



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

J. W. WASSEL, <i>President</i>		R. E. BRYAN, <i>Vice President</i>		R. E. LEHMANN, <i>Secretary</i>		D. G. SWANSON, <i>Treasurer</i>	
J. T. BARR	J. M. GOLIO	R. T. KEMERLEY	E. A. REZEK	G. R. THOREN	C. M. JACKSON	R. J. TREW	
R. E. BRYAN	D. HORNBUCKLE	R. D. POLLARD	M. J. SCHINDLER	J. W. WASSEL	D. J. SWANSON	D. C. WEBB	
S. J. FIEDZIUSZKO	R. H. JANSEN		R. W. SUDBURY		J. -W. RA	E. YAMASHITA	
<i>Honorary Life Members</i>		<i>Distinguished Lecturers</i>		<i>Past Presidents</i>			
A. C. BECK	A. A. OLINER	K. TOMIYASU	M. V. SCHNEIDER	K. WAKINO	E. D. COHEN (1995)		
S. B. COHN	T. S. SAAD	L. YOUNG	R. DIXIT		E. J. CRESCENZI (1994)		
T. ITOH					P. W. STAECKER (1993)		

S-MTT Chapter Chairmen

Albuquerque: D. D. MCLEMORE	Huntsville: H. L. BENNETT	San Diego: K.-L. P. YU
Atlanta: D. R. LEWIS, JR.	India: K. S. CHARI	San Fernando Valley: M. M. RADMANESH
Baltimore: H. B. SEQUEIRA	Indonesia: S. NATANAGARA	Santa Clara Valley/San Francisco: S. F. WETENKAMP
Beijing: W. G. LIN	Israel: A. MADJAR	Schenectady: R. J. GUTMANN
W. X. ZHANG	Kitchener-Waterloo: Y. L. CHOW	Seattle: J. MCCANDLESS
Benelux: K. VAN'T KLOOSTER	A. NATHAN	Singapore: L. MOOK-SENG
Buffalo: M. R. GILLETTE	Korea: D. C. PARK	South Africa: D. B. DAVIDSON
Bulgaria: H. D. HRISTOV	Los Angeles: J. A. VERKADE	South Australia: B. D. BATES
Central Iowa/Cedar Rapids: J. C. COZZIE	Milwaukee: J. RICHIE	South Brazil: A. O. M. ANDRADE
Central & South Italy: P. BERNARDI	Montreal: G. L. YIP	Southeastern Michigan: J. W. BURNS
Central New England/Boston: C. P. MCCLAY	New Hampshire: R. O. GEOFFROY	Spain: M. SALAZAR-PALMA
Central Virginia: S. H. JONES	New Jersey Coast: A. PAOLELLA	Springfield: J. B. MEAD
Chicago: J. DAVALOS	New South Wales: T. S. BIRD	St. Louis: R. W. KIEFEL
Cleveland: K. B. BHASIN	New York/Long Island: M. HANCZOR	Sweden: P. T. LEWIN
College Station: R. NEVELS	M. E. KNOX	Switzerland: W. BACHTOLD
Columbus: R. LEE	North Italy: C. U. NALDI	Syracuse: T. SARKAR
Czechoslovakia: M. ZEMAN	North Jersey: C. GUPTA	Taipei: G.-L. LIU
Dallas: S. R. NELSON	Oregon: V. K. TRIPATHI	Tokyo: Y. KOBAYASHI
Dayton: K. NAISHADHAM	Orlando: C. CHRISTODOULOU	Toronto: T. E. VAN DEVENTER
Denver-Boulder: R. G. GEYER	Ottawa: D. H. REEKIE	Tucson: H. C. KOHLBACHER
Egypt: I. A. SALEM	Philadelphia: W. D. JEMISON	Turkey: A. ALTINTAS
Finland: A. H. SIHVOLA	Phoenix: C. A. GAW	Twin Cities: M. J. GAWRONSKI
Florida West Coast: M. SMITH	Poland: J. W. MODELSKI	Ukraine: N. N. VOITOVICH
Foothill: D. A. PAUL	B. LEVITAS	United Kingdom/Ireland: T. H. OXLEY
France: R. A. ADDE	Princeton/Central Jersey: W. R. CURTICE	Venezuela: A. N. BIANCHI
Germany: F. ARNDT	Rio de Janeiro/Brazil: J. R. BERGMANN	Virginia Mountain: H. P. SINGH
Greece: N. K. UZUNOGLU	Russia: Y. I. BELOV	Washington D.C./Northern Virginia: S. BAJPAI
Houston: J. T. WILLIAMS	S. TRETYAKOV	Winnipeg: L. SHAFAI
R. D. NEVELS	M. V. DAVIDOVICH	Yugoslavia: B. S. JOCANOVIC
Hong Kong: K. K. MEI	V. LIOUBTCHENKO	
Hungary: I. FRIGYES		

IEEE TRANSACTIONS® ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES

Editor	Associate Editors	
R. J. TREW	EIKICHI YAMASHITA	FAZAL ALI
Case Western Reserve Univ.	(<i>Electromagnetics/Guided Waves</i>)	(<i>Applications, Tutorial, and Review</i>)
EEAP Department	The University of Electro-Communications	Nokia Mobile Phones
516 Glennan Bldg.	Department of Electronic Engineering	R&D Center
Cleveland, OH 44106-7221	1-5-1 Chofugaoka	9605 Scranton Rd.
Phone: (216) 368-4089/4088	Chofu-shi	Suite 450
Fax: (216) 368-2668	Tokyo 182 JAPAN	San Diego, CA 92121
email: r.trew@ieee.org	Phone: +81-424-83-2161, ext. 3321	Phone: (619) 450-4020, ext. 331
	Fax: +81-424-41-2588	Fax: (619) 677-7980
	email: yama@wave.ee.uec.ac.jp	email: fazal.ali@nmp.nokia.com
		LINDA KATEHI
		(<i>Special Issues and Invited Papers</i>)
		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@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, <i>Director, Division IV—Electromagnetics and Radiation</i>	

Executive Staff

DANIEL J. SENESE, *Executive Director*

DONALD CURTIS, <i>Human Resources</i>	ANDREW G. SALEM, <i>Standards Activities</i>
ANYHONY 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: ROBERT W. DAVIDSON

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
D. ZIMMERMAN-Phased and Active Arrays
R. SPARKS-Vehicular Technology
B. GELLER-Communication

Microwave Superconductor Applications
M. NISENOFF

Filters and Passive Components
H. C. BELL
R. V. SNYDER

Microwave Acoustics
B. MCAVOY

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	R. G. Carter	G. W. Ewell	J. B. Horton	D. K. Linkhart	J. Obregon	R. Sato	M. Tsuji
J. D. Adam	Z. J. Cendes	M. Faber	M. C. Horton	J. Litva	H. Ogawa	G. Saulich	M. Tsutsumi
M. G. Adlerstein	C. H. Chan	D. G. Fang	H. How	A. J. Lowery	F. Okada	J. O. Scanlan	R. S. Tucker
C. S. Aitchison	K. Chang	J. Feinstein	H. Howe	S. Lucyszyn	Y. Okamura	M. Schetzen	A. Uhler
Y. Akaiwa	W. S. C. Chang	A. Fernandez	C-W. Hsue	R. Luebbers	A. D. Olver	A. A. M. Saleh	T. ul Haq
M. I. Aksun	C. Chao	A. Ferrero	D. A. Huebner	S. A. Maas	F. Olyslager	B. Schiek	F. T. Ulaby
B. Albinsson	H. F. Chapell	S. J. Fiedziuszko	F. P. Hunsberger	R. H. MacPhie	A. S. Omar	M. Schindler	T. Uwano
N. G. Alexopoulos	W. Charczenko	J. G. Fikioris	H. Ikuno	A. Madjar	Ra. Padman	L. P. Schmidt	R. Vahldieck
F. Ali	S. K. Chaudhuri	C. A. Flory	T. Itoh	S. Maeda	R. W. Paglione	M. V. Schneider	M. Valtonen
S. Amari	C. H. Chen	V. A. Flyagin	D. Jablonski	S. F. Mahmoud	S-G. Pan	K. F. Schunemann	R. L. Van Tuyl
I. Angelov	S. H. Chen	G. Franceschetti	D. R. Jackson	M. L. Majewski	A. Paolella	J. E. Schutt-Aine	P. M. van den Berg
W. J. Anklam	Z. Chen	J. L. Freeman	R. W. Jackson	M. Makimoto	S. Papatheodorou	S. E. Schwarz	V. V. Varadan
J. W. Archer	W. C. Chew	R. Froelich	A. F. Jacob	R. R. Mansour	R. Parry	F. K. Schwing	G. D. Vendelin
F. Arndt	C-K. Chou	K. Fukui	G. L. James	L. Marchildon	C. R. Paul	A. J. Seeds	C. Vittoria
R. G. Arnold	C. Christopoulos	R. J. Gagne	R. Janaswamy	R. B. Marks	K. Paulsen	A. K. Sharma	R. H. Voelker
H. Ashoka	K. R. Chu	Z. Galani	J. M. Jarem	R. Marques	D. Pavlidis	H. Shigesawa	R. W. Vogel
A. E. Atia	S. L. Chuang	F. E. Gardiol	A. Jelenski	L. Martens	R. Pengelly	T. Shiozawa	J. Volakis
N. F. Audeh	M. Claassen	C. M. Gee	J. Jin	R. G. Martin	J. A. Pereda	N. V. Shuley	V. Volman
I. Awai	S. T. Clegg	B. Gelmont	W. T. Joines	A. Materka	A. F. Peterson	A. H. Sihvola	D. F. Wait
Y. Ayasli	R. E. Collin	G. G. Gentili	J. S. Joshi	G. L. Matthaei	A. R. Pinchuk	N. R. S. Simons	P. Waldow
T. L. Bagwell	B. Colpitts	W. Geyi	A. Jostingmeier	D. S. Matthews	R. D. Pollard	R. N. Simon	J. L. B. Walker
I. J. Bahl	R. C. Compton	G. Ghione	E. B. Joy	R. W. McMillan	Z. Popovic	C. Z. Smith	N. L. Wang
S. N. Bajpai	G. Conciauro	A. J. Giarola	S. Kagami	G. E. Meddaugh	A. Portis	G. S. Smith	D. Webb
J. Baker-Jarvis	H. M. Cronson	J. P. Gilb	T. Kashiwa	F. Medina	D. M. Pozar	C. M. Snowden	K. J. Webb
C. A. Balanis	T. W. Crowe	R. J. Gilmore	L. P. B. Katehi	M. D. Meehan	P. Pramanick	A. W. Snyder	R. M. Weikle
J. V. Balbastre	C. W. Crowley	J. Goel	S. Kawakami	K. K. Mei	S. N. Prasad	R. V. Snyder	S. Weinreb
J. W. Bandler	W. R. Curtice	M. Goldfarb	R. Keam	F. Merat	S. Prasad	R. A. Soares	J. A. Weiss
I. Bardi	S. D'Agostino	K. Goossen	P. C. Kendall	F. Mesa	R. Pregla	H. Sobol	A. Weisshaar
F. S. Barnes	L. C. da Silva	A. Gopinath	P. Kennis	J. S. Metcalfe	A. C. Priou	K. Solbach	M. J. Wengler
J. T. Barr	N. Dagli	C. Gough	P. J. Khan	R. Mittra	R. A. Pucel	M. N. Solomon	R. J. Wenzel
P. P. Barsony	A. S. Daryoush	R. Goyal	J.-F. Kiang	M. Miyagi	R. Raghuram	R. A. Spiciale	M. Werner
T. E. Batchman	N. K. Das	J. Graffeuil	R. W. P. King	C. I. Mobbs	C. J. Railton	B. E. Spielman	J. F. White
B. D. Bates	M. Davidovitz	M. Guglielmi	R. J. King	A. H. Mohammadian	A. Raisanen	P. Staecker	K. W. Whites
H. Baudrand	M. Davies	P. Guillon	T. Kitazawa	J. P. Mondal	C. Rauscher	B. Stallard	W. Wiesbeck
B. Beker	L. E. Davis	K. C. Gupta	R. H. Knerr	M. Mongiardo	J. Rautio	J. P. Starski	N. Williams
I. Bennion	D. Dawson	R. J. Gutmann	E. L. Kollberg	C. R. Moore	G. M. Rebeiz	P. E. Stauffer	J. C. Wiltse
T. M. Benson	H. De Los Santos	W. K. Gwarek	J. J. Komak	J. Morente	C.-L. Ren	M. B. Steer	F. Winter
A. Beyer	D. De Zutter	D. Halchin	J. A. Kong	N. Morita	G. P. Riblet	K. D. Stephan	H. W. Wintroub
K. Bhasin	D. R. Decker	V. F. Hanna	A. Konrad	A. Mortazawi	H. J. Riblet	M. S. Stern	K.-L. Wong
M. E. Bialkowski	G. Y. Delisle	G. W. Hanson	M. Koshiba	J. E. Mulholland	L. Riggs	E. W. Strid	T. Wong
R. M. Biernacki	E. J. Denlinger	H. L. Hartnagel	N. H. L. Koster	K. Naishadham	C. L. Rino	S. S. Stuchly	G. S. Woods
G. L. Bilbro	R. Diaz	J. Harve	J. S. Kot	A. Nakatani	P. Rizzi	R. Sturdivant	R-B. Wu
O. Biro	N. Dib	M. Hashimoto	S. K. Koul	M. S. Nakhla	M. J. W. Rodwell	C-C. Su	S-C. Wu
R. R. Bonetti	A. R. Djordjevic	E. E. Hassan	A. W. Kraszewski	C. U. Naldi	D. A. Rogers	C. Sun	Y. S. Wu
R. G. Bosio	J. Dobrowolski	H. A. Haus	J. G. Kretzschmar	E. A. Navarro	U. L. Rohde	S. E. Sussman-Fort	H. Yabe
J. Braunstein	R. Dyczij-Edlinger	C. Hearn	C. M. Krowne	A. Navarro	D. E. Root	J. Svacina	E. Yamashita
M. Bressan	M. Dydyk	W. Heinrich	W. Kruppa	E. H. Newman	A. Rosen	J. Svedin	H-Y. Yang
R. E. Brown	J. East	G. L. Heiter	C. M. Kudsia	M. Ney	G. Roussy	D. G. Swanson	K. Yashiro
R. E. Bryan	L. F. Eastman	J. Helszajn	E. F. Kuester	K. T. Ng	H. E. Rowe	M. Tabib-Azar	K. Yasumoto
R. L. Camisa	R. L. Eisenhart	P. R. Herczfeld	E. Kuhn	C. Nguyen	P. Russer	A. Taflove	K. S. Yee
S. Caorsi	S. El-Ghazaly	N. Herscovici	A. Lakhtakia	K. B. Niclas	D. Rutledge	C. T. Tai	T. S. Yeo
A. Cappy	E. El-Sharawy	D. A. Hill	P. Lampariello	J. S. Nielsen	A. Rydberg	S. H. Talisa	K. S. Yngvesson
L. Carin	A. Z. Elsherbeni	J. H. Hinken	J-F. Lee	W. T. Nisbet	D. Rytting	W. R. Tinga	N. Yoshida
J. W. Carlin	A. F. Emery	K. Hirai	R. Levy	T. Nishikawa	M. N. O. Sadiku	K. Tomiyasu	A. M. Young
L. Carin	N. Engheta	W. J. R. Hoefler	L. P. Ligthart	M. Norgren	P. K. Saha	B. S. Tremblay	B. Young
J. W. Carlin	W. J. English	K. Hongo	J. C. Lin	D. Novak	J. N. Sahalos	S. Tretjakov	K. A. Zaki
J. E. Carroll	N. R. Erickson	D. Hornbuckle	I. V. Lindell	J. Obregon	J-I. Sakai	R. J. Trew	M. Zoboli
S. Li	C. Eswarappa	M. Horno	H. Ling	D. Novak	A. J. Sangster	J. L. Tsalamengas	C. Zuffada
R. K. Hoffmann	H. J. Eul						