



TRẦN XUÂN NAM - LÊ MINH TUẤN

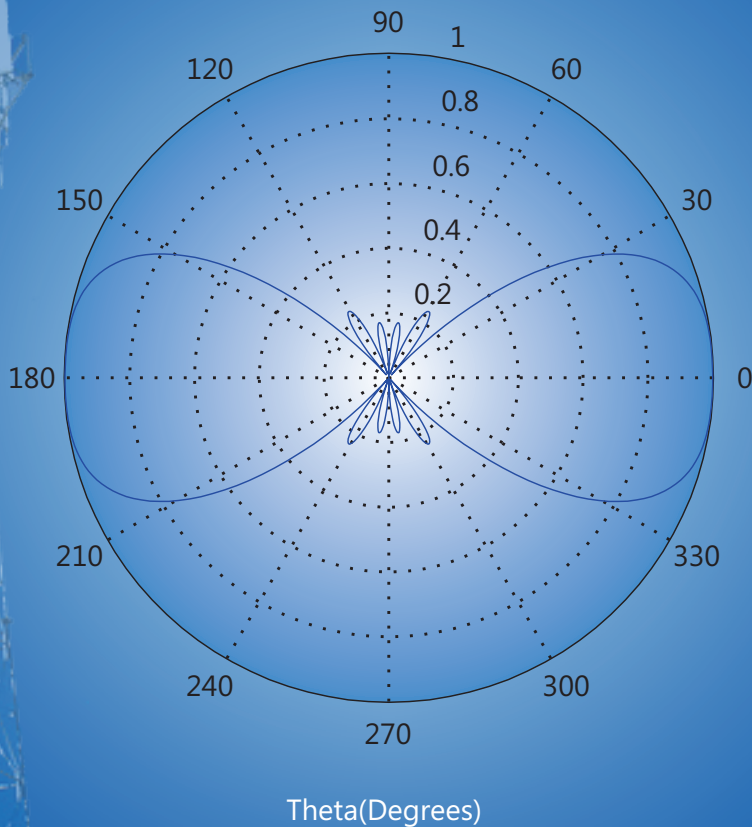
XỬ LÝ TÍN HIỆU KHÔNG GIAN - THỜI GIAN

Lý thuyết và Mô phỏng

XỬ LÝ TÍN HIỆU KHÔNG GIAN - THỜI GIAN



Normalized pattern



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT

PGS.TS. Trần Xuân Nam (*Chủ biên*) - TS. Lê Minh Tuấn

Xử lý tín hiệu không gian và thời gian

Lý thuyết và Mô phỏng



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT

Mục lục

Lời nói đầu	xiii
I Cơ sở về lập trình MATLAB và lý thuyết mô phỏng	1
1 Giới thiệu MATLAB	3
1.1 MATLAB là gì?	3
1.2 Khởi động và Thoát khỏi MATLAB	5
1.3 Làm việc với MATLAB Desktop	6
1.4 Các lệnh MATLAB cơ bản	7
1.5 Các ký hiệu đặc biệt	8
Tài liệu tham khảo	10
2 Tính toán và lập trình sử dụng Matlab	11
2.1 Các phép tính số học	11
2.2 Các toán tử so sánh	12
2.3 Các toán tử logic	14
2.4 Véc-tơ và Ma trận	16
2.5 Lập trình với MATLAB	24
2.6 Sử dụng đồ họa trong MATLAB	33
Tài liệu tham khảo	38
3 Lý thuyết mô phỏng	39
3.1 Khái niệm và vai trò của mô phỏng	39
3.2 Ví dụ về sự cần thiết của mô phỏng trong truyền thông	41

3.3	Nguyên lý xây dựng mô hình mô phỏng	45
3.4	Các phương pháp mô phỏng	47
3.5	Các tham số liên quan đến mô phỏng	48
3.6	Mô phỏng Monte-Carlo trong thông tin số	51
3.7	Mô phỏng băng thông và mô phỏng băng gốc	60
3.8	Tóm tắt chương	62
	Tài liệu tham khảo	62

II Lý thuyết kênh truyền và các phương pháp điều chế 63

4	Kênh thông tin vô tuyến	65
4.1	Kênh tạp âm AWGN	65
4.2	Kênh pha-đỉnh	70
4.3	Kênh pha-đỉnh Rayleigh	79
4.4	Kênh pha-đỉnh Rice	80
4.5	Mô phỏng pha-đỉnh Rayleigh và pha đỉnh Rice	82
4.6	Tóm tắt	88
	Tài liệu tham khảo	88
5	Các kỹ thuật điều chế số	91
5.1	Các hệ thống thông tin số	91
5.2	Các phương pháp điều chế cơ sở	94
5.3	Phương pháp điều chế PSK	97
5.4	Kỹ thuật điều chế biên độ cầu phương QAM	112
5.5	Mô phỏng truyền dẫn BPSK qua kênh AWGN	122
5.6	Mô phỏng hệ thống truyền dẫn MPSK	125
5.7	Mô phỏng truyền dẫn QAM	129
5.8	Tóm tắt	133
	Tài liệu tham khảo	133

III Các hệ thống phân tập và ăng-ten mảng thích nghi 153

6	Kỹ thuật thu phát phân tập không gian-thời gian	155
6.1	Các phương pháp phân tập	155
6.2	Kỹ thuật kết hợp phân tập không gian thu	159
6.3	Kỹ thuật kết hợp phân tập không gian phát	174
6.4	Tóm tắt	186
	Tài liệu tham khảo	186
7	Ăng-ten thích nghi	195
7.1	Các khái niệm cơ bản	195
7.2	Mô hình tín hiệu mảng ăng-ten	196
7.3	Nguyên lý tạo búp sóng thích nghi	200
7.4	Đặc tính búp sóng của ăng-ten thích nghi	204
7.5	Tiêu chuẩn tối ưu phẩm chất	205
7.6	Các thuật toán thích nghi	211
7.7	Ưu điểm của ăng-ten thích nghi	216
7.8	Tóm tắt	219
	Tài liệu tham khảo	220

IV Mã không gian-thời gian và các hệ thống MIMO 231

8	Các hệ thống MIMO	233
8.1	Mô hình kênh MIMO	233
8.2	Dung lượng kênh truyền MIMO	236
8.3	Các phương pháp truyền dẫn trên kênh truyền MIMO	246
8.4	Ghép kênh theo không gian	248
8.5	Các bộ tách tín hiệu tuyến tính	251
8.6	Các bộ tách tín hiệu phi tuyến	259
8.7	Tóm tắt	292
	Tài liệu tham khảo	293

9	Mã không gian – thời gian	321
9.1	Giới thiệu	321
9.2	Mã khối không gian – thời gian	322
9.3	Tóm tắt	339
	Tài liệu tham khảo	340

Danh sách hình vẽ

1.1	Môi trường làm việc của MATLAB	6
2.1	Đồ thị $\sin(x)$ và $\cos(x)$	35
2.2	BER của hệ thống BPSK trên kênh pha-đỉnh Rayleigh.	36
3.1	Hệ thống truyền thông qua kênh AWGN có thể dễ dàng thực hiện phân tích giải tích.	42
3.2	Ví dụ về một hệ thống khó thực hiện phân tích giải tích [1].	45
3.3	Lược đồ xây dựng mô hình mô phỏng.	46
3.4	Mối quan hệ giữa sai số, thời gian chạy mô phỏng theo độ phức tạp của mô hình [1].	46
3.5	Mô hình mô phỏng Monte-Carlo [3].	52
3.6	Biểu diễn phương pháp mô phỏng Monte-Carlo.	54
3.7	Ảnh hưởng của số lượng mẫu N tới độ chính xác của kết quả mô phỏng.	59
4.1	Một ví dụ về tạp âm Gauss với giá trị trung bình 0 và phương sai $\sigma_z^2 = 1$	66
4.2	Hàm mật độ xác suất Gauss với $\sigma_z^2 = 1$	67
4.3	Mật độ phổ công suất và hàm tự tương quan của tạp âm trắng.	68
4.4	Hàm phân bố của tạp âm AWGN.	70
4.5	Mô hình truyền sóng đa đường.	71
4.6	Sự lan truyền của đường l tới một trạm MS.	72

4.7 Một ví dụ về đáp ứng xung của kênh đa đường. 75

4.8 Mô tả phổ tần Doppler có dạng hình chữ U. 77

4.9 Kênh truyền đa đường được mô hình hóa như một bộ lọc FIR có các hệ số không đổi theo thời gian; $\tau_l = (l + 1)\tau$ 78

4.10 Đáp ứng xung của một bộ lọc FIR. 78

4.11 Đáp ứng tần số của kênh truyền pha-đỉnh: (a) Kênh pha-đỉnh phẳng, (b) Kênh pha-đỉnh chọn lọc theo tần số. 79

4.12 Hàm phân bố Rayleigh với $\sigma_h^2 = 1$ 81

4.13 Hàm phân bố Rice cho các giá trị khác nhau của K với $A_p = 1$ 83

4.14 Đường bao tín hiệu bị pha-đỉnh Rayleigh, số lượng tia $L = 35$, tần số Doppler cực đại $f_D = 100$ Hz. 85

4.15 Đường bao tín hiệu bị pha-đỉnh Rice, số lượng tia $L = 35$, tần số Doppler cực đại $f_D = 100$ Hz, hệ số Rice $K = 5$ và $K = 10$ 87

5.1 Sơ đồ khối của một hệ thống thông tin số điển hình. 91

5.2 Mô hình hệ thống thông tin số với điều chế và giải điều chế. 93

5.3 Các ví dụ về điều chế số băng gốc. 95

5.4 Các phương pháp điều chế sóng mang cơ sở. 96

5.5 Biểu diễn tín hiệu BPSK trong không gian hai chiều. 98

5.6 Sơ đồ bộ điều chế/giải điều chế đồng bộ BPSK. 99

5.7 Chòm sao tín hiệu 8PSK sử dụng mã hóa Gray. 103

5.8 Sơ đồ điều chế và giải điều chế MPSK. 104

5.9 Xác suất lỗi ký hiệu của tín hiệu MPSK trong kênh AWGN. 106

5.10 Xác suất lỗi ký hiệu gần đúng của tín hiệu MPSK. 107

5.11 Xác suất lỗi ký hiệu của tín hiệu MPSK trong kênh pha-đỉnh Rayleigh. 111

5.12	Một số dạng chòm sao tín hiệu QAM.	115
5.13	Sơ đồ bộ điều chế và giải điều chế QAM.	117
5.14	Chòm sao tín hiệu 16-QAM với mã hóa Gray.	118
5.15	Xác suất lỗi ký hiệu của tín hiệu QAM trong kênh AWGN.	120
5.16	Xác suất lỗi ký hiệu của tín hiệu QAM trong kênh pha-đỉnh Rayleigh.	121
5.17	Sơ đồ mô phỏng truyền dẫn BPSK trên kênh AWGN.	123
5.18	Phẩm chất BPSK trên kênh AWGN.	125
5.19	Mô phỏng truyền MPSK qua kênh pha-đỉnh Rayleigh.	126
5.20	Phẩm chất lỗi của hệ thống 8PSK trên kênh AWGN.	129
5.21	Phẩm chất lỗi của hệ thống 8PSK trên kênh pha-đỉnh Rayleigh.	130
5.22	Phẩm chất lỗi của hệ thống 16QAM trên kênh AWGN.	132
5.23	Phẩm chất lỗi của hệ thống 16QAM trên kênh pha- đỉnh Rayleigh.	133
6.1	Mô hình phương pháp kết hợp chọn lọc.	160
6.2	Phân phối xác suất (CDF) của SNR cho phương pháp kết hợp phân tập lựa chọn. (Vẽ bằng chương trình <code>combSNRcdf.m</code>).	162
6.3	Độ lợi phân tập của các phương pháp kết hợp phân tập. (Vẽ bằng chương trình <code>combSNRcdf.m</code>)	163
6.4	Mô hình phương pháp kết hợp tỷ số cực đại.	165
6.5	Phân phối xác suất (CDF) của SNR cho phương pháp kết hợp tỉ số cực đại. (Vẽ bằng chương trình <code>combSNRcdf.m</code>)	168
6.6	Sơ đồ cấu trúc máy thu với 2 nhánh phân tập MRC và một bộ tách tín hiệu tối ưu.	171
6.7	Phẩm chất BER trung bình của máy thu MRC với M nhánh phân tập sử dụng điều chế BPSK.	174

6.8	Sơ đồ phân tập MRT có N nhánh phân tập với các đường phản hồi.	176
6.9	Sơ đồ cấu hình phân tập phát giữ chậm với N nhánh phân tập.	177
6.10	Sơ đồ máy phát mã khối STBC Alamouti với 2 ăng-ten phát và 1 ăng-ten thu.	178
6.11	Sơ đồ Alamouti STBC với 2 ăng-ten phát và 2 ăng-ten thu.	182
6.12	Phẩm chất BER của các hệ thống Alamouti STBC so sánh với các hệ thống MRC.	185
7.1	Cấu hình một ăng-ten thích nghi với M phần tử.	196
7.2	Các cấu hình mảng khác nhau của ăng-ten thích nghi.	197
7.3	Mô hình tín hiệu của ăng-ten thích nghi.	198
7.4	Cấu hình một bộ tạo búp sóng băng hẹp.	201
7.5	Cấu hình bộ tạo búp sóng sử dụng các dây giữ chậm.	202
7.6	Bộ tạo búp sóng trên miền tần số sử dụng FFT. Ví dụ mô tả cho trường hợp xử lý tín hiệu tại một băng tần con k	203
7.7	Búp sóng chuẩn hóa của dàn tuyến tính cách đều với $M = 5$ phần tử và hướng phát xạ $\theta = 60^\circ$	205
7.8	Ví dụ về đường huấn luyện của thuật toán LMS. Ăng-ten mảng tuyến tính với $d = \lambda/2$, $M = 4$, $\mu = 0.05$, và $\text{SNR}_{\text{in}} = 0\text{dB}$	213
7.9	Một ví dụ về đường huấn luyện của thuật toán RLS. Ăng-ten mảng thích nghi với $d = \lambda/2$, $M = 4$, $\gamma = 0.999$, và $\text{SNR}_{\text{in}} = 0\text{dB}$	215
7.10	Tỉ số SNR đầu ra theo số phần tử ăng-ten.	217
7.11	Cải thiện vùng phủ nhờ sử dụng ăng-ten thích nghi.	218
8.1	Các mô hình phân tập không gian.	233
8.2	Mô hình kênh MIMO vô tuyến.	234

8.3	Mô hình tương đương của kênh truyền SISO.	237
8.4	Mô hình tương đương của kênh truyền MISO.	237
8.5	Mô hình tương đương của kênh truyền SIMO.	238
8.6	Mô hình kênh MIMO tương đương.	240
8.7	Dung lượng Ergodic ứng với các cấu hình MIMO khác nhau.	243
8.8	Dung lượng ergodic ứng với các giá trị SNR khác nhau.	245
8.9	Dung lượng outage $C_{out,5}/W$ ứng với các giá trị SNR khác nhau.	247
8.10	Phương pháp phân kênh theo không gian.	248
8.11	Phân loại các bộ tách tín hiệu MIMO-SDM.	249
8.12	Sơ đồ bộ tách tín hiệu tuyến tính cho MIMO-SDM.	251
8.13	Sơ đồ nguyên lý hoạt động của bộ tách tín hiệu V-BLAST.	263
8.14	Phẩm chất của các bộ tách tín hiệu cho hệ thống 4×4 MIMO-SDM.	266
8.15	Biểu diễn một dàn 2 chiều.	267
8.16	Ví dụ biểu diễn thao tác của thuật toán LLL trên một lưới 2 chiều.	269
8.17	Miền (vùng) quyết định của các bộ tách tín hiệu [18].	271
8.18	Mô hình tương đương của bộ tách tín hiệu có trợ giúp rút gọn cơ sở dàn.	273
8.19	Minh họa nguyên lý hoạt động của một bộ giải mã cầu.	279
8.20	BER của hệ thống 4×4 MIMO-SDM; Điều chế 16QAM.	284
8.21	Nguyên lý tìm các điểm tín hiệu của thuật toán giải mã cầu trong không gian phức.	287
8.22	Xác định thứ tự thử tối ưu tại lớp k cho các ký hiệu 8-PSK trong \mathbf{x}	290
8.23	BER của hệ thống 4×4 MIMO-SDM; Điều chế 8PSK.	292
9.1	Sơ đồ khối của một hệ thống mã hóa STBC.	322

9.2	Cấu trúc của một khung thông tin gồm các từ mã O-STBC.	334
9.3	Phẩm chất BER của mã OSTBC thực, $N = 4, M = 1$; Điều chế 4PAM.	338
9.4	Phẩm chất BER của mã OSTBC phức, $N = 4, M = 1$; Điều chế 16QAM.	339

Danh sách bảng

2.1	Các tham số định dạng đường đồ thị trong MATLAB	34
6.1	Quy luật mã hóa không gian-thời gian Alamouti . . .	177
8.1	Thuật toán tách tín hiệu QR	261
8.2	Thuật toán tách tín hiệu V-BLAST	264
8.3	Thuật toán rút gọn cơ sở dàn LLL	270

Lời nói đầu

Thông tin vô tuyến đã phát triển mạnh mẽ trong những thập niên vừa qua. Các hệ thống thông tin vô tuyến đã được ứng dụng rộng khắp, đáp ứng nhu cầu truyền thông tốc độ cao và truy nhập “mọi lúc, mọi nơi” của con người. Khác với các hệ thống truyền thông hữu tuyến, các hệ thống thông tin vô tuyến phải làm việc trong các điều kiện băng thông hạn chế và kênh truyền khắc nghiệt chịu ảnh hưởng của các hiện tượng: *pha-đỉnh*, *hiệu ứng Doppler* và *nhiều*. Để hạn chế được các ảnh hưởng này của kênh truyền vô tuyến, các kỹ thuật truyền dẫn tín hiệu đã được phát triển không ngừng. Từ các biện pháp phân tập không gian thu được đề xuất vào những năm 70, một loạt các kỹ thuật truyền dẫn và xử lý tín hiệu mới đã được đề xuất sử dụng và đưa vào các chuẩn giao diện vô tuyến cho các hệ thống thông tin di động đương thời. Phần lớn các kỹ thuật mới tập trung vào khai thác miền không gian còn nhiều tiềm năng, tạo nên kỹ thuật xử lý tín hiệu kết hợp không gian-thời gian. Các kỹ thuật xử lý tín hiệu không gian thời gian có thể kể ra bao gồm: kỹ thuật phân tập không gian thu/phát, kỹ thuật ăng-ten mảng thích nghi (adaptive array antenna), mã không gian thời gian (space-time code), và các hệ thống truyền dẫn đa ăng-ten phát đa ăng-ten thu (MIMO: Multiple Input Multiple Output).

Do có các ưu điểm nổi trội về nâng cao chất lượng tín hiệu thu, loại bỏ ảnh hưởng của hiện tượng truyền sóng đa đường, triệt nhiễu, và nâng cao dung lượng kênh truyền nên các kỹ thuật này đã được tích

hợp vào hầu hết các chuẩn giao diện vô tuyến cho các hệ thống thông tin di động 3G/4G, hệ thống WiMAX (Worldwide Interoperability via Microwave Access), Wi-Fi (Wireless Fidelity), và phát thanh, truyền hình số.

Cuốn sách này tập trung chính vào lý thuyết và phương pháp mô phỏng các kỹ thuật xử lý không gian thời gian nói trên. Mục tiêu của cuốn sách là cung cấp cho người đọc các kiến thức cơ bản nhất về mô hình tín hiệu, các thuật toán xử lý tín hiệu thu/phát, đến phương pháp mô hình hóa và xây dựng chương trình mô phỏng sử dụng công cụ Matlab. Nội dung cuốn sách được chia thành 3 phần:

- Phần 1: Cơ sở về lập trình Matlab và lý thuyết mô phỏng. Phần này trình bày cơ sở về lập trình MATLAB, lý thuyết cơ bản về mô phỏng, và phương pháp mô phỏng Monte-Carlo được sử dụng rộng rãi trong đánh giá các hệ thống truyền thông.
- Phần 2: Cơ sở lý thuyết kênh truyền và các phương pháp điều chế. Nội dung phần này tập trung về lý thuyết kênh truyền vô tuyến, phương pháp mô phỏng các kênh truyền vô tuyến phổ biến như kênh pha-đỉnh Rayleigh, pha-đỉnh Rice, và các phương pháp điều chế số.
- Phần 3: Các hệ thống phân tập và ăng-ten mảng thích nghi. Nội dung phần 3 tập trung vào các phương pháp phân tập không gian như các hệ thống phân tập không gian phát (MISO: Multiple-Input Single Input), các hệ thống phân tập không gian thu (SIMO: Single-Input Multiple-Output), các kỹ thuật kết hợp tín hiệu phân tập, và ăng-ten mảng thích nghi.
- Phần 4: Mã không gian-thời gian và các hệ thống MIMO. Phần này tập trung vào các kỹ thuật truyền dẫn không gian thời gian tiên tiến bao gồm: các phương pháp mã hóa và giải mã không gian-thời gian, phương pháp ghép kênh phân chia theo không gian và các kỹ thuật tách tín hiệu.

Cuốn sách được biên soạn nhằm đáp ứng nhu cầu giảng dạy và nghiên cứu về các lĩnh vực liên quan. Nội dung Phần 1 và Phần 2 đã được sử dụng làm giáo trình cho môn học *Mô phỏng các hệ thống viễn thông sử dụng MATLAB* phục vụ cho đào tạo đại học và sau đại học. Nội dung phần 3 và Phần 4 được sử dụng làm giáo trình cho môn học *Xử lý tín hiệu không gian thời gian* phục vụ cho đào tạo sau đại học. Toàn bộ nội dung cuốn sách được tổng hợp từ các kết quả nghiên cứu hơn 10 năm của các tác giả. Hi vọng cuốn sách cũng sẽ là nguồn tài liệu tham khảo có giá trị phục vụ cho đào tạo và nghiên cứu.

Nhóm tác giả

Trần Xuân Nam và Lê Minh Tuấn

Giới thiệu tác giả

PGS.TS Trần Xuân Nam sinh ngày 8/9/1971 tại Hà Giang, Hà Trung, Thanh Hóa. Tốt nghiệp Kỹ sư Vô tuyến Điện tử, chuyên ngành Thông tin, tại Học viện Kỹ thuật Quân sự năm 1993, Thạc sỹ Kỹ thuật Viễn thông tại Trường Đại học Kỹ thuật Sydney (UTS) của Australia năm 1998, Tiến sỹ Kỹ thuật Điện tử tại Trường Đại học Điện-Thông tin (UEC), Nhật Bản năm 2003. Từ 10/2003 đến tháng 3/2006 là giáo viên tại Trường Đại học Điện-Thông tin (UEC), Nhật Bản. PGS.TS Trần Xuân Nam được trao danh hiệu *Thủ khoa chuyên ngành Thông tin* của Học viện KTQS năm 1993, giải thưởng *Nhà khoa học Trẻ của Hiệp hội IEEE-APS, Nhật Bản năm 2003*, và đồng giải thưởng *Bài báo xuất sắc nhất Hội nghị Quốc tế về các Công nghệ tiên tiến trong Truyền thông 2012 (ATC2012)*. Hiện là Phó chủ nhiệm Khoa Vô tuyến Điện tử, Học viện Kỹ thuật Quân sự. Hướng nghiên cứu chính liên quan đến kỹ thuật xử lý tín hiệu cho thông tin vô tuyến bao gồm: kỹ thuật truyền dẫn, tách tín hiệu đa người dùng, kỹ thuật triệt nhiễu, ăng-ten thích nghi, mã không gian-thời gian và các hệ thống MIMO.

TS Lê Minh Tuấn sinh ngày 27/10/1976 tại Hoàng Hợp, Hoàng Hóa, Thanh Hóa. Tốt nghiệp Trường Đại học Bách khoa Hà Nội năm 1999, chuyên ngành Điện tử-Viễn thông, tốt nghiệp Thạc sỹ và Tiến sỹ tại Trường Đại học Thông tin Liên lạc (ICU), nay là Phân viện tại Viện Khoa học và Công nghệ Tiên tiến Hàn Quốc (KAIST) vào các năm 2003 và 2007. TS Lê Minh Tuấn là Giảng viên Khoa Kỹ thuật Điện tử I, Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông từ năm 1999 đến 2008. Hiện đang làm việc Trung tâm Nghiên cứu, Chuyển giao Công nghệ và Phân tích, Sở Khoa học và Công nghệ Hà Nội. TS Tuấn nhận đồng giải thưởng *Bài báo xuất sắc nhất Hội nghị Quốc tế về các Công nghệ tiên tiến trong Truyền thông 2012 (ATC2012)*. Lĩnh vực nghiên cứu chính bao gồm thông tin vô tuyến, mã không gian - thời gian, và các hệ thống MIMO.