



マイクロ波を用いた計測技術

柴 田 長吉郎*・堀 江 涼*²

Microwave Application on Measurement and Control

Chokichiro SHIBATA and Ryo HORIE

1. は じ め に

マイクロ波が工業計測用センサーとして利用されるようになったのは比較的最近のことである。もともとセンサーとしてのマイクロ波技術は、主として RADAR (Radio Detection And Ranging) 技術を中心として発展してきたもので、その最初の着想は 1904 年頃船舶の追突防止用として現れた。そして第 2 次大戦には英・米・独を中心として本格的な開発が行われ大戦末期にはほぼ現在のものに近い形で、軍用 RADAR が実用化されている。日本でも大戦末期にドイツ軍から RADAR 技術を導入するなどして開発が進められたが、射撃照準用の距離測定装置以上には発展しなかつた戦後しばらくして船舶用・航空管制用・気象用などの RADAR が国産化され戦後 40 年を経た現在ではこれらの RADAR により得られる情報は我々の社会生活を背後から支える不可欠のものになっている。

これらの RADAR は 0.2~100 km の範囲に存在する船舶・航空機などの距離と方位を画面上で点として認識するようなもので、その送信波は幅約 1 μ s、間隔約 1 ms、ピーク電力数 kW でパルス的に発射されるものが多い。通常このような送信電力を得るためにはマグネトロンのようなマイクロ波発振用の電子管を用いる。また従来受信信号を増幅したり、受信機用小電力を発振するためには TWT (進行波管)・クライストロン (速度変調管) などの電子管が用いられてきた。

しかしこれらマイクロ波電子管を用いた装置は工業計測用として用いるには取扱い電力が過大で、また高圧電源、放熱などの制約から小型・軽量化が困難であるために、マイクロ波の工業計測への応用は長い間着想にとどまっていた。

マイクロ波が国内で工業計測に応用され始めたのは、これらの電子管と置替えることのできる半導体素子が開

発されてからのことになる。

1960 年代に各国で盛んに研究されていた発振・変調・検波・増幅用マイクロ波半導体デバイスは 1970 年代に入ると商業ベースに乗り、国内外で安価・大量に出回り始めた。このマイクロ波部品の半導体化によりマイクロ波送受信機は小型・軽量・長寿命に構成できるようになり、それまで着想にとどまっていたマイクロ波の工業計測への応用が種々試みられるようになった。これら初期の開発応用例としてはドプラー方式湯面レベル計・マイクロ波位相検出方式変位計・FMCW 方式レベル計などに関するものが多く見られる。

これらの応用はその後、方式上設計上の検討を重ね、1970 年代後半に実用化され始めた。現在マイクロ波センサーの応用範囲は広くその台数は増えつつある。

2. マイクロ波センサーの特徴

マイクロ波とはその波長がおおよそ 0.1 mm から 1000 mm 程度の電磁波の総称で、短波長側は遠赤外線とその境界を接している。自由空間 (真空) 中を 3×10^8 km/s の速度で伝わり、その伝わり方は準光学的である。

一般にマイクロ波技術はコヒーレントな波を取り扱って発展してきた。すなわち相互に干渉し得る正弦波状のきれいな波を中心にした技術であり、他分野では一般無線電波・光レーザーもこの技術に属する。

このマイクロ波を非接触計測用媒体として工業計測に応用しようとする場合、他の計測用波動媒体である音波や光、放射線では得ることのできない幾つかの長所がある。実用化されたマイクロ波センサーの多くはそれらの長所を最大限に活用したものである。

マイクロ波の第 1 の長所は計測空間雰囲気により受ける散乱、減衰の影響が可視光に比べてずっと小さくできることである。Fig. 1 は海拔 0 m と 4 km についてマイクロ波の大気による減衰を示したものである。マイクロ

昭和 61 年 6 月 10 日受付 (Received June 10, 1986) (依頼解説)

* 新日本無線(株)常務取締役 理博 (Research & Development Laboratory, New Japan Radio Co. Ltd., 2-1-1 Fukuoka Kamifukuoka Saitama pref. 356)

*² 新日本無線(株)マイクロ波工場第一技術課専門課長 (Microwave Division, New Japan Radio Co. Ltd.)

Key words: microwave; measurement; control; pulse; type; target; semi-conductor; transmission; echo; power.

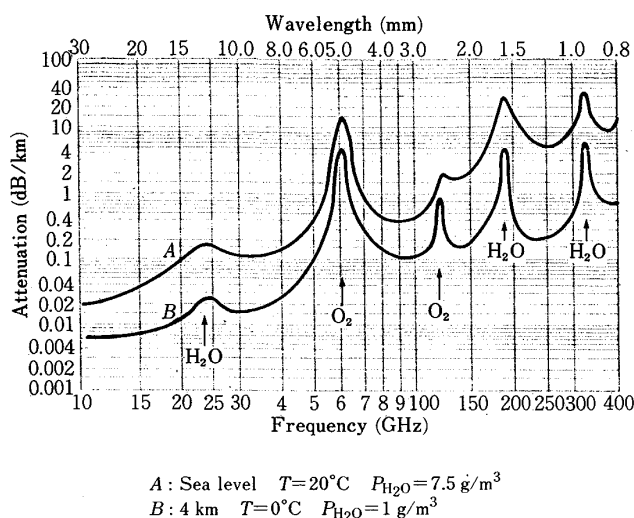


Fig. 1. Atmospheric absorption of microwave.

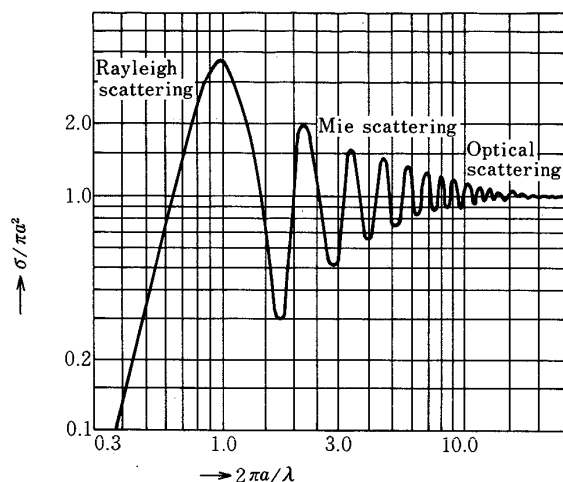


Fig. 2. Back scattering cross section of sphere.

波がターゲット（被測定標的）に当たると電力の一部は吸収されて熱となるがほかには各方向に散乱される。この散乱波のうちセンサーにもどってくるものを後方散乱波または単に反射とよんでいるが、ターゲットがマイクロ波の波長に対してどのような大きさであるかにより散乱のタイプは3種類に大別できる。ターゲットが波長に対して小さい場合はレーリ散乱、同程度の場合はミー散乱（または共振散乱）、大きい場合は光散乱となり、例えば半径 a の球について Fig. 2 に示すような散乱断面積となる。マイクロ波の波長に対し水滴、粉塵等の粒径は一般に約2桁小さく、散乱は上述レーリ散乱に従うので後方散乱断面積は実断面積の1/100程度となりほとんど測定に影響をおよぼさない。

第2の長所はマイクロ波伝達特性が環境条件に影響されにくいことである。マイクロ波伝搬速度は計測空間雰囲気比誘電率 ϵ_r の平方根に比例する。この ϵ_r は計測空間の誘電率と真空誘電率の比であるが、常温1 atm の

空気では1.0006の程度である。小数点以下の部分は電気感受率と呼ばれ空気の密度にほぼ比例して変化する部分である。仮りに環境条件変化により空気密度が2倍に変化したとしてもこのときの伝搬速度変化は0.03%以下と見積れ一般的要求水準に対し問題とならない。

第3の長所はマイクロ波の安全性である。工業計測への応用では一般に所要発振電力はたかだか数十 mW と非常に低エネルギーで必要十分な感度が得られる。また放射線のような人体への危険性を有しないので使用場所、応用範囲に関する制約条件を考慮する必要が無い。

以上のような特徴を活かしマイクロ波を工業計測に用いる場合の原理方式はさまざまである。

3. マイクロ波センサーの基本タイプ

マイクロ波を用いた工業計測用センサーのほとんどは自らマイクロ波を発射し、被測定物に照射・作用させ、受信波として検知することにより被測定物の物性値の情報を抽出するという構成のいわゆるアクティブセンサーである。

一般にマイクロ波を開口Dの放射器（アンテナ）より発射した場合、波長 λ に比例した一定の角度 β で拡がりながら空間を伝わる。この β を指向性と呼び式(1)で求めることができる。 k は定数で約70度で与えられる。

$$\beta = k\lambda/D \dots \dots \dots (1)$$

指向性 β で発射されたマイクロ波はターゲットに到達するとターゲットの材質・大きさ・表面形状に応じた反射（散乱）・透過・屈折・減衰・遅延（移相）などの作用を受ける。この場合ターゲットの材質とはマイクロ波にとっては複素誘電率と換言してもよい。

いずれにしてもこれらの反射波・透過波を受信し、広い意味でその振幅・位相情報を送信波と比較することにより、計測対象となつたターゲットの物性値情報すなわち材質、形状、大きさ、距離およびこれらの時間的変化を非接触で迅速に計測することが可能となる。

一方センサー自らはマイクロ波を発射せず、被測定物自らが放射するマイクロ波熱輻射波を受信することによって温度計測を行うという構成のパッシブセンサーも用いられている。

またアクティブ、パッシブを問わずこれらのセンサーに空間的掃引技術を加えることによって抽出情報の空間的分布を求めることが可能となる。

しかしながら実用センサーがこれらの機能すべてを同時に要求されることは少なく、計測ニーズにマッチした単機能化が計られることはいうまでもない。この意味から実用センサーを数種類の基本タイプに分類することができる。

第1のタイプはスカラー型センサーである。このタイプのセンサーはアクティブ型、パッシブ型を含み、受信波の強度（電力）およびその時間変化だけを検出する。

応用例として通過検出センサー、濃度センサー、ターゲット材質・粒度識別センサーなどがある。

第2のタイプはレーダ型センサーである。このタイプは原則的にアクティブ型で、センサーとターゲット間距離により生じる送受信波間の遅れ時間を検出する距離測定用センサーである。遅れ時間検出原理により更にパルス型・FMCW型・位相型に分類できる。応用例は各種レベル計・変位計・原料堆積断面形状測定装置（プロフィールメータ）などである。

第3のタイプはベクトル型センサーである。このタイプもアクティブ型のみで送受信波間の振幅と位相の両方の変化を検出する。応用例は水分計・誘電率計・密度センサーなどであり、ターゲット中にマイクロ波を透過させ被測定物の誘電体としての特性を計測することによりターゲット情報を抽出するものである。

これらの分類は実用的分類であつて必ずしもその境界は厳密ではないが、応用の主目的を理解するうえでは有用である。

測定機能を改善する目的で、これらの分類に対し共通に幾つかの手法が用いられる。前述の空間的掃引や送信周波数の掃引（二波以上の同時測定を含む）、また送受信アンテナの配置を工夫して光学的効果を利用する、アンテナの偏波特性を利用するなどの手法により一般に得られる情報量は増加し、測定精度を改善することができる。

4. 各種マイクロ波センサーの原理と応用

4.1 スカラー型センサー

アクティブ型を例にとりスカラー型センサーの基本構成を Fig. 3 に示す。マイクロ波発振器で発生させたマ

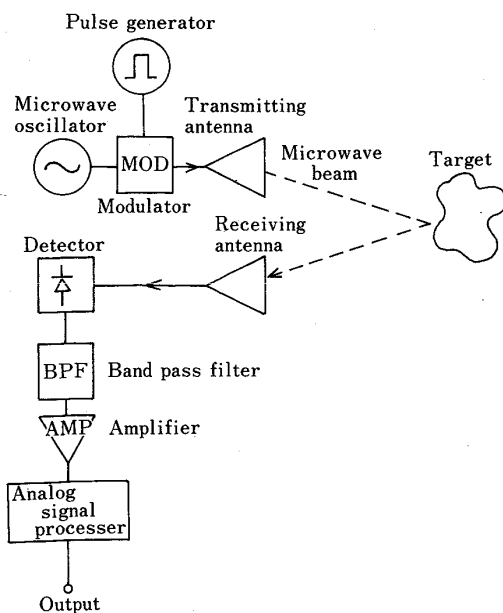


Fig. 3. Block diagram of scalar type sensor.

イクロ波に定周期の変調をかけアンテナにより送受信を行う。マイクロ波ビーム中に物体が侵入すると反射波が発生し、透過波は遮断もしくは減衰を受ける。これを受信・検波増幅することによりターゲットの侵入を認知する。その後のアナログ信号処理はセンサーの用途目的により異なる。

送信波に変調をかける目的は感度改善とセンサーのチャンネル化であり、変調を採用しない場合もあり得る。

本基本構成図では受信機は直接検波方式となつているが、高感度化するために一度中間周波数に変換増幅してから検波するスーパーヘテロダイン受信機もよく用いられる。

4.1.1 通過検出センサー

光センサーと同様に透過検出と反射検出が可能である。検知対象物はマイクロ波の波長 λ に比し十分大きくなければならない。検知対象物の有無を検出するだけなので信号処理回路としては受信波強度信号電圧と判定基準電圧の大小を比較する回路だけで済む。しかし耐久性や環境外乱対策を考慮すると判定基準電圧の自動補正、判定不感電圧幅の最適化、フィルタ定数の環境に対する最適化が実用化の決め手となる。代表的応用例として熱間圧延ラインの鋼材通過検出装置があげられる。

4.1.2 原料識別センサー

通過検出センサーが有無判定結果だけを出力するのにに対し原料識別センサーでは反射・透過波の受信電力強度に比例した信号を出力する。原料がマイクロ波ビーム中を定速で通過するとき種別・粒度に応じ出力信号の時間的变化スペクトルが示す固有のパターンから原料の識別ができる。また信号の持続時間から原料層の厚さ情報を得ることも可能である。パターンの識別処理にコンピュータを導入することにより高度なプロセス処理が可能になる。

4.1.3 濃度センサー

透過減衰を計測出力することによつて高濃度粉塵・水蒸気などの濃度を簡便に計測できる。低濃度の場合や高精度が必要な場合にはベクトル型を用いる必要がある。

4.1.4 ラジオメーター

パッシブ型構成で、計測対象物質から発生するマイクロ波領域での熱輻射雑音を低雑音受信機で受信・増幅し、この電力と内部基準雑音源により与えられる電力を比較することにより計測対象物質温度を計測する。

絶対温度 T (K) の物質により与えられる入力換算雑音電力 P_N は式 (2) で与えられる。

$$P_N = KTB(W) \dots\dots\dots (2)$$

ただし K : ボルツマン定数 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ B : 受信帯域幅 (Hz)

4.2 レーダ型センサー

4.2.1 パルス型レーダ

マイクロ波レーダとして最も良く知られた方式であ

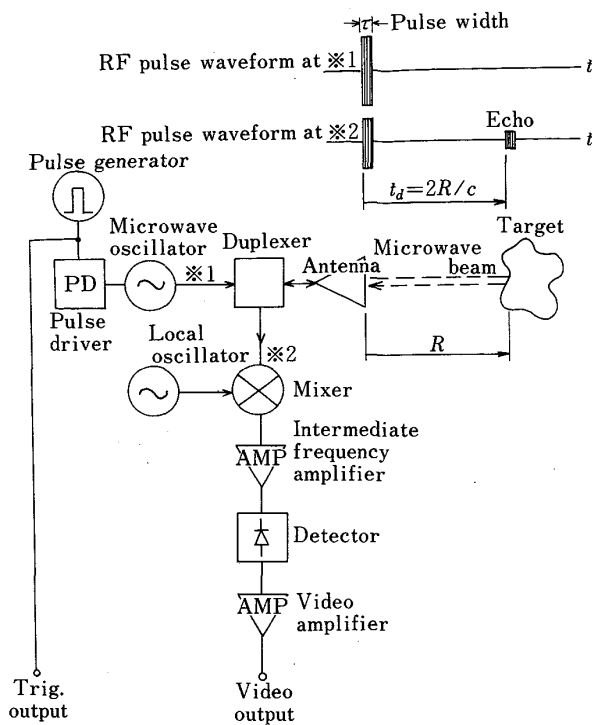


Fig. 4. Block diagram of pulse radar.

る。Fig. 4 に基本構成を示す。送信アンテナからパルス状マイクロ波を放射し、ターゲットからの反射波を受信アンテナにより受信する。送受信用アンテナは Fig. 4 に示すごとく送受切替回路 (Duplexer) を用いることにより 1 個で兼用することが多い。

アンテナとターゲット間の距離を R 、マイクロ波の伝搬速度を c で表すと、受信反射波は距離 R を一往復する時間だけ遅れて戻ってくる。この遅れ時間 t_d は下式 (3) で与えられる。

$$t_d = 2R / c \quad (3)$$

遅れ時間の近接した二つの反射波を受信した場合にこれらを識別する距離分解能は送信パルス幅 τ により決定されている。パルスの幅を短くするほど距離分解能は向上する。しかし他方パルス幅が短くなるとパルスの占有する周波数帯域幅が広がり、これを忠実に受信するためには受信機の取り扱える帯域幅も広げなければならない。ところが受信帯域幅を広くするとそれだけ受信雑音も増加することになり、結局探知能力が低下する。幅 τ のパルスを受信増幅する適正な受信機の帯域 B は式 (4) で与えられる。

$$B = 1.2 / \tau \quad (4)$$

パルス型レーダの長所として複数のターゲットからの反射波を分離受信でき、出力の意味が直感的に理解しやすい点あげられる。

しかし工業計測への応用では残念ながら現在までのところパルス方式で十分な精度を持ったものは実用化されていない。その理由は工業計測分野での距離計測に對す

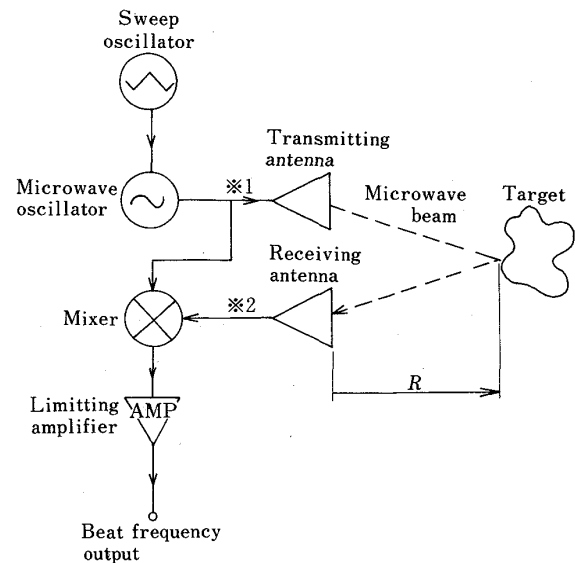


Fig. 5. Block diagram of FMCW radar.

る要求精度が一般レーダに比し非常に高く、必要なパルス幅の発生・変調・受信・遅延時間検出のすべてに渡り現状技術では不十分なためである。具体的にはパルスレーダの現状水準としてパルス幅 5 ns 程度のものが実用化されているがこれは距離分解能に換算して ± 0.4 m である。

将来パルス圧縮技術用素子の進歩・デジタル論理 IC の高速化等により 0.5 ns を十分下回る水準を達成できれば、パルス方式は工業計測用として脚光を浴びるようになるであろう。

4.2.2 FMCW 型レーダ

FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave) 型レーダは電離層の高さを計測するために初めて用いられ、その後電波高度計として発達してきた連続波レーダであり、NASA の月面着陸船にも用いられた。

Fig. 5 に基本構成を示す。連続発振させたマイクロ波の周波数 f を Fig. 6 に示すごとく繰り返し f_r 、掃引幅 Δf になるような三角波で掃引して送信する。距離 R 離れたターゲットにより反射されて戻ってきた受信波はパルス方式の場合と同様に式 (3) で与えられる時間 t_d だけ送信波に比べて遅れている。同一時刻の送信波と受信波の周波数の間には t_d に応じた周波数差 f_b が生じている。三角波で直線的に周波数変調されている場合、 f_b は式 (5) で与えられる。

$$f_b = t_d \cdot 2f_r \cdot \Delta f \quad (5)$$

FMCW レーダーでは Fig. 5 に示すミキサーで送信波の一部と受信波を混合することにより「うなり波」としてこの周波数差 f_b を抽出するので、 f_b はビート周波数と呼ばれる。ミキサーの出力は振幅変動の影響を除くために振幅制限増幅器により必要なレベルまで増幅される。

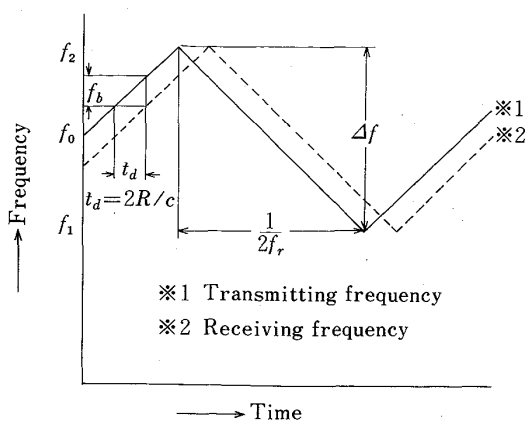


Fig. 6. FMCW radar frequency in time domain.

得られたビート信号をカウンタにより周波数計測すれば式 (3) と式 (5) から距離 R を求めることができる。ビート周波数の測定結果は整数で出てくるから 1 サイクル以下の端数は測れず誤差となる。これをステップ誤差という。ステップ誤差を軽減するために位相変調法・二重変調法などさまざまな方法が考案されているが根本的には Δf を十分大きくすることが必要である。ステップ誤差は測定距離によらない一定値であることから測定距離が小さい工業計測用途ではこの対策が特に重要となる。

FMCW 方式では、受信機に要求される帯域がパルス方式に比し格段に狭くてすみ感度的に有利である。マイクロ波系の構成が簡素であり、複数ターゲットの反射波を周波数で分離識別できるなど工業計測用としての長所実用性に富んでおり早くから用いられてきた。当面この地位に変化はないものと思われる。

応用範囲は溶銑、スラグ、溶融硝子レベルなどの各種熱間レベル計をはじめ距離計として広範に使用できる。

4.2.3 ドプラーレーダ

ドプラーレーダは基本型のままでは距離が測れず狭義の距離測定用センサーではないが、一種の距離情報を検出することができレーダセンサーとして扱われている。Fig. 7 に基本構成を示す。周波数 f_t で連続発振させたマイクロ波をアンテナから送信し、運動体ターゲットからの反射波を受信する。運動体ターゲットが送受信アンテナに向かう相対速度を v_r とすると反射波の周波数 f_r はドプラー効果により f_d だけずれ、式 (6) で与えられる。

$$f_r = f_t + f_d \quad (6)$$

f_d はマイクロ波の伝搬速度 c を用いて式 (7) で与えられる。

$$f_d = f_t \frac{c - v_r}{c + v_r} - f_t \quad (7)$$

通常 $c \gg v_r$ と考えてよく f_d は式 (8) で近似できる。

$$f_d = 2f_t v_r / c \quad (8)$$

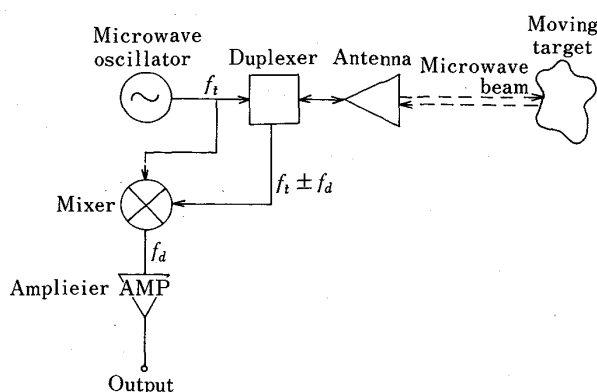


Fig. 7. Block diagram of doppler radar.

f_d は Fig. 7 のミキサーで送信波の一部と受信波を混合することにより $f_r - f_t$ として容易に得られる。このとき得られるドプラー信号 V_D の振幅はターゲットの後方散乱断面積により決定される。

この V_D の周波数を計ることにより式 (8) からターゲットの速度が、また f_d の位相の変化極性を判定することによりターゲットのアンテナに対する移動方向が、また V_D の振幅を測ることによりターゲットの反射強度 (材質・大きさ) がわかる。

このように単純なドプラー方式ではターゲットの速度はわかるが距離を定めることができない。距離を知るためには送信波に変調を加える必要があり、これには周波数変調と振幅変調の二通りの方法がある。前者には既に述べた FMCW 方式や、2 周波位相差方式がある。後者にはパルスドプラー方式がある。パルスドプラー方式には妨害反射波 (クラッタ) の除去という効果がある。

ドプラー方式にはターゲットが運動体の場合極めて簡素な構成で反射波検出ができるという長所がある。しかし基本形のままで得られる情報は限定され、工業計測応用としては運動体有無検出、各種速度計、散乱計 (粒度計・原料識別センサー) など比較的単純なものとなる。

4.2.4 位相型レーダ

位相型レーダには搬送波位相型と包絡線位相型があり前者はドプラーレーダの発展型、後者はパルスレーダの変型とも解釈できるが、遅れ時間 t_d の検出を送信基準波と受信波の位相差を比較検出するという技術で共通しており、あえて一分類を設けた。

搬送波位相型はドプラーレーダで静止ターゲットを測れないという欠点に慮みて考案されたものである。Fig. 8 (a) に基本構成を示す。周波数 f_t で連続発振させたマイクロ波を参照波ミキサーと周波数 f_L の局部発振器で周波数変換すると振幅 A_t の基準中間周波信号 V_t が得られ式 (9) で表せる。

$$V_t = A_t \sin \{2\pi(f_t - f_L)t\} \quad (9)$$

一方アンテナから距離 R にあるターゲットからの受

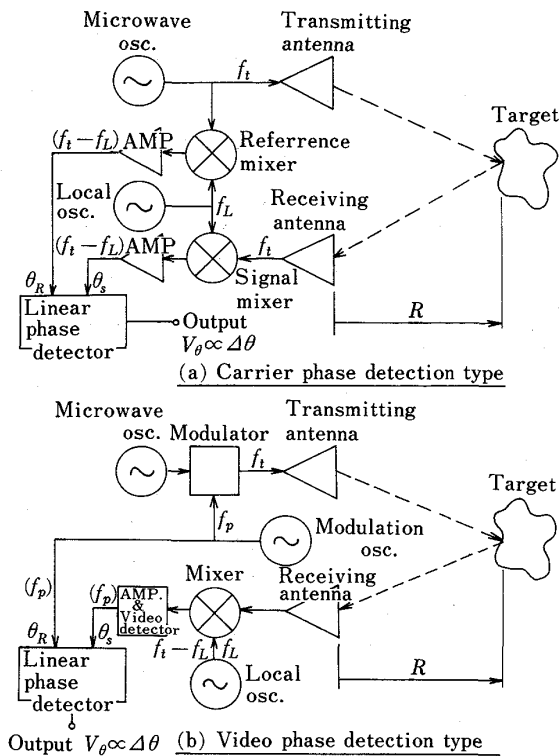


Fig. 8. Block diagram of phase detection radar.

信反射波を受信波ミキサーにより周波数変換すると振幅 A_r の受信中間周波信号 V_r が得られ式 (10) で表せる。

$$V_r = A_r \sin \{ 2\pi (f_i - f_L) t - 2\pi f_i t_d \} \quad \cdots (10)$$

ここに t_d は式 (3) で与えられる反射波の遅れ時間である。この二つの中間周波信号の位相差 θ に比例した電圧 V_θ が位相検出器により得られ、 V_θ は位相感度定数 K を用いて式 (11) で与えられる。

$$\begin{cases} V_\theta = K\theta \\ \theta = 4\pi f_i R / c \end{cases} \quad \cdots (11)$$

ただし位相検出器は θ として 2π の整数倍分を認識できず R の相対変化が $\lambda_i/2$ 以内でないと測ることができない。ここで λ_i は送信波の波長であり $\lambda_i = c/f_i$ で与えられる。

この搬送波位相型は読取精度が高いが限られた距離範囲の相対変化しか測れないので、微小変位の検出・振動波形解析等に用いられる。また振幅測定機能を付加することにより後述のベクトル型センサーとして用いることができる。

包絡線位相型はパルスレーダが工業計測用として精度感度ともに不足であることから改良形として考案された。すなわち振幅変調の波形をパルスから正弦波に変更することにより変調波の発生・変調が容易になり、受信帯域幅がほとんど不要であるために感度は格段に向上する。しかし複数の反射波に対し識別能力を全く有さない

設計時に十分配慮する必要がある。Fig. 8 (b) に基本構成を示す。連続発振させたマイクロ波に周波数 f_p の正弦波変調を加えアンテナから送信する。ターゲットからの反射波はヘテロダイン方式で中間周波に変換して受信・増幅し、その後包絡線検波器によって周波数 f_p の包絡線を復調する。送信波に加えた振幅 A_i の変調波 V_i と復調された振幅 A_r の受信波 V_r はそれぞれ次式で表せる。

$$V_i = A_i \sin(2\pi f_p t) \quad \cdots (12)$$

$$V_r = A_r \sin(2\pi f_p t - 2\pi f_p t_d) \quad \cdots (13)$$

t_d は式 (3) で与えられる反射波の遅れ時間である。 V_i と V_r を位相検出器に入力すると、両者の位相差 θ に比例した電圧 V_θ が得られ、位相感度定数 K を用いて式 (14) で与えられる。

$$\begin{cases} V_\theta = K\theta \\ \theta = 4\pi f_p R / c \end{cases} \quad \cdots (14)$$

位相検出器が θ として 2π の整数倍分を認識できない点は搬送波位相型の場合と同様であるが、 R の計測範囲を定めてから θ が 2π を超えないように f_p を決定することにより絶対距離測定が可能となる。すなわち R の最大値を R_{max} とすると f_p を式 (15) の範囲に選択すればよい。

$$f_p < 2c / R_{max} \quad \cdots (15)$$

ただし位相型センサーの精度は位相検出精度で制約されるので R_{max} を必要以上に大きく取ることは好ましくない。

応用例としては原料堆積断面形状測定装置がある。設計上の留意点として、既に述べた妨害反射波の低減と送受信機部品の位相周波数特性が重要である。

4.3 ベクトル型センサー

ベクトル型センサーはハード的には搬送波位相型センサーに信号強度検出用検波部を付加したものである。また定在波測定法、マイクロ波ブリッジによる干渉法なども一種のベクトル型センサーと考えられる。

ベクトル型センサーを用いてマイクロ波の透過減衰量 A 、透過移相量 θ を計測することにより誘電体物質の比誘電率 ϵ 、誘電体損失 $\tan \delta$ を計測できる。また既知の ϵ 、 $\tan \delta$ を有する物質の試料長、密度を知ることができる。

Fig. 9 に示す測定配置で厚さ l 、比誘電率 ϵ 、誘電体損失 $\tan \delta$ の誘電体を通過したマイクロ波の受ける減衰 A (dB)、移相 θ (rad) は式 (16)~(17) で与えられる。

$$A = 20 \log 10^e \cdot l \cdot \frac{2\pi f_i}{c} \quad \cdots (16)$$

$$\sqrt{\frac{\epsilon}{2}(-1 + \sqrt{1 + \tan^2 \delta})} \quad \cdots (16)$$

$$\theta = \frac{2\pi f_i}{c} \cdot l \cdot \sqrt{\frac{\epsilon}{2}(1 + \sqrt{1 + \tan^2 \delta})} \quad \cdots (17)$$

従って A 、 θ を測定することによって ϵ 、 $\tan \delta$ を知

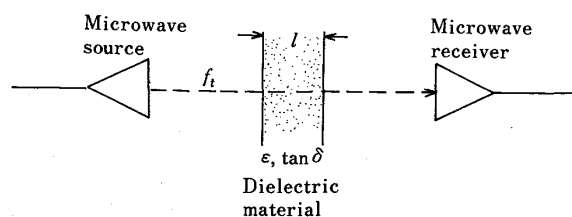


Fig. 9. Schematic of dielectric constant measurement.

ることができる。

また体積密度 100% の時の ϵ_0 , $\tan \delta_0$ が既知であれば見かけの ϵ , $\tan \delta$ を実測することにより未知の体積密度 ρ を式 (18)~(19) により算出できる。

$$\epsilon = (\epsilon_0 - 1)\rho + 1 \quad \text{..... (18)}$$

$$\tan \delta = \rho \tan \delta_0 \quad \text{..... (19)}$$

ベクトル型センサーを用いて水分率を計測する場合は水の誘電率が既知であるとして式 (20) を用いて見かけの誘電率 ϵ を計測することにより水分率 h_D を算出できる。

$$\epsilon = \epsilon_s + (\epsilon_{AQ} - 1)\rho_s \times h_D \quad \text{..... (20)}$$

ただし ϵ_s : 絶乾試料の比誘電率

ϵ_{AQ} : 水の比誘電率

ρ_s : 絶乾試料の比重

h_D : 乾基準水分率

5. 応用の現状・問題点・展望

マイクロ波センサーと一口にいつてもその内容はさまざまである。本稿ではマイクロ波センサーの基本形と工業計測への応用例のごく一部を紹介したに過ぎない。

しかし 1980 年頃から鉄鋼関係を中心としてマイクロ波センサーのライン稼動が次々と立ち上がってゆくを見てきた実感から、地味ながら今後マイクロ波センサーが工業計測の分野でその応用の幅・数量を伸してゆくことはまちがいないことと思われる。

特に高炉周辺のレベル計測、原料に関するマイクロ波センシング技術は確立されつつあり、今後は圧延・造塊ライン方面への応用発展が期待される。

マイクロ波技術そのものへ課せられた課題としては低価格化、高周波化の問題があげられるであろう。固体化により相当の低価格化が達成されてきたとはいえ、10 GHz 帯を中心とする一般レーダ用部品を流用して発展してきた関係で部品選択の自由度は低く、システムがコストアップする一因となっている。また工業計測用途としては 10 GHz によるセンサーでは指向性が不十分であろう。この分野での一層の発展を促すためには 20~30 GHz 帯で現在の 10 GHz 帯センサー並みの価格を実現する必要がある。

また 1990 年頃には 50 GHz 帯で大規模な市場が成立する可能性があり、もし実現すると工業計測用として十分な指向性を持ったセンサーが安価に入手可能となり、大量に用いられることになるであろう。