

Table des matières

Avant-propos	1
Introduction	3
Chapitre 1. La modulation.	27
1.1. Pourquoi la modulation ?	27
1.1.1. Justificatifs principaux de la modulation	27
1.1.2. Principaux schémas de la modulation	27
1.1.3. Critères pour la modulation <i>via</i> l'électronique	28
1.1.4. La modulation digitale : pour quoi faire ?	28
1.2. Principales contraintes techniques	28
1.2.1. Compromis simplicité/bande passante	30
1.2.2. Évolutions industrielles	30
1.2.3. Compromis simplicité/largeur de bande	31
1.3. Transmission de l'information (analogique ou digitale).	32
1.3.1. Caractéristiques de signaux pouvant être modifiées.	32
1.3.2. Représentation de l'amplitude et de la phase dans le plan complexe	33
1.4. Probabilités d'erreur.	35
1.4.1. Taux d'erreur par bit en fonction du rapport signal sur bruit	36
1.4.2. Démodulateur : décodeur destinataire	38
1.5. Vocabulaire de la modulation numérique	40
1.5.1. Symbole	40
1.5.2. Rapidité de modulation R	40
1.5.3. Débit binaire $D = 1/T_b$	40

1.5.4. TEB (BER pour <i>Bit Error Ratio</i>)	40
1.5.5. Efficacité spectrale	41
1.5.6. Signal d'horloge des symboles	42
1.5.7. Débit binaire et taux de symboles	42
1.6. Principes des modulations numériques.	42
1.6.1. Affichage polaire	44
1.6.2. Variations de paramètres : amplitude, phase, fréquence	44
1.6.3. Représentation dans le plan complexe.	45
1.6.4. Diagramme de l'œil.	47
1.7. Multiplexage	48
1.7.1. Partage du canal	49
1.7.2. Multiplexage en fréquence	49
1.7.3. Multiplexage temporel	50
1.7.4. Multiplexage du code	51
1.7.5. Multiplexage géographique (spatial).	51
1.8. Principaux formats des modulations numériques.	51
1.8.1. Modulation par déplacement de phase (MDP/PSK).	53
1.8.2. MDP-2	56
1.8.2.1. Modulation et démodulation	58
1.8.2.2. Un petit rappel sur les codes NRZ	58
1.8.2.3. Le spectre de la MDP-2	61
1.8.3. MDP-4	61
1.8.3.1. Modulation par déplacement de phase	64
1.8.3.2. Modulation et démodulation	64
1.8.3.3. MDP-4/QPSK de MATLAB	76
1.8.3.4. Exécution et résultats	83
1.8.3.5. Initialisation	84
1.9. EVM (<i>Error Vector Module</i>) et bruit de phase	85
1.9.1. Plot QPSK	90
1.9.1.1. Création d'un démodulateur PSK, avec 0 d' <i>offset</i>	92
1.9.1.2. Bruit de phase sur un signal QPSK	92
1.9.1.3. Fonction cosinus surélevé.	93
1.9.2. Effets du bruit de phase sur la 16-QAM.	96
1.9.3. Influence du bruit de phase sur le spectre du signal	97
1.9.4. Algorithmes	98
1.9.5. Analyseur de spectre	99
1.9.6. Mesure EVM d'un signal modulé par une 16-QAM bruyante.	101
1.10. Bruit gaussien (AWGN)	102
1.10.1. Canal AWGN	104
1.10.1.1. Niveau de bruit du canal AWGN.	104
1.10.1.2. Relation entre E_s/N_0 et E_b/N_0	105

1.10.2. Relation entre EsNo et SNR	105
1.10.3. Comportement pour des signaux d'entrée réels et complexes	105
1.11. Modulation QAM dans un canal AWGN	106
1.11.1. Démodulation MAQ/QAM	109
1.11.2. Détection de l'erreur de phase.	111
1.12. Suppression du déséquilibre I/Q.	112
1.13. Modulations par déplacement de fréquence	114
1.14. Modulation FSK binaire	115
1.15. Modulation par déplacement minimal	116
1.15.1. Taux d'erreur par bit avec canal gaussien	118
1.15.2. Expressions analytiques typiques utilisées dans « berawgn »	119
1.16. Modulation par déplacement d'amplitude	120
1.16.1. Modulation par tout ou rien	120
1.16.2. Modulation à M états	122
1.16.2.1. Les constellations MDA M symétriques	122
1.16.2.2. Le spectre de la MDA M symétrique	123
1.16.2.3. Modulation et démodulation	123
1.16.2.4. Les performances des MDA M.	125
1.17. Modulation d'amplitude sur deux porteuses en quadrature	125
1.17.1. Transmission digitale : câble et modems	125
1.17.2. Limites sur l'efficacité spectrale théorique	126
1.17.3. Déséquilibre I/Q	126
1.17.4. Constellations MAQ-M.	129
1.17.4.1. Modulation et démodulation	130
1.17.4.2. Efficacité spectrale	130
1.17.4.3. QAM : une généralisation de la MDA et de la MDP	131
1.17.4.4. Comparaison de la MDA et de la MDP	132
1.18. Transmetteurs de communications digitales	136
1.18.1. Récepteur de communications numériques	137
1.18.2. Mesures de puissance.	139
1.18.3. Puissance du canal adjacent	139
1.18.4. Mesures de fréquence.	140
1.18.5. Mesures de synchronisation	141
1.18.5.1. Précision de la modulation	141
1.18.5.2. Dépannage (<i>troubleshooting</i>) des mesures de vecteur d'erreur.	143
1.18.5.3. Amplitude <i>versus</i> erreur de phase	143
1.18.5.4. Erreur de phase IQ en fonction du temps	144
1.18.5.5. Vecteur d'erreur en fonction du temps	145
1.18.5.6. Spectre d'erreur – EVM en fonction de la fréquence	145
1.19. Applications.	147
1.19.1. Domaines	147

1.19.1.1. Les modems téléphoniques	147
1.19.1.2. Les faisceaux hertziens	147
1.19.1.3. Les transmissions par satellite	148
1.19.1.4. Les radiocommunications avec les mobiles	148
1.19.2. Digressions ou précisions autour des modulations	149

Chapitre 2. Quelques développements des techniques de modulation	155
2.1. OFDM	155
2.1.1. Problématique	155
2.1.2. Modulations multiporteuses	156
2.1.2.1. Stratégies de transmission	158
2.1.2.2. Canal connu à l'émission	158
2.1.2.3. Autres techniques de transmission pour atteindre la capacité du canal	159
2.1.2.4. Canal inconnu à l'émission	159
2.1.2.5. Codage	159
2.1.3. Principes généraux	160
2.1.4. Comment choisir N ?	162
2.1.5. Aspects pratiques	163
2.1.6. COFDM	164
2.1.7. Égalisation et décodage	166
2.1.8. Contexte multi-utilisateur	167
2.1.9. Accès multiple par répartition de codes	167
2.1.10. Ordinogramme schématique	169
2.1.11. Données en OFDM	171
2.1.12. OFDM : avantages et désavantages	172
2.1.12.1. Avantages	172
2.1.12.2. Désavantages	173
2.1.13. Conclusion intermédiaire	174
2.1.14. QPSK et OFDM avec objets système MATLAB	175
2.1.15. Différence entre FDM et OFDM	178
2.2. Orthogonalité : un bref rappel	185
2.2.1. Vecteurs dans \mathbb{R}^2	187
2.2.2. Fonctions dans $L^2([0,1])$	188
2.3. GSM	188
2.3.1. Rappels et éléments de base	188
2.3.2. Composition d'un GSM	190

2.4. MIMO	192
2.4.1. Définition et rappels	192
2.4.2. Principes	193
2.4.3. Utilisations	195
Chapitre 3. Traitement du signal : échantillonnage	197
3.1. Transformée en Z	197
3.1.1. Des transformées	197
3.1.2. Transformée en Z inverse	198
3.1.3. Propriétés	199
3.1.4. Convolution de suites	199
3.2. Bases du traitement du signal	201
3.3. Traitement de discrétisation réelle	204
3.3.1. Peigne de discrétisation réelle	204
3.3.2. Signal échantillonné réel	205
3.3.3. Signal échantillonné-bloqué	205
3.3.4. Modélisation de signaux échantillonnés réels	205
3.3.5. Quantification uniforme	206
3.3.6. Quantification par arrondi	206
3.3.7. Quantification par troncature	207
3.3.8. Résolution de quantification	207
3.3.9. Bruit gaussien blanc additif (AWGN) : un modèle simple mais efficace	207
3.3.10. Erreur de quantification et bruit de quantification	207
3.3.11. Réalisation pratique : échantillonneur-bloqueur et CAN	208
3.3.12. Spectres de signaux périodiques	208
3.3.13. Spectres de signaux non périodiques	209
3.3.14. DSP <i>versus</i> retard	211
3.3.14.1. Translation	211
3.3.14.2. Fonction de Dirac	211
3.3.15. TF d'un produit	211
3.3.16. Signal périodique avant échantillonnage	212
3.3.17. Spectre d'un signal échantillonné	212
3.3.18. Conditions sur la fréquence d'échantillonnage	213
3.4. Rappel de techniques de codage : entropie et capacité	213
Chapitre 4. Un peu de <i>hardware</i> associé	215
4.1. Oscillateur contrôlé en tension	215
4.2. Fonction de sensibilité impulsionnelle	221

4.3. Bruit de phase	222
4.3.1. Au passage à zéro	224
4.3.2. Aux pics	224
4.4. Boucle à verrouillage de phase	230
4.4.1. Étude d'un outil fondamental : la PLL	231
4.4.2. Structure schématique de la PLL	231
4.4.2.1. Le comparateur de phase	231
4.4.2.2. L'oscillateur contrôlé/commandé en tension (VCO)	233
4.4.2.3. Le filtre passe-bas	233
4.4.3. Fonctionnement de la boucle : capture et verrouillage	233
4.4.3.1. Capture	234
4.4.3.2. Bilan	235
4.4.3.3. Plage de verrouillage	236
4.4.4. Pompage de charge	240
Conclusion	241
Annexe 1. Autres exemples de modulation	243
Annexe 2. Synopsis sur les modulations analogiques et numériques.	251
Annexe 3. Analyse de Fourier	271
Liste des acronymes	299
Bibliographie	303
Index	305