

ま え が き

OFDM (orthogonal frequency division multiplexing, 直交周波数分割多重) は、マルチパスに強く、有限である周波数資源を有効に利用できることから、地上デジタル放送、無線 LAN にすでに導入されているほか、次世代モバイル通信方式などへの適用を目指して検討が進められている。さらに、光通信においてもさらなる高速化を目指して光 OFDM 技術の研究開発も行われており、現代の通信・放送分野において不可欠な技術となりつつある。

本書では、今後のデジタル通信・放送システムの根幹を成すと考えられる最新の OFDM 技術について、基礎から応用・実際の適用例までを紹介している。また、通信から放送までの幅広い分野にわたって統一的に記述していることに加えて、変調信号の発生・特性解析に関する MATLAB プログラムを載せていることも大きな特徴といえる。

ページ配分としては、まず 1 章では OFDM の基礎となる各種のデジタル変調方式について説明するとともに、MATLAB プログラムを掲載している。また 2 章では、OFDM を用いた次世代モバイル通信技術とそれに関する MATLAB プログラムを解説している。続いて 3 章では地上デジタル放送について実際のシステムを紹介するとともに、等化技術、高速移動受信技術などについて述べ、最後の 4 章では最新の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している。

今後、さまざまな分野において OFDM を用いたシステムの登場が期待されるが、本書がそれらにかかわる方々に対して少しでも手助けになれば幸いである。

なお、本書の執筆にあたっては、NHK アイテックの来山和彦氏、NHK の金森香子氏、広島市立大学情報科学研究科の藤坂尚登氏、神尾武司氏のご協力をいただいたほか、日本無線株式会社の間瀬豊治氏、富士通テン株式会社の高山一男氏、NHK の奥村泰之氏をはじめ多くの方々の文献を引用させていただいた。この場を借りて厚く御礼申し上げる。終わりに本書をまとめるにあたって種々ご協力をいただいたコロナ社の方々に深く感謝いたします。

2010 年 7 月

著者しるす

目 次

1. デジタル変復調技術の基礎

1.1 デジタル変復調技術	1
1.1.1 ASK 変調方式	2
1.1.2 FSK 変調方式	3
1.1.3 PSK 変調方式	6
1.1.4 多値直交振幅変調方式	11
1.1.5 MATLAB プログラム作成例	13
1.2 情報エントロピーとシャノン定理	21
1.2.1 各変調方式に対する BER と周波数利用効率	23
1.2.2 帯域制限	26

2. 次世代モバイル通信

2.1 電波伝搬環境	30
2.1.1 陸上移動伝搬特性	30
2.1.2 マルチパスフェージングチャネル	32
2.1.3 MATLAB プログラム作成例	37
2.2 OFDM 変復調の原理と実際	39
2.2.1 OFDM 方式の基本原理	39
2.2.2 OFDM 送信機の構成	41
2.2.3 隣接チャネル間干渉	42
2.2.4 ガードインターバルの挿入	43
2.2.5 OFDM 受信機の構成	45
2.2.6 チャネル推定と信号検出	48

2.2.7	OFDM システムの同期技術	48
2.2.8	誤り訂正符号とインタリーブ	51
2.2.9	ピーク電力対平均電力比	51
2.2.10	MATLAB プログラム作成例	54
2.3	OFDM 技術の応用	71
2.3.1	適応変調方式	71
2.3.2	MIMO 技 術	73
2.3.3	無 線 LAN	82
2.3.4	無 線 MAN	87
2.3.5	次世代無線通信システム	91

3. OFDM を用いた地上デジタル放送技術

3.1	地上デジタル放送システムの概要	102
3.1.1	伝送パラメータ	105
3.1.2	OFDM 信号波形	106
3.1.3	送受信システムの系統	108
3.1.4	OFDM 変復調器の基本構成	110
3.1.5	OFDM 信号の式表示	112
3.2	実際の放送ネットワークの構成	114
3.2.1	親局送信機	115
3.2.2	中継局送信機	118
3.2.3	出力フィルタ特性が信号劣化に与える影響	120
3.2.4	SFN に関する課題と対策	123
3.2.5	受 信 機	125
3.3	等 化 技 術	129
3.3.1	周波数領域での等化 (ガードインターバル内)	132
3.3.2	周波数領域での等化 (ガードインターバル超え遅延波の等化技術)	136
3.3.3	時間領域での等化 (低遅延マルチパス等化技術)	143
3.4	高速移動受信	147
3.4.1	ダイバーシティ受信 (帯域内におけるレベル変動の補正)	148
3.4.2	SP による等化の高精度化	149

3.4.3 キャリヤ間干渉対策 151

3.5 OFDM 信号の測定技術 152

4. OFDM を用いたシステムにおける新技術

4.1 SFN 環境下における長距離遅延プロファイル測定技術 160

4.1.1 電力スペクトル法の概要 162

4.1.2 基本原則 163

4.1.3 誤差対策 165

4.1.4 性能 171

4.1.5 遅延波の極性判別が可能な実用装置 174

4.2 近接遅延波の電界強度測定技術 179

4.2.1 直接波の広がり成分による妨害 179

4.2.2 改善方法 181

4.2.3 補正結果 181

4.3 海上移動受信時の課題と対策 182

4.3.1 海上移動受信時の電界強度変動 183

4.3.2 ガードインターバル超え遅延波の到来 183

4.3.3 隣接チャネルの影響 185

4.3.4 船舶内での再送信に関する調査 186

4.3.5 改良システムの系統と高速船での評価実験結果 193

4.3.6 ま と め 197

4.4 地上デジタル放送波の長距離光ファイバ伝送技術 198

4.4.1 設計・検討のためのシステムモデル 200

4.4.2 システム設計のための検討 201

4.4.3 実際の光ファイバ網を使用したフィールド実験 207

4.4.4 ま と め 210

引用・参考文献 211

索 引 216

1. デジタル変復調技術の基礎

本書の主題である **OFDM** (orthogonal frequency division multiplexing, **直交周波数分割多重**) はデジタル変調された多数のキャリア (搬送波) を合成することにより高性能化 (耐マルチパス性など) を実現したものである。

本章ではその基礎となるデジタル変復調技術, 情報理論の基礎, 無線通信のような過酷な伝送路において良好な信号品質を保つためには不可欠な誤り訂正技術について述べる。また, MATLAB によるプログラム例も示す。

1.1 デジタル変復調技術

情報を遠くまで伝送する場合は, 雑音やひずみなどの影響を受けるため, 送りたい伝送路に応じて信号の形を変換する必要がある。無線通信においては, **搬送波** (キャリア, carrier) に情報を乗せて送信を行う。このように, 電波に情報を乗せることを「変調」と呼ぶ。逆に, 電波に乗っている情報を取り出すことは「復調」と呼ばれる。搬送波に乗せる情報が, アナログ信号の場合の変調を「アナログ変調」, 一方, デジタル信号の場合「デジタル変調」と呼ぶ^{1)~6)†}。

アナログ変調においては, アナログ信号で搬送波の振幅, 周波数, 位相を変化させて情報を伝送する方式が用いられており, それぞれ **AM** (amplitude modulation, **振幅変調**), **FM** (frequency modulation, **周波数変調**), **PM** (phase modulation, **位相変調**) と呼ばれている。デジタル変調でも同じような方式が考えられ, 搬送波信号 $s(t)$ が

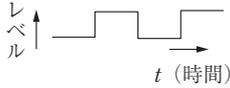
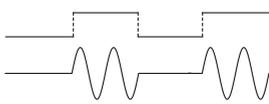
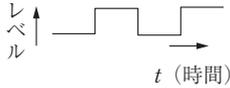
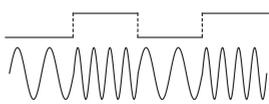
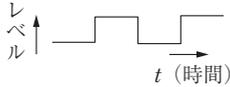
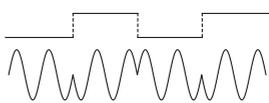
$$s(t) = A(t) \cos\{2\pi f_c t + \phi(t)\} \quad (1.1)$$

[†] 肩付き数字は, 巻末の引用・参考文献番号を表す。

2 1. デジタル変復調技術の基礎

で表されるとき、2値のデジタル信号データ「0」、 「1」により、振幅 $A(t)$ 、周波数 f_c および位相 $\phi(t)$ を変化させて情報を伝送する。これらの方式はアナログ方式に対応して、**ASK** (amplitude shift keying, 振幅変調)[†]、**FSK** (frequency shift keying, 周波数変調)、**PSK** (phase shift keying, 位相変調) と呼ばれている。表 1.1 に各種デジタル変調方式と信号波形を示す。

表 1.1 各種デジタル変調方式と信号波形

変調方式	デジタル信号 (データ)	信号波形
ASK (振幅変調)		
FSK (周波数変調)		
PSK (位相変調)		

1.1.1 ASK 変調方式

ASK はデジタル信号で搬送波の振幅を変えることにより情報を伝送する方式である。搬送波とデジタル信号を乗算することで ASK 信号を得ることができる。搬送周波数を f_c とすれば ASK の信号波形は次式で表される。

$$s(t) = A(t) \cos(2\pi f_c t) \tag{1.2}$$

ここで、 $A(t)$ は 2 値 ASK では 1 または 0 の値をとる。このように 2 値「0」か「1」で搬送波の断続を行う方式は、**OOK** (on-off keying) とも呼ばれる。

図 1.1 は ASK 変調方式の信号波形を示す。

また、複数のレベルを用いてシンボル当りのビット数を増やす方式もあり、

[†] 「shift keying」という英語は、「偏移変調」と訳される場合もあるが、通常、「変調」と訳される場合がほとんどである。

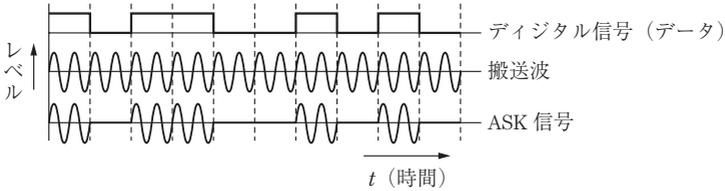


図 1.1 ASK 変調方式の信号波形

多値 ASK あるいは **多値 PAM** (multi-level pulse amplitude modulation, **多値パルス振幅変調**) と呼ばれる。ASK はレベル変動の影響を受けやすく、無線通信にはあまり利用されないが、振幅を 8 値に多値化し、伝送速度を高めた方式がアメリカの地上デジタルテレビ放送に採用されている⁷⁾。また、他の変調方式の装置と比べて、それほど複雑・高価なものではないため、光ファイバでデータ送信を行う場合に一般に使用されている。

1.1.2 FSK 変調方式

FSK は、2 値 (0, 1) のデジタル信号 (データ) に合わせて搬送周波数を変化させ、情報を伝送する方式である。図 1.2 は FSK 変調方式の信号波形を示す。

FSK 信号は 2 値のデジタル信号「0」、 「1」で、**VCO** (voltage controlled oscillator) あるいは複数の発振器を切り替えることにより発生させることができ、受信もそれぞれの周波数を選択するためのバンドパスフィルタがあればよい。複数の発振器を利用する場合、二つの発振器の位相関係はまったくランダムであるため、切り替えた瞬間、出力の位相が不連続になり、大量の高調波を

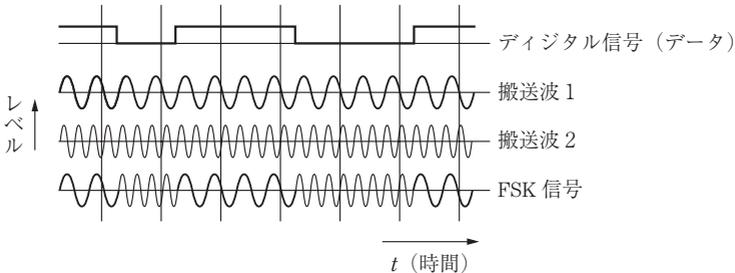


図 1.2 FSK 変調方式の信号波形

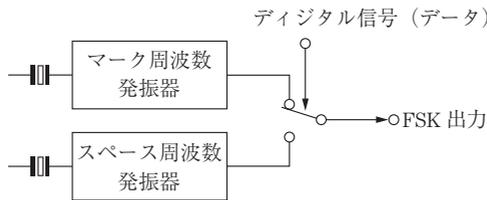
発生してしまう。すなわち切り替え時に位相変調を伴っているため、変調する信号をいくら帯域制限しても変調後のスペクトルのコントロールができなくなる。そこで、変調信号を帯域制限する必要があるが、変調出力は一定振幅ではなくなる。図 1.3 は FSK 変調方式のスペクトルである。



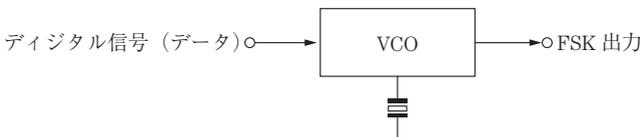
図 1.3 FSK 変調方式のスペクトル

一方、VCO など一つの発振器の周波数を連続的に変化させる場合は、変調信号を帯域制限することにより、スペクトルのサイドローブのコントロールが可能となる。このような FSK を **CPFSK** (continuous phase FSK) と呼ぶ。FSK といった場合は、ほとんどの場合 CPFSK のことを指す。図 1.4 に FSK 変調方式の種類を示す。

[1] **MSK** **MSK** (minimum shift keying) は **変調指数[†]** (modulation



(a) 位相不連続 FSK



(b) 位相連続 FSK (CPFSK)

図 1.4 FSK 変調方式の種類

[†] 変調指数とは、最大周波数偏差を変調周波数で割った値をいう。

index) を 0.5 とした FSK の中で最も周波数帯域が狭い信号であり, I 軸と Q 軸間の直交性を持つ変調方式である。

MSK 信号 $s(t)$ は, 振幅を A (定数), 初期位相を 0 とすれば, 次式で表される。

$$s(t) = A \sin\left(2\pi f_c t \pm \frac{\pi t}{2T}\right) \quad (m-1)T \leq t \leq mT \quad (1.3)$$

ここで, T はシンボル長, m は任意のシンボル番号である。三角関数の公式から式 (1.3) を書き直すと

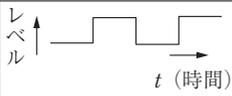
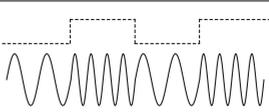
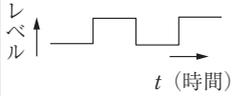
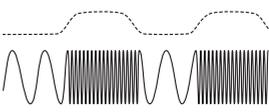
$$s(t) = A \left\{ \cos \frac{\pi t}{2T} \sin(2\pi f_c t) \pm \sin \frac{\pi t}{2T} \cos(2\pi f_c t) \right\} \quad (1.4)$$

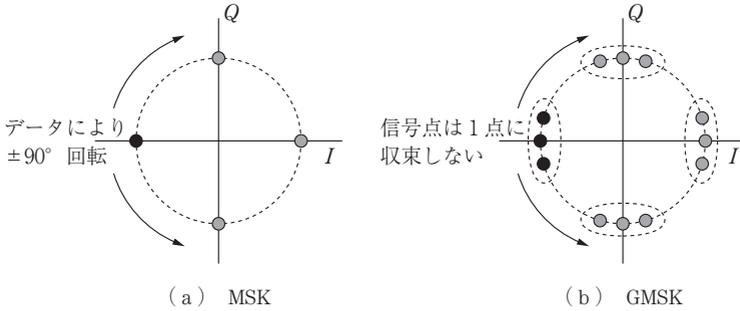
となる。このように I 軸 ($\cos(2\pi f_c t)$) と Q 軸 ($\sin(2\pi f_c t)$) の和で信号を表すことができる。

〔2〕 **GMSK** **GMSK** (Gaussian filtered MSK) は MSK の情報信号を変調する前にガウス (Gauss) 形波形整形フィルタで滑らかな波形に整形した後, 変調指数 0.5 を与えた変調方式である。MSK と GMSK の違いはガウス形フィルタの有無にある。MSK では信号点は完全に 4 点に収束するのに対し, ガウス形フィルタで帯域制限を行った GMSK では, 信号点が分散するので, 受信特性は MSK に比べ若干劣化する。表 1.2 に MSK と GMSK の比較を示す。

図 1.5 は MSK と GMSK 変調方式の $I-Q$ 平面での信号点配置を示す。MSK はデータに対し, 回転角度が $\pm 90^\circ$ となる。しかし, ガウス形フィルタで帯域制限を施した GMSK では, 方向転換時の回転速度の変化が MSK と比べ緩やかになる。

表 1.2 MSK と GMSK の比較

変調方式	デジタル信号 (データ)	信号波形
MSK		
GMSK		

図 1.5 MSK と GMSK の I - Q 平面での信号点配置

1.1.3 PSK 変調方式

PSK では有限数の位相が使われ、それぞれに 2 値デジタル信号（データ）特有のパターンが割り当てられる。それぞれのビットのパターンは、特定の位相と 1:1 に対応し、シンボルを構成する。アナログの位相変調は、変調周波数に無関係に変調レベルに比例して変調指数（位相量）が増加し、FM に比べて帯域が広がるため、あまり使用されない。しかし、デジタル変調の場合は、サンプル点で「1」か「0」を判断できればよい。PSK においては、ナイキストの基準を満足するロールオフフィルタを使用すれば、帯域を制限しても符号間干渉なしに伝送が可能であり、デジタル伝送に適した方式といえる。

〔1〕 **BPSK** **BPSK** (binary phase shift keying) は 2 値のデジタルデータに応じて、搬送周波数の位相を変化させることで情報を伝送する変調方式の一種である。BPSK 信号は次式で表される。

$$s(t) = A(t) \cos(2\pi f_c t) \quad (1.5)$$

搬送波の位相は 2 値のデジタル信号により変化し、 $0, \pi$ に 2 相位変調された信号が得られる。PSK の中では最も単純な方式で、周波数利用効率 (spectral efficiency, 伝送速度 (ビットレート) / 帯域幅) はよくない。しかしその分、通信誤りが生じにくいという利点がある。一方、BPSK では位相が急激に変化するため、出力スペクトルが広がってしまうという欠点もある。図 1.6 と図 1.7 は BPSK 変調方式の信号波形と信号点配置を示す。データにより

索 引

【い】		【し】		中央極限定理	33
位相雑音	127	時間インタリーブ	51	中継局	103
位相変調	1, 2	自己相関関数	35	長区間平均値	32
インタリーブ	51	自動周波数制御	84	超遅延波	84
【え】		自動利得制御	84	直接拡散方式	84
エルミート行列	76	シャドウイング	31	直線補間	134
エントロピー	22	シャノン限界	23	直並列変換	41
エントロピー関数	23	周波数インタリーブ	51	直交周波数分割多重	1, 29
【お】		周波数選択性フェージング	29	直交復調	110
親局	114	周波数変調	1, 2	直交変調	110
【か】		周波数利用効率	6, 108	【て】	
仮想キャリア	43	受信信号候補	77	低域通過フィルタ	7
ガードインターバル	29, 106	出力バックオフ	54	ディップ	148
ガードインターバル超え		瞬時値変動	30, 32	適応変調	71
遅延波	136	情報理論	21	伝送速度	102
加法性白色ガウス雑音	45	初期位相差	133	電力スペクトル法	161
簡易 BER	157	信号点	110	電力増幅器	51
【き】		振幅変調	1, 2	電力利得	51
逆離散フーリエ変換	41	シンボル間干渉	29, 44, 138	【と】	
キャリア	1	シンボル長	29	同一チャネル混信	129
距離変動	30	シンボル判定処理	131	等価 CNR	121
【く】		【す】		等化器	130
クリフエフェクト	117	水冷方式	117	【な】	
群遅延時間	121	スプリアス放射	9	斜め補間	136
【こ】		スペクトルマスク	121	【に】	
広義の定常	34	【せ】		2乗余弦窓	43
高速フーリエ変換	29	ゼロフォーシング	152	【ぬ】	
広帯域ワイヤレスアクセス	87	【た】		ヌルシンボル	49
誤差補関数	24	帯域通過フィルタ	43	【は】	
コスト関数	79	対角行列	75	パイロットシンボル基盤	48
コヒーレンス時間	48	ダイバーシティ受信	148	波長分散	199
コヒーレンス帯域幅	48	多重波伝搬路	29	搬送波	1
コヒーレンスバンド幅	36	畳込み演算子	144	判定帰還型	48
固有空間多重伝送方式	75	多値 ASK	3	【ひ】	
コンスタレーション	110	多値 PAM	3	ピーク電力対平均電力比	52
【さ】		多値パルス振幅変調	3	ビット誤り率	117, 156
散乱関数	37	短区間中央値	32	標準偏差	32
		短区間中央値変動	30	品質情報	92
		【ち】			
		遅延プロファイル	35, 157		

	【ふ】	【る】	
プリディストーション	107	マルチパスフェージング	29
	【へ】	無相関	34
平均情報量	22	無停波切替器	117
並直列変換	41	【ゆ】	
ベースバンド信号	32	有効シンボル長	106
変調指数	4	ユニタリ行列	75
	【ほ】	【ら】	
補 間	133	ランダム過程	33
	【ま】	【り】	
マッピング	12, 110	陸上移動伝搬特性	30
マルチパス	102	隣接チャネル間干渉	43

	【A】	【G】	
AC	109	FM	1
AM	1	FSK	2
ASK	2	【I】	
	【B】	GMSK	5
BER	9, 156	【L】	
BLAST	76	IFFT	57, 109, 137
BPF	43, 119	IMD	116
BPSK	6	ISM	82
	【C】	【M】	
CCK	84	MAC	86
CDM	40	MCPA	118
CNR	24	MCS	86, 92
CP	109	MER	154
CPFSK	4	MFN	114
CSMA/CA	86	MIMO	73
	【D】	MLD	77
D-BLAST	76	MMSE	152
DBPSK	84	MSK	4
DQPSK	84	【O】	
D-TxAA	92	OFDM	1
DU 比	128	OOK	2
	【E】	【P】	
E-UTRA	92	PAPR	52, 107
	【F】	PARC	92
FDD	92	PDC	11
FDM	40	PHS	11
FFT	29		
FIR フィルタ	132		
		【Q】	
		QAM	40
		QPSK	7
		QRM-MLD	78
		QR 分解	78
		【S】	
		SC-FDMA	92
		SFN	102, 114
		SNR	24
		SP	109
		STTD	92
		【T】	
		TDD	92
		TDM	40
		TMCC	109
		TS	109
		【U】	
		UMB	91
		UTRA	92
		【V】	
		V-BLAST	77
		VCO	3
		【W】	
		WiMAX	87

— 著者略歴 —

生岩 量久 (はえいわ かずひさ)

1970年 徳島大学工学部電気工学科卒業

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

現在に至る

NHK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・船井賞 (技術革新賞) などを受賞。電子情報通信学会フェロー。著書に「デジタル通信・放送の変復調技術」(コロナ社) など。



安 昌俊 (アン チャンジュン)

2003年 慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程修了

博士 (工学)

通信総合研究所 (CRL: 現 独立行政法人情報通信研究機構) 研究員

2007年 広島市立大学講師

2010年 千葉大学准教授

現在に至る

OFDM 技術とその適用

OFDM Technologies and Their Applications

© Kazuhisa Haeiwa, Chang-Jun Ahn 2010

2010年9月17日 初版第1刷発行



検印省略

著者 生岩量久
安昌俊
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 978-4-339-00815-9

(柏原) (製本: 愛千製本所)

Printed in Japan



無断複写・転載を禁ずる

落丁・乱丁本はお取替えいたします