



EGEM

électronique – génie électrique – microsystèmes

Mesures en hyperfréquences

*sous la direction de
Daniel Pasquet*

 **hermes**

Lavoisier

Table des matières

Chapitre 1. Analyse de réseaux	15
Daniel PASQUET, Paul CROZAT, Bernard HUYART	
1.1. Principes de l'analyse de réseaux	15
1.1.1. Coupleur directif	15
1.1.2. Mesure d'un dipôle en réflexion	17
1.1.2.1. Dispositif parfait	17
1.1.2.2. Directivité	18
1.1.2.3. Désadaptation du générateur	19
1.1.3. Mesure d'un quadripôle	20
1.1.3.1. Dispositif parfait	20
1.1.3.2. Erreurs de mesure en réflexion	20
1.1.3.3. Désadaptation de la charge	21
1.1.3.4. Isolation	21
1.1.4. Erreurs de mesure	21
1.1.4.1. Erreurs aléatoires	21
1.1.4.2. Erreurs systématiques	22
1.1.4.3. Modèle d'erreur	22
1.1.5. Structure de mesure	23
1.1.5.1. Guide coaxial	23
1.1.5.2. Monture de test	24
1.1.5.3. Mesures sous pointes	25
1.2. Analyseur de réseaux scalaire	26
1.2.1. Description du dispositif	26
1.2.2. Etalonnage simple en réflexion	27
1.2.2.1. Effet de la directivité	27
1.2.2.2. Effet de la désadaptation	30

1.2.3. Allongement de la ligne de mesure	32
1.2.4. Etalonnage par deux charges opposées	33
1.2.4.1. Directivité	33
1.2.4.2. Désadaptation du générateur	35
1.2.5. Etalonnage en transmission	36
1.2.5.1. Directivité	37
1.2.5.2. Désadaptation du générateur	37
1.2.5.3. Désadaptation de la charge	38
1.3. Analyseur de réseaux vectoriel à deux ou trois coupleurs	39
1.3.1. Description du dispositif	39
1.3.2. Modèle d'erreur à douze termes	40
1.3.3. Etalonnage SOLT	41
1.3.3.1. Etalons fixes	42
1.3.3.2. Charge coulissante	44
1.3.3.3. Etalonnage en transmission	45
1.4. Analyseurs de réseaux à quatre coupleurs	45
1.4.1. Description du dispositif	45
1.4.2. Modèle d'erreur à sept termes	46
1.4.3. Autocalibrages	48
1.4.3.1. Méthode TRL	48
1.4.3.2. Méthode LRM	49
1.5. Calibrage et épluchage des mesures	50
1.5.1. Principales techniques d'épluchages	50
1.5.1.1. Epluchage d'une monture de test	51
1.5.1.2. Epluchage d'une mesure de transistors sur tranche	51
1.6. Mesures dans des plages de températures importantes	51
1.6.1. Intérêt des mesures dans une large gamme de température	51
1.6.2. Choix de la méthode de mesure	52
1.6.3. Difficultés spécifiques à ces mesures	53
1.7. Analyseur de réseaux de type « six-port »	54
1.7.1. Introduction	54
1.7.2. Principe de mesure	55
1.7.2.1. Mesure d'une charge	55
1.7.2.2. Conclusions sur la mesure d'une charge	56
1.7.3. Mesure d'un quadripôle linéaire	57
1.7.4. Composantes matérielles de l'analyseur « six-port »	59
1.7.4.1. Le circuit interférométrique	59
1.7.4.2. Sondes de puissance	64
1.8. Bibliographie	66

Chapitre 2. Mesure des paramètres de bruit	69
Laurent ESCOTTE	
2.1. Introduction	69
2.2. Définitions	70
2.2.1. Bruit dans les dipôles	70
2.2.2. Facteur de bruit d'un quadripôle linéaire	71
2.2.3. Température équivalente de bruit d'un quadripôle	72
2.2.4. Quadripôles en cascade	72
2.2.5. Facteur de bruit d'un quadripôle passif	73
2.2.6. Paramètres de bruit d'un quadripôle	73
2.2.7. Représentation du bruit dans les circuits linéaires	74
2.3. Mesure du bruit dans les dipôles	75
2.4. Mesure du facteur de bruit	77
2.4.1. Principe de mesure	77
2.4.2. Instrumentation	78
2.4.2.1. Sources de bruit	78
2.4.2.2. Mesureur de bruit	80
2.4.3. Causes d'erreurs et d'incertitudes	81
2.4.3.1. Causes d'erreurs	81
2.4.3.2. Calcul d'incertitude	84
2.5. Mesure des quatre paramètres de bruit	88
2.5.1. Méthode des impédances multiples	88
2.5.1.1. Méthode d'extraction des paramètres de bruit	88
2.5.1.2. Précision des méthodes d'extraction	89
2.5.1.3. Techniques de mesure	91
2.5.1.4. Précision des mesures	95
2.5.2. Techniques basées sur la dépendance fréquentielle du facteur de bruit	96
2.5.3. Technique basée sur l'utilisation d'un radiomètre	99
2.5.4. Techniques interférométriques	100
2.5.5. Techniques basées sur une modélisation paramétrique du second ordre	103
2.5.6. Mesure des paramètres de bruit de transistors à effet de champ basée sur l'utilisation d'un modèle	105
2.6. Conclusion et perspectives	106
2.7. Bibliographie	107
 Chapitre 3. La mesure du bruit de phase en hyperfréquences	115
Olivier LLOPIS	
3.1. Introduction	115
3.2. Bruit de phase et d'amplitude : définitions et grandeurs utiles	117

3.3. La mesure du bruit de phase des oscillateurs	121
3.3.1. Mesure à l'analyseur de spectre	123
3.3.2. Techniques à références passives	124
3.3.2.1. Principe de base	124
3.3.2.2. Optimisation du système ; la ligne à retard	127
3.3.2.3. Optimisation du système ; le mélangeur	128
3.3.2.4. Optimisation du système ; le bruit d'amplitude	128
3.3.2.5. Performances globales	129
3.3.2.6. Calibrage et plancher de bruit de phase	130
3.3.3. Techniques à référence active	131
3.3.3.1. Boucle à verrouillage de phase : principe	131
3.3.3.2. Boucle à verrouillage de phase : choix du dispositif	134
3.3.3.3. Boucle à verrouillage de phase : calibrage	135
3.3.3.4. Boucle à verrouillage de phase : mesure à deux sources	136
3.3.3.5. Mesure active à verrouillage par injection	138
3.4. Bruit de phase des quadripôles	140
3.4.1. Technique de mesure	141
3.4.2. Plancher de bruit	141
3.4.3. Calibrage	142
3.4.4. Exemple d'application 1 : choix d'un composant pour un oscillateur	143
3.4.5. Exemple d'application 2 : mesure d'un diviseur de fréquence	145
3.5. Bruit d'amplitude	145
3.5.1. Technique de mesure	146
3.5.2. Exemple de mesures	146
3.6. Techniques spécifiques pour la détection de phase à très haute performance	147
3.6.1. Détecteur à corrélation	147
3.6.2. Détecteur interférométrique	149
3.7. Sources de référence pour la mesure et la conversion de fréquence	151
3.7.1. Sources synthétisées micro-ondes de très grande pureté spectrale	151
3.7.2. Oscillateurs micro-ondes à haute pureté spectrale	152
3.8. Conclusion	154
3.9. Bibliographie	155
3.10. Glossaire	158

Chapitre 4. Mesures non linéaires	161
Luc LAPIERRE	
4.1. Position du problème	161
4.1.1. Mesures visant la conception de circuit	162
4.1.2. Mesures visant la conception système	162
4.1.3. Non-linéarités avec et sans mémoire	163
4.2. Mesures à des fins de modélisation non linéaire de type circuit	165
4.2.1. Banc de mesure en impulsions	165
4.2.1.1. Principe général	165
4.2.1.2. Mesure des caractéristiques I(V)	165
4.2.1.3. Mesure des paramètres S en impulsions	170
4.2.1.4. Réglages et étalonnage du banc	173
4.2.1.5. Acquisition des mesures	173
4.2.1.6. Conclusion	174
4.2.2. Bancs de mesure à variation de charge passive	174
4.2.2.1. Principe général du banc à variation de charge passive	174
4.2.2.2. Banc de mesure à variation de charge passive sans démontage	177
4.2.2.3. Commentaires sur les tuners	179
4.2.2.4. Conclusion	181
4.2.3. Bancs de mesure à variation de charge active	181
4.2.3.1. Principe du banc de « load-pull » à charge active	181
4.2.3.2. Principe du banc de « load-pull » à boucle active	183
4.2.3.3. Principe du banc de « load-pull » multiharmonique	185
4.2.3.4. Conclusion	187
4.2.4. Mesure de formes d'ondes temporelles	187
4.2.4.1. Principe de la mesure de formes d'ondes temporelles	187
4.2.4.2. Banc de « load-pull » avec formes d'ondes temporelles	189
4.2.4.3. Conclusion	190
4.3. Mesure à des fins de modélisation non linéaire comportementale	190
4.3.1. L'enveloppe complexe	190
4.3.2. Mesure des caractéristiques AM/AM et AM/PM	193
4.3.2.1. Principe général	193
4.3.2.2. Utilisation des caractéristiques AM/AM et AM/PM	194
4.3.2.3. Conclusion	197
4.3.3. Mesure des caractéristiques d'intermodulation	197
4.3.3.1. Définition des principaux points caractéristiques d'un amplificateur	197
4.3.3.2. Banc de mesure de produits d'intermodulation	201
4.3.4. Caractérisation d'amplificateurs pour signal radar	202
4.3.4.1. Description du signal et de la méthode de mesure	202
4.3.4.2. Application de la mesure	203

14 Mesures en hyperfréquences

4.3.5. Mesure du NPR	203
4.3.5.1. Définition du NPR	203
4.3.5.2. Banc de mesure de NPR analogique	204
4.3.5.3. Banc de mesure de NPR numérique	205
4.3.5.4. Application à la génération numérique de signaux télécom	208
4.3.5.5. Conclusion	209
4.3.6. Mesures de signaux pour modélisation de non-linéarité à mémoire	209
4.4. Autres mesures relatives à la puissance	211
4.4.1. Les produits d'intermodulation passifs	211
4.4.1.1. Origine des produits d'intermodulation passifs	211
4.4.1.2. Banc de mesure de produits d'intermodulation passifs	212
4.4.2. Les effets de claquage en hyperfréquences	214
4.4.2.1. L'effet corona	215
4.4.2.2. L'effet multipactor	215
4.5. Conclusion générale	217
4.6. Bibliographie	217
Index	221