

Albrecht Ludloff

# **Handbuch Radar und Radarsignal- verarbeitung**

Mit 153 Bildern und 22 Tabellen



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung</b>	<b>1-1</b>
1.1 Radarprinzip . . . . .	1-1
1.2 Zur Geschichte des Radars . . . . .	1-2
1.3 Radaranwendungen und Radartypen . . . . .	1-3
1.4 Aufbau eines Rundsuchradars und Störsignale . . . . .	1-5
1.5 Aufgaben der Signalverarbeitung . . . . .	1-7
Literaturverzeichnis . . . . .	1-10
<b>2 Grundlagen und Radargleichung</b>	<b>2-1</b>
2.1 Übersicht . . . . .	2-1
2.2 $R^4$ -Gesetz und Rückstrahlquerschnitt . . . . .	2-2
2.3 Empfängerrauschen und Systemrauschen . . . . .	2-4
2.4 Empfänger-Empfindlichkeit und -Dynamik . . . . .	2-11
2.5 Radarantennen: ein Überblick . . . . .	2-16
2.6 Pulsradar und Wahl der Pulsfolgefrequenz . . . . .	2-21
2.7 Matched Filter-Prinzip . . . . .	2-31
2.8 Pulsintegration . . . . .	2-33
2.9 Die endgültige Radargleichung . . . . .	2-39
Literaturverzeichnis . . . . .	2-43
<b>3 Entdeckung konstanter und fluktuerender Echos im Rauschen</b>	<b>3-1</b>
3.1 Übersicht . . . . .	3-1
3.2 Prinzip des automatischen Zieldetektors . . . . .	3-2
3.3 CFAR-Zieldetektor . . . . .	3-4
3.4 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen radartypischer Zufallssignale	3-5
3.5 Einzelpulsentdeckung . . . . .	3-10
3.6 Wahl der Falschalarmwahrscheinlichkeit . . . . .	3-12
3.7 Zielfluktuation . . . . .	3-14
3.8 Die 4 Zielmodelle nach Swerling . . . . .	3-17
3.9 Frequenz-Agilität und Frequenz-Diversity . . . . .	3-18
3.10 Entdeckung nach kohärenter Integration . . . . .	3-20
3.11 Entdeckung nach nichtkohärenter Integration . . . . .	3-21
3.12 Entdeckung nach binärer Integration . . . . .	3-34
Literaturverzeichnis . . . . .	3-40

<b>4 Referenzradar und Verlustbilanz</b>	<b>4-1</b>
4.1 Übersicht . . . . .	4-1
4.2 Referenzradar . . . . .	4-1
4.3 Verlustbilanz . . . . .	4-5
4.4 Zielverweilzeit . . . . .	4-10
4.5 Beispiel eines Radarentwurfs . . . . .	4-12
4.6 Formelsammlung . . . . .	4-19
Literaturverzeichnis . . . . .	4-22
<b>5 Grundlagen der Filterung von Radarsignalen</b>	<b>5-1</b>
5.1 Übersicht . . . . .	5-1
5.2 Die Spektren von Radarechos . . . . .	5-2
5.3 Filterung von Einzelpuls und Pulsfolge . . . . .	5-10
5.4 Tiefpassfilterung von Bandpaßsignalen . . . . .	5-14
5.5 Radarkopf und Sendesignalaufbereitung . . . . .	5-22
5.6 Allgemeine Struktur der kohärenten Radarsignalverarbeitung . . . . .	5-27
5.7 Fehler und Verluste bei der I/Q- und A/D-Umsetzung . . . . .	5-32
Literaturverzeichnis . . . . .	5-40
<b>6 Matched Filter, Likelihood Ratio Filter und Prewhitening Filter</b>	<b>6-1</b>
6.1 Übersicht . . . . .	6-1
6.2 Matched Filter für Einzelpuls bei weißem Störsignal . . . . .	6-2
6.3 Beispiele für Einzelpuls-Matched Filter . . . . .	6-7
6.4 Das Matched Filter als Korrelator . . . . .	6-13
6.5 Matched Filter für farbige Störsignale . . . . .	6-15
6.6 Matched Filter für eine Pulsfolge bei weißem Störsignal . . . . .	6-18
6.7 Likelihood Ratio Filter . . . . .	6-23
6.8 Numerische Berechnung von Operationen mit komplexen Matrizen und Vektoren . . . . .	6-31
6.9 Vergleich von Matched Filter und Likelihood Ratio Filter . . . . .	6-34
6.10 Prewhitening Filter für eine Pulsfolge . . . . .	6-36
Literaturverzeichnis . . . . .	6-39
<b>7 Dopplerverarbeitung</b>	<b>7-1</b>
7.1 Übersicht . . . . .	7-1
7.2 Das MTI-Prinzip . . . . .	7-2
7.3 Klassifizierung der Dopplerverarbeitung . . . . .	7-4
7.4 Clutter-Eigenschaften . . . . .	7-6

7.5	Kenngrößen der Dopplerverarbeitung . . . . .	7-10
7.6	MTI-Radar . . . . .	7-20
7.7	PRF-Staffelung bei MTI-Radaren . . . . .	7-29
7.8	Improvementfaktor-Bilanz und SCV eines MTI-Radars . . . . .	7-44
7.9	Das MTD-Radar oder Pulsdoppler-Radar . . . . .	7-46
7.10	Dopplerfilterbank mit komplexen FIR-Filtern . . . . .	7-52
7.11	Dopplerfilterbank mit FFT (DFT) . . . . .	7-67
7.12	SIR-Improvement-Bilanz und SCV eines MTD-Radars . . . . .	7-71
7.13	Auswirkungen von Geräteinstabilitäten . . . . .	7-78
	Literaturverzeichnis . . . . .	7-91
<b>8</b>	<b>Pulskompression</b>	<b>8-1</b>
8.1	Übersicht . . . . .	8-1
8.2	Allgemeine Aspekte der Pulskompression . . . . .	8-2
8.3	Die Ambiguity-Funktion . . . . .	8-6
8.4	Lineare Frequenzmodulation . . . . .	8-10
8.5	Nichtlineare Frequenzmodulation . . . . .	8-16
8.6	Biphasenmodulation . . . . .	8-23
8.7	Polyphasenmodulation . . . . .	8-28
8.8	Ein allgemeines Verfahren zur Nebenkeulen-Reduktion . . . . .	8-34
8.9	Realisierungsmöglichkeiten . . . . .	8-39
	Literaturverzeichnis . . . . .	8-48
<b>9</b>	<b>CFAR-Methoden</b>	<b>9-1</b>
9.1	Übersicht . . . . .	9-1
9.2	Cell-Averaging-CFAR (CA-CFAR) . . . . .	9-2
9.3	Ordered Statistic-CFAR (OS-CFAR) . . . . .	9-8
9.4	Eine Näherungsformel für den CFAR-Verlust der CA-CFAR und OS-CFAR . . . . .	9-15
9.5	CFAR-Methoden bei Boden-Restclutter . . . . .	9-17
9.6	Zusammenschaltung verschiedener CFAR-Schwellen . . . . .	9-24
9.7	Unterdrückung von Straßenverkehrsechos . . . . .	9-25
9.8	Unterdrückung von Angelclutter . . . . .	9-26
	Literaturverzeichnis . . . . .	9-27
<b>10</b>	<b>Parameterschätzung</b>	<b>10-1</b>
10.1	Übersicht . . . . .	10-1
10.2	Grundlagen der Parameterschätzung . . . . .	10-2
10.3	Rauschbedingte Fehler bei der Entfernungsmessung . . . . .	10-4

10.4	Rauschbedingte Fehler bei der Winkelmessung . . . . .	10-10
10.5	Rauschbedingte Fehler bei der Dopplermessung . . . . .	10-12
10.6	Reduktion oder Auflösung von Mehrdeutigkeiten . . . . .	10-15
10.7	Meßfehler durch Glint und Szintillation . . . . .	10-17
10.8	Begrenzung der Azimutmeßgenauigkeit durch Szintillation (Fluktuation) . . . . .	10-20
10.9	Beispiel zur Parameterschätzung: MTD-Radar . . . . .	10-20
10.10	Zielauflösung . . . . .	10-23
	Literaturverzeichnis . . . . .	10-24

**Anhang:**

<b>A</b>	<b>Determinierte Signale und lineare Systeme</b>	<b>A-1</b>
A.1	Übersicht . . . . .	A-1
A.2	Fourier-Reihe in reeller Schreibweise . . . . .	A-2
A.3	Komplexe Darstellung von Sinussignalen . . . . .	A-4
A.4	Fourier-Reihe in komplexer Schreibweise . . . . .	A-6
A.5	Fourier-Transformation . . . . .	A-7
A.6	Dirac-Impuls oder Dirac-Stoß . . . . .	A-13
A.7	Kontinuierliche lineare Systeme . . . . .	A-16
A.8	Das Faltungsintegral . . . . .	A-20
A.9	Laplace-Transformation . . . . .	A-26
A.10	Die beiden Abtasttheoreme . . . . .	A-28
A.11	Diskrete Systeme und z-Transformation . . . . .	A-34
A.12	Diskrete Fourier-Transformation (DFT) . . . . .	A-47
A.13	Diskrete Faltung . . . . .	A-55
A.14	Korrelation determinierter Signale . . . . .	A-69
A.15	Formelsammlung . . . . .	A-82
	Literaturverzeichnis . . . . .	A-92
<b>B</b>	<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>B-1</b>
B.1	Liste der wichtigsten Formelzeichen . . . . .	B-1
B.2	Abkürzungen und Begriffe . . . . .	B-7

**Sachwortverzeichnis**