

通信技術者のための レーダの基礎

高橋 徹 著

コロナ社

ま え が き

電波を用いたシステムの代表例を筆者が挙げるとすれば、それは無線通信とレーダである。無線通信に関しては、近年では携帯電話やスマートフォンに代表される移動通信の普及により、一般の方にも身近な存在となっている。国内にも多くの研究者／技術者がおり、日々多くの研究開発成果が発表され、学会でも活発な議論が交わされている。一方、レーダに関しては、軍事、気象観測、航空管制など用途が特殊なため、一般の方に身近な存在になっているとは言い難い。近年では、車の衝突防止を目的とした車載ミリ波レーダが普及期に入ってはいるものの、無線通信ほど一般化はしていない。必然、研究者／技術者も限られており、通信関係者からすると、“何をしているのか、よくわからない”のが実情ではないかと思われる。

しかし、筆者の経験では、電波の観点で見ると無線通信とレーダの間には一定の類似性があり、基礎となる理論や処理方式にかなりの共通性があるように思われる。そこで、本書では、通信研究者／技術者向けに通信とレーダとの類似性の視点を取り入れながら、レーダの基礎を解説する。具体的には、両者に共通的なテーマであるレンジ方程式、変復調方式、信号検出に特化し、理論を主体に解説を行う。それぞれ、無線通信を専門とする研究者／技術者にとって馴染みのある内容を導入部として、理論式の導出については天下り的な記述をできるだけ避けることで、無線通信とレーダの共通的部分を理解していただけるように配慮したつもりである。しかし、筆者の力不足もあり、読者の皆さんの期待に十分に答えられていない可能性もある。この点については、読者の皆さんから忌憚のないご意見をいただきたい。なお、上記趣旨により、本書ではレーダ技術全般を解説しているわけではなく、例えば追尾などのレーダ特有の処理については記載していないことをあらかじめご了承ください。レー

ダ技術全般を理解するのに役立つ資料として文献1)~4)を挙げるので、興味のある読者はそちらもご参照いただきたい。

以下、本書の構成はつぎのようになっている。1章では、レーダの歴史、機器構成、計測可能な物理量、およびレーダの用途を解説し、レーダの概要を理解することを目的とする。2章では、レーダの回線設計を行うためのレンジ方程式について解説する。3章では、レンジ方程式の主要パラメータであるアンテナ利得、受信雑音電力、レーダ断面積を決める物理的な要因を解説する。4章では、レーダで用いられる各種変復調方式を示し、変調方式の各パラメータと探知性能の関係を解説する。5章では、しきい値設定による信号検出法および検出性能について解説する。

上述したように、筆者の経験では、無線通信とレーダに関しては共通する理論や処理方式が多いと思われる。このため、おのおの研究分野を理解することにより、それぞれの課題解決への糸口、あるいは新たな研究テーマの発掘につながるのではないかと考えている。例えば、本書内でも触れるが、海外では周波数ひっ迫問題の解決策の一つとして、通信信号とレーダ信号を共用化する研究が数多く報告されている。このような異分野の融合領域は、将来的に注目すべきテーマの一つではないかと筆者は考えている。読者の皆さんにとって、本書が課題解決の糸口や新たな研究テーマ発掘の契機となったとすれば望外の喜びである。

なお、本書は、電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究専門委員会主催の第4回コミュニケーションクオリティ基礎講座ワークショップで作成したテキストをベースに追記／修正を行ったものである。ワークショップテキスト作成の際には、実行委員の皆さんから多くの貴重な意見をいただいた。ここに改めて感謝申し上げたい。

2019年4月

高橋 徹

目 次

1. レーダの概要

1.1 レーダの歴史	1
1.2 レーダの基本構成	4
1.3 レーダで推定可能なおもな物理量	5
1.3.1 目標位置の推定	5
1.3.2 相対移動速度の推定	7
1.4 レーダの種類	8

2. レンジ方程式

2.1 無線通信のレンジ方程式：フリスの伝達公式	10
2.2 レーダのレンジ方程式（1）：孤立点目標のレーダ方程式	13
2.3 レーダのレンジ方程式（2）：体積分布型目標のレーダ方程式	15
2.4 レーダのレンジ方程式（3）：面積分布型目標のレーダ方程式	17
2.5 レーダのレンジ方程式（4）：平均電力表現によるレーダ方程式	20
2.6 損失要因	22

3. アンテナ／受信雑音／レーダ断面積

3.1 アンテナ	25
3.1.1 開口面アンテナの概要	26
3.1.2 開口面アンテナの利得	27
3.1.3 開口面アンテナの放射指向性（1）：方形開口一様分布	29
3.1.4 開口面アンテナの放射指向性（2）：円形開口一様分布	31
3.1.5 開口面アンテナの放射指向性（3）：円形開口ガウス分布	33

3.1.6	アレーアンテナの概要	34
3.1.7	アレーアンテナの放射指向性解析	36
3.1.8	リニアアレーの放射指向性	38
3.1.9	リニアアレーのグレーティングローブ	39
3.1.10	等振幅リニアアレーのアンテナ利得，サイドローブレベル， ビーム幅	41
3.1.11	平面アレーの放射指向性	43
3.1.12	4角配列平面アレーの放射指向性	44
3.1.13	任意周期配列平面アレーの放射指向性とグレーティングローブ チャート	46
3.1.14	平面アレーのアンテナ利得	50
3.1.15	4角配列平面アレーと3角配列平面アレーの比較	51
3.2	受信雑音	53
3.2.1	受信系雑音源の概要	53
3.2.2	外来雑音電力(アンテナ受信雑音電力)	54
3.2.3	低雑音増幅器で発生する雑音電力	58
3.2.4	損失のある給電回路で発生する雑音電力	59
3.2.5	システム雑音温度	59
3.3	レーダ断面積(RCS)	61

4. 変復調方式

4.1	変調波の表現式とアナログ変調	66
4.1.1	変調波の表現式	66
4.1.2	振幅変調	67
4.1.3	位相変調・周波数変調	69
4.2	無線通信におけるデジタル変調	71
4.3	レーダの変調方式概要	72
4.4	レーダの変調方式(1):パルス変調方式	73
4.4.1	送信波形と受信データ列	73
4.4.2	マッチドフィルタ(fast time 信号処理)	78
4.4.3	パルス変調信号のマッチドフィルタ	81
4.4.4	パルス変調信号の送信スペクトルと雑音帯域幅	83

4.4.5	ドップラー周波数が既知の理想的なマッチドフィルタ出力	85
4.4.6	ドップラーシフトが未知のマッチドフィルタ出力	87
4.4.7	パルス変調信号のアンビギュイティ関数	88
4.4.8	パルス変調信号に対するマッチドフィルタ処理後の信号対雑音電力比	90
4.4.9	ドップラー信号処理 (slow time 信号処理)	91
4.4.10	離散フーリエ変換による損失 (straddle 損失)	94
4.4.11	ドップラー周波数による目標分離	97
4.4.12	PRF の選定方法	98
4.5	レーダの変調方式 (2) : 線形周波数変調パルス方式	100
4.5.1	LFM パルス信号の送信波形	100
4.5.2	LFM パルス信号の周波数スペクトル	102
4.5.3	LFM パルス信号のアンビギュイティ関数	104
4.5.4	LFM パルス信号による距離応答特性	106
4.5.5	LFM パルス信号のドップラー応答とレンジドップラーカップリング	107
4.5.6	LFM パルスのマッチドフィルタ処理後の信号対雑音電力比と パルス圧縮利得	109
4.6	レーダの変調方式 (3) : 符号位相変調パルス方式	110
4.6.1	2 値位相変調 : バーカー符号による位相変調	111
4.6.2	バーカー符号位相変調信号の周波数スペクトル	114
4.6.3	バーカー符号位相変調信号のアンビギュイティ関数	115
4.6.4	多値位相変調方式	117

5. 信号検出

5.1	デジタル無線通信における信号検出	120
5.1.1	熱雑音によるシンボル誤り率	120
5.1.2	フェージング環境下でのシンボル誤り率	122
5.2	レーダにおける信号検出の概要	123
5.3	複素ガウス分布不要信号に対する誤警報確率と変動のない目標の 検出確率	127
5.3.1	誤警報確率としきい値の関係	128
5.3.2	検出確率としきい値の関係	130
5.3.3	ノンコヒーレント積分による検出確率向上	132

5.4 変動のある目標に対する検出確率.....138
5.5 一定誤警報確率 (CFAR) 処理.....142
5.6 CA-CFAR の検出性能解析.....146

付 録.....149

付録 A 式 (3.33) の導出..... 149
付録 B 式 (3.61) の導出..... 150
付録 C 式 (5.11) の導出..... 152
付録 D 式 (5.20) の導出..... 153
付録 E 式 (5.25) の導出..... 154
付録 F 式 (5.39) の導出..... 155
付録 G 式 (5.40) の導出..... 156
付録 H 式 (5.45) の導出..... 158
付録 I 式 (5.50) の導出..... 159
付録 J 式 (5.65) の導出..... 160
付録 K 式 (5.67) の導出..... 161

引用・参考文献.....162

索 引.....165

1. レーダの概要

無線通信、レーダともに電波を用いたシステムである。無線通信では電波を用いて遠隔地に情報を伝達することを目的としているのに対し、レーダは電波を用いて遠隔地に存在する物体を探知することを目的としている。目的だけ見ると、両者はまったく異なるもののように見えるが、“遠隔地に存在している情報を、電波を用いて取得する”という見地に立てば、両者の類似性を指摘することもできる。実際に、ハードウェアや信号処理などの要素技術では両者で共通な考え方をできるものも多い。

本章では、無線通信との共通性の視点を入れて、レーダの歴史や装置構成を述べる。また、レーダ固有の目的である物体の位置や速度の推定方法を概観し、代表的なレーダの種類を述べる。

1.1 レーダの歴史

レーダ (radar) という名称は、今日では固有名詞化しているが、もともと RAdio Detection And Ranging の略語である。文字どおり電波による探知と距離の計測 (測距) を意味している。その歴史は古く、端緒は 1900 年代初頭にまでさかのぼる。

ここでは、関連技術も含め、レーダの歴史を概観する^{5)~7)†1}。

〔1〕 1900 年代初頭

電波利用の端緒となったのは、1888 年の H. R. Hertz による電磁波の実証実験である。これは、J. C. Maxwell が 1864 年に Maxwell の方程式として完成した理論により存在が予言された電磁波の放射と検出に初めて成功した実験であ

†1 肩付きの数字は、巻末の引用・参考文献を表す。

2 1. レーダの概要

り、その後の無線通信やレーダの発展の基礎となるものである。

1901年には、有名な G. Marconi による大西洋横断無線通信実験が行われ、無線通信の有効性が認識され、その後の飛躍的な発展へとつながる。一方、レーダに関しては、1904年に C. Hulsmeyer が電波を用いた船舶衝突防止装置を開発し、ライン川での実証実験に成功し、これが初のレーダ特許として認められた。ただし、このときは目標探知だけであり、測距はできなかった。このように、無線通信とレーダの原理検証がほぼ同時期に行われたことは興味深い。しかしその後、無線通信の実用化が飛躍的に進展したのに対して、レーダが現在に通じる形で実用化されるのは1930年代半ばに入ってからであった。

なお、その後のレーダにおいて飛躍的な性能向上を可能にしたフェーズドアレーの原理が考え出されたのも、このころであった⁸⁾。1899年に S. G. Brown による特許出願(イギリス)、1902、1903年に A. Blondel による特許出願(ベルギー)があった。1905年には K. F. Braun (ブラウン管の発明者) が円形配列の3素子モノポールアレーを用いて、周方向に送信ビーム方向を変える実験を行い、フェーズドアレーの原理実証を行った。フェーズドアレーは、アレーアンテナの各素子アンテナの励振位相を制御して電波の送受信方向(ビーム方向)を電子的に走査するアンテナ方式であり、いわゆる空間信号処理の基礎となる概念である。この技術はレーダの飛躍的な発展に大きく寄与しただけでなく、アダプティブアレーの研究を経て今日の MIMO (multiple-input and multiple-output) 通信技術へとつながっている。

〔2〕 1930 年代

1930年代になると、軍事目的で数多くのレーダが実用化された。これは、長距離爆撃機の出現により、遠距離から航空機を探知可能なレーダの必要性が高まったためといわれている。また、高出力発振器などの各要素技術の開発も進み、探知距離などが実用レベルの性能になったことも一つの要因である。ただし、この時代は CW 波によるレーダがおもであり、かつ送信と受信の各アンテナが離れているバイスタティックレーダであった。現在に通じる形のパルスレーダが実証されたのは1936年アメリカ海軍研究所(Naval Research

Laboratory : NRL) によってである。その後、VHF/UHF帯を中心に、欧米各国で軍用途のレーダ開発／実用化が進んだ。

〔3〕 1940 年 代

1939年にイギリスで、マイクロ波帯での高出力空洞共振器マグネトロンが発明されたのを契機として、戦時下ということもあり、L帯、S帯、X帯などのマイクロ波帯でのレーダ開発が急激に進められた。VHF/UHF帯よりも高い周波数帯であるマイクロ波帯を使うことにより、アンテナの狭ビーム化による角度分解能向上と、信号周波数帯域幅の広帯域化による距離分解能向上が可能になった。また、高周波化によりアンテナが小型化し、航空機搭載も可能になった。

さらに、機械駆動による位相調整回路を用いたフェーズドアレーがアメリカにおいて実用化されたのも1940年代である。また、モノパルス追尾やMTI (moving target indication) といった現在でも使われているレーダ技術が開発されたのも1940年代後半である。

〔4〕 1950 年 代

戦時中の実用開発を受けて、1950年代にはレーダの理論体系化が進んだ。その中には、4章のマッチドフィルタ理論 (パルス圧縮技術)、5章の信号検出の確率理論も含まれる。また、パルス圧縮技術が実証され、合成開口レーダの研究開発が開始されたのも1950年代である。さらに、気象、大気、宇宙観測などの軍用途以外にもレーダが用いられるようになった。

〔5〕 1960 年 代

対空搜索レーダ用途で、電子制御の2次元ビーム走査のフェーズドアレー (AN/SPS-32/33) が、1961年アメリカで初めて実用化された。水平方向のビーム走査はフェライト移相器を用いた位相制御によるビーム走査、垂直方向は周波数制御によるビーム走査をする完全電子制御を実現した。完全電子制御のフェーズドアレーの実用化により、ビーム方向の瞬時切り替えが可能になり、レーダの飛躍的な能力向上につながった。

〔6〕 1970年代以降

1970年代に入ると、デジタル信号処理による処理能力向上が図られるとともに、受信機の低雑音化のためフロントエンド部に半導体の利用が始まった。

1980年代には、半導体技術の進展により、多数のアクティブフェーズドアレーレーダが開発／実用化された。また、気象レーダが急速に発展したのも1980年代である。

1990年度以降になると、デジタルプロセッサの発展により、アンテナと信号処理を組み合わせた処理、例えばデジタルビームフォーミング (digital beam forming : DBF) 技術が開発された。これらのデジタル信号処理による技術は、無線通信のアダプティブアレーや MIMO 技術ともつながっている。

1.2 レーダの基本構成

レーダの基本構成を図 1.1 に示す。図 1.1 の構成は送信と受信でアンテナを共用するモノスタティックレーダの構成を示している。送信と受信を別アンテナ

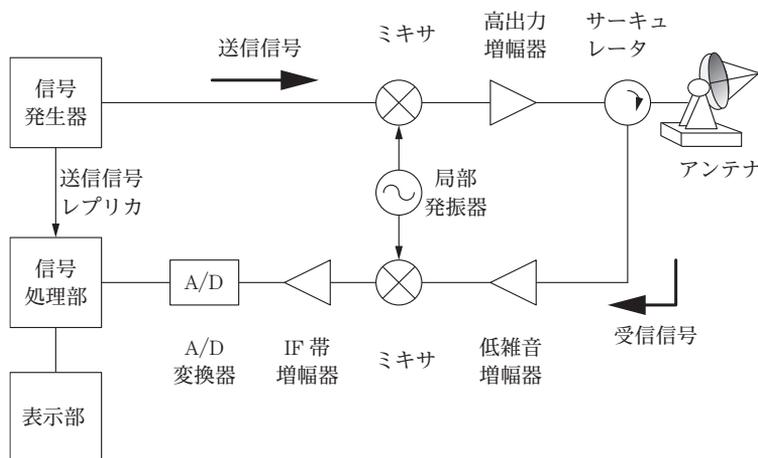


図 1.1 レーダの基本構成 (モノスタティックレーダ)

ナとし、かつ両者の位置が離れている構成はバイスタティックレーダと呼ばれる。現在、実用化されているレーダは、図 1.1 のモノスタティック構成が一般的である。また、近年のレーダでは、信号処理はデジタル信号処理で行われるのが一般的であるため、図 1.1 ではそのような構成図を示している。

図 1.1 より、アンテナが送受共用となっていることを除くと、レーダを構成するアンテナや高周波回路などのアナログ部は、通信用途と機能的には大きな差はないといえる。レーダよりも通信のほうが、一般的に瞬時の送受信信号が広帯域である、レーダでは電源効率を高くするため高出力増幅器を飽和動作させるのに対して通信では線形動作させることが多いなど、細部の性能面では違いがあるものの、機能的な大きな違いはアナログ部にはない。実際に、レーダと通信でアナログ部を共用する開発例も報告されている⁹⁾。デジタルプロセッサの発展により、デジタル信号処理が主流となった現在において、レーダと通信の違いは送信波形生成とその処理方法に集約することができる。

1.3 レーダで推定可能なおもな物理量

レーダは、目標物に向けて電波を送信し、その反射波を計測する。計測結果により目標の有無を探知し、目標が存在する場合にはその位置を推定することができる。また、レーダと目標との相対速度を推定することができる。

1.3.1 目標位置の推定

目標の位置(座標)は、図 1.2 に示すように、角度方向(方位角 AZ 、仰角 EL)とレーダから目標までの距離 R を計測することにより求めることができる。

角度方向はアンテナのメインビーム方向そのものであるため、メインビーム方向を目標の角度方向とすることが最も単純な角度測定(測角)方法である。ただし、この場合、メインビーム内に存在するすべての目標が同一角度に存在するとみなされる。すなわち、角度分解能はアンテナパターンのビーム幅によ

索引

【あ】

アクティブフェーズドア
レー 35
アップチャープ 101
アレーアンテナ 34
アレーファクタ 37
アンテナ利得 11,28,41,50
アンビギュイティ関数
88,104,115

【い】

位相変調 69

【か】

開口効率 29
開口面アンテナ 26
外来雑音 54
外来雑音温度 56
可視領域 48
カーソンの経験則 71
ガードセル 142

【き】

輝度温度 55
距離分解能 86,107,113

【く】

クラッタ 17,97,127,129
グレーティングローブ 39
グレーティングローブ
チャート 46

【け】

検出確率 125,130

【こ】

黒体放射 54
誤警報確率 125,128
コヒーレント積分
20,93,127
コンスタレーション 71

【さ】

最ゆう原理 144
雑音指数 58
雑音帯域幅 21,83
雑音電力 12
サンプリング周期 75
サンプリング周波数
75,85,104

【し】

しきい値判定 124
指数分布 129
システム雑音温度 12,59
自由度4のカイ2乗分布
139
周波数変調 69
受信雑音 53
受信信号マトリクス 76
信号対雑音電力比 12,79
振幅変調 67
シンボル誤り率 120

【す】

スワーリングケース0 132
スワーリングケース1 146
スワーリングモデル 138

【せ】

正3角配列 51
正方形配列 51
線形周波数変調 100

【そ】

送信 duty 21
相補誤差関数 122
素子アンテナ 34
素子占有面積 51
素子利得 51

【た】

帯域系 67
対数ゆう度関数 144
ダウンチャープ 101
多値位相変調 117

【ち】

チャープパルス 100
チャーププレート 101
直交振幅変調 71

【て】

低サイドロープ化 33
低雑音増幅器 58
デジタル位相変調 71

デジタル周波数変調 71
 デジタル振幅変調 71
 デジタルビームフォーミ
 ング 36
 停留位相法 102
 テストセル 142

【と】

等価入力雑音 60
 等価ベースバンド系 67
 ドップラーアンビギュイ
 ティ 94
 ドップラー効果 7
 ドップラー周波数 8,75

【な】

仲上・ライス分布 130,154

【ね】

ネイマン・ピアソン規範
 124

【の】

ノンコヒーレント積分
 127,132

【は】

バイスタティックレーダ 5
 バーカー符号 111
 パッシブフェーズドアレー
 35
 パルス圧縮 3,20
 パルス圧縮利得 109
 パルス繰り返し周期 20,74

パルス繰り返し周波数 74
 パルス幅 20,74
 パルス変調 20,73
 パルスレーダ 2,6

【ひ】

ビーム走査 35

【ふ】

フェージング 122
 フェーズドアレー 2,35
 複素ガウス分布 127
 符号位相変調 110
 プランク定数 55
 プランクの法則 55
 フランク符号 117
 フリスの伝達公式 10

【へ】

平面アレー 43
 変調レート 101

【ほ】

放射輝度 55
 ボルツマン定数
 12,54,55,79

【ま】

マーカムの Q 関数 131
 マッチドフィルタ
 3,22,77,78

【め】

面積反射率 17

【も】

モノスタティックレーダ 4

【り】

リニアアレー 38
 リファレンスセル 142

【れ】

レイリー・ジーンズの法則
 55
 レイリーフェージング 122
 レイリー分布 129,139,153
 レーダ断面積 14,61
 レーダ反射率 16
 レーダ方程式
 孤立点目標の—— 13
 体積分布型目標の——
 15
 平均電力表現による——
 20
 面積分布型目標の——
 17
 レンジ 77
 レンジアンビギュイティ
 99
 レンジドップラーカップリ
 ング 107
 レンジドップラーマップ
 78
 レンジピン 77
 レンジプロファイル
 86,106,115

【A】

ASK 71

【B】

BPSK 変調 120
 BT 比 110

【C】

CA-CFAR 142
 CFAR 142

CFAR 損失	24,147				
CPI	20,74,139		[L]	PSK	71
				[Q]	
[D]		LFM	100		
		low PRF	99	QAM	71
dwelt time	20,74		[M]	[R]	
[F]		medium PRF	99	RCS	14,61
fast time	77		[P]	[S]	
FSK	71				
		P3 符号	117	slow time	77
[H]		P4 符号	117	SNR	12,79
high PRF	99	PRF	74,98	straddle 損失	24,94
		PRI	20,74		

— 著者略歴 —

- 1992年 早稲田大学理工学部電気工学科卒業
1994年 早稲田大学大学院修士課程修了（電気工学専攻）
1994年 三菱電機株式会社入社
現在に至る
- 2010年 博士（工学）（早稲田大学）

通信技術者のためのレーダの基礎

Principles of Radar for Communication Engineers

© Toru Takahashi 2019

2019年7月5日 初版第1刷発行



検印省略

著者	たか	はし	とある
	高	橋	徹
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		
製本所	有限会社	愛千製本所	

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 978-4-339-00923-1 C3055 Printed in Japan

(大井)



JCOPY < 出版者著作権管理機構 委託出版物 >

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

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います。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いません。落丁・乱丁はお取替えいたします。