

デジタル通信・放送の 変復調技術

工学博士 生岩 量久 著

コロナ社

まえがき

通信・放送分野においては、アナログ伝送からデジタル伝送への移行が急速に進んでいる。携帯電話、コードレスなど通信分野のデジタル化の流れから放送分野でのデジタル化は当然予想されていたが、伝送に関してはこれまでデジタル化があまり進まず、アナログ方式が主流となっていた。

これは、放送の場合、情報量が多い画像を高品質でデジタル伝送するためには広い帯域が要求されることと複雑な構成の受信機が必要となることが原因である。しかしながら、近年の帯域圧縮技術とLSI (large scale integration, 大規模集積回路) 技術の進展により、現在使用しているアナログ伝送帯域幅をそのまま利用してもデジタル伝送が可能となるとともに、受信機も低コスト化できるようになった。さらに、デジタル変復調技術とLSI技術の進展に伴い、地上放送における最大の課題であるマルチパスフェージングに強いOFDM (orthogonal frequency division multiplexing, 直交周波数分割多重) 変調技術の実用化が可能となったことも大きい。

OFDMを用いた地上デジタルテレビ放送は、2003年から関東、近畿、中京地区で開始され、しだいにそのサービスエリアを広げつつあるが、このデジタル放送においては、最新のデジタル変復調技術が多く取り入れられている。

本書では、デジタル通信・放送システムの根幹をなすデジタル変復調技術について複雑な数式はなるべく使用せず、電子情報通信系学部生・初心者でもその本質を十分理解できるようわかりやすく解説している。また、基本的な通信方式であるシングルキャリア変調方式とマルチキャリアのOFDMを同時に取り扱っている点も大きな特徴といえる。

ページ配分としては、まずベースバンドにおけるデジタル伝送を説明した

後、シングルキャリアを用いた基本的な変調方式を述べる。つぎに、複雑な多重方式である OFDM についてふれた後、その応用として OFDM を用いた地上デジタルテレビ放送について変復調・伝送面を中心に説明する。最後に地上デジタルテレビ放送における技術的な課題とそれを解決するための新技術について OFDM に関連する事項を中心に紹介する。

なお、本書の執筆にあたっては、NHK 放送技術研究所の斉藤知弘氏、高田政幸氏、土田健一氏、(株)東芝の三木信之氏、アンリツ(株)の後藤剛秀氏、松下電器産業(株)の影山定司氏、広島市立大学情報科学部の神尾武司氏、安昌俊氏、藤坂尚登氏をはじめ、多くの方々からご協力をいただいた。この場を借りて厚く御礼申し上げます。終わりにコロナ社の方々のご尽力に謝意を表する次第である。

2008年2月

著者

目 次

1. デジタル伝送の基礎

1.1 デジタル伝送の基本構成	2
1.2 ベースバンドデジタル信号の種類	3
1.3 ベースバンド伝送における符号間干渉と誤り率	4
1.4 伝送路の雑音特性と誤り率	6
1.4.1 雑音特性	6
1.4.2 雑音による誤りの発生	7
1.5 無ひずみ伝送条件	8
1.6 シンボルレートおよびビットレートと帯域幅の関係	11
演習問題	11

2. デジタル変復調の基本方式

2.1 デジタル変調方式	12
2.1.1 ASK 変調方式	14
2.1.2 PSK 変調方式	16
2.1.3 符号間距離を同じにするための信号電力比較	30
2.1.4 変調波伝送に必要な帯域幅	31
2.1.5 PSK 信号を帯域制限したときに生じる非線形ひずみ	32
2.2 デジタル復調方式	33
2.2.1 同期検波方式	33
2.2.2 差動符号化と差動検波	37

2.3	PSK および QAM 変調方式の誤り率特性	40
2.3.1	誤り率の係数 k_1 の算出	41
2.3.2	誤り率の係数 k_2 および誤り率の算出	42
2.4	CNR と SNR および E_b/N_0 との関係	44
2.4.1	CNR と SNR	44
2.4.2	CNR と E_b/N_0 および周波数利用効率の関係	44
2.4.3	CNR と E_b/N_0 の使い分け	46
2.5	その他の変調方式	47
2.5.1	VSB 方式	47
2.5.2	OQPSK	50
2.5.3	$\pi/4$ シフト QPSK	52
2.5.4	FSK・MSK 系変調方式	53
2.6	周波数利用効率と振幅変化の面から見た各変調方式の評価	57
2.7	誤り訂正符号	58
2.7.1	ブロック符号	59
2.7.2	畳込み符号	60
2.8	符号化変調方式	63
	演習問題	64

3. OFDM 変復調方式

3.1	OFDM 変調の歴史と特徴	65
3.2	OFDM 信号波形	67
3.3	OFDM の直交性	69
3.4	OFDM 変復調器の基本構成	70
3.5	OFDM 信号の式表示と伝送	74
3.5.1	基本式	74
3.5.2	複素 OFDM 信号の伝送と復調	76
3.5.3	周波数変換の具体例	78
3.5.4	OFDM と差動検波	79

3.6	マルチパス干渉による信号劣化とガードインターバル	79
3.6.1	マルチパスによる信号劣化	79
3.6.2	ガードインターバルの付加	81
3.7	マルチパス干渉および周波数ずれによる信号劣化と波形等化	84
3.7.1	波形等化の必要性	84
3.7.2	マルチパスによる信号劣化と等化	85
3.7.3	周波数ずれによる信号劣化と等化	89
3.8	符号化とインタリーブ	93
3.8.1	時間インタリーブ	93
3.8.2	周波数インタリーブ	94
3.9	OFDM 波の同期技術	95
3.9.1	シンボル同期	96
3.9.2	キャリア周波数同期	97
3.10	OFDM 波増幅時の課題	97
3.10.1	非直線ひずみが OFDM 波に与える影響	97
3.10.2	直線性がよい電力増幅器が必要な理由	100
	演習問題	101

4. OFDM を用いた地上デジタルテレビ放送の変復調技術

4.1	地上デジタル放送システムの概要	103
4.1.1	地上デジタル放送のキーテクノロジー	103
4.1.2	日本、ヨーロッパおよびアメリカの放送方式比較	107
4.1.3	日本の地上デジタルテレビ放送方式の特長	109
4.1.4	アナログ放送とデジタル放送の比較	109
4.1.5	伝送パラメータ	112
4.1.6	実際の運用モード	115
4.2	地上デジタル放送の変復調技術	117
4.2.1	送受信システムの系統	117
4.2.2	携帯受信端末の系統	122

4.2.3	地上デジタル放送の伝送速度 (ビットレート)	123
4.2.4	SFN	124
4.2.5	OFDM 波の復調技術	128
4.3	地上デジタル放送の伝送特性	134
4.3.1	復調器における所要 CNR	134
4.3.2	キャリア周波数の許容偏差	135
4.3.3	OFDM キャリヤ周波数の測定	136
4.3.4	OFDM 波の伝送と干渉・混信妨害	137
4.3.5	所要電界強度を求めるための回線設計	140
	演習問題	144

5. 地上デジタル放送における OFDM 波の伝送 および受信と監視のための新技術

5.1	SFN ネットワーク実現のための技術	145
5.1.1	回り込み波キャンセラ	145
5.1.2	光変調器を用いた送受分離中継局用信号伝送システム	146
5.1.3	SFN 環境下における長距離遅延プロファイル測定装置	152
5.2	OFDM 波の増幅技術	157
5.2.1	デジタルプリディストーション方式 MCPA	157
5.2.2	GaN-HEMT を用いた PA	161
5.2.3	番組伝送用マイクロ波帯高効率電力増幅器	162
5.3	OFDM 波の監視技術	164
5.3.1	MER を用いた監視技術	164
5.3.2	放送中に BER 測定が可能な監視装置	170
5.4	OFDM 波を多段伝送したときの課題と対策	177
5.5	OFDM 波の海上移動受信	179
5.5.1	海面反射波による影響	180
5.5.2	ガードインターバル超えのマルチパスの影響	181
5.5.3	客室内における複数波再送信による干渉	182
5.5.4	再送信波の受信アンテナへの回り込みによる信号劣化	183

5.6 まとめおよび今後の展開	184
引用・参考文献	185
演習問題解答	189
索引	192

1

デジタル伝送の基礎

デジタル伝送は、アナログ伝送に比べてさまざまな特徴をもっている。おもなものをまとめて以下に示す。

- ① 信号が2値 (0, 1) のデジタル符号 (bit[†]) であるため、雑音や妨害に強い。また、IC (integrated circuit, 集積回路) 化が容易で低コスト化・小形化・安定化が図れる。
- ② 信号波形を忠実に送る必要はなく、サンプル点で誤りを発生させるほどの干渉がなければ復号が可能である。
- ③ 伝送路で誤りが発生しても、検出・訂正が可能である。また、誤り率で伝送品質・性能を評価できる (アナログ信号、特に映像や音声では人間による主観評価が必要)。
- ④ 映像・音声をはじめ、どのような信号でも、“0”、“1” の符号に変換されるため、さまざまな情報・サービスを多重して一つの伝送路で送ることができる。

一方

- ⑤ 広い帯域を必要とし、情報の圧縮 (ビット削減) が不可欠である。
- ⑥ 送受間で通常、同期をとる必要がある。
- ⑦ 信号の劣化状況がある範囲内であれば原信号とまったく同じ品質が得られるが、誤り訂正が不可能となった時点で急激に受信が不可能となる。
- ⑧ 圧縮や誤り訂正効果を高めるための信号の順序入替え (インタリーブ) などで遅延が発生する。

など、注意すべき点もあるが、情報圧縮技術、変調技術、誤り訂正技術などの進展などにより、これらの課題の多くは解決しつつある。

† binary digit の略。

1.1 デジタル伝送の基本構成

図 1.1 にデジタル伝送の基本構成を示す^{†1}。入力デジタル信号（ベースバンド信号）は，“0”，“1”が連続して現れないように、すなわち、エネルギーが集中しないようにスクランブル（scramble）^{†2}がかけられた後、伝送途中で生じる誤りを訂正するための誤り訂正符号が付加される。他のシステムからの情報は多重化部で多重され、1本のビットストリーム（bit stream）すなわち、デジタルデータの時系列情報となる。このデータによりデジタル変調された信号は、高周波（搬送波）に変換され電力増幅されたのち、無線（電波）あるいは有線などの媒体を通して伝送される。受信部では、増幅・復調後ビットストリームを再生し、多重分離部で分離された信号に対して誤り訂正を行い、デスクランブル（descramble）後、もとの信号に戻される。なお、ア

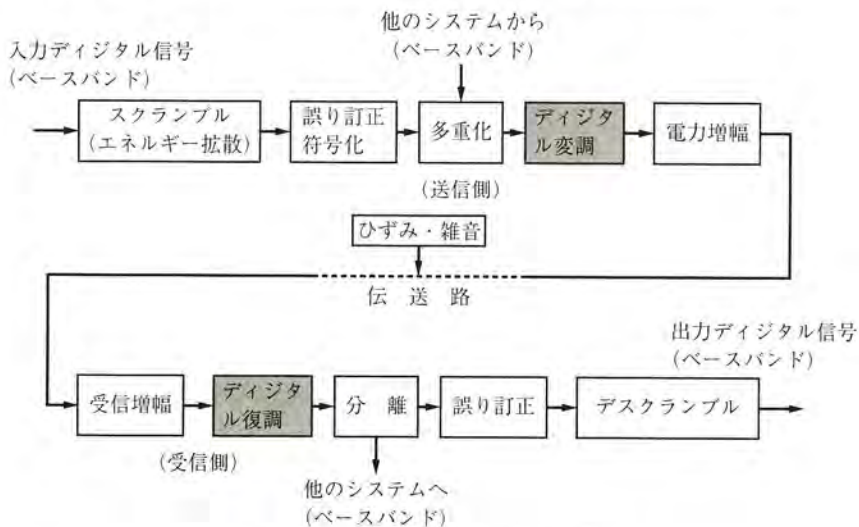


図 1.1 デジタル伝送の基本構成

†1 肩付き数字は巻末の引用・参考文献を示す。

†2 伝送帯域内の特定のスペクトル（spectrum）にエネルギーが集中すると、非線形をもつ機器では、ひずみ成分により符号誤りが発生するおそれがある。

ナログ伝送と異なり、デジタル伝送においては、一般的に送受信間で同期をとる必要があり、受信機側での同期動作が重要となる。ここで同期とは、搬送波の周波数、位相およびシンボル（符号のある状態、例えば“0”または“1”の状態。通常、複数のビットで構成される）変化のタイミングを送信側と一致させることをいう。

1.2 ベースバンドデジタル信号の種類

図 1.2 に最も基本的なベースバンド信号（base band signal, 変調を行う前の信号）の種類を示す¹⁾。NRZ（non-return to zero）は、最も基本的な信号であるが、映像や音声のような時間的、空間的に相関が大きく“0”または“1”が長く続きやすい信号を伝送する場合には、送受間の同期・タイミングがとりにくくなるため、この符号のままですることはあまり行われぬ。

RZ（return to zero）は、タイミングをとるのは容易となるが、パルス幅が半分となるため、帯域幅（bandwidth）は2倍必要となる。また、これらの信号は直流成分を含むが、直流成分を含まない両極 NRZ（-1あるいは1を伝

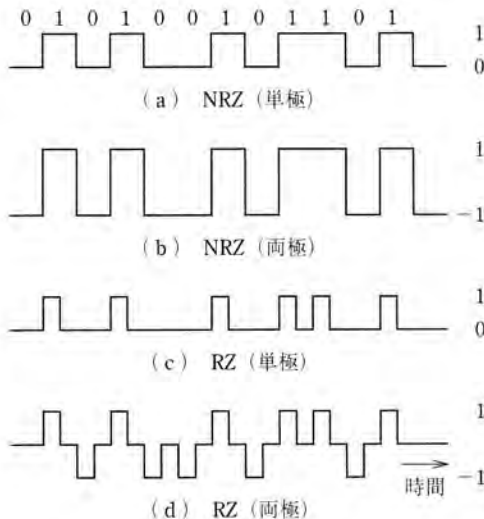


図 1.2 基本的なベースバンド信号の種類

送), 両極 RZ もある。両極 NRZ は, NRZ 信号をレベル変換 (“0”, “1” → “-1”, “1”) すれば得られる。

図 1.3 に基本となる NRZ 信号の波形とこの波形をフーリエ変換したスペクトルを示す。 T_p はパルス幅, T_i はパルス間隔 (パルス周期) である。急激な立上がり, 立下がり時間をもつパルス波形のため, スペクトルが無限まで広がっている。また, T_i を大きくしていくとスペクトル間隔は狭くなっていく。

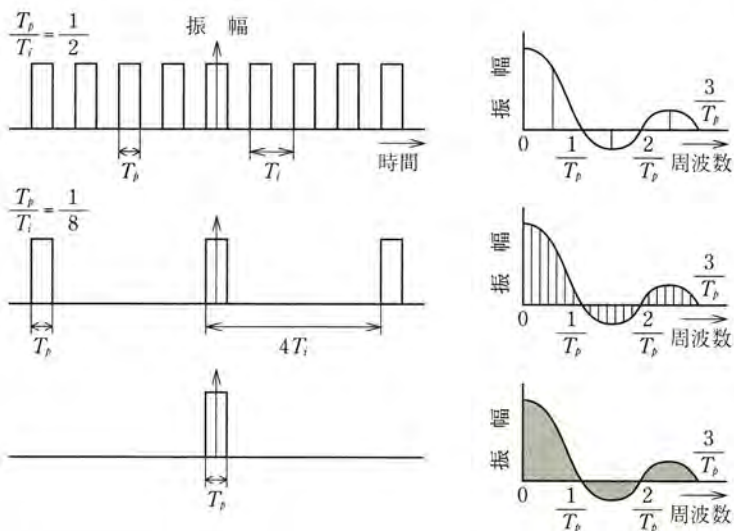


図 1.3 NRZ 信号の波形とスペクトル

注目すべき点は, いずれの波形においても $1/T_p$ ごとにヌル点 (null point) ができることである。このことは, $1/T_p$ の間隔で搬送波を配置した場合は, その周波数間においては符号間干渉 (シンボル間干渉, intersymbol interference, ISI) が発生しないということを示している。

1.3 ベースバンド伝送における符号間干渉と誤り率

デジタル伝送で重要なのは, 受信側で “0” か “1” を正確に判定できることであり, 送信波形を忠実に再現する必要はない。すなわち, 受信側において

デジタル信号は、図 1.4 (a) に示すように、サンプル点で“1”か“-1”を判定できれば、その間はどのような波形であっても差し支えない。ここがアナログ伝送と大きく異なる点である。

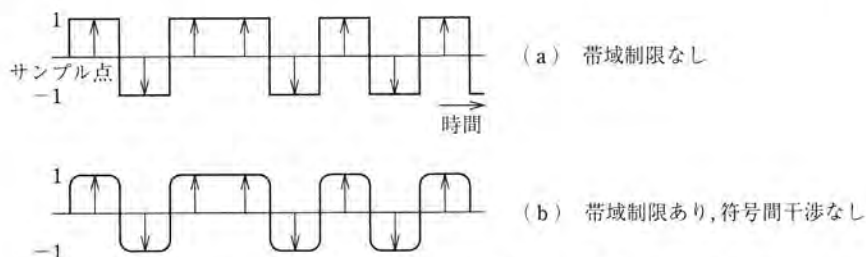


図 1.4 デジタル信号における帯域制限なし, ありのときの波形

NRZ 信号などでは、無限の帯域まで高調波が含まれているため、電波を有効に利用するためには**帯域制限** (band limitation) が必要である。適切な帯域制限を行えば図 (b) のような滑らかな波形となり、符号間干渉は生じない。

一方、伝送路の帯域制限が適切でない場合や非直線な位相特性^{†1}をもつ場合は波形ひずみが生じる。この場合、図 1.5 に示すように、符号間干渉によりサンプル点での値が変化し、“0”を“1”と誤って判断して**ビット誤り率** (bit error rate, BER)^{†2}を上昇させる。

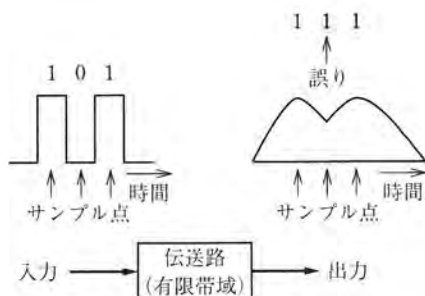


図 1.5 帯域制限が適切でない場合の誤り発生

†1 伝送路の位相特性が周波数に対して直線でないこと。

†2 シンボル誤りの場合は、**シンボルエラーレート** (symbol error rate, SER) という。

索 引

【あ】		外来雑音電力	141	誤差対策	154
アイパターン	19	ガウス雑音	6	誤差補関数	8
誤り訂正	58	ガウス分布	6	コスト法	35
【い】		確率密度関数	7	混信保護比	138
生き残りパス	62	崖効果	143	コンスタレーション	15
異シンボル	80	画 素	103	【き】	
位相シフトキーイング	13	ガードインターバル	82	サイドローブ	19
位相変調	12	ガードバンド	69	サイマル放送	145
色信号	104	可変長符号化	105	最ゆう復号法	60
インタリーブ	93	加法性ガウス雑音	7	雑音指数	45
インパルス	9	簡易 BER 測定	176	差動位相検波	37
インパルス応答	9	干渉マージン	141	差動位相シフトキーイング	38
【う】		【き】		差動検波方式	33
ウィンドウ処理	81	ギガビット/秒	104	差動符号化	38
動きベクトル	105	擬似雑音	96, 176	サンプリング周波数	79
動き補償	105	基準信号	33	残留側波帯	47
【え】		輝度信号	103	【し】	
衛星デジタル放送	107	逆離散フーリエ変換	75	時間インタリーブ	93
映像搬送波	112	ギャップフィルラ	183	時間率補正	143
エンコーダ	117	キャリヤ	12	時間領域	70
【お】		キャリヤ間干渉	131	自然2進数	23
オフセット QPSK	51	狭帯域フィルタ	34	実効長	143
親 局	124	局部発振器	72	ジッタ	10
音声搬送波	112	【く】		時定数	151
【か】		クリフエフェクト	143, 164	自動周波数補正	90
回線設計	140	グレイコード	22	時分割多重	69
階層化伝送方式	112	【こ】		シャノンの限界	45
外符号	114	格 子	61	遮へい	147
外部信号発生器	175	高速逆フーリエ変換	66	周波数インタリーブ	93
		拘束長	60	周波数シフトキーイング	13
		高速フーリエ変換	66	周波数選択性フェージング	
		誤差原因	153		84

【ぬ】		【ふ】		回り込み	145
ヌルシンボル	96	フィードフォワード	157	【め】	
ヌル点	4	符号化率	59	メインローブ	19
【ね】		符号化利得	58	メガビット/秒	11
熱雑音	6	符号間干渉	4	【ゆ】	
【は】		符号間距離	61	有効シンボル	82
ハイトパターン	180	符号器	117	ユークリッド距離	30
ハイパスフィルタ	16	符号語	59	【り】	
白色ガウス雑音	6, 45	符号分割多重	69	リグロース	32
場所率補正	143	ブッシュブル	161	離散コサイン変換	105
バースト誤り	58	プリディストータ	158, 162	リップル	85
バースト信号	34	ブロック符号	58	利得可変機能	150
バックオフ	111	分散	7	リードソロモン符号	58
ハフマン符号	105	分散パイロット	88	両側帯波	47
ハミング距離	51	分布帰還形半導体レーザ	149	両側波帯振幅変調	33
ハミング符号	59	【へ】		量子化	104
パルス振幅変調	47	ベイロード	119	リング変調回路	17
パンクチャド符号	62	ベースバンド信号	3	隣接チャンネル	139
搬送周波数	12	ヘッダ	119	【れ】	
搬送波	12	変換増幅器	147	連接符号	134
搬送波再生回路	34	変調誤差比	165	【ろ】	
搬送波電力対雑音電力比	20	変調指数	54	ローパスフィルタ	8
半値幅	137	変調周波数	16	ロールオフフィルタ	9
バンドパスフィルタ	32	【ほ】		ロールオフ率	9
【ひ】		放送波中継	125	【数字・他】	
光強度変調	147	包絡波検波	33	$\pi/4$ シフト QPSK	14
光検出器	148	補間	89	2 相位相シフト変調	17
光導波路の屈折率	149	ボルツマン定数	141	8 PSK	23
光ファイバ	147	ボーレート	10	8 VSB	48, 108
ビタビ復号	60	【ま】		16 PSK	23
ビット誤り率	5	マッピング	74	16 QAM	27
ビットストリーム	2	窓関数	81	32 QAM	27
ビットレート	11	マルチキャリア	65	64 QAM	27
非同期検波方式	33	マルチパスフェージング	65	256 QAM	27
		マルチパスマージン	141		

【A】		【E】		MC	105
AAC	105	E_b/N_0	44	MCPA	157
AB 級	161	【F】		MDCT	105
AC 信号	115	FDM	69	MER	165
AFC	90	FEC 方式	58	MFN	106
ALC	163	FFT	66	MPEG	104
AM	12	FM	12	MPEG-2	104
APSK	13, 25	FSK	13, 53	MPEG-4	104
ARQ 方式	58	【G】		M-QAM	26
ASK	13	GaAsFET	162	MSK	13, 53
ATSC	107	GaN-HEMT	161	【N】	
AVC	104	Gbps	104	NCO	130
AWGN	7	GI	82	NF	45
【B】		GMSK	14, 56	NRZ	3
BCH 符号	59	【H】		【O】	
BER	5	HDTV	103	OFDM	14
BPF	32	HDTV 画像	103	OFDM 変調技術	103, 105
bps	11	HPF	16	OOK	15
BPSK	16	【I】		OQPSK	51
BS	25, 107	IC	1	【P】	
【C】		ICI	131	PA	98
CATV	30	IDFT	75	PAM	47, 71
CDM	69	IF	78	PD	162
CNR	20	IFFT	66	pixel	103
CPE	131	IMD	99	PLL	34
CPU	170	ISDB-T	107	PM	12
CP 信号	115, 136	ISI	4	PN	96, 176
CW	136	ITU	137	PSK	13
C 級増幅器	14	I 軸	15	P-S 変換	71
【D】		【L】		【Q】	
DAB	66	LAN	65	QAM	13
DCT	105	LiNbO ₃ 光変調器	147	QPSK	20
DFB-LD	149	LPF	8	Q 軸	15
DPSK	38	LSI	66	【R】	
DSB 波	47	【M】		RF	122
DU 比	86	Mbps	11	RIN	148
DVB	66			RS 符号	58
				RZ	3

	【S】	SP 信号	88, 115, 137	TTL	162
		S-P 变换	22, 70	【U】	
SAW	48	SSB	47		
SDTV	103	STL	162	UHF	78, 102
SER	5			【V】	
sinc 関数	9	【T】			
SFN	90, 106	TDM	69	VCO	34, 53, 129
SG	175	TFM	56	VHF	102
SMF	149	TMCC 信号	115	VLC	105
SNR	10	TS 信号	111	VSB	14, 47

— 著者略歴 —

1970年 徳島大学工学部電気工学科卒業

1970年 日本放送協会（NHK）勤務

1988年 工学博士（東京大学）

2004年 広島市立大学教授

2013年 広島市立大学名誉教授

技術局において送信装置の設計・開発および地上デジタル放送ネットワーク
関連の研究に従事。東京都発明研究功労賞，映像情報メディア学会 開発賞・
進歩賞などを受賞。電子情報通信学会フェロー。

デジタル通信・放送の変復調技術

Digital Modulation Techniques for Communications and Broadcasting

© Kazuhisa Haeiwa 2008

2008年4月10日 初版第1刷発行

★

2014年6月10日 初版第3刷発行

検印省略

著者 生 岩 量 久
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 萩原印刷株式会社

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 978-4-339-00796-1 (中原) (製本：愛千製本所)

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