

リニアセルシステムの現状と テラヘルツへの展望

光ファイバーネットワークとミリ波無線システムを組み合わせたリニアセルシステムについて、空港滑走路異物検知システムおよび高速鉄道向け通信システムへの検討事例を交えながら、将来のテラヘルツ化について紹介する。

国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT)
ネットワークシステム研究所ネットワーク基盤研究室
菅野 敦史

早稲田大学
理工学術院基幹理工学部
川西 哲也

株式会社日立国際電気
モノづくり統括本部プロダクト部
柴垣 信彦



はじめに

高画質高感度カメラの普及と画像処理技術の高度化により、広範囲にわたる異物検知・侵入検知技術の革新が進み、多種多様な場所で利用されるようになってきた。しかしながら、十分な背景光量が取れず、かつ、数100mにわたる範囲を対象とする場合、視野角と画素数の問題からカメラ台数の大規模な導入もしくはカメラ自体のスキャン機構が必要となる。電波を用いるレーダー技術は昼夜問わず検出が可能であるものの、一般的に利用されるマイクロ波ではその波長の長さから数cm級の小異物の検知は困難である。一方、自動

車衝突防止センサーにも用いられるミリ波レーダーは、分解能は高いものの、ミリ波電波自体の伝搬損失の高さから検知範囲(セル)に制限がある。

高速道路・鉄道線路のような一次元・線形なシステムにおいて効果的な検知範囲拡大を実現する手法として、リニアセル方式があげられる。リニアセル方式はセルを線上にならべ、それらを光ファイバーネットワークで接続することで、高い検知能力を保ったまま検知範囲を広げる技術である(図1)。マイクロ波、ミリ波、テラヘルツ等周波数を問わず適用が可能であり、本稿ではその技術概要と現状、テラヘルツ帯への適用とその展望について議論する。

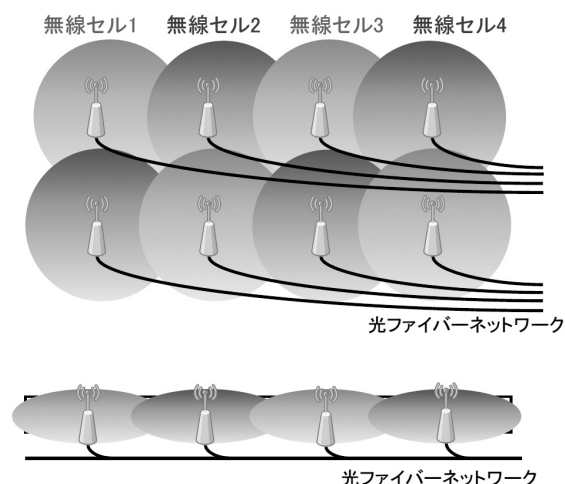


図1 (上) 通常無線セル構成、(下) リニアセル構成

リニアセルシステムとは

❖システムの概要

検知範囲(セル)を線上にならべているリニアセル方式は、上述の通り、鉄道向け通信技術や空港滑走路異物検知システムに適した方式である。レーダー・通信機能を有するリモート装置群をセルに沿って一次元的に設置し、光ファイバーネットワークを介して中央処理装置に接続する。5Gモバイル等でも実装が進む中央集約型無線アクセスネットワーク(C-RAN)に類する構成であり、その機能として、適応的な給電セルの切り替えや、複数のセルを束ねた大きな仮想セルを構成することも可能である。リニアセル方式の実装

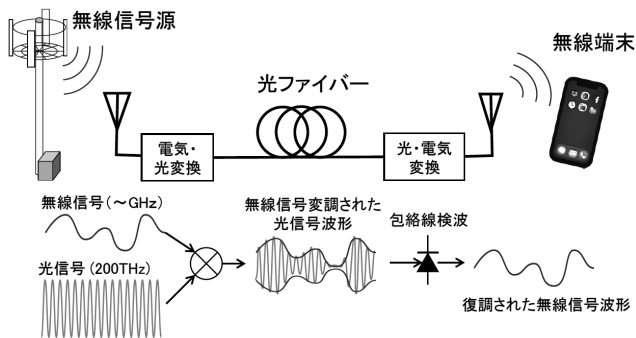


図2 光ファイバー無線 (RoF) 技術の概要

として様々な方式が考えられる。例えば、各リモート装置で信号処理を行い、デジタル光通信で各リモート装置の制御や信号集約をおこなう構成も既存システムの発展として容易に実装ができる。また、さらなるコスト最適化、高機能化を実現しうる方法として、例えば、中央処理装置内に信号発生部を集約し、光ファイバーネットワークにより信号をリモート装置群に分配・配送する構成もありうる。また、リモート装置群から信号処理部を廃して中央集約することもできる。つまり、中央部に高精度な信号源、高処理能力の計算機資源を集約することで、リモート装置を光電変換部・無線フロントエンド部のみで構成される「アンテナ」へ簡素化することができ、リモート装置群を多数配置しなければならない場合において、機能性を担保しつつシステムコストを低減させることが可能になる。加えて、中央集約型信号発生・収容により、各リモート装置へ配送する信号のコヒーレンス・同期性を高めることができ、従来方式では実現が難しい信号同期型システムが実現できる。

このコヒーレント^{*1}な信号配送を実現する技術の一つとして、光ファイバ無線技術（Radio over fiber: RoF）がある（図2）[1]。アナログ方式のRoF技術は広帯域かつ低損失な光ファイバーを同軸ケーブル様に用いる方式であるが、地デジ等の不感地対策としてすでに実用に供されている。送受信する信号を一旦アナログ・デジタル変換しパケットに収容して送受信を行うデジタルRoF技術は、モバイル通信基地局のアンテナ・信号処理装置間リンクとして実装されている。どちらも波長分割多重方式の採用により、1本の光ファイバーに複数信号を収容することができる。最先端光ファイバー通信システムの研究開発の進展により、光変調技術・復調技術の高速化が急速に進んでお

り、ミリ波帯信号の直接収容も実現されつつある。リニアセル方式と光ファイバー通信技術を融合させることで、ミリ波帯・テラヘルツ帯など伝搬距離の短い無線システムの実用化と高度化が進みつつある。

❖リニアセルレーダーシステム

リモート装置としてミリ波レーダーを採用したものがリニアセルレーダーシステムである[2]。ミリ波帯レーダーは前述のとおり、伝搬損失の影響から検知範囲が狭いことが問題であったが、RoF技術を用いた光ファイバーネットワークによるレーダー信号分配・収集システムを構築することにより検知範囲の拡大とリモート装置の低廉化を実現した。また、92～100GHzの周波数帯はレーダー等に利用可能であり、かつ、周波数帯域幅が8GHzと広いため、レーダー分解能の向上のみならず、その波長（およそ3mm）の短さから、1cm程度の異物検知も可能である。そこで、本技術の空港滑走路異物検知システム応用について検証した。

図3にミリ波帯リニアセルレーダーのシステムブロック図を示す。信号発生部および信号処理装置を中央集約とすることで滑走路脇設置レーダー装置の低廉化を図る。昨今の集積回路技術の進展による信号発生技術の高度化を勘案すれば、信号発生部をリモート装置側の実装し同期信号のみを配送することも現実的であろう。中央装置側で発生させた高精度信号をRoF技術により光ネットワークで配送し、リモート装置側では、受信した光信号を復調・再生することで高精度信号が得られる。その信号を適切な周波数変換・増幅後にアンテナより放射することでレーダー信号とする。受信時は、送信信号と混合して中間周波数帯に変換したレーダー信号をデジタルRoF技術により光ネットワークを介して戻し、複数のリモート装置の信

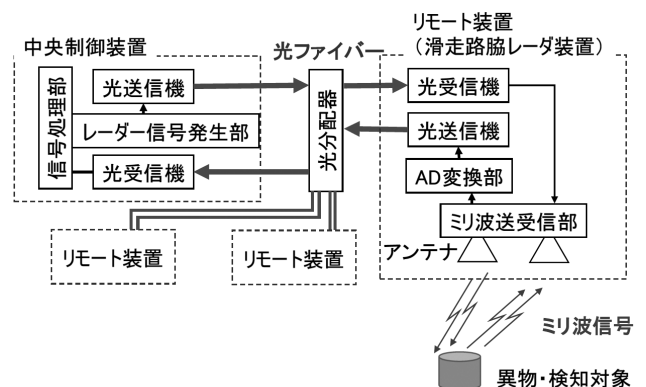


図3 ミリ波帯リニアセルレーダーのシステムブロック図

^{*1} 電磁波の位相が制御され揃っている状態

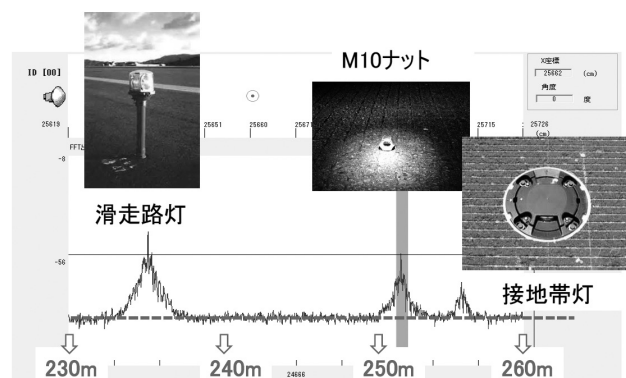


図4 リニアセルレーダーシステムによる滑走路上の物体検出例

号を中央信号処理装置で復調・解析することで、検知範囲を広げつつ高精度なレーダー異物検知が実現できる。開発した技術実証システムは、10秒以内に全周スキャンを完了することができ、500mの検知範囲をもつリモート装置を複数台連携させることでkmオーダーのカバーが実現できた。また、250m先に設置した5cm程度大の物体検知にも成功しており、空港滑走路脇に設置しフィールド実証試験を国内外で進めている(図4)。

❖リニアセルシステムの通信への応用

リニアセルの例として鉄道軌道は想像に難くない。鉄道向けの旅客用通信システムは複数あるものの、4Gモバイル通信の進展により、多くの旅客がスマホ等のモバイル機器を用いた通信を利用している。しかしながら、高速鉄道においては、モバイル通信基地局の切り替え時におけるハンドオーバー処理が通信断を引き起こし、モバイル通信の平均スループットは高く

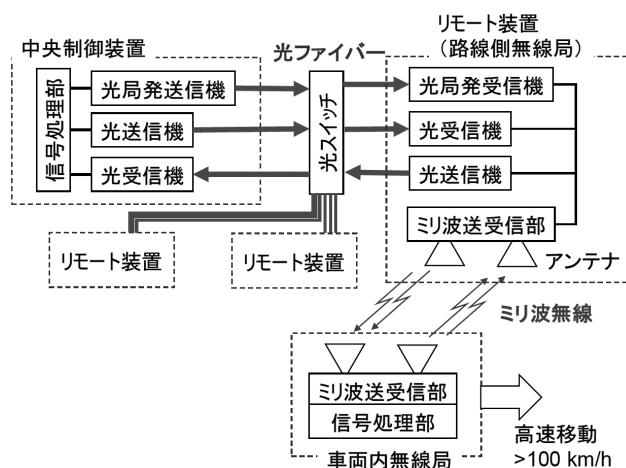


図5 鉄道向けリニアセル通信システムのブロック図

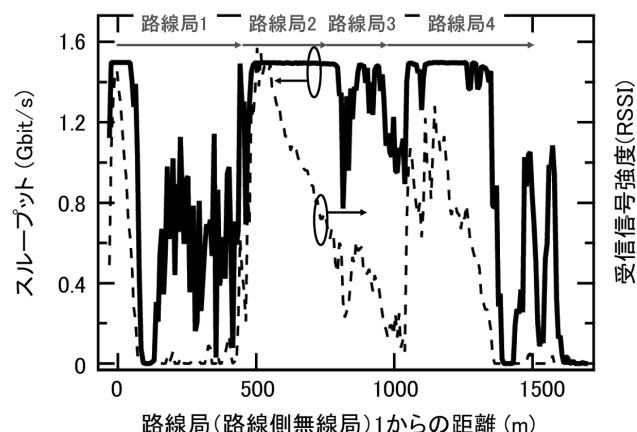


図6 時速240kmで通過する高速鉄道と光ファイバーネットワーク自動切替による車両追尾を行った路線側無線局群との接続スループットおよび受信信号強度(RSSI)曲線

ない。そこで、リニアセルシステムを応用したミリ波通信システムを検討した。給電セルの動的な切り替えでハンドオーバー処理を削減し、スループットの低下を防ぐ方式が実現可能である。鉄道では自車の速度・位置情報が指令所に中央集約されることが多いため、その情報を用いることで、セルの切り替えタイミングを自動処理することも可能である。

図5にシステムブロック図を示す。光ファイバーネットワーク中に設置した光スイッチを適時切り替えることで、信号配送するリモート装置を切り替える方式である。給電していない装置の信号放射を抑制することで、空間的な電波利用効率を高めることも可能である。フィールド試験システムにおいては周波数94.1~100GHzの帯域中に路線側設置局→車両局の「下り」信号と車両局→路線側設置局の「上り」信号を収容した。高速鉄道環境での信号伝搬揺動を鑑み、変復調方式として、シンボル速度250Mbaudを4波束ねた4値位相変調方式を採用した。実際に高速鉄道フィールドに本システムを設置し、時速240kmで移動する高速鉄道に対してピークレート1.5Gbit/s(4Kブルーレイ映画33GBを3分でダウンロード可能)の信号伝送を実証した(図6)[3]。

高周波化の展望とテラヘルツへの期待

一般的に無線システムの高周波化は高機能化につながるが多い。それは利用可能な周波数帯域幅の拡大のためであるが、電波法等の規制もあるため一概には言いづらい。レーダーシステム、特に自動車衝突防止センサにも用いられる周波数変調連続波(FM-CW)

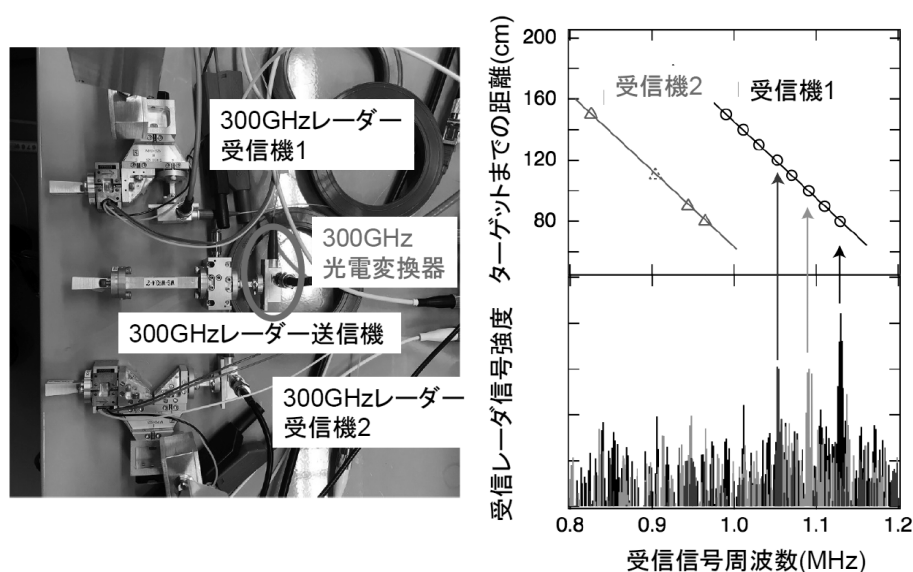


図7 300GHz帯バイスタティックレーダーの原理実証例

レーダー方式では、利用可能な周波数帯域幅がレーダー分解能(2つの物体が分離して検出できる分解能)に直結するため、高精度レーダーに広帯域化は欠かせない。一方、前述のとおり、高周波化により自由空間伝搬損失と大気減衰の双方が大きくなるため、電波到達距離が短くなる。本稿では92～100GHz帯を主に議論したが、法規制上、さらなる広帯域性を確保できる周波数としてD帯とよばれる110～170GHz帯があり、主に5Gモバイルの無線バックホール用通信システムの開発がすすんでいる[4]。

さらなる高周波化を行い、300GHz以上の周波数、テラヘルツ帯となるとその利害得失はさらに顕著となる。テラヘルツアンテナ・基地局の覆域は非常に小さくなるため、広域化にはリニアセルシステムや類するシステムが必要不可欠となる。光ファイバー通信技術に立脚するRoF技術は高周波信号と親和性が高い。最先端光送受信デバイス開発における周波数帯域の高周波化だけでなく、光ファイバーの伝送損失が小さいため、低周波から高周波にわたり損失の少ない信号フィーダーとしても利用できる。そのため、光技術を用いてテラヘルツ(300GHz)帯レーダーの開発や通信システムの原理実証等もなされている。テラヘルツ帯RoF技術の利用により、光周波数コム技術と高速光電変換器を組み合わせることで10GHz以上の帯域幅を有するレーダー信号の発生と受信が実証されている(図7)[5]。このレーダー装置をリニアセルレーダーシステムと同様に設置することで、さらなる高分解能化が実現できる。また、テラヘルツ通信においても、

上述の鉄道向け通信システムと同様の構成が実現しうる。セルは小さくなるもののテラヘルツの超広帯域性により、さらなる通信容量の拡大が見込め、高速鉄道に限らず鉄道システムにおける旅客用無線および業務用映像伝送システムへの応用が期待される。

まとめ

無線システムと光ファイバーネットワークを融合させたりニアセルシステムについて概説した。異物検知ミリ波レーダー装置と組み合わせることにより、検知性能を犠牲にすることなく空港滑走路のような広い検知範囲の実現とそ

の原理実証を実施した。また、動的な給電セル切り替え機能を用いることで、基地局があたかも「移動体に付随して動いている」ように振る舞いハンドオーバー処理による通信断を避ける方式も高速鉄道通信試験を通じて実証した。さらなる検知能力・通信性能の向上にむけたテラヘルツ帯適用も視野に入れた研究開発により、Society 5.0時代の高性能センシング・通信システムの実現が期待される。

謝辞

本研究開発は国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所電子航法研究所 米本成人氏、公益財団法人鉄道総合技術研究所 中村一城氏、川崎邦弘氏と共に総務省・電波資源拡大のための研究開発の一部として実施した。

【参考文献】

- [1] 菅野敦史, “信号波形のトランスパレント伝送技術,” NICTニュース, No. 460, pp.8-9 (2016).
- [2] 柴垣信彦, “ミリ波帯を使用した滑走路監視用レーダーシステムの概要と国際標準化活動,” ITU ジャーナル 2019年10月号(2019)
- [3] “世界初、90GHz帯を用いて時速240kmで走行する列車と地上間で毎秒1.5ギガビットのデータ伝送に成功,” NICTプレスリリース, 2019年1月29日.
- [4] ETSI GR mWT 008 v1.1.1 “millimetre Wave Transmission (mWT); Analysis of Spectrum, License Schemes and Network Scenario in D-band,” August 2018.
- [5] 菅野敦史, 関根徳彦, 笠松章史, 竇迫巖, 山本直克, 川西哲也, “光技術を用いるミリ波・テラヘルツ帯レーダー・イメージング技術,” 電子情報通信学会論文誌C, Vol. J100-C, No. 12, pp.597-607 (2017).