

レーダシステムの基礎理論

伊藤 信一 著

コロナ社

推薦のことば

我々の身近なところで広く日常的に用いられていながら、その動作原理などは必ずしもよく知られていないという技術がしばしば散見される。本書で取り扱う「レーダシステム」もその一つであろう。レーダは75年ほど前の第二次世界大戦を契機に開発されたが、この種の搜索レーダに限っても現代社会では「自動車レーダ」, 「気象レーダ」, 「ロケット追尾レーダ」, 「船舶レーダ」などに広く使われている。

さて、最も伝搬速度が速く、発生も受信も容易でとても便利な電磁波という「波動」は、次の二つの分野で広く用いられている。

- 1) 情報伝送（通信，放送）
- 2) 測距（レーダ）

1) の分野は携帯電話や地デジ放送などでなじみ深い。

一方、本書のテーマは2) の分野であり、波動が持っている「測距性」の活用である。本書では、どのようにして波動の「測距性」を実現していくかということが基礎に立ち返って丁寧に説明されている。

著者の伊藤信一氏は長年にわたってレーダシステムの研究開発に従事してきた技術者であり、現役を退いてからも電波技術の探究を続けている大ベテランである。本書には、至るところに著者の国内外での長年の経験に裏打ちされたレーダシステムに対する貴重な見方が反映されている。

私は、まず著者の12章にも及ぶ本書執筆にかける熱意と努力に対して敬服の念を表明しないわけにはいかない。どこからあの^{ほとばし}進るような熱意が生まれたのであろうか。勝手な推測ではあるが、現状の日本におけるレーダ技術に対しての危機感があるのではないだろうか。日本に借り物でない真の意味でのレーダ技術、そしてレーダ技術者が育ってほしいという思いであろう。さらにいえば、さまざまな技術およびその技術者を大切にする社会の実現をつねに願っておられるのであろう。

私はどのような技術であっても、自分の頭で考え自分の手を動かしてみ、初めて自分の言葉でその技術を語ることができると信じている。

本書は、まさに著者の言葉で語られた本来の意味での本邦初の「レーダシステムの基礎理論」というべきものであると確信している。

2015年9月

東京工業大学名誉教授

荒木 純道

まえがき

レーダが前大戦で活用され始めてから約75年が経ち、この間に米国では数多くのレーダ技術専門書が出版されてきた。それらの書籍は、搜索レーダから最新の応用に特化したレーダまでを対象に、動作理論からハードウェア設計までの広い技術範囲をカバーしている。

このように多くのレーダ技術書がすでに存在する現在、今回さらに1冊のレーダ技術書を著す目的は、高度なレーダシステムで採用されている基本技術の動作に関し、数式的かつ物理的な意味の本質をレーダの開発設計に携わっている技術者に伝えることにある。こう考える背景には、製造会社においてレーダの開発設計に長年携わってきた著者自身の技術者としての経験があり、現役時代には十分に追求しきれなかった動作原理の本質的理解の必要性を当時から強く感じていたからである。このような思いは、実務を終了した戦後第一～二世代のレーダ技術者に広く当てはまるのではないかと思う。

一方、多くの専門書の中には、開発設計技術者にとっては、その必要性を越える詳細な数学的解析を扱った書籍から測定データや設計データを豊富に載せた書籍まで幅広くそろっているが、基本的なレーダシステム技術の本質を実務技術者が必要と考えるレベルで整理してまとめた書籍はほとんど見当たらない。この事情は、国内の数えるほどしかないレーダ技術書にも当てはまるから、適切な参考書があれば、レーダ技術者や学習者にとって大きな時間の節約となるばかりでなく、技術の理解を深めて次の開発に生かすことができるのは確かであろう。

また、レーダの動作は自然現象との関わり合いに基づく部分が多く、自己完結的であり、標準化による技術的制約もほとんどないことから、デジタル時代となって実現手段が変わったとしても、レーダ動作の本質は変わることはない。

以上の考えに基づいて、本書ではレーダの基本形である搜索レーダについて、その主要機能である目標の探知技術を中心に、搜索レーダシステムの基礎

的理論とその物理的意味に重点を置いて解説する。特に、その本質を見落としがちな基礎的動作理論として本書で取り上げる理論は次のとおりである。

- ① 受信系におけるフィルタが目標検出性能へ与える効果（通常の帯域フィルタと下記③項のマッチドフィルタとの差異）
- ② 複数の反射パルス波を用いる積分処理による目標検出性能の改善効果
- ③ 目標反射パルス信号の信号対雑音比の最大化を図るマッチドフィルタ（整合フィルタ）の動作とその出力信号の性質
- ④ パルス圧縮フィルタの動作とその出力信号の性質

本書の全体構成は、9章までが上記テーマに重点を置いたセンサとしてのレーダシステムの基礎的理論の解説であり、その後の三つの章でシステム技術者にとって興味があり、有益と思われる次の技術を取り上げて解説した。すなわち、レーダシステム機能の飛躍的な拡大を可能としたフェーズドアレイアンテナ技術、搜索レーダにより間欠的に計測される目標座標データを用いるコンピュータによる追尾技術、特にカルマンフィルタの初歩的応用とその課題、および3次元レーダと呼ばれる搜索レーダの測高技術である。

本書の出版に当たって、東京工業大学の荒木純道先生には本書のみならずマイクロ波全般に関し、議論とご指導をいただきたいへんお世話になりました。深く謝意を表します。本書の内容に関し議論を通して貴重なご意見をいただいた元日本電気株式会社の年綱康宏氏、稲垣連也氏、またレーダに関し日頃議論いただく元日本電気株式会社の池田明氏、宍戸正昭氏、日本電気株式会社の山崎次雄氏、元富士通株式会社の栗原宏氏にお礼を申し上げます。日本電気株式会社の大先輩である豊田良助氏にはレーダ関連のみならずいろいろな側面で長きにわたりご指導をいただきました。深く感謝致します。また、本書の執筆・出版に当たってお世話になったコロナ社の関係者の方々にお礼申し上げます。

本書は一般社団法人情報通信振興会発刊の月刊誌「電波受験界」に15回にわたり連載した『レーダシステム技術入門』を基に、大幅に加筆・編集して単行本としたものです。最後になりますが、同会の関係者の方々にお礼を申し上げます。

2015年9月

著 者

目 次

1. 本書の範囲とレーダ利用の現状

1.1 レーダの特質	1
1.2 本書の対象範囲と構成	3
1.3 レーダ利用の現状と搜索レーダの位置付け	7
1.3.1 防衛用レーダ	8
1.3.2 航空管制用レーダ	11
1.3.3 気象レーダ	12
1.3.4 飛翔体追尾レーダ	19
1.3.5 宇宙飛翔体監視レーダ	19
1.3.6 画像（映像）レーダ	20
1.3.7 船舶用レーダ	21
1.3.8 自動車用レーダ	22
1.3.9 地中探査レーダ	23
1.3.10 その他のレーダ	24
1.4 レーダの周波数帯	25
1.5 戦時下レーダ開発における外国レーダ技術の利用	26
引用・参考文献	33

2. 目標探知性能の算定

2.1 レーダの基本形：搜索レーダ	38
2.1.1 目標の搜索と探知・計測	38
2.1.2 レーダ覆域設定上の基本的制約条件	40

2.1.3 レーダシステムの基本構成	42
2.2 目標探知性能の基本算定式	45
2.2.1 反射波受信電力の算定	45
2.2.2 基本レーダ方程式	49
2.3 SNR 導入による実用レーダ方程式	51
2.3.1 実用レーダ方程式導出のための検討事項	52
2.3.2 SNR による目標検出基準の必要性	53
2.3.3 基準とするフィルタ出力に対応する SNR の表示式	55
2.3.4 実用レーダ方程式	57
2.4 確率に基づく目標検出基準の導入	66
2.4.1 目標検出の確率的判定の必要性	66
2.4.2 確率的目標検出基準の算定手順	68
2.4.3 PPI 表示における目視検出の一端紹介	70
引用・参考文献	71

3. レーダ方程式のパラメータ

3.1 送信パルス波諸元	72
3.2 アンテナ諸元	74
3.2.1 レーダ用アンテナの一般的性質	74
3.2.2 アンテナビーム幅	75
3.2.3 アンテナ利得	77
3.2.4 偏波	79
3.2.5 その他のアンテナ諸元	82
3.3 アンテナ利得・開口積	84
3.3.1 利得・開口積の周波数依存性の定式化	84
3.3.2 最大探知距離の周波数特性	85
3.4 レーダ断面積	89
3.4.1 レーダ断面積の工学的解釈	89
3.4.2 レーダ断面積の角度依存性	89
3.4.3 単純形状物体のレーダ断面積	91

3.5 受信機雑音	93
3.5.1 増幅器の雑音指数	94
3.5.2 多段増幅器の雑音指数	97
3.5.3 雑音指数の測定法	98
3.6 システム雑音	99
3.6.1 システム雑音電力	99
3.6.2 受信部の等価入力雑音電力	101
3.6.3 伝送線路の等価入力雑音電力	101
3.6.4 アンテナ雑音電力	103
3.7 フィルタの特性とその損失補正	105
3.7.1 雑音帯域幅	105
3.7.2 帯域フィルタの損失補正	106
3.7.3 マッチドフィルタのマッチング損失	114
3.7.4 帯域幅補正係数	115
引用・参考文献	116

4. 目標信号の検出基準

4.1 単一反射パルス波による目標検出と目標検出基準	118
4.1.1 雑音と信号に関わる確率分布	119
4.1.2 誤警報確率設定値に対応する信号検出しきい値	130
4.1.3 目標検出確率設定値に対応する目標検出基準値	131
4.2 複数反射パルス波による目標検出と目標検出基準	133
4.2.1 積分処理による目標検出性能の改善	134
4.2.2 コヒーレント積分処理による目標検出	136
4.2.3 ノンコヒーレント積分処理による目標検出	140
4.3 目標反射波の変動を考慮した目標検出基準	148
4.3.1 変動する目標反射波の扱い方	149
4.3.2 目標フラクチュエーションモデル (変動モデル)	150
4.3.3 変動する目標反射波に対する目標検出基準値	152
引用・参考文献	158

5. 目標探知性能算定のまとめ

5.1 レーダ方程式におけるシステム関連パラメータ	159
5.1.1 レーダ方程式における損失項	159
5.1.2 電波伝搬中に受ける大気と地表面の影響	163
5.1.3 搜索レーダにおける目標ヒット数	167
5.2 レーダ方程式のまとめ	168
5.2.1 代表的レーダ方程式との比較考察	168
5.2.2 レーダ方程式の計算例	171
引用・参考文献	174

6. 電波の大気屈折とレーダ垂直覆域図

6.1 電波の大気屈折がレーダ運用に与える影響	175
6.2 大気屈折率分布と電波伝搬軸の屈折	177
6.2.1 大気屈折率分布モデル	177
6.2.2 電波伝搬軸の数式表示	178
6.3 レーダ垂直覆域チャート	181
6.3.1 指数分布モデルによる垂直覆域チャート	182
6.3.2 等価地球半径モデルによる垂直覆域チャート	184
6.4 球形大地上のレーダ見通し距離	185
6.5 大地反射が垂直覆域に及ぼす影響	187
引用・参考文献	189

7. レーダシステム性能の改善・向上技術

7.1 システム性能の改善・向上課題	190
7.2 アンテナ設計による搜索・探知性能の改善・向上	192
7.2.1 垂直面アンテナパターンの最適設計	192

7.2.2 偏波の選定	197
7.3 マッチドフィルタによる SNR の最大化	200
7.3.1 マッチドフィルタの導出	200
7.3.2 マッチドフィルタの出力信号波形	204
7.3.3 マッチドフィルタの特質	207
7.4 パルス圧縮技術による尖頭送信電力の設計自由度向上	209
7.4.1 パルス圧縮技術のレーダシステムにおける意義	209
7.4.2 パルス圧縮方式のレーダ方程式における取扱い	212
7.5 レーダ信号処理によるクラッタ中目標の検出性能改善	212
7.5.1 クラッタ環境下での目標検出	213
7.5.2 移動体反射波のドップラー周波数偏移	214
7.5.3 目標検出性能改善におけるクラッタ諸元の記述	217
引用・参考文献	221

8. パルス圧縮技術

8.1 周波数変調信号を用いるパルス圧縮	222
8.1.1 LFM パルス圧縮方式の動作の流れ	223
8.1.2 LFM パルス圧縮方式の圧縮原理	225
8.1.3 LFM パルス圧縮方式の圧縮信号波形	229
8.1.4 パルス圧縮フィルタの具現化技術	232
8.1.5 LFM パルス圧縮信号の時間サイドローブ低減	235
8.1.6 非線形周波数変調信号を用いる時間サイドローブ低減	237
8.2 位相変調信号を用いるデジタルパルス圧縮方式	238
8.2.1 離散的信号による位相変調	239
8.2.2 2値符号列によるデジタルパルス圧縮	239
8.2.3 多相符号列によるデジタルパルス圧縮	241
引用・参考文献	243

9. レーダ信号処理技術

9.1 クラッタの性質とクラッタレーダ断面積	244
9.1.1 大地クラッタ	244
9.1.2 海面クラッタ	246
9.1.3 気象クラッタ	247
9.2 ドップラー周波数偏移の利用による目標検出性能の改善	248
9.2.1 MTI 処理による移動体の検出	248
9.2.2 デジタル フィルタ バンクによる移動体の検出	256
9.3 クラッタの統計的特徴の利用による目標検出性能の向上	257
9.3.1 Log-FTC/CFAR	258
9.3.2 ワイブル CFAR	259
9.3.3 ノンパラメトリック CFAR	259
引用・参考文献	260

10. フェーズド アレー アンテナ技術

10.1 電子走査アンテナの基本方式	262
10.2 フェーズドアレー アンテナの特長とレーダによる利用	264
10.3 フェーズドアレー アンテナのビーム走査	268
10.3.1 直線フェーズドアレー アンテナのビーム走査	269
10.3.2 平面フェーズドアレー アンテナのビーム走査	271
10.4 フェーズドアレー アンテナの構成	274
10.4.1 パッシブフェーズドアレー アンテナの構成	274
10.4.2 アクティブフェーズドアレー アンテナの構成	279
10.5 フェーズドアレー アンテナ設計上の技術課題	282
10.5.1 グレーティングローブの発生回避	283
10.5.2 素子アンテナ間相互結合への対処	290
10.5.3 アレー面表面波によるブラインドの発生回避	293
10.5.4 量子化移相誤差への対処	295

10.5.5 アレー動作周波数帯域幅の制約	297
引用・参考文献	299

11. 搜索レーダにおける目標追尾技術

11.1 レーダにおける目標追尾	301
11.2 搜索レーダにおける目標追尾	302
11.2.1 TWS 追尾処理の流れ	302
11.2.2 追尾フィルタの考え方	303
11.2.3 α - β フィルタによる目標追尾	306
11.3 最適推定理論に基づく目標追尾	309
11.3.1 カルマンフィルタの応用	309
11.3.2 カルマンゲインと分散の計算例	315
11.3.3 追尾フィルタの最適化へ向けた課題	318
引用・参考文献	320

12. 搜索レーダにおける測高技術（3次元レーダ）

12.1 ペンシルビームを用いる測高方式	321
12.1.1 ペンシルビーム測高方式の分類	322
12.1.2 垂直面ビーム電子走査による測高方式	325
12.1.3 垂直面ビーム非走査アンテナによる測高方式	331
12.2 ファンビームを用いる測高方式	332
12.2.1 垂直面ビーム機械走査アンテナによる測高方式	332
12.2.2 垂直面ビーム非走査アンテナによる測高方式	334
引用・参考文献	338

索引	339
----	-----

本書の範囲とレーダ利用の現状

初めに筆者の考えるレーダの特質とそれに基づく本書執筆の立脚点を述べ、続いて本書の構成の全体像と各章の内容を紹介する。次に、国内を中心とする各種レーダ利用の現状とレーダへの周波数割当状況を取り上げる。最後に、日本の初期のレーダ開発への取組み状況に関し、戦時下における外国レーダ技術の利用を切り口として当時の苦戦の一端を紹介する。

1.1 レーダの特質

「レーダ」は気象観測や航空管制、また最近は自動車の安全運転用など社会生活の中で身近に利用されるようになり、動作も直感的に理解しやすいことから一般の人々になじみのある言葉になっている。レーダによる電波反射現象の利用は山びこに例えられることが多いが、現存するレーダ方式の多くは自然界や人間界にすでに存在する波動反射現象の中に似た仕組みを見いだすことができる。

レーダ (radar) は、RAdio Detection And Ranging の略語^{[1]†}であり、一言でいえば「電波による探知と測距」を意味するが、多くの場合、基本機能として「搜索と測角」が付け加わる。

明るい電灯を灯せばその周りによく見えるように、レーダの場合も十分な強さの電波を発射して近距離を見るのであればよく見える。雑音や不要反射波を含む見えたままの情報を画像として出力し、それ以降の目標検出や処理をオペレータやコンピュータによる画像処理にゆだねる場合には、センサとしてのレーダの機能と役割はここまでとなる。

† 肩付き数字は、章末の引用・参考文献番号を表す。

しかし、レーダの基本機能として目標反射波を雑音から分離して検出しようとする場合は、レーダが捉えるパルス反射波と各種の雑音の性質に立ち返ったレーダに固有の検出技術が必要となる。レーダから数百 km の遠距離に存在する小さな航空機を各種の雑音の中から捉える場合や、近距離であってもクラッタ (clutter) と呼ばれる各種の雑多な不要反射波に埋もれる小さな目標を検出する場合には、雑音に抗して検出の限界点で目標検出を行うことが要求される。

本書では、上記の後者の立場に立って雑音中の目標検出をレーダの基本機能として捉え、レーダシステムにおける目標検出に関わる動作を物理的かつ理論的に整理して解説する。とかく確立されたものとして見過ごされがちな動作原理を正しく理解してレーダシステムの開発や最適設計に臨むことにより、より良い成果が得られるものと思う。

前大戦中に米欧はレーダに膨大な勢力を集結して短期集中的に実用機の開発に当たり、実戦に投入して大きな成果を取めた。この開発の中では実機の開発・生産に並行して幅広い理論的研究も行われ、レーダの性能向上や斬新なレーダ方式の開発に寄与した。理論的成果の中の基本的なものは戦後になって秘密指定が解除された後、学会などで公開された。これらの理論は、マイクロ波、アンテナ、雑音、目標検出、マッチドフィルタ、パルス圧縮など各分野を切り開いた基本的理論をも含む広範なものであった。その後、これらの基本理論の周りに信号処理理論などが構築されて 1970 年頃までにはレーダシステムに関わる基礎理論は一通りまとまった。

その後も、ハードウェアの進歩やフェーズドアレー アンテナの実用化やコンピュータを始めとするデジタル技術の進歩により、それまで実現できなかったことが可能となったり、新しい要素技術に基づく新しいレーダ方式が提案されたり、新しい分野への応用に社会的要求が高まったりして、システムとしてのレーダは応用の範囲を拡大しつつ進歩を続けている。

以下に、恒久的に当てはまるとされるレーダシステムの基本的特質を挙げる。

- ① レーダの基本動作を貫くシステム技術は自然の物理現象と多くの接点を持っているため、基本的なレーダシステムの理論は時代とともに変わることはなく不変である。
- ② 地球の大気中で遠方の物体を天候によらず見ることを可能とする手段は電波だけであり、現状は代替手段はない。光の場合には雲や霧の中では減衰が大きく、遠方まで到達しない。
- ③ レーダでは、受信反射波と自己の送信波との比較により目標の情報を抽出することができる。受信側が送信波の情報を正確に知っており、これを利用できることは他の電波システムと異なる点である。
- ④ レーダは送信波と目標反射特性との相互作用の結果である反射波の性質をシステム全体で追求する装置であるため、送信機からアンテナ、受信機を経てコンピュータに至るまでのサブシステムが組み合わされて、システムとして最適動作することが重要である。このため、レーダは、異なる技術領域のサブシステム全体にまたがるシステム設計が必要とされる技術分野である。
- ⑤ レーダシステム一式はそれ自体で閉じた系を構成して動作するため、相互運用性確保のための標準化は周波数帯を除き必須ではない。このため、運用目的に応じて独自の方式を構築しやすく、斬新なアイデアを実現しやすい。

1.2 本書の対象範囲と構成

前節で示したレーダの基本機能に関して本書が取る立場に従って、雑音中の目標検出に関するレーダシステム動作を中心に取り上げ、さらにレーダシステム設計者にとって興味があると思われる技術分野について数項目を追加して本書の対象範囲とした。

目標検出はほとんどの方式のレーダで基本的役割を果たすが、特に搜索レーダはこの機能に重点を置いたレーダであることから、搜索レーダを念頭に置いて

て目標検出の物理的動作とその基礎的理論を解説する。また、搜索レーダシステムに関して追加した新旧のトピックについては、それらの基本的な考え方を伝えることを目的としてまとめた。

本書の内容の多くは米国で研究開発され公開された文献に基づいており、したがって関連する多量のデータ類は本書では到底対象とし得ないものであることから、データについては記載内容を説明する上で必要となる最小限の範囲を載せた。米国における研究開発で蓄積された膨大な量のデータは章末に挙げる引用・参考文献の中に報告されているので、必要な読者はそれらを参照されるようお願いする。

以下、本書の構成と記載内容について、章ごとに説明する。

1章では、前節で述べたレーダに関する筆者の基本的な考え方と本節で述べる本書の対象範囲に加え、現状の各種レーダの利用状況とそれらのレーダと搜索レーダとの関連性、および劣勢にあった戦時中の日本のレーダ開発においていくつかのルートで導入された外国レーダ技術が果たした役割について、その一端を紹介する。

2～9章は、本書の主題である目標探知能力に関する技術解説である。図 1.1 に各章記載内容の相互関係を示す。これらの章の全体は、関連する技術内容によってくっった A, B, C の三部から構成されている。

同図の A 部 (2～5章) は目標探知性能の算定に関わる章から成る。

2章では、初めに搜索レーダにおける最大探知距離算定とは別の要因により課せられる覆域設定上の制約条件を説明する。次に、送信パルス波について物体からの反射波のレーダ受信強度を求め、基本レーダ方程式を導出する。次いで、目標検出の実態に即した目標検出判定を行うために、信号対雑音比と確率的判定方法を導入して実用レーダ方程式を導く。このレーダ方程式における信号対雑音比としては、帯域フィルタ (2.3.3 項参照) 出力を基準とする場合とマッチドフィルタ (整合フィルタ) 出力を基準とする場合の両者について比較考察する。

3章では、2章で導いたレーダ方程式に現れるレーダの物理的パラメータと

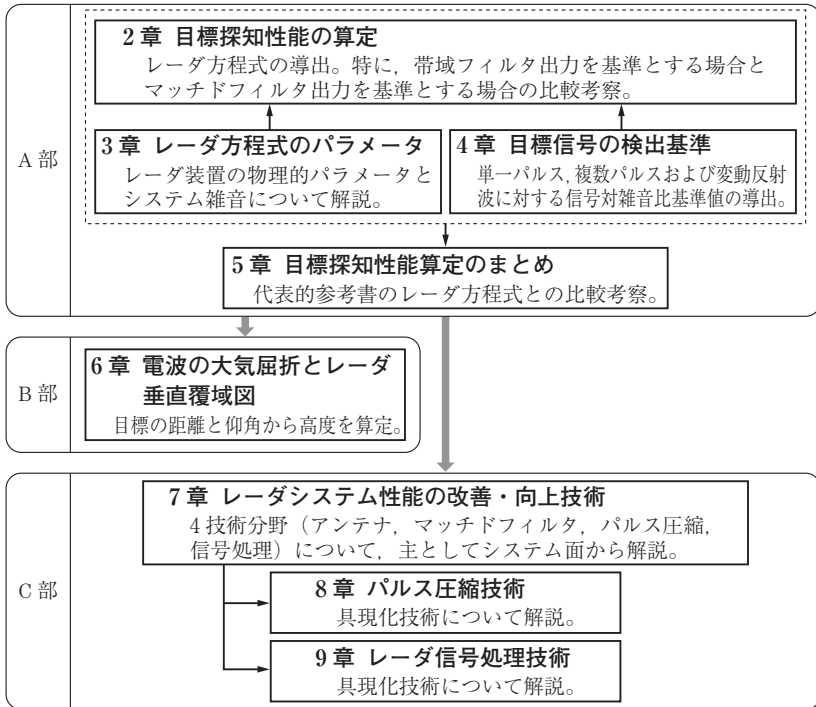


図 1.1 目標探知関連各章記載内容の相互関係

レーダ内外の雑音に起因する目標検出レベルに関わるシステム雑音について解説する。

4章では、2章で導いたレーダ方程式において、受信信号のSNRを比較して目標の存在判定を行うための目標検出基準値の算定について解説する。目標検出の条件としては、単一パルスによる場合、複数パルスによる場合、また目標反射波に変動がある場合を取り上げる。

5章は、2～4章全体のまとめの章である。まず、前章までの説明では簡略化のために省略した各種損失項をレーダ方程式に導入する。次に、代表的引用・参考文献に記載された見掛け上一部が異なる3種のレーダ方程式を取り上げて、本書のレーダ方程式と併せて4式の間考え方の差異について比較考察する。それらの差異の明確化によって、レーダ方程式の適切な使用が促進され

るものと思う。

次に図 1.1 の B 部 (6 章) では、前章までに検出された目標の位置情報 (レーダから見た距離と仰角) に基づいて、大気による電波屈折が存在する球形の地球上において大気屈折を補正して目標の座標 (距離と高度) を近似計算し表示する方法について解説する。

図 1.1 の C 部 (7~9 章) では、A 部で扱った目標検出性能の算定で前提とした基本的機能から成るレーダに対し、機能・性能の改善・向上を図る技術を取り上げる。

初めに 7 章で、現状の基本的な改善・向上技術の全体像を整理して表で示す。取り上げる改善・向上技術はアンテナ設計技術、マッチドフィルタ技術、パルス圧縮技術、および信号処理技術に大別される 4 分野であり、それぞれの技術についてレーダシステムに与える改善・向上効果と具現化技術を理論面から解説する。上記技術分野の内、パルス圧縮技術と信号処理技術については 7 章内ではシステムの側面からの解説とし、具現化技術についてはそれぞれ章を改める。

次に、8 章では 7 章のシステム面からの解説を受けて、パルス圧縮方式の具現化技術を周波数変調信号を用いる方式と位相変調信号を用いる方式に 2 分類して理論的に解説する。特に、圧縮動作の各ステップを図で示すことによりパルス圧縮の動作原理の正しい理解を容易にすることを意図した。

次に、9 章では 7 章のシステム面からの記述を受けて、レーダ信号処理技術を目標のドップラー周波数偏移の利用技術とクラッタの統計的特徴の利用技術に分けて解説する。

レーダの目標検出に直接関わる技術は 9 章までとなるが、フェーズドアレーアンテナ技術の発達はレーダシステム機能の飛躍的な拡大を可能としたことから、この技術を 10 章で解説する。10 章ではフェーズドアレーアンテナの構成と基本的な動作原理を解説するとともに、レーダシステム設計者が知っておくべきフェーズドアレーアンテナ設計上の技術課題について概要を解説する。

11 章では、搜索レーダにより探知・計測された目標位置データをコンピュー

タで追尾するための基本的技術（アルゴリズム）について解説する。オペレータがレーダ表示器を目視しながら手で描いて行っていた方法と同等な方法から始めて、最適推定理論の初歩的応用までを解説する。

12章では、「3次元レーダ」と呼ばれる測高機能を備えた搜索レーダによる目標高度の測定方法を取り上げる。ペンシルビームを形成して走査するフェーズドアレーレーダでは目標の3次元座標の計測は当然の機能となっているが、ここに至る発展の過程では興味深い各種の測高方式が開発された。それらの方式の多くはすでに旧式となっているが、ここで振り返って各種の方式を整理し解説する。

1.3 レーダ利用の現状と搜索レーダの位置付け

レーダを用途で分類すると、搜索レーダの機能と技術は他の用途のレーダでも広く使用されていることがわかる。一方、搜索レーダ以外の用途のレーダで

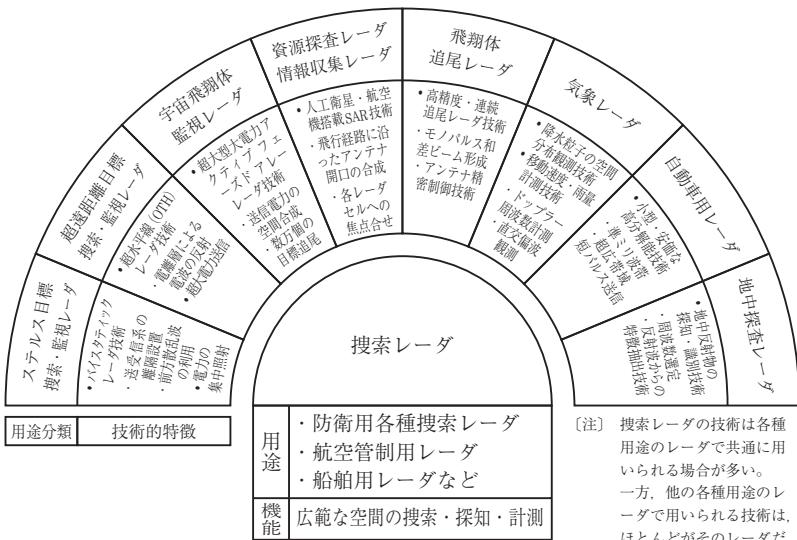


図 1.2 搜索レーダと各種レーダとの技術的関連

は、各用途に固有の機能と技術が組み込まれてその主たる目的を果たしている。この意味で搜索レーダは各種レーダの中で共通の基本レーダ的な機能と性格を持っているといえる。図 1.2 はこの考え方を図にまとめたものであり、搜索レーダの周りに各種用途のレーダが固有の機能と技術を持って搜索レーダと関連していることが示されている。

本節ではレーダ利用の現状について、図 1.2 と同一の視点から代表的用途のレーダについて概要を紹介する。大型から小型まで、レーダ応用の範囲は従来の枠を越えて拡大している。

1.3.1 防衛用レーダ

レーダは前大戦中に軍用目的で集中的に開発・実用化された経緯からもわかるとおり、防衛目的では必須のシステムとして陸海空の各種用途に応じて多種類のレーダが開発され、使用されている。特に高度な性能を備えた最先端技術のレーダは、最初に防衛用として開発されて実用に供される場合が多い。以下、これらきわめて多種類のレーダの中から、代表的用途のレーダを取り上げて紹介する。

〔1〕 遠距離対空搜索レーダ

代表的な遠距離対空搜索レーダは、日本全国に 28 箇所ある航空自衛隊の



図 1.3 警戒管制レーダ (J/FPS-5)
(写真提供：防衛省)

レーダサイト^[2]に設置されている警戒管制レーダである。これらのレーダは日本の空域に侵入する航空機の監視が主たる任務であり、航空機の 3 次元位置情報を取得し日本全土をカバーする防空システムに入力する。機械回転式レーダと電子走査方式レーダがある。これらの固定式レーダに対し同目的の移動式レーダも開発され、使用されている。図 1.3 に示す J/FPS-5 レーダ^[3]はアクティブ フェーズド アレー アンテナ 3 面から成る最新の警戒管制レーダであり、弾道ミサイル探知

機能も備えている。

〔2〕 艦載捜索レーダ

海上自衛隊の護衛艦などに搭載され、自艦の周辺空域を飛行する航空機を探知する対空捜索レーダが代表的である。ファンビーム回転式と垂直面内ではペンシルビームを電子走査し水平面内は機械回転する方式があり、航空機の2次元または3次元座標を取得する。前記のほか、海上の船舶の監視に供される小型の水上捜索レーダがある。

〔3〕 艦載捜索・火器管制レーダ

ミサイル護衛艦に搭載され、自艦の指揮システムに接続されたイージス（Aegis）レーダ^{[4]~[6]}（図1.4参照）が代表的である。このレーダは4面固定のフェーズドアレーアンテナを備え、全周にわたる捜索機能に加えて高速目標への追従性能を生かした多目標追尾機能を有し、ミサイル発射の管制も行う多機能レーダシステムである。



図1.4 艦船用イージス多機能レーダシステム
(写真提供：防衛省)

〔4〕 火器管制レーダ

前項のシステムのほか、陸海空各自衛隊が所有する各種のミサイルシステムには、目標の捜索・探知・追尾・火器管制の機能を有する各種の多機能フェーズドアレーレーダが組み込まれている。捜索範囲はレーダの全周にわたるシ



図 1.5 ペトリオット ミサイル システムの火器管制レーダ (写真提供: 防衛省)

システムのほか、目標の存在が想定される限定空域に限られるシステムも多く、その多くは移動用である。図 1.5 にペトリオット ミサイル システムの火器管制レーダ^{[5],[7],[8]}を示す。戦闘機搭載用の火器管制レーダは、これらの機能が最も小型・軽量に凝縮されたレーダシステムである。

〔5〕 着陸誘導管制装置^[9]

着陸誘導管制装置 (GCA: Ground-Controlled Approach) は空港監視レーダ (ASR) と滑走路横に設置された精測進入レーダ (PAR: Precision Approach Radar, 12.1.2〔4〕項, およびコラム 10.1 参照) を備えた着陸誘導管制システムである。PAR のオペレータは、着陸態勢に入った航空機のブリップを特殊な専用表示器で監視し、主として防衛用航空機を悪天候下で着陸誘導するために、高低方向と方位方向の標準経路からの差異を無線機を通して口頭でパイロットに伝える。

〔6〕 OTH レーダ^[10]

OTH レーダ (Over-The-Horizon radar, 超水平線レーダ) は、HF 帯 (High Frequency, 短波帯: 3 ~ 30 MHz) の電波を送信し、電離層と海面による電波の反射を利用して水平線を越える数千 km 先までの航空機や船舶などを探知するレーダである。受信時のアンテナ開口は数百 m から 3 km に及ぶ巨大な大きさであり、水平面内ではビーム走査を行い、垂直面内は非走査のことが多い。米欧で開発された。

〔7〕 バイスタティックレーダ^[11]

同一のアンテナを送受信で用いるモノスタティックレーダ (monostatic radar) に対し、バイスタティックレーダ (bistatic radar) は送信系と受信系を離隔して設置するレーダ方式である。受信系の存在位置が発見されにくいなどの利点があり古くから案はあったが、近年はステルス目標 (stealth target, 低

索引

【あ】

アクティブインピーダンス 291~293
 アクティブフェーズドアレー
 アンテナ 8, 15, 19, 279, 282
 アクティブフェーズドアレー
 レーダ 280, 281
 電子管式 280, 281
 α - β フィルタによる目標追尾
 306~309
 システムモデル 306
 アレー素子パターン 293, 294
 アンテナ雑音電力 103~105
 アンテナ諸元 74~84
 アンテナ利得 77~78
 円偏波 79~81
 コセカント2乗形状 84
 サイドロープレベル
 75, 82, 83
 指向性利得 77, 78
 実効開口面積 78
 垂直偏波 79
 水平偏波 79
 楕円偏波 80
 ビーム形状 83
 ビーム幅 72, 73
 偏波 79~82
 アンテナ設計技術 192~200
 円偏波 198~200
 高仰角ブーストパターン
 194, 195
 コセカント2乗パターン
 192~194
 水平・垂直偏波 197, 198
 低仰角シャープカットオフ
 パターン 195

デュアルビームパターン
 196

アンテナ損失 161
 アンテナパターン損失
 161, 162
 アンテナ利得 46
 アンテナ利得・開口積 84~88
 周波数依存性 84~88
 アンビギュイティ 41

【い】

イーグルスキャン
 261, 276, 330, 331
 位相・周波数走査アンテナ
 327, 328
 位相走査アンテナ 327~329
 1次元走査 327
 回転2次元走査 328, 329
 マルチビーム反射鏡
 327, 328
 位相変調デジタルパルス
 圧縮方式 238~242
 多相符号列 241, 242
 多相変調 239
 2相変調 239
 2値符号列 239~241
 バーカー符号 240~241
 フランク符号 241, 242
 一義の確定距離 251, 252
 移動型警戒用レーダ
 「SCR-270」 28, 32, 33
 移動用3次元レーダ 327, 328

【う】

宇宙デブリ観測用レーダ 281
 宇宙飛翔体監視レーダ
 19, 20, 280
 ウルツブルグレーダ 29~31

【え】

A スコープ 44, 71
 AN/FPS-85 19, 280
 エンジェルエコー 194

【か】

海面クラッタ
 213, 214, 246, 247
 対数正規分布 246
 レイリー分布 246
 レーダ断面積 246
 海洋レーダ 24
 ガウスフィルタ 111, 112
 ガウス分布 120
 ガウス分布雑音 121
 画像(映像)レーダ 20, 21
 艦載電波探信儀「2号2型」
 30, 31

【き】

疑似雑音列 241
 気象クラッタ
 199, 213, 214, 247, 248
 レイリー分布 248
 レーダ断面積 247
 気象レーダ 12~18
 ウインドプロファイラ 15
 大型大気観測用レーダ
 18
 雷レーダ 15
 気象ドップラーレーダ 13
 局地的気象監視システム
 15
 空港気象ドップラーレーダ
 13
 下水道管理用レーダ
 雨量計 15

- 降雨観測レーダ 17
 次世代マルチパラメータ
 気象レーダ 16
 新アメッシュ 15
 大気観測レーダ 15
 直交二重偏波レーダ 14
 2周波降水レーダ 17
 フェーズドアレー気象
 レーダ 16
 二重偏波レーダ雨量計 14
 レーダ雨量計 14
 COBRA 16
 CバンドMPレーダ 14
 DPR 17
 DRAW 13
 MUレーダ 17, 18
 PANDA 16
 PANSY 18
 TRMM / PR 17
 WINDAS 15
 XRAIN 14
 XバンドMPレーダ 14
 XバンドMPレーダ
 ネットワーク 14
 疑似乱数符号列 241
 狭帯域雑音 122
 狭帯域フィルタ 43, 52, 54, 119
- 【く】**
 空間分布クラッタ 247
 空港監視レーダ 10
 矩形フィルタ 111, 112
 クラッタ環境下での目標検出
 213, 214
 クラッタ
 ——の強度分布 218
 レイリー分布 218
 ——の統計的特徴 214
 ——のレーダ断面積
 217, 218
 空間クラッタ 217, 218
 面状クラッタ 217, 218
 クラッタロックMTI 255
 グレーティングローブ
 268, 283~290
- 可視域
 285, 286, 288~290
 三角配列 290
 直線フェーズドアレー
 284~287
 非可視域
 285, 286, 288~290
 平面フェーズドアレー
 287~290
- 【け】**
 検出確率 69, 131
 検波後積分処理 134
 検波前積分処理 134
- 【こ】**
 航空管制用レーダ 11, 12
 空港監視レーダ 11, 12
 空港面探知レーダ 11, 12
 航空路監視レーダ 11
 2次監視レーダ 12
 洋上航空路監視レーダ 11
 航空機搭載気象レーダ 25
 合成開口レーダ 11, 20
 交通取締用レーダ速度計 25
 港内・沿岸監視レーダ 24
 後方散乱 81, 82
 誤警報確率 68, 69, 130, 131
 固定型警戒用レーダ
 「SCR-271」 32, 33
 固定用3次元レーダ 336
 コヒーレントMTI方式 248
 コヒーレント積分処理
 134~140
 コラップシグ損失 163
- 【さ】**
 最小信号検出レベル 49, 50
 最大探知距離 50, 51, 61~63
 ——の周波数特性
 85~88
 最長符号列 241
 最適2値符号列 241
- 最適推定理論に基づく
 目標追尾 309~319
 カルマンゲイン
 312, 314~317
 カルマンフィルタ
 309~319
 座標誤差の標準偏差 317
 速度誤差の標準偏差 318
 共分散行列 312~314
 雑音指数 94~99
 増幅器 94, 95, 97
 測定法 98, 99
 多段増幅器 97, 98
 雑音帯域幅 56, 59, 60, 105, 106
 雑音の確率分布 120~125
 検波後雑音電圧 124, 125
 雑音電圧包絡線
 123~124
 雑音のスペクトル密度 201
 3次元レーダ 321
 4/3地球半径モデル 185, 186
 散乱断面積 11, 48
- 【し】**
 しきい値 67~69
 システム雑音 54, 99~105
 システム雑音電力 59, 60
 システム性能の改善・
 向上課題 190, 191
 システム損失 45
 実効開口面積 49
 自動検出・追尾処理 302
 自動車用レーダ 22, 23
 シフトレジスタ符号 241
 射撃管制用レーダ
 「SCR-268」 28, 32, 33
 射撃用レーダ (GL Mark2)
 31, 32
 周波数走査アンテナ 325~327
 スネーク導波管 325, 326
 筒型反射鏡 326
 平面アレー 326
 受信機雑音 93~99
 受信系高周波伝送線路損失
 162, 163

受信部の発生する雑音電力 101

シュワルツの不等式 202

準白色雑音 120, 121

情報収集衛星用レーダ 11

 光学衛星 11

 レーダ衛星 11

シングルキャンセラ MTI 248~252

 ブラインド速度 251, 252

(信号+雑音)の確率分布 125~130

 検波後(信号+雑音)電圧 127~130

 (信号+雑音)電圧包絡線 126, 127

信号検出しきい値 130, 131

信号処理損失等 163

信号対雑音エネルギー比 56, 133

信号対雑音比 43, 52

【す】

垂直面機械走査アンテナ 332~334

垂直面ビーム非走査アンテナによる測高 334~338

 受信干渉計方式 335~337

 受信マルチビーム方式 337, 338

 Vビーム方式 334, 335

スイープ 44

スタガ PRF MTI 253~255

ステルス目標 10, 11

スペクトル密度 56

スワーリングモデル 150~152

【せ】

成形アンテナパターンの実例 196, 197

整合フィルタ 55

精測進入レーダ 10, 276, 330, 331

積分処理 70

線形周波数変調

線形周波数変調パルス

 圧縮方式 222~237

 圧縮原理 225~228

 圧縮信号波形 229~231

 時間サイドローブ 235~237

 デジタルパルス圧縮フィルタ 233, 234

 動作の流れ 223, 224

 表面弾性波分散遅延線 232, 233

 LFM 信号 228, 229

船舶用レーダ 21

前方散乱 81, 82

【そ】

探索レーダ 7, 8, 38, 41

送受切換器 42, 43

送信系高周波伝送線路損失 160, 161

送信パルス波 72~74

 瞬時電圧 72

 瞬時電力 72

 デューティサイクル 73

 デューティファクタ 73

 パルス繰返し周波数 73

 パルス幅 72

 平均電力 72

素子アンテナ 290~293

 相互結合 290~293

 入力インピーダンス 291, 292

 放射パターン 291~293

【た】

帯域通過フィルタ 106~114

帯域幅損失係数 58, 108~114

帯域幅補正係数 63, 64, 115, 116

帯域フィルタ 55, 64, 65, 106

帯域フィルタ出力を基準とする SNR 55, 56

大気

 —による電波の屈折 166

 —による電波の減衰 164~166

大気吸収損失 162

大地クラッタ 196, 213, 214, 244~246

 ガウス分布 245

 対数正規分布 246

 レイリー分布 245, 246

 レーダ断面積 —の周波数 245

スペクトル分布 219, 220

 ガウス分布モデル 219, 220

 指数分布モデル 220

 多項式モデル 220

大地反射の垂直覆域への影響 187~189

対流圏吸収損失 164, 165

多義性 41

多機能フェーズドアレイレーダ 267, 268, 302

多機能レーダシステム 9

ダブルキャンセラ MTI 252, 253

探照灯管制レーダ (S.L.C.) 31, 32

【ち】

チェインホームレーダ 27

地上設置型合成開口レーダ 24

地中(探査)レーダ 23

地表面による電波の反射 166

地平線以遠の覆域下部 42

着陸誘導管制装置 330

チャープ方式 222

中心極限定理 120, 218, 245

【つ】

追尾フィルタ 303~306

 システムモデル 306

 スムージング 304

 フィルタリング 303, 304

 プレディクション 303, 304

 —の最適化へ向けた課題 318, 319

【て】

抵抗の発生する熱雑音 95, 96

低雑音高周波増幅器 43
 デジタルビームフォーミング
 17, 332
 デジタルフィルタバンク
 256, 257
 TWS 追尾処理の流れ 302, 303
 追尾開始処理 303
 追尾更新処理 303, 305
 追尾予測処理 303, 305
 データ結合 303
 データ相関 303
 デテクタビリティファクタ
 61, 62, 66, 131, 132
 テイラー分布 236, 237
 電子走査アンテナ 262~264
 周波数走査アンテナ
 262~264
 ビーム切換アンテナ
 262~264
 フェーズドアレーアンテナ
 262~264
 伝送線路の発生する雑音電力
 101~103
 電波高度計 25
 電波探信儀 29
 電波探知機 29
 電波の大気屈折 175~181
 大気屈折率の指数分布
 モデル 177, 178
 大気屈折率の直線分布
 モデル 178
 電波伝搬軸 178~181
 レーダ運用に与える影響
 175, 176

【と】

透過型空間給電フェーズド
 アレー方式 PAR 277
 等価地球半径モデル 42
 等価入力雑音電力 59
 動作周波数帯域幅 297~299
 開口面効果 297
 サブアレー 278, 298
 ドップラー周波数偏移
 214~217
 トランスバーサルフィルタ 257

【に】

2次周回エコー 41
 二重曲面反射鏡アンテナ 196
 日本版ウルツブルグレーダ
 30, 32
 ニューマン文書 31, 32

【ね】

熱雑音 60

【の】

ノンコヒーレント MTI 方式
 248
 ノンコヒーレント積分処理
 134, 136, 140~148
 ノンパラメトリック CFAR 259

【は】

白色雑音 96, 106, 201
 パターワースフィルタ 111, 112
 パッシブフェーズドアレー
 アンテナ 274, 275, 278, 279
 給電回路方式 278, 279
 空間給電方式 275, 278
 透過型空間給電方式
 275, 278
 反射型空間給電方式
 275, 278

パルス圧縮技術 209~212
 レーダシステムにおける
 意義 209~211
 レーダ方程式における
 取り扱い 212

パルスドップラーレーダ 256
 半機械式位相走査アンテナ
 329~331
 半機械式フェーズドアレー
 レーダ 276
 反射波受信電力 45~49
 半値帯域幅 105, 106

【ひ】

ビジビリティファクタ 132
 飛翔体追尾レーダ 19

非線形周波数変調パルス圧縮
 方式 237, 238
 時間サイドローブ
 237, 238
 ビデオ積分処理 134
 表面波によるブラインドの
 発生 293, 294

【ふ】

フェーズドアレーアンテナ
 9, 264~268
 フェーズドアレーアンテナ設計
 上の技術課題 282~299
 直線アレーのビーム走査
 269~271
 特長 264~267
 ビーム走査 268~274
 ビーム走査形態 267, 268
 平面アレーのビーム走査
 271~274

覆 域

——の最小距離設定
 40~42
 ——の最大距離設定
 40~42
 ブラインド速度 251~255
 ブリップ 44

【へ】

ペンシルビームを用いる
 測高方式 321~324
 フレームタイム 322
 分類 322, 323

【ほ】

防衛用レーダ 7~11
 イージスレーダ 9
 艦載搜索 9
 艦載搜索・火器管制 9
 警戒管制 8
 水上搜索 9
 対空搜索 8, 9
 着陸誘導管制装置 10
 バイスタティック 10
 ペトリオットミサイル
 システム 10

<p>モノスタティック 10 J/FPS-5 8 OTH レーダ 10</p> <p>【ま】</p> <p>マッチドフィルタ 55~57, 64, 65, 200~209 SNRの最大値 203, 208 インパルス応答 203, 204 出力信号 204~207 出力を基準とする SNR 56, 57 特 質 207~209 マッチドフィルタの導出 200~204 マッチング損失 62, 114, 115 マルチビームアンテナ 323, 326~328, 331</p> <p>【み】</p> <p>見逃し確率 69</p> <p>【め】</p> <p>面状クラッタ 245</p> <p>【も】</p> <p>目標検出基準 118~157 単一反射パルス波 118~133 複数反射パルス波 133~148 目標反射波の変動 148~157 目標検出基準値 52, 60, 61, 62, 66, 131~133, 146~148, 152~157</p>	<p>単一反射パルス波 131~133 複数反射パルス波 146~148 目標反射波の変動 152~157 目標検出の確率的判定 66~70 目標追尾 301~319 捜索レーダによる 301, 302~319 追尾レーダによる 266, 301 トラックホワイルスキャン 301, 302 目標ヒット数 167 目標フラクチュエーション モデル 150~152 モノスタティックレーダ 79, 84</p> <p>【ゆ】</p> <p>有色雑音 121</p> <p>【り】</p> <p>量子化移相誤差 295~297 量子化サイドローブ 296 量子化指向誤差 297</p> <p>【れ】</p> <p>レイリー分布 124, 125 レーザレーダ 14 レーダ ——の周波数帯 25, 26 レーダシステムの基本構成 42~44</p>	<p>レーダ垂直覆域チャート 181~185 指数分布モデルによる 182~184 等価地球半径モデル による 184, 185 レーダ断面積 47~49, 89~93 角度依存性 89~91 金属球体 91, 92 金属平板 92 コーナーリフレクタ 92, 93 参考値 93 2個の金属球 90, 91 プロペラ機 90 レーダ方程式 60~66, 71, 168~174 基本レーダ方程式 45, 49~51 計算例 171~174 実用レーダ方程式 51, 52, 57~66 帯域フィルタ出力 61, 62 比較考察 168~171 マッチドフィルタ出力 62, 63 レーダ見通し距離 185~187 レンズ効果損失 165, 166</p> <p>【ろ】</p> <p>ロケット追尾レーダ 19 ロビンソンスキャナ 333, 334</p> <p>【わ】</p> <p>ワイブル CFAR 259</p>
--	--	--

<p>【A】</p> <p>ADT 302 AN/APQ-7 276 AN/MPN-1 276 AN/TPN-19 277 ARSR 11 ASDE 11, 12</p>	<p>ASR 10, 11, 12</p> <p>【C】</p> <p>CFAR 214</p> <p>【D】</p> <p>DBF 17, 332</p>	<p>【E】</p> <p>ECCM 325, 327</p> <p>【G】</p> <p>GB-SAR 24 GCA 10, 330</p>
--	--	---

[L]		[N]		[S]	
LFM	222	NLFM	237	SAR	11, 20
LIDAR	14			SLAR	20
LNA	43		[O]	SNR	52, 54
Log-CFAR	259	ORSR	12	STC	194, 195
Log-FTC	258		[P]	Swerling モデル	150~152
	[M]	PAR	10, 276, 277, 330, 331		[T]
MERA	280	PPI	43, 44, 70, 71	TWS	301, 302
MTI	217, 248	PRF	73		[V]
				VEB	329

— 著者略歴 —

- 1965年 東京工業大学理工学部卒業（電気工学）
1968年 東京工業大学理工学研究科修士課程修了（電子工学）
1971年 日本電気株式会社勤務
電波応用事業部にて各種アンテナ、レーダシステム、および電子戦システムの研究・開発・設計およびプロジェクトマネジメントに従事。第一レーダ技術部長。この間1974～1975年、米国MIT電子システム研究所客員研究員。
1989年 日本モトローラ株式会社勤務 技師長
2008年 一般財団法人ディフェンスリサーチセンター
研究委員
現在に至る

レーダシステムの基礎理論

Basic Theory of Radar Systems

©Shin-ichi Itoh 2015

2015年11月20日 初版第1刷発行



検印省略

著者 伊藤 信 一
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 新日本印刷株式会社

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 978-4-339-00870-8 (横尾) (製本：牧製本印刷)

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