LCX(漏えい同軸ケーブル)を用いた無線 LAN システム

塚本悟司
侯 亜飛
鈴木文生
丹羽敦彦

Satoshi Tsukamoto (株) 国際電気通信基礎技術研究所
Yafei Hou 奈良先端科学技術大学院大学
Fumio Suzuki (株) フジクラ
Atsuhiko Niwa (株) フジクラ・ダイヤケーブル

1 はじめに

ICT(Information and Communications Technology, 情報通信技術)の利活用が盛んになり、無線 LAN (Wireless Local Area Network) の導入が進んだ結果、ビデオ会議や遠隔授業などの低遅延で安定した通信速度が要求され、これまで有線接続であった通信にも無線 LAN が使用されるケースが増加している。また、スマートフォンの普及により、移動中の車内や移動の待ち時間に、高精細画像の送信やリアルタイム動画の視聴など大容量の通信を行うケースも増加している。移動端末のネットワーク接続には、移動通信システムが広く使用されているが、近年はそのオフロード先としての無線 LAN の利用も増加傾向にある。その結果、図 1 に示すような商業施設や地下通路などの多数のユーザ端末が高密度に存在する場所では、通信に使用する無線リソースの不足による遅延増加や通信速度低下が顕在化しつつある。

複数のアンテナを用いて空間多重を行う MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output) は周波数利用効率を向上させて通信に必要な無線リソース量を削減する極めて有効な技術である。しかし、図 2 のような多くの端末が互いに LoS (Line of Sight, 見通し) 環境となる場所では、MIMO による空間多重度の低下や被干渉の増加により効果が得られにくい。これに対して、通常の MIMO 伝送を改良するための様々な技術が研究されており、例えば非線形 MIMO やマッシュアップ MIMO、マルチユーザ MIMO、分散協調 MIMO などがあるが、いずれも新たな信号処理の追加が必要である。

小セル化^{*1}も周波数の繰返し利用により面的に周波数利用効率を向上させる技術として有効である。しかし、小セル化を行うと端末の移動時にハンドオーバー頻度が増加し、このための制御通信により無線リソースが消費さ

れる。加えて、ハンドオーバー時の一時的な伝送停止による遅延や干渉セル数の増加も懸念される。

リニアセルは、アンテナを中心とした円形のオムニセルやその一部である扇形のセルとは異なり、線状あるいは帯状のセルで、セル形状を変えろというアプローチにより小セル化のメリットを得つつデメリットを克服する技術である。これは、5G に向けた技術の一つとしても検討されている。漏えい同軸ケーブル (LCX: Leaky Coaxial Cable) は、無線信号を伝送する同軸ケーブルの外部導体に多数の穴を空け、ここから電波を少量ずつ放射することで、ケーブルに沿ってリニアセルを形成する。本稿では、LCX を用いた無線 LAN システムとその MIMO 化について解説する。

図 1 LCX によるリニアセルのイメージ

図 2 LCX による通信エリア限定のイメージ

*1 一つの基地局の担当範囲であるセルを小さくすること。

2 LCX の構造

LCX は使用する周波数や用途により各種製品が市販されている。図3左のLCXは吊架して使用するためのステーワイヤが付属している外径29mmの製品で、携帯電話の不感地^{*2}対策にも使用されており、図右は5GHz帯無線LANで使用可能な外径7mm程度と細径なものである。このほか、東海道新幹線でのUHF帯列車無線に使用されている、外径約50mmで屋外での長期使用を前提とし十分な耐久性や耐候性を有するものなどがある。

LCXの構造は、図4に示すように、中心導体を誘電体でもある絶縁体で囲み、これに外部導体を縦添えし、更にプラスチック樹脂の絶縁被覆で覆った構造のものが広く使われている。また、軽量化のため中心導体を中空構造とするなど同軸ケーブルと同様の改良もなされている。外部導体には、周期的に配置したスロットと呼ぶ長孔が穿孔してあり、ここを波源として放射される各スロットからの電波が合成されて受信される。

3 LCX の利点と欠点

LCXではリニアセルを形成することなどにより、以

図3 外径29mm（左）と7mm（右）の市販LCX

図4 LCXの断面（左）と内部構造（右）

図5 オムニセル（左）、リニアセル（右）干渉エリア比較

下に列挙する利点がある。

- セルの長手方向への移動時には、同一セル面積のオムニセルに比べてより遠くまで同一セルが続いているため、ハンドオーバーの頻度を減らせる。
- 自セル内での平均的な被干渉セル数を低減できる。オムニセルでは、図5左に示すように周囲の複数のセルからの干渉を受ける範囲が広いが、リニアセルでは、図5右のようにセルの両端部を除けば、主に上下のセルからしか干渉を受けない。しかも、平行に配置されたリニアセル間では、セルの長手方向の移動に伴う干渉源との距離の変化が少ないことから、干渉電力の変化も少なくなり、移動時に干渉抑圧アルゴリズムが効果的に機能することが期待できる。
- 遮蔽される確率や遮蔽時の受信電力低下が少ない。アクセスポイント（AP）から端末（STA）までの伝送経路の一部がLCXにより有線化されることで、無線による空間伝搬となる区間を短縮できる。歩行者等の遮蔽物の密度が一定であると仮定すれば、遮蔽される確率は伝搬距離の減少に伴い低下する。また、STAではLCXの複数のスロットからの合成波を受信しており、一部のスロットからの波が遮蔽されても、残りのスロットからの直接波が到来するため、受信電力の低下が抑えられる。
- トンネル等では壁面等からの反射波の影響が生じにくいようLCXの結合損^{*3}を調整するなど、適切な回線設計を行うことでマルチパス^{*4}を減少させ、LCXと平行に移動する際の受信電力変動を抑制できる。
- モノポールアンテナ等ではマルチパス等により不明瞭になりやすいセル境界がLCXでは比較的明瞭である。
- 既存システムへの適用において、既存端末に改造等を加えることなくそのまま使用可能である。

このほか、非通信の利用ではDCや低周波信号を重畳させることが可能なため、通信と電源供給を同時に行う

ことや、LCXに沿ったエリアでの高精度な位置検出を行う研究⁽¹⁾も行われている。

一方、欠点は、ケーブル損や終端抵抗での電力消費により放射効率が低くなるほか、移設が容易でなく設置場所の自由度や

^{*3} LCXから遠ざかる方向（法線方向）に一定の距離を隔てて置いたアンテナとLCX間の減衰量であり、LCXから漏えいする電波の量を表す尺度として利用している。

^{*4} 地面や壁面等の反射により複数の電波伝搬経路が形成されることである。マルチパスにより伝搬経路の異なる波が合成されることで、フェージングや位相シフト、シンボル間干渉などが生じ、受信信号の品質に影響を与える要因となる。

^{*2} どの基地局からの電波も届かず、通信ができない場所のこと。

美観上の問題がある。最も大きな課題は、設置や維持のコストが素子型アンテナなどに比べて高く、セルの長さに応じて増加する点である。無線 LAN では IEEE802.11n 以降 MIMO が導入されているが、1 本の LCX をアンテナ素子 1 本相当として 2×2 MIMO を構成すると、適切な間隔を空けて 2 本の LCX 敷設が必要のためコストが倍増する。5 章では 1 本の LCX で 2×2 MIMO を実現する技術を紹介する。

4 LCX 放射波の偏波と指向性

LCX からの電波の放射について図 6 で説明する。座標は、LCX の長さ方向を X、LCX を軸とした周方向を Φ 、LCX からの法線方向を Y とする。S₁, S₂, S₃, S₄, … は、外部導体上に位置する細長い穴（スロット）であり X 方向に一定の間隔で並んでいる。スロット同士の間隔をピッチ P で示す。LCX でのケーブル内電磁波伝搬の基本的性質は同軸ケーブルと同様であり、電磁エネルギーを TEM 波として伝送する。ケーブル内部では中心導体表面から垂直に、誘電体を挟んで外部導体との間に電界が生じ、磁界は中心導体を軸に回転している。外部導体内面には、LCX の長さ方向に電流が流れるため、この外部導体の一部にスロットが存在することで、スロット内に電界が生じ電波が放射される。放射電波は図 6 上に示すように各スロットの放射波が合成されて強め合い、スロット間の位相差とスロット間隔 P により決まる指向性を持った波面として空間を伝搬する。この位相差は LCX 自体が遅延線路として作用することで生じており、各スロットが開口アンテナに相当する。図 6 下に概念図としてこれを示した。

図 6 に示した LCX ではスロット内の LCX の長さ方向に電界を生じるため、水平偏波を放射する。なお、ここでの水平偏波は LCX を水平、すなわち大地に対して平行に張った状態で電界が大地と水平になる方向であり、垂直偏波は電界が大地に垂直となる方向である。

一方、図 7 の LCX では同じ傾きとなるスロットの中間に、X 軸に対して逆方向に傾けたスロットがある。このように傾きの異なるスロットがジグザグに連なるパターンは、垂直偏波を放射する LCX に採用される。図 7 の下方に、X 方向の電流によって傾いたスロットに電界 E が生じるとした場合の、 Φ 方向の電界 E_φ と X 方向の電界 E_x に分解した各成分を示している。例えば、スロットピッチを高周波信号の LCX 内波長とほぼ同一と仮定すると、スロット S₂ ではスロットピッチの半分の位置にあるため隣り合うスロット S₁ や S₃ とは逆向きに瞬時電流が流れることになる。その結果、この図のスロット S₂ の X 方向の電界 E_x は両隣の電界と逆向きとなり

互いに打ち消し合う。これに対し Φ 方向の電界 E_φ は、これらのスロットで全て同相、すなわち図の例では下向きとなる。その結果、垂直偏波が放射される。

放射角 θ は、LCX の法線方向を 0 度として LCX の終端側を 90 度、給電側を -90 度として表す。この θ は、 ϵ_r を誘電体の比誘電率、 λ_0 を高周波信号の自由空間における波長、P をスロットピッチとし、LCX を基本モードで使用する場合には、次の式で表せる⁽²⁾。

$$\theta = \sin^{-1} \left(\sqrt{\epsilon_r} - \frac{\lambda_0}{P} \right) \quad (1)$$

$\theta = 0$ では共振状態となるため、これを避けて設計する必要があるものの、この式から、放射方向は LCX の設計パラメータである P や ϵ_r を適切に選ぶことで、比較的自由に変えられることが分かる。

一例として放射方向を変えるため試作した 2 種類の 5 GHz 帯用 LCX、Type 1 (P = 38 mm) と Type 2 (P = 29 mm) の指向性パターン測定結果を図 8 及び図 9 に示す。測定はターンテーブル上に LCX (長さ 3 m) を水平に置き、水平面を XY 面として LCX の長さ方向を X 軸、LCX から離れる方向を Y 軸とした。指向性パターンは X 軸に対して回転対称であることから XY 面での受信電力を偏波別に行った。LCX は図の左右方向に配置され、左側が給電点、右側が 50 Ω 終端部分である。測定周波数は 5.35 GHz で、最大値を 0 dB として正規化した。測定結果から、放射角はそれぞれ約 -20 度と約 -50 度であり、異なる放射角の垂直偏波 LCX が実現できている。

図 6 水平偏波用 LCX からの電波放射の模式図（上）と等価的な概念図（下）

図 7 垂直偏波用 LCX のスロット

図 8 LCX Type 1 の水平面内放射指向性

図 9 LCX Type 2 の水平面内放射指向性

LCX ではケーブルから離れる方向への距離が数 m 程度での通信を想定しており、ここでの受信電力はスロットの数や形状で調整するため、指向性についてはこれまでほとんど検討されていない。しかし、MIMO では独立した異なる伝搬路を得ることで空間多重を実現していることから、これに影響する指向性や偏波を制御することは、LCX においても重要である。

5 LCX に対する MIMO の適用

1 本の LCX を 1 本のアンテナとして、これを複数本使用することにより、LCX での MIMO が実現可能である。例えば、屋内通路の天井の両端近くに沿って配置した 2 本の LCX により MIMO が実現できることが実験により示されており⁽³⁾、鉄道の線路に沿って敷設された LCX と高速移動する列車内の端末との間で MIMO 通信を行うことを想定した研究結果も報告されている⁽⁴⁾。

しかし、MIMO の導入にあたり複数の LCX の敷設が必要のため、このコストを削減する技術が望まれている。この技術として、単一 LCX を 2 本のアンテナ相当として動作させ MIMO に必要な LCX の本数を半減させる手法と、敷設コスト低減のために複数の LCX を一体化させた複合ケーブルの製作を念頭に、LCX 間隔を $1/2 \lambda$ 以下に近接させた 2 本の LCX による MIMO の手法を紹介する。

図 10 単一 LCX での MIMO 構成

図 11 近接配置した LCX による MIMO 構成

(1) 単一 LCX による 2×2 MIMO

図 8 の結果から、給電点から見て手前約 20 度方向への放射が最も強い。また、逆側から給電した場合も同様に給電点の方に向けて放射される。図 10 に、これを利用して実現した単一 LCX による 2×2 MIMO の構成を示す。図中央にある LCX に右側 (Port1) から給電した信号は、矢印 a や a' の方向に放射され、左側 (Port2) からの信号は、これとは逆方向の b や b' の向きに放射される。加えてそれぞれ放射するスロットまでの LCX 内での伝搬により位相や振幅差が生じるため、結果として、それぞれ異なる伝搬路となることで 2×2 MIMO が実現できる。

(2) 近接した 2 本の LCX による 2×2 MIMO

図 8 と図 9 の結果から Type 1 と Type 2 ではどちらも垂直偏波であるが放射角が異なる。図 11 の構成では上側 LCX に左側 (Port1) から給電した信号は、LCX から垂直に近い矢印 a や a' の向きに放射され、下側 (Port2) の信号は、LCX に沿う水平に近い矢印 b や b' の向きに放射される。異なる伝搬路が生成されるので LCX を近接設置しても 2×2 MIMO が実現できる。

このほか、垂直と水平偏波 LCX の組み合わせによる MIMO も可能である。直交偏波^{*5} MIMO はマルチパスがなくても互いに分離が容易なため、市販の無線 LAN 製品などでの採用が多く、親和性の面から有効と考える。

単一 LCX による MIMO や放射角の異なる LCX による MIMO、直交偏波 LCX での MIMO を組み合わせる

*5 水平偏波と垂直偏波の組合せなど、互いに偏波面が 90 度異なる、すなわち直交する二つの直線偏波を同時に使用する MIMO のことである。

ことで、4本のLCXによる8×8 MIMOの実現も期待できる。

6 LCXによるMIMOの空間多重度

図10や図11の構成によりそれぞれMIMO効果が得られることを、測定した伝搬路行列から2×2 MIMOの性能指標となるCN (Condition Number, コンディショナンバ) を求めることにより確認した。図10や図11のa, a', b, b'の伝搬路値は、伝搬路行列Hの要素 h_{31} , h_{41} , h_{32} , h_{42} にそれぞれ対応している。CNはHに対して特異値分解を行い、特異値より得た二つの固有値の比をdBで表したもので、以下の式で表せる。

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{31} & h_{41} \\ h_{32} & h_{42} \end{pmatrix} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^* = \mathbf{U} \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} \mathbf{V}^*,$$

$$CN = 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} \right) \quad (2)$$

全長10mのType 1とType 2のLCXを電波暗室内に設置し、これと平行に設置したリニアレール上のスラ

図12 両側給電時のコンディショナンバ

図13 片側給電時のコンディショナンバ

イダに、LCXから0.5m離してモノポールアンテナを間隔1λで取り付けた。LCXが長さ方向に対して対称性があることから、測定範囲は中央(0m)からの片側の6mとした。5mまでがLCXの存在する範囲である。各LCXの両端とアンテナ2本をマルチポートのネットワークアナライザに接続し、アンテナをゆっくり移動させながら各伝搬路値を測定した。MIMOでは周囲からの反射波がない条件では空間相関が高まりCNの低下が大きいと考えられるので、電波吸収体をLCXの周囲に配置し直接波が支配的となる環境での評価とした。

伝搬路測定結果から求めた単一LCXでのMIMOのCNを図12に示す。5mの地点まで、測定範囲内の全ての周波数でCNがMIMOによる空間多重効果が十分得られるとされる10dB以下⁽⁵⁾となっている。また、図13は片側給電でのLCX2本によるMIMOのCNである。こちらも、ほぼ5mまでCNが10dB以下となっている。これらにより単一LCXや近接した2本のLCXによる2×2 MIMOが可能であることを確認した。

7 LCXのIEEE802.11nでの実測スループット

Type 1とType 2の2本のLCXを複合した試作LCXによる通信実験を行った。このLCXは市販のIEEE802.11n対応無線LANアクセスポイント(AP)と組み合わせて工事設計認証を得ている。図14のように鉄筋コンクリート造のビルの地階、通路幅約3m天井高約3mの廊下に、壁に沿って床から高さ0.8mの位置に長さ10mのLCXを設置した。USB接続の無線LAN端末(STA)をLCXと平行に置いたりニアレール上のスライダに、LCXから0.5mの距離となるように取り付けた。このSTAをLCXに沿って給電点より2.5m地点から6m地点間で0.1mごとに静止させ、ipref*⁶によりAP、STAそれぞれに有線接続したノートPC間

図14 スループット測定時のLCX配置

* 6 ネットワークの帯域測定等に使用される、スループット測定ソフトウェア。

図 15 地下通路での実測スループット

のスループットを測定した。なお、実験では本 AP での MCS (Modulation and Coding Scheme) の不適切な選択による影響を極力排除するため、使用可能な 4 種類の変調方式のうち 64QAM を使用しない設定で行った。図 15 に示したオムニアンテナのスループット(破線)は、場所により大きく変動し、4.75 m 地点では 1 本の LCX の SIMO によるスループット(細線)よりも低い。7.5 m 付近では良好であることから距離減衰ではなく反射波の影響によると推測できる。これに対し、複合ケーブル(太線)では比較的安定して MIMO が実現されていることが確認できる。

8 今後の展望

低遅延や常時接続は、高速大容量と並んで今後の通信の要求条件として重視されることが予想される。特に移動時の低遅延で安定した接続性の確保は、移動ロボットや自動運転車両等の移動体相互の情報交換などにも必須である。一方で、端末数の増加や高速大容量の要求にも対応する必要がある。これには、ヘテロロジニアスネットワークのように異なる特徴を持ったシステムを組み合わせるのが有効である。

高速大容量化では広い帯域の確保が可能なミリ波帯を使用する IEEE802.11ad も実用化の段階に入っている。ミリ波では、低速な移動でもドップラー周波数が高くなるためマルチパスが多い環境では通信速度の低下を招きやすく、電波の直進性が高いため遮蔽による影響も大きく出やすい。LCX を用いた低マイクロ波帯のシステムは、移動時の安定した接続性や遮蔽の影響を軽減できることから、ミリ波帯の無線システムと併用することで、その欠点を互いに補完するものとして有効な技術である。

謝辞 本稿にて紹介した内容の一部は、総務省の戦略的情報通信研究開発推進事業 (SCOPE) 課題番号 135007001 により実施したものである。

■ 文献

- (1) T. Higashino, M. Okada, T. Maeda, and S. Tsukamoto, "Position location using OFDM signal in LCX linear cell MIMO system," Proc. Intl. Conf. on CSEE 2014, pp.203–206, March 2014.
- (2) 岸本利彦, 佐々木伸, LCX 通信システム, 電子通信学会, 東京, Aug. 1982.
- (3) J. Medbo, and A. Nilsson, "Leaky coaxial cable MIMO performance in an indoor office environment," Proc. IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2012), pp.2061–2066, Sept. 2012. DOI:10.1109/PIMRC.2012.6362694
- (4) 川合裕之, 北尾光司郎, 今井哲郎, "LCX を用いた列車内 MIMO スループット特性の一検討," 信学技報, AP2011-172, pp.147–152, Jan. 2012.
- (5) "LTE テストにおける MIMO 性能とコンディション・ナンバー," アジレント社 Application Note, 5990-4759JAJ, Feb., 2010.

塚本 悟司 (正員)

平 3 電機大・工 2 部・電子卒。民間企業を経て平 9 (株) サイバネテック入社。第三世代移動体通信向け実験機開発に従事。平 17 (株) 国際電気通信基礎技術研究所入社。以来、信号処理、MIMO 伝送、ESPAR アンテナの研究に従事。現在、同社主幹研究員。博士 (工学)。URSI-C 小委員会委員、IEEE 会員。

侯 亜飛 (正員)

平 11 中国安徽工程大・工・電子卒。平 19 高知工科大学大学院博士後期課程了。平 19 龍谷大博士研究員。平 22 (株) 国際電気通信基礎技術研究所入社。平 26 奈良先端科学技術大学院大学特任助教。現在、同助教。OFDM、空間多重、MIMO 伝送、信号処理技術の研究に従事。博士 (工学)、理博。IEEE シニア会員。

鈴木 文生 (正員)

昭 52 埼玉大・工・電気卒。昭 54 同大学院修士了。同年藤倉電線 (株) (現 (株) フジクラ) 入社。以来、光ファイバ型部品、漏えい同軸ケーブルの開発に従事。現在、同社メタルケーブル・機器開発部グループ長。

丹羽 敦彦

平 10 埼玉大・工・機能材料卒。平 12 同大学院修士了。同年 (株) フジクラ入社。平 28 (株) フジクラ・ダイヤケーブル出向。現在、同社技術部係長。光ファイバ型部品及び漏えい同軸ケーブルの開発、通信ケーブルの設計に従事。