

ま え が き

私は1997年に著書，“Digital Mobile Communication”を英語で出版した。当時は移動通信のデジタル化が導入の端緒にあったので、その基本技術の紹介を試みたのである。日本語版もすぐに出す計画であったものの、新しい技術とシステムがつぎつぎと登場したので、これらをできるだけ多く含めるために、時間をおくことにした。新しい技術の例としては、W-CDMA、ターボ符号、MIMO伝送、G.729音声符号化、OFDM(A)システム、周波数領域等化、パケット伝送スケジューリング、プレディストータによる非線形歪み補償、などが挙げられる。新しい技術は今後も登場すると思われるものの、いわゆる4G方式に至って、その峠は越えたものと私は考えている。これらのデジタル移動通信技術の進歩は、英語版を執筆した15年前の著者の予想をはるかに凌いでいる。これを可能にしたのは、半導体技術の発展であることをここに明記しておきたい。

移動通信サービスは世界中で進展した。サービス内容は、従来の音声主体からインターネットに接続してのデータおよび画像通信へ移行しつつある。これに伴い、例えば、最近のスマートホン端末は、音声に加えてパソコンとしての機能を備えており、その性能は年々強化されている。これにより、利用者は、場所の制約から解放されてインターネット接続を楽しめる。インターネットへの無線接続は、通信サービスの究極の形態であり、その機能の向上は今後とも続くであろう。

デジタル移動通信は通信の利便性の向上に加えて、新しいビジネス環境の一つとして、世界経済の拡大および効率化に貢献している。端末/システムの供給企業、通信サービスの提供者およびコンテンツ作成業者などが、多くの働き口を創出した。

本書の目的は、デジタル移動通信にかかわる要素技術とシステムの双方について、できるだけ幅広く含めて、基礎から応用までをできるだけ平易に解説することである。ここで、根拠を提示しないで結果だけを示す、いわゆる天下り記述は極力避けた。このような目的のためには、複数の著者がそれぞれの専門分野を分担して執筆することが望ましい。私が単独で書くことは、含める内容および記述の深さの全体的なバランスの点で不利である。ただし、著者の考え方および説明の仕方の統一性の点で、読者の興味および理解を増すのに役に立つと信じている。私が心掛けたことは、技術とシステムの本質をいかにわかりやすく書くかである。システムの詳細な記述は、世界中で多数出版されている専門書に当たっていただきたい。ここでは、古くなって現在は使用されていないシステムもそのまま含めたものがある。システム技術の進歩を読者が実感できる記念碑として有効であると思ったからである。

デジタル移動通信技術の進展を眺めてきて、私は基本概念の重要性について改めて認識した。基本概念の本質を押さえておけば、新しい技術を理解することはさほど困難ではない。技術の本質を捕えるためには、物理的直感と数学モデルによる理解を組み合わせることが有効である。私はこれをできるだけ試みた。そのための一つとして、信号とシステムの基礎から記述を始めることにして、その応用例を実際のシステムで言及した。本書は大学院の教科書および社会人向けの基礎的な専門書を意図している。初心者は、全体を一読してデジタル移動通信の技術とシステムの全体像をつかんでいただきたい。すでに理解を終えている研究者、技術者に対しても、理解の再確認や備忘録として役に立つものと期待している。ここでは、英語版での序文も参考までに再録した。英語版からの主な変更点は、2章の信号とシステムの記述を充実したこと、新しい技術である、ターボ符号、MIMO 伝送、G.729 音声符号化、OFDM(A) システム、周波数領域等化、パケット伝送スケジューリング、プレディストータによる非線形歪み補償などを加えたこと、および第3世代システムの進化について述べたことなどである。さらには、各章の構成も一部変更するとともに、一部の話題は割愛した。

本書を完成させるまでには、英語版の作成にあたって協力して下さった方々に加えてたくさんの人に助けていただいた。共同研究者であった九州大学の牟田修氏には、ターボ符号の原稿の改善とともに、図表の作成提供および旧版原稿の管理でお世話になった。電気通信大学の学生、馬岳林君、岩城晃二君には、本書で使用した図表の一部について、計算と作成を行っていただいた。北海道大学の犬鐘武雄氏と電気通信大学の谷口哲樹氏には、MIMO システムの原稿に目を通していただき、意見をいただいた。東北大学の安達文幸教授、東京都市大学の佐和橋衛教授には、最新の技術について長時間の携帯電話での会話を含めて、いつも快く教えていただいた。電気通信大学の皆様、特に、中嶋信生教授には私を先端ワイヤレスコミュニケーション研究センターに招いていただき、この本の執筆の便宜を図っていただいた。最後に、コロナ社は執筆が遅れたのにもかかわらず、親切な対応をしていただいた。助力いただいた方々の代表者としてここに記して感謝します。

2013年1月

電気通信大学
赤岩 芳彦

英語版序文

デジタル化は通信のみならず，他の分野，例えばデジタルオーディオ（コンパクトディスク）やデジタル制御を用いた機器などでの技術^{すうせい}趨勢である。デジタル化したシステムは，精度および安定性の点でアナログシステムに勝る。デジタル化を支えるものは，システムを実現するための大規模集積回路や計算機の進歩である。通信分野のデジタル化では，電話交換網でのデータおよびデジタル音声伝送，デジタルマイクロ波通信，デジタル光ファイバ通信が先行した。移動通信のデジタル化はこれらの分野に比べて遅れた。しかし，近年，デジタル移動通信の研究開発が爆発的に活発化しているので，その遅れを早急^{ばんかい}に挽回すると思える。この動きは，パーソナル通信，モバイルコンピューティング，モバイルマルチメディアなどのデジタル移動通信サービスによってさらに加速するであろう。

デジタル技術はどのような分野にも共通に応用できるものがある。しかし，分野ごとに要求条件が異なるので，直接的に応用できないものもある。移動通信における要求条件は，高速フェージングに対する強さ，周波数および電源の効率性，装置の小型，低価格性などである。これらの要求条件を満たすための技術としては，電波を使用することからして，変調および復調で代表される無線伝送技術である。本書では，デジタル伝送技術を重点において，デジタル移動通信技術の全体を紹介する。

1章では，デジタル移動通信とはなにか，なぜ移動通信をデジタル化するのかについて述べる。デジタル移動通信におけるさまざまな技術について，全体的に大まかな知識を与えることを目指している。

2章は，信号，雑音および信号システムについて，数学的な解析を行う。信号解析では，デルタ関数，フーリエ変換，相関関数，デジタル信号の表現，

平均電力，電力スペクトル密度，変調信号の表現，および直交信号について述べる。雑音解析においては，雑音指数，雑音温度，雑音の統計的性質について説明する。

3章はデジタル通信方式の基礎を扱う。符号間干渉を生じないナイキスト基準，パーシャル応答方式，整合フィルタおよび最適受信機について述べる。

4章は移動通信回線を扱う。レイリーフェージング，周波数選択性フェージング，シャドーフージングおよび遠近問題などの移動通信に特徴的な事柄について述べる。

5章はデジタル変調について説明する。デジタル変調の基礎，変調信号の電力スペクトル，復調および誤り率の解析について述べる。

6章では，移動通信におけるデジタル変調方式について詳しく述べる。まず，定包絡線デジタル変調方式から始める。これには，MSK，TFM，GMSK，ナイキスト多値FM，PLL-QPSK，CCPSK，デュオカテナリFM，相関PSK，デジタルFMが含まれる。つぎに，線形変調方式について述べる。線形変調方式を移動通信に適応することの重要性とそのときの問題性にふれたのち， $\pi/4$ シフトQPSK，8PSK，16QAMなどの線形デジタル変調について説明する。

7章では，デジタル移動通信における，その他の技術について述べる。耐多重波変調方式，マルチキャリア伝送方式，スペクトル拡散通信，ダイバーシチ通信，適応等化器，誤り制御，トレリス符号化変調，適応干渉除去，音声符号化を取り上げている。

8章では，装置と回路の実現法について述べる。基地局および移動機の構成について説明した。ここでは，スーパーヘテロダインおよび直接変換による受信機の構成，送受信アンテナ共用回路，周波数合成回路，送信回路，受信回路，直流遮断およびオフセットへの対処法などが含まれる。

9章では，デジタル移動通信システムについて述べる。まず，セルラーシステムの概念，多重アクセス方式，回線割当て方式などの要素技術を説明する。つぎに，アナログFMにおけるデジタル伝送，無線呼出し方式，ディジ

タル無線電話，データサービスシステム，デジタルコードレス電話，デジタルセルラー電話システム，無線LAN，移動衛星通信システムを紹介する。

この本を書くにあたって，つぎのような目標を立てた。

- ・記述の深さは異なるものの，重要な技術のほとんどすべてを網羅する。
- ・信号とシステムおよびデジタル通信基礎から始めることで，初心者でも理解しやすくする。
- ・厳密な議論よりも，技術の意味するところの直感的な理解を与えることを優先する。
- ・デジタル移動通信システムを設計する技術者に役立つために，回路実現法を含める。

デジタル移動通信において，現在進められている研究開発の新しい成果により，本書のある部分は近い将来に陳腐化する運命にある。ただし，この本を執筆しているこの時期において，デジタル移動通信について網羅的，体系的に説明した本がないので，技術者，研究者に必ずや役に立つものと信じている。

技術（工学）は科学と違うところがある。科学とは異なって，工学ではよく知られている技術を組み合わせることによって，あるいは他の分野で開発された技術を導入することによって，その分野での新しい技術がもたらされる。新しい技術が提示された後では，その動作，重要性，動機を理解することは比較的やさしい。しかし，新しい技術を創り出すことはかなり難しい。カギとなる技術についてその背景も含めて，徹底的な理解が重要である。創造的な技術者および科学者にとって，最も大事なことは，目標達成へ向けた意欲と忍耐を持続することである。本書が，比較的新しい分野であるデジタル移動通信の研究者，技術者に役に立つことを願っている。

1996年12月

赤岩 芳彦

目 次

1. 序 論

1.1 デジタル移動無線通信方式	1
1.2 移動無線通信デジタル化の目的	5

2. 信号と線形システムの基礎

2.1 信号解析	10
2.1.1 デルタ関数	10
2.1.2 フーリエ解析	16
2.1.3 信号	27
2.1.4 デジタル信号	33
2.1.5 変調信号	36
2.1.6 等価ベースバンド複素表現	38
2.2 雑音解析	40
2.2.1 通信システムにおける雑音	40
2.2.2 雑音の統計的性質	42
2.2.3 雑音の電力スペクトル密度	44
2.2.4 フィルタ通過後の雑音の自己相関関数	45
2.2.5 帯域通過雑音	46
2.2.6 帯域通過雑音を含んだ正弦波信号の包絡線と位相	49
2.2.7 相関を有する確率変数の生成とその確率密度関数	51
2.3 線形システム	53
2.3.1 線形時不変システム	53

2.3.2	線形システムの応答	54
2.3.3	システムの微分方程式による記述	63
2.3.4	線形システムの例	66
2.4	離散時間システム	75
2.4.1	標本化と標本化定理	76
2.4.2	離散時間信号のエネルギー, 電力, 相関	79
2.4.3	離散時間信号のフーリエ変換	80
2.4.4	離散時間システムの応答	88
2.4.5	差分方程式による表現	96
2.4.6	デジタルフィルタ	98
2.4.7	ダウンサンプリング, アップサンプリングおよびサブサンプリング	103
2.4.8	逆回路	106
2.4.9	窓関数	107
2.4.10	離散フーリエ変換 (DFT)	108
2.4.11	高速フーリエ変換 (FFT)	112
2.5	最適化問題の解法と適応信号処理	115
2.5.1	最適化問題の解法	115
2.5.2	適応信号処理	119

3. デジタル通信方式の基礎

3.1	パルス整形	135
3.1.1	ナイキストの第1基準	136
3.1.2	ナイキストの第2基準	140
3.1.3	ナイキストの第3基準	141
3.1.4	その他のパルス整形法	142
3.2	線路符号	143
3.2.1	単極性 (オン・オフ) 符号と極性符号	143
3.2.2	多値符号	144
3.2.3	グレイ符号	145
3.2.4	マンチェスター (スプリットフェーズ) 符号	146
3.2.5	同期周波数偏移変調符号 (同期 FSK 符号)	147

3.2.6	相関符号化	148
3.2.7	差動符号化	155
3.3	信号検出	155
3.3.1	C/N , S/N , および E_b/N_0	156
3.3.2	ビット誤り率	157
3.3.3	NRZ 信号の積分放電フィルタ検出方式	162
3.3.4	ナイキスト I 信号方式	163
3.3.5	整合フィルタ	164
3.3.6	送受信フィルタの同時最適化	169
3.3.7	最適受信機	171
3.3.8	最尤受信機とビタビアルゴリズム	178
3.3.9	符号間干渉がない場合の最適受信機	181
3.4	同期	183
3.4.1	シンボルタイミング再生	183
3.4.2	フレーム同期	185
3.5	スクランブル	186
3.6	公開鍵暗号方式	189
3.7	多重伝送	191
3.8	通信路容量	193

4. 移動無線通信伝送路

4.1	搬搬損	197
4.2	シャドウイング	199
4.3	レイリーフェージング	200
4.3.1	高周波電力スペクトル	202
4.3.2	同相・直交成分の相関	203
4.3.3	包絡線の相関	203
4.3.4	包絡線の空間的相関	204
4.3.5	ランダム周波数変調 (ランダム FM)	205

4.4	遅延広がりと周波数選択性フェージング	206
4.4.1	コヒーレント帯域	209
4.4.2	周波数選択制フェージング	210
4.5	遠近問題	211
4.6	同一チャネル干渉	212
4.6.1	レイリーフェージング環境下	213
4.6.2	シャドウイング環境下	213
4.6.3	レイリーフェージングとシャドウイングの組合せ	213
4.6.4	議 論	214

5. デジタル変調の基礎

5.1	デジタル変調信号	216
5.2	線形変調と定振幅変調	217
5.3	デジタル変調	218
5.3.1	位相偏移変調 (PSK)	218
5.3.2	周波数偏移変調 (FSK)	222
5.3.3	定包絡線位相偏移変調 (定包絡線 PSK)	225
5.3.4	直交振幅変調 (QAM)	226
5.4	デジタル変調信号の電力スペクトル密度	226
5.4.1	線形変調	227
5.4.2	デジタル周波数変調 (デジタル FM)	228
5.5	復 調	230
5.5.1	同期検波	230
5.5.2	包絡線検波	243
5.5.3	差動 (同期) 検波	243
5.5.4	周波数弁別検波	248
5.5.5	フェージング回線における誤り率	262
5.6	デジタル通信システムの計算機シミュレーション	270

6. 移動無線通信におけるデジタル変調

6.1	アナログ FM 無線通信システム用デジタル変調	277
6.2	定包絡線変調	278
6.2.1	最小偏移変調 (MSK)	278
6.2.2	パーシャルレスポンスデジタル FM	289
6.2.3	ナイキスト帯域制限デジタル FM	301
6.2.4	特性比較	305
6.3	線形変調	306
6.3.1	$\pi/4$ シフト QPSK	309
6.3.2	8 値 PSK	314
6.3.3	16QAM, 64QAM	314
6.4	スペクトル拡散方式	315
6.5	マルチキャリア伝送	323
6.5.1	直交周波数分割多重 (OFDM)	324
6.5.2	マルチキャリアデジタル信号の生成と復調	332
6.5.3	マルチキャリア伝送における受信	337
6.6	単一搬送波周波数分割変調	340

7. デジタル移動無線通信におけるその他の関連技術

7.1	ダイバーシチ通信方式	343
7.1.1	SN 比の確率密度関数	346
7.1.2	平均誤り率	349
7.1.3	複数基地局送信ダイバーシチ	356
7.1.4	アンテナ選択ダイバーシチ	360
7.2	MIMO システム	365
7.2.1	最大比合成ダイバーシチ	366
7.2.2	時空間符号	375

7.2.3	空間分割多重伝送	377
7.3	適応自動等化器	394
7.3.1	線形等化器	395
7.3.2	等化における特性評価基準	398
7.3.3	判定帰還等化器	402
7.3.4	ビタビ等化器	403
7.3.5	適応アルゴリズムと予測アルゴリズム	404
7.3.6	予等化	404
7.3.7	周波数領域等化器	412
7.3.8	ターボ等化器	413
7.3.9	歪み等化器に関する議論	414
7.3.10	移動無線通信への適用	416
7.4	誤り制御技術	417
7.4.1	線形ブロック符号	420
7.4.2	巡回符号	422
7.4.3	たたみ込み符号	424
7.4.4	接続符号	426
7.4.5	ターボ復号	426
7.4.6	低密度パリティ検査 (LDPC) 符号	441
7.4.7	事前確率と誤り率の現象論的表現	446
7.4.8	自動再送要求 (ARQ)	449
7.4.9	移動無線通信への適用	451
7.5	トレリス符号化変調	452
7.6	適応干渉抑圧	455
7.7	音声符号化	463
7.7.1	パルス符号変調 (PCM)	463
7.7.2	デルタ変調	465
7.7.3	適応差分 PCM (ADPCM)	466
7.7.4	適応予測符号化	467
7.7.5	マルチパルス符号化	469
7.7.6	符号励振 LPC (CELP)	472
7.7.7	LPC ボコーダ	477

7.7.8 移動無線通信への適用	478
------------------	-----

8. デジタル移動無線システムの装置と回路

8.1 基地局	481
8.2 移動局	482
8.3 スーパーヘテロダインと直接変換受信	483
8.4 送信と受信の多重	489
8.5 周波数合成器	490
8.6 送信回路	492
8.6.1 デジタル信号波形発生器	492
8.6.2 FSK 変調器	494
8.6.3 線形電力増幅器	496
8.6.4 送信電力制御	516
8.7 受信回路	518
8.7.1 AGC 回路	518
8.7.2 論理回路を用いた信号処理	520
8.7.3 復調器	522
8.8 直流遮断および直流オフセットへの対策	527

9. デジタル移動無線通信システム

9.1 基本的な概念	529
9.1.1 セルラー方式	529
9.1.2 多重アクセス	537
9.1.3 回線割当て	541
9.1.4 FDMA, TDMA, CDMA	550
9.1.5 セル間干渉の抑圧	552
9.1.6 中継伝送方式	553
9.2 アナログ移動無線通信システムにおけるデジタル伝送	554

9.3	無線呼出しシステム (ページング).....	555
9.4	双方向デジタル移動無線.....	557
9.5	移動無線データシステム.....	558
9.5.1	MOBITEX	558
9.5.2	テレターミナルシステム.....	558
9.5.3	アナログセルラー方式における移動無線データシステム.....	559
9.6	デジタルコードレス電話.....	560
9.6.1	CT-2	560
9.6.2	DECT	561
9.6.3	PHS	561
9.7	デジタル移動電話システム.....	562
9.7.1	GSM 方式.....	563
9.7.2	北米におけるデジタルセルラーシステム.....	567
9.7.3	日本におけるデジタルセルラーシステム.....	571
9.7.4	第2世代システムの進化.....	572
9.7.5	第3世代システム.....	573
9.7.6	3G システムの進化.....	577
9.7.7	WiMAX	583
9.8	無線 LAN.....	584
付 録	録	594
付録 2.1	ディリクレ型のデルタ関数.....	594
付録 2.2	デルタ関数に対する試験関数の条件.....	594
付録 2.3	三角関数の公式.....	595
付録 4.1	電波伝搬公式.....	596
付録 4.2	式 (4.21) の導出.....	598
付録 4.3	式 (4.24) の導出.....	598
付録 5.1	非線形回路における変調信号の歪み.....	599
付録 5.2	周波数弁別におけるガウス雑音電力の期待値の導出.....	600
付録 5.3	M 系列発生回路.....	601
付録 6.1	直交周波数分割多重方式 (OFDM).....	601
付録 7.1	同期検波を適用した場合の最大比合成ダイバーシチの平均誤り率.....	604

付録 7.2 近似確率密度関数を適用した場合の最大比合成ダイバーシチの 平均誤り率.....	605
付録 8.1 1/4 波長線路.....	606
付録 9.1 ポアソン到着率.....	606
引用・参考文献.....	608
索 引.....	637

1 序

論

この章ではデジタル移動無線通信方式と移動無線通信の意義について簡単に述べる。

1.1 デジタル移動無線通信方式

デジタル移動無線通信方式の概略ブロック図を図 1.1 に示す。音声信号は音声符号器によりデジタル信号に変換される。デジタル化された音声信号はデジタル移動無線伝送路により送信され、受信機において元のアナログ音声信号に変換される。音声符号化技術の目標は受容できる音声信号品質を確保しながらより低速の符号化速度を達成することである。デジタル信号は論理

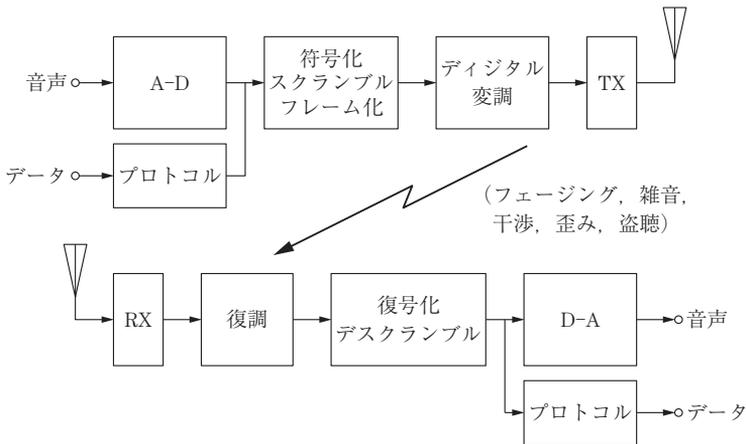


図 1.1 デジタル移動無線通信方式

回路に通すことにより，伝送路符号化，スクランブル，あるいはフレーム化など，システムの要件に応じて処理される。伝送路符号化とは，伝送誤りを訂正したり検出するために，余分なビットを挿入することである。スクランブルは認められた受信者のみが知っている複雑な変換を施すことによって第三者に対して伝送信号を隠すために行われる。フレーム化とは図 1.2 に示すように情報信号を他の信号とまとめて一かたまりにすることである。フレーム化の目的は，異なる信号を時間軸上で多重化したり，伝送路符号化を行ったり，同期型スクランブルを可能にするためである。

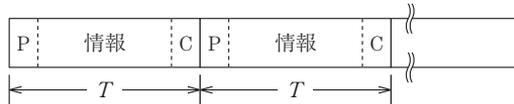


図 1.2 フレームに組んだ信号

送信機のつぎの段階はデジタル変調である。デジタル変調とアナログ変調は原理的にはなんら相違はない。どちらにせよ，変調は振動している搬送波信号の振幅か位相，あるいはこれらの双方を変調入力信号に比例させて変化させる操作である。(被)変調信号の帯域は狭いのが望ましい。そのため，低域通過フィルタあるいはこれと等価な帯域通過フィルタを，変調入力信号の帯域を制限するために用いる。デジタル伝送においては，低域通過フィルタの伝達関数あるいはこれと等価なインパルス応答は，3章に述べるように特別な特性になるように設計する。変調のつぎには高周波信号への周波数変換，電力増幅，およびアンテナからの送信が続く。

アンテナで受信した信号は，増幅，中間周波への周波数変換を行ったのち，帯域通過フィルタで帯域制限する。復調器は送信ベースバンド信号を出力する。この信号は雑音および送信機，伝送路，受信機の特性の不完全性により多少とも劣化している。デジタル変調信号の復調の原理はアナログ変調のそれと同じである。すなわち，同期検波あるいは非同期検波が可能である。デジタル変調のあるものは，変調信号が定まった位相点をとるので，同期検波に必

要な搬送波信号を受信信号から再生することができる。

復調された信号を判定回路に入力し、ここで、標準化したのち、送信で許されているデジタル値のうちの一つの値に離散化する。タイミング再生回路は標準化タイミング信号を出力する。タイミング信号は、受信されたデジタル信号レベルのクロック周波数での変化を検出することで抽出する。受信機側での主要な関心事は判定誤り率である。判定はデジタル伝送方式に特有な処理である。判定処理の原理はデジタル信号がいくつかの離散値しかとらないことによっている。もし、判定誤りがなければ、雑音、干渉および歪みは信号伝送になんの影響も与えない。このことは、中継局で信号の受信、再生、送信を行う多中継伝送方式において特に重要になる。このとき、デジタル伝送では雑音、歪み、および干渉の蓄積が起こらないからである。アナログ伝送ではこうはならない。

判定回路の出力は論理信号の形態をとる。伝送路復号、逆スクランブル、フレーム化された信号の分解などを、伝送路符号化、スクランブル、フレーム化などの逆の処理として、論理回路によって行う。

デジタル音声信号は音声復号器によってアナログ信号に変換される。音声信号を考えるかぎり、伝達関数の位相特性はさほど重要でない。人間の耳は音声信号の位相に鈍感であるからである。他方、デジタル伝送における判定誤りは伝達関数の振幅・位相特性の双方に敏感である。これが、パルス波形を歪みなしで伝送しなければならない理由である。

データ信号の伝送は音声信号の伝送とはいくつかの点で異なる。データ伝送では、例えば銀行振込みサービスなどでは、正確な伝送が要求されるので、きわめて低い誤り率が必要となる。対照的に、会話信号の伝送においては、かなり高い誤り率でも許される。なぜなら、音声信号は冗長性が高く、また、人間は知能が高い通信端末であるからだ。通信内容が不明な場合、われわれはもう一度話してくれと頼むことができるし、語や節の意味を確かめることができるし、また、発音や意味を推察することもできる。

データ通信における‘知能’はデータ端末に埋め込まれているプロトコルに

よる。プロトコルによって、データ伝送の効率が、たとえ伝送路の特性が同じであっても、異なることになる。誤り率特性がいつも良好とはいえない移動無線伝送路におけるデータ伝送では、誤りを検出し、自動的に再送を行う ARQ (automatic repeat request) が不可欠である。データ伝送においては音声伝送と異なり、通信の即時性はさほど問題とはならない。

移動無線伝送路の特徴は見出し外伝搬となることである。移動端末が速く動くと、伝送される信号は高速フェージングを受ける。フェージングの深さは数 10 dB に達する。フェージングの速さは搬送波周波数と移動速度に比例する。例えば、搬送波周波数が 900 MHz で、車速が毎時 100 km のとき、最大ドップラー周波数は 90 Hz と高くなる。受信機はこのような高速フェージングに対処できなければならない。他方で、携帯端末は移動速度が遅いのでフェージング速度がとても低くなる。これにより、新たな問題、すなわちフェージングの期間が長くなるという問題が起こる。この場合、通信を長い間行うことができなくなる。

デジタル伝送速度が高くなるに従い、伝送路は周波数選択性フェージングを呈することになる。このときフェージングにおけるレベル低下の程度が周波数によって異なることになり、その結果、伝送路の伝達関数は無歪み特性を示さなくなる。周波数選択性フェージング伝送路における信号歪みは符号間干渉のためビット誤り率特性を劣化させることとなる。

雑音は通信において一般的な問題である。移動無線通信では、搬送波の周波数は VHF 帯や UHF 帯であることが多い。これらの周波数帯はマイクロ波帯に比べて、人工雑音や大気雑音がやや高い。高い受信感度を得るために、低雑音の受信機を用いたとしても、その雑音レベルを伝送路雑音に比べて低くしても効果が少ない。雑音の多い伝送路で通信を確実にするという課題に対して、デジタル通信では誤り制御を行うことで解決できる。

移動無線通信において、送信信号が防護（秘話）されていないとすれば、第三者が通話を盗聴することが起こり得る。送信電波は四方に広がるので、周波数掃引受信機を使えば盗聴が容易に行える。アナログ通信においても、通信の

防護を行うことができるけれども、秘話の程度あるいは音質という点で不十分である。デジタル通信では、十分に安全でかつ高音質の音声を保ちながら盗聴を防ぐことができる。

移動無線通信装置はある意味で民生機器と似たようなものである。移動端末の市場における数は、民生機器と同様、衛星通信やマイクロ波通信などの非民生通信機器のそれに比べて多い。移動端末はポケットに入るように小型であり、かつ消費者が簡単に買える価格である。ところで、デジタル化によって、移動無線端末の価格や大きさが上昇するのは、そのサービスが同じであるかぎり、市場は許さないだろう。

移動無線通信機器と民生機器との最大の相違は、前者は大きなシステムに支えられているのに対して後者はそうでないことである。移動電話システムを考えてみよう。移動電話交換局、多数の基地局および端末機がシステムを構成している。ところで、交換局やこれを接続する有線通信装置は、基地局や移動端末に先だってデジタル化が行われた。この本は、基地局と移動端末機との間の、すなわち（無線）空中インタフェースの通信を主な対象としている。これには、デジタル変復調や、多数の利用者が必要に基づいて共有の回線を使用する方法や、基地局と加入者移動端末間のその他の信号伝送に関する技術が含まれる。

デジタル移動通信は世界中に普及するまでになった。また、これに関わるビジネスが成長し、世界の経済活動の拡大に貢献している。

1.2 移動無線通信デジタル化の目的

データ伝送、音声信号の秘話、周波数利用効率などが移動通信のデジタル化に向けての主要な動機となっている。目的によってこれらに対する重点の置き方が異なる。

〔1〕 **データ通信** 先進的な移動データ通信は、移動通信システムの制御において大きな役割を演じている。例として、移動電話システムでの呼設定、

終話のための制御が挙げられる。ここでは、データ伝送の速度はそんなに速くないものの、高い信頼性が要求される。不安定な移動無線通信回線での信頼性のあるデータ伝送なくしては、移動通信システムは実現できない。

デジタル呼出しシステムにおいては、無線局はデータ信号の形で呼出し信号を放送する。無線呼出しシステムは移動通信のデジタル化の最初の例であろう。デジタル無線呼出しシステムは回線当たり3万の加入者を収容できる。この数は、従来のトーン信号伝送方式の3倍の多さである。昔は先進的であったこのシステムは、デジタル携帯電話の普及によってすでに役割を終えている。

移動データ端末と中央計算機との間のデータ伝送も行われている。この例として、販売員が商売上のデータを車の中からデジタル無線伝送装置を使って送信すると、彼が事務所に帰るまでに、それらのデータがすでに処理され、請求書などの書類がすでにでき上がっていることになる。他の例として、車の配車を移動無線データ通信により効率化することも挙げられる。

表示付無線呼出し端末（ページング）は移動メッセージ通信の先駆となったものである（図1.3）。デジタル移動無線によるメッセージ通信は電子メールが普及するにつれて重要になった。メッセージ通信は通信の受け手の仕事の邪魔をしないこと、周波数利用効率が高いことの点で通話よりも有利である。

インターネットの高性能化とその普及は通信サービスを激変させた。この

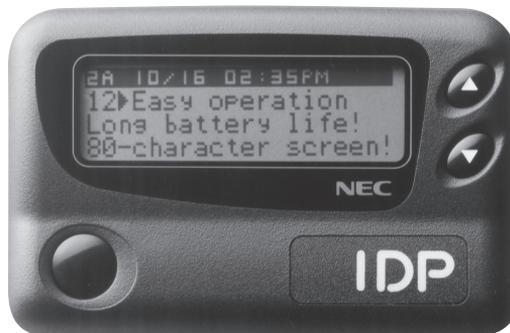


図1.3 表示無線呼出し端末（写真はNECのご厚意による）

サービスを移動無線通信に拡張することを目的にして、デジタル移動無線システムは新しい技術をつぎつぎと導入して来た。その性能として、伝送速度を考えると、ここ20年間において、初期の10 kbpsから最新のLTE端末では100 Mbpsへと1万倍に増加した。また、端末も、PC（パーソナルコンピュータ）の機能を取り入れてきて、現在、いわゆるスマートフォンが主流になりつつある。

〔2〕 **音声スクランブル** 移動無線通信において盗聴防止は軍用や警察通信では通信の安全性の点で最重要事になる。移動電話やコードレス電話といった公衆通信においても、これらが普及するにつれて音声スクランブルは重要視されている。アナログ通信においても、盗聴から音声を保護する技術が知られてはいるものの、盗聴防止あるいは音声品質の程度が十分でない。デジタル通信を用いた音声スクランブルはこれらの欠点を補っている。すなわち、会話が行われているかどうか第三者にはまずわからないぐらいであり、同時に音質の劣化も少ない。

〔3〕 **周波数利用効率** 周波数帯域は限りある一種の天然資源であることから、周波数スペクトルの有効利用は無線通信においては重要事である。一般的に、デジタル通信はアナログ通信に比べて、より広い帯域を必要とする。例えば音声信号を64 kbpsのパルス符号化変調（PCM）で符号化し、2値伝送するとすれば、最低でも32 kHzのベースバンド信号帯域を必要とする。これは、アナログ通信に比べてほぼ8倍の帯域となる。移動通信のデジタル化が有線通信や固定マイクロ波通信に比べて遅れていたのは、周波数スペクトルの有効利用に対する条件が厳しく、これに対処できる技術がこれまで開発されていなかったからである。最近のデジタル移動通信における進歩はこの問題の克服に成功していることを意味している。

スペクトル有効利用においてデジタル変調と音声符号化が主要な役割を果たす。図1.4は音声符号化速度とデジタル変調の効率の関数として、チャンネル当りの帯域、言い換えれば、デジタル音声伝送に必要なチャンネル間隔という観点からスペクトル効率を表したものである。デジタル変調の効率〔bps/

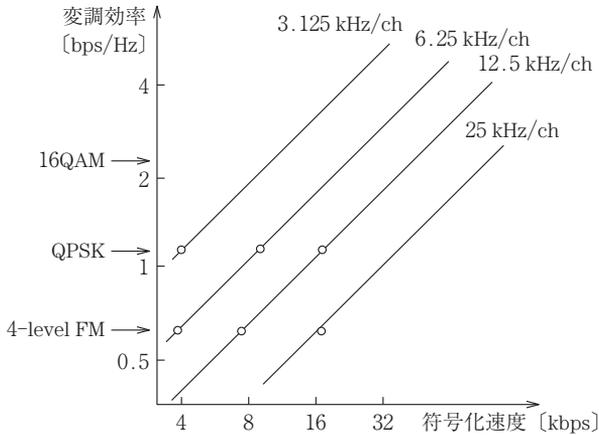


図 1.4 変調効率と情報源（音声）符号化率による回線当りに必要な帯域

Hz] は、単位帯域幅 [Hz] 当りの伝送速度 [bps] で定義される。アナログ FM 通信で最も広く用いられる 25 kHz のチャンネル間隔が 4 値 FM と 16 kbps の音声符号化、例えば適応デルタ変調 (adaptive delta modulation, ADM) により達成できる。もし、8 kbps の音声符号化あるいは線形 4 相位相変調 (QPSK) などの 2 倍のスペクトル効率のデジタル変調を用いれば、12.5 kHz のチャンネル間隔が可能となる。もし、これらの両者を使えば 6.25 kHz チャンネル間隔となる。後で述べるように、現在の技術からすると、チャンネル当り 3.125 kHz が可能となっている。

セルラー方式においては、スペクトル効率を決めるものとして他の要素、すなわち周波数あるいはチャンネル再利用距離がある。短い再利用距離が望ましい。デジタル方式は、同一チャンネル干渉を低減する干渉抑圧技術、誤り訂正技術、あるいは回線状態に応じて使用するチャンネルを適応的に割り当てる、などにより、再利用距離を短くすることができる。さらには、同じ周波数を同一の場所で用いて、独立な複数の信号を同時に並列伝送することが、複数のアンテナを用いて (multi input multi output, MIMO) チャンネル間の干渉を抑圧することにより、可能となった。

〔4〕 システムコスト 通信システムをデジタル化するとその費用は増加することがある。しかし、 N チャンネル時分割多重アクセス (TDMA) のデジタル伝送により、基地局の送受信器の費用は低下する。その理由は、送受信器の数が周波数分割多重アクセス (FDMA) を用いた従来のアナログシステムに比べて $1/N$ に減少するからである。さらには、TDM 方式用に開発された共通増幅の導入により基地局の価格は劇的に低下している。端末機の価格としては、デジタル携帯電話は従来のアナログ携帯電話に比べて高いこともあるだろう。しかし、システム帯域幅が与えられたとして、チャンネル当りの相対的な端末費用を考えると、たとえ総費用は高くなったとしても、デジタル化によるチャンネル総数の増加は、チャンネル当りの費用を低減することになる。

索引

【あ】

アイパターン	135
赤岩	301, 308
アップサンプリング	103
アナログ FM 通信	277
アナログコードレス電話	560
誤り訂正	418
誤り率	245
安定性	58
アンテナ選択ダイバーシチ方式	360

【い】

イーガー	276
異種ネットワーク	535
位相検出器	521
位相推移法	487
位相特性	56
位相比較検波	243
位相不確定性	234
位相偏移変調	217
位相偏移変調信号	218
位相連続 FSK	222
一次低域通過フィルタ	66
位置登録	536
一般化 Tamed FM	293
一般化ノバ・シャルレスポンス方式	149

移動積分回路	102
移動平均	69
イメージ周波数	484
イメージ抑圧受信方式	486
因果性	89
インターリーブ	418
陰的ダイバーシチ	345
インパルス応答	54
インプリシットダイバーシチ	345

【う】

ウォルシュ関数	30
---------	----

【え】

エキシプリシットダイバーシチ	345
エネルギー	27
エネルギースペクトル密度	28
エネルギー対雑音電力密度比	156
遠近問題	211

【お】

奥村カーブ	197
オフセット QPSK	220
オムニセル	531
折返し	99

オン・オフ符号	143
音声駆動送信	480, 483
音声スクランブル	7
音声符号化	463

【か】

回線交換	538
回線交換方式	538
回線割当て	541
回線割当て計画法	545
確率分布関数	42
確率密度関数	42
カーソン帯域	224
ガード区間	326
加法的白色ガウス雑音	42
カールネ・ルoup級数展開	172

【き】

逆 z 変換	82
逆回路	72, 106
逆行列の補助定理	130
逆離散時間フーリエ変換	82
逆離散フーリエ変換	110
球復号	390
鏡像周波数	484
狭帯域帯域通過信号	38
極	60
極性符号	143

キルヒホッフ・ホイヘンス
の近似 596

【く】

空間ダイバーシチ 344

空間フィルタリング 388

空間分割多重伝送 365

熊手受信機 167

クラスⅡパルシャルレス

ポンス符号 154

クラスⅠパルシャルレス

ポンス符号 149

クリック 250

クリック雑音 256

グレイ符号 145

群遅延特性 56

群復調器 526

群変調器 526

【こ】

公開鍵暗号 189

高速フーリエ変換 112

後方帰還 65

交流理論 63

誤差補関数 43

コーシー・シュワルツの

不等式 367

コストスループ復調器 232

コードブック 472

コヒーレント帯域 209

固有関数 55, 173

固有値 55, 173

固有ビーム空間分割多重

伝送 381

コンフォート雑音 480

【さ】

再帰最小二乗アルゴリズム
127

最急降下法 125

最小二乗平均アルゴリズム

126

最小平均二乗誤差基準 388

最小平均二乗誤差法

116, 388

最小偏移変調 278

最大事後確率アルゴリズム

431

最大スループット 545

最大スループット法 547

最大比合成 344, 347, 348

最適受信機 172

最適変調指数 261

最尤系列推定 294

最尤検出 389

最尤受信機 178

再利用分割 532

雑音 40

——の自己相関関数 45

雑音指数 41

差動検波 243

差動同期検波 243

差動符号化 155

サブキャリア 325

サブサンプリング 104

差分方程式 96

サンプリング関数 21

三瓶 315

【し】

時間ダイバーシチ 344

時間間引き法 113

時空間符号 375

ジグビー 591

指向性ダイバーシチ 344

自己相関関数 29

自己組織化再利用分割

方式 544

自己同期型 187

二乗平均アルゴリズム 398

システム関数 55

システム推定 121

システム同定 121

システムレベルシミュレー

ション 275

事前確率 161

事前確率情報 446

自動再送要求 449

自動等化器 394

時不変システム 54

時不変性 89

時分割多重 33, 191

時分割多重接続 550

時分割多重方式 489

シャドウイング損

199

重根 60

縦属接続 62

周波数応答 55

周波数合成器 490

周波数シンセサイザ 490

周波数ダイバーシチ 344

周波数標本化定理 78

周波数分割多重 33

周波数分割多重接続 550

周波数偏移変調 217

周波数弁別検波 248

周波数ホッピング 315

周波数ホッピングスペクトル拡散 585
 周波数間引き法 114
 周波数領域等化 412
 受信ダイバーシチ 344
 シュワルツの不等式 165
 純 ALOHA 539
 巡回符号 422
 自律的再利用分割 543
 信号 27
 信号対雑音電力比 40, 156
 振幅特性 56
 振幅偏移変調 217
 信頼度情報 427

【す】

スイッチ合成 344
 スクランプル 2, 186
 スケジューリング 578
 スーパーヘテロダイン受信機 483
 スペクトル拡散 315
 スペクトル密度 20
 スループット 538
 スロット付き ALOHA 539

【せ】

正規化 LMS 127
 整合フィルタ 164
 積分放電フィルタ 68
 セクタセル 531
 セル 529
 セルラー方式 529
 ゼロ IF 信号 37
 ゼロ中間周波数信号 37

ゼロフォースアルゴリズム 400
 ゼロフォース法 388
 線形システム 53
 線形時変システム 56
 線形性 89
 線形電力増幅器 496
 線形ブロック符号 420
 線形変調 217, 306
 選択合成 344, 348
 選択ダイバーシチ 346
 選択的マッピング 511
 尖頭値対平均電力比 511
 前方誤り訂正 418
 前方帰還 64
 前方帰還回路 65
 線路符号 143

【そ】

双 1 次 z 変換 100
 相関位相変移変調 299
 相関関数 28
 相関受信機 169
 相関符号化 148
 送受信デュープレクサ 481
 送信ダイバーシチ 344
 送信電力制御 516
 送信電力の割当て 383
 ゾーン 529

【た】

帯域通過フィルタ 61
 対数正規分布 199
 対数尤度比 160, 429
 ダイバーシチ通信 343
 ダウンサンプリング 103

多重アクセス 537
 多重化 2
 多重伝送 191
 たたみ込み 88
 たたみ込み積 83
 たたみ込み積分 24
 たたみ込み符号 424
 多段階適応キャンセラ 460
 多値符号 144
 タナーグラフ 443
 束効果 543
 ダブルコンバージョン法 487
 ターボ等化器 413
 多ユーザ検出器 460
 単一搬送波周波数分割変調 340
 単極性符号 143
 単側波帯信号 70

【ち】

遅延検波 243
 遅延線 68
 遅延広がり 208
 遅延プロフィール 207
 チャネル棲分け方式 542
 中継伝送方式 553
 超関数 13
 直接拡散 315
 直接スペクトル拡散 585
 直接変換受信 485
 直線位相回路 102
 直流オフセット対策 527
 直流遮断伝送路 527
 直列接続 62
 直交級数展開 510

秦	197	比例公平共用	545	ベイズの定理	432
ハミング窓	107	比例的公平基準	545, 546	並列接続	62
パルス整形回路	134			ベクトル符号化	407
パルスデューティ比	142	【ふ】		ベクトル量子化	472
パルス符号変調	464	フィードフォワード AGC		ページング	6, 555
半二重通信方式	489	回路	519	ベースバンド同期 FSK 符号	
搬送波対雑音電力比	156	フィードフォワード法	499		147
搬送波再生	231	フェルマーの定理	191	ヘテロジニアス	535
判定帰還等化器	402	負帰還回路	70	ヘムトセル	535
ハンドオーバー	535	負帰還増幅器	496	変 調	2
ハンドオフ	535	複数基地局送信ダイバーシチ	356	変調指数	225
反復最小二乗アルゴリズム				偏波ダイバーシチ	344
	404	複素振幅信号	37	【ほ】	
反復ターボ復号化	437	符号化	75	ポアソン到着率	606
【ひ】		符号間干渉	136	包絡線検波	243
比較器	521	符号分割多重	33, 192	ホモダイン受信	485
ピーククリッピング・		符号分割多重接続	550	ポーリング方式	537
フィルタリング法	512	符号励振 LPC	472	補累積分布関数	330
ピーク対平均電力比	511	ブランチメトリック	180	ボルテラ級数	39
ピーク歪み基準	400	フーリエ級数	16	【ま】	
ピコセル	533	フーリエ級数展開	16	マイクロセル	533
非線形システム	38	フーリエ積分	18	マイクロダイバーシチ	344
非線形時不変システム	56	フーリエ変換	19	窓関数	107
非線形時変システム	57	—の性質	23	マルチキャリア伝送	324
ビタビアルゴリズム	178	プリコーディング	151	マルチパルス符号化	469
ビタビ等化器	403	フリスの式	196	マルチユーザ受信機	388
ビット誤り率	157	ブルートゥース	589	マルチユーザダイバーシチ	
秘密鍵	190	プレディストータ	501	効果	345, 578
ビーム傾斜	532	フレーム化	2	マンチェスター符号	146
表参照	492	フレーム同期	185	【む】	
表示付無線呼出し端末	6	分析合成法	471	無線 LAN	584
標本化	75, 76	【へ】		無線 MAN	591
標本化定理	76	平均二乗誤差	117	無線呼出し	555
平 出	294	平衡型増幅器	513		
ヒルベルト変換回路	69	ベイズの混合規則	175		

室 田	294		
		【ら】	【る】
【め】		ラグランジェの未定乗数法	ルートナイキスト I フィルタ
メトリック	179		118
メモリ回路	39	ラップアラウンド処理	274
メモリ効果	504	ランダム FM	205
		ランダム FM 効果	264
		【り】	
【も】		離散時間信号	75
目的関数	116	離散時間フーリエ変換	80
モデュロ演算	73	離散フーリエ変換	110
		リーマン・ルーベック	
【よ】		の定理	594
要求予約方式	537	量子化	75
陽的ダイバーシティ	345	量子化雑音電力	463
汚れ紙符号化	392	隣接チャンネル干渉	212
予符号化	391		
			【れ】
			レイズドコサイン波形
			142
			レイズドコサインロール
			オフフィルタ
			138
			レイリーフェージング
			200
			レイリー分布
			47
			接続符号
			426
			連続位相変調
			300
			連続時間信号
			76
			【わ】
			和・積法
			445

	[A]	CDM	192		[E]
		CDMA	33, 192, 550		E_b/N_0
A-b-S 法	471	CDMA One	573	EDGE	156
ACELP	474	cdma2000	576	EDGE Evolution	572
ADM	8, 466	CDMA2000 1x	576	EDR	572
ADPCM	122, 466	cdma2000 1x	577	ERMES	590
AF	553	cdmaOne	573, 576	E-SDM	556
AGC 回路	518	CDMA 方式	552	ETSI	381
ALC 回路	527	CDPD	559		556
ALOHA 方式	539	CELP	472		
AM-AM 変換	271	Chernoff bound	386	[F]	
AMI 符号	153	C/N	156	FDMA	33, 192, 550
AM-PM 変換	271	CoMP	582	FDMA 方式	550
AMPS	554, 567	CORPSK	299	FEC	418
APC 方式	469	CP	326	FFT	112
ARP	543	CPFSK	222	FH	315, 590
ARQ	4, 418, 449	CPM	300	FHSS	585
ASK	217	CSMA/CA	585	FIR	65
AWGN	42	CSMA 方式	540	FIR システム	65
A 法則	464	CT-2	560	FIR フィルタ	101
	[B]		[D]	FLEX	556
Berrou	426	DECT	561	FOMA	576
BPSK	218, 235	DES 方式	187	FPLMTS	476, 573
BPSK 信号	219	DF	553	FSK	217
BWN	591	DFT	110		
	[C]	dirty paper coding	392	[G]	
C.E. シヤノン	193	DPM	299	G.729	475
carrier aggregation	582	DS	315	Gallager	441
CCDF	330	DSI	544	GI	326
CCK	586	DSSS	585	Glavieux	426
CCPSK	298	DTFT	81	GMSK	294
CDLC	559			Go Back N ARQ	449
				GPRS	572
				GSM	563

		LLR	429		
		LMS アルゴリズム	126	【P】	
【H】		LPC 分析	468	PAPR	330, 511
HDR	577	LPC ボコーダ	477	PCM	464
HDR システム	545	LTE	579	PCN	566
HPSK	575	LTE-Advanced	582	PD	501
HSCSD	572			PDC	482, 571
HSDPA	578	【M】		PF	545
HS-DSCH	578	MAP アルゴリズム	431	PFS	545
HSPA	579	Maseng	299	PFS 法	547
HSPA-Evolution	579	Max-Log-MAP アルゴリ		PHP	561
HSUPA	579	ズム	438	PHS	561
		MBMA	592	PLL-QPSK	304
【I】		MCA	554	POCSAG 方式	555
IDFT	110	MIMO システム	365	PRMA	544
IEEE 802.15	589	MLD	389	PSD	226
IEEE 802.15.4	591	MLSE	294	PSI-CELP	474
IEEE 802.16	591	MMSE 基準	388	PSK	217
IEEE 802.20	592	MMSE 法	388	PSK 信号	218
IEEE 802	584	MOBITEX	558	PTS	512
IIR	65	MSK	278		
IIR フィルタ	103	MT	545	【Q】	
IMT-2 000	573	M アルゴリズム	390	QAM	37, 217, 226
IMT-DS	574	M 系列発生回路	601	QPSK	218, 237, 309
IMT-FT	576	M 系列発生器	270	QPSK 信号	219
IMT-MC	574	M 値 PSK	222, 239	QR 分解	389
IMT-SC	576				
IMT-TC	576	【N】		【R】	
IS-54	568	NF	41	RCR	571
IS-95	569, 576	NMT	554	RLS アルゴリズム	127, 404
ISM バンド	585	NRZ 信号	142	Round-Robin	547
i モード	572			RPE-LPC/LTP	471
		【O】		RR	545
【L】		OFDM	324	RSA 暗号	189
LDPC 符号	441	OQPSK	309	RSSI	519
LINC 増幅器	501			RZ 信号	142
LINC 方式	501				

[S]		Tamed FSK	291	[Z]	
		TDD 方式	489		
S. O. Rice	250	TDM	191	z 変換	82
SDM	365	TDMA	33, 192, 550	【数字・ギリシャ文字】	
selective repeat	449	TDMA 方式	551	1/4 波長線路	515, 606
SIMO	366	TFM	289	16QAM	240, 314
SLM	511	Thitimajashima	426	2 値 PSK	218
S/N	156	[U]		2 パスモデル	207
SNR	40	U-NII 帯	587	3GPP	577
SORP	544	UWB	590	3GPP2	577
SPILL	491	[V]		4 値 FM	301
SS	315	VCO	232, 494	4 値 PSK	218
SSB 信号	70	VOX	480, 483	802.11	584
STBC	375	VSELP	472	8PSK	218
stop and wait	449	[W]		8 値 PSK	218
STTC	375			μ 法則	464
[T]				$\pi/2$ シフト BPSK 信号	219
Tamed FM	289	WiMAX	583	$\pi/4$ シフト QPSK	221, 309

—— 著者略歴 ——

1968年 九州大学工学部電子工学科卒業
1968年
～88年 日本電気株式会社勤務
1979年 工学博士（九州大学）
1988年
～96年 九州工業大学教授
1996年
～
2009年 九州大学教授
2009年 電気通信大学特任教授
現在に至る

デジタル移動通信技術のすべて

All about Digital Mobile Radio Communication Technology

© Yoshihiko Akaiwa 2013

2013年3月26日 初版第1刷発行



検印省略

著者 ^{あか}赤 ^{いわ}岩 ^{よし}芳 ^{ひこ}彦
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 新日本印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00846-3

(金)

(製本：複製本印刷)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします