



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

C. M. JACKSON, <i>President</i>			J. T. BARR IV, <i>Vice President</i>		W. A. SHIROMA, <i>Secretary</i>		J. S. KENNEY, <i>Treasurer</i>	
J. T. BARR IV	K. C. GUPTA		C. M. JACKSON	J. MODELSKI	R. SORRENTINO		R. J. TREW	
M. P. DE LISIO	M. HARRIS		J. S. KENNEY	J. M. POND	F. J. SULLIVAN		K. VARIAN	
S. M. EL-GHAZALY	K. HONJO		R. B. MARKS	M. J. SCHINDLER	G. THOREN		S. WETENKAMP	
S. J. FIEDZIUSZKO								
<i>Honorary Life Members</i>				<i>Distinguished Lecturers</i>			<i>Past Presidents</i>	
A. C. BECK	T. ITOH	K. TOMIYASU	R. COMPTON	S. M. EL-GHAZALY	R. B. MARKS		R. W. SUDBURY (2000)	
S. B. COHN	A. A. OLINER	L. YOUNG	T. J. BRAZIL	J. JENSEN	W. MENZEL		E. A. REZEK (1999)	
	T. S. SAAD		H. J. DE LOS SANTOS	A. KATZ	R. WEIGEL		R. D. POLLARD (1998)	

MTT-S Chapter Chairs

Albuquerque: C. C. COURTNEY	Germany: W. S. MENZEL	Orlando: T. IVANOV	Spain: L. DE-HARO
Atlanta: J. LASKAR	Greece: N. K. UZUNOGLU	Ottawa: D. H. REEKIE	Springfield: J. B. MEAD
Baltimore: J. MOELLERS, B. SEQUEIRA	Hong Kong: E. PUN	Philadelphia: E. HOLZMAN	St. Louis: K. E. KRAUSE
Beijing: W. X. ZHANG, Y.-R. ZHONG	Houston: J. T. WILLIAMS, R. D. NEVELS	Phoenix: A. C. REYES	St. Petersburg: S. TRETYAKOV
Benelux: B. NAUWELAERS	Hungary: I. FRIGYES	Poland: B. LEVITAS, S. A. MALYSHEV,	Sweden: J. JOHANSSON
Buffalo: M. R. GILLETTE	Huntsville: H. L. BENNETT, C. PLANT	J. PIOTROWSKI E. SEDEK	Switzerland: R. VAHLDECK
Bulgaria: P. I. PHILIPOV	India: K. S. CHARI	Portland: V. K. TRIPATHI	Syracuse: T. SARKAR
Central Iowa/Cedar Rapids:	Indonesia: D. SIRAT	Portugal: J. J. L. FREIRE	Taipei: M. H. CHEN
J. C. COZZIE, D. E. OLIVER	Israel: A. MADJAR	Princeton/Central Jersey: W. R. CURTICE	Taiwan: S. H. HSU, J. L. LIUANG
Central New England/Boston:	Ithaca: R. C. COMPTON, N. KOLIAS	Rio de Janeiro/Brazil: J. R. BERGMANN	Tbilisi: D. KARKASHADZE
J. L. HEATON, III	Kitchener-Waterloo: R. R. MANSOUR	Russia: Y. I. BELOV, V. A. KALOSHIN,	Thailand: N. YOOTHANOM
Central & South Italy: P. BERNARDI	Korea: S.-W. YUN	B. Y. KAPILEVICH, S. TRETYAKOV	Tokyo: I. AWAI
Central Virginia: S. H. JONES	Lithuania: B. LEVITAS	San Diego: U. DHALIWAL	Toronto: T. E. VAN DEVENTER
Chicago: H. VALENZUELA	Los Angeles: J. A. VERKADE	San Fernando Valley: J. WEILER, JR.	Tucson: VACANT
Cleveland: M. TABIB-AZAR	Milwaukee: J. RICHIE	Santa Clara Valley/San Francisco:	Turkey: A. ALTINTAS
College Station: R. NEVELS,	Minsk Belarus: S. A. MALYSHEV	E. CAMARGO	Twin Cities: M. J. GAWRONSKI
C. NGUYEN	Mohawk Valley: E. P. RATAZZI	Sao Paulo: A. O. M. ANDRADE, D. CONSONI	Ukraine East: Y. S. SHIFRIN
Columbus: R. LEE	Montreal: G. L. YIP	Saratov/Penza: M. V. DAVIDOVICH	Ukraine Kiev: Y. M. POPLAVKO
Czechoslovakia: Z. SKVOR	Moscow: V. E. LYUBCHENKO	Schenectady: R. J. GUTMANN	Ukraine West: N. N. VOITOVICH,
Dallas: D. T. BRYANT	Nanjing: W. X. ZHANG	Seattle: W. CHARCZENKA, M. CHEN	R. S. ZARIDZE
Dayton: K. NAISHADHAM	New Hampshire: T. L. PERAGINE	Singapore: Y. T. SOON	United Kingdom/Ireland: N. WILLIAMS
Denver-Boulder: M. PIKET-MAY,	New Jersey Coast: T. P. HIGGINS	South Africa: D. B. DAVIDSON	Venezuela: A. N. BIANCHI
C. HALLOWAY	New South Wales: K. P. ESSELLE	South Australia: H. J. HANSEN	Victorian: R. B. WATERHOUSE
Egypt: I. A. SALEM	New York/Long Island: M. HANCZOR	South Brazil: A. O. M. ANDRADE	Virginia Mountain: VACANT
Finland: J. J. TUOVINEN	Nizhny Novgorod: Y. I. BELOV	South Brevard Indian River: T. E. DURHAM,	Washington DC/Northern Virginia: R. A. KAUL
Florida West Coast: G. M. BONAGUIDE	North Italy: C. N. NALDI	M. THURSBY	Winnipeg: L. SHAFAI
Foothills: B. B. SZENDRENYI	North Jersey: C. GUPTA	Southeastern Michigan: T. GROTHORN	Yugoslavia: B. S. JOCANOVIC
France: H. BAUDRAND	Novosibirsk: B. KAPILEVICH		

IEEE TRANSACTIONS® ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES

Editor	Associate Editors
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	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: +1 250 721 6230 or 6052 email: jbornema@ece.uvic.ca email: j.bornemann@ieee.org
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	ROBERT A. YORK (Special Issues and Invited Papers) ECE Dept. Eng. I Univ. of California Santa Barbara, CA 93106 Phone: +1 805 893 7113 Fax: +1 805 893 3262 email: rayork@ece.ucsb.edu

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC.

Officers

JOEL B. SNYDER, <i>President</i>	JAMES M. TIEN, <i>Vice President, Publications, Products, & Services</i>
RAYMOND D. FINDLAY, <i>President-Elect</i>	MAURICE PAPO, <i>Vice President, Regional Activities</i>
HUGO M. FERNANDEZ VERSTEGEN, <i>Secretary</i>	MARCO W. MIGLIARO, <i>President, Standards Association</i>
DALE M. CASTON, <i>Treasurer</i>	LEWIS M. TERMAN, <i>Vice President, Technical Activities</i>
LYLE D. FEISEL, <i>Vice President, Educational Activities</i>	NED R. SAUTHOFF, <i>President, IEEE USA</i>

PETER W. STAECKER, *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 DURNIAK, <i>Publications, Products, & Services</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: DAWN M. MELLEY
Production Director: ROBERT SMREK
Transactions Manager: GAIL S. FERENC
Electronic Publishing Manager: STEPHEN COHEN
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 © 2001 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.

2000 MTT-S TECHNICAL COMMITTEE CHAIRS

Coordinating Chairman: R. T. KEMERLEY, M. STEER

Computer-Aided Design

K. C. GUPTA
C. SNOWDEN

Microwave Acoustics

R. WEIGEL

Lightwave Technology

R. KNERR
P. R. HERCZFELD

Submillimeter-Wave Techniques

K. K. AGARWAL

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
D. SWANSON

Microwave Network Theory

R. SNYDER
D. SWANSON

Digital Signal Processing

K.-C. WANG
C. M. CHANG

Biological Effects and Medical Applications

A. ROSEN
A. VANDERVORST

Microwave Measurements

R. E. HAM
S. F. ADAM

Microwave and Millimeter Wave Packaging/Manufacturing

R. STURDIVANT
V. TRIPATHI

Microwave Ferrites

J. D. ADAM

Microwave Low-Noise Techniques

J. J. WHELEHAN, JR.
J. M. OWENS

Microwave Field Theory

W. J. HOEFER
J. W. MINK

Microwave Systems

K. D. BREUER
P. HEIDE
R. KAUL
A. MORTAZINI
R. A. SPARKS
D. ZIMMERMAN

HF/VHF/UHF Technology

F. H. RAAB
H. C. BELL

Microwave Superconductivity

M. NISENOFF
G. C. LIANG

Microwave Technology Business Issues

G. JANKOVIC

Wireless Communication

B. D. GELLER
J. B. HORTON

RF MEMS and Micromachining

L. P. B. KATEHI

EDITORIAL BOARD

Editor: D. RUTLEDGE

M. D. Abouzahra	K. L. Carr	S. J. Fiedziuszko	H. Hwang	R. Levy	A. S. Omar	A. J. Sangster	M. Tsutsumi
J. D. Adam	K. R. Carver	J. G. Fikioris	J. C. M. Hwang	G.-C. Liang	H. Oraizi-Esfahani	T. K. Sarkar	J. Uher
M. G. Adlerstein	R. H. Caverly	C. A. Flory	R. J. Hwu	J. C. Lin	K. Osafune	J. O. Scanlan	A. Uhlir
M. N. Afsar	Z. J. Cendes	K. R. Foster	A. Iida	I. V. Lindell	D.-S. Pan	D. H. Schaubert	F. T. Ulaby
K. K. Agarwal	H. J. Chaloupka	M. Fujii	T. K. Ishii	S. Lindenmeier	G.-W. Pan	B. Schiek	N. K. Uzunoglu
M. Aikawa	C. H. Chan	R. J. Gagne	A. Ishimaru	H. Ling	A. Paoella	M. Schindler	R. Vahldieck
M. Akaike	F. Chang	O. P. Gandhi	K. Itoh	D. K. Linkhart	J. Papapolymerou	L.-P. Schmidt	P. M. van den Berg
Y. Akaiwa	K. Chang	F. E. Gardiol	T. Itoh	K. Lonngren	D. Parker	K. F. Schunemann	T. E. Van Deventer
M. I. Aksun	S. K. Chaudhuri	S. Gearhart	D. Jablonski	J. LoVetri	R. Parry	J. E. Schutt-Aine	A. VanderVost
B. Albinsson	C.-H. Chen	S. D. Gevorney	C. Jackson	R. Luebbers	F. W. Pascher	F. K. Schwing	V. V. Varadan
F. Alessandri	C. H. Chen	G. G. Gentili	R. W. Jackson	Z. Ma	M. Pastorino	A. Seabaugh	L. Vietzorreck
N. G. Alexopoulos	J.-Y. Chen	J. Gerber	A. F. Jacob	S. A. Maas	C. R. Paul	A. J. Seeds	C. Vittoria
S. Amari	Z. Chen	S. Gevorgian	G. L. James	R. H. MacPhie	K. Paulsen	S. Semonov	R. H. Voelker
L. S. Andersen	W. C. Chew	W. Geyi	R. H. Jansen	A. Madjar	J. Pavio	J. Sevic	R. W. Vogel
I. Angelov	J. Chilo	F. M. Ghannouchi	J. M. Jarem	M. L. Majewski	D. Pavlidis	A. K. Sharma	J. Volakis
R. E. Anholt	C.-K. Chou	G. Ghione	A. Jelenski	M. Makimoto	W. Pearson	H. Shigesawa	V. Volman
W. J. Anklaam	M. Claassen	B. K. Gilbert	S. K. Jeng	T. Manabe	S.-T. Peng	Y. C. Shih	D. F. Wait
Y. Antar	S. T. Clegg	R. J. Gilmore	G. Jerinic	R. R. Mansour	R. Pengelly	T. Shiozawa	P. Waldow
J. W. Archer	R. Coccioli	A. W. Glisson	J. Jin	L. Marchildon	J. A. Pereda	W. A. Shiroma	J. L. B. Walker
F. Arndt	R. E. Collin	P. F. Goldsmith	W. T. Joines	R. B. Marks	A. F. Peterson	J. Shmoys	J. J. H. Wang
P. Asbeck	G. Conciauro	G. Gonzalez	J. S. Joshi	L. Martens	W. F. Pickard	N. V. Shuley	R. W. Waugh
A. E. Atia	C. Courtney	A. Gopinath	K. Joshi	K. D. Marx	M. Picket-May	M. Shur	D. Webb
I. Awai	J. Crescenzi	J. Graffeuil	A. Jostingmeier	A. Materka	R. J. Pogorzelski	B. Sigmon	J. P. Webb
Y. Ayasli	T. W. Crowe	R. D. Graglia	S. Judah	G. L. Matthaei	D. Pompei	A. H. Sihvola	K. J. Webb
I. J. Bahl	C. W. Crowley	G. L. Gragnani	R. Kagiwada	D. S. Matthews	G. E. Ponchak	K. Silvonon	H. Wei
A. J. Bahr	W. R. Curtice	M. Guglielmi	D. Kajfez	J. R. Mautz	Z. Popovic	R. N. Simons	R. Weigel
S. N. Bajpai	B. N. Das	P. Guillon	H. Kamitsuna	F. Medina	M. Pospieszalski	Z. Skvor	R. M. Weikle
J. Baker-Jarvis	N. K. Das	K. C. Gupta	M. Kanda	K. K. Mei	D. M. Pozar	C. E. Smith	C. Weil
C. A. Balanis	J. B. Davies	R. Gupta	A. Karp	W. Menzel	P. Pramanick	G. S. Smith	T. Weiland
J. V. Balbastre	W. A. Davis	R. J. Gutmann	T. Kashiwa	F. Mesa	S. Prasad	R. P. Smith	J. A. Weiss
J. W. Bandler	D. Dawson	W. K. Gwarek	L. P. B. Katehi	A. R. Mickelson	R. Pregla	C. M. Snowden	R. J. Wenzel
I. Barba	A. A. De Salles	G. I. Haddad	F. Kauffman	R. Minasian	A. C. Priou	W. Snyder	M. Werner
I. Bardi	D. De Zutter	P. R. Haddad	R. T. Kemerley	J. W. Mink	R. A. Pucel	R. V. Snyder	J. Whelehan, Jr.
B. D. Bates	J. E. Degenford	S. Kenney	S. Kenney	R. Mittra	Y. Qian	R. A. Soares	J. Whitaker
H. Baudrand	M. P. DeLisio	D. Halchin	P. Kennis	K. Mizuno	F. Raab	H. Sobol	K. W. Whites
W. D. Becker	B. C. Deloach	M. A. K. Hamid	S. Kenney	S. Mizushima	V. Radisic	R. Sobolewski	W. Wiesbeck
B. Beker	E. J. Denlinger	V. F. Hanna	A. R. Kerr	J. P. Mondal	R. Raghuram	K. Solbach	A. E. Williams
P. Bernardi	A. Deutsch	G. W. Hanson	R. J. King	M. Mongiardo	C. J. Railton	R. Sorrentino	D. Williams
H. L. Bertoni	N. Dib	W. Harth	T. Kitazawa	N. Morita	O. M. Ramahi	P. Staecker	J. C. Wiltse
A. Beyer	A. R. Djordjevic	H. L. Hartnagel	R. H. Knerr	A. Mortazawi	C. Rappaport	P. Starski	P. Winsen
P. Bhartia	J. Dobrowolski	J. Harvey	Y. Kobayashi	M. Mrozowski	J. Rautio	J. Staudinger	I. Wolff
M. E. Bialkowski	R. Drayton	H. Hasegawa	T. Koike	S. Munoz	G. M. Rebeiz	P. R. Stauffer	K. Wong
E. M. Biebl	D. G. Dudley	E. E. Hassan	A. Koksal	M. Muraguchi	J. M. Rebollar	M. B. Steer	G. S. Woods
G. L. Bilbro	G. Dural	C. Hearn	J. J. Komiak	Y. Murakami	C.-L. Ren	K. D. Stephan	K. Wu
J. R. Birch	M. Dydyk	J. Heaton	J. A. Kong	V. Nair	R. Reuter	M. S. Stern	K.-L. Wu
F. Boegelsack	J. East	W. Heinrich	A. Konrad	M. Nakajima	G. P. Riblet	M. Stuchly	R.-B. Wu
R. R. Boix	L. F. Eastman	G. L. Heiter	M. Koshiba	M. S. Nakhla	A. N. Riddle	S. S. Stuchly	Y. S. Wu
J. Bornemann	T. F. Eibert	N. Herscovici	N. H. L. Koster	S. Nam	M. Righi	R. Sturdivant	S. Xu
J. A. Bornholdt	H. Eisele	C. W. Hicks	S. K. Koul	E. A. Navarro	M. Rittweger	S. E. Sussman-Fort	H. Yabe
R. G. Bosio	S. El-Ghazaly	D. A. Hill	A. W. Kraszewski	E. H. Newman	V. Rizzoli	D. G. Swanson	A. B. Yakovlev
J. Braunstein	B. El-Sharawy	W. J. R. Hoefer	K. E. Kreischer	H. S. Newman	S. V. Robertson	C. Swift	E. Yamashita
M. Bressan	E. El-Sharawy	R. K. Hoffmann	J. G. Kretschmar	M. Ney	G. P. Rodrigue	W. Tabbara	H.-Y. Yang
W. B. Bridges	J. A. Encinar	K. Hongo	C. M. Krowne	C. Nguyen	M. J. W. Rodwell	A. Taflove	H.-W. Yao
E. Brown	W. J. English	W. E. Hord	J. Krupka	J. S. Nielsen	U. L. Rohde	Y. Takimoto	K. Yasumoto
G. S. Brown	N. R. Erickson	D. Hornbuckle	W. Kruppa	Y. Nikawa	D. E. Root	F. L. Teixeira	G. A. Ybarra
R. E. Brown	L. Escotte	M. Horno	H. J. Kuno	M. Nisenoff	L. Roselli	E. Tentzeris	K. S. Yngvesson
C. Buntschuh	R. D. Esman	M. C. Horton	J. T. Kuo	D. Novak	A. Rosen	M. K. Thumm	T. Yoneyama
D. P. Butler	C. Eswarappa	B. Houshmand	A. Lakhtakia	K. Ohata	G. Roussy	M. Toupikov	R. A. York
J. Butler	H. J. Eul	H. How	P. Lampariello	F. Okada	T. E. Rozzi	V. Trenkic	N. Yoshida
Q. Cai	M. T. Faber	M. J. Howes	M. Lancaster	Y. Okamura	A. E. Ruehli	S. Tretyakov	S. Yoshikado
M. Calcaterra	D. G. Fang	K. W. Hui	L. E. Larson	A. Oki	D. Rutledge	R. J. Trew	P. Yu
A. C. Cangelaris	J. Fang	W. Humbert	J. Laskar	M. Okoniewski	A. Rydberg	J. L. Tsalamengas	K. A. Zaki
S. Caorsi	D. A. Fathy	F. P. Hunsberger	P. A. A. Laura	A. A. Oliner	P. Saguet	L. Tsang	Q.-J. Zhang
A. Cappy	M. Feldman	B. Huyart	G. Lazzi	F. Olyslager	P. K. Saha	M. Tsuji	A. Zhao
L. Carin	A. Fernandez	I. Huynen	G.-T. Lei		J. N. Salhalos		J. F. Zuercher
	H. R. Fetterman	D. Levine					C. Zuffada