

電波発射禁止帯への干渉を低減する車載用 UWB レーダの開発

Development of Automotive UWB Radar to Reduce Impact on Radio Services in Restricted Band

河村尚志 Takashi Kawamura, 手代木扶 Tasuku Teshirogi, 江島正憲 Masanori Ejima, 荒屋敷豊 Yutaka Arayashiki, 斉藤澄夫 Sumio Saito

[要 旨]

現在 UWB 技術を用いた準ミリ波帯車載用短距離レーダ (SRR: Short Range Radar) の開発が世界中で進められているが、割り当て周波数の中に、地球探査衛星や電波天文を保護する電波発射禁止帯が含まれており、これらの無線業務との干渉を抑え、UWB レーダの共存をいかに確保するかが大きな課題となっている。この解決策として FCC は 2004 年 12 月に従来の規則の一部改訂を行い、発射禁止帯の放射を厳しくする新たなスペクトルマスクを定めた。当社ではこの新マスクを満たす新しい SRR を開発した。このレーダは、キャリアリークが生じないバースト発振器と発射禁止帯の放射を抑えることのできるアンテナで送信系を構成することの特徴とし、これにより干渉低減を図っている。さらに、高速動作の自乗検波器、利得可変低雑音増幅器、低ドロップのサンプルホールド回路などのキーデバイスを開発することによって、簡易な構成の UWB レーダを実現している。

[Summary]

Development of automotive short-range radar using ultra-wideband (UWB) technology in the quasi-millimeter-wave band is progressing worldwide. However, this band includes the restricted band for protecting radio services, such as passive sensors for the Earth Exploring Satellite Service (EESS), or radio astronomy. Consequently, technologies are needed to reduce the impact of UWB radar on passive radio services and permit coexistence. In December 2004, the FCC revised the rules and prescribed a new spectrum mask. We have developed a novel UWB SRR that complies with the new mask by using a carrier-leak-free burst oscillator and planar antenna with notch filtering. We also have developed several key MMICs, such as a square-law detector with high-speed operation, variable-gain LNA, low-droop sample-hold circuit, etc., which are essential for building a simple UWB.

1 まえがき

路上の安全を高め交通事故死を低減することは現在の世界的課題である。

欧州では EU が 2010 年までに交通事故死者の数を 2000 年の半数以下にするいわゆる E-safety 計画¹⁾を策定したのを受け、その実現に向けて業界団体である SARA (Short range Automotive Radar frequency Allocation group) が結成され、UWB (Ultra-Wideband) 技術を用いた準ミリ波帯車載レーダの開発を進めている。

UWB 技術は元々米国で軍事技術として発展してきたが、FCC (連邦通信委員会) が 2002 年 2 月に商用への開放を宣言した²⁾のを契機に世界でその研究開発が一斉に開始された。準ミリ波帯 (22~29GHz) を用いた UWB レーダは、高い距離分解能を確保でき、また、ドライバーの死角となる車周辺を広く見ることができるほか、超音波センサーに比べ天候の影響がないこと、探知距離を長く取れること、車体のデザインに制約を及ぼさないことなどからその実用化が期待されている。

UWB はその名のとおりに数 GHz に及ぶ広帯域を使用するので、

放射電力密度が小さいとはいえ、既存の電波業務との干渉が最大の問題となる。特に、自らは電波を発射しない地球探査衛星 (EESS) のパッシブセンサーや電波天文等の業務を保護するための電波発射禁止帯 (23.6~24.0GHz) には特別の配慮が必要になる。ITU-R ではこの問題を扱う TG 1/8 を組織し、2005 年 10 月までに 6 回の会合を開いて世界的に審議を行い、その結果統一的な規制の勧告案を作成した³⁾。

FCC では当初 22~29GHz で -41.3dBm/MHz の放射を認め、上記発射禁止帯ではレーダアンテナの仰角サイドローブを制限するという規制を打ち出していたが、2004 年 12 月に発射禁止帯の放射を周囲より 20dB 低い -61.3dBm/MHz に改訂し、EESS などの保護と UWB システムとの共存を図る姿勢を鮮明にした⁴⁾。しかしながら、これまで開発された欧米の UWB レーダでは、後述する技術的理由により電波発射禁止帯を使用せざるを得ないため、FCC の新規格を満たすことはきわめて難しい。

当社では FCC の新ルールを満たす UWB レーダを開発した⁵⁾。このレーダは送信系にキャリアリークが生じないバースト発振器とノッチフィルター機能を持つアンテナを採用している。この発振器

を用いると、スペクトラムのメインローブを電波発射禁止帯から十分離して配置できる。また、アンテナ電波発射禁止帯に利得のノッチを一致させることができ、バースト発振器と合わせ 25dB 以上の放射抑圧が可能となる。これらの新技術は日本から ITU-R に提案され、勧告案や議長レポートとして採択された。

本レーダでは、上記の送信系だけでなく受信系にも、自乗検波器、利得可変低雑音増幅器、低ドループのサンプルホールド回路、などのキーとなる新たなデバイスを開発した。本論文ではレーダの構成と特徴、FCC の新しい規格を満たすバースト発振器、ノッチフィルター機能を有するアンテナをはじめ、RF フロンとエンドを構成するデバイスの性能について述べる。

2 車載用 UWB レーダの開発をめぐる動向と技術課題

これまで開発されている UWB レーダでは、連続波を電子スイッチで ON/OFF するパルス変調方式を採用してきた。しかしながら、電子スイッチでは ON/OFF の分離が有限(通常 20~30dB)であり、UWB レーダではパルス OFF の時間が ON の数千倍長いこと連続的キャリアークによってスペクトルに大きな残留キャリアが発生する。そのためドップラーレーダ用に割り当てられ、大きい放射が許容されている SRD 帯(24.05~24.25GHz)に上記残留キャリアを収容することで解決しようとしてきた⁶⁾。しかし、前述の発射禁止帯がこれに極めて近いために、干渉が避けられないという問題に陥っている。そのため、SARA では準ミリ波 UWB レーダが一定割合普及する 2013 年ごろに、78GHz のミリ波帯に移行するという変則的シナリオを描いている。

2002 年に制定した FCC の“First Report and Order”では発射禁止帯についても -41.3dBm/MHz の放射を認めていたが、EESS などとの干渉を軽減する対策として、UWB レーダの普及に応じてそのアンテナのサイドローブを段階的に厳しくするという規制を併記している。具体的には、2005 年 1 月 1 日から仰角 30° 以上でサイドローブを -25dB 以下、2010 年 1 月 1 日からは -30dB 以下、2014 年 1 月 1 日以降は -35dB 以下、と定めている。しかしながら、これを実現するためにはアンテナは垂直方向に大きな寸法を必要とし、一般乗用車ではバンパー内側にレーダを収納できなくなってしまう。また、仮にこの仰角制限をクリアできたとしても、水平方向に放射された電波が、他の車や周辺物体、さらには雨滴により散乱し、EESS へ干渉することが指摘されている⁷⁾。結局、この問題を解決するには、この発射禁止帯の電波の放射を低く抑えるしか方法がないと考えられる。

2004 年に追加された FCC の新スペクトルマスクはこのような背景から出されたものである。このマスクは図 1 に示すように、23.12 GHz~23.6GHz および 24.0GHz~29.0GHz では -41.3dBm/MHz の最大放射を認め、この外側ならびに電波発射禁止帯では -61.3dBm/MHz に抑えている。

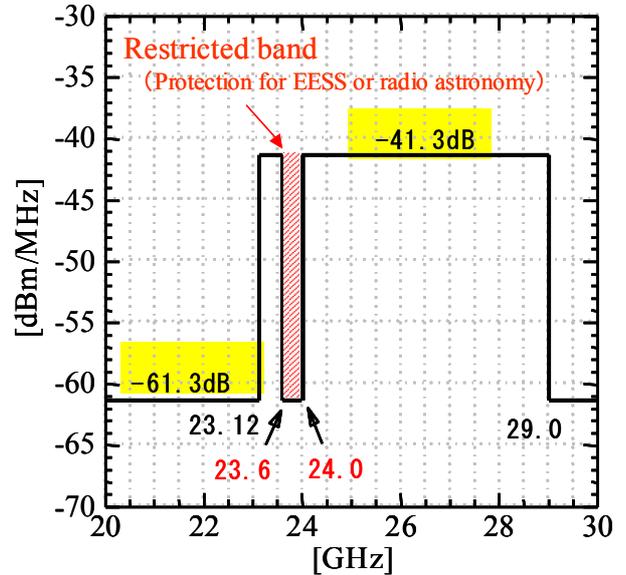


図 1 FCC 新スペクトルマスク⁴⁾
FCC Revised spectrum mask

3 レーダシステムの構成と特徴⁵⁾

図 2 に今回開発した UWB レーダのブロック図を示す。

レーダ動作の概要は以下の通りである。送信短パルス整形器(Tx PS)は可変遅延回路(VDC)の送信トリガー信号(Tx trigger)によって 1ns 程度の送信パルスを生成し、バースト発振器(BO)を駆動する。バースト発振器はキャリアークの無い 26GHz、1ns 程度のバースト信号を発振し、これがレーダ送信信号として電力増幅器(PA)を介して送信アンテナから空間に放射される。PA は出力電力可変機能を有しており、その出力電力は制御回路(Control/Data Acquisition Board)によってターゲットの種類や距離に応じて制御される。また、レーダ送信信号の繰り返し周波数は 100kHz 程度である。

本レーダでは、複数のターゲットからの多重反射を抑圧するため、直交する 2 つの円偏波アンテナを送信受信アンテナとして使用している。このアンテナについての詳細は後述するが、発射禁止帯にノッチをもつアンテナであり、送信アンテナは左旋偏波(LHCP)、受信アンテナは右旋偏波(RHCP)である。

受信アンテナで受信したレーダ受信信号は、利得制御機能を持った低雑音増幅器(LNA)で増幅したのち、自乗検波器(SLD: Square-Law Detector)で検波され、帯域 2GHz のローパスフィルタ(LPF)を介してサンプルホールド回路(SH)に入力する。サンプルホールド回路は受信短パルス整形器(Rx PS)からの信号(可変遅延回路によりターゲットの距離に応じた遅延が与えられている)をサンプル信号としてこの検波信号を 100ns 程度ホールドする。ホールドされた信号は ADC でデジタル化され信号処理される。

これまでに開発された UWBレーダの多くは、直交検波方式であり、局部発振器、アンプ、ミキサ、SH で構成される受信部が 2 セット必要となる。これに対し、本レーダは自乗検波方式であり、受信部は 1 セットのみで構成される。これにより低コスト化を実現している。さらに、SLD を使用するインコヒーレントな検知方式は、直交検波方式より人体のようなターゲットを検知するのに適している。⁸⁾

また、本レーダは PA の出力電力制御と LNA の利得制御機能を有することによって、レーダの検波器のダイナミックレンジを等価的に大きくできる。これにより全体としてレーダ動作に十分なダイナミックレンジを確保している。

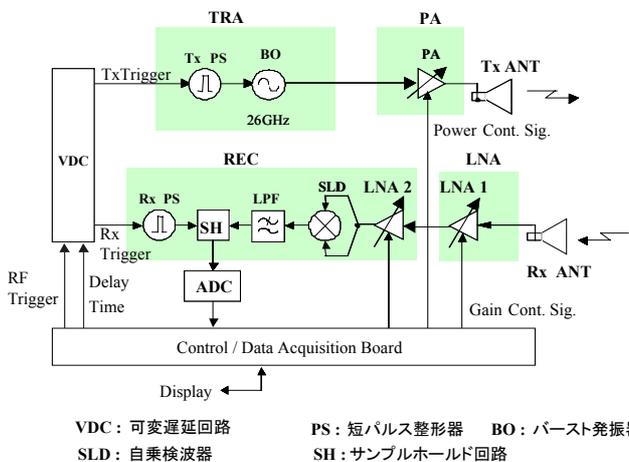


図 2 UWBレーダブロック図
Simplified block diagram of SRR

4 構成機器と性能

本レーダのために、4 種類の MMIC (TRA, PA, LNA, REC) を開発した。これらの MMIC は、準ミリ波帯で高性能なデバイスを製造するのに適した InGaP/GaAs HBT (Hetero-junction Bipolar Transistor) プロセスで製造されている⁹⁾。

4.1 送信系

送信系は、TRA(バースト発振器, 短パルス整形器), PA の 2 つ

の IC で構成されている。

(1) バースト発振器(BO)⁹⁾

バースト発振器は高速に発振開始と停止を行う工夫により、短パルス整形器が生成する 1ns 程度のパルス幅に応じた時間だけ 26GHz 帯のバースト信号を発振する回路で、発振停止時はキャリアークが全く無いという特徴を持つ。発振周波数は 25.5GHz から 27.5GHz まで可変可能で、出力電力は -5dBm 以上である。バースト発振器は本システムが成立するための最も重要なデバイスであり、その実現方法について詳細に述べる。

発振器の発振開始、発振停止を行うには、電源をスイッチする方法が考えられる。特に電源を遮断すれば、発振は理論上あり得ないため、従来の電子スイッチで連続波をパルス変調する方式で問題になるバースト信号停止時のリークは完全に除去できる。しかし、市販の誘電体共振器型発振器(DRO)や電圧制御発振器(VCO)などの発振器は電源投入後の発振起動が緩慢(数十nsから数μs前後)であり、UWB で必要とされる 1ns 程度の短いバースト信号を作り出せない。

発振器の発振開始、発振停止を高速で起動することができれば、UWBレーダ用発振器としてリークがなく、かつ簡素化、低コスト化が実現可能となる。このため、本開発では発振部の電源電流を高速で ON/OFF する回路の採用と、発振を高速で起動させるためのトリガを共振器に与える手法を用いた。

本発振器の回路図(概略図)を図 3 に示す。発振器は Q1, Q2 の差動型正帰還増幅回路、発振周波数を決める

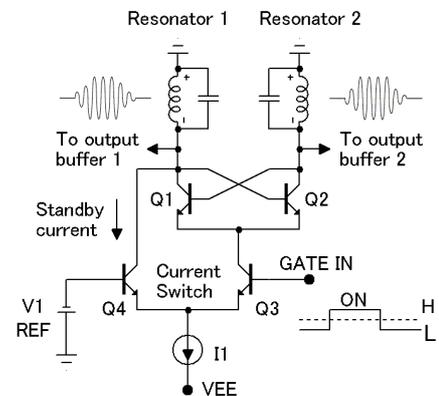


図 3 バースト発振器回路図(概略図)
Schematic of burst oscillator

ための共振器(Resonator1, 2), および Q3 と Q4 で構成する電流スイッチ(Current Switch)から成る。

ここで, Q3 の入力 GATE 信号(GATE IN)が図に示すようにLの場合, 定電流トランジスタ Q3 のコレクタ電流は遮断されて, Q1, Q2 に電源電流は供給されず, 発振はしない。一方, Q4 は導通状態になり, Resonator1 のコイルには起動に備えた定常電流(standby charge current)が流れている。次に, Q3 が H になると Q1, Q2 に電源電流が供給され, 発振可能状態になる。同時に Q4 は遮断状態になり, Resonator1 のコイルに流れていた定常電流が急激に OFF になる。その結果, Resonator1 に過渡的な電気振動が発生し, これ(トリガ)をきっかけとして発振が急激に始まる。

図 4 にバースト発振器で生成した信号のスペクトラム分布を示す。残留キャリアが存在した場合, キャリアの周波数の位置に線スペクトルが重畳された分布となるが, この図にはそれが存在しない。よって, 残留キャリアが存在しないことが確認できる。また, 図より中心周波数を 26.5GHz にすることによって発射禁止帯 23.6~24.0GHz のレベルがピークより 20dB 程度低下していることがわかる。この低下量はパルス幅や中心周波数の取り方によって異なるが, 第一サイドローブが発射禁止帯にかかったとしてもピークより 13dB 以上の低下することが見込まれる。更に, 後述するアンテナの放射抑圧効果により 15dB 以上の放射抑圧が可能のため, 合わせて 25dB 以上の放射抑圧が可能であり, FCC のルールを満足できる。

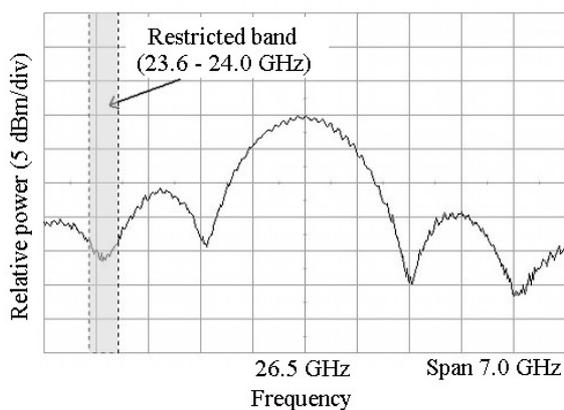


図 4 バースト発振器スペクトラム(パルス幅 = 900 ps)
Spectrum of burst oscillator (pulse width = 900 ps)

(2) 短パルス整形器(PS)

送信短パルス整形器(Tx PS)は図2の可変遅延回路が発生する 100ns 程度の送信トリガ(Tx trigger)に同期して約 1ns のパルスを発生する回路である。パルス幅は外部制御電圧により 0.5ns から 1.5ns の間で調整できる。また, 受信用として REC に入っている受信短パルス整形器(Rx PS)もこれと同じ回路である。

(3) 電力増幅器(PA)

増幅回路はHBTエミッタ接地を使ったシングルエンド増幅器で, HBTのコレクタ電圧を変化させることで出力電力を 0dBm から +19dBm まで連続可変できる。図5に最大出力電力時の入出力特性を示す。

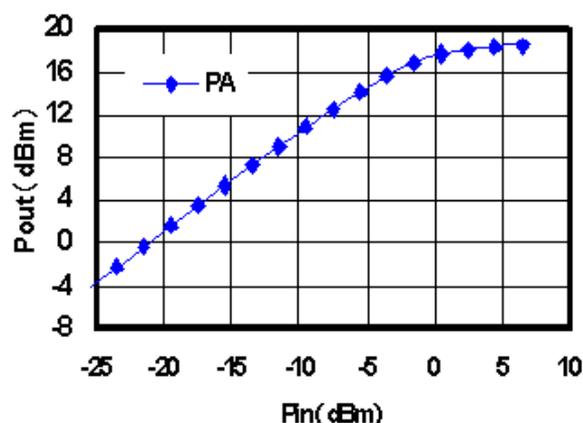


図 5 PA 入出力特性
PA Input/output characteristics

4.2 アンテナ^{10), 11)}

電波発射禁止帯での利得にノッチ特性を有すると共に, 多重反射抑圧効果のある円偏波の UWB レーダアンテナを開発した。

広帯域なアンテナをプリント基板で実現する場合, 一般に基板を厚くするが, このようにすると表面波が発生しアンテナ素子の特性を大きく乱してしまう。そこで, 図 6 のように素子の周りにスルーホールによるキャビティを構成し, 周りに長さ $L_r \approx \lambda_g/4$ となるリムを設けることによって表面波の抑制を可能にした。また, キャビティ寸法 L_c とリムの長さ L_r およびスパイラル素子の調整によりキャビティの共振周波数を発射禁止帯に一致させ, 放射の抑制を可能にした。

このアンテナを用いて 2×4 のアレーを試作し, 特性評価を行った。アレーは広角・広帯域にわたり良好な円偏波を実現するシーケンシャル回転構成¹²⁾としている。

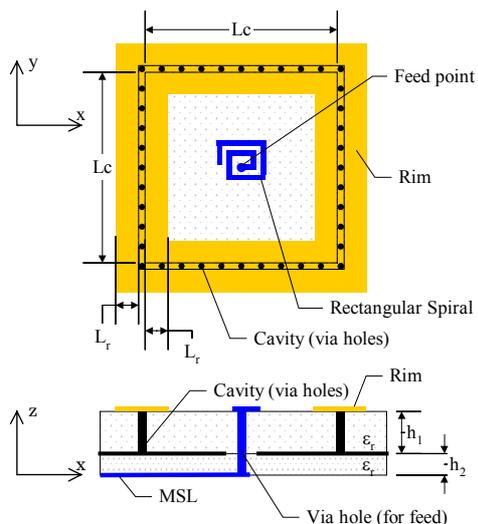


図6 アンテナ構成図
Structure of rimmed-cavity-back spiral antenna

利得の周波数特性を図7に示す。25~29GHzにおいて利得は14dBi以上、また、発射禁止帯における利得は26.5GHzに対して15dB以下のノッチ特性を実現しており、電波発射禁止帯での放射が抑制されている。また、交差偏波(LHCP)レベルも広帯域及び広角にわたって低レベルとなっている。

このほかに、直線偏波のアンテナ素子を採用したものについても開発を進めており、ほぼ同等な性能のアンテナの開発に成功している。¹³⁾

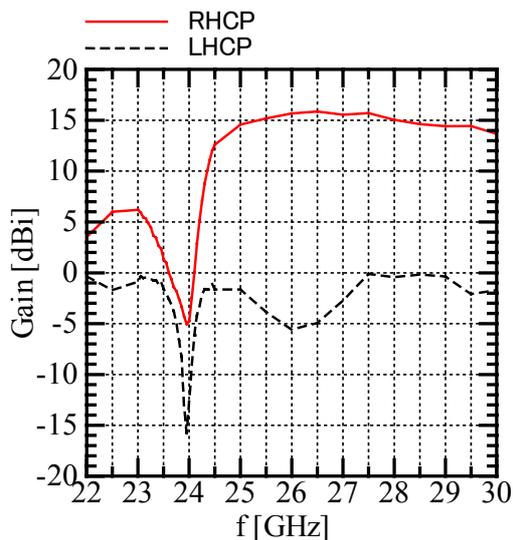


図7 2x4 アレーアンテナの利得
Gain of 2 x 4-element array

4.3 受信系⁵⁾

受信系はLNA1, REC(短パルス整形器, 自乗検波器, サンプルホールド, LNA2)で構成されている。

(1) 低雑音増幅器(LNA1, LNA2)

LNA1, LNA2は同一設計の低雑音増幅器で利得を変えられることが特徴である。増幅回路は電力増幅器と同じHBTエミッタ接地を使ったシングルエンド増幅器で、利得制御の方法はHBTのコレクタ電流を制御することで実現した。この方法だと、LNAの利得を低減した場合でも飽和出力電力が大きく変化しないという特徴が得られる。

図8に制御電圧(Vcont)に対する利得およびNFの特性を示す。

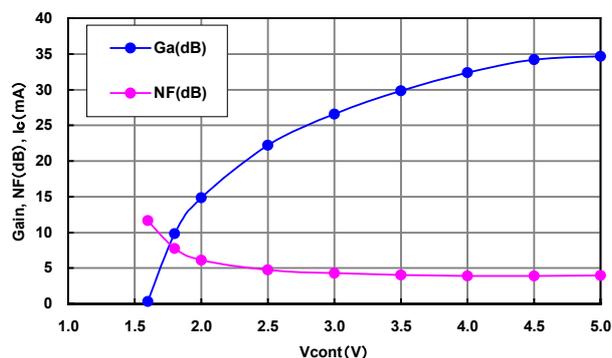


図8 LNA利得制御特性
LNA Gain control characteristics

(2) 自乗検波器(SLD)

本システムでは、準ミリ波帯で高速な動作を必要とするため、高速性に関して優れているギルバートセル回路を基にした自乗検波器を採用した。図9に入出力特性を示す。

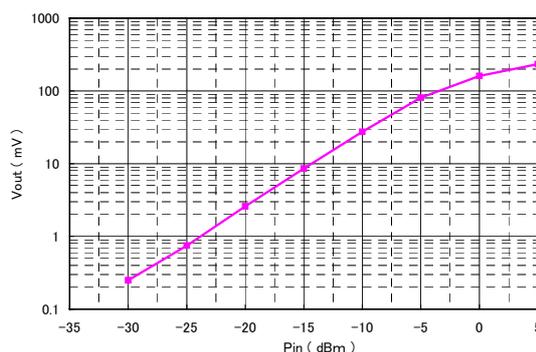


図9 自乗検波器入出力特性
SLD Input/output characteristics

(3) サンプル・ホールド回路(SH)

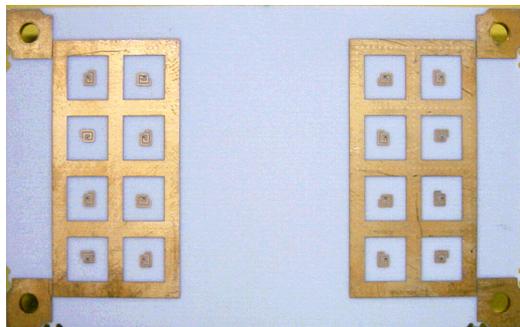
本システムでは、受信短パルス整形器で生成されたトリガパルスのパルス幅に相当する時間だけ入力信号を積分し出力する積分型サンプルホールド回路を採用した。

このサンプルホールド回路の性能は、サンプル時間数百 ps に対してホールド時間は 100ns 程度であり、ドループ特性は 50ns で 12% 程度である。

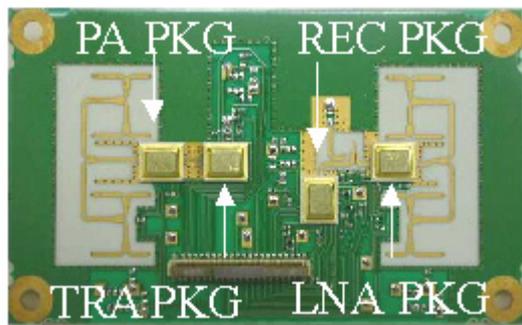
5 レーダ性能（ループテスト）

これらの MMIC とアンテナを使った UWB レーダを試作した。

図 10 は試作したレーダの RF フロントエンドの外観である。送信アンテナは左旋偏波 (LHCP), 受信アンテナは右旋偏波 (RHCP) の 2×4 アレーであり、基板の裏に MMIC を実装している。基板はロジャース製高周波基板 RO4003C ($\epsilon_r = 3.38$) を使用し、サイズは 86×50mm である。本装置の性能を表 1 に示す。



(a) アンテナ面
Top view



(b) デバイス実装面
Bottom view

図 10 UWB レーダ RF フロントエンド
RF Front-end of SRR

日本では、UWB レーダの周波数割り当てがまだ行われておらず、電波を放射する免許を得られないため、レーダの送受信アンテナの代わりに SMA コネクタを取付けた送受信試験ボード(図 11)を製作し基本性能を評価した。この試験ボードと同軸線および可変アッテネータを使って図 12 のブロック図のような実験系を構築し、反射波を検知するレーダ動作のシミュレーションを行った。

表 1 UWB レーダ RF フロントエンドの性能
Performances of RF front-end of SRR

Parameters	Typical value
Pulse width	0.5~1.5ns
Frequency of BO	25.5~27.5GHz
Output power of BO	-5dBm
Output power of PA	0~19dBm
LNA gain	0~35dB
Antenna gain	14dBi
Polarization	LHCP (Tx) RHCP (Rx)
Input level for SLD	-30~0dBm
Hold time of SH	<100ns

PA の出力レベルと可変アッテネータを調整することにより、LNA 入力端にレーダ断面積 0dBm², 距離 5m のターゲットからの反射レベルと同等な信号を入力した時の結果を図 13 に示す。なお、この時の同軸ケーブルの長さは 10m パルス幅 0.75ns である。この結果からケーブル長の半分の 5m の位置に反射波を検知できている。

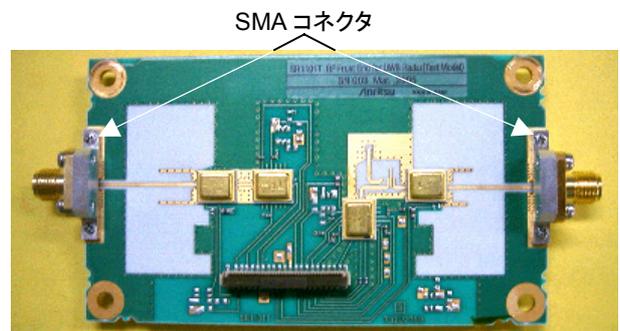


図 11 送受信試験ボード
Test board

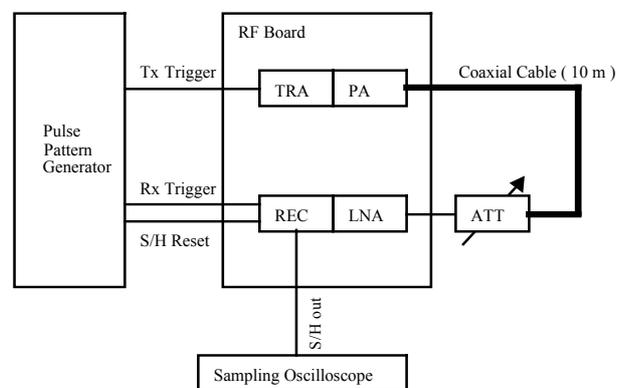


図 12 実験系ブロック図
Block diagram of experiment

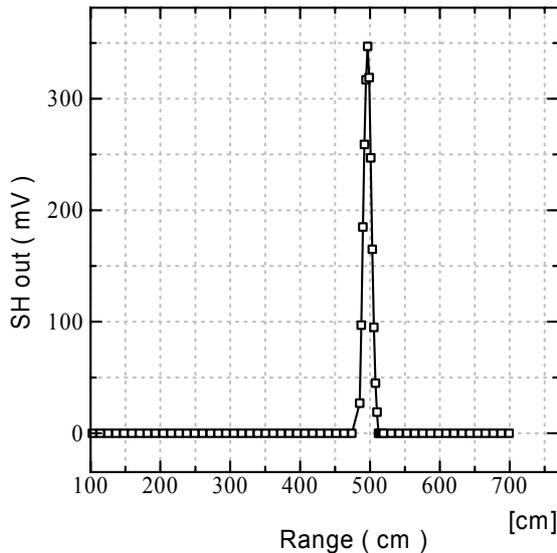


図 13 UWB レーダ検知性能
SRR Detection performance

6 むすび

FCC の新スペクトルマスクを満たし、かつ簡易な構成を実現する新しい UWB 短距離レーダ、並びにキーデバイスであるキャリアリークを生じないバースト発振器、ノッチフィルター機能を有するアンテナをはじめ、短パルス整形器、可変出力 PA、可変利得 LNA、自乗検波器、サンプルホールド回路など RF フロントエンドを構成するデバイスについて述べた。

本レーダの開発は、松下電器産業株式会社パナソニックオートモーティブシステムズ社 (PAS 社) 殿と共同で開発したもので、当社は主に RF フロントエンド系を、PAS 社殿が制御系と信号処理系を分担した。共同開発に参加された PAS 社殿、ならびに当社コアテクノロジー R&D センターの関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) http://europa.eu.int/information_society/activities/esafety/index_en.htm
- 2) "First Report and Order," FCC 02-48, Feb. 14, 2002
- 3) "Draft new Recommendation ITU-R SM.[UWB.COMP] - Impact of devices using ultra-wideband technology on systems operating within radiocommunication services," SM. 1BL13, <http://www.itu.int/rec/R-REC-SM.1BL13-0-200605-D/en>
- 4) "Second Report and Order and Second Memorandum Opinion and Order," FCC 04-285, Dec. 16, 2004
- 5) T. Teshirogi, et al. "UWB Automotive Radar to Mitigate Impact on Radio Services Using Restricted Band," APMC2005 Proceedings, M2-11, pp.83-86 (Suzhou, China)
- 6) Gresham, I., et al.: "Ultra-Wideband Radar Sensors for Short-Range Vehicular Applications," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 2004, 52, (9), pp. 2105-2122,
- 7) M. Younis, et al., "Interference from 24GHz Automotive Radars to Passive Microwave Earth Remote Sensing Satellites," IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, vol.42, PP. 1387 - 1398, July 2004
- 8) Van Trees, "Detection, estimation, and modulation theory - Part 1," Wiley, New York, 1968
- 9) T. Teshirogi, et al., "A residual-carrier-free burst oscillator for automotive UWB radar applications," Electronics Letters, Vol. 41, No.7, pp. 535-536, 28 April, 2005
- 10) T. Kawamura, et al., "UWB radar antenna with emission notch in restricted frequency band," Proc. ISAP2005, FA2-1, pp.941-944, Aug. 2005 (Seoul)
- 11) 山本, 河村, 梅田, 手代木: "発射禁止帯にノッチを有する UWB レーダアンテナ", 2005 電気通信学会総合大会, B-1-79
- 12) T.Teshirogi et al., "Wideband Circularly Polarized Array Antenna with Sequential Rotations and Phase Shift of Elements," ISAP-85, 024-3, pp.117-120,1985.
- 13) 河村, 前田, 手代木, 滝沢, 浜口, 河野: "UWB レーダアンテナの電波発射禁止帯ノッチの広帯域化", 2006 電気通信学会総合大会, B-1-120

執筆者



河村 尚志
R&D 本部
コアテクノロジー R&D センター
ワイヤレス計測技術開発部



手代木 扶
R&D 本部
コアテクノロジー R&D センター
ワイヤレス計測技術開発部



江島 正憲
R&D 本部
コアテクノロジー R&D センター
MMIC 開発部



荒屋 敷 豊
R&D 本部
コアテクノロジー R&D センター
MMIC 開発部



斉藤 澄夫
計測事業統轄本部
IP ネットワーク計測事業部
第 1 開発部