



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	
<i>Honorary Life Members</i>		<i>Distinguished Lecturers</i>		<i>Past Presidents</i>			
A. C. BECK	A. A. OLINER	K. TOMIYASU	R. DIXIT	C. RAUSCHER	R. E. BRYAN (1997)		
S. B. COHN	T. S. SAAD	L. YOUNG	P. HERCZFELD	A. ROSEN	J. W. WASSEL (1996)		
T. ITOH			W. MENZEL	J. WAKINO	E. D. COHEN (1995)		

S-MTT Chapter Chairmen

Albuquerque: D. P. MCLEMORE	Ithaca: R. C. COMPTON, N. KOLIAS	Saratov/Penza: M. V. DAVIDOVICH
Atlanta: G. D. HOPKINS	Kitchener-Waterloo: Y. L. CHOW	Schenectady: R. J. GUTMANN
Baltimore: J. MOELLERS, B. SEQUEIRA	Korea: D. C. PARK	Seattle: W. CHARCZENKA, M. CHEN
Beijing: W. G. LIN, W. X. ZHANG	Los Angeles: R. STURDIVANT, E. W. RAY	Singapore: M. S. LEONG-SENG, S. P. YEO
Benelux: K. VAN'T KLOOSTER, B. NAUWELAERS	Milwaukee: J. RICHIE, D. MISRA	South Africa: D. B. DAVIDSON, J. CLOETE
Buffalo: M. R. GILLETTE, H. MORRISON	Minsk Belarus: S. A. MALYSHEV	South Australia: B. D. BATES, A. J. PARFITT
Bulgaria: H. D. HRISTOV, P. I. PHILIPPOV	Montreal: G. L. YIP, C. C. HUANG	South Brevard Indian River: T. E. DURHAM, M. THURSBY
Central Iowa/Cedar Rapids: J. C. COZZIE, S. BURNS	Moscow: V. E. LYUBCHENKO	Southeastern Michigan: J. W. BURNS, T. GROTHORN
Central New England/Boston: S. D. MITTLEMAN	Nanjing: W. X. ZHANG	Spain: M. SALAZAR-PALMA, L. DE-HARO
Central & South Italy: P. BERNARDI	New Hampshire: D. L. BACON	Springfield: K. M. LAU
Chicago: E. G. BOGUS, J. P. PHILLIPS	New Jersey Coast: A. PAOLELLA, M. MIZAN	St. Louis: S. TRETAKOV
Cleveland: K. B. BHASIN, M. TABIB-AZAR	New South Wales: T. S. BIRD, C. WILSON	St. Petersburg: S. TRETAKOV
College Station: R. NEVELS, C. NGUYEN	New York/Long Island: M. HANCZOR	Sweden: J. JOHANSSON, S. HAGELIN
Columbus: R. LEE, H. SHAMANSKY	Nizhny Novgorod: Y. I. BELOV	Switzerland: L. PROST, W. BACHTOLD
Czechoslovakia: P. PECHAC	North Italy: C. N. NALDI	Syracuse: T. SARKAR, W. SONG
Dallas: C. LEE, S. PIERCE	North Jersey: C. GUPTA, W. SCHMIDT	Taiwan: S. H. HSU, J. L. LIUANG
Dayton: G. SIMPSON, R. LAYDEN	Novosibirsk: B. KAPILEVICH	Tbilisi: D. KARKASHADZE
Denver-Boulder: R. G. GEYER	Orlando: T. IVANOV	Thailand: N. YOOTHANOM
Egypt: O. L. EL-SAYED	Ottawa: D. H. REEKIE	Tokyo: T. NISHIKAWA
Finland: A. H. SIHVOLA, J. E. AURINSALO	Philadelphia: W. D. JEMISON, E. HOLZMAN	Toronto: T. E. VAN DEVENTER
Florida West Coast: M. SMITH, H. HILL	Phoenix: A. C. REYES	Tucson: H. C. KOHLBACHER, R. J. FINGER
Foothills: S. M. SAAD, K. SCHOEDER	Poland: W. GWAREK, B. LEVITAS, S. A. MALYSHEV	Turkey: A. BUYULKALSOY
France: R. F. ADDE, H. BAUDRAND	Portland: V. K. TRIPATHI, E. GODSHALK	Twin Cities: M. J. GAWRONSKI, J. LARSON
Germany: N. KEEN, J. D. BUCHS	Princeton/Central Jersey: W. R. CURTICE, A. KATZ	Ukraine East: A. I. NOSICH
Greece: G. KIRIAKIDIS	Rio de Janeiro/Brazil: J. R. BERGMANN, F. J. HASSELMANN	Ukraine Kiev: Y. M. POPLAVKO
Hong Kong: K. K. MEI	Russia: V. LIOUBCHENKO	Ukraine West: N. N. VOITOVICH
Houston: J. T. WILLIAMS, S. A. LONG	San Diego: P. YU, S. HARTS	United Kingdom/Ireland: N. WILLIAMS, A. A. REZAZADEH
Hungary: I. FRIGYES, T. BERCELI	San Fernando Valley: J. WEILER, JR., H. C. BELL	Venezuela: A. N. BIANCHI, R. SANCHES
Huntsville: H. L. BENNETT, C. PLANT	Santa Clara Valley/San Francisco: L. M. BURNS	Virginia Mountain: H. P. SINGH
India: K. S. CHARI, M. H. KORI	Sao Paulo: A. O. M. ANDRADE, E. D. LAGRIMAS, D. CONSONI	Washington DC/Northern Virginia: S. F. DALA, S. N. BAIJPAI
Indonesia: D. SIRAT		Winnipeg: L. SHAFAI
Israel: A. MADJAR, S. AUSTER		Yugoslavia: B. S. JOCANOVIC, O. BORIC

IEEE TRANSACTIONS® ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES

Editor	Associate Editors
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	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
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	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

JOSEPH BORDOGNA, <i>President</i>	FRIEDOLF M. SMITS, <i>Vice President, Publication Activities</i>
KENNETH R. LAKER, <i>President-Elect</i>	DANIEL R. BENIGNI, <i>Vice President, Regional Activities</i>
ANTONIO C. BASTOS, <i>Secretary</i>	L. JOHN RANKINE, <i>Vice President, Standards Association</i>
BRUCE A. EISENSTEIN, <i>Treasurer</i>	LLOYD A. MORLEY, <i>Vice President, Technical Activities</i>
ARTHUR WINSTON, <i>Vice President, Educational Activities</i>	JOHN R. REINERT, <i>President, IEEE USA</i>

WILLIAM G. DUFF, *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</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: VALERIE CAMMARATA
Production Director: ROBERT SMREK
Transactions Manager: GAIL S. FERENC
Electronic Publishing Manager: STEPHEN COHEN
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:** 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:** 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. Odyniec	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. Uhler
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. Voelker
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. A. Gossens	S. Kagami	R. G. Martin	K. 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	F. Kauffman	R. C. Graglia	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	A. R. Kwarek	A. R. Kerr	F. Merat	G. S. Smith	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	M. A. K. Hamid	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	R. 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. Komiak	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. Bomemann	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. Rizzzi	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. Hornbuckle	A. Lakhtakia	A. Navarro	U. L. Rohde	A. Taflve	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	