

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

昨年度までに隣接するアンテナ装置(RAU)間において放射する FMCW 信号の掃引速度に差をつけることで、偽像の発生を抑圧する技術について検討してきた。掃引速度に差がある場合には、図 1 に示すように中間周波数帯において干渉信号の周波数が変動するため、一定した偽像とはならずノイズレベルにのみ影響を与える。ノイズレベルの変動を監視することができれば、このような干渉の検出も可能である。

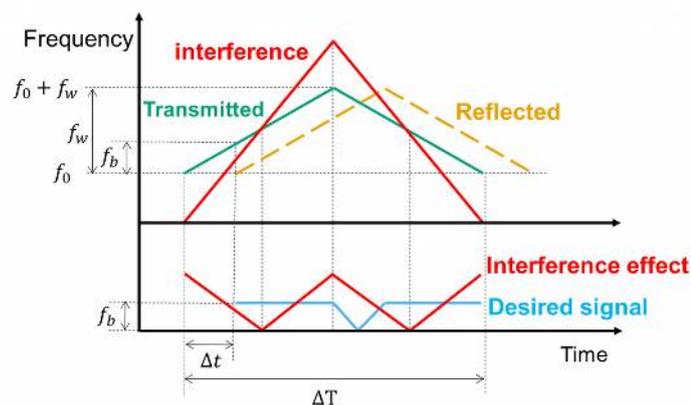


図 1 掃引速度に差がある場合の干渉

リニアセルレーダでは多数の RAU を同時に用いるため、同じ掃引速度をもつ装置間での干渉の可能性はある。特に、航空機からの強い反射波による干渉が活性する可能性がある。この場合には図 2 に示すような狭帯域干渉が発生する。狭帯域干渉は、掃引速度が同じチャープ信号を受信す

ることによって発生する。狭帯域干渉によって発生する信号は、所望信号と同種のものであり、実際の測距によって発生した信号と区別がつかないことから偽像となる。偽像が発生すると、実際に物体は存在しない場合でも存在するとシステムが誤認してしまい、誤報の発生につながる。狭帯域干渉を回避する方法としては、自分と同種のレーダー信号の有無を検出してから干渉による影響がないタイミングで掃引を開始するキャリアセンス方式などがある。

今年度は複数の RAU を結ぶ光ネットワークの構成を適切に設計、制御することで、狭帯域干渉による偽像発生を抑圧、偽像の判別についての研究を行い、その原理をクアラルンプール国際空港において実施したフィールド実験で実証した。

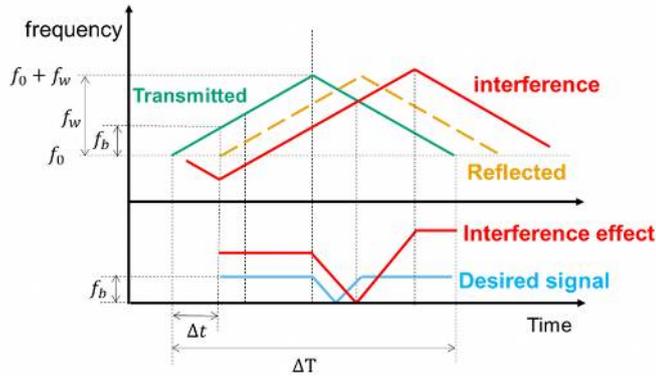


図 2 狭帯域干渉模式図

リニアセルレーダの干渉模式図を図 3 に示す。リニアセルレーダの各 RAU は協調制御により、直接他の RAU に干渉することはない。しかし、飛行機などにより送信波が反射された場合、実際の所望波よりも強い干渉波として他の RAU に受信される場合がある。FMCW リニアセルレーダにおける干渉の回避方法として、RAU の掃引速度を変化させる方法や各 RAU の RoF において光路長に差をつけて送信タイミングを変化させる方法を検討させた。RoF に追加する光路長の計算式を式(1)に示す。

$$L_f = \frac{4R_{max}}{c} c' \quad [m] \quad (1)$$

(L_f : 追加する光ファイバ長[m], R_{max} : レーダーの最大探知距離[m], c' : ファイバ内の光速[m/s])

式(1)は FMCW リニアセルレーダにおいて、探知範囲内の偽像すべてを除去するのに必要ファイバの長さである。特定の位置の偽像を除去するのに必要なファイバの長さを以下の式(2)に示す。

$$L_f = \frac{2(R_f + R_{max})}{c} c' \quad [m] \quad (2)$$

(R_f : 偽像の発生位置[m])

以上の式を用いて光ファイバの長さを追加し、干渉回避を実現する。

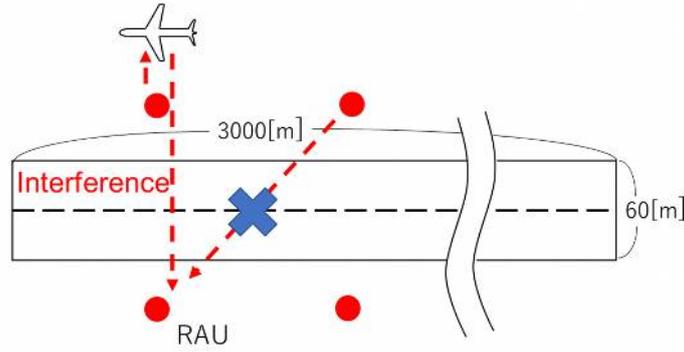


図 3 リニアセルレーダ干渉模式図

ここではクアラルンプール国際空港での実験で用いた実験系の構成について述べる。まず、図 4 に FMCW リニアセルレーダの構成図を示す。リニアセルレーダの構成は大きく分けて Control Unit、RAU の二つに分けることができる。Control Unit ではレーダー波の生成と受信信号の解析を行う。30 GHz 帯 3 GHz 幅のチャープ信号を生成した後、光変調器と光増幅器を介して空港の既存光ネットワークに接続し、各 RAU に伝送する構成である。RAU 部では、Photo Detector(PD)で電気信号に変換した後、三通倍かつ増幅しアンテナにて放射する。反射波は増幅後、送信波と混合し差周波成分を AD 変換した後、Control Unit まで光ファイバ経由で伝送される。そして FFT 処理され各種の信号処理の後、端末にレーダー情報として表示される構成となっている。そして、Control Unit、RAU の二つを結ぶのが Optical Network 部、つまり光ファイバ群である。これらはレーダーの受信信号と送信信号を伝送する他、各 RAU を同期させるための制御信号を伝送している。また、今回の実験におけるパラメータを以下の表 1 に示す。距離分解能は約 1.9 cm になることから、理論上 1 インチ程度のものであれば検知は可能である。また、アンテナの半値全幅は約 0.5 deg となっている。

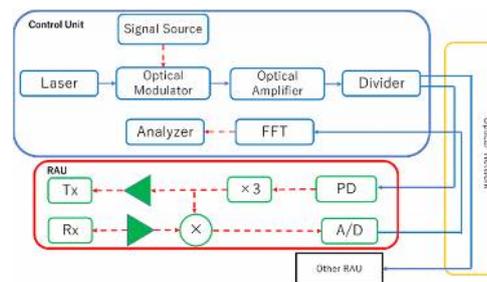


図 4 FMCW リニアセルレーダ構成図

図 5 に RAU を直線配置したリニアセルレーダ干渉系の模式図を示す。横から見た図を図 6 に示す。リニアセルレーダ干渉系は RAU2→RAU1→飛行機をほぼ一直線に配置した実験系である。メインの受信系である RAU2 と飛行機の胴体中心との距離は 200 m、また RAU2 と RAU1 との距離は 43.2 m となっている。制御装置群と各 RAU は光ファイバでつながれており、それぞれ 300 m となっている。RAU2→RAU1→飛行機 が完全に一直線に並んでない理由は、RAU 1 によって RAU2 の送信波が遮られるのを危惧したためである。完全に一直線ではないので、アンテナゲインの角度依存性により、干渉パワーは弱くなってしまふことが見込まれるが、計算上では角度の差は 0.33 deg であるため大きい損失とはならない。また、各 RAU は 4 秒で 1 回転し、その回転は Control Unit からの制御信号により完全

に完全に同期が可能である。図 6 に示すように、各 RAU は飛行機の胴体中心方向を向いており、仰角は水平方向から上に約 1 deg である。また、高さは 1.5 m に調整している。そして、RAU には 10 dB の ATT(アッテネータ)を装着している。これは、飛行機からの反射電力が不意に大きくなってしまった場合に受信系が破損してしまうことを危惧したためである。

表 1 リニアセルレーダパラメータ

パラメータ	値
変調方式	FMCW
中心周波数(GHz)	96
送信帯域幅(GHz)	7.9
送信電力(dBm)	17
アンテナ利得(dBi)	44
繰り返し周波数(kHz)	1.25
IF 帯域幅(MHz)	62.5
FFT ポイント	32678
FFT サンプリング周波数(MHz)	125

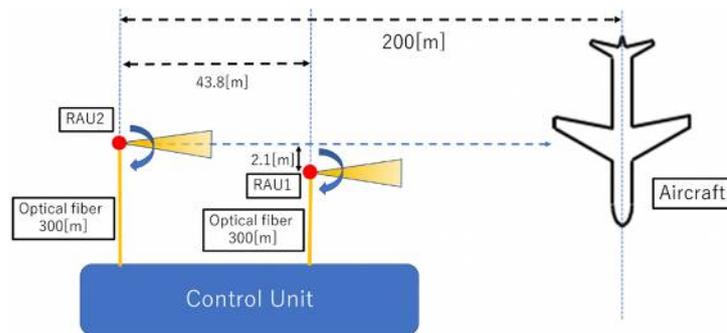


図 5 リニアセルレーダ干渉系(上面図)

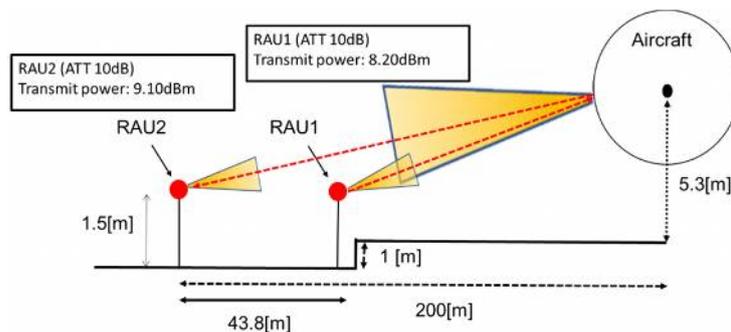


図 6 リニアセルレーダ干渉系(側面図)

この実験系では、受信系を RAU2 にしており、RAU2 は自身の送信波により発生した反射波と、RAU1 からの干渉波を受信する。経路の違う二つの信号を受信することで、ディスプレイには現実の飛行機に加え、ゴーストターゲットとしての飛行機が表示される。まず、干渉波がない場合の PPI を図 7 に示す。

干渉波がない場合、PPI 上では RAU 2 から見えるもののみが映っている。X=0 m、Y=200 m の地点には飛行機が見えており、その奥の約 270 m 地点には二機目の飛行機が映し出されている。RAU1 と RAU2 を両方送信したときの PPI を図 8 に示す。RAU2 の送信波が反射波として受信されるまでの経路

は RAU2→飛行機→RAU2 の計 400 m である。それに対し、RAU1 による干渉波は、RAU1→飛行機→RAU2 の計 356.2 m であるため、RAU2 の反射波によってできる像と RAU1 の干渉波によってできる像の位置が異なり、後者が偽像となる。

偽像を回避するために我々は図 9 のような実験系を用いて実験を行った。RAU1 からの干渉波を受信するタイミングは、RAU1 の送信タイミングに依存するので、RAU2 側の光ファイバの長さのみを変更することで干渉波との間にできるビート周波数の値を制御することができる。これを図 4.3.1-13 に示す。送信タイミングを光ファイバにて一定時間以上ずらすと IF 帯域より外にビート周波数が発生するため、干渉による偽像が発生しなくなる。また、送信タイミングの変化量が微量でも、干渉によるビート周波数の値が変化するため、偽像が移動する。1000m のファイバを挿入すると、図 10 に示すように、飛行機の偽像が PPI から消えている。これは、干渉波とのビート周波数の値が IF 帯域を超えたためである。ここで、RAU2 からの距離が 200 m の飛行機からの干渉を排除することのできる光ファイバの長さを計算する。RAU1→飛行機→RAU2 の経路は 356.2 m となるので、飛行機からの干渉波は送信波に対して

$$356.2 \div (3.0 \times 10^8) = 1.19 \text{ } [\mu\text{s}]$$

遅れて受信される。ここで、IF 帯域 62.5 MHz がどれくらいの時間遅延量に相当するかを計算する。掃引時間 T: 400 μs 、周波数掃引幅 f_w : 7.9 GHz より

$$(400 \times 10^{-6}) \div (7.9 \times 10^9) \times (62.5 \times 10^6) = 3.16 \text{ } \mu\text{s}$$

よって、干渉回避に必要な時間遅延量は 4.35 μs となる。ファイバ内の光の速さを $2.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ とすると、必要な光ファイバの長さは

$$(4.35 \times 10^{-6}) \times (2.0 \times 10^8) = 870 \text{ m}$$

となる。よって 900 m 以上の光ファイバによる遅延があれば、200 m の位置にある飛行機からの干渉波による偽像は除去可能である。

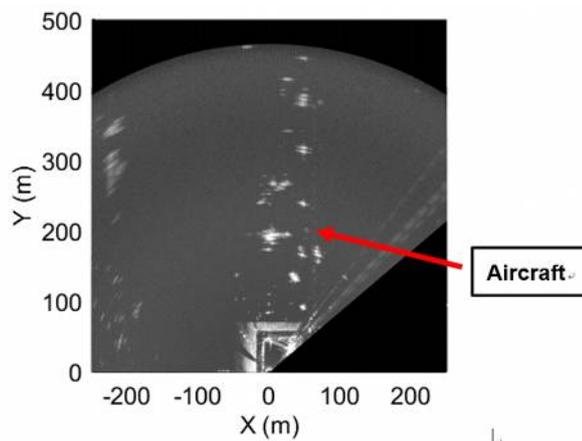


図 7 RAU2 のみを送信した場合の RAU2 の PPI (干渉なし)

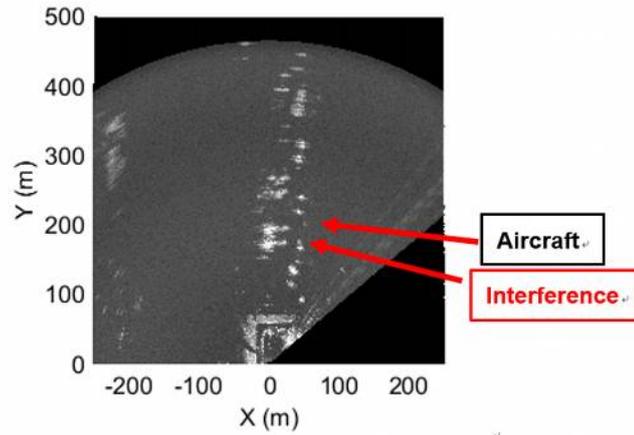


図 8 両方送信した場合の RAU2 の PPI (干渉あり)

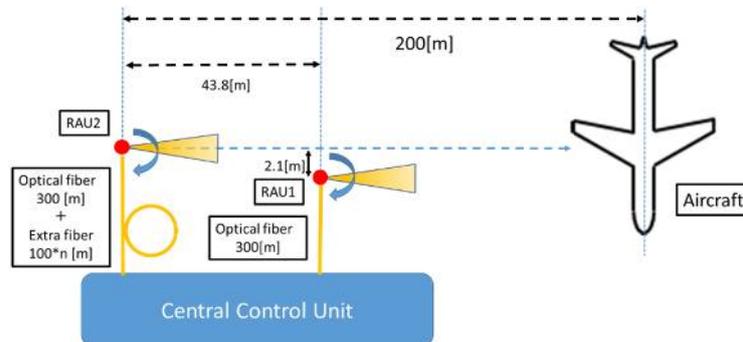


図 9 リニアセルレーダ干渉系(ファイバによる遅延差あり)

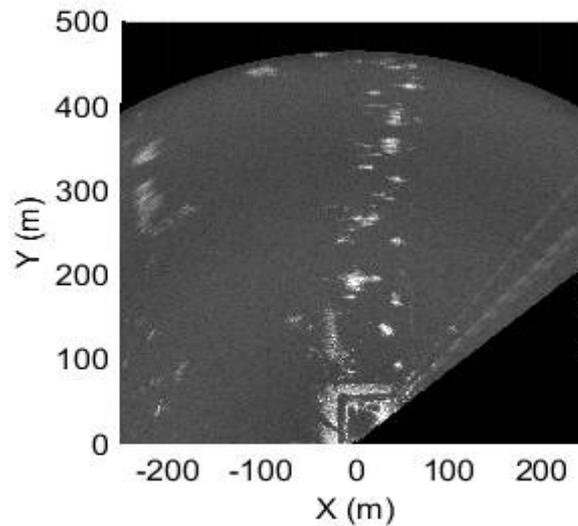


図 10 1000 m のファイバ追加時の PPI

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, Seamless Networks for Beyond 5G, IEEE Future Networks Tech Focus Volume 3, Number 3, November 2019

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

Tetsuya Kawanishi, Tetsuya Miura and Keizo Inagaki, Reconfigurable radio-over-fibre networks for interference mitigation in linear cell radars, 21th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), July 9th, UFR Science, Anger, France

4.4 受賞・表彰

4.5 学会および社会的活動

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

来年度以降も、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画し、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。