

## ミスマッチドフィルタ検波による OFDM 通信・レーダ統合システムの 複数ターゲット分離性能の向上とドップラーシフトの影響の検討

渡部 颯人\* 山尾 泰† 安達 宏一‡

電気通信大学 先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター  
〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

E-mail: \*watabe@awcc.uec.ac.jp, †yyamao@m.ieice.org, ‡adachi@awcc.uec.ac.jp

**あらまし** 無線通信の帯域拡大が進んでいる状況を受けて、無線通信の送信波を用いてレーダセンシングを同時に行う無線通信・レーダ統合システムの研究が行われている。このひとつとして、ミスマッチドフィルタ (MMF) 検波による OFDM 通信・レーダ統合システムがある。このシステムで得られるレンジパルスのサイドローブレベルは一般的な相関検波に比べて低いため、複数ターゲットの分離性能に優れている。しかしながら、送信機や物標が移動する場合に発生するドップラーシフトが大きいとサイドローブ特性が劣化する。本稿ではこの影響を計算機シミュレーションによって評価・分析した。また、本システムにおけるサイドローブ特性を改善して複数ターゲット分離性能を向上する方法として、複数シンボル送信による MMF 出力の平均化を提案し、サイドローブレベルを最大 10 dB 程度低減できることを計算機シミュレーションによって確認した。また提案法のサイドローブレベル低減効果によって複数ターゲットの分離性能を更に向上できることを示した。

**キーワード** 無線通信・レーダ統合, レーダ, レンジサイドローブ, ミスマッチドフィルタ,  
ドップラーシフト, OFDM

### Enhancement of Multi-Target Separation in Communication-Radar Integrated System Using OFDM with Mismatched Filter Detection Considering Doppler Shift Effect

Hayato WATABE\* Yasushi YAMAOKA† and Koichi ADACHI‡

Advanced Wireless & Communication Research Center, The University of Electro-Communications  
1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

E-mail: \*watabe@awcc.uec.ac.jp, †yyamao@m.ieice.org, ‡adachi@awcc.uec.ac.jp

**Abstract** Communication-radar integrated systems that perform wireless communication and radar sensing at the same time with common radio resource have been studied. Communication-radar integrated system using OFDM with mismatched filter (MMF) radar detection achieves superior multi-target separation performance because sidelobe level of the range pulse is lower than that of correlation-based detection. However, a large Doppler shift caused by movements of transmitters or objects degrades the sidelobe performance. In this paper, simulations are conducted to identify the Doppler shift effect on the performance. Moreover, we propose an MMF output averaging method to improve sidelobe characteristics and multi-target separation performance. The simulation results show that the sidelobe levels are reduced by up to 10 dB with the averaging method. It is also shown that the multi-target separation performance is further improved by the proposed method.

**Keywords** Communication-Radar Integration, Radar, Range Sidelobe, Mismatched Filter, Doppler Shift, OFDM

#### 1. はじめに

近年、自動車用レーダの利用拡大と移動通信サービスの広帯域化が進み、より多くの周波数資源が必要とされている。また、第 5 世代移動通信方式 (5G) では 28GHz 帯 (周波数帯域幅 400MHz) をはじめとするミリ波の利用が検討されるなど、移動通信における周波数の高周波化および周波数帯域幅の拡大が進んでおり、レーダで使われている周波数および周波数帯域幅と同

じオーダーとなってきた [1]。このような背景から、無線通信とレーダセンシングを一つの周波数で同時に行う、無線通信・レーダ統合システムに関する研究が行われている。そのひとつに、OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) による通信・レーダ統合システム [2-7] がある。このシステムでは相関計算によってレーダセンシングが可能なのが文献 [2] で示されている。しかし相関計算によって得られるレーダレンジプロファイルはレンジサイドローブが高いため、

複数反射物から反射した波の受信強度の差が大きい場合には、弱い反射波が強い反射波に埋もれてしまい検出不能となる問題がある。図1に車載レーダへの適用を想定した場合に複数の反射体がある例を示す。この例では近くに存在する車両（反射体1）に対して、スクーター（反射体2）は遠く、しかもレーダ反射断面積（RCS；Radar Cross Section）が小さいので反射波の受信強度が弱い。このとき反射体1からの反射波によるレンジサイドローブで反射体2の検出が困難な場合が発生する。

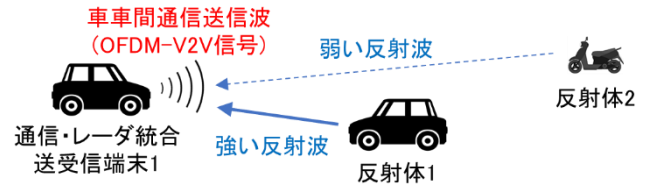


図1. 車車間通信・レーダ統合システム

レーダのレンジサイドローブを低減し複数ターゲット分離性能を改善するための検波法として、窓関数を用いたIFFT（Inverse Fast Fourier Transform）による検波法[3, 4]と mismatchドフィルタ（MMF; Mismatched Filter）による検波法[5-9]がある。窓関数を用いたIFFTによる検波法では、相関検波法に比してレンジサイドローブを抑圧して広いダイナミックレンジを持つOFDMレーダを実現できるが、窓関数によってメインローブの幅が広がって距離分解能が低下する欠点がある。

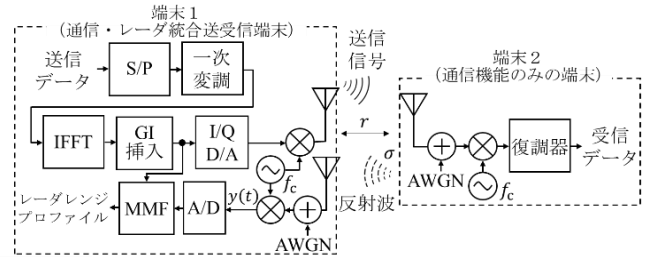


図2. MMF検波によるOFDM通信・レーダ統合システム

一方、MMFによる検波法はFMチャープ信号を用いたレーダのレンジサイドローブを改善する方法として文献[8, 9]で提案されたもので、フィルタのインパルス応答を適切に設定することでレンジサイドローブを抑圧し、広いダイナミックレンジを実現できることが報告されている。筆者らはMMFがOFDM信号を用いたレーダに対しても有効であることを見出し、これを用いた通信・レーダ統合システムを提案した[5]。そして、距離分解能の低下を抑えながらIFFTによる検波法と同程度の高いダイナミックレンジを実現可能であることを示した[6]。しかしながら、送信機や物標が移動する場合に発生するドップラーシフトとOFDMのサブキャリア間隔の比が大きくなると、レンジサイドローブレベルが上昇するという課題も見いだされた[7]。

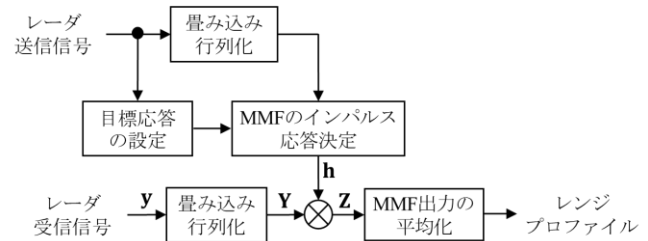


図3. MMF検波の信号処理ブロック図

そこで本稿では、ドップラーシフトがMMFレーダ検知性能に与える影響を計算機シミュレーションによって評価する。また、MMFのサイドローブ特性を改善し複数ターゲット分離性能を更に向上する方法として、複数の異なるデータで変調された送信パルスを用いたMMF出力の平均化を提案し、提案法で得られるレーダ性能を計算機シミュレーションによって評価する。

送受信機能を有する端末1はOFDM信号の定期送信を行い、通信機能のみを有する端末2の車体によって反射された反射信号をMMF検波することでレーダセンシングを行う。端末1から距離 $r$ (m)離れた位置にいる端末2では端末1からの信号を受信した後、送信側と逆の処理を行って受信データを得る。

## 2. mismatchドフィルタ(MMF)検波によるOFDM通信・レーダ統合システム

### 2.1. システム概要

MMF検波によるOFDM通信・レーダ統合システムの機能ブロック図を図2に示す[5]。通信・レーダ統合

### 2.2. mismatchドフィルタ検波

図3に提案したMMF検波のブロック図を示す。信号処理は等価低域の離散時間系によるデジタル信号処理である。図で $\mathbf{y}$ はレーダ受信信号の離散時間系列ベクトル、 $\mathbf{Y}$ は $\mathbf{y}$ の畳み込み行列、 $\mathbf{h}$ はMMFのインパルス応答時系列ベクトル、 $\mathbf{Z}$ はMMF出力の時系列ベクトルを表す。MMF検波では、まず送信信号パルスと目標応答波形からMMFのインパルス応答を時間領域の最小二乗法で決定する。本提案では目標応答波形として、送信信号の自己相関特性のメインローブを用いた[5]。そして、決定したMMFのインパルス応答とレーダ受信信号を用いてMMF検波を行う。ある送信パルスに対するMMF検波の出力は次式で表される。

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Yh} \quad (1)$$

OFDMレーダの送信パルス長はOFDMの1シンボ

ルである．提案法では異なる複数のシンボルによる複数のパルスを順次送信し，上式で得られた複数の MMF 出力の時間を合わせて加算・平均化した後で，レーダレンジプロファイルを得る．なお，MMF 出力の平均化処理については次節で詳しく説明する．

### 3. MMF 出力の平均化によるレンジパルスのサイドローブレベル低減

MMF で得られるレンジサイドローブレベルを更に低減するため，複数の MMF 出力の複素数領域での平均化を提案する．MMF で得られるレンジパルスのメインローブは送信データのパターンによらず一定である．その一方で，MMF 出力のサイドローブ成分は送信データのパターンごとにランダムな複素数の時系列となり，送信データによって変動の様子が異なる．そのため，複数の異なる送信シンボルに対して MMF 出力を複素数領域で平均化することでサイドローブ成分が互いに打ち消し合い，サイドローブレベルを低下させることができる．

複数の MMF 出力の平均化を行うために，合計  $N_{\text{sym}}$  個の異なる OFDM シンボルを 1 シンボルずつ送信間隔  $T_{\text{trans}}$  (s) で送信するものとする．ここで， $T_{\text{trans}}$  は総送信時間  $T_{\text{total}}$  (s) と送信シンボル数  $N_{\text{sym}}$  から，次式を用いて決定する．

$$T_{\text{trans}} = \frac{T_{\text{total}}}{N_{\text{sym}}} \quad (2)$$

ただし，前の送信シンボルの反射波が次の送信シンボルの反射波の受信時間内に混入することがないように， $T_{\text{trans}}$  は次式を満たす必要がある．

$$T_{\text{trans}} > \frac{2R_{\text{max,R}}}{c} + T_{\text{OF}} \quad (3)$$

上式において， $R_{\text{max}}$  (m) は反射体までの最大距離， $c$  (m/s) は光速， $T_{\text{OF}}$  (s) は OFDM 信号のシンボル長（送信パルス長）を表す．なお， $R_{\text{max}}$  は最大レーダ検知距離の 2 倍以上とする． $R_{\text{max}} = 500$  m とした場合，式(3)による条件は  $T_{\text{trans}} > 12.3 \mu\text{s}$  となる．

また，レンジプロファイル上で同じ物体を多重検知することを防ぐため，総送信時間  $T_{\text{total}}$  の間に物体が動くことのできる距離は距離分解能よりも短い必要がある．したがって，総送信時間  $T_{\text{total}}$  は次式を満たす必要がある．

$$T_{\text{total}} < \frac{\Delta R}{v_{\text{max}}} = \frac{c}{2Bv_{\text{max}}} \quad (4)$$

上式において， $\Delta R$  (m) は距離分解能， $v_{\text{max}}$  (m/s) は想定される最大移動速度， $B$  (Hz) は OFDM 信号の無線周波数帯域幅を表す．最大移動速度として，都市内車車間通信の要件である  $v_{\text{max}} = 19.4$  m/s (70 km/h) [10] を想定した場合，式(4)による条件は  $T_{\text{total}} < 20.3$  ms となる．

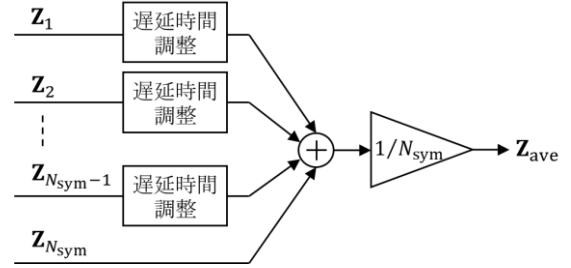


図 4. 複数 MMF 出力の平均化処理ブロック図

前述した総送信時間の制約を満たすように  $T_{\text{total}} = 5$  ms とした場合，送信間隔の制約  $T_{\text{trans}} > 12.3 \mu\text{s}$  を満たす  $N_{\text{sym}}$  は， $N_{\text{sym}} < 407$  となる．したがって式(3),(4)の制約条件を満たしながら，必要に応じて大きな  $N_{\text{sym}}$  を設定することができる．

複数 MMF 出力の平均化処理ブロック図を図 4 に示す． $N_{\text{sym}}$  個の OFDM シンボルをシンボルごとに MMF 検波し，得られた  $N_{\text{sym}}$  個の MMF 複素出力の時間を揃えて平均化する．ここで， $\mu$  番目のシンボルの MMF 出力ベクトル  $\mathbf{Z}_\mu$  は次式で表される．

$$\mathbf{Z}_\mu = \mathbf{Y}_\mu \mathbf{h}_\mu \quad (5)$$

上式において， $\mathbf{Y}_\mu$  は  $\mu$  番目のシンボルのレーダ受信信号の畳み込み行列， $\mathbf{h}_\mu$  は  $\mu$  番目のシンボルのために設計された MMF のインパルス応答時系列ベクトルを表す．

平均化後の MMF 出力  $\mathbf{Z}_{\text{ave}}$  は次式で表される．

$$\mathbf{Z}_{\text{ave}} = \frac{1}{N_{\text{sym}}} \sum_{\mu=1}^{N_{\text{sym}}} \mathbf{Z}_\mu \exp\{-j(N_{\text{sym}} - \mu)T_{\text{trans}}\} \quad (6)$$

ここで， $\|\mathbf{Z}_{\text{ave}}\|$  は MMF 出力平均化後のレンジプロファイルである．なお， $\|\cdot\|$  はベクトルのノルムを表す．

### 4. シミュレーションによる評価

提案した OFDM 通信・レーダ統合システムのレーダ性能を評価するため，MATLAB を用いた計算機シミュレーションを行った．シミュレーションで想定したシステムの諸元を表 1 に示す．通信システムとして 5G

表 1. 想定したシステム諸元

搬送波周波数 $f_c$	28 GHz
基本サブキャリア間隔 $\Delta f$	120 kHz
無線周波数帯域幅	380.2 MHz
基本 OFDM シンボル長 $T_{\text{OF}}$	8.93 $\mu\text{s}$
総送信時間 $T_{\text{total}}$	5 ms
小型バンのレーダ反射断面積 $\sigma_{\text{van}}$	13 dBm <sup>2</sup>
スクーターのレーダ反射断面積 $\sigma_{\text{moto}}$	0 dBm <sup>2</sup>
MMF 応答長	3 シンボル
送受信標準化周波数	1.45 GHz
レンジプロファイル上での物体検出所要 SNR	10 dB

の無線諸元[11]を想定した．また，レーダ検知対象物が単一ターゲットの場合には小型バンを想定し，そのレーダ反射断面積（RCS）は  $\sigma_{\text{van}} = 13 \text{ dBm}^2$  とした[12, 13]．送信データはメルセンヌ・ツイスタ法によりランダムに生成し，一次変調は BPSK（Binary Phase Shift Keying）とした．また，自由空間減衰と，距離  $r$  にある  $\sigma \text{ (m}^2\text{)}$  の RCS の物体による反射減衰を考慮し，伝搬利得を次式のとおりとした．ここで， $\lambda \text{ (m)}$  は送信波の波長を表す．

$$G = \sqrt{\frac{\lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4}} \quad (7)$$

#### 4.1. ドップラーシフトの影響

図 2 の統合システムにおいて，端末 1 からみた端末 2 の相対速度が  $v_{\text{rel}} \text{ (m/s)}$  のとき，受信パルスの連続時間等価低域信号  $y(t)$  は次式で表される．

$$y(t) = \sum_{n=0}^{N_{\text{sub}}-1} A(r)a(n) \exp\left(j2\pi f_n \left(t - \frac{2r}{c}\right)\right) \times \exp(j2\pi f_{\text{rD}} t) \text{rect}\left(\frac{t - 2r/c}{T_{\text{OF}}}\right) \quad (8)$$

ここで

$$f_n = n\Delta f, \quad n = 0, \dots, N_{\text{sub}} - 1 \quad (9)$$

$$f_{\text{rD}} = \frac{2v_{\text{rel}}f_c}{c} \quad (10)$$

式 (8) において， $n$  はサブキャリア番号， $N_{\text{sub}}$  はサブキャリア数， $A(r)$  は信号の振幅変動， $a(n)$  は  $n$  番目の搬送波で送信される一次変調後の複素データシンボル， $f_n \text{ (Hz)}$  は  $n$  番目のサブキャリアの周波数， $\text{rect}(l)$  は長さ  $l$  の矩形窓を表す．また，式 (9) において  $\Delta f \text{ (Hz)}$  はサブキャリア間隔，式 (10) において  $f_{\text{rD}} \text{ (Hz)}$  はレーダ受信時に観測されるドップラー周波数， $f_c \text{ (Hz)}$  は搬送波周波数をそれぞれ表す．

一方，MMF のインパルス応答はドップラーシフトの影響を含まない 2 つの信号（送信信号と目標応答）から決定される．そのため，MMF の入力であるレーダ受信信号がドップラーシフトの影響を含む場合，MMF 出力のサイドローブレベルが最小にならないことが想定される．

この影響を評価するために表 2 の諸元で計算機シミュレーションを行い，相対速度とサブキャリア間隔を変化させた場合のピーク対サイドローブ比（PSLR; Peak to Sidelobe Ratio）を求めた．PSLR はレンジプロファイルにおけるメインローブのピーク値と検出距離範囲（今回のシステムでは 90m）でのサイドローブレベルの最大値の比とした．

表 2. ドップラーシフトの影響のシミュレーション諸元

シミュレーション回数	1000
サブキャリア間隔	$\Delta f \times K \text{ kHz (} K=1\sim 8\text{)}$
送信 OFDM シンボル数 $N_{\text{sym}}$	1
対象物の位置 $r$	10 m
対象物の相対速度 $v_{\text{rel}}$	0, 50, 100, 140 km/h

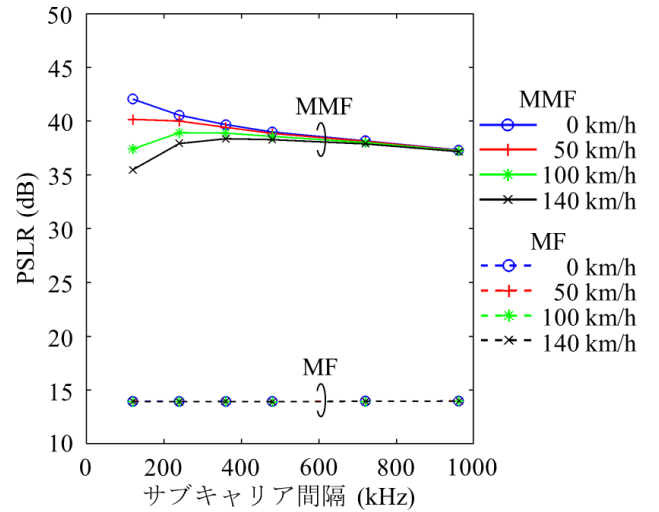


図 5. PSLR—サブキャリア間隔特性

表 3. サブキャリア間隔で規格化したドップラー周波数

$\Delta f \text{ (kHz)}$	$v_{\text{rel}} \text{ (km/h)}$					
	120	240	360	480	720	960
0	0	0	0	0	0	0
50	0.022	0.011	0.007	0.005	0.004	0.003
100	0.043	0.022	0.014	0.011	0.007	0.005
140	0.06	0.03	0.02	0.015	0.010	0.008

図 5 にサブキャリア間隔と PSLR の関係を示す．相関検波(MF; Matched Filter)の PSLR はサブキャリア間隔や相対速度に関わらず 13 dB 程度であり，ドップラーシフトの影響は小さい．一方 MMF 検波では，サブキャリア間隔が 5G 規格の 120 kHz の場合，相対速度が増加して  $f_{\text{rD}}$  が大きくなると PSLR が低下する．またこの低下量はサブキャリア間隔が狭いほど大きいことが分かる．この点について考察するため，サブキャリア間隔で規格化したドップラー周波数を表 3 に示す．表から，サブキャリア間隔を広げると規格化ドップラー周波数が小さくなり，個々のサブキャリア帯域でのドップラーシフトの影響が相対的に小さくなることが分かる．サブキャリア間隔を広げると，相対速度の増加による PSLR の低下量が小さくなるのはこのためと考えられる．さらに，図 5 でサブキャリア間隔を広げ

ていくと、相対速度の PSLR への影響は小さくなるが、PSLR が全般的に低下する傾向が見られる。これは、サブキャリア間隔を広げた結果、サブキャリア間隔の逆数の関係にある OFDM シンボル長（レーダパルス長）が短くなって MMF の入力サンプル数が減少したことにより、メインローブの検波電力が低下するためと考えられる。

なお、MF 検波および MMF 検波のどちらの場合でも、ドップラーシフトの影響によるメインローブレベルの低下は想定した相対速度の範囲内では小さく無視できる。

#### 4.2. MMF 出力の平均化によるサイドローブレベルの改善効果

複数の MMF 出力を複素数領域で平均化したときのサイドローブレベル改善効果を評価するため、表 4 のパラメータで単一ターゲット環境での計算機シミュレーションによる評価を行った。図 6 に平均化に用いる送信シンボル数とサイドローブレベルの関係を示す。サイドローブレベルは、検出距離範囲での二乗平均平方根値 (RMS; Root Mean Square) と、最大値の両者を示した。送信シンボル数が 1 の場合は従来の平均化無しの結果を表す。MMF 出力の平均化によって、いずれの相対速度の場合でもサイドローブレベルの最大値および RMS 値が低減されている。サイドローブレベルの最大値の低減効果は最大で 5 dB 程度であり、送信シンボル数が 8 以上で低減効果が飽和する。一方、RMS 値は最大 10 dB 程度低減でき、送信シンボル数を 32 以上にすると低減効果が飽和することが分かる。

次に、近傍と遠方の 2 ターゲット環境での同時検出特性を評価した。図 7 に、距離  $r = 10 \sim 30$  m に小型バン、 $r = 40 \sim 88$  m の位置にスクーター (RCS は  $\sigma_{moto} = 0$  dBm<sup>2</sup>) をそれぞれ配置した場合における、スクーターのメインローブに対する PSLR を  $v_{rel} = 0$  km/h の場合について示す。PSLR はレンジプロファイルにおけるスクーターのメインローブのピーク値とその前後 5 m の範囲にあるサイドローブレベルの最大値の比とした。図において (a) は平均化無しの特性、(b) は 8 シンボルで平均化した場合の特性を表す。図から、平均化によって PSLR が大きく改善されることがわかる。ターゲット検出に必要な PSLR を 10 dB 以上とした場合、スクーターが検出できない位置の組合せ (図中の黒色のプロット) は 19 ポイントから 3 ポイントに減少している。この結果、スクーターが検出可能な距離も大幅に伸びている。小型バンとの距離が 10 m と近い場合、スクーターが検出可能な距離は平均化無しの場合 44 m であるが、平均化有りの場合は 80 m 程度に伸びている。図 8 は同様の条件で  $v_{rel} = 140$  km/h の場合の結

表 4. MMF 出力平均化効果のミュレーション諸元

シミュレーション回数	500
送信 OFDM シンボル数 $N_{sym}$	$2^n$ ( $n=0\sim6$ )
対象物の位置 $r$	10 m
対象物の相対速度 $v_{rel}$	0, 140 km/h

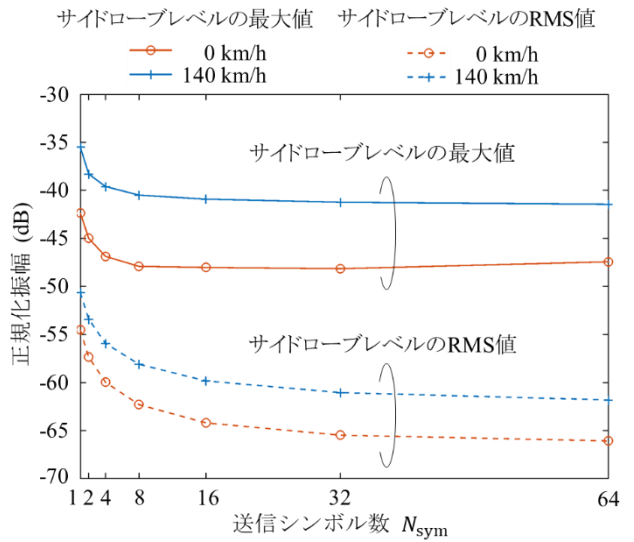
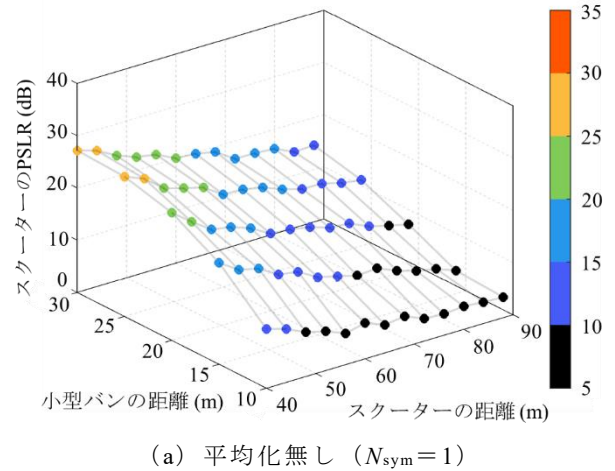
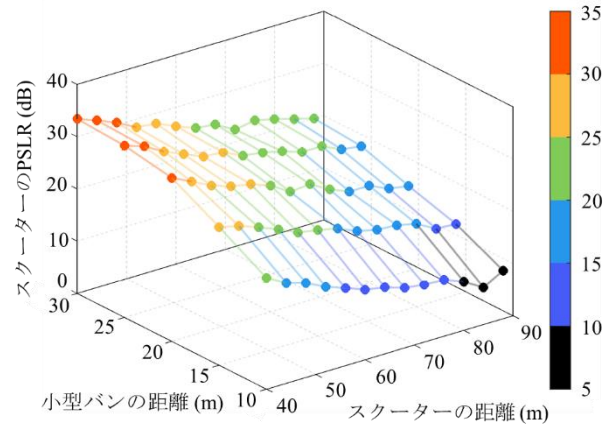


図 6. 送信シンボル数とサイドローブレベルの関係

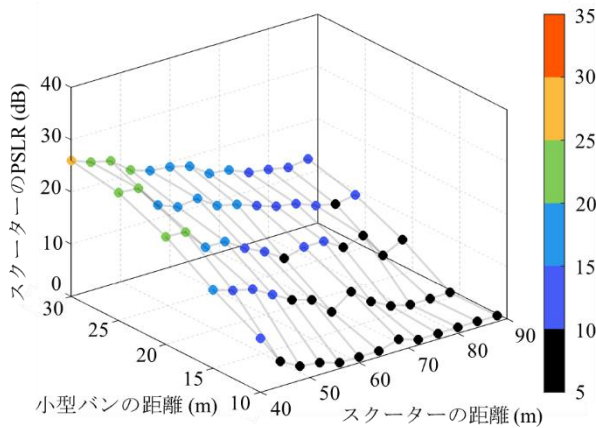


(a) 平均化無し ( $N_{sym} = 1$ )

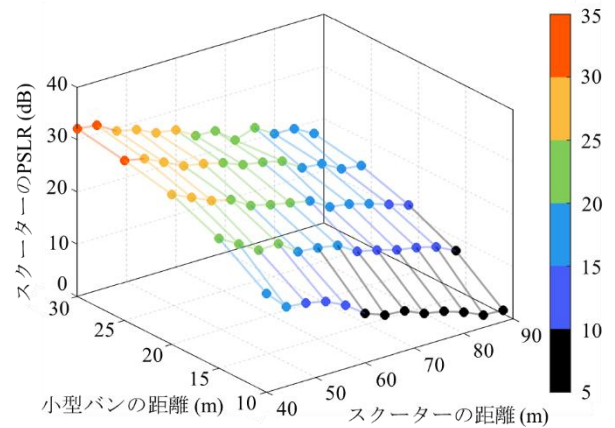


(b) 平均化有り ( $N_{sym} = 8$ )

図 7. スクーターの PSLR ( $v_{rel} = 0$  km/h)



(a) 平均化無し ( $N_{\text{sym}}=1$ )



(b) 平均化有り ( $N_{\text{sym}}=8$ )

図 8. スクーターの PSLR ( $v_{\text{rel}}=140 \text{ km/h}$ )

表 5. シミュレーション範囲における  
スクーターの検出率

	平均化無し ( $N_{\text{sym}}=1$ )	平均化有り ( $N_{\text{sym}}=8$ )
$v_{\text{rel}}=0 \text{ km/h}$	71 %	95 %
$v_{\text{rel}}=140 \text{ km/h}$	58 %	86 %

果であり、スクーターが検出できない位置の組合せが図 7 同様、大きく減少している。

図 7, 8 におけるスクーターの検出可能場所率を表 5 に示す。平均化有りとなしの場合を比較すると、シミュレーション範囲におけるスクーターの検出率は  $v_{\text{rel}}=0 \text{ km/h}$  の時に 24 %,  $140 \text{ km/h}$  の時に 28 %改善されている。以上の結果から、MMF 出力の平均化により複数ターゲットの分離性能が向上することが確認できた。

## 5. むすび

MMF 検波による OFDM 通信・レーダ統合システムにおいて、ドップラーシフトがレーダ性能に与える影響を計算機シミュレーションによって評価し、ドップラーシフトの影響がサブキャリア間隔に依存することを示した。更に、本システムのサイドローブ特性を改善する方法として複数シンボル送信による MMF 出力の平均化法を提案し、サイドローブレベルを最大 10 dB 程度低減できることを示した。また提案法のサイドローブレベル低減効果によって、複数ターゲットの分離検出性能を更に向上できることを示した。

謝辞 本研究には 2020 年度総務省 SCOPE 受託研究 #195003009 の研究成果が含まれる。

## 文 献

[1] M. Agiwal, A. Roy, N. Saxena, "Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 3, pp. 1617-1655, 2016.

[2] A. Garmatyuk, J. Schuerger, Y. T. Morton, K. Binns, M. Durbin, J. Kimani, "Feasibility study of a multi-carrier dual-use imaging radar and communication system," Proc. 37th European Microwave Conference, pp. 1473-1476, Munich, Oct. 2007.

[3] C. Sturm, E. Pancera, T. Zwick, and W. Wiesbeck, "A novel approach to OFDM radar processing," Proc. IEEE 2009 Radar Conf. (RadarCon09), Pasadena, CA, May.2009.

[4] C. Sturm and W. Wiesbeck, "Waveform Design and Signal Processing Aspects for Fusion of Wireless Communications and Radar Sensing," Proc. IEEE, vol. 99, no. 7, pp. 1236-1259, Jul. 2011.

[5] 渡部颯人, 阿部友希, 山尾泰, "ミスマッチドフィルタ受信による OFDM 通信・レーダ統合システムの基本検討," 信学技報, vol. 119, no. 416, SANE2019-98, pp. 7-12, 2020 年 2 月.

[6] H. Watabe, T. Abe, and Y. Yamao, "Communication-Radar Integrated System Using 5G OFDM Signal and Mismatched Filter Reception," Proc. IEEE 92nd Vehicular Technology Conference, Nov. 2020.

[7] 渡部颯人, 山尾泰, 安達達一, "ミスマッチドフィルタ受信による OFDM 通信・レーダ統合システムにおいてドップラーシフトがレーダ性能に与える影響," 信学ソ大, B-2-16, 2020 年 9 月.

[8] M. H. Ackroyd, F. Ghani, "Optimum Mismatched Filters for Sidelobe Suppression," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. AES-9, no. 2, pp. 214-218, March 1973.

[9] J. E. Cilliers, J.C. Smit, "Pulse compression sidelobe reduction by minimization of  $L_p$ -norms," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 43, no. 3, pp. 1238-1247, 2007.

[10] 総務省, "ITS 無線システムの高度化に関する研究会報告書," 2009 年 6 月.

[11] 総務省, "情報通信審議会 情報通信技術分科会(第 9 回) 新世代モバイル通信システム委員会 報告概要(案)," 2018 年 6 月.

[12] I. Matsunami, R. Nakamura, and A. Kajiwar, "RCS measurements for vehicles and pedestrian at 26 and 79GHz," Proc. 6th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS) 2012, pp. 1-4, 2012.

[13] T. Schipper, J. Fortuny-Guasch, D. Tarchi, L. Reichardt, and T. Zwick, "RCS measurement results for automotive related objects at 23-27 GHz," Proc. 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), pp. 683-686, 2011.