

# 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

多数のアンテナユニットからなるリニアセルシステムのさらなる性能向上と電波資源の有効利用を目指し、FMCW 方式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。

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。反射波はその距離に応じた遅延を持ち、また、振幅も距離やレーダー断面積に大きく依存して変化するが、その周波数変化の速度は送信波と全く同じである。つまり、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ことになり、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、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。本開発では、妨害波の混入が起こりえる隣接するアンテナ装置の間で周波数掃引速度に一定の差をもうけることで、偽像の発生を避けるとともに、不要放射が混入していることを検知する技術の検討を行った。

まず、干渉発生程度の基本的条件を把握するために図 1 に示すような簡単なモデルで、滑走路をはさんで対向するアンテナ装置からの妨害について数値的に検討した。現在、成田国際空港にて実証実験が行われているリニアセルレーダシステムを干渉検討のモデルとして、表 1 に示すような性能を持つものと仮定した。検知する対象は 500m の距離においたレーダー断面積(RCS: Radar Cross Section)が $-20\text{dBsm}$ (おおよそ直径 1 インチ、高さ 1 インチの金属円柱)の物体であるとした。

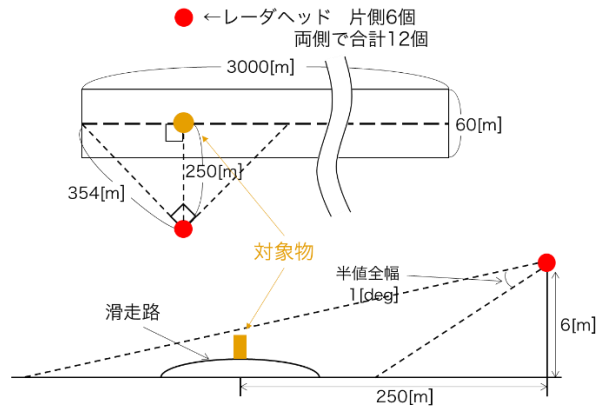


図 1 対向するアンテナ装置からの妨害波のモデル

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)

アンテナはピークゲインが 1 で、半値幅  $1^\circ$  のガウシアンビームであると仮定した。サイドローブは考えないとする。するとそのアンテナのゲイン  $G$  は、向かい合うアンテナの水平方向相対角を  $\theta_x$ 、縦方向の差を  $\theta_y$  とすると(1)のように表される。

$$G = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{\theta_x}{\frac{\theta_{1/2}}{2\sqrt{2\ln 2}}} \right)^2 + \left( \frac{\theta_y}{\frac{\theta_{1/2}}{2\sqrt{2\ln 2}}} \right)^2 \right\} \right] \quad (1)$$

ここで、 $\theta_{1/2}$  は半値幅 ( $G$  が半分となる  $\theta$ ) である。レーダー方程式より、所望波である物体からの反射波の受信電力  $P_{r,d}$  は次式で表すことができる。

$$P_{r,d} = \frac{G_d^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_d^4} P_t \quad (2)$$

ここで、 $R_d$ : 物体との距離、 $G_d$ : アンテナゲイン、 $\sigma$ : 物体の有効反射面積 (RCS) であるとした。向かいのアンテナからの非所望波である干渉波の受信電力を  $P_{r,u}$  は、

$$P_{r,u} = \frac{G_u^2 \lambda^2}{(4\pi)^2 R_u^2} P_t \quad (3)$$

であたえられる。ここで、 $R_u$ : 向かいのアンテナとの距離、 $G_u$ : アンテナゲインである。所望波 (反射波) と非所望波 (干渉波) 受信電力の比である  $D/U$  比は次のように表される。

$$\frac{D}{U} = 10 \log \left\{ \frac{P_{r,d}}{P_{r,u}} \right\} \text{ [dB]} \quad (4)$$

アンテナの水平方向相対角を変化させたときの D/U 比は図 5.3.1.1-2 のようになる。  
 $R_d: 250.072[\text{m}]$ 、 $R_u: 500[\text{m}]$ 、 $\sigma: -20[\text{dBsm}]$ 、 $G_u: 1$ 、 $\theta_y: 1.37[\text{deg}]$ とした。相対角を1°程度以内では D/U 比が悪化し干渉の影響が見られることがわかる。

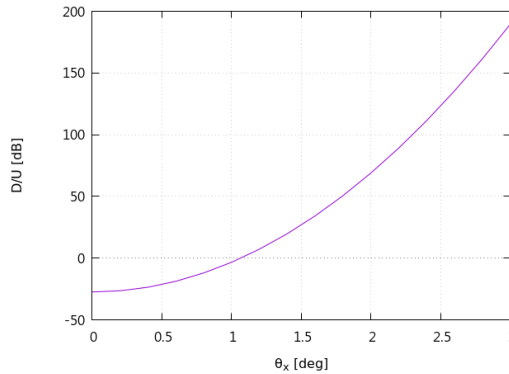


図 2 アンテナ方向と D/U 比の関係

次に、相対角度が1度以内となって干渉の影響が生じるときにおいても、偽像の発生を抑えるために、隣接するアンテナ装置において、周波数掃引速度に差をつける構成についての検討を行った結果について述べる。今年度は中間周波数帯信号に対して干渉を模擬する実験系を構築し、掃引速度差と干渉の影響の関係について調査した。

図 3 に FMCW レーダーの基本構成を示した。信号源の出力の一部を局発として用いて、対象物から受信した信号を周波数変換し、スペクトラムアナライザ(SA: Spectrum Analyzer)で周波数弁別する。周波数軸のプロファイルが、レーダー像となる。実際のレーダーでは空中に電波を放射し、対象物からの散乱波を受信するが、この場合、対象物の状況や、実験環境によって受信信号の強度が大きく変動する。この研究では、信号処理、変調方式による差異を求めるのが主目的であるために、ファイバ無線技術を用いた。対象物からの反射を模擬するためにはケーブルによる遅延を利用するという方法が考えられるが、周波数が高い領域ではケーブルによる損失が非常に大きくなるという課題があった。光ファイバで無線信号波形を伝送するファイバ無線技術では、簡単に大きな遅延を得ることができるため、レーダーの動作を正確に模擬することができる。今回用いた構成を図 4 に示した。EO(Electric-to-Optical)変換器は信号源からの電気信号を光に変換する。これの一部を OE(Optical-to-Electric)変換器により局発信号源(LO)を得る。一方、対象物からの散乱波は所定の長さ(x[m])の光ファイバによる遅延で模擬する。

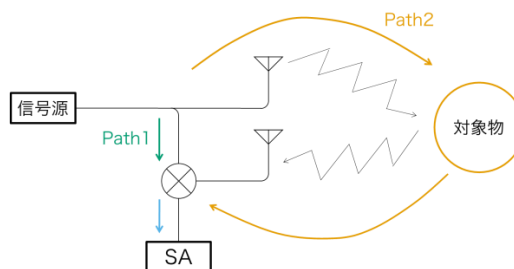


図 3 FMCW レーダーの基本構成

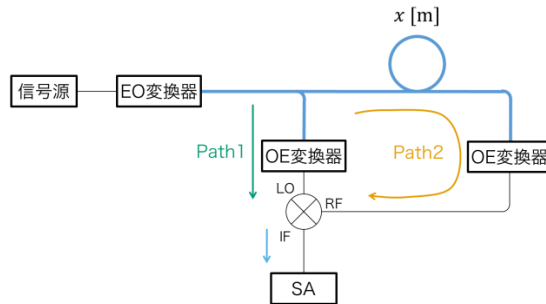


図 4 FMCW レーダー模擬系

図 5 に干渉波(妨害波)を導入する模擬系の構成を示した。送信波は中心周波数 $f_c$ :2GHz、掃引幅 $f_w$ :1GHz、掃引時間 $\Delta T$ :50 $\mu$ sとし、干渉波は送信波と中心周波数、掃引時間は同一とし、掃引幅を1.1~1.5GHzで変化させた。またファイバ長差 $x$ は100mとした。干渉波の強度は受信波と比べ+10dBほどになるように設定されている。また、今回は信号源 1 と信号源 2 はそれぞれ、任意信号発生器の CH1 と CH2 から出力されているため、送信波と干渉波が時間的に完全に同期している。実際にはミキサにおいては経路の違いから若干の時間差を持つがそれは数十 ns のオーダーであり掃引時間50 $\mu$ sより十分小さいため、干渉波は送信波、受信波に十分重なると考えられる。

図 6 に干渉波がない場合のスペクトログラムを示した。対象物の距離に対応する周波数(20MHz)に一定のビート信号が発生していることがわかる。これが所望信号に相当する。図 7 と図 8 に干渉波がある場合のスペクトログラムを示した。それぞれ妨害波の影響が所望信号を横切る形で V 字型に発生することがわかる。掃引速度差がより大きい図 7 の場合がより急峻で、所望信号を横切っている時間が短いことがわかる。

図 8 にレーダー像に相当するスペクトルを示した。いずれの場合にも偽像の発生はないことが確認できる。干渉の影響がある場合にはノイズフロアが全体として上昇していることがわかる。これは、ノイズフロアの変化から他のアンテナ装置からの不要波を受信していることを検出できることを示している。ノイズフロアの変化が発生した場合に隣接するアンテナ装置に指令を出して、回転方向を変えるなどの対処が可能である。来年度以降、システム全体としての性能の最適化を目指した検討を進める予定である。

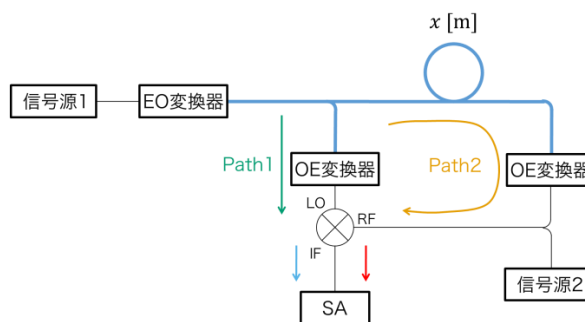


図 5 FMCW レーダー干渉模擬系

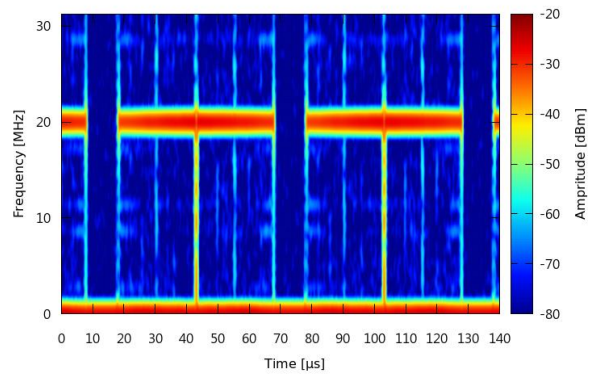


図 6 FMCW レーダー復調波のスペクトログラム(干渉波なし)

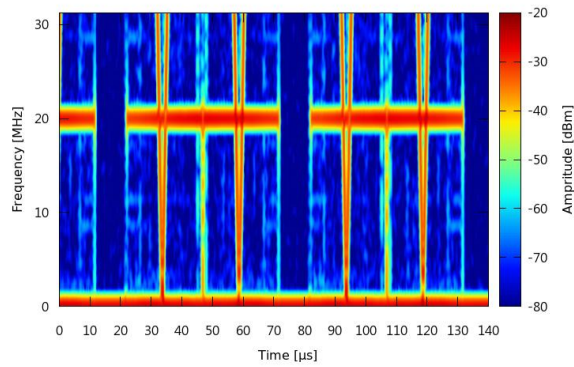


図 7 FMCW レーダー復調波のスペクトログラム(干渉波の $f_w$ : 1.5GHz)

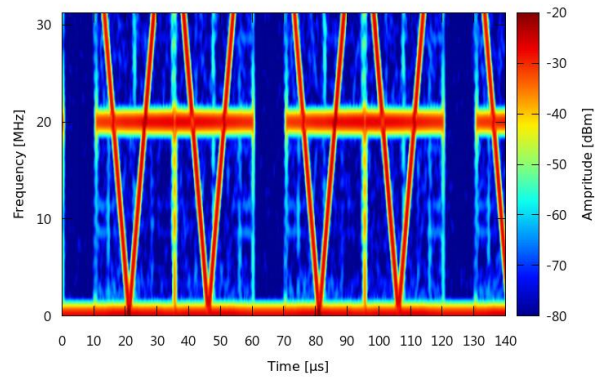


図 8 FMCW レーダー復調波のスペクトログラム(干渉波の $f_w$ : 1.1GHz)

### 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

Atsushi Kanno, Pham Tien Dat, Naokatsu Yamamoto, and Tetsuya Kawanishi, "Millimeter-Wave Radio-Over-Fiber Network for Linear Cell Systems," *Journal of Lightwave Technology* Vol. 36, Issue 2, pp. 533-540 (2018)

#### 4.2 総説・著書

#### 4.3 招待講演

Tetsuya Kawanishi, "Instantaneous frequency measurement for broadband radio signals using optical single sideband modulation," 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2017), Phuket, Thailand, October 30 – November 2, 2017

Tetsuya Kawanishi, "Sensor over fibres and its application to high resolution millimeter-wave radar," The 3rd Int'l Conference on Remote Sensing Technologies and Applications (ICRSTA 2018), Bangkok, Thailand, January 5-7, 2018

Tetsuya Kawanishi, Kei Akama, Atsushi Kanno and Naokatsu Yamamoto, "Interference Assessment of Linear Cell Radar Remote Antenna Units," 6th Workshop on Convergence of Radio and Optical Technologies (CRO-WS 2018), Kuala Lumpur, Malaysia, February 22, 2018

#### 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。