



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							

Honorary Life Members

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

Distinguished Lecturers

F. ALI	H. J. DE LOS SANTOS	T. LEE
P. ASBECK	J. JENSEN	R. B. MARKS
R. COMPTON	A. KATZ	R. WEIGEL

Past Presidents

R. W. SUDBURY (2000)
E. A. REZEK (1999)
R. D. POLLARD (1998)

MTT-S Chapter Chairs

Albuquerque: J. LEHR	Foothills: B. B. SZENDRENYI	Nizhny Novgorod: Y. I. BELOV	Southeastern Michigan: L. M. ANNEBERG
Atlanta: J. FORDHAM	France: D. PASQUET	North Jersey: K. DIXIT	Spain: L. DE-HARO
Austria: R. WEIGEL	Germany: W. S. MENZEL	Novosibirsk: B. KAPILEVICH	Springfield: S. C. REISING
Baltimore: H. N. FUEDEM	Greece: I. XANTHAKIS	Oregon: R. HAMILTON, D. FERWALT	Sweden: J. JOHANSSON
Beijing: Y.-R. ZHONG	Hong Kong: K. M. LUK	Orlando: P. WAHID	Switzerland: R. VAHLDECK
Benelux: B. NAUWELAERS	Houston: J. T. WILLIAMS	Ottawa: J. ROY	Syracuse: E. ARVAS
Buffalo: M. R. GILLETTE	Hungary: T. BERCELI	Philadelphia: J. LAW	Taipei: D.-C. CHANG
Bulgaria: F. FILIPOV	India: K. S. CHARI	Phoenix: D. VASILESKA	Thailand: N. YOOTANOM
Central Iowa/Cedar Rapids: D. JOHNSON	Israel: A. MADJAR	Poland: J. K. PIOTROWSKI	Tomsk: O. V. STOUKATCH
Central New England/Boston: J. D. KENNEDY	Japan: K. MIZUNO	Portugal: J. COSTA FREIRE	Toronto: R. ABHARI
Central & South Italy: P. BERNARDI	Kitchener-Waterloo: R. R. MANSOUR	Princeton/Central Jersey: W. R. CURTICE, A. KATZ	Tucson: J. PAPAPOLYMEROU
Chicago: H. VALENZUELA	Korea: S.-W. YUN	Rio de Janeiro/Brazil: J. R. BERGMANN	Turkey: L. GUREL
Cleveland: M. TABIB-AZAR	Lithuania: B. LEVITAS	Saint Louis: J. BORNHOLDT	Twin Cities: M. J. GAWRONSKI
College Station: R. D. NEVELS	Long Island/New York: M. HANCZOR, M. KNOX	Saint Petersburg: S. V. ZAGRIADSKI	Ukraine: P. MOLCHANOV
Columbus: S. ELLINGSON	Los Angeles: J. A. VERKADE	San Diego: U. DHALIWAL	Ukraine East: Y. M. KULESHOV
Croatia: J. BARTOLIC	Milwaukee: G. HANSON	San Fernando Valley: J. WEILER	Ukraine Kiev: Y. POPLAVKO
Czechoslovakia: P. BEZOUSEK	Minsk Belarus: S. A. MALYSHEV	Santa Clara Valley/San Francisco: S. BROZOVICH	Ukraine Rep. of Georgia: R. S. ZARIDZE
Dallas: P. WINSON	Mohawk Valley: E. P. RATAZZI	Saratov/Penza: M. V. DAVIDOVICH	United Kingdom/Ireland: A. REZAZADEH
Dayton: A. TERZOULI, JR.	Montreal: K. WU	Schenectady: R. J. GUTMANN	Venezuela: A. N. BIANCHI
Denver-Boulder: M. PIKET-MAY, C. L. HALLOWAY	Moscow: V. A. KALOSHIN	Seattle: T. RASCHKO	Victorian: R. B. WATERHOUSE
Egypt: I. A. SALEM	Nanjing: W. X. ZHANG	Singapore: C. S. TECK	Virginia Mountain: D. MILLER
Finland: J. J. TUOVINEN	New Hampshire: T. L. PERAGINE	South Africa: J. JOUBERT	Washington DC/Northern Virginia: M. D. NUESLEIN
Florida West Coast: E. W. GRIMES	New Jersey Coast: C. ALVAREZ	South Australia: H. J. HANSEN	Winnipeg: L. SHAFAI
	New South Wales: K. P. ESSELLE	South Brazil: H. FIGUEROA	Yugoslavia: A. MARINCIC
	North Italy: C. U. NALDI		

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

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

Associate Editors

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

JOEL B. SNYDER, *President*
RAYMOND D. FINDLAY, *President-Elect*
HUGO M. FERNANDEZ VERSTEGEN, *Secretary*
DALE M. CASTON, *Treasurer*
BRUCE A. EISENSTEIN, *Past President*
LYLE D. FEISEL, *Vice President, Educational Activities*

JAMES M. TIEN, *Vice President, Publications, Products & Services*
MAURICE PAPO, *Vice President, Regional Activities*
MARCO W. MIGLIARO, *President, Standards Association*
LEWIS M. TERMAN, *Vice President, Technical Activities*
NED R. SAUTHOFF, *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 © 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. Cover photo: Composite of Bellrock, Chiricahua, and Organ Pipe National Monuments, all in Arizona, design by Judi Glidden, JG Designs, Loveland, OH.

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