

狭帯域・遠近両用高分解能小型レーダー技術の研究開発

Research and Development of Radar Technology of Long Range and High Resolution by Narrow Receiver Bandwidth

研究代表者

稲葉敬之 電気通信大学
Takayuki Inaba The University of Electro-Communications

研究分担者

小菅義夫[†] 秋田学[†] 渡辺優人[†] 藤村嘉一[†]
芝隆司[†] 渡辺一宏[†] 中村真帆[†] 太田敏行[†]
木村徳典[†] 香川正幸[†] 坂本禎治郎[†]
山田雅也^{††} 久保田幹^{††} 山岸傑^{††} 塚島光路^{††} 小河昇平^{††} 福永貴徳^{††}
Yoshio Kosuge[†] Manabu Akita[†] Masato Watanabe[†] Kaichi Fujimura[†]
Takashi Shiba[†] Kazuhiro Watanabe[†] Maho Nakamura[†] Toshiyuki Ota[†]
Tokunori Kimura[†] Masayuki Kimura[†] Teijiro Sakamoto[†]
Masaya Yamada^{††} Miki Kubota^{††} Suguru Yamagishi^{††}
Koji Tsukashima^{††} Shohei Ogawa^{††} Takanori Fukunaga^{††}
[†]電気通信大学

^{††}住友電気工業株式会社

[†]The University of Electro-Communications

^{††}Sumitomo Electric Industries, LTD.

研究期間 平成 26 年度～平成 28 年度

概要

本研究開発では、従来手法に比べ半分以下の占有帯域幅で、送信ピーク電力と観測時間を同等にした従来の手法と同等の最大検知距離と距離分解能の比を得ることが可能で、1 m～数十mの距離の物体を検知可能な狭帯域・遠近両用高分解能レーダー技術を確立し、さらにその小型化技術を開発する。この技術確立のために、課題（ア）狭帯域・遠近両用高分解能レーダー変復調技術、（イ）時空間信号処理技術、（ウ）小型レーダーモジュール技術の各研究開発を実施した（課題（ア）（イ）電気通信大学、課題（ウ）住友電気工業株式会社）。

Abstract

The radar technology that can obtain the detectable maximum range to range resolution ratio by the half of transmission bandwidth compared with the conventional method and can detect the objects at the range from 1m to several tens meters are established. The technique for miniaturizing radar RF device is also developed. To establish the radar technology, following research subjects are conducted: (1) R&D of radar modulation for a long range and high resolution by a narrow receiver bandwidth, (2) R&D of Space-time signal processing, (3) R&D of small radar module technology. (1) and (2) are conducted by UEC and (3) are conducted by Sumitomo Electric Industries.

1. まえがき

ミリ波レーダーは、自動車の衝突回避等を目的とする ITS（高度道路交通システム）用途での実用化に加え、踏切安全監視・交差点周辺監視や車両前方および周辺監視による衝突被害回避を目的とした次世代車載レーダー、更には、物流検査や建設機器等の産業分野における様々な用途への導入検討が加速している。ミリ波レーダーは、車の衝突回避等を目的とする ITS（高度道路交通システム）用途で実用化されているのみならず、物流や検査、建設機器、災害対応等の産業分野への応用の期待が高い。

特に、踏切安全監視・交差点周辺監視や車両前方および周辺監視による現在よりも高度な衝突被害回避等の用途への導入にあたっては、人物の分離検知を可能とする高分解能性が求められるため、広帯域を利用したレーダー技術の研究開発が活発に行われている。しかしながら、広帯域を利用すれば内部雑音が増加し、その状況で検知距離性能を高めるためには高い送信ピーク電力が必要となり、対応するハードウェアの高コスト化や干渉の問題を招く恐れがある。また、既存の方式では、複雑な電波環境での多目

標対処能力や遠近を両立可能とする能力に課題があり、新しい変復調方式に基づくミリ波レーダーシステム（7.9 GHz 等）の開発が必要となっている。さらに、道路交通や鉄道の安全監視システム等の実シーンにレーダーを適用する場合、多数の不要反射波環境の中で多数の人や車を検知する必要がある。このため、本研究開発では、電波の往復時間のみでなく送信周波数間の位相差計測と複合した新たな変復調技術や時空間信号処理技術を開発することで、狭帯域・遠近両用高分解能小型レーダーを確立し、周波数資源のより一層の有効活用に資することを目的とする。レーダーでは、狭帯域化することで分解能が反比例して悪化する。一方で最大検知距離は電波の往復伝搬損失から比例して延伸するわけではなく微小な遠距離化にとどまる。したがって狭帯域にて最大検知距離と距離分解能の比を向上させることは難しい技術課題である。

本研究開発では、従来手法に比べ半分以下の占有帯域幅で、送信ピーク電力と観測時間を同等にした従来の手法と同等の最大検知距離と距離分解能の比を得ることが可能で、1 m～数十 m の距離の物体を検知可能な狭帯域・遠

狭帯域・遠近両用高分解能小型レーダー技術の研究開発

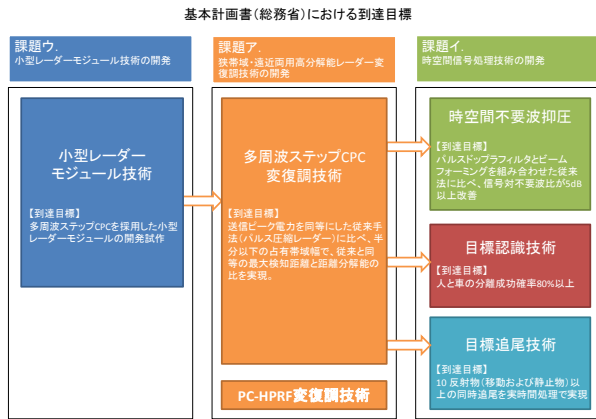


図 1.1 研究課題間の関係

近両用高分解能レーダー技術を確立し、さらにその小型化技術を開発する。この技術確立のために、課題(ア)狭帯域・遠近両用高分解能レーダー変復調技術、(イ)時空間信号処理技術、(ウ)小型レーダーモジュール技術の各研究開発を実施する。課題間の関係を図 1.1 に示す。

2. 研究内容及び成果

2.1. (ア) 狭帯域・遠近両用高分解能レーダー変復調技術の開発

一般的にレーダーで高分解能を得るためには広帯域信号の送受信が必要であるが、広帯域化することで受信機雑音が増加し検知距離が減少してしまうという課題がある。このため、人物の分離検知を可能とする高い分解能と遠距離性の両立を狭帯域にて実現する新たな変復調方式を開発する必要がある。まえがきで述べた送信ピーク電力を同等にした従来手法(パルス圧縮レーダー)に比べ、半分以下の占有帯域幅で、従来と同等の最大検知距離と距離分解能の比を実現するため、多周波ステップ CPC 方式を開発する。PC-HPRF(Phase Coded High Pulse Repetition frequency)方式を開発する。

2.1.1. 多周波ステップ CPC 方式の開発

多周波ステップ CPC 方式は、合成帯域法により狭受信機帯域幅(すなわち遠距離性に優れる)にて高分解能を得る方法である。合成帯域法で生じる距離アンビギュイティ問題に対処するために、距離サイドローブのない完全自己相関が得られる 2 つの CPC 符号パルス圧縮を距離ゲートとして用い、この CPC 符号パルス圧縮と前記合成帯域法で誤差要因となるドップラシフトに対しパルスドップラフィルタを融合させた処理構成にて対処する方式である。図 2.1 に、多周波ステップ CPC 方式の送信シーケンス、図 2.2 に信号処理ブロック図を示す。図 2.1 に示すように、N 個の異なる送信周波数を時分割で切り替え、相補の関係にある 2 つの CPC パルス(Code1、2)を送信する。これを観測時間内に M 回繰り返す。信号処理においては、受信した Code1、Code2 にそれぞれ対して CPC パルス圧縮を行い、パルスドップラフィルタ(PDF)により速度を求める。位相補正処理後に Code1、2 に対する CPC パルス圧縮出力の加算処理を行う。その加算結果に対し、N 個の周波数ステップにおける距離ゲートの位相差を用いて合成帯域することで高距離分解能を得る。なお、フーリエ変換に基づく合成帯域処理の他、S/N が十分確保できる条件においては超分解能法を用いることも可能である(超分解能モード)。本方式は、反射点間のアソシエーション問

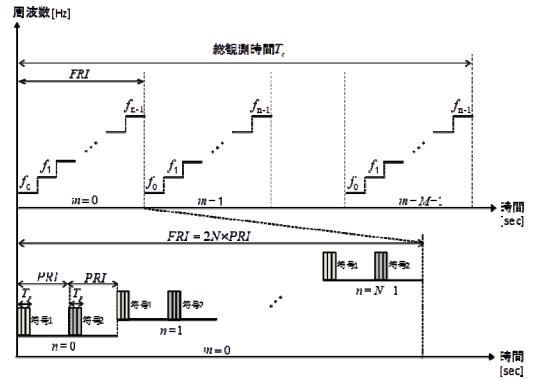


図 2.1 多周波ステップ CPC 方式の送信シーケンス

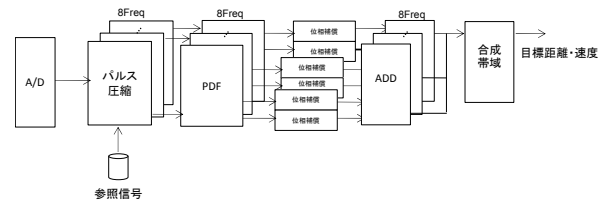


図 2.2 多周波ステップ CPC 方式の信号処理ブロック図

題がなく、また速度・距離が高分解能であるばかりか電力のアイソレーションもある程度速度差と距離差があれば 110dB 以上を達成可能な電気通信大学独自の変調方式である。

(1) 多周波ステップ CPC 変復調方式の原理検証実験

表 2.1 に原理検証実験に用いる多周波ステップ CPC ミリ波レーダーのパラメータを示す。図 2.3 に、多周波ステップ CPC ミリ波実験レーダーの各処理後の出力結果を示し、図 2.3(b)より、符号長が 16 と比較的短いにも関わらず 20~200m 以上にわたり -60dB 以下の距離サイドローブが得られていることが確認される。ここで位相符号パルス圧縮において同等の距離サイドローブを得るためには、M 系列符号を例にすると必要な符号長は 2047 である。図 2(c)に示す合成帯域処理後の結果より、送信帯域幅 430MHz に相当する 34cm のメインローブ幅が得られていることが分かる。同様の結果を小型ミリ波レーダーを用いた原理検証実験においても確認している。

(2) 遠距離における高距離分解能性能検証実験

遠距離における高距離分解能性能を検証するために多周波ステップ CPC ミリ波実験レーダーをミ用いたフィールド実験を実施した結果の一例を示す。実験条件は以下の通りとする。

- 目標：コーナーリフレクタ 2 つ (いずれも 10dBsm)
- 距離 (目標 1) : 149.83-151.43 (m)
- 距離 (目標 2) : 150.17 -151.77 (m)
- 速度 : 4 (km/h) (等速、レーダー視線方向)

図 2.4 に、実験結果 ((a)実験風景, (b)距離・速度マップ, (c)目標速度に対応する距離プロファイル, (d)目標周辺拡大図)を示す。図 5(d)において青色の実線は、超分解能モードによる結果であり、本事例に関しては、距離 150m、距離差 34cm (帯域幅に相当) の二つのコーナーリフレクタの分離が確認される。開発した小型ミリ波レーダーを用いた実験においても 2 目標の分離が確認される(図 2.5)。

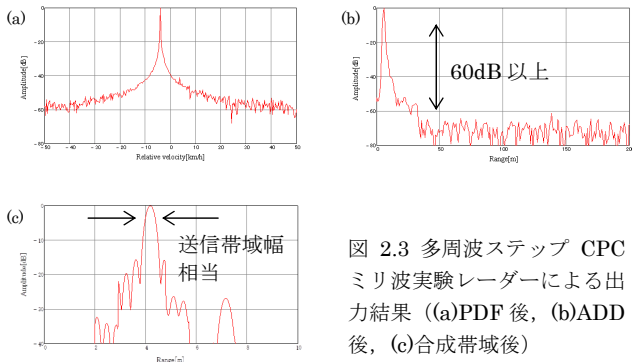


図 2.3 多周波ステップ CPC ミリ波実験レーダーによる出力結果 (a)PDF 後, (b)ADD 後, (c)合成帯域後

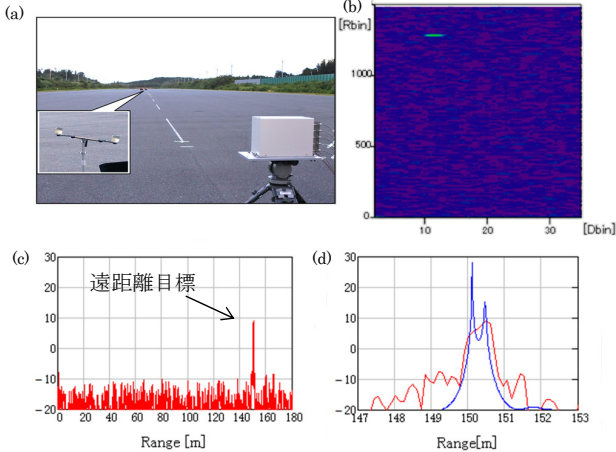


図 2.4 多周波ステップ CPC ミリ波実験レーダーを用いたフィールド実験結果

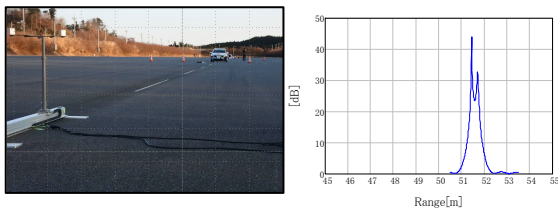


図 2.5 小型ミリ波レーダーによる車両搭載試験

表 2.1 多周波ステップ CPC ミリ波レーダーパラメータ

レーダーパラメータ	緒元
パルス帯域幅	80MHz
符号長	16
PRI	3.5 μ s
パルス数:M	512
周波数ステップ幅	50MHz
周波数ステップ数:N	8
送信帯域幅	430MHz

表 2.2 方式による探知距離性能比較結果 (各 50 回計測)

	距離 1m に補正後の S/N の平均 [dB]	探知距離性能
パルス圧縮方式	108.16	1
多周波ステップ CPC 方式 (周波数ステップ 16)	117.61	1.72

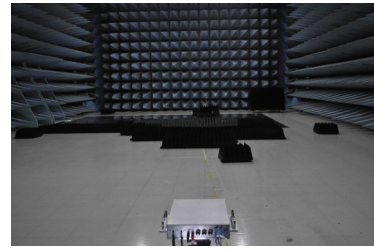


図 2.6 電波暗室 (20m×10m×10m) における性能比較実験

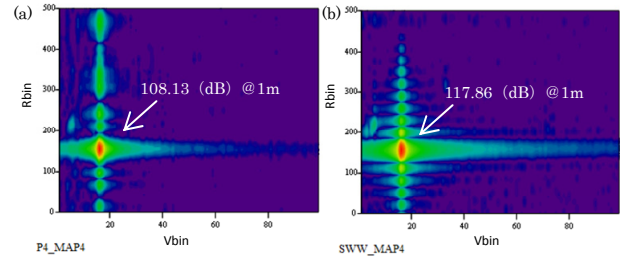


図 2.7 探知距離性能比較実験の一例 (a)パルス圧縮方式, (b)多周波ステップ CPC 方式)

(3) 従来方式との探知距離比較実験

送信帯域幅、観測時間 (CPI)、送信ピーク電力、目標の RCS を同一条件とした多周波ステップ CPC 方式と従来法であるパルス圧縮方式の探知距離性能を比較検証するために、図 2.6 に示すような電波暗室にて、24GHz ソフトウェアレーダーを用いて実験を実施した。比較結果の一例を図 2.7 に示し、50 回計測した結果の平均値を表 2.2 に示す。表 2.2 に示すように多周波ステップ CPC 方式は、同じ距離分解能が得られる条件において、従来法に比べ探知距離性能が約 1.72 倍 (周波数ステップ 16) にまで延伸可能となる結果が得られている。ここで、最大検知距離と距離分解能の比を性能とすると、性能は式 (1) で表される (k_1, k_2 は定数)。

$$PF = \frac{R_{\max}}{\Delta R} = \frac{k_1}{k_2} B^{\frac{3}{4}} \quad (1)$$

同じ性能を満たすために必要な帯域幅 0.48 倍 (半分以下) となる。

(4) 一般道路におけるミリ波レーダーシステム試験

一般道において、多周波ステップ CPC ミリ波実験レーダーによるシステム試験を実施した。本試験では、歩道橋上に地上高 8.7m、俯角 4.0 度で開発した多周波ステップ CPC ミリ波レーダーを設置し、歩道橋下の一般道を通行する車両の検知 (2.2.3 で述べる最適化多目標追尾アルゴリズム搭載) を行った。なお、本設置条件によるビーム照射範囲は距離約 100m~180m 程度であり、当該距離内における計 4 車線 (片側 2 車線道路) を走行する車両を検知対象とする。図 2.8 に一般道路におけるミリ波レーダーシステム試験結果の一例を示す。図 2.8 より、同一方向の交通流 (左車線) において追い越し車線の車両が走行車線の車両を追い越していく状況 (近接距離目標) においても 2 つの目標を検知していることがわかる。また、2.2.3 の最適化多目標追尾アルゴリズムにより走行速度および距離の差から個別の目標の航跡として分離されていることが分かる。本結果は、開発した多周波ステップ CPC ミリ波レーダーの高距離速度分解能および最適化多目標追尾アルゴリズムにより、一般道路において走行車線毎に車両検知・追尾が可能であることを示している。

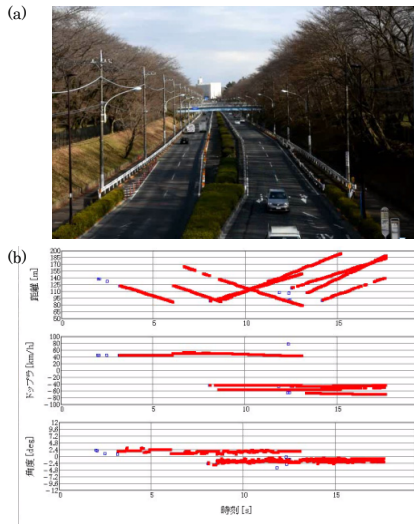


図 2.8 一般道における多周波ステップ CPC ミリ波レーダシステム試験 (a) 試験風景, (b) 試験結果の一例

2. 1. 2. PC-HPRF 方式の開発

UWB パルス方式 (従来方式) の送信シーケンスを図 2.9 に示す。UWB パルス方式では高距離分解能が得られるようなパルス幅 T_p の狭いパルスを用いる。一般的に UWB パルスレーダーでは距離の曖昧さをなくすためにパルス繰り返し時間を目標までの電波往復にかかる時間 (時間遅延 τ) より十分大きく設定する。しかし、送信エネルギー (送信平均電力) が小さく探知距離が短いという課題がある。そこで、PC-HPRF 方式では図 2.10 に示すように PRI を距離の Ambiguity が発生する限界以下 (High Pulse Repetition Frequency) とし、また各パルスに位相 (Phase-Coded) 変調することにより、上記の Ambiguity の問題の解決を図る。目標までの電波往復時間よりパルス繰り返し時間を短くすることで、送信平均電力を大きくし、パルス間のコヒーレントな積分処理により検知距離を延伸が期待される方式である。

(1) 従来方式との探知距離比較実験

送信帯域幅、観測時間 (CPI)、送信ピーク電力、目標の RCS を同一条件とした PC-HPRF 方式と UWB パルス方式の探知距離性能について比較するために電波暗室において行った実験結果 (PC-HPRF 方式における 19.2m の距離の移動目標の S/N) の一例を図 2.11 に示し、UWB パルス方式との探知距離の比較結果を表 2.3 に示す。

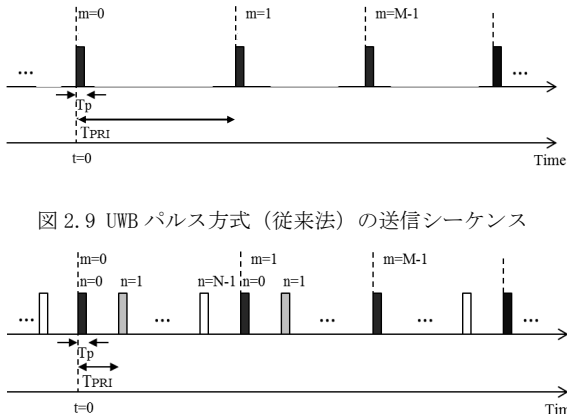


図 2.9 UWB パルス方式 (従来法) の送信シーケンス

図 2.10 PC-HPRF 方式の送信シーケンス

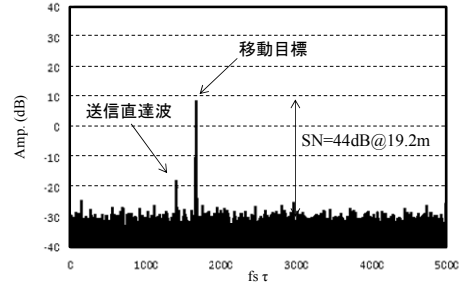


図 2.11 PC-HPRF 方式の探知距離性能評価試験結果の一例
表 2.3 性能評価試験による各方式の探知距離

最大探知距離, Rmax	
PC-HPRF 方式	189m
UWB パルス方式	34m

2. 2. (イ) 時空間信号処理技術の開発

不要波抑圧技術として、アレーアンテナを備えるレーダーにより計測された実データを解析し各種環境でのクラッタの特性を研究・把握した上で、アレーアンテナによる時空間信号処理アルゴリズムを開発する。まず、見通しのよい道路や市街地等、各種道路環境にて実時間動作可能な高分解能遠近両用レーダー信号処理装置で計測した時空間不要波信号の基礎特性を評価する。上記結果を用いて多周波ステップ CPC 方式に適合したアルゴリズムを開発することで、パルスドップラフィルタとビームフォーミングを組み合わせた従来法に比べ、信号対不要波比が 5dB 以上改善されることをシミュレーションにより検証することを目標とする。

2. 2. 1. 不要波抑圧時空間信号処理技術の開発

不要波抑圧のための時空間信号処理として、アンテナ方向とパルス方向の 2 次元適応フィルタである STAP (Space Time Adaptive Processing) がある。このフィルタは、入出力の信号対不要波電力比 (S/C) を最大とする MSN (Maximum Signal to Noise Ratio) により、2 次元空間で不要波対してヌルを形成するものである。本開発では、前方監視レーダーにおいて不要波が局在する自速付近のドップラ周波数情報に着目し STAP に比べ大幅に計算負荷を小さくした ELD-STAP (Element · Localized Doppler-STAP) を多周波ステップ CPC 方式に適用する。ELD-STAP は、アレーアンテナを備えたパルスレーダーにおいて計測される距離 (k)、アンテナ (n)、ドップラ (m) からなる 3 次元の受信データを用いて不要波抑圧を行う (図 2.12)。ELD-STAP ウェイト算出には不要波のみが含まれる信号の相関行列の逆行列が必要であり (図 2.13)、注目するテスト距離ビンの前後を参照セルとして推定する (図 2.12)。計算負荷を小さくするため、パルスドップラフィルタを前処理とすることで自速付近の選択した

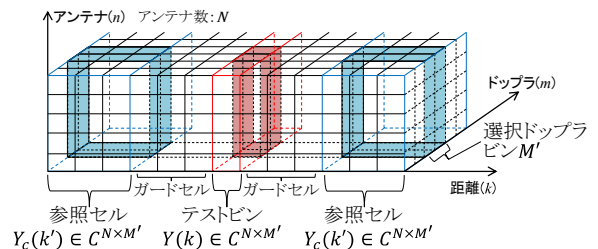


図 2.12 ELD-STAP 法で使用する受信データ領域

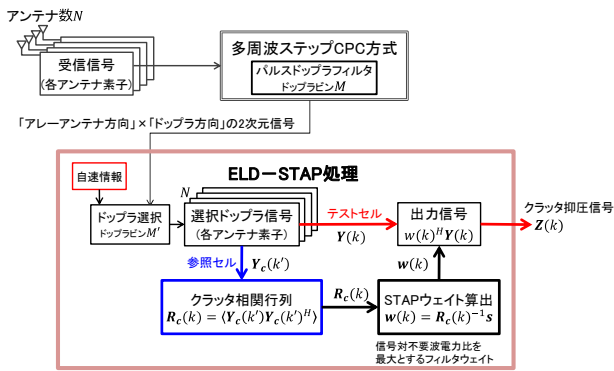


図 2.13. ELD-STAP 法の信号処理ブロック図

ドップラ信号のみを使い、アンテナ方向と選択ドップラ方向の 2 次元適応フィルタにより不要波を抑圧する。

(1) 実験による ELD-STAP の性能検証

開発した不要波抑圧技術の実験的検証に向けて、クラッタ環境下における歩行者検出を目的として、道路脇の植込みから比較的大きなクラッタが入る環境でフィールド実験を行った。計測環境として、植込みの他にガードレールが存在する環境や地面クラッタの大きな草地でも計測を行った。また、歩行者の近傍に反射の大きな車両が存在する環境についても計測を行い、全 304 データを取得した。ここではその一例を示す。歩行者については、ドップラ速度が生垣や車両からのクラッタ速度に近くなり検出が困難となる道路を横切る人物を計測した。計測は、レーダーを車載して約 20km/h で走行しながら反対車線を 5km/h で道路を横切る歩行者を捉えることで行った。

図 2.14 に開発技術による不要波抑圧の一例を示す。両側に植込みがあり、左側にガードレールがある環境レーダーの自速付近に両側の植込みと左側のガードレールの支柱からの不要波が電力 20~35dB で歩行者の電力成分に重畳している。従来法では、185cm 間隔のガードレール支柱と歩行者がほとんど区別できない状況となっている。一方、不要波抑圧処理 ELD-STAP の結果では、植込みとガードレールからの不要波を約 30dB 抑圧し歩行者を検出しやすくなっていることがわかる。

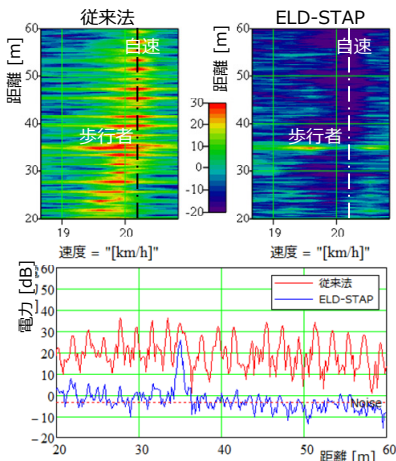


図 2.14. ELD-STAP の性能検証実験結果の一例

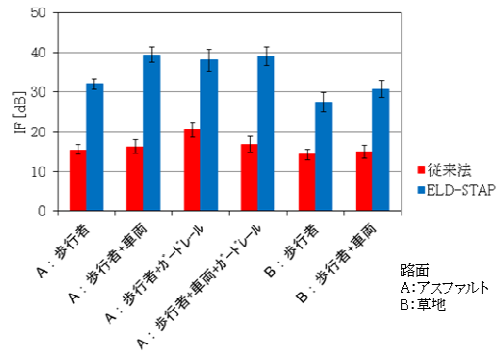


図 2.15. 計測環境に対する不要波抑圧性能

(2) 計測環境に対する不要波抑圧性能

全 304 計測データによる従来法と ELD-STAP の計測環境に対する抑圧性能の比較を図 2.15 に示す。従来法に比べ評価指標 IF(Improvement Factor)値が 15~23dB 改善されている。歩行者近傍に反射の大きな車両やガードレールが有る場合についてもそれらの影響を受けて抑圧性能が下がることなく、それらが無い場合と同等以上の IF 値となっている。

2.2.2. 目標追尾技術の開発

目標追尾技術の開発では、検知されたデータの時間方向の相関性から、将来位置の予測を行う目標追尾技術を開発する。具体的には、実時間動作可能な高分解能遠近両用レーダー信号処理装置の出力である目標検知データを基に 10 反射物(移動および静止物)以上の同時追尾を実時間の処理で実現可能とすることを目標とする。

(1) 最適化多目標追尾アルゴリズムの開発

図 2.16 に提案する最適化多目標追尾アルゴリズムのブロック図を示す。複数追尾フィルタ同時実行法では、平滑性能および追従性能の異なる 3 種のフィルタ A、フィルタ B、フィルタ C が並列に構成されており、平滑性能の高いフィルタ(フィルタ B)が優先的に選択される。フィルタ B のゲーティング処理(ゲート幅が小さい)においてゲート外と判定された検知データに対しては、フィルタ A、フィルタ C の順番でゲーティング処理(ゲート幅が大きい)が行われ、徐々に追従性能の高いフィルタが選択される仕組みとなっている。本手法により、車両の横切りやすれ違いのように、距離やドップラ、角度などの検知データの変化量が大きい状況に対しても、適切な追尾が可能となる。

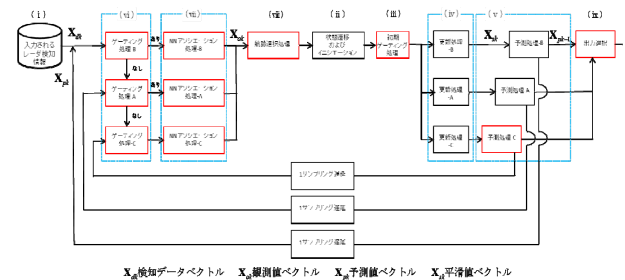


図 2.16. 最適化多目標追尾アルゴリズムのブロック図

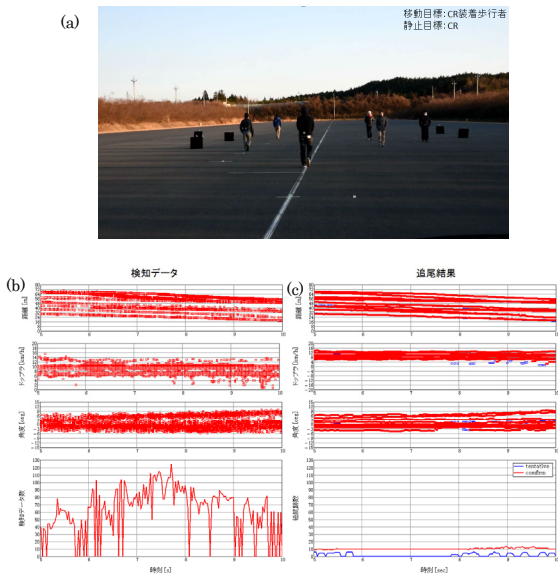


図 2.17 10 目標追尾性能評価試験
(a) 実験風景, (b) 検知データ, (c) 航跡数

(2) 10 目標追尾性能評価試験

本試験では、多周波ステップ CPC ミリ波実験レーダーを車載の状態とし、レーダー搭載車両が低速 (10km/h) で走行する条件で、目標として移動目標 6 目標、静止目標 5 目標とする。また、移動目標は、コーナーリフレクタを装着した歩行者とし、レーダーに対して近づくあるいは遠ざかる方向に速度 4km/h で移動する。本試験における試験の様子を図 2.17(a)に示す。図 2.17(b)に試験において得られた検知データ (距離、ドップラ、角度)、および検知データ数を示す。同様に、図 2.17(c)に本検知データに対する、開発した最適化多目標追尾アルゴリズムによる追尾結果を示す。図 2.17(b)より、本実験において最大 125 個の検知データが同時に検知されていることがわかる。これは、主にコーナーリフレクタを装着した歩行者から得られる複数反射点の影響であると考えられる。開発した最適化追尾アルゴリズムでは、これらの複数反射点に対して対応可能なゲート幅の設定を行っており、さらに初期ゲーティング処理、航跡選択処理を施すことにより、一目標に対して適切な一航跡を出力可能とする。本手法により、図 2.17(c)の総航跡数に示すように、航跡は目標数と同等の 10 航跡が出力されていることより 10 反射物 (移動および静止物) 以上の同時追尾が確認される。

2. 2. 3. 目標認識技術の開発

目標認識技術の開発は、自動検知前のレーダーの生の波形から目標の有無を自動判断して検知し、目標識別に適した特徴量を判定し、目標が何であるのかを認識する目標認識技術を開発する。レーダーの生波形から特徴量を抽出することで、車、人、自転車を分離する基礎技術を確立し、本研究では、人と車の分離成功確率 80%以上を目標とする。

(1) 短時間特徴量の開発

- 単一の CPI を用いた特徴量

多周波ステップ CPC ミリ波レーダー出力である距離-速度 (RV) マップから得られる特徴量としてその形状特徴と強度情報を用いる。とくに歩行人物の対向条件の場合に特徴的となる、ドップラ方向の広がり距離方向の広がり比率を主要な特徴量の一つとする。これを算出するために、まず最大反射強度点を中心として、距離 (R) 方向

及び速度 (V) 方向のある閾値以上の強度を持つ bin 数の分布を図 19(b)に示す。このデータ数分布を確率分布とみなし、正規分布からの隔たりを数値化できる標準偏差、尖度、歪度を算出し特徴量とする。また速度ドップラ方向の bin 数、距離方向の bin 数そのものの標準偏差、尖度、歪度も特徴量として扱う。なおこれらの特徴量は、1CPI 分の RV マップデータから得られる。その他に反射強度の情報を用いる特徴量についても検討した。反射強度を距離で規格化したものを距離規格化電力 (NP: Normalized Power) として、特徴量の一つとする。また、すべての反射点について NP を積算したものを距離規格化積算電力 (NAP: Normalized Area Power) としてこれも特徴量の一つとする。また目標反射点の強度分布についても形状分布と同様の統計量の特徴量として用いる。

- 複数の CPI を用いた特徴量

図 2.18 (a) に示すように、歩行人物は歩行時のポーズが 1 計測の 8CPI (240ms) 間でも変化しており、複数 CPI での時間変化 (和や標準偏差) も特徴量として使用すると、より人間の歩行特徴を表現できると考えられる。本報告では複数 CPI として 3、5CPI を使用した場合の評価も行う。

(2) 目標認識評価試験

認識技術の開発を目的として特徴量の開発及び評価を行うために、多周波ステップ CPC ミリ波実験レーダーを用いて、車両及び歩行人物を目標とした計測実験を数回にわたって行った (図 2.19)。計測はレーダーを地面に固定設置した場合と車載した場合において、それぞれ距離 5m-25m の範囲における車両と歩行人物を目標とした。進行方向はそれぞれレーダーに対向した場合と横切り方向に移動する場合の計測を行った。計測データに対して多周波ステップ CPC 方式の信号処理を施し、合成帯域結果に対して特徴量を学習して車両と歩行人物を分類するサポートベクターマシンを用いた認識結果を表 2.4 に示す。評価は全データを 5 分割してそのうち 4 つを学習に用いる交差検定を 100 回行い、その平均値を示した。特徴量は 1CPI のみから算出されるもの以外に、3、5、8CPI を用いた特徴量も使用した場合についても学習し、サポートベクターマシンのカーネルは 1 次、2 次、3 次及び RBF カーネルを用いた場合の結果をそれぞれ示した。歩行人物目標及び車両目標の距離-速度 map 形状や強度分布の違い等を用いて短時間特徴量を開発したところサポートベクターマシンなどの機械学習アルゴリズムを用いることで、実データに対して 2 次カーネルを用いた場合には全組み合わせで 98%以上となる高い識別率を確認した。

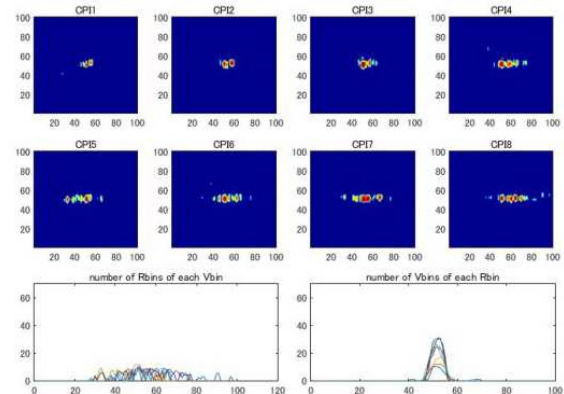


図 2.18 歩行人物 (対向方向) の一回の計測 (240ms) から得られる 8cpi 分の RVmap の変化 (上 2 段) と最大強度点での Rbin 方向 (下段左) 及び Vbin 方向 (下段右) の 8cpi 分の反射点数



図 2.20 目標認識評価実験風景 ((a) 歩行人物, (b) 横切り車両)

表 2.4 目標認識評価試験結果

レーダー静止 (計測数) データは計測数*8CPI			使用CPI数	線形SVM	2次SVM	3次SVM	RBF SVM
①	対向車両(6)	対向歩行人物(43)	1	99.8	99.8	99.7	99.6
			3	99.9	99.8	99.8	99.6
			5	100	99.8	99.8	99.6
②	対向車両(6)	横切り歩行人物(3)	1	98.6	98.9	98.9	98.8
			3	99.0	98.9	98.9	98.8
			5	99.5	98.9	98.9	98.8
③	横切り車両(6)	対向歩行人物(43)	1	97.5	98.6	98.7	98.4
			3	97.5	98.7	98.9	98.6
			5	97.2	98.9	99.0	98.6
④	横切り車両(6)	横切り歩行人物(3)	1	96.8	97.7	97.9	96.5
			3	97.9	98.3	98.3	96.9
			5	98.3	98.7	99.0	97.0
⑤	対向+横切り車両(12)	対向+横切り歩行人物(46)	1	97.0	98.7	98.6	98.5
			3	96.7	98.9	99.0	98.6
			5	96.9	99.0	99.0	98.5

2. 3. (ウ) 小型レーダーモジュール技術の開発

本技術の開発においては、ハードウェア内部で発生する不要波を抑圧するRF回路技術を開発し、アンテナ、IF回路と合わせてレーダーモジュール化を行った。また狭帯域・遠近両用高分解能小型レーダー技術の開発の成果であるレーダー処理部と接続することによりITSインフラレーダーを想定したレーダー性能確認実験を行った。

2. 3. 1. RFデバイスに関する研究開発

RFモジュールを構成するRFデバイスにおいて、不要波は主に送信用周波数変換デバイスで生成される。送信用周波数変換デバイスの不要波抑圧量拡大を図った。送信用周波数変換デバイスの構成は、19GHz帯ローカルアンプ、2通倍器、38GHz帯ローカルアンプ、ダブルバランス型高調波ミキサである。図2.20にブロック図と試作したMMICの写真を示す。この構成では、高調波ミキサを用いることでローカル信号を低減している。また、ダブルバランス回路を適用し、イメージ信号の抑圧とローカル信号の更なる抑圧を図っている。

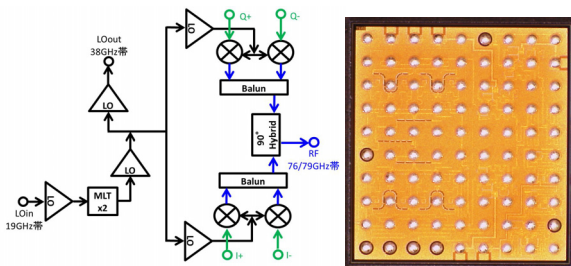


図 2.20 送信用周波数変換デバイスのブロック図と試作したMMIC写真

次に実装した送信用周波数変換デバイスの評価結果について述べる。多層基板に実装した送信用周波数変換デバイスの評価結果を図2.21に示す。76GHz~81GHzで、目標仕様とした変換利得($-17\text{dB} \leq G_c \leq -13\text{dB}$)を満足した。また、図2.21に示すように、規定の出力レベル(-13dBm)周辺において、入出力特性が線形であることを確認できた。アウトプットP1dBは -7dBm と、目標仕様通りの値が得られた。不要放射抑圧に関する詳細は2.3.4節で述べる。

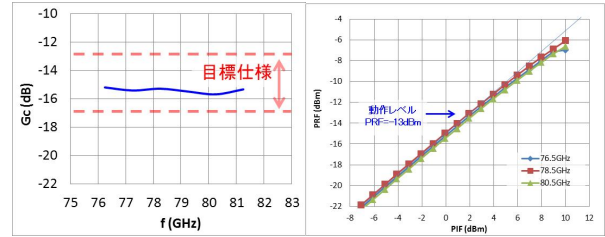


図 2.21 送信用周波数変換デバイスの周波数特性と入出力特性

2. 3. 2. RFデバイス実装に関する研究開発

(1) RFモジュールの試作、評価

今後のミリ波レーダーの普及促進にはレーダーモジュールのコスト低減が重要である。このうち要素技術の一つであるRFモジュールのコスト低減に関する検討を行った。RFモジュールの実装基板は多層構造で検討し、図2.22に示すように20mm x 34.5mmと小型化を実現した。また、RF特性に優れた接合パターン検討を行い、MMIC実装部は、図2.23に示すように、レジスト径0.12mm、ピッチ0.3mmで設計した。図2.24にMMIC、バックショート、SMAコネクタを実装したRFモジュールを示す。試作したRFモジュールの送信特性は、76~81GHzにおいて、送信出力電力8.7~10.4dBm(目標仕様4.8~11.7dBm)、イメージ信号 -17.3dBm 以下(目標仕様 -15dBm 以下)、ローカル漏洩電力 -19.3dBm 以下(目標仕様 -15dBm 以下)と目標仕様を満足できた。

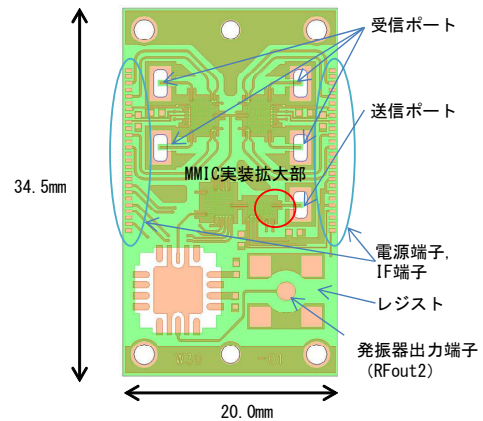


図 2.22 RFモジュール基板

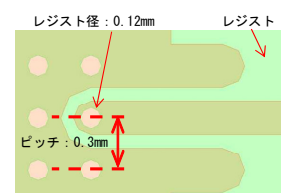


図 2.23 MMIC実装拡大部

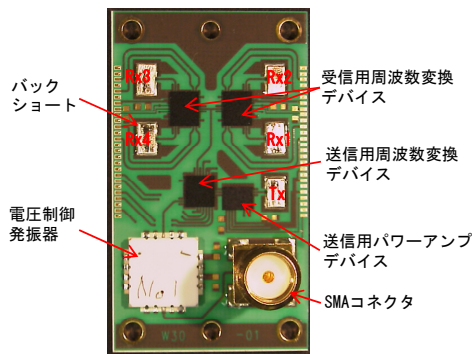


図 2.24 試作した RF モジュール

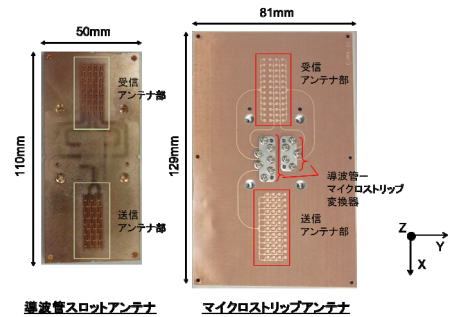


図 2.25 アンテナ試作機外観図

(2) RF モジュールの耐環境性検討

ミリ波レーダーの ITS インフラへの適用を想定すると道路周辺の環境への耐性が必要である。よって RF モジュールの車から排出される溶剤、ガスに対する影響を調査するため、耐環境性試験を、実使用条件に合わせた実環境に近い仕様（4 種混合ガス試験）で実施した。ガスに対する試験条件は IEC60068-2-60 試験方法 4 に基づいて設定した。詳細設定内容を表 2.5 に示す。

表 2.5 RF モジュールの耐環境試験仕様

条件	
濃度：硫化水素	0.01ppm
塩素	0.01ppm
二酸化窒素	0.2ppm
二酸化硫黄	0.2ppm
温度	25℃
湿度	75%RH
時間	96時間

特性評価を実施した結果、試験前後で電流変動はすべて規格内であることを確認した。また、RF モジュールの表面及び断面観察を実施した結果、腐食等の発生が無いことを確認した。以上により、試作した RF モジュールは道路周辺の環境下において特に問題ないことを検証できた。

2. 3. 3. アンテナユニットの開発

片側 4 車線道路の交差点周辺での車両検知レーダーを想定したアンテナユニットの開発を実施した。アンテナユニットは導波管スロットアンテナ方式と、量産時の低コスト化を意識したプリント基板を用いたマイクロストリップアンテナ方式の 2 方式で設計、試作、評価した。

導波管スロットアンテナは薄い金属板を厚み方向に複数枚重ねて圧着する拡散接合法にて製作した。拡散接合法による製作では、金属板に導波管や放射スロットに相当する位置に穴あけ加工が必要となる。穴明け寸法とアンテナ特性について評価し、穴あけ加工精度によるアンテナ特性変動を開発目標仕様範囲に抑えるために、穴明け加工法はエッチング法で決定した。導波管スロットアンテナ試作機の外観を図 2.25(左)に示す。図 2.26 の指向性図、表 2.6 の評価結果に示すように、開発目標を満たす特性が得られた。また指向性特性はシミュレーションと実測値が良く一致しており、試作機がシミュレーション設計通りに高精度に製作できていることを確認した。

プリント基板マイクロストリップアンテナは、基板厚 167 μ m のフッ素樹脂基板を用いて設計した。試作機外観を図 2.25 右、試作機評価結果一覧を表 2.6 に示す。ミリ波レーダー量産時の低コスト化を目的としたプリント基板を用いた方式でも開発目標仕様を満たすアンテナを製作できた。

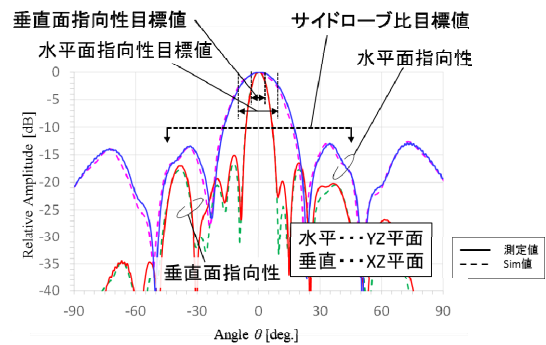


図 2.26 導波管スロットアンテナ試作機指向性図

表 2.6 試作機評価結果

	開発目標仕様	導波管スロット	マイクロストリップ
周波数	76~77GHz	同左	同左
偏波方向	水平偏波	同左	同左
受信系統配置間隔	0.8 λ 以下 @76.5GHz	0.79 λ	0.79 λ
VSWR	2.0以下	1.34以下	1.83以下
利得(送受信合計)	34.5dBi以上	42.0dBi	34.7 dBi
アンテナ指向性			
水平面ビーム幅	19° 以上	20.3° 以上	22.2° 以上
垂直面ビーム幅	7° 以上	7.7° 以上	7.1° 以上
垂直面指向性	10dB以上	15.4dB 以上	11.0dB以上
サイドローブ比			
受信間			
アイソレーション	-15dB以下	-19.4dB以下	-23.6以下
送受信間			
アイソレーション	-40dB以下	-70.1dB以下	-40.6dB以下

2. 3. 4. 不要波発射抑圧技術に関する研究開発

RF デバイスから送信される信号は、所望の RF 信号以外に不要に発射される信号が含まれる。この不要発射は、アンプの非線形性や周波数変換デバイスにより生成される。図 2.27 に RF 信号と主な不要発射の関係を示す。RF 信号の周波数はローカル信号と IF 信号 (2GHz) の周波数の和となる。同時に RF 信号近傍にイメージ信号とローカル信号が漏洩する。無線設備規則によると、不要発射(スプリアス領域)の強度の許容値は 50 μ W(約 -13dBm)以下とする必要がある。つまり RF 信号が 10mW の場合は、漏洩信号抑圧は 23dBc 以上とする必要がある。

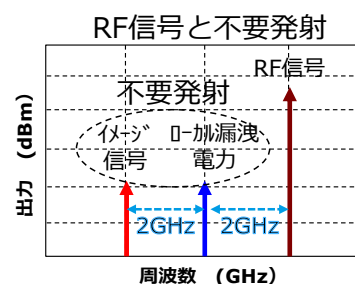


図 2.27 RF 信号と不要発射の関係

ローカル信号の抑圧量は、ハーモニックミキサの特性とバランス回路の特性で決まり、MMIC の外部回路に殆ど依存しない。一方、イメージ信号の抑圧量は、IF 信号として入力される IQ 信号の特性（振幅差と位相差）と RF 合成部の 90°カプラの特性（振幅差と位相差）の合算で決まる。このため、RF 合成部の 90°カプラの特性は IQ 信号の特性とセットで調整する必要がある。IQ 信号の特性を図 2.28 に示す。この IQ 信号の特性と整合するように、RF 合成部の 90°カプラで図 2.29 に示す調整を行った。

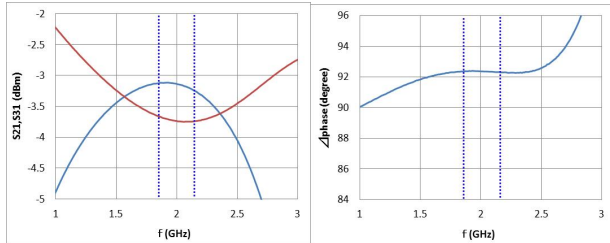


図 2.28 IQ 信号の振幅差と位相差

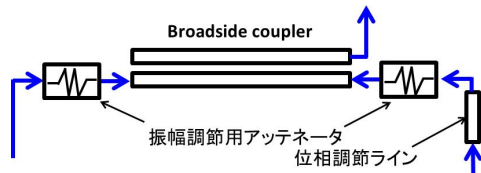


図 2.29 IQ 信号の振幅差と位相差の調整

上記対策を行ったMMICをRFモジュールに実装し、RF信号及び不要波の特性評価を行った。評価結果を図2.30に示す。ローカル漏洩電力の抑圧量は30dBc以上が得られ、また、イメージ信号抑圧量は35dBc以上が得られ、いずれも目標仕様とした25dBc以上を満足した。

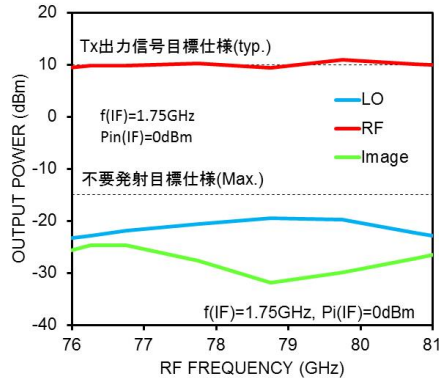


図 2.30 RF モジュールの不要波特性

2.3.5. ITSや自動運転システムへの応用に関する研究開発

(1) レーダーモジュールの開発

アンテナ、RFモジュール、IF部により構成されるレーダーモジュールの接続図と外観写真を図 2.31 に示す。IF部とRF部はワイヤボンディングで接続し、RF部とアンテナはRF部のマイクロストリップラインを導波管に変換しアンテナの導波管給電部と接続導波管で接続した。試作したレーダーモジュールは特定小電力無線局ミリ波レーダー用無線設備標準規格(ARIB STD-T48)に定められた規格を満たしており、フィールド実験に必要な技術基準適合証明も取得した。

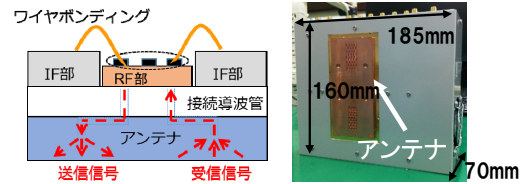


図 2.31 レーダーモジュール実装イメージと外観

(2) ITS インフラレーダーを想定した性能確認実験

レーダーモジュールと課題アで開発した信号処理装置を接続し、遠近両用性と高分解能の性能確認実験を実施した。本研究開発のミリ波レーダーは、実用化が始まった安全運転支援や、将来の高速道路等での自動運転車両への自動走行を支援するインフラシステムへの適用を想定しており、今回の実験では安全運転支援システムにおける走行車両検出を想定した。図 2.32 に片側 4 車線道路の交差点での安全運転支援システムの車両検出イメージと目標カバーエリア (150m 区間×4 車線) を示す。

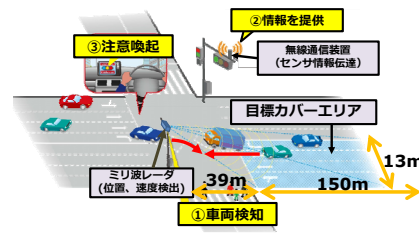
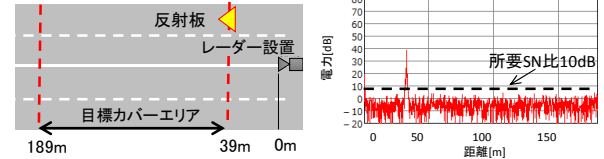


図 2.32 安全運転支援システムと目標カバーエリア

目標カバーエリア内での車両検出の可否を調査するため、一番端の車線の近端 39m 地点と遠端 189m 地点に車両相当の RCS10dB の反射板を設置し SN 比を測定した。実験イメージと結果を図 2.33 に示す。所要 SN 比 10dB に対して、189m 地点においても 10dB 以上マージンがある結果を得た。次に、高分解能性を評価するために、2つの反射板の分離検出実験をした。2つの反射板間の距離は、レーダーの有効な送信帯域幅 430MHz から計算される理論分解能と同等の 34cm とした。実験イメージと測定結果を図 2.34 に示す。測定結果に示すように 34cm 離れた 2つの物体からの信号が 2つのピークに分かれていることから、それぞれを分離して検出できることを確認した。

近端SN比測定



遠端SN比測定

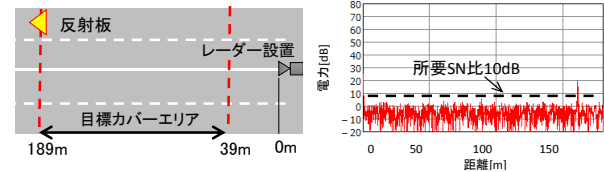


図 2.33 遠近両用性測定結果

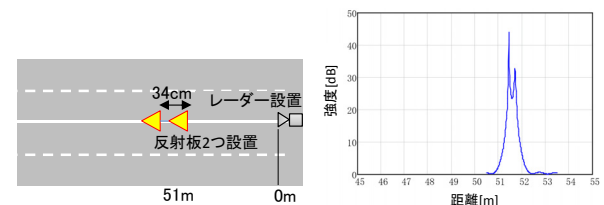


図 2.34 分解能特性の測定結果

3. 今後の研究成果の展開

今後、実現が期待される次世代 ITS (安全運転支援システム等) や自動運転システムにおいて、車両や歩行者の分離検知や遠近両用での物体検知など、既存のレーダーでは実現できない性能を持つレーダー技術開発が必須である。この課題解決の方策として有望な方式が、電気通信大学が提案する「多周波ステップ CPC 方式」や「PC-HPRF (Phase Coded High Pulse Repetition frequency) 方式」である。本研究開発実施後、連携企業においては平成 29 年度より製品化試作を実施し実用化を目指す。一方、電気通信大学においては、実用化時の諸問題について技術支援を行う予定である。また、社会的注目の大きい踏切監視レーダーなど各種応用へ適用可能とするための実用化研究にも取り組む。

4. むすび

本研究開発では、狭帯域・遠近両用高分解能レーダー技術を確立し、さらにその小型化技術を開発する。この技術確立のために、課題 (ア) 狭帯域・遠近両用高分解能レーダー変復調技術、(イ) 時空間信号処理技術、(ウ) 小型レーダーモジュール技術の各研究開発を実施した (ア) 狭帯域・遠近両用高分解能レーダー変復調技術の開発では、合成帯域法により狭受信機帯域幅 (すなわち遠距離性に優れる) にて高分解能を得ることが可能な多周波ステップ CPC 方式を開発し、同方式の遠近両用性、高分解能性を実験的に確認した。また、従来手法に比べ半分以下の占有帯域幅で、送信ピーク電力と観測時間を同等にした従来手法と同等の最大検知距離と距離分解能の比の達成を実証した。(イ) 時空間信号処理技術の開発では、不要波抑圧技術として、開発したシミュレーターを用いて不要波抑圧特性評価と実験による検証 (オフライン) を実施し、基本計画書での到達目標値を大きく上回る信号対不要波比 15~23dB の改善を確認した。目標追尾技術として開発した多目標追尾アルゴリズムによる目標追尾評価試験を実施し、基本計画書での到達目標である「10 反射物 (移動および静止物) 以上の同時追尾」の達成を確認するとともに、実フィールドでの実時間動作を確認した。目標認識技術として、レーダーの生波形から特徴量を抽出し目標の認識を行うアルゴリズムのソフトウェア化を行い目標認識評価試験及び総合評価を実施し、基本計画書での到達目標値を上回る、人と車 (人と同程度の低速) の分離成功率約 98% 以上の達成を確認した。(ウ) 小型レーダーモジュール技術の開発では、76GHz 帯のアンテナ、RF モジュール、IF 回路の要素技術開発を行い、それらにより構成されるレーダーモジュールを試作し機能確認を行った。また課題 (ア) で開発された信号処置装置と接続し ITS インフラセンサ用途を想定した実証試験を行い、対象物体からの反射波の SN 比の測定等により必要な基本性能が得られていることを確認した。以上より、狭帯域・遠近両用高分解能小型レーダー技術の研究開発は基本計画書上のすべての目標を達成した。

【査読付き誌上発表論文】

- [1] 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, "多周波ステップ CPC レーダの提案と原理検証実験", 電気学会論文誌 C, Vol. 135, No. 3, pp.285-291 (2015 年 3 月)
- [2] 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, "多周波ステップ CPC レーダの鉄道環境への応用のための基礎実験", 電気学会論文誌 D, vol135, no.5 (2015 年 5 月)
- [3] 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, "UWB インパルスレーダにおけるパルス間符号変調による遠距離性

の改善", 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J97-B, No.7, pp.556-564 (2014 年 7 月)

(その他 14 件)

【査読付き口頭発表論文】

- [1] M. Akita, Y. Ota, M. Watanabe, T. Inaba, "Experimental Comparison of Stepped Multiple Frequency CPC with Pulse Compression", Proceedings of IEEE 2017 International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM) TU2-4, (2017 年 3 月 21 日)
- [2] M. Akita, M. Watanabe, T. Inaba, "Development of Millimeter Wave Radar Using Stepped Multiple Frequency Complementary Phase Code and Concept of MIMO Configuration", Proceedings of IEEE 2017 Radar Conference (2017 年 5 月発表予定)
- [3] 塚島光路, 姉川修, 川崎健, 大塚晃, 久保田幹, 徳満恒雄, 荻田省一 "Transceiver MMIC's for Street Surveillance Radar", European Microwave Week 2016 (2016 年 10 月 4 日)

【口頭発表】

- [1] 秋田学, 太田裕也, 渡辺優人, 稲葉敬之, "多周波ステップ CPC 方式とパルス圧縮方式の探知距離性能比較実験", 信学技報, vol. 116, no. 252, pp. 51-56, 2016 (2016 年 10 月 21 日)
- [2] 小河昇平, 山田雅也, 谷本雄大, 稲葉敬之, "多周波ステップ CPC 方式のための 76GHz 帯レーダ無線部開発", 電子情報通信学会総合大会 (2017 年 3 月 22 日)
- [3] 福永貴徳, 高野豊久, 山岸傑, "車両検知レーダーを想定した 76GHz 帯パッチアンテナに関する一検討", 電子情報通信学会総合大会 (2017 年 3 月 25 日)

【申請特許リスト】

- [1] 福永貴徳, 山岸傑, アンテナ及びレーダ, 日本 (2016 年 10 月 21 日)
- [2] 姉川修, マーチャントバラン, 日本 (2016 年 10 月 20 日)
- [3] 谷本雄大, 電波センサおよび検知方法, 日本 (2016 年 11 月 11 日)

【登録特許リスト】

- [1] 稲葉敬之, 木島壮氏, 渡辺優人, 「レーダ装置」特許第 5704552 号, 日本, 2015 年 3 月 6 日

【受賞リスト】

- [1] 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, 第 31 回電気通信普及財団賞テレコムシステム技術奨励賞, "多周波ステップ CPC レーダの提案と原理検証実験", 2017 年 3 月 24 日
- [2] 秋田学, 中島大輔, 渡辺優人, 稲葉敬之, 第 72 回電気学術振興賞論文賞, "A Feasibility Study on Multiple Frequency CW for Landing Radar", 2016 年 5 月 27 日
- [3] 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, IEEE AES Japan Chapter 優秀論文賞, "UWB インパルスレーダにおけるパルス間符号変調による遠距離性の改善", 2016 年 3 月 17 日

【報道発表リスト】

- [1] "踏切事故を防げセンサー進化", 朝日新聞, 2015 年 1 月 21 日