

電波を使った物体検出や距離測定の実例

# レーダのしくみと 応用技術

見本

米本 成人  
藤井 智史  
角張 泰之  
牛尾 知雄



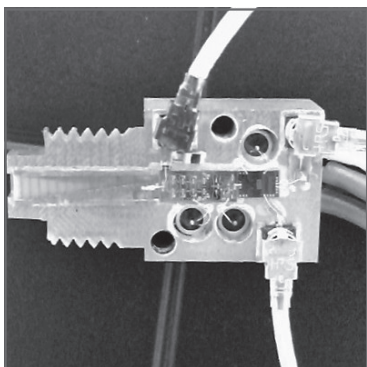
このPDFは、CQ出版社発売の「レーダのしくみと応用技術」の一部見本です。  
内容・購入方法などにつきましては以下のホームページをご覧ください。

内容 <https://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/51/51031.htm>  
購入方法 <https://www.cqpub.co.jp/order.htm>

## 【CONTENTS】

動作原理と基本特性…1  
1cm<sup>3</sup> サイズの 76GHz レーダ・モジュールの試作…6  
波浪や潮流を観測する 13.5MHz 海洋レーダ…10  
空港内で地上走行する航空機の位置を把握するパッシブ・レーダ…18  
雨や雲の 3 次元分布を推定できる気象レーダ…26  
複数のレーダとカメラを組み合わせた滑走路異物検出システム…31  
レーダの歴史と進化…35

**CQ出版社**



## 電波を使った物体検出や距離測定の実例

# レーダのしくみと応用技術

## 第1回 動作原理と基本特性

米本 成人 Naruto Yonemoto

高周波デバイスの高性能化と低価格化が進み、ワンチップのミリ波レーダ用チップも発売されているほどです。ただし、日本国内で運用できるレーダを作るのは法規上のハードルが高く、不可能ではないものの、未だに困難を伴います。

しかし自動運転では、夜間で性能が落ちるカメラや霧で性能が落ちるLiDARを補間するためにレーダを使いたいなど、低コスト化してきたこともあり、より身近な存在になりつつあります。

そこで本連載では、製作可能かどうかにはあまりこだわらず、レーダの変調方式や帯域、電力、アンテナなどについて、専門家と話が度る程度の理解を目標に、原理や歴史、国内で使われている具体例を紹介します。

〈編集部〉

### 電波を使って物体検出と距離測定を行うのがレーダ

レーダ(Radar: Radio Detection and Ranging)は電波を用いて物体を検出し、その距離を測定する装置です。レーダと一口に言っても、さまざまな用途に応じて異なる原理を用いて測定しています。

まずは各レーダの原理を説明し、その違いを明確にします。難しい計算はできるだけ使わずに、レーダ性能の計算ができる原理を解説します。

#### ● レーダの方式

レーダには大きく分けて3つの方式があります。この分類に従って、それぞれのレーダの原理について解説します。

##### ● 1次レーダ

自ら電波を発し、物体からの反射波を計測する

##### ● 2次レーダ

応答器をもった物体に質問して、返答までの時間を計測する

##### ● 受動型レーダ

自らは電波を発せず、受信だけでレーダ画像を生成する

### 自分で送信して反射波を受信する 1次レーダ

● 一般的なレーダのイメージ通りのものが1次レーダ  
通常レーダといわれてイメージするのは、この方式のレーダを示すことが多いはずだ。

図1に、1次レーダによる測定のイメージを示します。レーダ本体から電波を送信し、物体に反射して戻ってくる成分を受信します。レーダ内部では、送信してから受信されるまでの時間を測定して、物体までの距離を求めます。

見本

#### ● パルス・レーダ

パルス・レーダは、送信信号として短時間だけ電波を発するパルスを用います。図2に、送受信信号の時間的な波形を例示します。

送信信号として幅の狭いパルス状の電波を送信すると、その電波は物体によって反射されて送信位置へと戻ってきます。この時、送信信号に対して物体の距離分だけ遅れて受信信号が観測されます。

この遅れ時間( $\Delta t$ )に電波の速度(光速 $c$ )を掛けると、電波の進んだ距離が算出されます。これは電波が往復する距離となるので、その半分为物体までの距離 $d$ となります。

$$d = \frac{c \Delta t}{2} \dots\dots\dots (1)$$

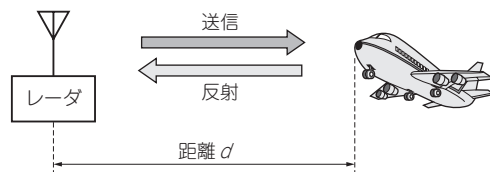


図1 レーダの原理図

レーダから送信された電波は物体に当たって乱反射する。その反射のうち、レーダへ戻ってきた成分を分析して、物体までの距離を求める

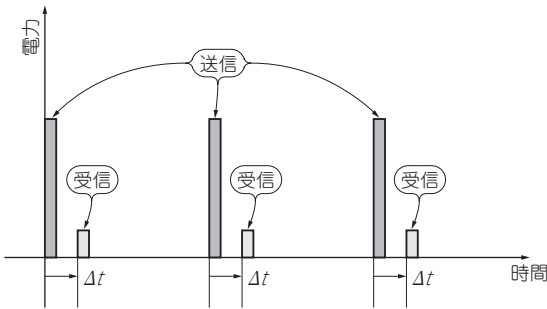


図2 パルス・レーダで物体までの距離を求める原理

レーダから送信されたパルス信号は、物体に当たって戻ってくる。受信信号は物体までの距離の分だけ遅れて観測される

### ● レーダの受信電力（レーダ方程式）

レーダで受信できる電力を考えたいのですが、その前に、電波の伝搬を理解する必要があります。より簡単な、片道の電波の伝搬について考えてみます。

▶ 電波は距離の自乗に反比例して弱くなる

図3に示すように、送信電力が $P_t$  [W]の送信機に最大ゲイン $G_t$ のアンテナを取り付けて波長 $\lambda$  [m]の電波を送信し、最大ゲイン方向に距離 $d$  [m]だけ離れて配置されたゲイン $G_r$  (有効面積 $A_r$  [m<sup>2</sup>])のアンテナで受信する場合、どれくらいの電力が受信できるかを考えてみます。

送信電力はアンテナによって強められ、 $P_t G_t$ の合成電力となります。距離が $d$ だけ離れた受信点では、半径 $d$ の球の表面積に応じて電力密度が薄まります。受信アンテナは、その電力密度とアンテナの有効面積 $A_r$ を掛けた分だけを受信できます。

これを整理して、アンテナ有効面積との公式を利用すると、次式が求まります。提唱したHarald T. Friisの名前を冠して「フリスの伝達公式」と呼ばれます。

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} A_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2} \dots\dots\dots (2)$$

アンテナの有効面積 $A$ とゲイン $G$ の関係については、次節で解説します。

このフリスの伝達公式は、電波の片道の伝搬関数を表現しています。同じ装置を用いて電波を片道伝搬させる場合、受信電力は距離 $d$ の2乗に反比例する、ということは、ぜひ覚えておきましょう。

▶ レーダは電波が往復ぶん減衰する

次に、電波が往復するレーダの場合はどのように計算できるかを考えてみます。

図4に示すように、ゲイン $G$  (有効面積 $A$  [m<sup>2</sup>])の送受信アンテナは共用として、送信電力が $P_t$  [W]、距離が $d$  [m]離れたところにレーダ断面積 $\sigma$  [m<sup>2</sup>]の物体があるとき、物体から反射されて戻ってくる電力を求めましょう。

往路は、先に説明したように距離 $d$ の地点で電力密

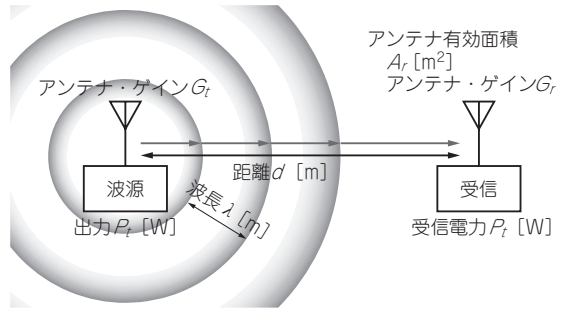


図3 フリスの伝達公式のイメージ

波源から送信された電波は、アンテナで強められて球面状に広がる。受信点ではアンテナの有効面積の分だけ電力として取り出せる

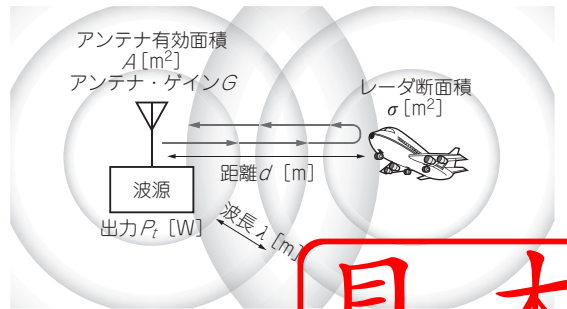


図4 レーダの受信電力

レーダから送信された電波は球面状に広がって物体に当たる。物体のレーダ断面積分だけのエネルギーが逆方向に、球面上に広がりながら戻ってくる

度を計算できます。その位置にレーダ断面積 $\sigma$ の物体があるので、それに乗じたエネルギーが反射波となります。

この反射波の復路でも、往路と同様に距離が $d$ 離れたところでは電力密度が下がり、アンテナの有効面積分だけが抽出できます。

これを整理して、アンテナ有効面積との公式を利用すると、無線技術士の試験などで見かけるレーダ方程式が得られます。

$$P_r = \frac{P_t G}{4\pi d^2} \sigma \frac{A}{4\pi d^2} = \frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 d^4} \dots\dots\dots (3)$$

ここで強調しておきたいのは、レーダの場合、同じ装置で同じ物体を検出するとき、受信電力は物体までの距離 $d$ の4乗に反比例するということです。よって、受信できる電力は非常に小さくなります。

レーダで遠くの物体を検出するためには、共振を起こすことなく増幅率を高くする、ノイズ・フロアを低減するために電子回路のノイズ対策を過剰なくらい行うなど、高度なアナログ回路の製造技術が必要となってきました。

### ● アンテナ・ゲインの定義

レーダは電波を送信して、物体から反射するなどし

見本