

リニアセルを用いた高速無線通信および高精度レーダーに関する研究

研究代表者 川西 哲也
(基幹理工学部 電子物理システム学科 教授)

1. 研究課題

直線上に並べたミリ波送受信ユニットを光ファイバーで接続したシステムであるリニアセルを用いた高速無線通信と高精度レーダーの性能向上に関する研究を行う。リニアセルシステムの基本概念は研究代表者らが中心となって提案したものであり、空港滑走路や鉄道線路上の障害物を検知するためのレーダーシステムや、インフラ向け高速通信システムへの実用展開を公的研究機関、民間企業などと連携して進める。大学側としては、これらの複数の送受信ユニットが光ファイバネットワークで接続されたシステムの、設計理論、動作原理の詳細の解明などに注力し、光無線融合システム研究を新たな分野として確立し、実用性のみならず、学術としての成果を目指す。また、当該分野の学生指導を通して、国際的に広がりが見込まれる分野で活躍できる人材輩出につなげたいと考えている。

2. 主な研究成果

今年度は、引き続き滑走路上の異物を検出するためのレーダーにおける干渉抑圧に関する研究を行った。微小な異物からの電波を受けるために高感度なシステムを構築する必要がある。滑走路付近には構造物が少なく、異物からの電波を識別しやすい環境ではあるが、航空機がレーダー付近に存在する場合には、スムーズな機体表面からの強い反射が干渉を起こす可能性がある。昨年までの研究で、各レーダーユニットをつなぐ光ファイバーの長さを切り替えることで、干渉による偽像を抑圧するシステムを提案し、クアラルンプール国際空港における実験で、その動作原理を実証した。しかしながら、ファイバー長を切り替えて2回測定したレーダー像に対して信号処理をすることで干渉による偽像を抑圧するという方式であるために、移動する物体からの干渉を抑圧できないという課題があった。今年度は、光ファイバーの切り替えによるレーダー像取得のタイムラグを解消し、干渉によって発生する偽像を抑圧する新たな手法として2周波 FMCW 信号を用いた干渉抑圧を提案し、その動作原理をシミュレーションで確認した。その概要（2021年5月電子情報通信学会ミリ波・マイクロ波フォトンクス研究会にて発表予定）を以下に示す。

まず、昨年度クアラルンプール国際空港にて実施した実証実験をシミュレーションにて再現する環境を整えた。干渉回避実験の概要を図1に示す。この実験系では2つのRAU(Remote Antenna Unit)と航空機をほぼ一直線上に配置し、2つのRAUから送信した信号をRAU2で受信する。RAU1とRAU2は航空機に向かって同じ信号を同じタイミングで送信しているが、RAU2(送信)⇒航空機(反射)⇒RAU2(受信)とRAU1(送信)⇒航空機(反射)⇒RAU2(受信)の光路長が異なるため、RAU2で信号を受信するタイミングに差が生じ、狭帯域干渉による偽像が発生する。RAU2のみ信号を送信した場合のレーダー像を図2、両方のRAUから信号を送信した場合のレーダー像を図3に示す。

このような偽像を抑圧するため、この実験系ではRAU2と制御装置群を繋ぐ光ファイバーの長さを100mずつ延長することが可能となっている。光ファイバー長の延長により信号が光ファイバー

内を通過している時間だけ RAU2 のみ送信タイミングを遅延させることができ、RAU2 から信号が送信されてから RAU1 の信号を受信するまでの時間を任意に変更できる。すなわち、送信波と干渉波の差周波数を制御でき、偽像が発生する位置をずらすことができる。光ファイバーを 400m 追加したときのレーダー像を図 4 に示す。図 3 と図 4 に対して AND 処理を行うことで、偽像を抑圧できる。AND 処理の結果を図 5 に示す。なお、AND 処理の閾値は大津の二値化によって算出する[4]。

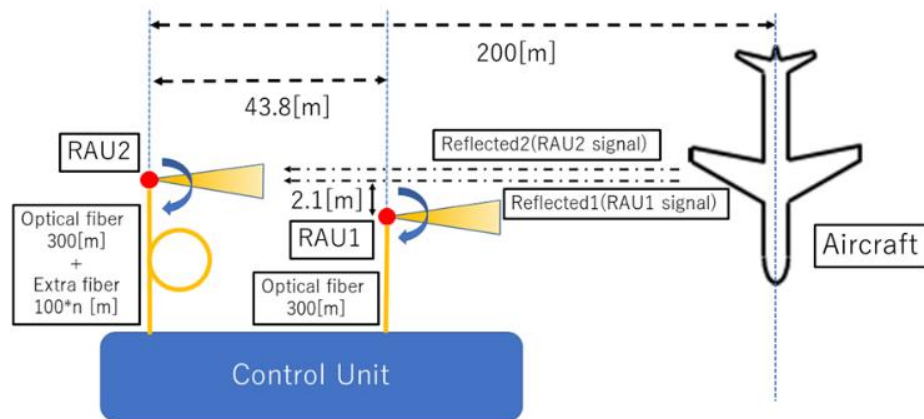


図 1 リニアセルレーダー干渉回避実験概要図

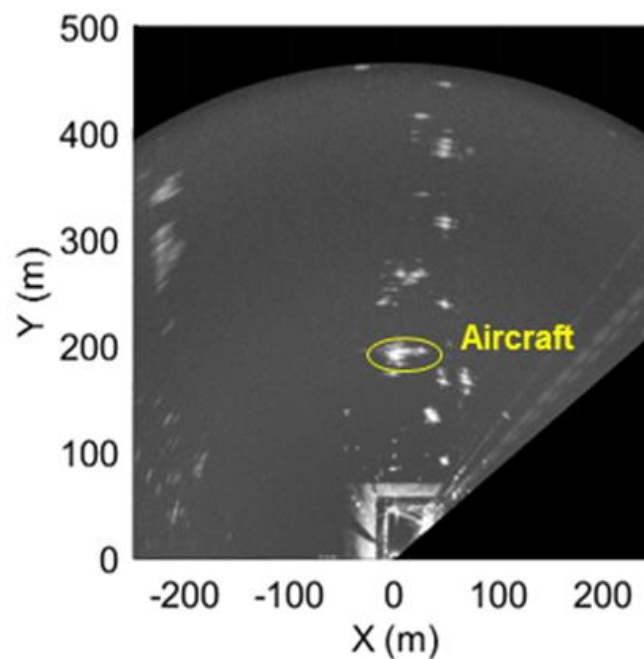


図 2 RAU2 のみ送信した場合

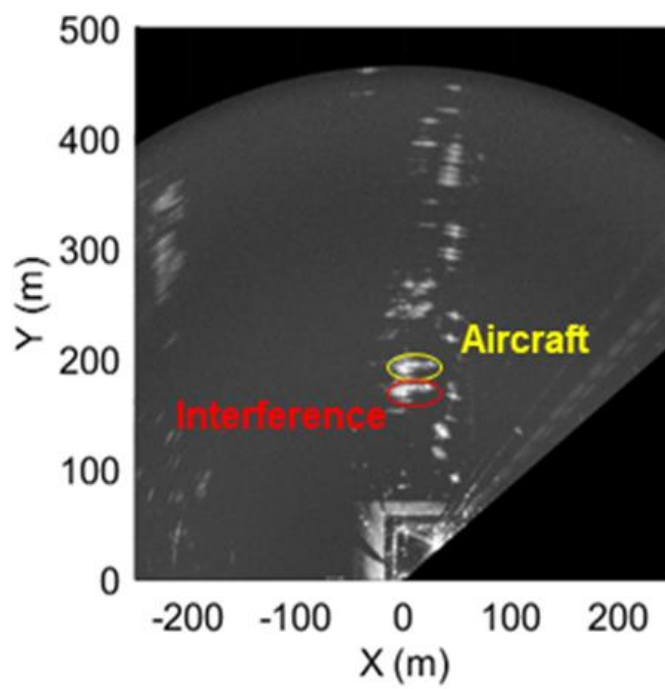


図 3 両方の RAU から信号を送信した場合

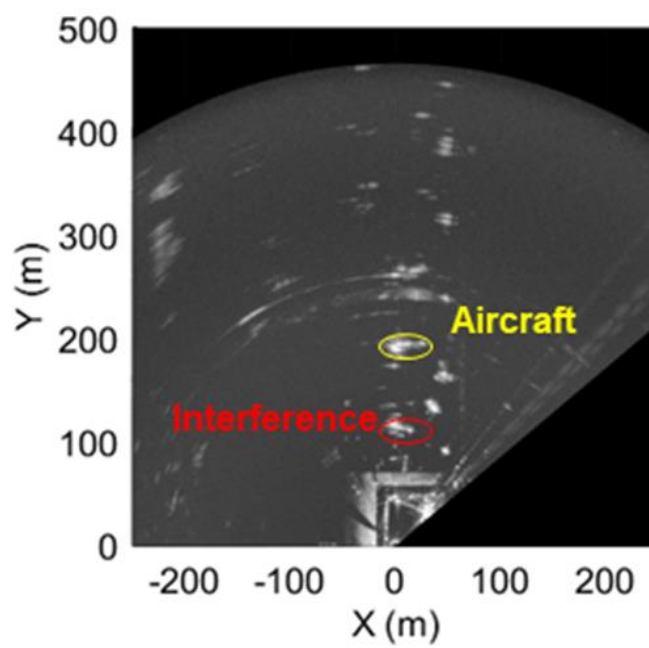


図 4 光ファイバーを 400m 延長した場合

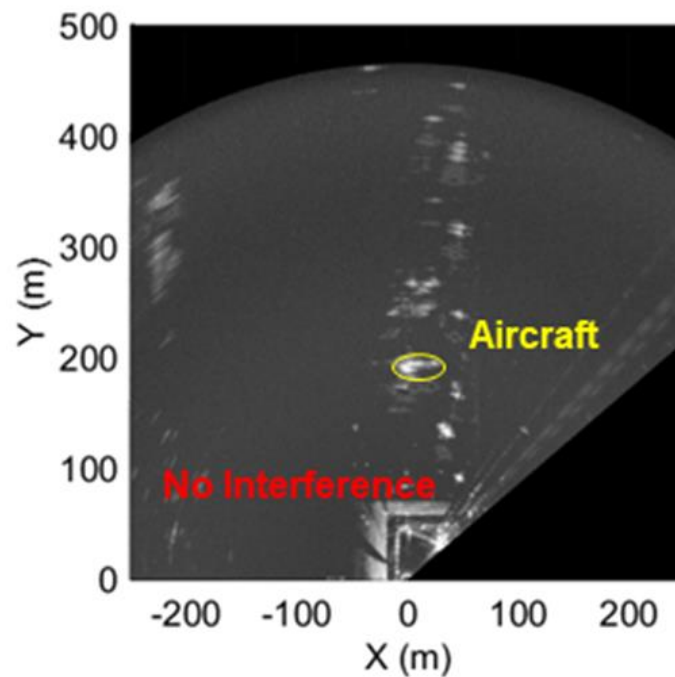


図 5 AND 処理による偽像抑圧結果

次に、実証実験を再現したシミュレーションの結果について報告する。シミュレーションにおける各パラメータは実証実験で使用したものと同様に設定した。RAU2 と制御装置群の間の光ファイバーを追加しなかった場合と 100m 追加した場合について、実証実験で得られたレーダ像と比較した結果を図 6、図 7 にそれぞれ示す。これらの結果から、シミュレーション上でも光ファイバーの延長によって偽像の発生位置が移動すること、またその発生位置が実証実験と一致していることを確認した。したがって、このシミュレーションにおける実証実験の再現性は十分にあるといえる。

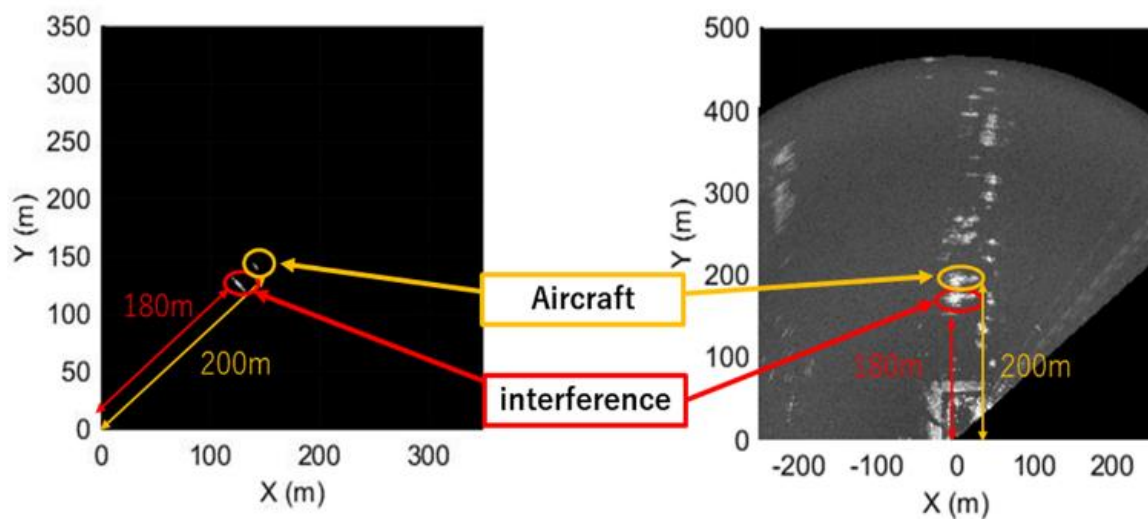


図 6 光ファイバー長を延長しなかった場合のシミュレーション結果(左)と実証実験結果(右)

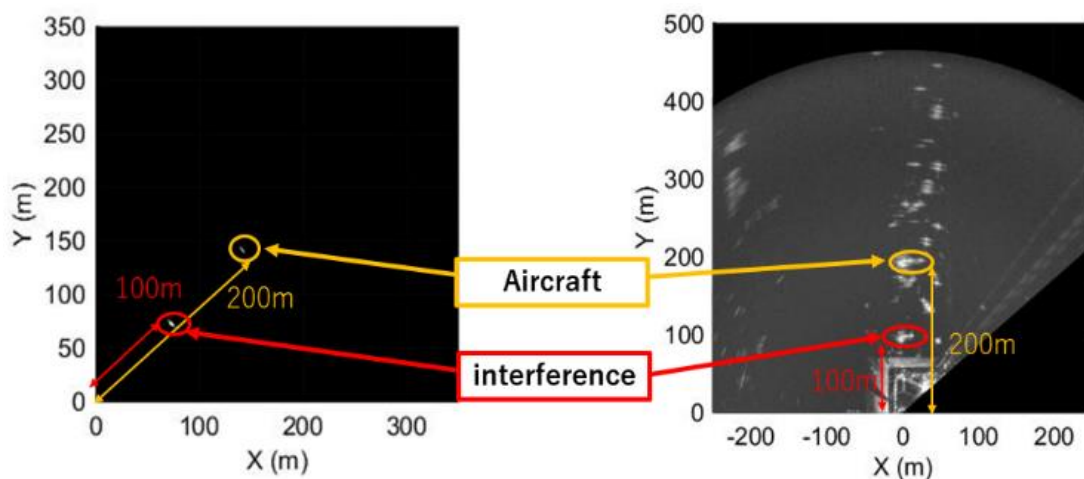


図7 光ファイバー長を100m 延長した場合の
シミュレーション結果(左)と実証実験結果(右)

光ファイバーを延長するためには光ファイバーの接続を切り替える必要があるため、光ファイバーを延長する直前と直後では観測地点が異なり、次に同じ地点を観測できるのはレーダーが1回転した4秒後となる。この4秒間に目標物が移動してしまった場合、得られたレーダー像に対し AND 処理を行うと本来探知しなければならない目標を除去してしまう可能性がある。したがって AND 処理による偽像抑圧を行うためには偽像の出現位置が異なる2つのレーダー像を同時に取得する必要がある。この条件を満たすレーダーとして、2周波 FMCW レーダーを提案した。2周波 FMCW レーダーの送信信号と受信信号の関係を図8に示す。

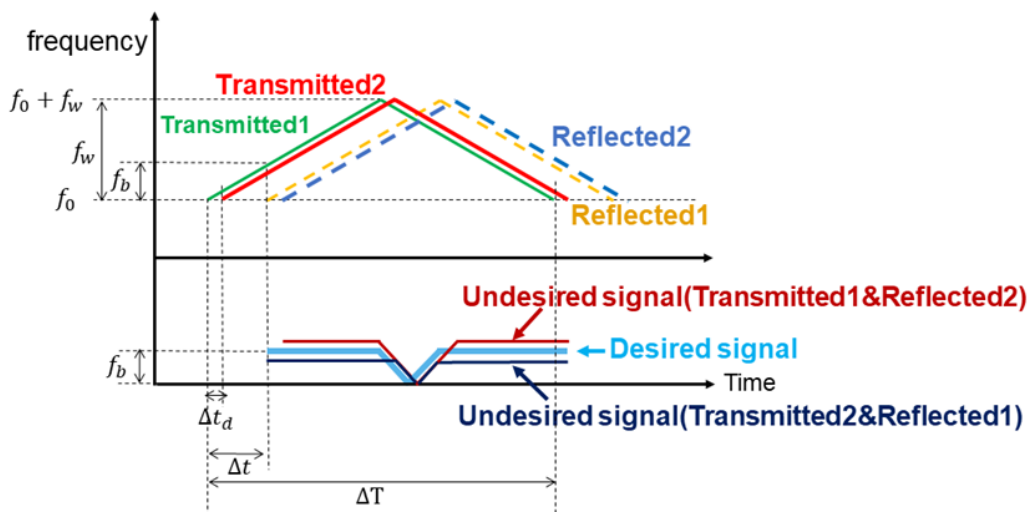


図8 2周波 FMCW レーダー概要図

2 周波 FMCW レーダーは掃引開始タイミングのみが異なる 2 つの FMCW 信号を 1 つの信号として送信する。この送信波によって、目標からの反射波も 2 種類の FMCW 信号となる。送信波の 2 つの FMCW 信号のうちどちらをローカル信号とするかによって、一方は所望信号となり、もう一方の信号によって狭帯域干渉による偽像が発生する。Transmitted1 をローカル信号と考えると Reflected1 が所望信号であり、Reflected2 によって偽像が発生する。その時の Transmitted1 と Reflected2 の差周波は Reflected1 との差周波よりも大きくなるため、偽像は目標の像よりも遠い位置に発生する。一方、Transmitted2 をローカル信号と考えると Reflected2 が所望信号であり、Reflected1 によって偽像が発生する。その時の Transmitted2 と Reflected1 の差周波は Reflected2 との差周波よりも小さくなるため、偽像は目標の像よりも近い位置に発生する。この理論を検討するために行ったシミュレーションの結果を図 9 に示す。この結果から、送信波の 2 つの FMCW 信号のうちどちらをローカル信号とするかによって偽像の発生位置が異なっていることが分かる。また、これらのレーダー像は受信波を受信機側で処理した結果得られたものであるため、同時に取得できる。

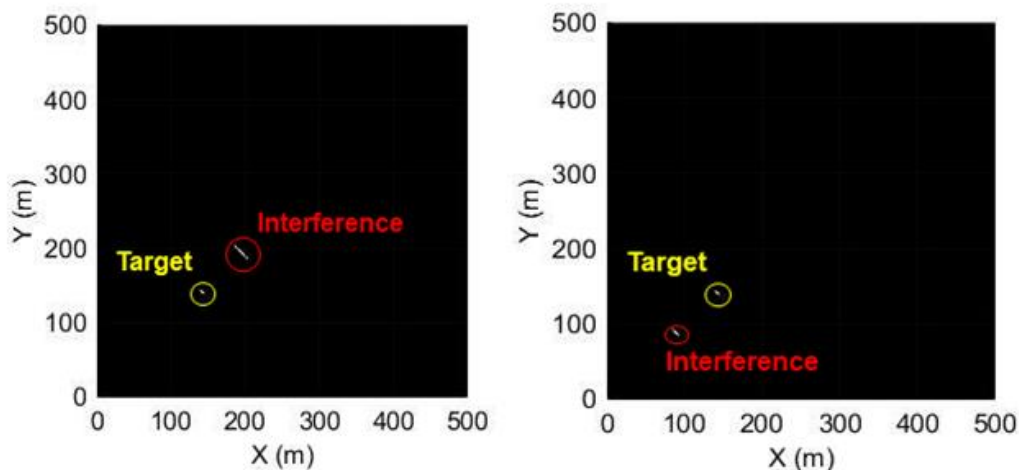


図 9 ローカル信号を Transmitted1 とした場合(左)と Transmitted2 とした場合(右)

リニアセルレーダーで 2 周波 FMCW 信号を用いる場合を考える。2 周波 FMCW リニアセルレーダーの概要図を図 10 に示す。2 周波 FMCW リニアセルレーダーはすべての RAU で 2 周波 FMCW 信号を送信しているため、干渉波も 2 周波 FMCW 信号となる。2 周波 FMCW リニアセルレーダーの全ての RAU で Transmitted1 と Transmitted2 の遅延時間 Δt_d が同じだった場合、干渉波として観測される Interference1 と Interference2 の遅延時間も Δt_d となる。その結果、Transmitted1 が送信されてから Interference1 を観測するまでの時間と Transmitted2 が送信されてから Interference2 を観測するまでの時間が同じになり、それらの差周波も同じ値の f_i となる。すなわち、それらの信号による偽像の発生位置は同じであり、AND 処理を行っても除去できない。したがって、2 周波 FMCW リニアセルレーダーにおいて AND 処理による干渉抑圧を行うためには、送信波と干渉波の差周波をローカル信号によって異なる値にするために、少なくとも隣接する RAU 間で Δt_d の値を変更する必要がある。 Δt_d の値を変更しなかった場合と変更した場合の 2 周波 FMCW リニアセルレーダーのシミュレーション結果を図 11 から図 14 にそれぞれ示す。

以上の結果から、2 周波 FMCW リニアセルレーダーでは RAU ごとの遅延時間 Δt_d を変更することで送信波と干渉波の差周波をローカル信号によって異なる値にし、得られた 2 つのレーダー一像に対して AND 処理による干渉抑圧が可能であることがわかる。

今年度のリニアセルレーダーにおける干渉の抑圧に関する研究成果を以下にまとめる。実証実験を再現するシミュレーションを実装し、その再現性を示すことができた。2 周波 FMCW レーダーについて、従来の系における干渉回避の課題点であった光ファイバーの切り替えによるレーダー一像取得のタイムラグを解決し、偽像の発生位置が異なる 2 つのレーダー像を同時に取得することが可能であることを示した。また 2 周波 FMCW リニアセルレーダーについて、RAU ごとの遅延時間 Δt_d を変更することでローカル信号の選択によって得られる 2 つのレーダー一像の偽像を異なる位置に発生させ、AND 処理による干渉抑圧が可能であることを示した。

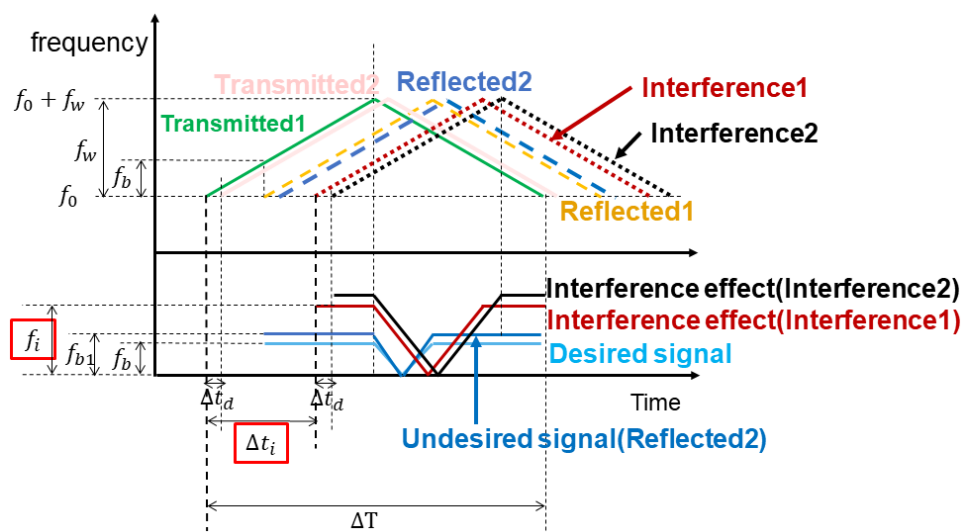


図 10 2 周波 FMCW リニアセルレーダー概要図(Transmitted1 をローカル信号とした場合)

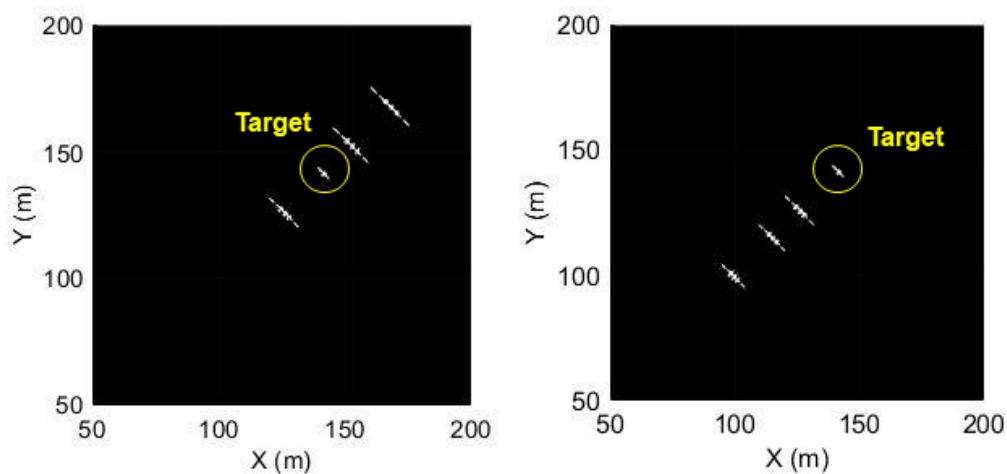


図 11 Δt_d が同じ場合、ローカル信号が Transmitted1(左)、Transmitted2(右)

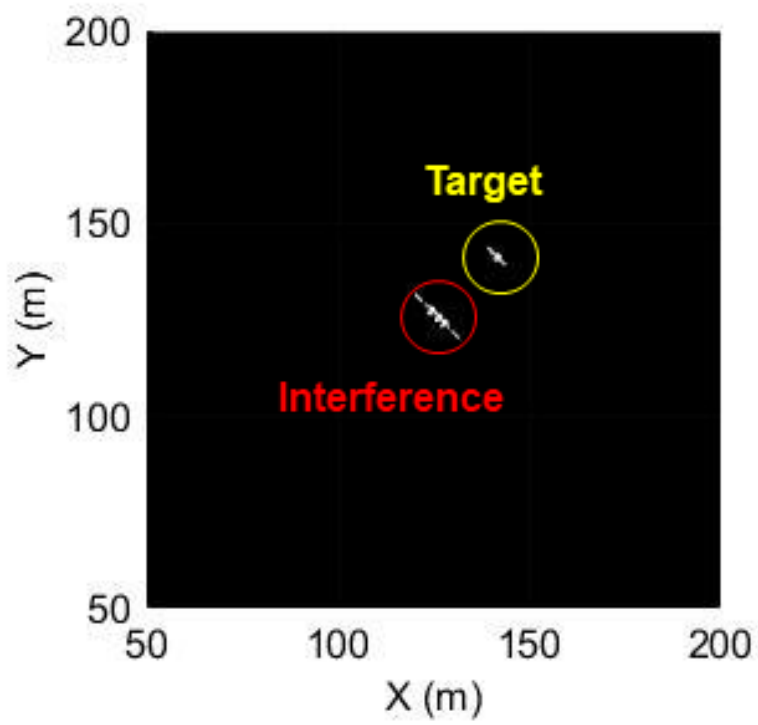


図 12 各 RAU で Δt_d が同じ場合の AND 処理結果

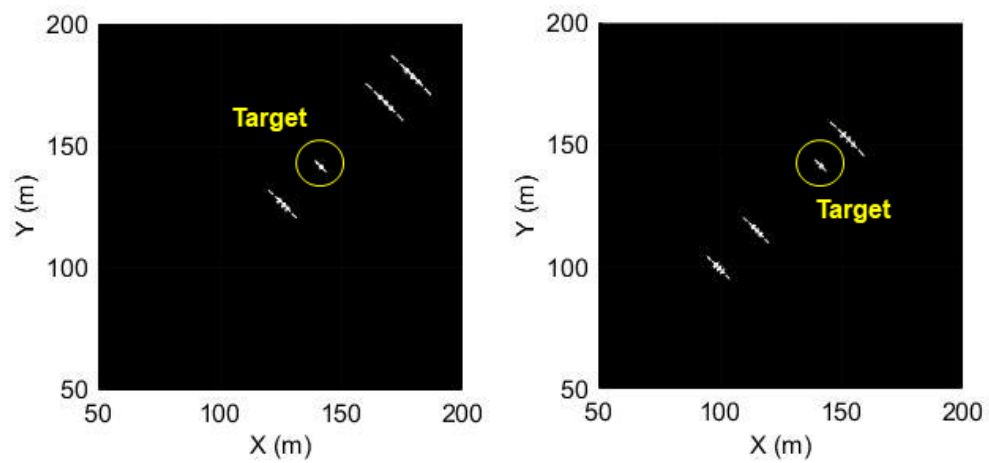


図 13 Δt_d が異なる場合、ローカル信号が Transmitted1(左)、Transmitted2(右)

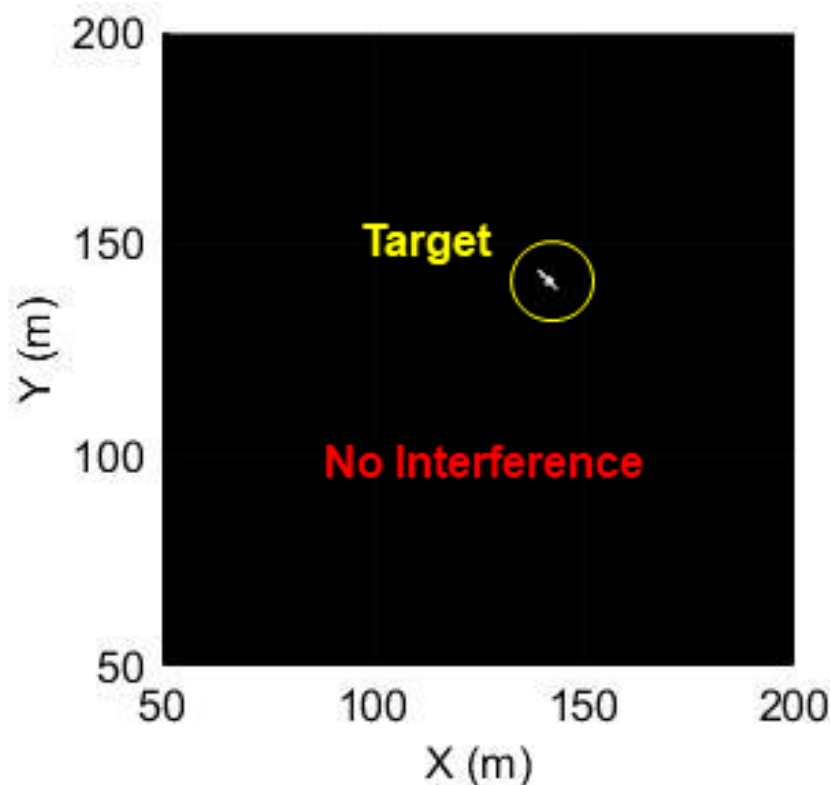


図 14 各 RAU で Δt_d が異なる場合の AND 処理結果

- [1] S. Futatsumori, et al., “Airport field evaluation of an optically-connected 96 GHz millimeter-wave radar system for runway foreign object debris detection” 2017 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves.
- [2] K. Akama, et al., “Study on interference between RAUs of linear cell radar” MWP Symposium (2017).
- [3] T. Miura, et al., IEICE Electronics Express, 17, 20200228 (2020)
- [4] 大津展之 “判別および最小 2 乗規準に基づく自動しきい値選定法” 電子情報通信学会論文誌 D Vol.J63-D No.4 pp.349-356

3. 共同研究者

理工学術院総合研究所 招聘研究員 稲垣恵三

4. 研究業績

4.1 学術論文

Tetsuya Kawanishi, Keizo Inagaki, Atsushi Kanno, Naokatsu Yamamoto, Takamitsu Aiba, Hiroki Yasuda, Tomohiro Wakabayashi, Terahertz and Photonics Seamless Short - Distance Links for Future Mobile Networks, Radio Science, 56, e2020RS007156. <https://doi.org/10.1029/2020RS007156>

4.2 総説・著書

Tetsuya Kawanishi, Wired and Wireless Seamless Access System for Public Infrastructure, Artech House 2020

4.3 招待講演

Tetsuya Kawanishi, Photonics in 5G and beyond, Asia Communications and Photonics

Conference (ACP) / the International Conference on Information Photonics and Optical Communications (IPOC) 2020

Tetsuya Kawanishi, THZ SEAMLESS NETWORKS FOR FUTURE MOBILE SERVICES, The International Conference on Plasma Science (ICOPS) 2020

4.4 受賞・表彰

文部科学大臣表彰 科学技術賞

4.5 学会および社会的活動

総務省電波政策懇談会にてテラヘルツ帯研究開発の必要性について意見を述べた

5. 研究活動の課題と展望

来年度以降も、干渉抑圧方式、光による無線波形伝送に関する研究に加えて、様々な環境下での電波伝搬に関する調査も平行して行う予定である。国際標準化への貢献も継続し、研究成果の社会実装を目指す。