

Keysight Technologies

レーダー距離方程式の導出

Application Note
パート1

$$R_{\max}^4 = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{kT_0 B_n F_n (S/N) (4\pi)^3}$$



レーダーの現在のトレンドとテクノロジー

エンジニアや科学者が、電磁気学の初期の実験の功労者として日頃口にする名前が、ハインリッヒ・ヘルツ、ジェームス・クラークス・マクスウェル、ニコラ・テスラです。19世紀後半から20世紀初頭にかけて行われた彼らの研究から、21世紀のレーダーシステムまでの道のりをたどれば、基本的な概念(金属物体は電波を反射する)に基づいて、性能、コスト、サイズ、機能などの特定のニーズを満たす、さまざまなテクノロジーが生み出されてきたことが分かります。これらのテクノロジーは、軍用途(検知、測距、トラッキング、回避、ジャミング)では限界まで利用されています。

民生用エレクトロニクスや通信の場合と同様に、引き続き機能と性能を向上させるための手段となっているのが、純粋なアナログ設計からハイブリッドアナログ/デジタル設計への進化です。レーダーシステムでは、高周波化がさらに進み、信号はますます高速化しています。また、信号フォーマットと変調方式(パルスなど)もさらに複雑化し、広い帯域幅が必要になっています。

システムの動作を偽装してジャミングを防止するために、高度なデジタル信号処理(DSP)手法が使用されています。アクティブ電子走査アレイ(AESA)などのアーキテクチャーでは、窒化ガリウム(GaN)などの高度な材料を用いてフェーズド・アレイ・アンテナが実装され、ビームフォーミングとビームステアリングの性能を高めています。

その最たる例が、数千個の送信/受信(T/R)モジュールが連携して動作するフェーズド・アレイ・レーダーです。これらのレーダーでは通常、性能を向上するためのさまざまな高度な手法(サイドローブヌル化、スタガードパルス繰り返し間隔(PRI)、周波数アジリティ、リアルタイム波形最適化、広帯域チャープ、ターゲット認識機能)が使用されています。

動作環境内の複雑さの範囲には、地表面クラッター、海面クラッター、ジャミング、干渉、無線通信信号などの電磁界ノイズが含まれる可能性があります。これには、複数のターゲットが存在し、それらの多くがレーダー断面積(RCS)が小さくなる材料やテクノロジーを利用している場合も含まれます。

これらの最新の複雑さはすべて、数学的な基礎であるこのレーダー距離方程式に従っています。

レーダーシリーズ

このアプリケーションノートは、レーダーシステムとそれに関連する測定の課題と解決策を掘り下げたシリーズの第1弾にあたります。シリーズ全体を通して、不変的な基本事項と最新のアイデアを合わせて紹介していきます。

各アプリケーションノートの補足記事で、さまざまなソリューション(ハードウェアとソフトウェア)を取り上げています。これには、レーダーシステムの進化と共に登場する、将来を見据えた機能も含まれます。

このシリーズのアプリケーションノートが、新しいシステムのデザインやシステムのアップグレードなどの日々の作業で、基礎的な資料またはタイムリーな資料として少しでもお役に立つことを願っています。

レーダー距離方程式の導出

レーダーで最も重要なものは、3次元空間をスキャンし、単なる存在の有無から、位置、速度、方向、形状、識別などの詳細まで、検出された物体についての情報を集める能力です。ほとんどの実装では、レーダーシステムにより、パルスドRF信号またはパルスドマイクロ波信号を生成し、ターゲットに向かって発射し、その信号を送信したアンテナと同じアンテナで収集します。

レーダーレーシーバー位置での信号パワーは、送信パワー、アンテナ利得(または開口面サイズ)、ターゲットがレーダー信号を反射する強さ(RCS)に比例します。さらに重要な点として、信号パワーは、ターゲットまでの距離の4乗に間接的に比例します。

このプロセス全体は、レーダー距離方程式によって記述されます。レーダー距離方程式には重要な変数が組み込まれていて、最適な性能を確認して保証するために行なう測定を理解する基礎となります。

距離方程式の導出は、点源アンテナ(すなわち、等方性放射体)の単純な球散乱伝搬モデルから始めます。単純化するために、アンテナが仮想球の内部を照射する際の単位表面積当たりのパワー密度は同じであると仮定します(図1)。球の表面積は、球の半径の関数です。

$$A_s = 4\pi R^2$$

A_s = 球の表面積
R = 球の半径

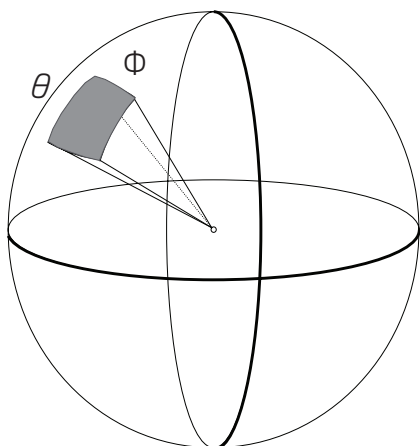


図1. 理想的な等方性アンテナ放射では、単位表面積当たりのパワー密度は等しくなります。

パワー密度を求めるには、全送信パワー (W) を球の表面積 (m^2) で除算します。

$$\rho = \frac{P_t}{A_s} = \frac{P_t}{4\pi R^2}$$

ρ = パワー密度 (W/m^2)
 P_t = 全送信パワー (W)

レーダーシステムは、放射されたエネルギーをターゲットに集中させるために指向性アンテナを使用するので、アンテナの指向性利得 G (ターゲットに向けられたパワーと理想的な等方性アンテナからのパワーに対する比として定義される)を考慮するために方程式を変更します。

$$\rho_T = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2}$$

ρ_T = 指向性アンテナからターゲットに向かうパワー密度
 G_t = 指向性アンテナの利得

この方程式は、ターゲットに当たる送信パワー密度を表しています。このエネルギーの一部はさまざまな方向に反射され、一部が再放射されてレーダーシステムに戻ります。再放射されてレーダーに戻る入射パワー密度の量は、ターゲットのRCS(σ)の関数です。レーダーから見ると、RCSは面積の単位であり、ターゲットサイズの指標です(図2)。

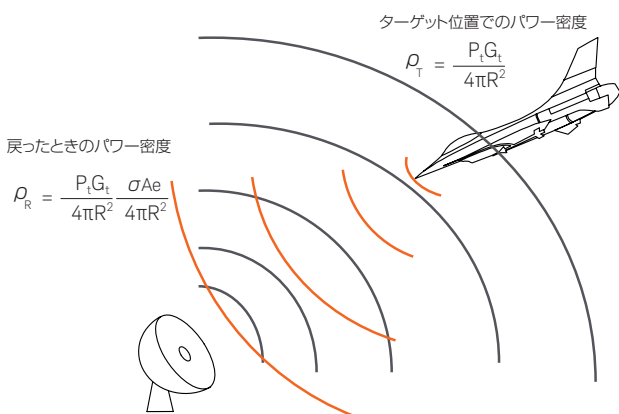


図2. レーダーに戻る反射パワー密度は、ターゲットにおける送信信号のパワー密度に比例し、ターゲットのRCSによる影響も受けます。

この情報を使用して、レーダーアンテナに戻るパワー密度を計算するために、方程式を展開することができます。方程式を展開するには、送信パワー密度に、RCSと球の面積との比を乗算します。

$$\rho_R = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2}$$

ρ_R = レーダーに戻るパワー密度(W/m²)
 σ = RCS(m²)

このように、レーダーアンテナは、ターゲットによって反射された信号の一部を受信します。この信号パワーは、アンテナに戻ってきたパワー密度に、アンテナの有効面積 A_e を掛けた値に等しくなります。

$$S = \frac{P_t G_t \sigma A_e}{4\pi R^4}$$

S = レシーバーで受信した信号パワー (W)
 P_t = 送信パワー (W)
 G_t = 送信アンテナの利得(比)
 σ = RCS(m²)
 R = 半径またはターゲットまでの距離(m)
 A_e = 受信アンテナの有効面積(m²)

アンテナ理論からアンテナの利得と有効面積について以下の関係式が得られます。

$$A_e = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi}$$

G_r = 受信アンテナの利得
 λ = レーダー信号の波長(m)

この関係を用いて、受信信号パワーの方程式を簡素化することができます。モノスタティックレーダーの場合は、アンテナ利得 G_t と G_r は同じです。これがこの導出に当てはまると仮定します。

$$S = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^2 R^4 4\pi}$$

$$\rightarrow S = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

S = レシーバーで受信した信号パワー (W)
 P_t = 送信パワー (W)
 G = アンテナ利得 (送信と受信に同じアンテナを使用すると仮定)
 λ = レーダー信号の波長(メートル)
 σ = ターゲットのRCS(m²)
 R = 半径またはターゲットまでの距離(m)

レシーバー位置での信号パワーが得られたので、次に、レシーバーがどのように信号を処理して情報を抽出するかを解析します。レシーバーの主な制限ファクターは、ノイズとその結果として生じる信号対ノイズ(S/N)比です。

レシーバーの入力におけるノイズパワーの理論的な極限は、ジョンソンノイズ(熱雑音)と呼ばれます。ジョンソンノイズは、電子のランダムな動きによって発生し、温度に比例します。

$$N = kTB_n$$

N = ノイズパワー (W)
 k = ボルツマン定数(1.38×10⁻²³ジュール/K)
 T = 温度(K)
 B_n = システム雑音帯域幅

室温が290 Kのときのレシーバーの入力でのノイズパワーは、4×10⁻²¹ W/Hz、-203.98 dBW/Hz、または-173.98 dBm/Hzです。レシーバーの出力でのノイズパワーは、レシーバー内で発生するノイズにより上記の式によって評価される値よりも常に高くなります。¹ このことから、出力ノイズは、理想ノイズパワーにレシーバーのノイズファクターと利得を掛けた値に等しくなります。

$$N_o = GF_n kTB$$

N_o = 全レシーバーノイズ
 G = レシーバーの利得
 F_n = ノイズファクター

レシーバーの利得は、レシーバーの信号出力と信号入力に対する比として書き換えることができます($G = S_o/S_i$)。ノイズファクター F_n について解くと、以下の式が得られます。

$$F_n = \frac{S_i / N_i}{S_o / N_o} \quad \text{ここで、} N_i = kTB$$

1. 1ノイズファクター以外の制限因子には、発振器ノイズ(位相ノイズ、AMノイズなど)、スプリアス信号、残差、イメージ応答が含まれます。これらの信号は、ノイズに似ているかどうかにかかわらず、受信信号に対するレシーバーの処理能力に影響を与えます。単純化するために、これらの因子はこの導関数には含めません。ただし、位相雑音とスプリアスは、レーダーの性能に影響を与える重要な因子であるため、このシリーズの後のアプリケーションノートで紹介する測定の議論には含まれています。

定義では、ノイズファクターは、入力でのS/Nと出力でのS/Nとの比です。この式を別の形に書き直すことができます。この場合も $G = S_o/S_i$ です。

$$F_n = \frac{N_o}{kT_oB_nG}$$

N_o = 全レシーバーノイズ
 G = レシーバーの利得
 S_o = レシーバーの出力信号
 S_i = レシーバーの入力信号
 T_o = 室温
 k = ボルツマン定数
 B_n = レシーバーの雑音帯域幅

ノイズファクターは、信号がシステムを通過する際の信号対ノイズの劣化を表すため、入力での最小検出可能信号(MDS)を決定することができます。これは、入力での雑音パワー kTB による出力での最小S/N比に対応します。最小 S_o/N_o 条件を満たす場合は、 S_i は S_{min} に近づきます。

$$S_{min} = kT_oB_nF_n \left(\frac{S_o}{N_o} \right)_{min}$$

S_{min} = レシーバーの入力で必要な最小パワー
 F_n = ノイズファクター
 $(S_o/N_o)_{min}$ = レシーバープロセッサが信号を検出するために必要な最小比

これで、システムノイズに対応した必要な最小信号レベルが定義されました。レーダーの最大レンジを計算するには、MDS (S_{min}) が最大レンジ位置のターゲットから反射する信号レベルと等しいとして計算します。 S_{min} が先に示したSの式に等しいとすると、以下の式が得られます。

$$S_{min} = kT_oB_nF_n \left(\frac{S_o}{N_o} \right)_{min} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_{max}^4}$$

この式を変形すると、レーダーの最大レンジについて解くことができます。

$$R_{max}^4 = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{kT_oB_nF_n(S/N) (4\pi)^3}$$

P_t = 送信パワー (W)
 G = アンテナ利得 (送信と受信に同じアンテナを使用すると仮定)
 λ = レーダー信号の波長 (m)
 σ = ターゲットのRCS (m^2)
 k = ボルツマン定数
 T = 室温 (K)
 B_n = レシーバーの雑音帯域幅 (Hz)
 F_n = ノイズファクター
 S/N = 信号を検出するためにレシーバープロセッサが必要な最小S/N比

この式により、レーダーの最大ターゲットレンジをトランスミッターパワー、アンテナ利得、ターゲットRCS、システム雑音指数、最小S/N比の関数として表すことができます。実際には、これはシステム性能の簡略化されたモデルです。性能に影響を与える因子は、他にも多数あります。これには、この方程式を導出する際に行った仮定の変更も含まれます。

考慮すべき2つの追加項目が、システム損失と信号処理中に適用されるパルス積分です。システム内の損失は、送信経路(L_t)と受信経路(L_r)の両方に存在します。従来のパルスドレーダーアプリケーションでは、レーダーアンテナの各位置に対して、あるターゲットから複数のパルスを受信するので、積分によりシステム性能を向上できると仮定することができます。¹ この積分は、理想的ではない可能性があるため、積分対象のパルスの数に基づいた積分効率係数 $E_i(n)$ を使用して、積分を改善できます。

これらの項を含めると、以下の式が得られます。

$$R_{\max}^4 = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma E_i(n)}{kTB_n F_n (S/N) (4\pi)^3 L_t L_r}$$

L_t = 送信経路の損失
 L_r = 受信経路の損失
 $E_i(n)$ = 積分効率係数

議論を簡素化するために、方程式全体を対数(dB)に変換します。

$$40 \log(R_{\max}) = P_t + 2G + 20 \log \lambda + \sigma + E_i(n) + 204 \text{ dBW/Hz} - 10 \log(B_n) - F_n - (S/N) - L_t - L_r - 33 \text{ dB}$$

ここで、

- R_{\max} = 最大距離(m)
- P_t = 送信パワー (dBW)
- G = アンテナ利得(dB)
- λ = レーダー信号の波長(m)
- σ = ターゲットの実測RCS(dB_{sm}、すなわち1平方メートルを基準にしたdB)
- F_n = 雑音指数(dBiに変換されたノイズファクター)
- S/N = 信号を検出するためにレシーバー処理機能に必要な最小S/N比(dB)

33 dBの項は、 $10 \log(4\pi)^3$ から来ています。 $30 \log(4\pi)$ とも記述できます。204 dBW/Hzは、室温でのジョンソンノイズからの値です。RCS(σ)のデシベル項は、dB_{sm}、すなわち球の1メートル断面(1平方メートルの断面積を持つ球)を基準にしたデシベル値です。この球は、RCS測定の標準ターゲットです。マルチアンテナレーダーの場合、各エレメントの性能が等しいと仮定すると、最大距離はエレメントの数に比例します。

1. レーダーのアンテナビーム幅はゼロよりも大きいので、レーダーがある期間にわたって各ターゲット上に存在すると仮定することができます。

距離方程式とシステムブロック図の関連付け

図3に、代表的なレーダーシステムの簡素化したブロック図を示します。システムははるかに複雑である可能性がありますが、ブロック図では6つの必須ブロックに注目します。

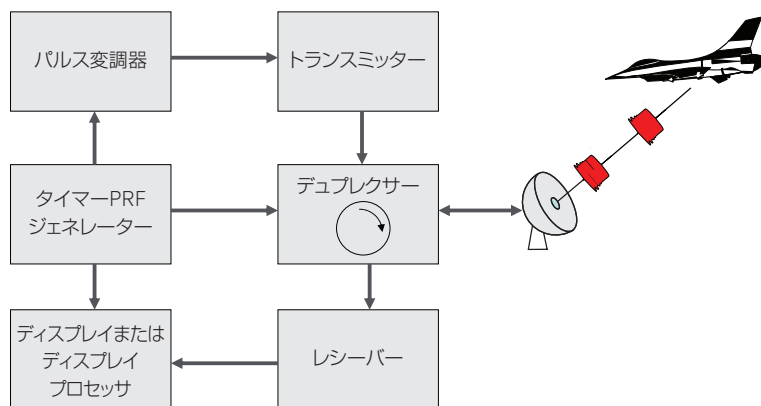


図3. この簡素化したブロック図は、代表的なレーダーシステムの必須エレメントを示しています。

マスタータイマーまたはPRFジェネレーターが、システムの中央ブロックです。パルス変調器、デュプレクサー(送信/受信スイッチ)、ディスプレイプロセッサへの接続を介して、システムのすべてのコンポーネントを時間同期しています。さらに、レシーバーへの接続により、フロントエンド保護、または感度時間制御(STC)などの時間同期利得制御用のゲーティングが得られます。

図4に、ブロック図のトランスミッターセクションとレシーバーセクションの拡大表示を示します。この拡大バージョンには、最新手法の多くを可能にするハイブリッドアナログ/デジタルデザインが示されています。引き出し線は、簡素化されたレーダー距離方程式内の主要変数が関係する位置を示しています。

$$40 \text{ Log}(R_{\text{max}}) = P_t + 2G + 20 \text{ Log } \lambda + \sigma + E_i(n) + 204 \text{ dBW/Hz} - 10 \text{ Log}(B_n) - F_n - (S/N) - L_t - L_r - 33 \text{ dB}$$

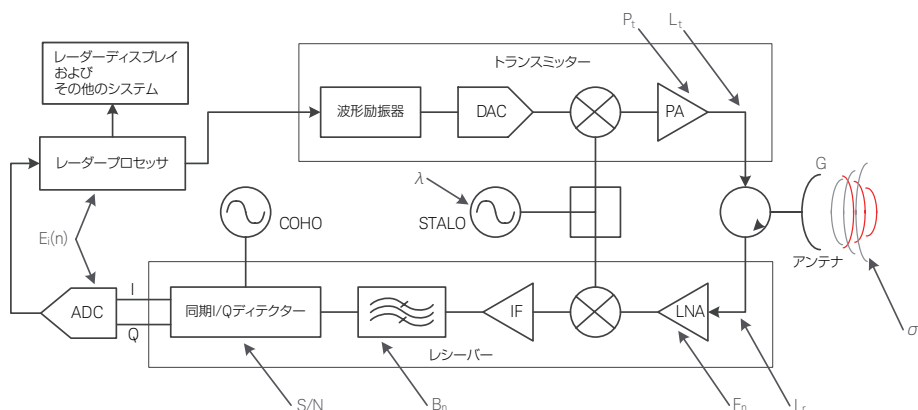


図4. レーダー距離方程式の変数は、この展開されたブロック図の主要エレメントと直接関係しています。

まとめ

ヘルツ、マクスウェル、テスラから数十年たった現在でも、金属物体が電波を反射するという基本的な概念は変わりません。ここで導出したように、レーダー距離方程式には、レーダーシステムが対象物を検出できる最大距離を定義する、基本変数が含まれています。これらの変数はレーダーシステムのブロック図の主要セクションに直接関係するため、レーダーシステムの実際の性能を理解し、特性評価し、検証するための強力なフレームワークとなります。

このシリーズの今後のアプリケーションノートでは、ブロック図の4つのセクション、トランスミッター、レシーバー、デュプレクサー、アンテナに焦点を当てます。これらのブロックは拡張されているため、これからも距離方程式のパラメータと各ブロックまたはコンポーネントの関連付けを行っていきます。

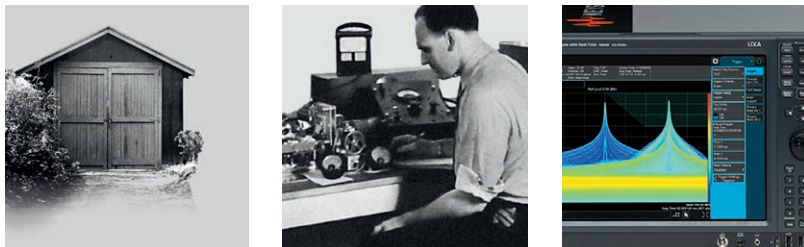
このシリーズの今後のアプリケーションノートでは、レーダーシステムの進化と共に登場するさまざまな機能を備えた製品(ハードウェアとソフトウェア)も取り上げます。

関連情報

- アプリケーションノート：『Radar Measurements』、カタログ番号5989-7575EN
- アプリケーションノート：『レーダー /EW向けの新しいパルス解析手法』、カタログ番号5992-0782JAJP
- アプリケーションノート：『Using SystemVue's Radar Library to Generate Signals for Radar Design and Verification』、カタログ番号5990-6919EN
- アプリケーションノート：『Radar Development Using Model-Based Engineering』、カタログ番号5992-0544EN
- アプリケーションノート：『フェーズド・アレイ・アンテナおよび送受信モジュールのテストの高速化』、カタログ番号5992-1171JAJP
- ウェブキャスト：『フィールドでレーダーシステムを正確に検証する手法』
- Brochure：『マルチチャンネルアンテナ校正、リファレンスソリューション』、カタログ番号5991-4537JAJP
- ポスター：『Radar Fundamentals』
- ポスター：『Electronic Warfare Fundamentals』

ヒューレット・パッカードからアジレント、そしてキーサイトへ

キーサイトは、75年以上もの間、電子計測によって未知なる世界を解き明かしてきました。キーサイト独自のハードウェア、ソフトウェア、スペシャリストが、お客様の次のブレイクスルーを実現します。Unlocking measurement insights since 1939.



1939

未来

myKeysight

myKeysight

www.keysight.co.jp/find/mykeysight

ご使用製品の管理に必要な情報を即座に手に入れることができます。

DEKRA Certified
ISO 9001 Quality Management System

www.keysight.com/go/quality

Keysight Technologies, Inc.
DEKRA Certified ISO 9001:2015
Quality Management System



Keysight Assurance Plans

www.keysight.com/find/AssurancePlans

Up to ten years of protection and no budgetary surprises to ensure your instruments are operating to specification, so you can rely on accurate measurements.

Keysight Infoline

Keysight Infoline

www.keysight.com/find/service

測定器を効率よく管理するためのオンラインサービスです。無料登録により、保有製品リストや修理・校正の作業履歴、校正証明書などをオンラインで確認できます。

契約販売店

www.keysight.co.jp/find/channelpartners

キーサイト契約販売店からご購入頂けます。
お気軽にお問い合わせください。

www.keysight.co.jp/find/AD

キーサイト・テクノロジー合同会社

本社 〒192-8550 東京都八王子市高倉町9-1

計測お客様窓口

受付時間 9:00-18:00 (土・日・祭日を除く)

TEL ☎ 0120-421-345 (042-656-7832)

FAX ☎ 0120-421-678 (042-656-7840)

Email contact_japan@keysight.com

ホームページ www.keysight.co.jp

記載事項は変更になる場合があります。
ご発注の際はご確認ください。