL B. SNYDER, *Past President*
LYLE D. FEISEL, *Vice President, Educational Activities*

JAMES M. TIEN, *Vice President, Publications, Products & Services*
W. CLEON ANDERSON, *Vice President, Regional Activities*
BEN C. JOHNSON, *President, Standards Association*
MICHAEL R. LIGHTNER, *Vice President, Technical Activities*
LEEARL A. BRYANT, *President, IEEE USA*

PETER W. STAECKER, *Director, Division IV — Electromagnetics and Radiation*

Executive Staff

DANIEL J. SENESE, *Executive Director*

DONALD CURTIS, *Human Resources*
ANTHONY DURNIAK, *Publications*
JUDITH GORMAN, *Standards Activities*
CECELIA JANKOWSKI, *Regional Activities*
PETER A LEWIS, *Educational 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: DAWN M. MELLEY
Production Director: ROBERT SMREK
Transactions Manager: GAIL S. FERENC
Managing Editor: MONA MITTRA
Senior 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:** 3 Park Avenue, 17th Floor, New York, NY 10016-5997. **IEEE Operations Center:** 445 Hoes Lane, P.O. Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331. **NJ Telephone:** +1 732 981 0060. **Price/Publication Information:** Individual copies: IEEE Members \$10.00 (first copy only), nonmember \$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 © 2002 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.

EDITORIAL BOARD

Editor: D. RUTLEDGE

Associate Editors: G. REBEIZ, J. BORNEMANN

R. Abou	D. Budimir	B. English	S. Hong	W. Kuhn	S. Mizushima	R. Pregla	T. Shiozawa	V. Veremey
M. Abouzahra	T. Budka	N. Erickson	W. Hong	M. Kumar	J. Modelski	M. Prigent	W. Shiroma	J. Verspecht
A. Abramowicz	D. Buechler	M. Eron	K. Honjo	J. Kuo	S. Mohammadi	R. Pucel	N. Shuley	H. Vicks
D. Adam	M. Bujatti	L. Escotte	G. Hopkins	P. Kuo	T. Monediere	Y. Qian	P. Siegel	D. Vinayak
K. Adam	C. Buntschuh	C. Eswarappa	J. Horng	H. Kurebayashi	M. Mongiardo	F. Raab	D. Sievenpiper	C. Vittoria
M. Adlerstein	D. Butler	G. Ewell	J. Horton	L. Khusner	C. Moore	V. Radisic	A. Sihvola	J. Volakis
M. Afsar	J. Cabanillas	P. Excell	B. Houshmand	Y. Kwon	J. Morente	M. Raffetto	K. Silvonen	V. Volman
H. Ahn	M. Calcaterra	M. Faber	G. Howard	S. Kyriazidou	A. Morini	Y. Rahmat	N. Skou	A. Vorst
M. Aidam	E. Camargo	D. Fang	J. Howard	A. Lakhtakia	N. Morita	C. Railton	Z. Skvor	K. Wakino
C. Aitchison	R. Cameron	M. Farina	M. Howes	K. Lakin	H. Morkoc	A. Raisanen	R. Sloan	P. Waldow
M. Akaike	N. Camilleri	A. Fathy	C. Hsue	P. Lampariello	A. Mortazawi	O. Ramahi	C. Smith	C. Wang
Y. Akaiwa	C. Campbell	A. Fernandez	C. Huang	M. Lancaster	J. Mosig	S. Raman	G. Smith	G. Wang
I. Aksun	F. Canning	A. Ferrero	H. Huang	U. Langmann	M. Mrozowski	J. Randa	P. Smith	H. Wang
C. Akyel	A. Cappy	I. Fianovsky	J. Huang	G. Lapin	J. Mueller	C. Rappaport	C. Snowden	L. Wang
E. Alekseev	G. Carchon	J. Fiedziuszko	D. Huebner	L. Larson	J. Muldavin	J. Raskin	R. Snyder	N. Wang
F. Alessandri	G. Carrer	H. Figueroa	H. Hui	J. Laskar	M. Muraguchi	C. Rauscher	P. So	W. Wang
A. Alexanian	R. Carter	G. Franceschetti	A. Hung	J. Laurin	M. Nakhla	J. Rautio	K. Solbach	Z. Wang
W. Ali-Ahmad	N. Carvalho	M. Frankel	I. Hunter	S. Le Maguer	S. Nam	J. Rebel	H. Song	R. Waugh
F. Alimenti	M. Celuch	F. Frezza	M. Hussein	J. Lee	T. Namiki	J. Reinert	M. Sorolla	J. Webb
H. Al-Jamid	H. Chaloupka	M. Fujii	I. Huynen	K. Leung	N. Nauwelaers	K. Remley	R. Sorrentino	K. Webb
B. Alpert	C. Chan	V. Fusco	J. Hwang	Y. Leviatan	J. Navarro	J. Represa	J. Sowers	C. Wei
A. Altintas	C. Chang	G. Gabriel	K. Hwang	R. Levy	A. Nazarov	L. Reynolds	D. Staiculescu	D. Weide
S. Amari	F. Chang	T. Gaier	T. Idehara	G. Li	D. Neikirk	A. Reynoso	J. Stake	R. Weigel
I. Angelov	K. Chang	Z. Galani	H. Ikuno	J. Li	A. Neto	E. Rezek	B. Stallard	W. Weiglhofer
R. Anholt	W. Chappell	M. Garcia	A. Ishimaru	L. Li	E. Newman	U. Rhode	D. Stancil	R. Weikle
G. Annino	G. Chattopadhyay	B. Geller	T. Ishizaki	L. Lighthart	H. Newman	D. Rhodes	P. Starski	T. Weiland
Y. Antar	S. Chaudhuri	G. Gentili	M. Islam	E. Lil	N. Newman	G. Riblet	K. Stephan	A. Wiley
G. Antonini	C. Chen	J. Gerber	M. Ismail	J. Lin	M. Ney	A. Riddle	D. Sullivan	S. Weinreb
I. Aoki	F. Chen	F. German	K. Ito	I. Lindell	E. Ngoya	B. Riddle	F. Sullivan	J. Weiss
R. Aparicio	H. Chen	M. Geshiro	K. Itoh	H. Ling	C. Nguyen	J. Rius	P. Sundararajan	A. Weisshaar
K. Araki	Z. Chen	S. Gevorgian	T. Itoh	D. Linkhart	T. Nichols	I. Robertson	S. Sussman-Fort	C. Weitzel
J. Archer	K. Cheng	R. Geyer	T. Ivanov	D. Lippens	K. Niclas	S. Robertson	A. Sutoño	K. Weller
P. Arcioni	C. Chi	G. Ghione	D. Jablonski	V. Litvinov	S. Nightingale	G. Rodrigue	K. Suyama	T. Weller
F. Arndt	Y. Cho	D. Ghodgaonkar	C. Jackson	Q. Liu	Y. Nikawa	A. Rodriguez	J. Svacina	C. Wen
M. Asai	D. Choi	A. Gibson	D. Jackson	Y. Liu	A. Niknejad	M. Rodwell	D. Swanson	L. Whicker
J. Atherton	C. Chou	J. Gilb	R. Jackson	C. Lohmann	K. Nikoskinen	J. Rogers	B. Szendrenyi	J. Whitaker
A. Atia	Y. Chow	B. Gilbert	A. Jacob	R. Loison	S. Nogi	R. Rogers	W. Tabbara	K. Whites
N. Audeh	C. Christosomidis	R. Gillard	H. Jacobsson	J. Long	T. Nojima	H. Rogier	A. Taflöve	W. Wiesbeck
J. Avaritsiotis	C. Christopoulos	B. Gimeno	N. Jain	D. Lovelace	M. Norgren	R. Romanofsky	G. Tait	G. Wilkins
A. Aydiner	K. Chu	N. Ginzburg	G. James	J. LoVetri	A. Nosi	L. Roselli	Y. Takimoto	A. Williams
J. Bae	P. Civalleri	V. Giordano	R. Jansen	K. Lu	A. Nosich	A. Rosen	T. Tamir	D. Williams
T. Bagwell	J. Cloete	B. Glass	A. Jelenski	S. Lu	B. Notaros	J. Rosenberg	K. Tanaka	J. Wiltse
Z. Baharav	R. Caccioli	E. Glass	M. Jensen	S. Lucyszyn	K. Noujeim	U. Rosenberg	W. Tang	S. Withington
I. Bahl	B. Collin	A. Glisson	T. Jerse	R. Luebbers	D. Novak	E. Rothwell	L. Tarricone	D. Wittwer
J. Baker-Jarvis	B. Colpitts	M. Goano	P. Jia	N. Luhmann	T. Nozokido	J. Roulmeliotis	J. Tauritz	H. Wolfgang
C. Balanis	F. Cooray	E. Godshalk	J. Jin	K. Luk	G. Nusinovich	H. Rowe	D. Teeter	K. Wong
S. Banba	E. Costamagna	J. Goel	J. Johansson	H. Luong	D. Oates	L. Roy	F. Teixeira	T. Wong
J. Bandler	R. Coverly	C. Goldsmith	U. Jordan	J. Luy	J. Obregon	B. Rubin	E. Tentzeris	G. Woods
I. Barba	J. Crescenzi	S. Goodnick	K. Joshin	Z. Ma	J. O'Callahan	J. Rubio	M. Tentzeris	H. Wu
F. Bardati	D. Cros	S. Gopalsami	J. Joubert	S. Maas	S. Ohkawa	A. Rudjakova	K. Thakur	K. Wu
I. Bardi	W. Curtice	P. Gould	D. Kaftez	G. Macchiarella	I. Ohta	A. Ruehli	P. Thakur	R. Wu
S. Bardi	G. Dambrine	B. Graeme	H. Kamitsuna	P. Macchiarella	H. Okazaki	P. Russer	H. Thal	T. Wu
S. Barker	B. Das	J. Graffeuil	T. Kashiwa	A. Madjar	M. Okoniewski	A. Rydberg	M. Thorburn	Y. Wu
B. Basu	N. Das	L. Gragnani	L. Kempel	S. Mahmoud	S. Oliver	D. Rytting	M. Thumm	R. Wylde
H. Baudrand	M. Davidovitz	G. Grau	I. Kenji	S. Majewski	F. Olyslager	A. Saad	W. Tinga	G. Xiao
D. Becker	B. Davies	C. Grossman	A. Kerr	M. Majewski	A. Omar	C. Saavedra	E. Tong	H. Xin
K. Beilenhoff	B. Deal	A. Grudiev	O. Kessler	M. Makimoto	M. Omiya	K. Sabet	A. Toscano	S. Xu
B. Beker	A. Dec	P. Guillon	J. Kiang	J. Malherbe	B. Ooi	L. Sadovnik	M. Toupikov	Y. Xu
C. Bell	B. Deckman	M. Gupta	P. Kildal	R. Mallavarpu	J. Osepchuk	A. Safwat	S. Trabelsi	H. Yabe
H. Bell	M. DeLisio	F. Gustrau	B. Kim	L. Maloratsky	D. Pan	M. Sagawa	P. Tran	D. Yager
S. Berkeshli	P. deMaagt	R. Gutmann	I. Kim	C. Mann	G. Pan	J. Sahalos	S. Tretyakov	A. Yakovlev
M. Berroth	D. deZutter	A. Guy	T. Kitazawa	R. Mansour	S. Pan	A. Sangster	C. Trueman	H. Yang
W. Beyenne	N. Dib	W. Gwarek	M. Kitlinski	G. Marrocco	A. Parfitt	K. Sarabandi	A. Truitt	Y. Yang
A. Beyer	L. DiDomenico	B. Haas	L. Knockaert	A. Martucci	S. Parisi	T. Sarkar	J. Tsalamengas	H. Yao
M. Bialkowski	T. Djordjevic	P. Haddad	R. Knoechel	A. Massa	H. Park	P. Savi	L. Tsang	K. Yashiro
E. Biebl	J. Doane	S. Hagness	P. Koert	K. Matsunaga	W. Park	D. Schaubert	M. Tsuji	S. Yeo
P. Bienstman	J. Dobrowolski	A. Hajimiri	T. Koike	G. Matthaei	A. Parker	F. Schettino	T. Tsujiguchi	W. Yin
J. Birch	A. Doc	M. Hamid	T. Kolding	D. Matthews	T. Parker	B. Schiek	M. Tsutsumi	Y. Ymeri
T. Bird	R. Drayton	J. Han	N. Koliass	P. Matthews	R. Parry	E. Schloemann	J. Tuovenin	J. Yook
O. Biro	J. Drewniak	G. Hanson	E. Kollberg	J. Mazierska	M. Pastorino	L. Schmidt	J. Tuovinen	R. York
M. Blank	L. Dunleavy	H. Hartnagel	J. Komik	J. Mazzur	P. Pathak	D. Schmitt	C. Turner	N. Yoshida
P. Blundy	V. Dunn	J. Harvey	A. Komiyama	G. Mazzarella	T. Pavo	J. Schneider	K. Uchida	B. Young
B. Bocquet	L. Dussot	H. Hasegawa	G. Kompa	D. McQuiddy	D. Pavlidis	M. Schneider	J. Uher	M. Yu
L. Boglione	A. Duzdar	M. Hashimoto	A. Konrad	E. McShane	J. Pereda	D. Schreurs	A. Uhlir	S. Zagriadski
R. Boix	S. Dvorak	G. Hau	B. Kormanyos	F. Medina	L. Perregini	W. Schroeder	T. Uno	K. Zaki
J. Booske	L. Dworsky	S. Hay	M. Koshiba	K. Mei	M. Petelin	K. Schuenemann	T. Uwano	J. Zapata
E. Borie	M. Dydyk	J. Hayden	J. Kot	W. Menzel	A. Peterson	H. Schumacher	N. Uzunoglu	J. Zehentner
R. Bosisio	J. East	L. Hayden	A. Kraszewski	F. Mesa	J. Philips	J. Schutt-Aine	C. Vale	Q. Zhang
H. Boss	T. Eibert	B. Haydl	J. Kretschmar	P. Mezzanotte	P. Pieters	F. Schwing	G. van den Bosch	X. Zhang
A. Boudiaf	G. Eleftheriades	P. Heide	A. Kroenig	T. Mezzanotte	M. Pirola	F. Secchi	D. van der Weide	A. Zhao
C. Boyd	F. Ellinger	M. Helier	C. Krowne	A. Mickelson	V. Plessky	H. Serizawa	D. van Hoenacker	L. Zhu
M. Bozzi	T. Ellis	M. Herman	V. Kropac	E. Miller	C. Pobanz	R. Settaluri	E. van Lil	N. Zhu
C. Brewitt-Taylor	B. El-Sharawi	J. Herren	J. Krupka	J. Miller	R. Pogorzelski	J. Sevic	C. van Niekerk	D. Zimmermann
T. Brookes	B. Elsharawy	D. Hill	M. Krupka	P. Miller	R. Pollard	O. Sevimli	K. Varian	H. Zirath
A. Brown	A. Elsherbeni	K. Hirayama	H. Kubo	J. Miranda	G. Ponchak	O. Shana'a	M. Vaughan	J. Zmuidzinaz
E. Brown	A. Encinar	J. Hirokawa	C. Kudsia	D. Mirshekar	Z. Popovic	D. Sheen	G. Vendelin	J. Zurcher
S. Brozovich	J. Encinar	A. Holden	S. Kudsus	M. Miyazaki	V. Postoyalko	T. Shen	I. Vendik	
S. Bruce	N. Engheta	J. Hong	B. Kuhn	K. Mizuno	S. Prasad	X. Sheng	S. Verdeyme	