

レーダの基礎

— 探査レーダから合成開口レーダまで —

大内 和夫 編著

平木 直哉

木寺 正平

松田 庄司

小菅 義夫 共著

小林 文明

松波 勲

佐藤 源之

コロナ社

はじめに

近年のレーダのハードウェアとソフトウェアの発展にはめざましいものがあり、従来の探査・追尾レーダから最新の各種レーダに関する多くの研究成果が発表され、新技術が開発・運用されてきている。同時に、レーダ技術に関する優れた専門書も出版されてきた。一方、解説書の多くは比較的専門性の高い内容で、理解するには高度な知識が必要とされている。このような背景のもと、基礎知識を含めたレーダの最新技術を入門者にも理解できるような解説書が必要と考えて監修・執筆したのが本書である。限られたスペースでの詳細な数式の導出と説明は困難であることから、数学的記述には必要最小限の数式を使用した。本書でカバーできない、より高度で詳細なレーダ技術の解説と送受信機や関連装置などのハードウェアに関しては本文中に引用した参考文献と専門書を参照することをお勧めする。

本書の1章から4章まではレーダの基礎を中心に解説し、5章から9章で最新のレーダ技術について述べる。1章の序論では、レーダの歴史と電磁波およびレーダの種類などを解説し、2章ではレーダの基礎となるレーダ方程式とマイクロ波の散乱特性、および近年注目を浴びているステルス技術を紹介する。実際のレーダ受信信号にはクラッタと呼ばれるターゲット以外からのノイズが含まれており、ターゲット検出にはランダムに分布しているクラッタの統計的分布を理解する必要がある。3章では、このようなクラッタとターゲット検出に利用される一定誤警報率について解説し、4章で送受信信号のアナログ処理とデジタル処理によるレーダ信号処理を説明する。5章から9章は、それぞれ、最新の探査・追尾レーダと気象レーダ、発展のめざましい車載レーダ、画像レーダで多岐の分野で活躍している合成開口レーダ、および土木建築と地質調査、さらには地雷探査や埋没遺跡探査等に利用されている地中レーダの原理

と応用について解説する。

本書の各章はレーダにおけるそれぞれの分野の第一人者によるものであるが、独立した章の集まりとするのではなく、統一した内容とすることを心がけた。しかし、本書では電磁波、レーダの基礎から異なる種類のレーダまでを取り扱っており、数式のパラメータには各分野で従来から使われて定着している英文呼称がある。このような多岐の分野においてパラメータを限られた数のアルファベットで統一することは困難であることから、章によって同じ英文字とギリシャ文字が異なる内容を記述する場合もある。そのため適時に必要な定義を加えてある。本書がレーダの入門者を始めとする研究者の参考になれば幸いである。

本書の完成までには多くの方々の協力があつた。特にコロナ社には構想から出版までの長期間にわたり多大なご尽力をいただいた。レーダ画像や資料を提供していただいた方々には、それぞれ該当する箇所での提供の旨を表示しているが、ここにあらためて感謝の意を表する次第である。

2017年1月

大内 和夫

目 次

1. 序論：レーダの概要

1.1	電磁波スペクトル	1
1.2	レーダの原理と定義	4
1.2.1	パルスレーダ	4
1.2.2	最大探知レンジ	5
1.2.3	分解能	6
1.2.4	チャープ信号とパルス圧縮技術	7
1.3	レーダ小史	10
1.3.1	黎明期（19世紀後半～1920年代）	10
1.3.2	発展期（1930年代～1940年代半ば）	11
1.3.3	最盛期（1940年代半ば～）	12
1.3.4	搜索レーダ	13
1.3.5	追尾レーダ	15
1.3.6	アクティブフェーズドアレイレーダ	16
1.3.7	気象レーダ	16
1.3.8	車載レーダ	17
1.3.9	合成開口レーダと逆合成開口レーダ	18
1.3.10	地中レーダ	19
1.4	おもなレーダの種類と応用	20
1.4.1	搜索レーダ	20
1.4.2	追尾レーダ	22
1.4.3	気象レーダ	23
1.4.4	車載レーダ	25
1.4.5	サイドルッキング機上レーダ	25
1.4.6	合成開口レーダ	28

1.4.7 地中レーダ	28
1.4.8 その他のレーダ	29

2. レーダ方程式とマイクロ波の散乱

2.1 電磁波の基礎知識	31
2.1.1 横波と平面波	31
2.1.2 偏波特性	33
2.1.3 マイクロ波の減衰と反射係数	34
2.2 レーダ方程式	41
2.2.1 レーダ方程式とレーダレンジ方程式	41
2.2.2 最大探知距離とパルス反復周波数	45
2.2.3 規格化レーダ断面積	47
2.2.4 マイクロ波の散乱とレーダ断面積	48
2.3 アンテナと電波反射鏡	52
2.3.1 アンテナ	52
2.3.2 電波反射鏡	55
2.4 ステルス技術と電波吸収技術	56
2.4.1 形状制御技術	57
2.4.2 電波吸収技術	58

3. レーダクラッタ

3.1 レーダクラッタと統計的性質	62
3.1.1 レーダクラッタとターゲット	62
3.1.2 統計的記述の基礎知識	63
3.2 クラッタと確率密度関数	65
3.2.1 正規分布	65
3.2.2 レイリー分布	67
3.2.3 対数正規分布	70

3.2.4	ワイブル分布	71
3.2.5	ガンマ分布	72
3.2.6	K -分布	73
3.2.7	確率密度関数と対象物	74
3.3	確率密度関数の選定：AIC	75
3.3.1	最尤推定値	76
3.3.2	K-L 情報量	77
3.3.3	赤池情報量基準：AIC	77
3.3.4	AIC の例	79
3.4	ターゲット検出と一定誤警報率	81
3.4.1	誤警報確率と検出確率	81
3.4.2	一定誤警報確率：CFAR	82
3.4.3	Log-CFAR	83
3.4.4	Linear-CFAR	86
3.4.5	対数正規-CFAR	88
3.4.6	CFAR 損出	88
3.4.7	その他の CA-CFAR	89
3.4.8	ノンパラメトリック CFAR	90
3.4.9	画像レーダデータの CFAR 処理	91

4. レーダ信号処理

4.1	信号の変復調	93
4.1.1	複素表現	93
4.1.2	AM 変復調	94
4.1.3	FM 変復調	95
4.2	フーリエ解析	96
4.2.1	フーリエ変換	97
4.2.2	パワースペクトル解析	98
4.2.3	解析信号	101
4.2.4	超関数のフーリエ変換	102

4.3	フィルタ処理	105
4.3.1	白色性雑音	105
4.3.2	整合フィルタ	105
4.3.3	逆フィルタ	108
4.3.4	Wiener フィルタ	109
4.4	デジタル信号処理	111
4.4.1	信号の離散化	111
4.4.2	信号の復元	114
4.4.3	離散フーリエ変換 (DFT)	116
4.4.4	高速フーリエ変換 (FFT)	120

5. 搜索・追尾レーダ

5.1	搜索レーダ	122
5.1.1	搜索レーダの概要	122
5.1.2	搜索レーダの構成	123
5.1.3	レーダ覆域	127
5.1.4	目標検出処理	131
5.2	追尾処理	135
5.2.1	追尾処理の概要	135
5.2.2	追尾レーダ	136
5.2.3	単一目標追尾と多目標追尾	138
5.2.4	座標系	140
5.2.5	干渉形フィルタと非干渉形フィルタ	141
5.2.6	代表的な非干渉形フィルタ	142
5.2.7	代表的な干渉形フィルタ	146
5.2.8	ベイズ推定手法による多目標追尾法	147

6. 気象レーダ

6.1	気象レーダの概要と特徴	153
-----	-------------	-----

6.1.1	日本の気象レーダの歴史	153
6.1.2	気象レーダの種類	154
6.1.3	気象レーダで観えるもの	155
6.1.4	観測手法 (PPI, RHI, CAPPI)	156
6.1.5	観測誤差要因	158
6.2	レーダによる降雨の観測	160
6.2.1	降水量の推定	160
6.2.2	降水のモデル	161
6.2.3	レーダ・アメダス合成雨量	163
6.2.4	特徴的なエコーパターン	163
6.2.5	二重偏波レーダ	164
6.2.6	わが国における二重偏波レーダを用いた観測	165
6.3	ドップラーレーダによる大気の観測	167
6.3.1	ドップラーレーダの原理	167
6.3.2	ドップラーレーダによる風観測	167
6.3.3	ドップラー速度場のパターン	168
6.3.4	具体的な観測例 (竜巻やダウンバースト)	170
6.4	さまざまなレーダによる観測	173
6.4.1	ウィンドプロファイラ	173
6.4.2	ドップラーライダ	173
6.4.3	ドップラーソーダ	173
6.4.4	RASS レーダ	174
6.5	最新のレーダ観測技術	174
6.5.1	X-NET (X バンドレーダネットワーク)	174
6.5.2	雲レーダ	176
6.5.3	フェーズドアレイレーダ	177
6.5.4	レーダを用いた短時間予測 (ナウキャスト)	178

7. 車 載 レ ー ダ

7.1	車載レーダの概要と特徴	182
-----	-------------	-----

7.2 変調方式	184
7.2.1 FM-CW方式	184
7.2.2 2周波CW方式	186
7.2.3 相対速度ゼロおよび相対速度同一の複数ターゲット検知対策	188
7.3 クラッタの統計的性質	188
7.3.1 レンジプロファイル	188
7.3.2 クラッタの統計的性質	190
7.3.3 赤池情報量基準 (AIC) による分布検定	190
7.4 クラッタ抑圧	191
7.4.1 レンジプロファイル	191
7.4.2 パルス積分による信号電力対クラッタ電力比 (SCR)	193
7.4.3 パラメトリック CFAR とパルス積分によるクラッタ抑圧	194
7.4.4 荷重パルス積分法	195
7.5 目標物検知・識別	198
7.5.1 ハフ変換による複数移動目標物検知	199
7.6 今後の課題	201
7.6.1 レーダの近距離性能の向上	202
7.6.2 多様な環境での検知能力向上	202
7.6.3 他センタとの協調センシング	203
7.7 将来の車載レーダ	203

8. 合成開口レーダ

8.1 パルス圧縮技術	204
8.1.1 レンジ方向の分解能：パルス圧縮技術	204
8.1.2 点拡張関数と分解能の基準	207
8.2 合成開口レーダ	208
8.2.1 合成開口技術	209
8.2.2 移動体の画像	214
8.2.3 画像変調	216

8.2.4 観測モード	220
8.3 干渉合成開口レーダ	221
8.3.1 干渉 SAR の原理と複素インタフェログラム	221
8.3.2 地表標高の計測	223
8.3.3 地表高度変化の計測	224
8.3.4 InSAR データ処理の流れ	225
8.4 偏波合成開口レーダ	228
8.4.1 偏波情報と散乱行列	228
8.4.2 散乱成分の電力分解と固有値解析	230
8.5 将来の合成開口レーダ	232

9. 地 中 レ ー ダ

9.1 GPR の 原 理	234
9.1.1 地中の電磁波伝搬	234
9.1.2 電磁波の反射	235
9.2 岩石・地層の比誘電率	236
9.3 GPR 計 測	238
9.3.1 レーダシステムの性能評価	238
9.3.2 GPR システム	239
9.3.3 レーダ送信波形	240
9.3.4 受信波形	240
9.3.5 波形表示	242
9.4 計 測 手 法	243
9.4.1 アンテナ配置	243
9.4.2 誘電率分布測定	244
9.5 データ処理技術	245
9.5.1 地下構造とレーダ波形	245
9.5.2 信号処理	247
9.6 モ デ リ ン グ	252

9.6.1	波線追跡法	252
9.6.2	FDTD	253
9.7	応用	255
9.8	電磁波を用いた地下計測	258
9.9	将来の地中レーダ	259
	引用・参考文献	260
	索引	269

執筆分担

1～3章, 8章 大内和夫

1章 平木直哉

4章 木寺正平

5.1節 松田庄司

5.2節 小菅義夫

6章 小林文明

7章 松波 勲

9章 佐藤源之

1

序論：レーダの概要

レーダ (radar) は, “RADio Detection And Ranging” の文字からなる略語[†]で, アンテナから電波を放射して遠方のターゲット (一般的な意味での目標物または観測対象) を探知し距離・方位を計測, あるいはレーダ画像を生成する装置である。可視光と比べて非常に長い波長の電磁波を使うので, 雲や霧, さらにはある程度の雨や雪を透過してはるかに遠方の目標物を探査することが可能で, 太陽光を必要としないので夜間でも利用できるという特長を持っている。本章ではまず, ガンマ線から電波までの電磁波と一般的なレーダに利用されるマイクロ波の周波数帯と特徴を説明し, レーダの原理を解説する。つぎに, ヘルツによる電波実験から現在に至るまでのレーダの小史を要約した後, 本書で取り扱う搜索レーダと気象レーダ, 車載レーダ, 合成開口レーダおよび地中レーダを簡単に紹介する。

1.1 電磁波スペクトル

われわれが利用している電磁波には, 図 1.1 にあるように, 最も波長の短い高周波の γ 線からレントゲン撮影に使用される X 線, 非常に長い波長を持った低周波の電波が含まれる^{1), 2)}。ここで, 電磁波の波長 λ と周波数 f には $c = \lambda f$ の関係があり, $c = 3 \times 10^8$ [m/s] は電磁波の自由空間での速度である。周波数の単位は [1/s] で, 波動が 1 秒間に振動する回数を意味し, 一般的にはヘルツ [Hz] で表示される。電磁波は粒子と波動の性質を持ち, 高周波の γ 線や X 線は粒子として取り扱われ, 比較的低い周波数の光や電波は波動で表現される。電磁波のエネルギーは周波数に比例するので, γ 線などの放射線 1 個の粒子

[†] 1940 年に米国海軍によって使用された名称で, 英国では以前から RDF (Radio Detection Finding) という名称が使われていた。

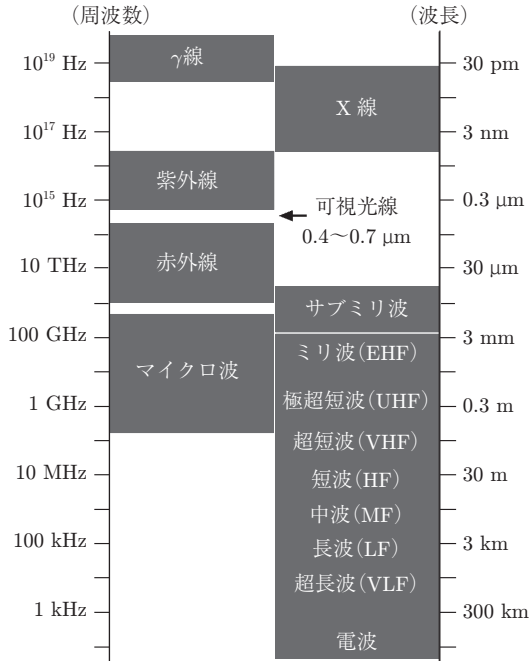


図 1.1 電磁波の周波数と波長およびバンド名^{†1}

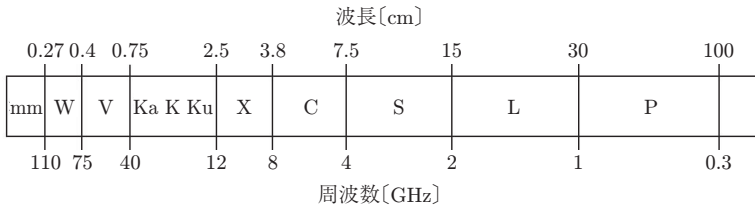
は生体の細胞を破壊するほどの膨大なエネルギーを持つが、低周波の電波が持つエネルギーは少なく生体への影響も少ない。3 THz^{†2} (波長 0.1 mm) 以下の周波数の電磁波は総称して電波と呼ばれ、一般的なレーダは 300 GHz (波長約 1 mm) から 0.3 GHz (波長 1 m) の周波数帯のマイクロ波を利用する。マイクロ波の低周波数帯とより低周波の電波を使ったレーダには、周波数約 50 MHz ~ 1 GHz (波長 6.0 ~ 0.3 m) の UHF から VHF 帯を利用した地中レーダ (ground penetrating radar, GPR) (9 章参照) と、HF 帯を使った地平線越えレーダ (over-the-horizon radar, OTHR) がある。地中レーダでは物質を透過する信号が必要なので、土壌への透過率の比較的大きい長波の電磁波を利用している (2 章参照)。また、一般的なレーダでは、地球の曲面のため最長の視野が地平線によって制限されており、より遠くのターゲットを地上から検出することが

^{†1} 電磁波の周波数帯の分類には学問・応用分野によって多少の違いがある。

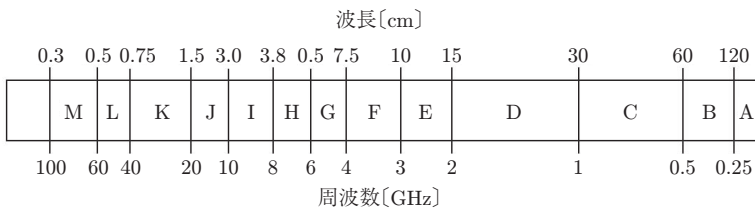
^{†2} 1 THz = 10^{12} Hz, 1 GHz = 10^9 Hz, 1 MHz = 10^6 Hz

困難である。OTHR では、HF 帯の電波が電離層によって反射される特性を利用して、地平線を超えた最も遠方で数千 km 先の航空機や船舶からの反射波を受信することでターゲット検出を行う。詳細は本書の範囲外であるが、OTHR には非常に大きなアレイアンテナを使い、ターゲットの移動による受信信号のドップラー周波数変化を利用している（ドップラーレーダに関しては 6 章参照）。

レーダに使われるマイクロ波は、図 1.2 にあるように、波長（周波数）ごとに細分化されている。IEEE Standard の例図 (a) では、波長の短いミリ波の中で 40~110 GHz 帯の周波数帯は、W と V バンドに分割され車載レーダや電波天文学の分野で使われており、周波数 40~12 GHz 帯のマイクロ波は波長の短い順から Ka, K, Ku バンドと呼ばれ、降雨レーダや衛星通信に広く利用されている。X バンドもよく使われているバンドの一つで、一般的な探査レーダを始め、合成開口レーダ（synthetic aperture radar, SAR）、ドップラー気象レーダ、通信などに利用されている。S と L および P バンドはおもに通信とテレビジョン放送などに利用されているが、一部の合成開口レーダにも使われている。また、前述したように P バンドから 1 GHz の周波数帯は地中レーダに利用さ



(a) IEEE standard



(b) NATO standard

図 1.2 マイクロ波の波長と周波数帯およびバンド名

れている。NATO standard ではより民間での利用目的として図 1.2 (b) のように分類されている。

1.2 レーダの原理と定義

1.2.1 パルスレーダ^{3)~6)}

レーダにはさまざまな種類があるが、最も一般的なレーダは、短いパルスを連続的に送信し同じアンテナで受信するパルスレーダである。図 1.3 にその原理を示す。まず、送信回路のマグネトロン^{†1)}や半導体回路を使って発生したマイクロ波を増幅し、指向性の鋭いアンテナを通して目標方向に向かって放射する。パルス放射後は送受信切替器がある一定時間だけ受信モードに切り替わる。図 1.3 で、照射内にあるターゲット A は入射波をあらゆる方向に再放射し、アンテナ方向に反射されたエコー^{†2)}電磁波がアンテナで受信される。受信後に送受信切替器が送信モードになりつぎのパルスを放射する。受信波のパワーは送信波と比べて非常に小さいため、送信時に大出力の信号が受信機に流入し受信回路を壊さないように、送受切替器には送受信経路を電気的に分離するデュプレクサ (duplexer) と呼ばれる分波器が使われる。

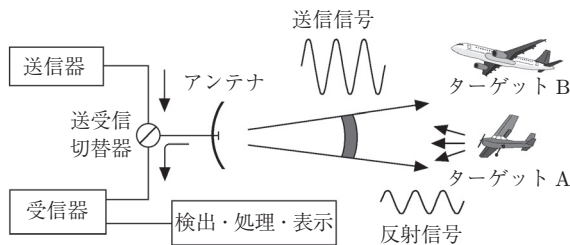


図 1.3 パルスレーダの原理

レーダはアンテナを回転しビーム方向を変化させながら、送信と受信のプロセスを繰り返す。ターゲットのアンテナとの距離は送信時刻と受信時刻から算

^{†1)} マイクロ波を発生する一種の真空管で電子レンジにも利用されている。

^{†2)} 受信信号はこだまのように帰ってくることから echo (エコー) とも呼ばれる。

出され、方位は回転アンテナの放射方向から推定される。図 1.3 の例では、アンテナの放射方向が変化するにつれ最初に照射されたターゲット A が照射圏外になり、ターゲット B が照射圏内に入ると B の距離と方位が同様に算出される。

より定量的には、電磁波の空気中での速度を $c(= 3 \times 10^8 \text{ m/s})$ 、パルス放射時刻とターゲットからの受信時刻との差、つまりパルス往復時間を τ_R とすると、ターゲットの距離は

$$R = \frac{c\tau_R}{2} \tag{1.1}$$

となる。距離 R は一般的にレンジ (range) あるいはレンジ距離と呼ばれる。

1.2.2 最大探知レンジ^{3)~6)}

図 1.4 にあるように、もしターゲット A がパルス 1 と 2 の時間帯の距離にあるとすると、ターゲット A の距離は式 (1.1) から測定できる。しかし、もしターゲット B がパルス 1 と 2 の時間帯に相当する距離に位置せず、より遠方の位置にあるとすると、ターゲット B の位置はパルス 2 の送信後に検知される。ターゲットの距離は送信時刻と受信時刻から算出されるので、ターゲット B の距離は間違った値となってしまう。この現象は、二次エコー (二次以降は多次の) 周

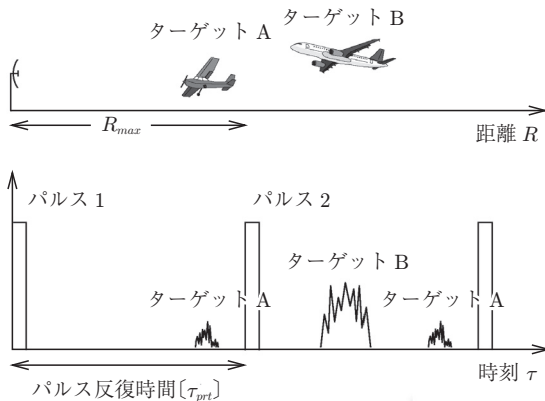


図 1.4 パルス反復時間 τ_{prt} と最大探知距離 R_{max} , および B の二次エコー

索引

【あ】	
赤池情報量基準	75, 77, 188, 190
アーククラウド	172
アクティブ電子走査アレイ	126
アジマス画像シフト	215
暖かい雨	161
霰（あられ）	154
アレイ型 GPR	256
アンサンブル平均	47, 64
アンテナ	52
【い】	
遺跡探査	233
位相アンラッピング	226
一定誤警報確率	82, 83
移動体の画像	214
インタフェロメトリック SAR	19
インパルスレーダ方式	240
【う】	
ウィーナー・ヒンチンの定理	100
ウィンドプロファイラ	173
ウェザークラッタ	63
雨 滴	154
【え】	
エイリアシング	112
エコー頂高度	178
エコー面積	179
エルゴード性	98
エンジェルエコー	63, 156

鉛直積算値	179
エントロピー	77, 231
円偏波	33
【お】	
オービスレーダ	30
【か】	
解析信号	101
海洋短波/超短波 (HF/VHF)	
レーダ	29
カイ 2 乗分布	133
確率密度関数	64, 65, 132
ガストフロント	170
画像変調	216
壁透過レーダ	30
カルマンフィルタ	146
干 渉	60, 159
干渉形フィルタ	141
干渉合成開口レーダ	221
観測雑音	135
観測モード	220
ガンマ分布	72
【き】	
規格化レーダ断面積	47
気象レーダ	16, 23, 153
北基準直交座標	140
逆合成開口レーダ	18
逆フィルタ	108
逆フーリエ変換	97, 212
強定常	99
極座標	140
距離ゲート	136

【く】	
空港気象ドップラーレーダ	168
空港面探知レーダ	22
駆動雑音	146
雲レーダ	154
クラッタ	62, 188-190
グランドクラッタ	63, 155
グランドレンジ	26, 130, 207
クーリー・チューキー	
アルゴリズム	120
【け】	
形状制御技術	57
ゲート	147
ゲート処理	139
検出確率	45, 81, 131
減衰係数	35
減衰率	234
【こ】	
降雨減衰	159
航空管制レーダ	14, 123
航空路監視レーダ	21
降水強度	160
降水粒子判別表	165
合成開口技術	27, 209
合成開口長	211
合成開口レーダ	18, 28, 208
航 跡	151, 219
航跡型 MHT	151
高速フーリエ変換	120, 126, 207
高密度環境	139
港湾監視レーダ	21

- 誤警報確率 44, 81, 132, 201
 コーシー・シュワルツの不等式 106
 コヒーレンス 223
 コモンオフセット測定 243
 固有値解析 231
 孤立離散時間系列 118
 コンボリューション 205, 213
- 【さ】**
 最小探知信号対雑音比 128, 132
 最大探知距離 5, 45, 46, 127
 最大反射強度 178
 サイドロッキング機上レーダ 25, 204
 最尤法 76
 差分干渉 SAR 224
 参照信号 7, 107, 205, 211
 サンプリング 111
 サンプリング定理 112
 サンプル (標本) 平均 64
 散乱行列 228
- 【し】**
 シーアイスクラッタ 63
 シークラッタ 63, 155
 自己相関関数 99
 自動周波数制御 124
 弱定常 99
 車載レーダ 17, 25, 182
 周期外エコー 5, 46
 収束 167
 周波数変調連続波 25
 循環推移定理 119
 準最適化 151
 瞬時周波数 101
 地雷検知 255
 地雷探査 233
 信号電力対クラッタ電力比 193
- 【す】**
 垂直偏波 33
- 垂直面覆域図 129
 水平偏波 33
 スキャンモード 220
 ステルス技術 56
 ストリップ (マップ) モード 220
 スネルの法則 252
 スーパーセル 163
 スーパーヘテロダイン 124
 スペクトル密度 100
 スポットライトモード 220
 スラントレンジ 26, 129, 205
- 【せ】**
 正規分布 65, 132
 整合フィルタ 105, 208
 晴天エコー 156
 絶対可積分 103
 雪片 154
 ゼロパディング 115
 線形最小 2 乗フィルタ 142
 船舶レーダ 13, 20
- 【そ】**
 相関処理 139, 205
 搜索レーダ 13, 20, 122
 送信デューティサイクル 128
 速度パターン 168
- 【た】**
 対象定理 119
 対象正規分布 70, 190
 対象正規-CFAR 88
 体積散乱 51
 ダウンパースト 164
 楕円偏波 33
 多仰角 PPI 156
 多重反射 51
 たたみ込み積分 98
 竜巻渦 170
 竜巻注意情報 168
 多目標追尾 138
 単一目標追尾 138
- 短距離レーダ 182
 探査距離 238
 短時間予測 174
- 【ち】**
 地球構成物質 236
 逐次決定型 150
 地形干渉縞 222
 地質調査 233
 地中レーダ 19, 28, 233
 地表高度変化の計測 224
 地表標高の計測 223
 チャープ信号 7, 28, 95
 チャープパルス 7, 205
 中間周波数 94, 124
 直接発振方式 123
 直線偏波 33, 54, 230
 直増幅方式 125
 直達波の除去 248
 直交検波 93
- 【つ】**
 追尾維持 139
 追尾開始 139
 追尾解除 140
 追尾フィルタ 135
 追尾レーダ 15, 22, 136
 津波被害 256
 冷たい雨 161
- 【て】**
 デジタル信号 111
 デジタルビームフォーミング 55, 123, 126, 232
 ディフラクション・スタッキング 250
 デシベル単位 48
 データレート 123
 データ割当 139
 デルタ関数 102
 点拡張関数 206
 電磁波スペクトル 1
 電磁波速度 234

電磁波の侵入深度 35
 電磁波の反射 235
 電波暗室 60
 電波吸収技術 58
 電波の異常伝搬 159
 電波反射鏡 55

【と】

透過係数 38
 冬季雷 165
 動径速度 167
 透磁率 234
 導電率 234
 土壌水分率 237
 ドップラー周波数3, 167, 212
 ドップラー速度 24, 167
 ドップラーソーダ 173
 ドップラー定数 211
 ドップラーライダー 173
 ドップラーレーダ 24, 167

【な】

ナイキスト条件 112
 内挿 115

【に】

二次エコー 6, 46
 二重偏波レーダ 164

【ね】

熱雑音 65

【の】

ノンパラメトリック CFAR.90

【は】

バイスタティック・レーダ41
 白色性雑音 105
 パーセバルの定理 97
 波線追跡法 252
 バタフライ演算 121
 発散 167
 ハフ変換 199

パラメトリック CFAR 83, 194
 パルス圧縮 7, 86, 95, 125, 127, 204
 パルス積分 193
 パルス反復周波数 45
 パルスレーダ 4, 108, 127, 176
 パワー・アバチャ積 129
 パワースペクトル 100
 反射因子差 165
 反射係数 38, 217, 235

【ひ】

非干渉形フィルタ 141
 電(ひょう) 154
 標準大気伝搬モデル 130
 標本化 111
 標本化定理 112
 表面散乱 51, 231

【ふ】

フェーズドアレイ 123, 125, 126
 フェーズドアレイアンテナ 23, 54, 126
 フェーズドアレイレーダ 16, 177
 フォアショートニング 217
 複素インタフェログラム 222
 富士山レーダ 154
 フックエコー 163
 ブライトバンド 159
 フーリエ変換 97, 208, 212
 ブリュースター角 39
 フレネルの反射係数 236
 プロファイラ 155
 プロファイル 189
 プロファイル測定 243
 分解能 6, 27, 28, 112, 185, 207, 238

【へ】

平面波 31, 52
 平面偏波 33
 偏光角 39
 偏波 31, 33, 54, 164, 228, 236
 偏波合成開口レーダ 228

【ほ】

ボウエコー 164
 包絡線 101
 包絡線検波 93
 ポラリメトリック SAR 19, 228
 ポリウムサーチ 123, 129
 ポリウムスキャン 156

【ま】

マイグレーション 245
 マイクロ波 3, 41, 122, 154
 マイクロ波の減衰 34
 埋設物検出 233
 マグネトロン 12, 123
 マーシャル・パルマー分布 162
 マルチ・スタックレーダ 257
 マルチセル 164
 マルチパラメータレーダ 24

【み】

ミー散乱 49

【め】

メソサイクロン 168

【も】

目標照射時間 128
 目標追尾 135
 目標捕捉 137
 モデリング 252

【や】

やくも 256

	【ゆ】	量子化誤差	112	レーダ反射因子	161
		量子化雑音	112	レーダ反射強度	154
誘電体	34	臨界角	37	レーダ覆域	122, 127
誘電率	234	リングング	240	レーダ方程式	41, 43, 127, 129, 161
誘電率の推定	249			レーダレンジ方程式	43
雪霰 (ゆきあられ)	158	【る】		レンジスキュー	209
		累積分布関数	66	レンジプロファイル	188
	【ら】			レンジマイグレーション	209
ランダウの記号	120	【れ】		【わ】	
		レイオーバー	217	ワイドアングル測定	243
	【り】	レイリー分布	67, 132	ワイブル分布	71, 190
離散フーリエ係数	117	レーダ・アメダス合成雨量	163		
離散フーリエ変換	116	レーダクラッタ	62		
量子化	111	レーダ小史	10		

	【A】		【C】	FM-CW	25, 95, 177, 184
A スキャン	241	C スキャン	242	foreshortening	217
ACC	182	C バンド	154, 224	frequency modulation	95
AGC	248	CAPPI	24, 156	frequency modulation- continuous wave	25, 95, 177
AGC 処理	249	CFAR	83	f-k フィルタリング	248
AIC	77, 190	CFAR 損出	88	【G】	
airport surface detection radar	22	chirp パルス	7	GPR	233
airport surveillance radar	21	CMP 測定	243	【H】	
air route surveillance radar	112	COHO	124, 125	Hilbert 変換	101
aliasing	112	common mid point 測定	243	【I】	
ALIS	255	constant altitude PPI	24	I チャネル	94
all neighbor 法	148	Cooley-Tukey アルゴリズム	120	【J】	
α - β フィルタ	144	【D】		Joint Probabilistic Data As- sociation	148
AM 変調	94	DBF	23, 55, 126	JPDA	148
amplitude modulation	94	DFT	116	【K】	
AN 法	148	digital beam forming	23, 55, 126	K-分布	73
ARSR	21	【F】		K-L 情報量	77
ASDR	22	FDTD	253		
ASR	21	FFT	120, 207		
【B】		FM 変調	95		
B スキャン	241	FM (frequency modulation)	7		

【L】
 layover 217
 Linear-CFAR 86
 Log-CFAR 83
 LOG/CFAR 195

【M】
 MHT 150
 moving target indicator 21
 MP レーダ 24, 176
 MTI 21, 155

【N】
 NMO 補正 244
 NN 法 139
 Normalized RCS 47
 normal moveout 補正 244
 NRCS 47
 Nyquist 条件 112

【P】
 PDA 147
 plane position indicator 156
 plan position indicator 12, 46

Pol-InSAR 19, 231
 PPI 156
 PPI スコープ 12
 probabilistic data associa-
 tion 147

【Q】

Q チャネル 94

【R】

RAM (radar absorbent
 material) 58
 range height indicator 156
 RASS 174
 RHI 156

【S】

SCR 193
 SEG-Y 247
 STALO 124, 125
 STC 248
 Stop アンド Go 250

【T】

TDR 245
 Topp の式 237

TWS 140

【U】

UAVSAR 232
 UWB 181

【W】

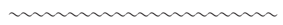
W バンド 154
 Wiener フィルタ 109

【X】

X バンド 154, 224
 XRAIN 176
 X-NET 174

【Z】

Z-R 関係 162



【数字】

2 周波 CW 方式 186, 188
 24 GHz/26 GHz 帯レーダ 182
 3 成分散乱パワー分解法 230

— 編著者略歴 —

大内 和夫 (おおうち かずお)

1976年 University of Southampton 物理学科卒業
1977年 Imperial Collage, University of London 大学院修士課程修了(物理学専攻)
1980年 Imperial Collage, University of London 大学院博士課程修了(物理学専攻)
1980年 Imperial Collage, University of London 助手
1981年 Doctor of Philosophy(理学博士)(University of London)
1982年 Queen Elizabeth Collage, University of London 研究員
1984年 King's Collage, University of London 主任研究員
1992年 Imperial Collage, University of London 特別研究員
1996年 広島工業大学教授
1999年 高知工科大学教授
2006年 防衛大学校教授
2013年 韓国海洋科学技術院 Brain Pool Program 研究員
2015年 株式会社IHI航空宇宙事業本部勤務
現在に至る

— 著者略歴 —

平木 直哉 (ひらき なおや)

1987年 日本大学生産工学部電気工学科卒業
1989年 日本大学大学院生産工学研究科博士前期課程修了(電気工学専攻)
1989年 日本無線株式会社勤務
現在に至る

松田 庄司 (まつだ しょうじ)

1976年 京都大学工学部電気工学第2学科卒業
1978年 京都大学院工学研究科修士課程修了(電子工学専攻)
2006年 京都大学院情報学研究科博士後期課程修了(通信情報システム専攻)博士(情報学)(京都大学)
1985年 三菱電機株式会社勤務
現在に至る

小林 文明 (こばやし ふみあき)

1984年 北海道大学理学部地球物理学科卒業
1986年 北海道大学大学院理学研究科博士前期課程修了(地球物理学専攻)
1991年 北海道大学大学院理学研究科博士後期課程修了(地球物理学専攻)理学博士
1991年 防衛大学校助手
1995年 防衛大学校講師
1997年 防衛大学校助教授
2011年 防衛大学校教授
現在に至る

佐藤 源之 (さとう もとゆき)

1980年 東北大学工学部通信工学科卒業
1985年 東北大学大学院工学研究科博士課程修了(情報工学専攻)工学博士
1985年 東北大学助手
1990年 東北大学助教授
1997年 東北大学教授
現在に至る

木寺 正平 (きでら しょうへい)

2003年 京都大学工学部電気電子工学科卒業
2005年 京都大学大学院情報学研究科修士課程修了(通信情報システム専攻)
2007年 京都大学大学院情報学研究科博士後期課程修了(通信情報システム専攻)博士(情報学)(京都大学)
2009年 電気通信大学大学院助教
2014年 電気通信大学大学院准教授
現在に至る

小菅 義夫 (こすげ よしお)

1972年 早稲田大学理工学部数学科卒業
1974年 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了(数学専攻)
1974年~2004年 三菱電機株式会社勤務
1997年 博士(工学)(東北大学)
2004年 長崎大学教授
2014年 電子航法研究所研究員
電気通信大学特任教授
現在に至る

松波 勲 (まつなみ いさむ)

2005年 北九州市立大学国際環境工学部情報メディア工学科卒業
2007年 北九州市立大学大学院国際環境工学研究科博士前期課程修了(情報工学専攻)
2008年 日本学術振興会特別研究員DC2
2010年 北九州市立大学大学院国際環境工学研究科博士後期課程修了博士(工学)
2010年 長崎大学助教
2010年 電子航法研究所客員研究員(兼任)
2013年 北九州市立大学准教授
現在に至る

レーダの基礎 ——探査レーダから合成開口レーダまで——

Principles of Radar ——From probing radar to SAR——

© Kazuo Ouchi 2017

2017年3月3日 初版第1刷発行

★

検印省略

編著者 大内和夫
著者 平木直哉
木寺正平
松田庄司
小菅義夫
小林文明
松波勲
佐藤源之
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 三美印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00894-4 (森岡) (製本:愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします