

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、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、電波伝搬や測定技術に注力し、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

今年度もリニアセル技術に関連する課題として、ミリ波帯・テラヘルツ帯無線技術に関する研究プロジェクトを実施した。その中で、電波伝搬に関連するものとして、広帯域信号に対する伝搬モデル化や高速特性変動の評価についてとりあげる。

伝搬モデルの高精度化に関しては、広帯域信号を用いた特性測定技術に関する研究を行った。具体的に2つの方式について検討した。一つはV帯時分割方式広帯域送受信器を用いたもので、その伝送レートと連続波の応答の関係を解析した。低コスト送受信器を用いた電波環境推定のための基礎データを得ることが目的である。図1は伝送レートと受信電力の関係を、直接波と地面からの反射波による二波干渉がある環境で測定したものである(図2)。送受信器の距離を18-20mとした。測定間隔は5cm、アンテナ高さは0.802mであった。全電力とスループットの関係にずれがあるのは帯域内の位相関係になどに起因すると考えており、さらなる解析を実施する予定である。

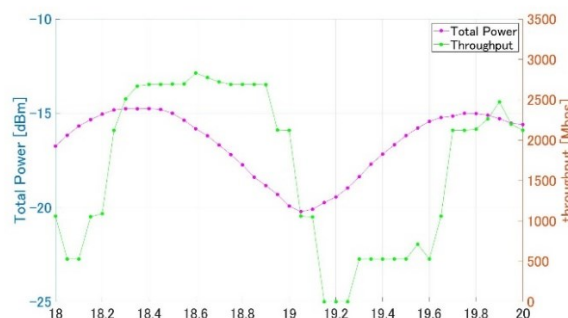


図1 V帯広帯域送受信器の伝送レートと受信電力の関係

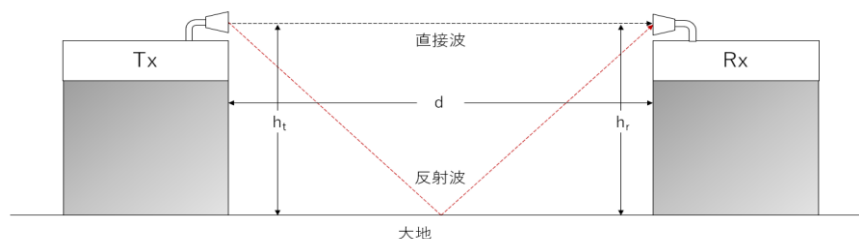


図 2 電波暗室内伝搬特性測定

もう一つが広帯域 OFDM 信号を用いた測定である。これは、高速任意波形発生装置と高速オシロスコープを用いたもので、これまでの正弦波信号を用いた伝搬測定と異なり、広帯域応答を一括で得ることができるという特徴がある。図 3 に送信側、図 4 に受信側の構成を示す。二波干渉の影響が帯域内に現れている例である。ミリ波帯では周波数が高いことから、数センチの移動で伝搬状況が大きく変動する。他方、広帯域信号では、帯域内にその影響が顕著に表れることになる。広帯域 OFDM 信号を用いた測定ではこれらを包括的に測定することが可能となる（図 5）。基本特性評価として、広帯域信号を用いた二波干渉の影響を測定した（図 6 および図 7）。

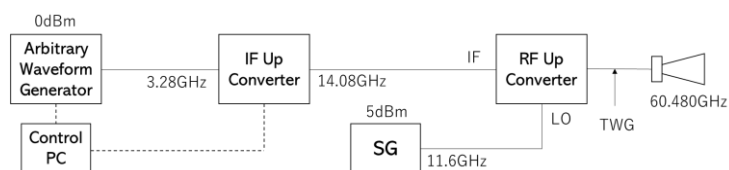


図 3 広帯域信号送信機

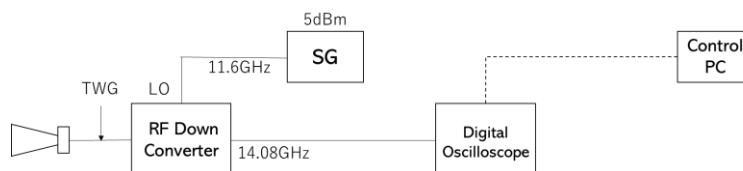


図 4 広帯域信号受信機

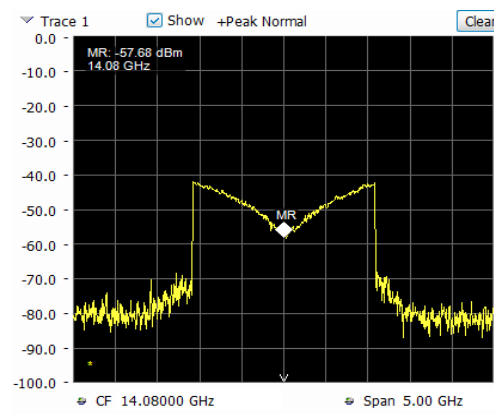


図 5 受信信号スペクトルの例

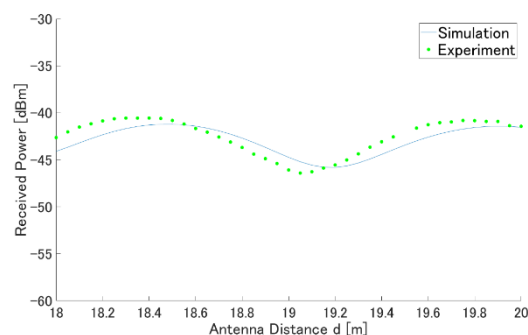


図 6 広帯域信号の二波伝搬特性(垂直偏波)

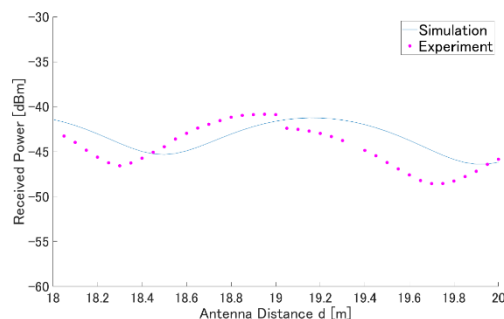


図 7 広帯域信号の二波伝搬特性(水平偏波)

高速測定については、広帯域 OFDM 信号を用いた時間周波数分析を用いた実験装置の構築を進めている。60GHz 帯にて、高速で回転する金属製ファンによる電波伝搬特性の変動を測定する実験を行った。図 8、図 9 はそれぞれ OFDM 信号の送信機、受信機の構成を示す。図 10 に実験系の全体構成を示した。

広帯域オシロスコープを用いた受信機で測定したスペクトログラムを図 11 に示す。OFDM 信号の反射波のうち扇風機の羽を反射しているのが赤い部分、扇風機の羽を通過してコーナーリフレクタからのみの反射がある場合が緑色の部分である。青色の部分は信号周波数帯域の範囲外であり、パワーレベルが極端に低く青くなっている。このうち赤い部分に注目すると赤い部分の中でもパワーの大きい部分と小さい部分が斜めに周期的に表れている。これは扇風機の羽が動いていることの表れであると同時に扇

風機の回転によって伝搬環境に乱れが生じているととらえることができる。干渉縞の時間変位を利用して送受信アンテナに対する変位速度を求める。図 12 に先ほど示したスペクトログラムの拡大図を示す。AB 間における周波数 f_{AB} は中心中波数が 14.08GHz, 帯域幅が 2.16GHz であることから式(1)となる。

$$f_{AB} = 14.08 - \frac{2.16}{2} + 0.678 \approx 13.7[\text{GHz}] \quad (1)$$

スペクトログラムの干渉縞が二波干渉によるものとする、図 12 より AB 間の位相差 $\Delta\psi = 3.8 \times 2\pi$ と読み取れるので、式(1)と電波の伝搬速度 $c = 3 \times 10^8[\text{m/s}]$ から経路差 Δl が求まる。

$$\Delta l = \frac{\Delta\psi c}{2\pi f_{AB}} \approx 0.083[\text{m}] \quad (2)$$

式(2)は羽根による電力の反射の最初から最後までまでの経路差の変化を表しており、これが送受信アンテナに対する変位量 Δx によるものだとすると Δx は式(3)で表される。

$$\Delta x = \frac{\Delta l}{2} \approx 41[\text{mm}] \quad (3)$$

図 13 に示すように本実験で用いた扇風機の羽の幅は回転軸方向に対して 35.0mm であるので、この結果は妥当だといえる。羽根の位置変位量は通過時間 $\Delta t = 2.30[\text{ms}]$ の間で生じたものであるから、変位速度 v は式(4)と表される。

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \approx 18[\text{m/s}] \quad (4)$$

この時、ドップラー周波数偏移 f_d は式(5)で与えられる。

$$f_d = \frac{2v}{c} f_{AB} \approx 1.7[\text{kHz}] \quad (5)$$

ドップラー周波数偏移はスペクトログラムの周波数偏移よりも十分に小さいので、干渉縞の発生原因は二波干渉に代表されるようなマルチパス干渉による影響だと考えられる。

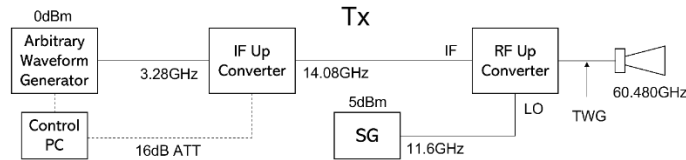


図 8 OFDM 送信機の構成

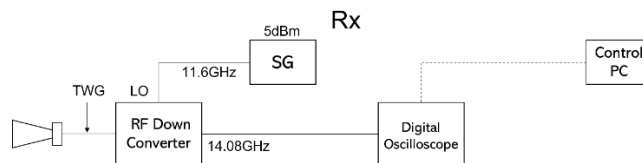


図 9 OFDM 受信機の構成

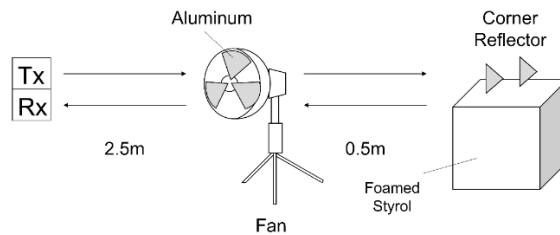


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。 10 OFDM 受信機の構成

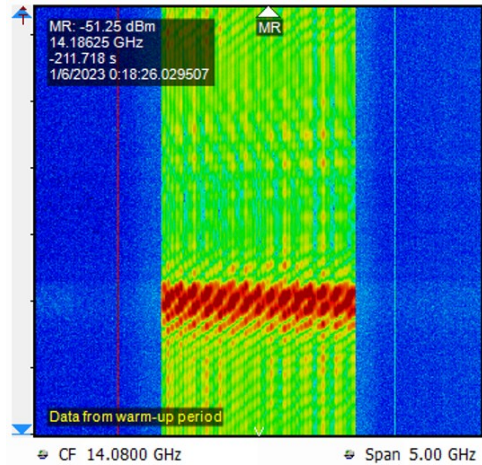


図 11 スペクトログラム

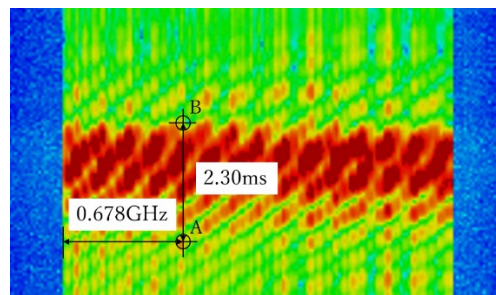


図 12 スペクトログラム (拡大図)

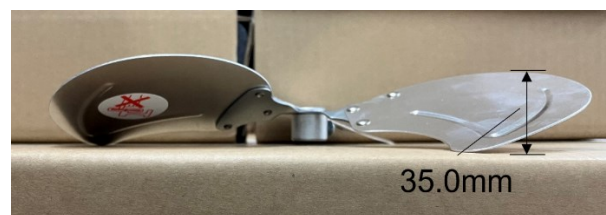


図 13 金属製ファン

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

Q. Huang and T. Kawanishi, "Precise RF Phase Measurement by Optical Sideband Generation Using Mach-Zehnder Modulators" Photonics 10, no. 3: 324 (2023).

S. Masuda, Z. Zhongqi, M. Kitamura, M. Morishita, K. Jitsuno, K. Inagaki, A. Kanno and T. Kawanishi, In-vehicle NLOS pedestrian detection system using secondary radar based on frequency doubling and oversampling signal analysis, IEICE Communications Express 11 (9), 560-565 (2022).

R. Kawabata, S. Nakamaru, K. Jitsuno, K. Inagaki and T. Kawanishi, Stability of MMF transmission characteristics with wide variety of laser linewidth, IEICE Communications Express 11 (9), 555-559 (2022)

4.2 総説・著書

特になし

4.3 招待講演

Tetsuya Kawanishi, Lightwave modulation for high-performance radio-over-fiber systems, 2022 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)

4.4 受賞・表彰

特になし

4.5 学会および社会的活動

特になし

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。