

自動車レーダの基礎 Introduction of Automotive Radars

桐本 哲郎

Tetsuo Kirimoto

電気通信大学

The University of Electro- Communications

〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

TEL&FAX : 042-443-5175 E-mail : kirimoto@ee.uec.ac.jp

Abstract

Millimeter-wave automotive radars finally enter a phase of practical applications. Automobiles can keep the regular vehicular gap with radar data to avoid collisions. This session gives a basic and consistent explanation of the principle and mechanism of millimeter-wave automotive radars from the following view points: (1) General principle of radars, (2) Frequency design, (3) Waveform design, (4) Signal processing, (5) Antennas.

1. まえがき

肉眼では直接見えない離れた場所の様子を感じ知る能力を身につけることは人類普遍の願望である。「レーダ: RADAR[1],[2] (Radio Detection And Ranging)」は電波を使って、まさにこの願望を具現化した人類の大発明であろう。この発明は不断の努力によって高度化され、今や昼夜・天候に関係なく大空の果てから大地の下までも見通せるまで進化した。レーダは航法管制[3], 地球観測, 気象観測等のリモートセンシング[4],[5], 地中埋設物の検出[6], 移動体の速度計測, 障害物検出など多くの分野で活用され, 現代社会に深く浸透している。

レーダの動作原理を支える「波長程度以上の大きさを持つ物体は電波を反射する」という物理現象は, 1886 年に Hertz が行った一連の実験の中で示されており, 人類がレーダを創造する芽をここに見いだすことができる。1925 年, パルス電波を用いて電離層の高度を計測する実験が Breit と Tuve らによって行われ, この実験の成功を契機に欧米諸国が一斉にレーダの開発に乗り出した。1935 年, 英国の National Physical Laboratory の Watson-Watt らによって最初の実験レーダが開発され, パルス電波を使って初め

て飛行機の探知に成功した。1941 年春には, 米国の Radiation Laboratory は最初のマイクロ波レーダの開発に成功し, これを用いて海上の艦船を有効に探知できることを示した。このマイクロ波レーダには, 表示器として PPI (Plan Position Indicator) が装備されており, 現代レーダの原形がこのときにほぼ完成されたのである。

レーダに用いられた電波の周波数は最初 25MHz であったが, それがわずかに 5-6 年後の 1940 年頃には GHz 帯の電波が用いられるようになった。現在では十数 GHz 帯のマイクロ波レーダが多くの分野で活躍し, 30-100GHz 帯のミリ波レーダが実用化されている。このように使用する電波の高周波化が進められた一つの理由は, レーダの方位測定精度を得るために必要な指向性の高いアンテナを電波の性質を光に近づけて, 小型・軽量に実現するためであった。1950 年代では, 高周波の高出力送信技術や高感度受信技術が未熟であったため, レーダの探知能力向上のための技術開発は, もっぱら高周波送信機の大出力化および受信機の低雑音化を中心に行われた。

このようにレーダ開発の主題が「より遠くにあるより小さなものをより細かく詳しく観るレー

表1 ミリ波自動車レーダの実用化例[7]

発売時期	メーカー	システム
1998/11	ダイムラー クライスラー	ACC
1999/07	日産	ACC
1999/09	ジャガー	ACC
2001/10	BMW	ACC

ダの実現」におかれてきたのは、レーダの進化を要望するアプリケーションの主体が宇宙・防衛にあったからであろう。その中にあって、1970年頃から、「より遠く」ではなく「よりコンパクトに」、「より安全に」、「より安価に」を開発の主眼においた自動車用近距離レーダの開発が始まった。1990年前後から快適で安全な車社会の実現を目指す高度道路交通システム(ITS: Intelligent Transport Systems)の研究が活発化すると、ミリ波を用いた自動車レーダの研究が各国で急速に進められた。電波法の整備とあいまって、1990年代後半には走行支援システムACC(Adaptive Cruise Control)に組み込まれた自動車レーダが表1に示すように相次いで発表された。自動車レーダは、ACC、駐車支援、車線変更支援等走行の利便性・快適性を高めるだけでなく、衝突被害軽減（プリクラッシュセーフティ）、ブラインドスポット等車の安全運転を支える重要なアイテムとして、近い将来一気に普及が進む可能性を秘めている。航空機や船舶と同様にレーダが車に搭載される時代の到来である。レーダが車にとって当たり前のものになるためには、あらゆる走行場面に対応できるように一層の高性能化、高機能化および高信頼性の確保を進めると共に低価格化の推進が必要である。自動車レーダの実用化は途についたばかりであり、まだまだ解決すべき課題は多い。自動車レーダが社会に深く浸透することを願い、本稿では、自動車レーダの方式技術についてその基礎的事項を概説する。

表2 ミリ波帯の周波数割り当て

	47GHz	60GHz	76GHz	94GHz	139GHz
日本		59-66	76-77		
米国	46.7-46.9		76-77	94.7-95.7	139-140
欧州		63-64	76-77		

2. 自動車レーダと小電力ミリ波レーダ

自動車レーダには、距離百数十m内にある相対速度-200km/h～200km/hで移動もしくは静止している種々の物体を気象条件や時間帯によらず検出できる能力が求められる。また、道路の状況によらず先方にある物体が車両制御に必要な自レーン上に存在するの可否かを判定するために水平方向の角度を測定することが要求され、ビームを所定の角度範囲に走査する必要がある。

このような自動車レーダの実現にむけて、総務省は「76GHz帯の周波数を利用する小電力ミリ波レーダの技術的条件」を次のように示している[8]。

- ア 無線周波数帯 76GHz 帯
- イ 空中線電力 10mW 以下
- ウ 空中線利得 40dB 以下
- エ 指定周波数帯幅 1GHz 以内

3. ミリ波の特徴

前章で示したようにミリ波が自動車レーダに有効と考えられている。欧米諸国でも同様に考えられており、各国が自動車レーダに対してミリ波帯の周波数を表2に示すように割り当てている。

ミリ波が有効とされるのは同波が有する次のような特徴に基づいている。

(1) 大気伝搬特性

大気による減衰が大きく、伝搬距離が短い。より遠くを標榜するレーダにとっては、この特徴はマイナスであるが、探知距離が百数十m程

度の自動車レーダにとっては減衰が問題になることは少ない。逆に遠くに届かないためレーダ間の干渉が小さくなり、少し離れていれば同じ周波数を繰り返し利用できることから、この特徴を利点として活かすことができる。

(2)波長が短い

アンテナや回路の大きさは波長で規定されるため、レーダの小型化に有効である。例えば、アンテナ開口長 D は波長を λ 、所要のビーム幅を θ_b として、概ね $D \approx \lambda/\theta_b$ で与えられる。実装スペースが限られた自動車にとって、この特徴は非常に有用である。

(3)帯域を広くとれる

小型バイクなど物理的大きさが1m程度の小さい目標を高い精度で検出するために、自動車レーダには高い距離分解能が要求される。レーダの距離分解能は送信信号の帯域に逆比例し、高い距離分解能を確保するためには、送信信号および受信機の広帯域化が必要である。一般に、周波数を高くすることで比帯域が小さくなり、広い周波数帯域の占有が容易となる。

4. レーダの原理

4.1 測位と測速

レーダに要求される基本機能は、位置測定機能（測位）および相対速度測定機能（測速）の二つである。図1に測位原理を示す。

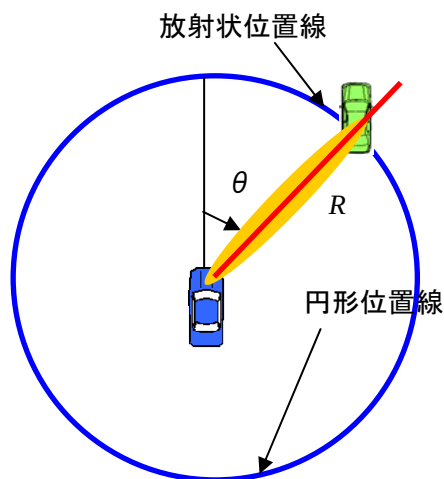


図1 レーダの測位原理

レーダは内部で発生した電波を外部空間に向けて送信し、その一部が目標に到達して反射した電波を受信することによって、目標-レーダ間の距離 R と基準方位からの目標角度 θ を測定する。得られた距離情報と角度情報に基づいて図1に示すように円形位置線と放射状位置線を描き、両位置線の交点を求めて目標位置を特定する。

距離情報は、送信信号の振幅、周波数あるいは位相に適当な変調を与え、これと受信信号との相関によって抽出される送受間の時間差から求められる。変調方法を異にするいくつかのレーダ方式が考案されている。

角度情報は、アンテナビームを形成して電波の送受信を限られた方位に限定し、これを走査することによって得られる。ビームを形成して走査するアンテナ方式についてはいくつか方式が考案されている。

相対速度情報については、ドップラ効果により反射信号に生じる周波数偏移を抽出して測定する方法が一般に用いられる。レーダのコヒーレンシーが十分でなく、ドップラ周波数の抽出が困難である場合には、距離の時間変化率から求める方法がとられる。

4.2 レーダ方程式と受信電力[1],[2]

レーダが捉える目標反射信号の受信電力 P_r は次のレーダ方程式によって求めることができる。

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L_s} \quad (1)$$

ここで、

P_t :送信電力

G :アンテナ利得

λ :波長

R :レーダ-目標間距離

σ :レーダ断面積

L_s :大気、降雨減衰等の損失

である。式(1)では送受両アンテナの利得は等し

いとしている．アンテナ利得 G はアンテナの有効開口面積を A とすると概ね次式で与えられる．

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad (2)$$

式(1)に示すようにレーダの受信電力は距離の4乗に比例して減衰し，遠方にある目標は探知できなくなる．この限界を最大探知距離と呼ぶ．受信機の目標検出可能最小電力を $P_{r\min}$ とすると，最大探知距離 $R_{\max}$ はレーダ方程式により次のように求められる．

$$R_{\max} = \left[\frac{G^2 \lambda^2 \sigma P_t}{(4\pi)^3 P_{r\min}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

受信機の目標検出可能最小電力 $P_{r\min}$ は信号処理利得を含めた受信機等価雑音電力 P_{ne} との相対値 $SNR_{\min} = P_{r\min} / P_{ne}$ から求められる．所要の $SNR_{\min}$ はレーダの基本性能を規定するパラメータ目標検出確率および誤警報確率から決定される．自動車レーダでは $R_{\max}$ は百数十mである．

5. レーダ方式

自動車レーダに要求される機能は，パルス方式，CW(Continuous Wave)方式のどちらでも実現できるが，同レーダの探知距離が～100m程度の近距離であること，信号処理負荷が比較的小さい等の理由から，実用化された自動車レーダではCW方式を採用している例が多い．以下，代表的な(1)パルスドップラ方式，(2)FM(Frequency Modulated)CW方式および(3)二周波CW方式について述べる．

(1) パルスドップラ方式

図2に示すようにパルス変調された短パルス信号を送信し，反射信号が受信されるまでの遅延時間 τ を測定して距離を求める． τ は電波が目標までの往復距離を伝搬する時間であるから，距離は次式で求められる．

$$R = c\tau/2 \quad (4)$$

ここに， c は光速である．パルスレーダの距離

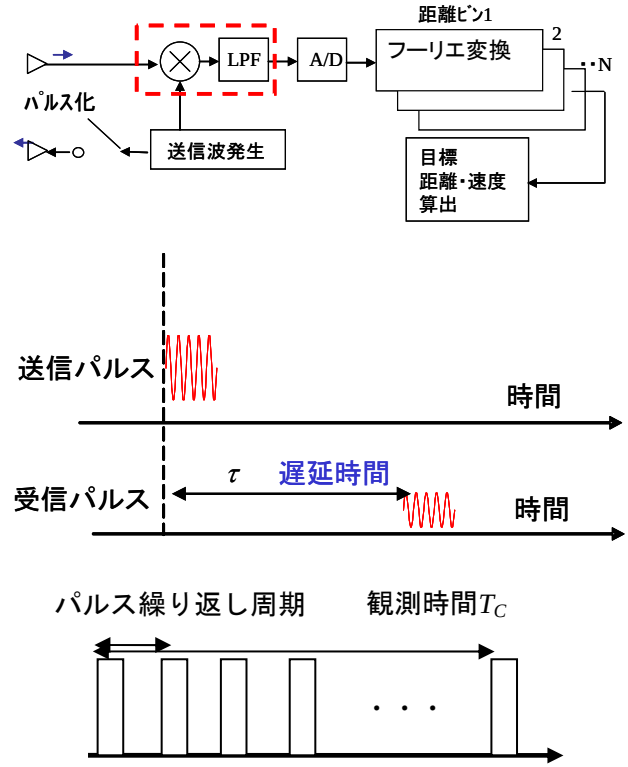


図2 パルスドップラ方式

分解能 δR はパルス幅 T_w で決まる．

$$\delta R = cT_w/2 \quad (5)$$

パルス幅 T_w のパルスを受信するために必要な受信機の帯域 B_0 は次式で与えられる．

$$B_0 = 1/T_w = c/2\delta R \quad (6)$$

速度は図1に示すように送信パルスを一定の周期で繰り返し送信し，同一距離ビンにある受信パルスの位相の変化を信号処理して抽出されるドップラ周波数から求めている．

$$v = \frac{\lambda f_d}{2} \quad (7)$$

また，速度分解能は観測時間 T_c によって決まり，次式で与えられる．

$$\delta v = \lambda/2T_c \quad (8)$$

ここに， λ は波長である．この方式で高い距離分解能を確保するために式(6)に示すように広帯域受信機を要し，高速の信号処理が必要となる．一方，この方式では距離ビンと周波数ビンのそれぞれの領域において信号の弁別処理が施されるため，CW方式に比べて干渉に強く，信

号の分離性能が高くなる。

また、最近注目されている UWB (Ultra Wide Band) レーダも本方式の一つである。ただし、通常、信号の位相情報が利用できない構造となっているためドップラ効果を用いた速度計測はできない。極短パルスを送受することでブラインド距離が極めて小さくなり、また、構成が非常に簡単になる。

(2) FMCW 方式

図 3 に示すように周波数が線形に増加するように周波数変調した up-sweep 信号と周波数が線形に減少するように周波数変調した down-sweep 信号を交互に目標に向けて送信する。アンテナで捉えた目標反射信号を送信信号の一部とミキシングしてビート信号を得る。up-sweep および down-sweep におけるビート信号の周波数はそれぞれ次式で与えられる。

$$f_{up} = \frac{4\Delta f R}{cT_m} - \frac{2v}{\lambda} \quad (9a)$$

$$f_{down} = \frac{4\Delta f R}{cT_m} + \frac{2v}{\lambda} \quad (9b)$$

ここに、 T_m は変調繰り返し周期であり、 Δf は変調周波数幅である。距離 R と速度 v は式(9a)と式(9b)を解いて求めることができる。

この方式の距離分解能 δR と速度分解能 δv はそれぞれ次式で与えられる。

$$\delta R = \frac{c}{2\Delta f} \quad (10)$$

$$\delta v = \frac{\lambda}{T_m} \quad (11)$$

また、この方式で必要な受信機帯域は距離探知幅および速度検知幅をそれぞれ ΔR および Δv で表すと次式で与えられる。

$$B_0 = \frac{4\Delta f \Delta R}{cT_m} + \frac{2\Delta v}{\lambda} \quad (12)$$

一般に、同じ距離分解能を得るために必要な FMCW 方式の受信帯域はパルス方式のそれに

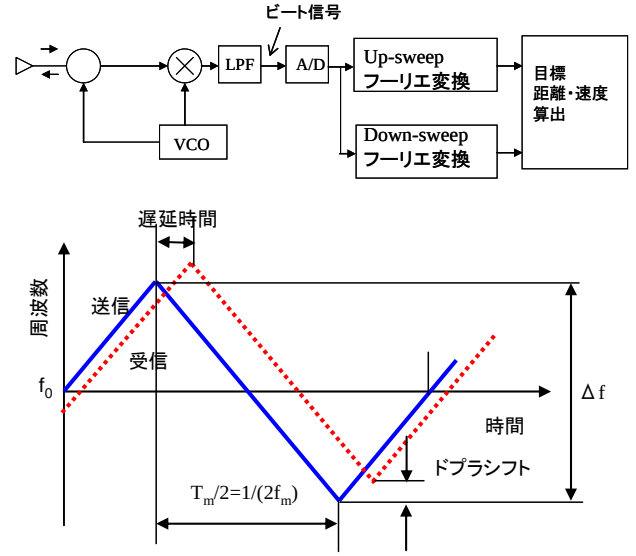


図 3 FMCW 方式

比べて小さくなり、従って、信号処理速度についてもパルス方式に比べて低速でよい。ただし、複数の目標からの反射信号を同時に受信した場合、この方式では同時に検出された複数の f_{up} と f_{down} の組み合わせを決定するアルゴリズムが必要となり、信号処理が複雑になる。また、この方式では遠方にある小目標の受信信号が近くにある不要物体からの反射信号に埋もれ探知が困難となるいわゆる CW 方式に共通の遠近問題を抱えていることに注意が必要である。

(3) 二周波 CW 方式

ここでは、説明を簡単にするため図 4 に示すように周波数 f_1 の CW 信号とそれとわずかに異なる周波数 f_2 の CW 信号をそれぞれ時間 T_c の間隔で時分割にて切り替えて送信する場合について述べる。目標で反射して受信された信号は、送信周波数が f_1 の区間は周波数 f_1 のローカル信号でミキシングされ、送信周波数が f_2 の区間は周波数 f_2 のローカル信号でミキシングされる。ミキシング後のビート信号はそれぞれ次式で得られる。

$$B_{f_1}(t) \propto \cos\left(2\pi f_d t - \frac{4\pi f_1 R}{c}\right) \quad (13)$$

$$B_{f_2}(t) \propto \cos\left(2\pi f_d t - \frac{4\pi f_2 R}{c}\right) \quad (14)$$

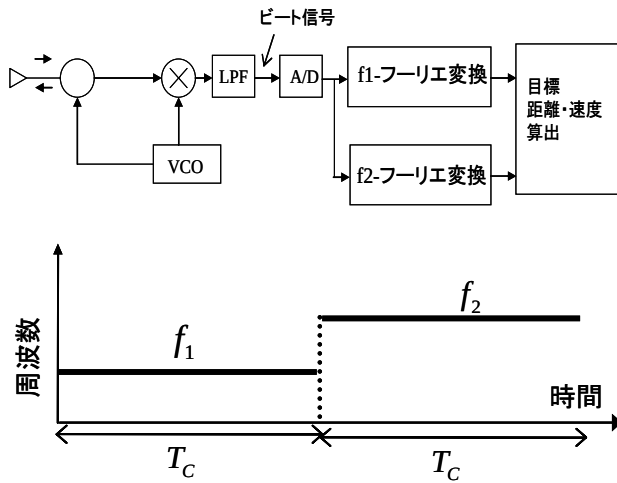


図4 二周波 CW 方式

ここで、 $f_d (= 2v/\lambda)$ はドップラ周波数であり、 f_1 と f_2 の差が僅かであることから両ビート信号におけるドップラ周波数は等しいとして問題ない。二周波 CW 方式では、両ビート信号をフーリエ変換してドップラ周波数 f_d を検出し、ついで同周波数におけるスペクトルの位相差 $\Delta\phi (= \phi_2 - \phi_1)$ を抽出して、次式により距離と速度を求める。

$$R = \frac{c\Delta\phi}{4\pi(f_2 - f_1)} \quad (15)$$

$$v = \frac{\lambda f_d}{2} = \frac{f_d c}{2f_1} \approx \frac{f_d c}{2f_2} \quad (16)$$

このとき、距離アンビギュイティが発生しないためには、

$$\frac{4\pi(f_2 - f_1)}{c} R_{\max} < \pi \quad (17)$$

を満足する必要がある。速度測定の分解能は FMCW 方式等他の方式と同様に時間 T_c でさまり、

$$\delta v = \frac{\lambda}{2T_c} \quad (18)$$

である。

$R_{\max}$ が数百メートルの場合、式(17)から $f_2 - f_1$ は数百 kHz となり、二周波 CW 方式では極めて狭い周波数占有帯域で距離および速度の測定ができることが分かる。ただし、速度が同じであ

る複数目標からの反射信号が同時に受信された場合、距離の測定はできない。また、目標との相対速度が零の場合にはビート信号が直流となって位相抽出が不可能となり、距離の測定ができない。さらに、この方式も FMCW 方式と同様に遠近問題を抱えていることに注意が必要である。

6. アンテナ方式

通常自動車レーダでは仰角（垂直）方向の角度測定機能は必要とされないため仰角方向には固定の狭ビームが用いられる。比較的広い角度範囲を高い角度分解能で計測が必要とされる方位（水平）方向測定機能実現のため、アンテナ方式として、(1)機械走査方式、(2)ビーム切り替え方式、(3)フェーズドアレー方式、(4)デジタルフォーミング方式等が考えられている。

(1) 機械走査方式

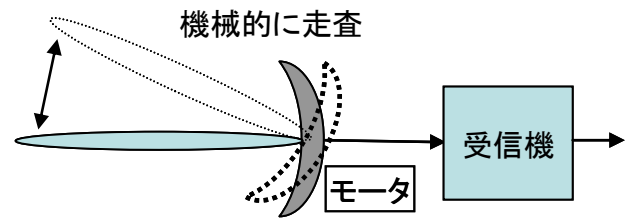


図5 機械走査方式

図5に示すように波長に比べて開口の大きなアンテナを用いてビーム幅の狭いビームを形成し、これをモータ等の駆動力を利用して走査する方式である。比較的簡単に鋭いビームを得ることができるが、走査の機構が必要であり、後述のフェーズドアレー方式に比べて走査速度が遅い。

(2) ビーム切り替え方式

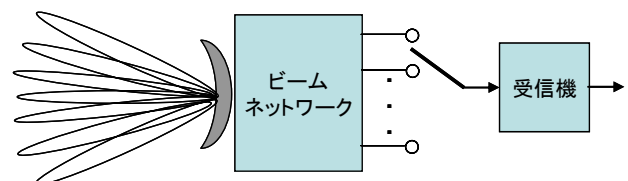


図6 ビーム切り替え方式

図6に示すように指向方向が少しずつずれたビーム幅の狭い固定ビームを複数形成し、電氣的に時分割でこれを切り替える方式である。走査範囲が広く、高い角度分解能が要求される場合には多数のビームが必要となり、ハードウェアの規模が大きくなる。自動車レーダ用としては3ビーム、9ビームを切り替える開発例が報告されている。

(3) フェーズドアレー方式

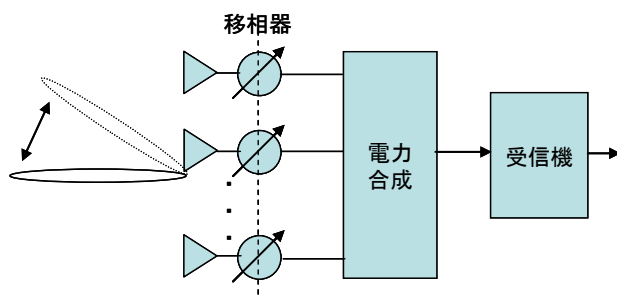


図7 フェーズドアレー方式

図7に示すように複数の素子アンテナを一定の間隔で配列したアレーアンテナで構成される。素子アンテナに接続された移相器で信号の位相を制御することによりビームを高周波帯で形成して走査する。ビームを高速で走査できることが最大の特徴である。

(4) デジタルビームフォーミング方式

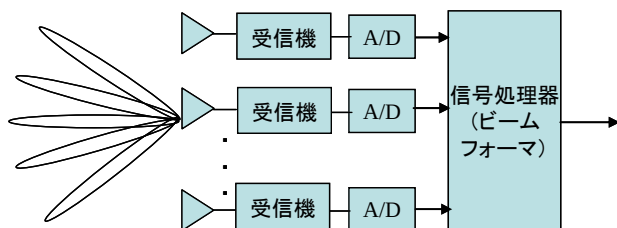


図8 デジタルビームフォーミング方式

フェーズドアレー方式と同様に複数の素子アンテナを一定の間隔で配列したアレーアンテナで構成される。各素子アンテナで受信された信号は受信機内で検波されてベースバンド信号に変換される。ついでベースバンド信号はA/D変換器によりデジタル信号に変換され、信号処理演算によりビームが形成される。この方式では受信信号の波形情報を数値データとして記憶

保存するため、演算により様々な形状を持つビームを形成できることが最大の特徴である。例えば、図8に示すようにマルチビームを形成し、全走査範囲を同時に観測して、近距離目標のデータレートを高める等柔軟なレーダ運用を可能にする。

(5) モノパルス方式

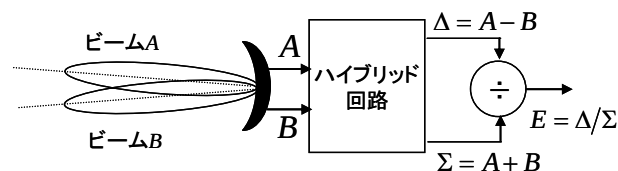


図9 モノパルス方式

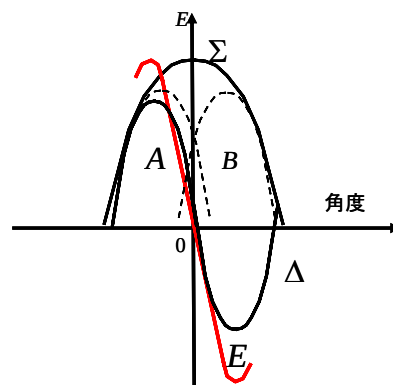


図10 角度誤差曲線

パルスレーダにおいて1回のパルス信号の送受信で角度測定ができることからこのネーミングが与えられた。振幅モノパルス方式と位相モノパルス方式があり、ここでは振幅モノパルス方式について述べる。図9に示すようにパターンが同一の二つのビームの主軸を正面方向から対称にずらしたアンテナを用いる。それぞれのビームで受信した信号をハイブリッド回路に入力して和信号 Σ と差信号 Δ を出力する。受信信号の受信方向とアンテナ正面方向との角度差が図10に示すように和信号レベルと差信号レベルの比 $E = \Delta/\Sigma$ に比例することを利用して、受信角度を測定する。この方式ではビーム内に二つ以上の信号が同時に受信される場合には原理上角度測定できないことに注意を要する。

なお、(1)～(4)に示したアンテナ方式はビーム

形成とビーム走査を目的とするものであり、角度測定精度はビーム幅程度である。これに対しモノパルス方式はビーム内に捉えた信号の受信角度をビーム幅を超えた精度で測定することを目的しており、(1)・(4)のアンテナ方式と組み合わせて用いられることが多い。

7. むすび

開発が始まってから 40 年近くの年月が経過し、自動車レーダはようやく実用化の途につき、普及の兆しが見え始めた。自動車レーダが広く社会に受け入れられるためには、低価格化と共に、一層の高性能化・高機能化を進めることが重要である。例えば、現状の自動車レーダでは人や自転車の探知は難しいとされ、このためには 20cm 程度の距離分解能の実現とレーダの高感度化が必要である。これに対応するため総務省は 78-81GHz 帯ミリ波自動車レーダの開発構想（ユビキタス ITS）を打ち出している[9]。欧州では同周波数帯域を利用して数十 cm にある超近距離目標を探知できる UWB(Ultra Wide Band)レーダの開発を進めている。また、自動車レーダは今のところ自律型センサーに位置付けられているが、今後は通信機能を取り入れてインフラ協調型センサーの性格を強めてゆくと思われる。

このように自動車レーダは、今後多くの関係者の努力に支えられて、確実な進化を遂げてゆくであろう。本稿がこれから自動車レーダの開発に関わる人達に少しでも参考になれば幸いである。

文 献

- [1] Skolnik M. I. :“Introduction to Radar Systems (second edition)”, McGraw-Hill, New York (1980).
- [2] Skolnik M. I. (ed.):“Radar Handbook (second edition)”, McGraw-Hill, New York(1990).
- [3] Stevents M. C. :“Secondary Surveillance Radar”, Artech House, Norwood, MA (1988).
- [4]“小特集：電波とリモートセンシング”,日本リモートセンシング学会誌, 12, 1, pp.43-101 (1992).
- [5] Doviak R. J. and Zrnic D. S. :“Doppler Radar and Weather Observations”, Academic Press, Orlando (1984).
- [6] 西村康：“遺跡調査と電磁計測”，資源・素材学会, 第 2 回地下電磁計測ワークショップ 論文集, pp.1-6(1992-12).
- [7]大槻智洋, 田野倉保雄：“クルマで瞬き始める電子の「眼」”，日経エレクトロニクス, 2003.8.4, pp.57-68(2003)
- [8]総務省 HP より
http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/pressrelease/japanese/denki/970526j601.html
- [9]ITS 情報通信システム推進会議 HP より
<http://www.itsforum.gr.jp/Public/J3Schedule/P17/1mori070420.pdf>