

Norbert Schuster, Valentin G. Kolobrodov

Infrarotthermographie

Zweite, überarbeitete und erweiterte Ausgabe



WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Inhaltsverzeichnis

1	Technische Besonderheiten der Wärmebildtechnik	12
1.1	Radiometrische Kette	13
1.2	Prinzipien der räumlichen Abtastung	14
1.3	Historische Fakten zur Thermographie	16
2	Mathematische Grundlagen zur Beschreibung der Signalverarbeitung	19
2.1	Frequenzanalyse determinierter Signale	19
2.1.1	Fraunhofersche Beugung	22
2.1.2	Normiertes Beugungsbild PSF	25
2.1.3	Übertragungsfunktion MTF	27
2.2	Beschreibung nichtdeterminierter Signale	28
2.3	Lineare Systeme	33
2.3.1	Faltung	33
2.3.2	Übertragungsfunktion	35
2.3.3	Rauschsignale	37
2.4	Zeitliche und räumliche Abtastung	38
2.5	Berechnungsbeispiele	42
3	Eigenstrahlung von Objekt und Hintergrund	50
3.1	Energetische und photometrische Größen	50
3.2	Strahlungsausbreitung	53
3.3	Energiebilanz des Strahlungstransportes	56
3.4	Strahlungsgesetze des Schwarzen Körpers	58
3.5	Eigenstrahlung realer Körper	61
3.5.1	Emissionsgrade realer Körper	62
3.5.2	Berechnung der Eigenstrahlung	65
3.5.3	Störquellen und thermischer Hintergrund	67
3.5.4	Thermische Auflösung und Strahlungscontrast	68
3.6	Berechnungsbeispiele	72
4	Atmosphärische Transmission	78
4.1	Berechnung der Transmission infolge des in der Luft gelösten Wasserdampfes	80
4.2	Berechnung der Transmission infolge des in der Luft vorhandenen Kohlendioxids	83
4.3	Atmosphärische Fenster	85
4.4	Berechnung des Transmissionsgrads infolge Streuung aus der Sichtweite	88

4.5	Berechnungsbeispiele.....	90
5	Optische Systeme.....	95
5.1	Thermographische Abbildung.....	95
5.1.1	Abbildungsbeziehungen.....	95
5.1.2	Thermische Auflösung.....	98
5.1.3	Räumliches Auflösungsvermögen.....	100
5.1.4	Räumliche Abtastung.....	104
5.2	Infrarotoptische Materialien.....	106
5.2.1	Linsenmaterialien.....	106
5.2.2	Antireflexbeläge.....	110
5.2.3	Spiegelmaterialien.....	112
5.3	Optomechanische Abtastung.....	113
5.3.1	Abtastung mit Planspiegel.....	114
5.3.2	Abtastung mit Spiegelpolygon.....	115
5.3.3	Abtastung durch Polygonprismen.....	118
5.3.4	Abtastung durch Drehkeilpaar.....	120
5.4	Konzipierung des optischen Systems.....	121
5.4.1	Sicherung der thermischen und räumlichen Auflösung.....	121
5.4.2	Erfasstes Bildfeld FOV (field of view).....	124
5.4.3	Berechnung der IR-Optiken.....	126
5.5	Ausführungsformen.....	129
5.5.1	Linsenoptiken.....	129
5.5.2	Spiegeloptiken.....	130
5.5.3	Kepler-Vorsätze.....	131
5.5.4	Makro- und Mikrothermographie.....	132
5.5.5	Approximation der Modulationsübertragungsfunktion.....	133
5.6	Berechnungsbeispiele.....	137
5.7	Aufgaben zur selbständigen Lösung.....	150
6	Infrarotstrahlungsempfänger.....	155
6.1	Empfängerkenngrößen.....	155
6.1.1	Empfindlichkeit (responsivity, sensibilité).....	155
6.1.2	Detektivität (detectivity, detectivité).....	158
6.1.3	Kleinste auflösbare Bestrahlungsstärkedifferenz.....	161
6.1.4	Modulationsübertragungsfunktion.....	161
6.2	Thermische Empfänger.....	163
6.2.1	Arten thermischer Eielementempfänger.....	164
6.2.2	Pyroelektrisches Vidikon.....	167
6.2.3	Thermische Empfängerarrays.....	172
6.3	Quantenempfänger.....	174
6.3.1	Grundlegende Eigenschaften.....	174
6.3.2	Funktionsprinzipien von IR-Quantenempfängern.....	176

6.3.3	Ausführungsformen.....	179
6.4	Empfängerkühlung.....	183
6.4.1	Flüssiggaskühlung.....	184
6.4.2	Joule-Thomson-Kühlung.....	185
6.4.3	Thermoelektrische Kühlung.....	186
6.4.4	Stirling-Kühler.....	188
6.5	Berechnungsbeispiele.....	190
7	Signalverarbeitung	198
7.1	Elektrisches Signal am Empfängerausgang.....	198
7.2	Einstellung und Korrektur der Temperaturskala auf analogem Wege	200
7.3	Möglichkeiten der digitalen Bildbearbeitung.....	202
7.4	Abtastung und Rauschbandbreite	204
7.4.1	Abtastung mit Einelementempfängern.....	204
7.4.2	Abtastung mit Zeilenempfängern.....	205
7.4.3	Bildaufnahme mit Matrixempfängern.....	207
7.5	Berechnungsbeispiele.....	208
8	Anzeigeeinheiten.....	216
8.1	Charakteristika für Anzeigen.....	216
8.1.1	Größe und Auflösung.....	216
8.1.2	Lichttechnische Größen	218
8.1.3	Farbwiedergabe	218
8.2	Elektronenstrahlröhre.....	221
8.3	Flüssigkristallanzeigen.....	223
8.4	Plasma-Bildschirme	225
9	Gesetze der visuellen Wahrnehmung.....	228
9.1	Grundlegende Eigenschaften des Auges.....	228
9.1.1	Aufbau und Bildentstehung.....	229
9.1.2	Photometrische Eigenschaften.....	232
9.1.3	Geometrisch-optische Eigenschaften.....	234
9.2	Übertragungseigenschaften des menschlichen Auges	235
9.3	Integrierende Wirkung des Auges	238
9.3.1	Zeitkonstante des Auges.....	238
9.3.2	Räumliche Integration.....	239
9.3.3	Flimmern der angezeigten Szene.....	241
9.4	Wahrnehmung des thermographischen Bildes	242
9.4.1	Reaktionen bei der Objektwahrnehmung.....	242
9.4.2	Referenzobjekte	243
9.4.3	Entdeckungswahrscheinlichkeit	244
9.4.4	Erkennungswahrscheinlichkeit	246
9.5	Berechnungsbeispiele.....	247

10	Bewertungskriterien für Wärmebildsysteme	253
10.1	Auswahl des spektralen Arbeitsgebietes	253
10.2	Übertragungsfunktion	254
10.3	Rauschbegrenzte thermische Auflösung	257
10.4	Verbindung von räumlicher und thermischer Auflösung	259
10.4.1	Ableitung der MDTD-Beziehung	259
10.4.2	Minimal auflösbare Temperaturdifferenz MRTD	264
10.5	Reichweite von Wärmebildsystemen	267
10.5.1	Rauschäquivalente Reichweite NER	268
10.5.2	Entdeckungsreichweite unter Berücksichtigung der Integration durch das Auge MDR_1	269
10.5.3	Entdeckungsreichweite unter Berücksichtigung der Kontrastempfindung MDR_2	271
10.5.4	Erkennungsreichweite MRR	273
10.6	Berechnungsbeispiele	274
10.7	Aufgaben zur selbständigen Lösung	285
11	Prüfung von Wärmebildsystemen	288
11.1	Messung des Videosignals	289
11.1.1	Signalübertragungsfunktion	290
11.1.2	Rauschsignal	291
11.1.3	Rauschäquivalente Temperaturdifferenz	292
11.2	Messung der Modulationsübertragungsfunktion	294
11.3	Objektive MRTD- und MDTD-Messung	295
11.4	Weiterentwicklung von Messmöglichkeiten	298
12	Anwendungen	300
12.1	Pyrometrie	300
12.1.1	Messproblem	301
12.1.2	Schmalbandige Messung	302
12.1.3	Eliminierung des Emissionsgrades	304
12.1.4	Breitbandige Messung	306
12.2	Thermographische Diagnose	306
12.2.1	Bauthermographie	315
12.2.2	Medizinthermographie	316
12.2.3	Vorbeugende Instandhaltung	318
12.2.4	Lock-in-Thermographie	319
12.2.5	Kombination von visuellen Bildern und Thermogrammen	320
12.3	Temperaturkontrolle in technologischen Prozessen	321
12.4	Sicherheits- und Militärtechnik	323
12.4.1	Objekt- und Brandschutz	323
12.4.2	Passive Aufklärung	326
12.4.3	Passive Fernerkundung	328
12.4.4	Zielverfolgung	329
12.5	Berechnungsbeispiele	331

13	Entwicklungstendenzen.....	336
13.1	Sichtgeräte.....	336
13.2	Messkameras.....	338
13.3	High-Speed-IR-Kameras.....	340
13.4	Systeme mit großer Reichweite.....	340
	Verwendete Formelzeichen.....	342
	Literaturverzeichnis.....	346
	Sachwortverzeichnis.....	352