

各種物標の 26/70GHz 帯 UWB レーダ断面積および時間領域応答の測定

Measurements of Ultra Wideband Radar Cross-Sections and Time-Domain Responses of Various Targets at 26/70 GHz

高橋 直人[†] 天野 信之^{††} 廣瀬 敏之^{†††} 西山 巖^{††††} 小林 岳彦^{†††††}, ^{††††††}
 Naoto TAKAHASHI Nobuyuki TENNO Toshiyuki HIROSE Iwao Nishiyama Takehiko KOBAYASHI

[†]NTTアドバンステクノロジー株式会社 ^{††}株式会社村田製作所 ^{†††}シーメンス株式会社
 NTT Advanced Technology Corp. Murata Manufacturing Co., Ltd. Siemens K.K.

^{†††††}独立行政法人情報通信研究機構 ^{††††††}東京電機大学
 Information and Communications Technology Tokyo Denki University

[†]〒239-0847 神奈川県横須賀市光の丘 3-2 YRP2 番館 2 階
 Phone:046-847-6027
 E-mail: naoto.takahashi@ntt-at.co.jp

1. はじめに

UWB(ultra wideband)無線技術は、1ns 以下という非常に幅の狭いパルスを用いた非常に広帯域な周波数幅(数~数十 GHz)を試用する無線システムとして近距離超高速無線通信、高分解能レーダ等への応用を念頭に近年急速に注目が集まっている。

2002 年に米国連邦通信委員会(FCC)は、UWB 技術の利用に関する規制緩和に踏み切り、欧州や日本でも UWB 技術の規制緩和に関する検討が進められている。独立行政法人情報通信研究機構(NICT)は 2002 年に UWB 結集型特別グループを組織すると共に、横須賀リサーチパーク(YRP)を中心に組織化した UWB 産学官コンソーシアムを結成し活動を行っている[1]。このコンソーシアムでは、UWB アプリケーションの一つとして 26 GHz 帯(22~29 GHz)および 70 GHz 帯(68~75 GHz)を車載レーダに用いる検討を行っている。

車載レーダは目標物として乗用車、軽車両、人間、標識および樹木等が想定される。この UWB を用いた車載レーダの開発には、目標物のレーダ断面積を明らかにする必要がある。26GHz 帯のレーダ断面積は現在までに乗用車、中型バイク、自転車、人間および各種円柱を測定し報告したが、70 GHz 帯のレーダ断面積は測定を行っていない[2], [3], [4], [5]。

これらのことから 70 GHz 帯レーダの開発に不可欠なデータである自動車、中型バイク、各種円柱等のレーダ断面積を実測したので、26 GHz 帯のレーダ断面積の測定結果と合わせて報告する。

2. 測定方法

2.1 コーナーリフレクタ

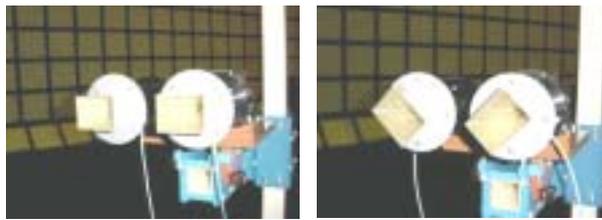
20.5 m(W)×15.5 m(D)×9.0 m(H)の電波暗室内のターンテーブル上に、投影面積 0.09 m²(0.3 m 平方)の 2 面コーナーリフレクタを床面から 0.85 m に設置し、正面方向から±5° 方向までの 10° を 1° 刻みに回

転させた。床面には電波吸収体を敷き詰めた。これにより、地面の影響を除いたコーナーリフレクタそのもののレーダ断面積を測定できる。送受信には平行して配置した 2 個のリジッド WG ホーンアンテナおよび角錐ホーンアンテナを用いて、送受信偏波の組合せが V-V, H-H, +45° -45° の 3 通りについてベクトルネットワークアナライザにより S₂₁ を測定した。

表 1 に測定諸元を示す。また、図 1 にアンテナ設置例、図 2 に実験風景を示す。図 1(a), (b)はそれぞれ 26GHz 帯、70GHz 帯のアンテナ設置例である。アンテナ主ビーム方向は水平で、アンテナ高はコーナーリフレクタの中心である 0.85 m とした。アンテナとコーナーリフレクタとの平均距離はそれぞれ 2.5, 5, 10 m で、アンテナのフットプリントはコーナーリフレクタの投影面積よりも十分大きくなる。

表 1 測定諸元

項目		諸元	
測定系		ベクトルネットワークアナライザ	
周波数		22~29 GHz, 68~75 GHz	
時間		10~40 ns, 10~90 ns, 40~90 ns	
送受信偏波		V-V, H-H, +45° -45°	
送受信アンテナ	26 GHz	種別	リジッド WG ホーンアンテナ
		利得	22.5 dBi (25.5 GHz)
	70 GHz	種別	角錐ホーンアンテナ
		利得	22.6 dBi (70.0 GHz)
アンテナ高, 平均距離	乗用車		0.85 m, 10 m
	中型バイク, 自転車, 人間		1.4 m, 5 m
	鉄管柱, 木柱, 塩ビ管		1.33 m, 2.5 m
物標	コーナーリフレクタ	投影面積 0.09 m ² (0.3 m 平方)	
	乗用車	全長 4.75 m × 全幅 1.75 m × 全高 1.39 m	
	中型バイク	全長 2.00 m × 全幅 0.73 m × 全高 1.05 m	
	自転車	全長 1.83 m × 全幅 0.55 m × 全高 1.14 m	
	人間	身長 1.73 m, 体重 70 kg, 標準体型	
	鉄管柱	50, 100, 200 mm φ × 全長 2.00 m	
	木柱	200 mm φ × 全長 2.00 m	
塩ビ管	200 mm φ × 全長 2.00 m		



(a)26GHz 帯



(b)70GHz 帯

図 1 送受信アンテナ設置例

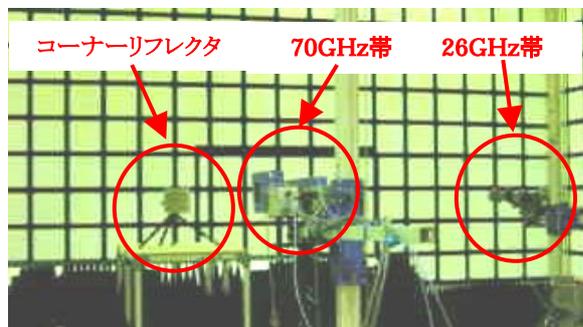


図 2 実験風景(コーナーリフレクタ)

2.2 各種物標

コーナーリフレクタ測定時と同様に電波暗室内のターンテーブル上に、4ドアセダン型乗用車(排気量 20)を床面から約 0.3 m ジャッキアップして設置し、正面方向から真後方向までの 180°を 1°刻みで回転させた。この時の物標中心と送受信アンテナ間との距離は 10 m とした。同様に中型バイク、自転車および人間では、高さ 0.8 m の台上に設置し、アンテナ高 1.4 m とした。この時の物標中心と送受信アンテナ間との距離は 5 m とした。また、鉄管柱、木柱および塩ビ管では、正面方向から真横方向までの 90°を 30°刻みで回転させた。この時の物標中心と送受信アンテナ間との距離は 2.5 m とし、アンテナ高 1.33 m とした。送受信アンテナには 26GHz 帯がリジッド WG ホーンアンテナ、70GHz 帯が角錐ホーンアンテナを用いて、送受信偏波の組合せが V-V, H-H, +45°-45°の 3 通りについて S_{21} を測定した。

図 3 に各物標の実験風景例を示す。図 3(a), (b), (c)はそれぞれ乗用車、中型バイク、200 mm φ 鉄管柱の測定例である。アンテナのフットプリントは乗用車および中型バイクの場合に車輪を真横にした場合に車輪の投影面積よりも最大 10 %程度小さくなることがある。しかし、投影面積 10 %の減少は電力にして 0.5

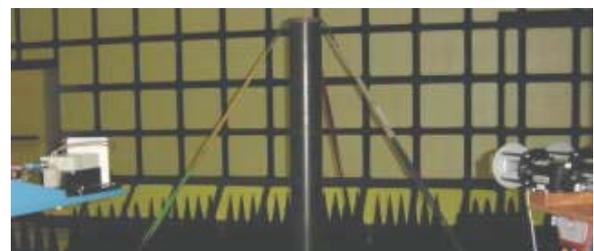
dB 程度となるため、ほとんど影響はない。また、自転車および人間ではアンテナフットプリントは投影面積よりも大きくなる。一方、鉄管柱、木柱および塩ビ管では、アンテナと物標との平均距離はダイナミックレンジを考慮し 2.5 m としたため、アンテナのフットプリントを考慮すると、各種円柱の有効反射面積に含まれる等価長は 0.7 m 程度に相当する。



(a)乗用車



(b)中型バイク



(c)200 mm φ 鉄管柱

図 3 実験風景

3. 測定結果

3.1 コーナーリフレクタ

図 4 に送受信偏波の組合せを V-V, H-H, +45°-45°とした場合の距離 5 m における正対時の周波数特性を示す。図の上下にはそれぞれ 26 GHz 帯、70 GHz 帯の測定結果である。同図はコーナーリフレクタの周波数特性を示しているが、この周波数特性の傾きは送受信アンテナ等の周波数特性によるものと考えられる。また、各偏波における周波数特性は各周波数共にほぼ一致していることがわかる。このことからコーナーリフレクタによる測定精度が高いことがわかる。また、距離 2.5, 10 m のコーナーリフレクタ測定についても同様の傾向を示している。

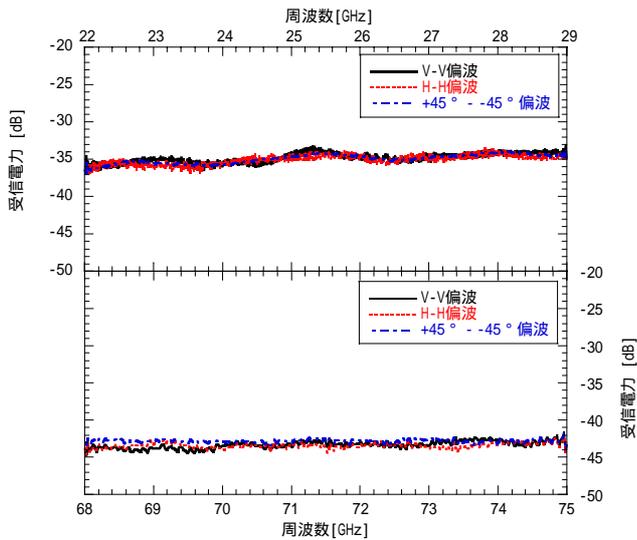


図4 コーナーリフレクタの周波数特性

ここで、受信電力 P_r [dB]は、式(1)に示すレーダ方程式より算出できる。また、コーナーリフレクタのレーダ断面積(有効反射面積) σ [m²]は式(2)で表される。[6]

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

P_t : 送信出力[dBm] P_r : 受信電力[dBm]
 G : 送受信アンテナ利得[dBi] λ : 波長[m]
 R : 目標物とアンテナとの距離[m]

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

A : 投影面積[m²]

距離 5 m における投影面積 0.09 m²(0.3 m 平方)の 2 面コーナリフレクタを用いた時の受信電力 P_r [dB]は、周波数 22, 25.5, 29 GHz の時にそれぞれ-35.5, -35.0, -34.7 [dB], 周波数 68, 71.5, 75 GHz の時にそれぞれ-44.5, -44.1, -43.8 [dB]となる。

このことから 2 面コーナリフレクタを用いた較正を行うことにより、平均 1 dB 以内の精度でレーダ断面積が求められることを確認した。

3.2 各種物標

図 5 に乗用車の各方向における時間領域応答の例を示す。同図は上から順に車輻前方から後方までを 45° 毎に回転させた時の測定結果であり、送受信偏波の組合せを V-V とした場合の周波数 26, 70 GHz の測定結果を示してある。

車輻前方、真横、後方では、26GHz 帯の受信電力は最大-50 dB とほぼ同程度であるが、前後方 45° の

場合は 10 dB 程度低い-60 dB 程度となっている。また、70 GHz 帯の受信レベルは 26 GHz 帯に比べ全体的に 10 dB 程度低くなっている。

このことから車輻の前後左右の 4 方向が高いレベルとなることがわかる。また、時間領域応答の形状が方向により異なることから、車輻の方向依存性が顕著に現れていることがわかる。これは乗用車の構造によるものが大きく影響していると考えられる。これに加え、26 GHz 帯と 70 GHz 帯との時間領域応答は 10dB 程度のレベル差があるもののほぼ同様の傾向を示している。

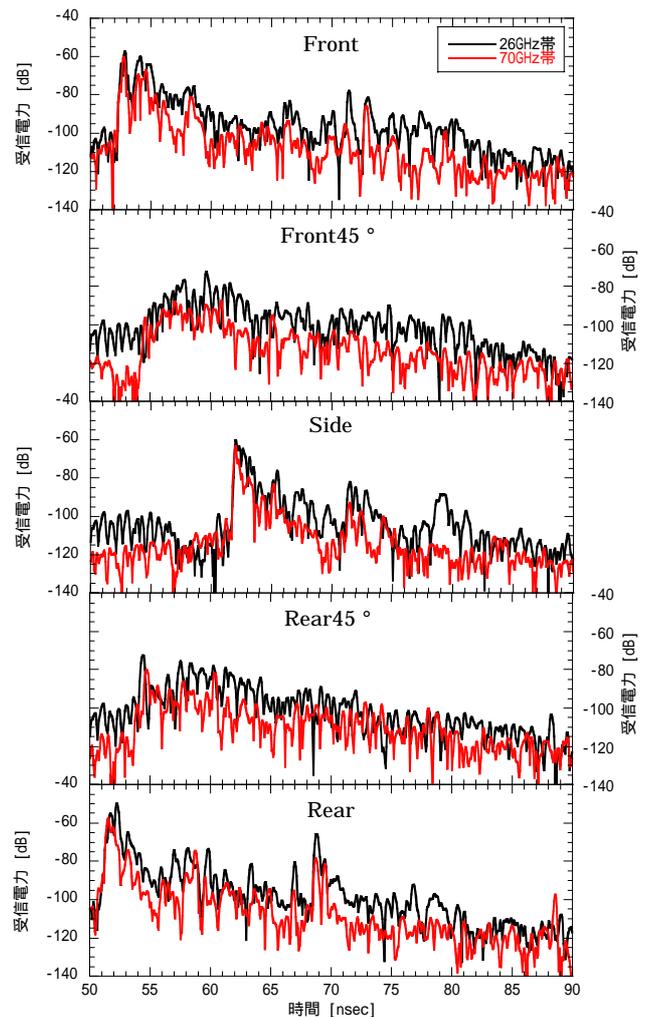


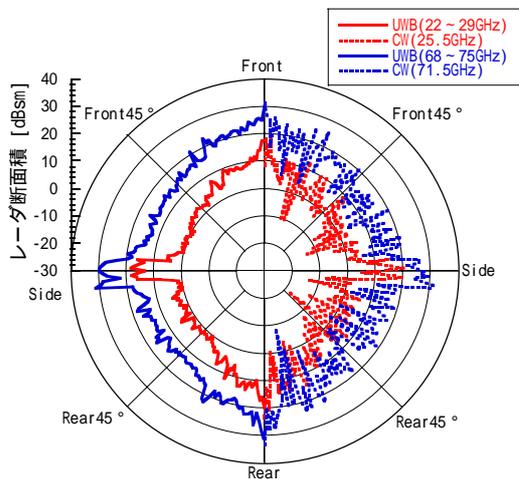
図5 乗用車の各方向における時間領域応答例

図 6 に各種車両におけるレーダ断面積の測定結果例を示す。(a), (b)にはそれぞれ乗用車、中型バイクを示し、この時の送受信偏波の組合せを V-V とした場合の測定結果である。各レーダチャートの左半分が UWB(22~29 GHz または 68~75 GHz)、右半分が CW(25.5 GHz または 71.5 GHz)のレーダ断面積を表している。ここでの UWB 測定結果は各周波数の平均電力を求め、この平均電力から算出したレーダ断面積を用いている。

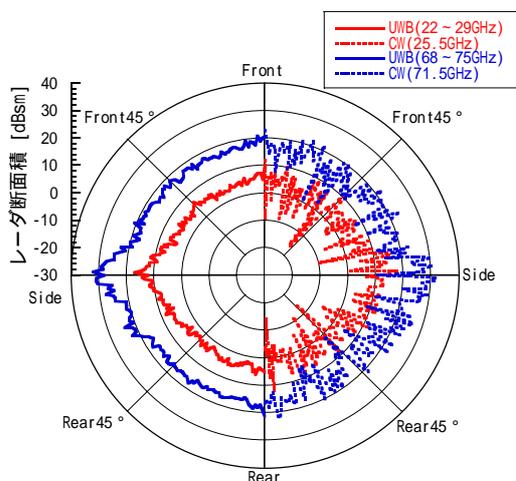
各種車両における UWB のレベル変動は最大 20 dB 程度であるが、CW は 35 dB 程度である。このことから UWB のレーダ断面積の方が CW のそれと比べて、方向依存性が著しく小さい(落ち込みが浅い)。

乗用車における UWB レーダ断面積は、正面、真横および真後方向で 26 GHz 帯が $\sigma=20 \text{ dBm}^2$ 程度、70 GHz 帯が $\sigma=30 \text{ dBm}^2$ 程度である。斜め 45° 方向では 26, 70 GHz 帯がそれぞれ $\sigma=5, 15 \text{ dBm}^2$ 程度であった。 $\sigma=20 \text{ dBm}^2$ は文献[7]に与えられているマイクロ波帯における乗用車のレーダ断面積の代表値(100 m²)と合致している。同様に、中型バイクでは真横方向で 26, 70 GHz 帯がそれぞれ $\sigma=18, 33 \text{ dBm}^2$ 程度である。それ以外の方向では 26, 70 GHz 帯がそれぞれ $\sigma=5\sim 10, 17\sim 22 \text{ dBm}^2$ 程度であった。

これらのことから車両の大きさや形状に依存してレーダ断面積が決まることがわかる。また、70GHz 帯のレーダ断面積は 26GHz 帯に比べ平均 12dB 程度大きくなるが、レーダ断面積の形状はほぼ一致している。



(a)乗用車



(b)中型バイク

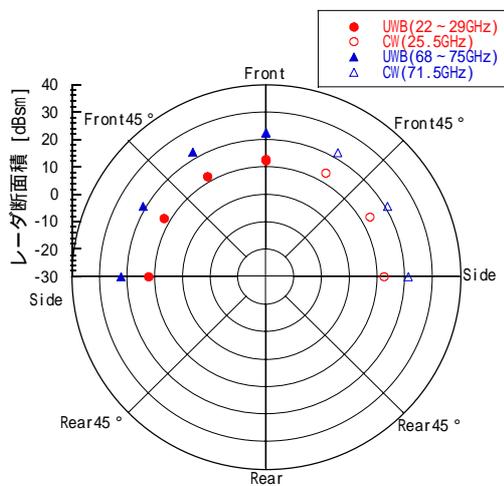
図 7 に各種円柱におけるレーダ断面積の測定結果例を示す。(a)~(c)にはそれぞれ 200 mm φ の鉄管柱、木柱、塩ビ管を示し、この時の送受信偏波の組合せを V-V とした場合の測定結果である。

200 mm φ 鉄管柱では UWB と CW のレーダ断面積はほぼ一致している。鉄管柱の UWB レーダ断面積は、26 GHz 帯が $\sigma=13 \text{ dBm}^2$ 程度、70 GHz 帯が $\sigma=23 \text{ dBm}^2$ 程度である。

同様に 200 mm φ 塩ビ管では UWB のレーダ断面積の方が CW のそれと比べて 5 dB 程度大きい。これは塩ビ管が誘電体であることと、塩ビ管内部が空洞であることから、塩ビ管を透過した電波が管内部で反射することにより干渉が発生しノッチが入るためである。塩ビ管の UWB レーダ断面積は 26 GHz 帯が $\sigma=5 \text{ dBm}^2$ 程度、70 GHz 帯が $\sigma=16 \text{ dBm}^2$ 程度である。

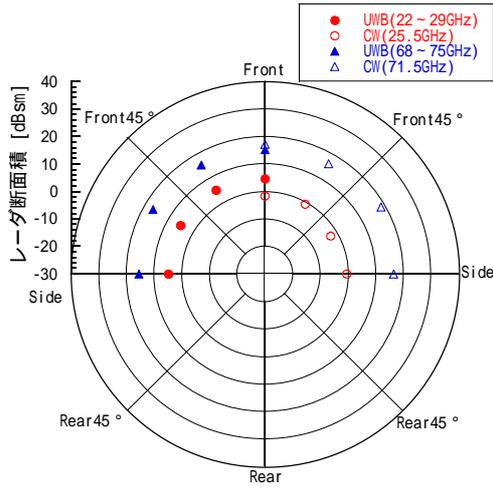
また、200 mm φ 木柱における UWB と CW のレーダ断面積はほぼ一致している。木柱の UWB レーダ断面積は 26 GHz 帯では $\sigma=3 \text{ dBm}^2$ 程度とほぼ一定値となっているが、70 GHz 帯では $\sigma=6\sim 16 \text{ dBm}^2$ 程度と最大 10 dB 程度の差が現れている。これは使用した木柱の材質(特に含水率)が不均一であったためと考えられる。但し、26 GHz 帯においても送受信偏波の組合せが H-H 偏波の場合には、最大 5 dB 程度の差が現れていた。

これらのことから各種円柱におけるレーダ断面積は材質が金属、塩ビ管、木柱の順にレーダ断面積が小さくなるのがわかる。但し、木柱のように材質が不均一なものについてはレーダ照射位置によりレーダ断面積が異なることがわかった。また、70 GHz 帯のレーダ断面積は 26 GHz 帯に比べ平均 10 dB 程度大きく、各種車両時の測定結果である平均 12 dB とほぼ一致している。

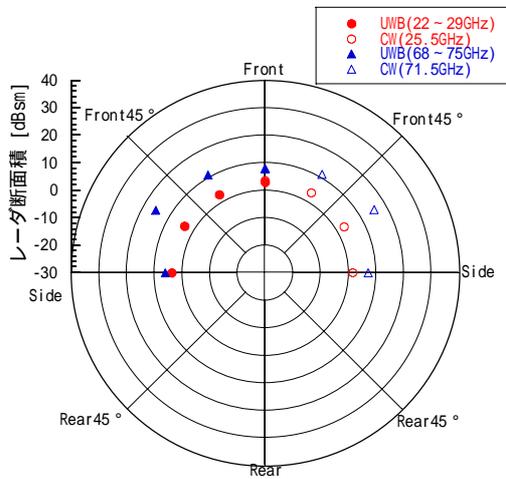


(a) 200mm φ 鉄管柱

図 6 各種車両におけるレーダ断面積



(b)200mm φ 塩ビ管



(c)200mm φ 木柱

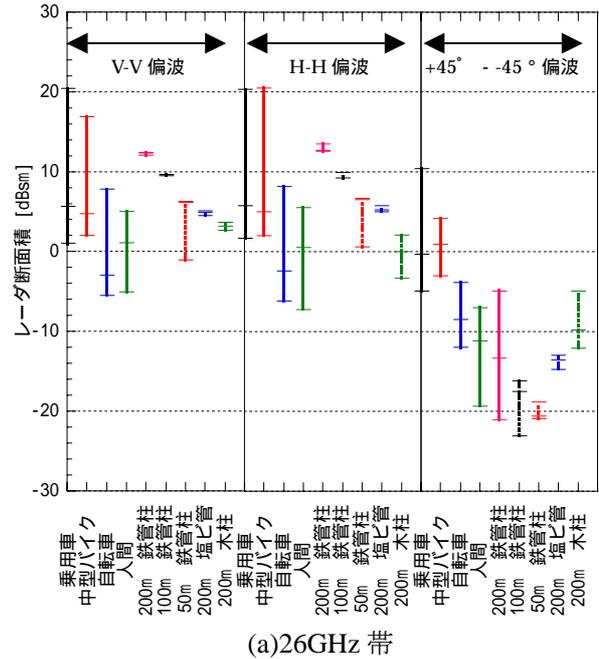
図 7 各種円柱におけるレーダ断面積

図 8 に各種物標におけるレーダ断面積を示す. (a), (b)はそれぞれ 26 GHz 帯, 70 GHz 帯の測定結果である. X 軸には各種物標, Y 軸にはレーダ断面積を示し, 左から順に偏波の組合せが V-V, H-H, +45° - -45°を示してある.

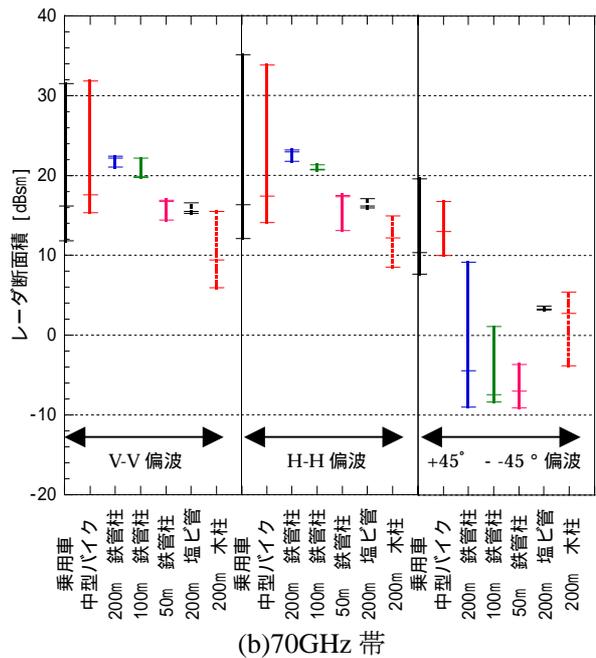
V-V 偏波および H-H 偏波では, 偏波の違いは顕著に現れておらず, 同程度のレーダ断面積である. また, 金属柱の場合には理論どおり径が太くなるに従ってレーダ断面積が大きくなり, 同径で材質が異なる場合には, 金属柱, 塩ビ管, 木柱の順にレーダ断面積が小さくなる.

一方, +45° - -45° 偏波では, V-V 偏波および H-H 偏波に比べ 10 dB 以上レーダ断面積が小さくなる. しかし, 材質の異なる円柱のレーダ断面積は V-V 偏波および H-H 偏波と異なり, 鉄管柱に比べ塩ビ管や木柱の方が大きくなる場合があることがわかった.

これらの結果は 26 GHz 帯, 70 GHz 帯共に同様の傾向であると言える.



(a)26GHz 帯



(b)70GHz 帯

図 9 各偏波におけるレーダ断面積一覧

4. まとめ

26 GHz 帯, 70 GHz 帯における各種物標の UWB レーダ断面積を測定した. それによると乗用車のレーダ断面積は車輻前方, 真横, 後方で最大となり, 中型バイクのそれは真横で最大となる. また, CW レーダに比べ UWB レーダを用いた方がレーダ断面積の方向依存性を小さく抑えられる.

一方, 各種円柱のレーダ断面積は, 金属柱の場合には径が太くなるに従って大きくなり, 同径で材質が

異なる円柱の場合には、鉄管柱、塩ビ管、木柱の順でレーダ断面積が小さくなる。

これに加え、70 GHz 帯のレーダ断面積は物標に依存せず 26 GHz 帯に比べ平均 10 dB 程度大きくなるが、レーダ断面積の傾向は周波数に依存せずほぼ一致している。

今後、UWB レーダの開発に必要となる樹木等のレーダ断面積データを蓄積していくと共に、システム開発に必要なパラメータを検討していく予定である。

謝辞 本研究は、情報通信研究機構 UWB 結集型特別グループおよび UWB 研究開発コンソーシアムが実施したものである。測定にご協力頂いた同グループの荒木純道、高田潤一、陸田裕子および同コンソーシアムの吉川誠、佐々木収、明山哲、大久保文男、細谷裕子の各氏に感謝致します。

参考文献

- [1] 河野, “UWB システムの総論－研究・開発・法制化の動向－”, MWE2003, WS1-1
- [2] 高橋, 吉川, 角田, 天野, 小林, “準ミリ波 UWB における乗用車レーダ断面積の測定”, 第 482 回 URSI-F, 2004
- [3] 高橋, 吉川, 角田, 天野, 小林, “乗用車の Ka 帯 UWB レーダ断面積の測定”, 2004 信学総大, B-1-44
- [4] 高橋, 吉川, 天野, 廣瀬, 西山, 小林, “人間および軽車両の Ka 帯 UWB レーダ断面積の測定”, 2004 信学ソ大, AS-4-4
- [5] 高橋, 天野, 廣瀬, 西山, 小林, “各種円柱の Ka 帯 UWB レーダ断面積の測定”, 2005 信学総大, ABS-1-8
- [6] 吉田 孝(監修), “レーダ技術”, 社団法人電子通信学会, 1984.
- [7] M.I.Skolnik, “*Introduction to Radar Systems*, 3rd ed.”, McGraw-Hill, New York, 2001.