

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礎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、新幹線などの高速鉄道向けの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予定である。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、国際的に広がり期待さ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

FMCW 方式では周波数が一定速度で減少または増加する周波数掃引信号（チャープ信号）を発信し、対象物からの反射波を検出するという方式である。送信波と反射波の周波数差は距離による遅延時間にだけ依存するので、送信波と受信波をミキシングすることで得られる中間周波数帯信号の周波数が一定値になる。これが、FMCW 方式による距離測定の原理であるが、他のシステムからの不要波が受信信号に混入した場合、中間周波数帯信号をある程度の時間、積分することで抑圧が可能である。一般に妨害波が送信波と同じ周波数変化を持つ周波数掃引信号となることはなく、時間平均すると妨害波の周波数は中間周波数帯で大きく変動するという現象が起きるためである。しかし、リニアセルレーダのように複数のアンテナ装置を同時に動作させる場合、同じ速度で周波数変化する信号が妨害波として混入する恐れがあるが、これは偽像となり原理的に除去することが不可能である。

昨年に引き続き、リニアセルシステムを構成するレーダーアンテナユニット間で発生しうる干渉の影響の検討と、協調動作による干渉の影響の抑圧手法の開発を行った。以下に主な研究成果について具体的に述べる。隣接するアンテナ装置間で周波数掃引速度に差を設けることで、偽像発生を抑圧できることをこれまでに報告しているが、多数のアンテナユニットをもつ規模の大きなシステムの場合、同じ掃引速度のアンテナユニット間で干渉が発生する可能性がある。今年度は干渉により生じる偽像が特有のパターンを有することに着目した干渉検出方法に関する研究を行った。

図 1 に本研究で用いた空港モデルの概要図を示す。60 m 幅の滑走路とその両側にそれぞれ 2 本の平行誘導路をもつ。アンテナ装置 Radio Access Unit (RAU) は、滑走路に沿って 400 m ごとに、滑走路の中心から 250 m 離れた位置に対称に配置され、それぞれ光ファイバにより接続されている。RAU は高さ 5 m の位置に設置され、アンテナはビームの中心が滑走路中央になるように 1.15 度下向きに設定されている。解析で用いたリニアセルレーダシステムのパラメータを表 1 に示す。これらのパ

ラメータは成田空港において実証実験中のリニアセルレーダシステムを参考に設定した。レーダーの方式は FM-CW で周波数帯域は 92-100 GHz である。アンテナは半値全幅 0.5 度の開口面アンテナであるとした。図 2 にアンテナゲインパターンを示した。図 3 は、成田空港における実際の距離と受信電力の関係である。442 m 離れた直径 1 inch の金属製シリンダー (-20 dBsm の Radar Cross Section; RCS) の反射による受信信号の SNR は 15 dB であることが読み取れ、本モデルもこの値を基準にノイズフロアレベルを設定した。

本研究では、空港モデルにおける 2 つの状況下での干渉現象について考察を行った。図 4 に空港で発生する干渉のモデルを示した。ここでは、リニアセルレーダのアンテナは協調制御されており、すべて同じ方向を向いていると仮定している。これにより、アンテナ同士が正対し送信波が直接干渉することはなく、干渉は航空機や空港内の構造物により反射して発生すると考えられる。

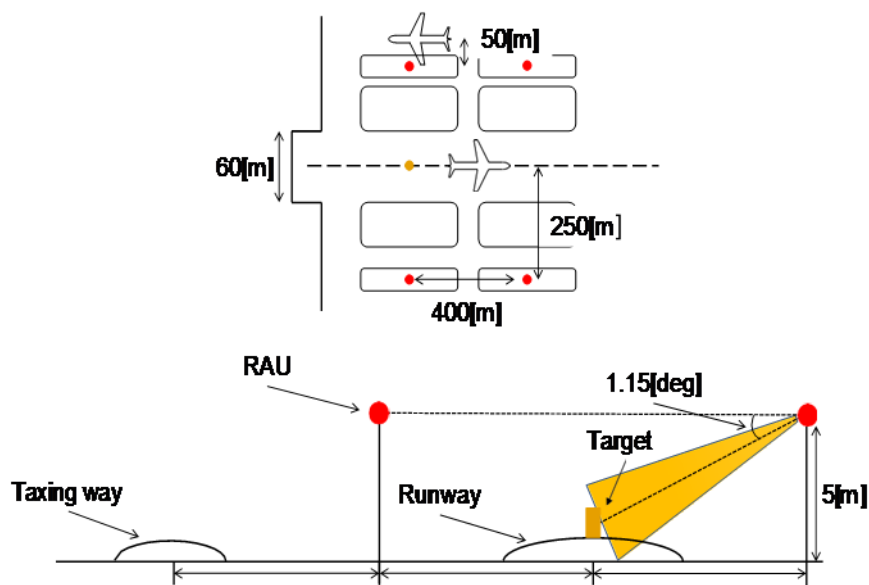


図 1 妨害波のモデル

表 1 リニアセルレーダシステムの諸元

周波数掃引波形	三角波
周波数	92-100 (GHz)
変調方式	FM-CW
アンテナ半値幅	1 (deg)
繰り返し周波数	1.25 (KHz)
回転数	15 (RPM)
測定距離	500 (m)
検知能力 (RCS)	-20dBsm (500m)
想定滑走路	60 X 3000 (m)

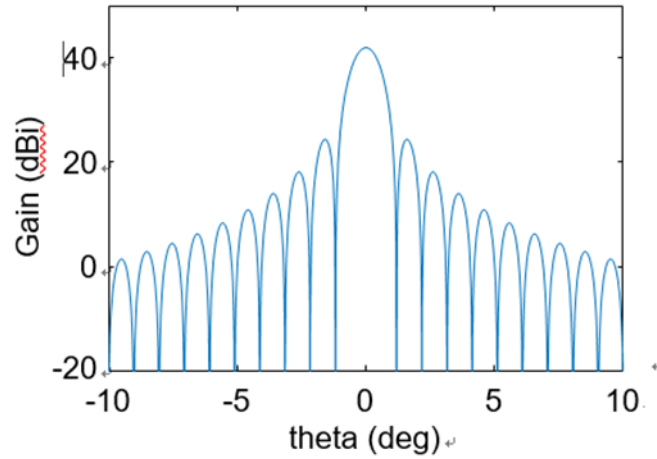


図 2: 空港モデルにおけるアンテナゲインパターン (開口面アンテナ).

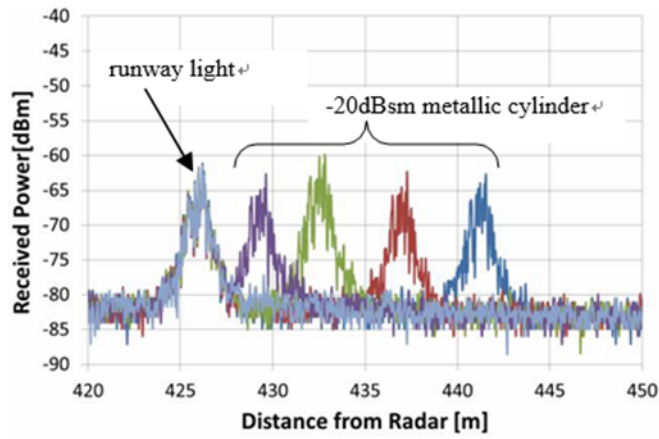


図 3: 成田空港における受信電力. 442 m 離れた -20 dBsm の 1 inch シリンダーの反射による受信信号の SNR は 15 dB

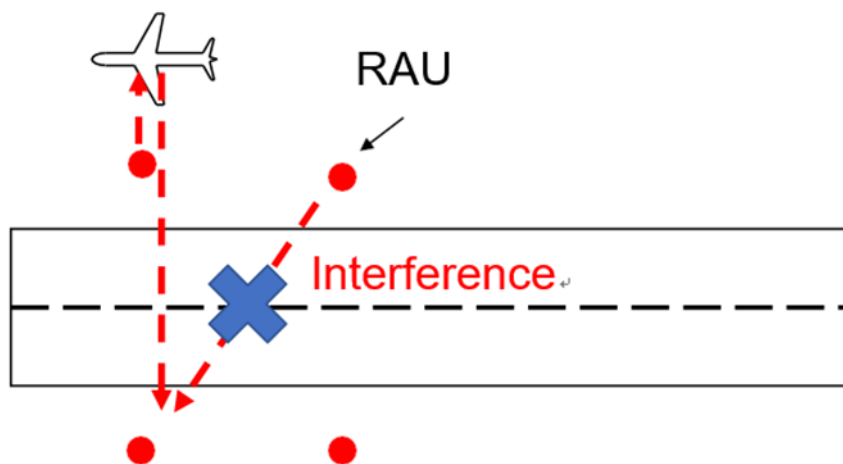


図 4: 空港で発生する干渉の基本概念図

図 5 に空港内の構造物による反射によって発生する干渉のモデルを示した。図中に示したような滑走

路脇のライト（滑走路灯）によって、隣のアンテナからの送信波が反射され干渉する場合を想定している。隣り合うアンテナの向きが滑走路に対して垂直である場合に干渉が発生すると考えると、滑走路灯方向のビームはメインローブから 42.3 度 ずれたサイドローブとなり、そのアンテナゲインは -15.4 dBi となる。また、干渉波の伝搬距離は $297.3 \times 2 = 594.7 \text{ m}$ となる。ここ、滑走路灯の RCS を -10 dBsm であるとする、レーダ方程式より受信電力 $PR = -214.7 \text{ dBm}$ となる。これは、システムのノイズフロア -122.9 dBm より十分小さいため、滑走路灯の反射による干渉波は測定に影響を及ぼさないことがわかった。

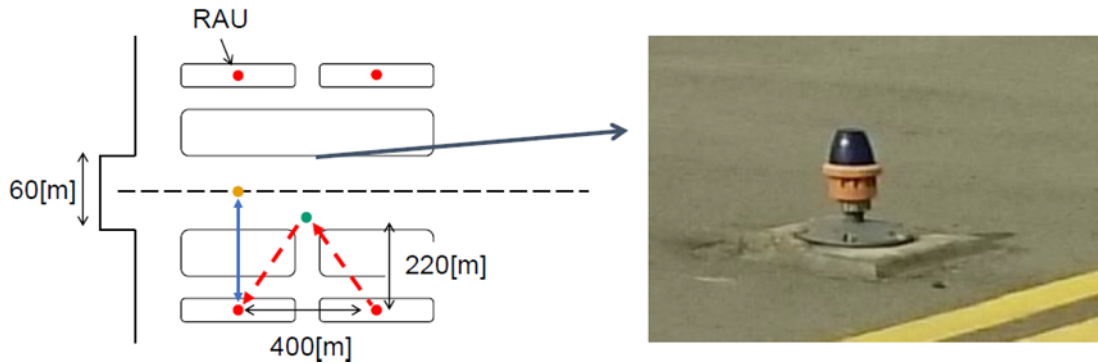


図 5: 空港内の構造物による干渉の模式図。

次に、平行誘導路上の航空機により向かい合うアンテナからの送信信号が反射されて発生する干渉について考える。図 6 に干渉モデルの概要図を示す。向かい側のアンテナのサイドローブより放射された送信波は航空機の側面に到達する。航空機の動体は円柱状であるため、航空機により反射した電波は平面反射の場合に比べて大きく拡散する。下式に、本モデルの送信電力と干渉波の受信電力との関係式を示す。

$$P_R = \frac{P_T G_T \pi d^2}{(4\pi R_T)^2} \frac{G_R \lambda^2}{2\pi R_R^2 \{1 - \cos(\phi/2)\}}$$

本式は、フリスの伝達公式と幾何学により求めることが出来る。本モデルでは、送信アンテナと受信アンテナの間で航空機へ向かうビームの角度に差が生じる。航空機の胴体中心の高さを 6 m とすると、干渉源のアンテナビーム、受信側のアンテナビームはそれぞれ上下方向に 2.3 度、1.3 度ずれたサイドローブとなる。送信アンテナゲイン $GT = 13.9 \text{ dBi}$ 、受信アンテナゲイン $GR = 15.9 \text{ dBi}$ 、送信アンテナ-航空機の距離 $RT = 50 \text{ m}$ 、航空機-受信アンテナの距離 $RR = 550 \text{ m}$ 、アンテナ開口面半径 $d = 9.2 \text{ cm}$ 、 $\phi = 3.74 \text{ deg}$ と場合のアンテナの回転角と干渉波の理論受信電力 PR の関係は図 7 のようになった。ここで、アンテナの向きが滑走路に対して垂直である場合を 0 度とした。図 7 より、アンテナ回転角が ± 5 度の範囲で干渉波のパワーがノイズフロアを上回ることがわかった。以上より、平行誘導路上に航空機がいる場合は干渉が発生し、観測に影響を及ぼす可能性があることがわかった。

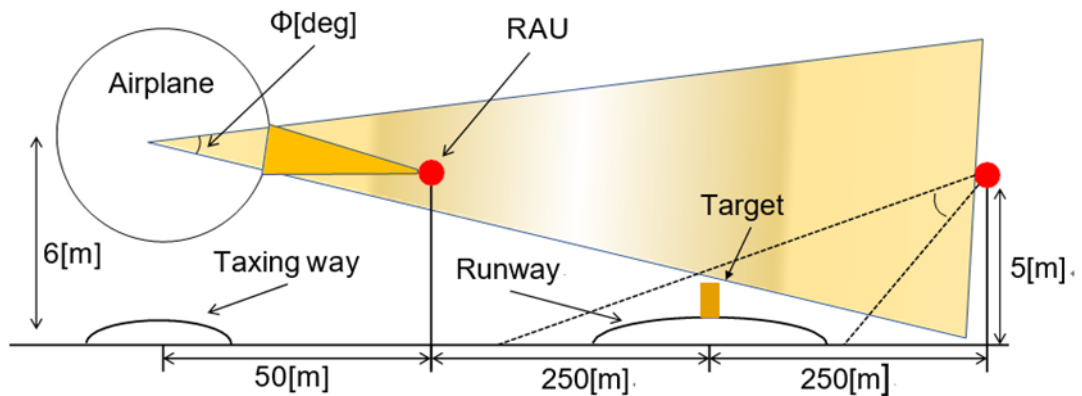


図 6: 誘導路上の航空機の反射による干渉の模式図.

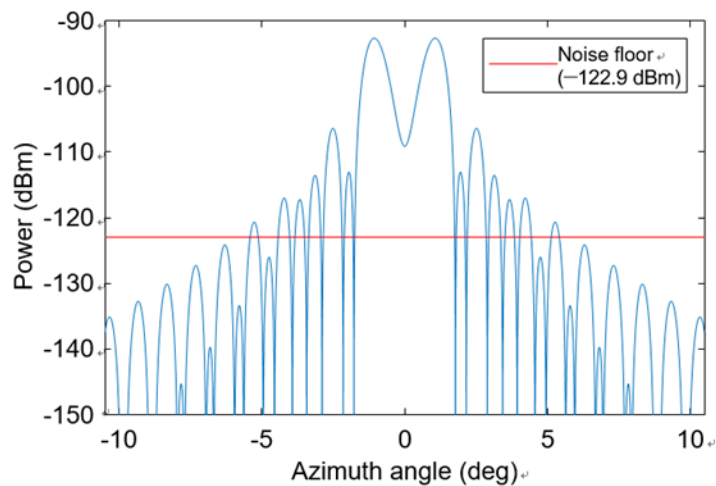


図 7: アンテナ回転角と誘導路上の航空機による干渉波の受信電力の関係.

干渉波の受信電力パターンがこのような特徴的なものとなる性質を利用することで干渉を検出できる可能性がある。図 8 に干渉発生時に想定されるレーダ画像を示す。これは、今年度開発したシミュレーターにより生成したものである。図のように 2 つのコブ状の特徴的な偽像が発生すると考えられ、この受信パターンを図 7 の理論受信電力と相関をとることにより干渉検知を行う。このような干渉電力パターンは航空機方向のビーム角に依存するため、対象とする航空機の種類や距離により変化する。よって、それぞれの状況に応じた干渉電力パターンが必要となるが、航空機の走路や機種はある程度限定されるため、干渉電力パターンをあらかじめデータベース化することにより発生しうる干渉は検知可能である。今後、より詳細の解析を行う予定である。

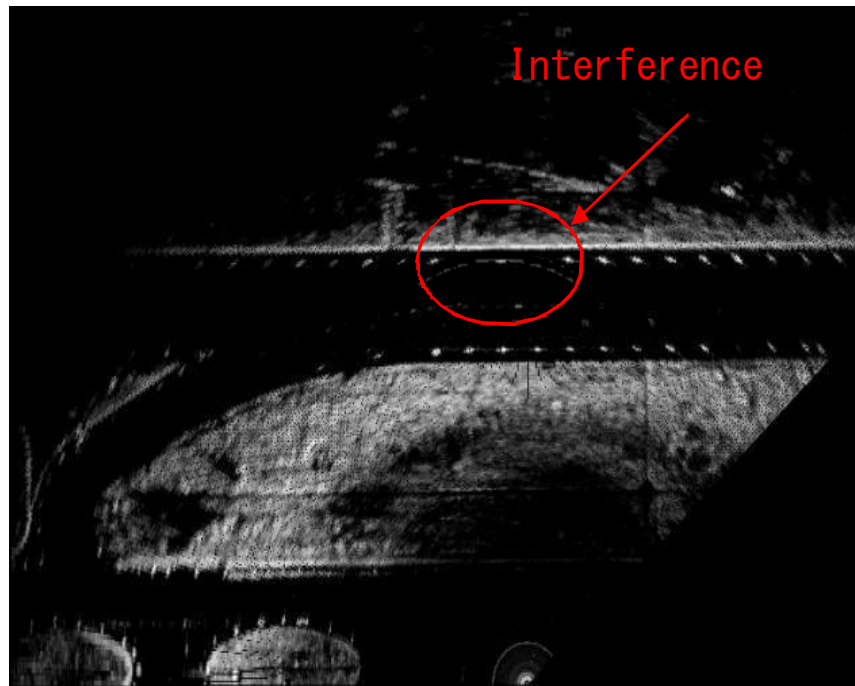


図 8: 特徴的な干渉電力パターンによる想定レーダ画像.

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

Toshimasa Umezawa, Takahide Sakamoto, Atsushi Kanno, Naokatsu Yamamoto, and Tetsuya Kawanishi, "High Speed 2-D Photodetector Array for Space and Mode-Division Multiplexing Fiber Communications", *J. Lightwave Tech.*, pp. 3684-3692, Vol. 36, No. 17, 2018

川西哲也、菅野敦史、ウーゴ フレイレ、"Wired and Wireless Links to Bridge Networks", *IEEE Microwave Magazine*, pp. 102-111, Vol. 19, Issue 3 (2018年5月号)

Tetsuya Kawanishi, Atsushi Kanno, Pham Tien Dat, Toshimasa Umezawa and Naokatsu Yamamoto, "Photonic systems and devices for linear cell radar," *Applied Sciences*, 9, 554, 2019

Tetsuya Kawanishi, "THz and Photonic Seamless Communications", *J. Lightwave Tech.*, pp. 1671-1679, Vol. 37, No. 7, 2019

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

Tetsuya Kawanishi, Millimeter-Wave Radars using Radio-Over-Fibers, 2018 IEEE Photonics Conference (IPC)

Tetsuya Kawanishi, THz Communications Enabled by Photonics, 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC)

Tetsuya Kawanishi, Kei Akama, Atsushi Kanno and Naokatsu Yamamoto, 2018 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA)

Tetsuya Kawanishi, Atsushi Kanno and Naokatsu Yamamoto, 90-GHz Linear-Cell Systems for Public Transportation Systems, 2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)

4.4 受賞・表彰

4.5 学会および社会的活動

IEEE Photonics Society 理事

クアラルンプール国際空港における実証実験

5. 研究活動の課題と展望

今年度は干渉検出、自動回避システムに関する研究に着手する。また、成田国際空港、クアラルンプール国際空港における実証実験に参加し、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。