

Inhalt

1	Einführung	12
1.1	Was ist ein Netzwerkanalysator?	12
1.2	Wellengrößen und S-Parameter	13
1.3	Warum vektorielle Netzwerkanalyse?	17
1.4	Ein Schaltungsbeispiel	18
2	Aufbau eines heterodynen N-Tor-Netzwerkanalysators	22
2.1	Blockschaltbild	22
2.2	Aufbau des Testsets	23
2.2.1	Konstanz der a-Welle	24
2.2.2	Reflexionsgleichlauf	25
2.2.3	Direktivität	26
2.2.4	Messtoranpassung und Mehrfachreflexionen	29
2.2.5	Zusammenfassung	31
2.2.6	Ausblick	32
2.3	Realisierung des direktiven Elements	33
2.3.1	Messbrücke	34
2.3.2	Leitungskoppler	36
2.3.3	Andere Realisierungen	42
2.4	Weitere Komponenten des Testsets	42
2.4.1	Empfängereichleitungen	42
2.4.2	Generatoreichleitungen	46
2.4.3	Aktive und passive Testsets	48
2.5	Generator	49
2.6	Referenz- und Messkanalempfänger	50
2.7	Messablauf	54
2.7.1	Ablauf der S-Parametermessung	54

2.7.2	Messdatenverarbeitungskette	55
2.7.3	Messkurvenerzeugung	57
2.8	Wesentliche Einstellmöglichkeiten	57
2.8.1	Benutzeroberfläche	57
2.8.2	Messablaufparameter	60
2.8.3	Darstellungsparameter	64
2.9	Gerätefernsteuerung	70
2.9.1	Nutzung einfacher Digitalsignale	70
2.9.2	Protokollfähige Schnittstellen	70
2.9.3	Automatisierung	73
2.10	Vereinfachte Realisierungen	76
2.10.1	N+1-Messstellenanalysator	77
2.10.2	Netzwerkanalysator mit N-Tor-Schaltmatrix	78
3	Messgenauigkeit und Kalibrierung	80
3.1	Reduzierung zufälliger Messabweichungen	81
3.1.1	Thermische Drift	81
3.1.2	Wiederholgenauigkeit	81
3.1.3	Rauschen	84
3.2	Korrektur systematischer Messabweichungen	86
3.2.1	Nichtlineare Einflüsse	86
3.2.2	Lineare Einflüsse	87
3.3	Kalibrierstandards	89
3.3.1	Koaxiale Kalibrierstandards	91
3.3.2	Hohlleiterkalibrierstandards	99
3.3.3	Streifenleitungs-Kalibrierstandards	102
3.3.4	Koplanare Kalibrierstandards	106
3.3.5	Einheitliches Modell der Kalibrierstandards	109
3.4	Lineare Fehlermodelle und Kalibrierverfahren	111
3.4.1	3-Term-Modell (OSM-Verfahren)	111
3.4.2	7-Term-Modell (TOM-, TRM-, TRL-, TNA-, UOSM-Verfahren)	114
3.4.3	10-Term- und 12-Term-Modell (TOSM-Verfahren)	119
3.4.4	15-Term-Modell (TOM-X-Verfahren)	123

3.4.5	Adapter und nicht einfügbare Messobjekte	124
3.4.6	Unvollständige Kalibrierverfahren	127
3.4.7	Praktische Hinweise zur Kalibrierung	129
3.5	Verifikation	132
3.5.1	T-Check und Beatty-Standard	133
3.5.2	Messung der effektiven Systemdaten	136
3.5.3	Grundbegriffe der Statistik	142
3.5.4	Messunsicherheitsanalyse	146
3.6	Rückführbarkeit	151
3.6.1	Internationales Einheitensystem	151
3.6.2	Pseudoeinheiten dB und dBm	153
3.6.3	Wichtige SI-fremde Einheiten	155
3.6.4	Organisation der Rückführbarkeit	155
3.6.5	Rückführung eines Netzwerkanalysators	156
4	Lineare Messungen	157
4.1	Durchführung einer TOM-Kalibrierung	157
4.2	Durchführung einer TNA-Kalibrierung	160
4.3	Messung des Reflexionsfaktors und des SWR	162
4.4	Messung des Transmissionsfaktors	167
4.5	Messung der Gruppenlaufzeit	169
4.6	Messung der Phasenlaufzeit, automatischer Längenversatz	173
4.7	Messung der Stabilität	175
4.8	Messung mit Embedding	178
4.9	Messung mit Deembedding	183
4.10	Messung balancierter Leitungen	188

4.11	Messung des Fern- und Nah-Nebensprechens	192
4.12	Filter mit balanciertem und unbalanciertem Tor, Imbalance und Gleichtaktunterdrückung	196
4.13	Messung von Schaltzeiten und Drift	201
4.14	Messungen an Verstärkern im Pulsbetrieb	208
4.15	Messung des Wirkungsgrads	210
5	Zeitbereichsmessungen	214
5.1	Zeitbereichsbeschreibung	214
5.1.1	Impuls- und Sprungantwort	215
5.1.2	Zeitbereichsdarstellung linearer HF-Schaltungen	217
5.1.3	Zeitbereichsreflektometrie mit dem Oszilloskop	218
5.1.4	Fourier-Transformation	224
5.2	Numerische inverse Fourier-Transformation	226
5.2.1	Inverse diskrete Fourier-Transformation	227
5.2.2	Fensterung	234
5.2.3	Bandpassmodus	240
5.2.4	Rechenzeitorientierte Transformationen	244
5.3	Nutzung der Zeitbereichsoption	244
5.3.1	Bedienung des Tiefpassmodus	246
5.3.2	Bedienung des Bandpassmodus	249
5.3.3	Vorteile durch Extrapolation	250
5.3.4	Reihenfolge der Verarbeitung	252
5.4	Zeittor	253
5.5	Tabellen und Diagramme	257
5.5.1	Impuls- und Sprungantworten wichtiger Reflexionsfaktoren	257
5.5.2	Gegenüberstellung wichtiger Fensterfunktionen	264
5.5.3	Gegenüberstellung wichtiger Zeittore	265
5.5.4	Diagramm zur Bestimmung des Eindeutigkeitsbereiches	267

6	Messbeispiele zur Zeitbereichsmessung	268
6.1	Messung einer Leitung mit Störstelle	268
6.2	Messungen an einem Oberflächenwellenfilter im Zeitbereich	274
6.3	Dreidimensionale Ortung von Materialeinschlüssen	280
6.4	Messung der komplexen effektiven Systemdaten und OSML-Kalibrierung	283
7	Nichtlineare Messungen	288
7.1	Ausstattungsmerkmale für nichtlineare Messungen	288
7.1.1	Pegelregelung	288
7.1.2	Generatorpegelkalibrierung	291
7.1.3	Empfängerpegelkalibrierung	293
7.1.4	Pegel-Sweep	294
7.1.5	Mehrquellenkonzept	295
7.1.6	Frei konfigurierbarer frequenzumsetzender Modus	296
7.1.7	Zugang zu den Generator- und Empfängersignalen	298
7.1.8	Leistungsmessköpfe als Messstellen	298
7.1.9	Externe Generatoransteuerung	299
7.1.10	Weitere Ausstattungsmerkmale	300
7.2	Messung des Kompressionspunktes	301
7.3	Messung einer Detektorkennlinie	302
7.4	Harmonische	304
7.4.1	Modell der harmonischen Verzerrungen	304
7.4.2	Messung der Harmonischen und ihres Intercept-Punktes	308
7.5	Intermodulation	315
7.5.1	Modell der Intermodulationsverzerrungen	315
7.5.2	Messung der Intermodulationsprodukte und ihres Intercept-Punktes	318

7.6	Nachverstärkte Quelle mit externem Testset	328
7.7	Messung der Hot-S-Parameter	330
7.8	Load-Pull-Messungen	332
7.9	Echtbalancierte Messungen	336
8	Mischermessungen	338
8.1	Signale und Kenngrößen am Mischer	338
8.1.1	Signale am Mischer	338
8.1.2	Mischprodukte höherer Ordnung	341
8.1.3	Wichtige Mischerparameter	342
8.2	Ausstattungsmerkmale für die Messung von Mixchern	346
8.2.1	Mischermessmodus	346
8.2.2	Anschluss eines Referenzmischers	348
8.3	Beispiel für eine Mischermessung	348
8.4	Beispiel für eine frequenzumsetzende Messung an einem HF-Signalzug	352
8.5	Frequenzbereichserweiterung	354
9	Antennen- und Radarrückstreumessungen	360
9.1	Antennenmessungen	361
9.2	Wichtige Antennenmessgrößen	366
9.3	Radarrückstreumessungen	369
10	Schlusswort und Danksagung	373

A	Anhang	374
A1	Mathematische Grundlagen	374
A1.1	Komplexe Zahlen	374
A1.2	Matrizenrechnung	377
A2	Wichtige Formelzeichen und Größen	380
A3	Verwendete Schaltzeichen	385
A4	Akronyme und Abkürzungen	386
A5	Abbildungsnachweis	390
A6	Literaturliste	392
A6.1	Eine Auswahl von Applikationsschriften	392
A6.2	Bücher, wissenschaftliche Publikationen und Standards	393
A7	Index	398
A8	Die aktuellen Netzwerkanalysator-Modellreihen von Rohde & Schwarz	415