



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. E. BRYAN, <i>President</i>		R. D. POLLARD, <i>Vice President</i>		M. B. STEER, <i>Secretary</i>		E. A. REZEK, <i>Treasurer</i>	
J. T. BARR	S. J. FIEDZIUSZKO	R. H. JANSEN	R. D. POLLARD	M. J. SCHINDLER	G. R. THOREN	K. VARIAN	
R. E. BRYAN	K. C. GUPTA	R. T. KEMERLEY	J. W. RA	R. W. SUDBURY	R. J. TREW	E. YAMASHITA	
E. J. CRESCENZI	C. M. JACKSON	J. K. MCKINNEY	E. A. REZEK	D. J. SWANSON			
<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	J. W. WASSEL (1996)		
S. B. COHN	T. S. SAAD	L. YOUNG	P. HERCZFELD	A. ROSEN	E. D. COHEN (1995)		
T. ITOH			W. MENZEL	J. WAKINO	E. J. CRESCENZI (1994)		

S-MTT Chapter Chairmen

Albuquerque: E. G. FARR	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: Y.-R. ZHONG	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. PHILIPOV	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: P. CARR, P. MCCLAY	Nanjing: W. X. ZHANG	Spain: M. SALAZAR-PALMA, L. DEHARO
Central & South Italy: P. PAOLO, P. STEFANO	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: G. J. SCHMITT, M. STINSON
Cleveland: K. B. BHASIN, M. TABIB-AZAR	New South Wales: T. S. BIRD, C. WILSON	St. Petersburg: S. TRETYAKOV
College Station: R. NEVELS, C. NGUYEN	New York/Long Island: F. WINTER, R. POMIANER	Sweden: J. JOHANSSON, S. HAGELIN
Columbus: R. LEE, H. SHAMANSKY	Nizhny Novgorod: Y. I. BELOV	Switzerland: L. PROST, W. BACHTOLD
Czechoslovakia: M. ZEMAN, J. SVACINA	North Italy: C. V. 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: C. A. GAW, J. T. ABERLE	Tucson: H. C. KOHLBACHER, R. J. FINGER
Foothills: S. M. SAAD, K. SCHOEDER	Poland: W. GWAREK, E. SEDEK	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. LIOUBTCHENKO	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: S. F. WETENKAMP	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. BAJPAI
Indonesia: D. SIRAT		Winnipeg: H. MOHEB, M. BARAKAT
Israel: A. MADJAR, S. AUSTER		Yugoslavia: B. S. JOCANOVIC, O. BORIC

IEEE TRANSACTIONS® ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES

Associate Editors

Editor			
R. J. TREW	EIKICHI YAMASHITA	FAZAL ALI	LINDA KATEHI
Case Western Reserve Univ.	(<i>Electromagnetics/Guided Waves</i>)	(<i>Applications, Tutorial, and Review</i>)	(<i>Special Issues and Invited Papers</i>)
EEAP Department	The University of Electro-Communications	Nokia Mobile Phones	University of Michigan
516 Glennan Bldg.	Department of Electronic Engineering	R&D Center	EECS Department
Cleveland, OH 44106-7221	1-5-1 Chofugaoka	9605 Scranton Rd.	3240 EECS Bldg.
Phone: (216) 368-4089/4088	Chofu-shi	Suite 450	1301 Beal Avenue
Fax: (216) 368-2668	Tokyo 182 JAPAN	San Diego, CA 92121	Ann Arbor, MI 48109-2122
email: r.trew@ieee.org	Phone: +81-424-83-2161, ext. 3321	Phone: (619) 450-4020, ext. 331	Phone: (313) 747-1796
	Fax: +81-424-41-2588	Fax: (619) 677-7980	Fax: (313) 747-2106
	email: yama@wave.ee.ucc.ac.jp	email: fazal.ali@nmp.nokia.com	email: katehi@eeecs.umich.edu

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC.

Officers

CHARLES K. ALEXANDER, <i>President</i>	DANIEL R. BENIGNI, <i>Vice President, Professional Activities</i>
JOSEPH BORDOGNA, <i>President-Elect</i>	FRIEDOLF M. SMITS, <i>Vice President, Publication Activities</i>
PAUL Y. S. CHEUNG, <i>Secretary</i>	RAYMOND D. FINDLAY, <i>Vice President, Regional Activities</i>
HOWARD L. WOLFMAN, <i>Treasurer</i>	DONALD C. LOUGHRY, <i>Vice President, Standards Activities</i>
JERRY R. YEARGAN, <i>Vice President, Educational Activities</i>	LLOYD A. MORLEY, <i>Vice President, Technical Activities</i>

WILLIAM G. DUFF, *Director, Division IV—Electromagnetics and Radiation*

Executive Staff

DANIEL J. SENESE, *Executive Director*

DONALD CURTIS, <i>Human Resources</i>	ANDREW G. SALEM, <i>Standards Activities</i>
ANTHONY J. FERRARO, <i>Publications</i>	RICHARD D. SCHWARTZ, <i>Business Administration</i>
CECELIA JANKOWSKI, <i>Regional Activities</i>	W. THOMAS SUTTLE, <i>Professional Activities</i>
PETER A. LEWIS, <i>Educational Activities</i>	JOHN WITSKEN, <i>Information Technology</i>

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. Navarro	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	