位置情報を用いた漏洩同軸ケーブルスロットの開閉による空間変調の容量拡 大の研究

| 代表研究者 | 侯 | | 亜 | 飛 | 尚 | 山大学 | 大学院自然科学研究科 | 助教 |
|-------|---|---|---|---|---|-----|------------|----|
| 共同研究者 | 田 | 野 | | 哲 | 畄 | 山大学 | 大学院自然科学研究科 | 教授 |

1 はじめに

駅・地下街・大規模商業施設等の多数のユーザが密集する環境に適した通信方式として、従来の小セル化よりも空間多重度を高めることができ、かつ電波不感地帯が少ないリニアセル方式が期待されている.漏洩同軸ケーブル(LCX)は地下街等の携帯電話の不感地帯対策や新幹線車内インターネット接続サービスでの地上-車両間回線等に既に使用されている.LCXを用いたリニアセルにおいて通信容量を増加させるにはLCXの増設が必要となり、その際の敷設コストや設置スペースの制約が大きな問題となっている.一方、LCXはスロット数目が多くなり、スロットの開閉で空間変調[1,2]による通信容量が増加できて、設置スペースの制約へも解消できる[3-6].本研究調査では、LCXを使用する環境において、位置推定方法とLCXに付いた数目が何百個があるスロットの開閉による空間変調を提案し、研究する.

2 漏洩同軸ケーブル(LCX)の構造及び指向性と LCX 空間変調提案法

2-1 漏洩同軸ケーブル(LCX)の構造と放射波指向性と伝搬路モデル

漏洩同軸ケーブル(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 の穴をあけ、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.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.LCX の様々な製品があり、携帯電話の不感地対策に 使用されている.また、東海道新幹線でのUHF帯列車無線にも使用されている.LCX の構造は、図 1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は合成されて受信される.



外部導体

図 1 LCX の内部構造

LCX では細長い環境というリニアセルを形成することなどにより、多い利点がある.例えば、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くため、ハンドオーバ の頻度を減らせる.また、自セル内での平均的な被干渉セル数を低減できる.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.さなに、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 搬となる区間を短くでき、遮蔽される確率は伝搬距離に依存するため減少する、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いるので、いくつかのスロットからの波が遮蔽されても、残りのスロッ トから直接波が到来するので、受信電力の低下が抑えられる.

LCX からの電波の放射について図 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,図に概念図としてこれを示した.



図2LCXからの電波放射の模式図(水平偏波(左)垂直偏波(右))

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.

受信側の LCX 電波路モデル H[7]を図 3 に示す. 伝搬路は見通しの直接波 h_{LOS} と反射波 h_{LOS} を構成する. それぞれ以下の式に示す.

$$H = h_{LOS} + h_{NLOS}$$
$$h_{LOS} = \sum_{i=1}^{M} \alpha_i \sqrt{P_l(r_i) \cdot E(\theta_i)} \cdot e^{-j(k_0 r_i + \beta_i)}$$
$$h_{NLOS} = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} \alpha_i \sqrt{P_l(r_{ij} + r'_{ij}) \cdot E(\theta_i)} \cdot e^{-j\left[k_0\left(r_{ij} + r'_{ij}\right) + \beta_i\right]}$$



図 3 LCX 電波路モデル

ここでは、 α_i は送信側からスロット 0_i までの振幅減衰である. P(x)とE(x)は経路の電力減衰とケーブル放射 角度による電力利得である. M と N はスロット数と散乱体数を表す. k_0 は自由空間における電波の伝搬定数 である. β_i は送信側からスロット 0_i まで位相変化を表す.

2-2 LCX 空間変調提案法

提案する空間変調手法を図4 に示す.空間変調ビットC2 から,このビットを表示するチャネルパターンhを形成するために,送受信両方で既知な特定のスロット開閉(1/0)パターンを制御し,変調ビットC1 と



ともに送信する. 受信側で推定されたチャネルh から空間変調ビットC2 を復調できる. また, 通 常と同様に変調ビットC1 を復調する.

図4 より,M 個のスロットからK 個を選択 すると、チャネルパターンの数目が $C(M,K) = \binom{M}{K}$ である.空間変調ビット数 $B(2^{B} \leq C(M,K))$ を表示できる信号空間ダイアグラムを構成するために、C(M,K)から 2^{B} 個チャネルパターン集合 $H_{set}: \{H_{1}, \ldots, H_{2}^{B}\}$ が適切に選ばれることが必要で

ある.ここで、H_{set}の最小ユークリッド距離 d_{min} が下記の式のように表される.

$$d_{min} = \frac{min_{i,j,i\neq j} \{ \left| H_i - H_j \right|_2^2 \}}{\frac{1}{2^B} \sum_{i=1}^{2^B} |H_i|_2^2}$$

3 LCX 空間変調のチャネルパターン選択法の評価

空間変調システムの誤り率など特性は空間変調に使わ れるチャネルパターン集合の最小ユークリッド距離 dmin と 関係がある.従って、膨大なチャネルパターンから最大 d_{\min} を持つ最適な 2^{B} チャネルパター集合 H_{set} を選定するこ とは提案した LCX 空間変調の鍵である.本研究では、ラン ダム選択 (RS: Random Selection) と遺伝アルゴリズム (GA: genetic algorithm) [8] 二つ選択手法を提案し、評価した.

3-1 ランダム選択 (RS) による最適なチャネルパター選定 法の評価

RS 手法はその名に示されているように空間変調ビット 数 B に対して、ランダムに膨大なチャネルパターンから2 ^Bチャネルパター H_i (*i*=1, ..., 2^B)を生成し, d_{\min} を計算する. こ のプロセスを繰り返して実行し、最大 dmin がある 2^Bチャネル パター集合 H_{set} を固める. 繰り返し回数を増やすことで良い Hset を探し当てる. この提案に対して, LCX に付いた数目が百 個以上あるスロットの開閉による空間変調パターンの正規化 した最小ユークリッド距離 dmin を評価した. シミュレーショ ン環境と諸元を表1と図5に示す.

長さが 10m である LCX (2.4GHz, 126 個のスロット) を配置 する環境をシミュレーションした. 受信機の位置を LCX に沿 って変更して,複数位置(LCX 中心は(0,0)座標とする)の dmin を調べた.空間変調ビットは2,4,6,8,10 と変化させて、反射 波無しとあるシミュレーション環境とし,半分の 63 スロット の開閉を変調する LCX 空間変調システムを評価した. 各空間 変調ビットBに対して、10 万回繰り返し,最後に一番大きな dminを持つ Hset が信号空間ダイアグラムとなる.

表1:シミュレーション諸元

| 空間サイズ (<i>H,W,L</i>) [m] | $3 \times 5 \times 10$ |
|----------------------------|------------------------|
| LCX 長さ [m] | 10 |
| スロット周期 [m] | 0.08 |
| LCX の波長短縮係数 | 0.6403 |
| LCX の最大放射角度 [deg] | θ =18 |
| ケーブル損失 [dB/m] | 0.6 |
| 観察周波数帯域幅 | 76.25 |
| 観察周波数間隔 [KHz] | 312.5 |
| 散乱体数(N) | 0, 10 |
| 受信アンテナ高さ [m] | 1.5 |



反射波無しとありの環境における評価した提案法結果を図6に示す.結果によると、ビット数を大きく すると距離は小さくなることが分かる.LCX のスロット開閉による空間変調手法の有効性を明らかにした. また、反射波有無、位置変動は dmin 特性に大きい影響がないことも分かった.



図 6 特定位置において RS 手法で空間変調信号空間の最大 d_{min}(左:N = 0, 右:N = 10)

3-2 遺伝的アルゴリズム(GA)による最適なチャネルパター選定法の評価

生物の適応進化に関する計算手法であり、最適化問題の解法として注目されている GA を利用し、繰り返して、適切かつ良いスロット(良い遺伝子)を探し出すことで、最適 SM チャネルパターンを選択法を提案した. 図 7 と図 8 には、GA 手法による LCX のスロット選択法と処理流れを示す.





提案した遺伝的アルゴリズムは以下の流れで実装される。なお、下記では個体数を n_d ,最大世代数をGと置く.各個体にLCXの全スロットOn/Off情報が収容される.また,あらかじめ n_d 個の個体が入る集合を二つ用意する。以下、この二つの集合を「現世代」、「次世代」と呼ぶことにする.

図 7 と図 8 のように、まず、現世代に n_d 個の個体をランダムに 0n/0ff 情報を生成する. そして、各個体 $0 d_{\min}$ を評価関数により、現世代の各個体の適応度をそれぞれ計算する. 適応度 wの数値は d_{\min} と正比例す る、また $\sum_{i=1}^{n_d} w_i = 1$. そして、適応度数値による降顺并べる n_d 個の個体を二つ数目が等しいグループにする.

次に、順番に、グループ A とグループ B からそれぞれ一つ個体を取り、ある確率pで一部スロットの 0n/0ff 情報を交叉と変異の動作のどれかを行い、その結果を次世代に保存する.また、次世代の個体数が n_d 個になるまで上記の動作を繰り返す.

更に,次世代の個体数がn_d個になったら次世代の内容を全て現世代に移す.

以降の動作を最大世代数 G 回まで繰り返し、最終的に「現世代」の中で最も適応度w_iまた d_{min}の高い個体を「解」として出力する.

反射波あるシミュレーション環境と諸元は表1と図5と同じになる. 図9と図10には位置(x, y)が(9m, 3m)で ある受信側に提案したGA手法による dmin の収束特性を示す. 横軸と縦軸は繰り返しの回数と dmin の変動を表 す. また, SMビットはそれぞれ2,4,6と8を変動し,確率pが三種類0.2,0.5また0.8でシミュレーショ ンが行った. 図9と図10にしめした結果から見ると、GAによるスロット 0n/0ff 状態を決める手法がRS方法より 大きい dminを持つHset ができることが分かった.また,確率pの数値も dmin の収束特性に大きい影響があり,適切 な確率pを設定が必要である.特にSMビットが6以上としたら、GAの交叉と変異動作の頻度が多ければ多く 程,多く dminを改善できる.その原因は、SMビットを増えると、多い良いスロット(良い遺伝子)を探し出 す必要のため、交叉と変異動作の頻度が多くなれば良いかと推測される.

表 2-4 には様様受信位置において RS 手法と GA 手法で取った *d*_{min}の比較結果である.この結果により, RS 手法と比べて, GA 手法の有効性が分かった.特に, SM ビットが高い場合, GA 手法の改善レベルが大きい という結論が得られる.



表 2: RS 方法と GA 方法の dmin 比較

| SM | (x, y) = (1, 1) [m] | | | | (x, y) = (1, 3) [m] | | | |
|-----|---------------------|----------------|----------------|----------------|---------------------|---------|----------------|----------------|
| ビット | RS 法 | | GA 法 | | RS 法 | GA 法 | | |
| | | <i>p</i> = 0.2 | <i>p</i> = 0.5 | <i>p</i> = 0.8 | | p = 0.2 | <i>p</i> = 0.5 | <i>p</i> = 0.8 |
| 2 | 1.404 | 1.429 | 1.440 | 1.434 | 1.364 | 1.421 | 1.435 | 1.418 |
| 4 | 0.361 | 0.540 | 0.549 | 0.590 | 0.268 | 0.472 | 0.519 | 0.546 |
| 6 | 0.089 | 0.154 | 0.162 | 0.207 | 0.098 | 0.144 | 0.158 | 0.217 |
| 8 | 0.022 | 0.032 | 0.032 | 0.061 | 0.017 | 0.035 | 0.031 | 0.040 |

表3:RS 方法とGA 方法の dmin 比較

| SM | (x, y) = (5, 1) [m] | | | | (x, y) = (5, 3) [m] | | | |
|-----|---------------------|----------------|---------|---------|---------------------|---------|---------|---------|
| ビット | RS 法 | | GA 法 | | RS 法 | GA 法 | | |
| | | <i>p</i> = 0.2 | p = 0.5 | p = 0.8 | | p = 0.2 | p = 0.5 | p = 0.8 |
| 2 | 1.384 | 1.441 | 1.444 | 1.452 | 1.378 | 1.428 | 1.429 | 1.415 |
| 4 | 0.431 | 0.531 | 0.543 | 0.570 | 0.386 | 0.521 | 0.551 | 0.571 |
| 6 | 0.111 | 0.169 | 0.158 | 0.229 | 0.092 | 0.130 | 0.176 | 0.203 |
| 8 | 0.031 | 0.039 | 0.037 | 0.065 | 0.020 | 0.033 | 0.036 | 0.045 |

表4:RS 方法とGA 方法の dmin 比較

| SM | (x, y) = (9, 1) [m] | | | | (x, y) = (9, 3) [m] | | | |
|-----|---------------------|----------------|----------------|----------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| ビット | RS 法 | | GA 法 | | RS 法 | GA 法 | | |
| | | <i>p</i> = 0.2 | <i>p</i> = 0.5 | <i>p</i> = 0.8 | | <i>p</i> = 0.2 | <i>p</i> = 0.5 | <i>p</i> = 0.8 |
| 2 | 1.418 | 1.435 | 1.424 | 1.441 | 1.386 | 1.443 | 1.435 | 1.432 |
| 4 | 0.372 | 0.545 | 0.509 | 0.549 | 0.215 | 0.517 | 0.544 | 0.569 |
| 6 | 0.100 | 0.141 | 0.146 | 0.205 | 0.115 | 0.144 | 0.194 | 0.203 |
| 8 | 0.026 | 0.037 | 0.038 | 0.056 | 0.029 | 0.040 | 0.042 | 0.063 |

4. 結論

本研究では、漏洩同軸ケーブル (LCX) に付いた数目が何百個があるスロットの開閉による空間変調のシス テムを提案した。また、空間変調システムの誤り率など特性は空間変調に使われるチャネルパターン集合の 最小ユークリッド距離 *d*_{min} と最大 *d*_{min} を持つ最適な 2^{*B*} チャネルパター集合 *H*_{set} を選定することには、ランダ ム選択 (RS: Random Selection) と遺伝アルゴリズム (GA: genetic algorithm) 二つ選択手法を提案し、評価した. 今後の課題について、LCX のスロット数目が多すぎ、開閉パターン数が指数的に増える.空間変調容量に関 する関係式の確立が非常に難しくなる.また、端末の位置推定誤差が提案空間変調システムの容量に何か影 響があるか、どのような手法で影響の減少かなど、今後の課題となり、検討している.

【参考文献】

- M. Wen, B. Zheng, J. K. Kim, M. D. Renzo, "A survey on spatial modulation in emerging wireless systems: Resarch progresses and applications," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 37, no. 9, pp. 1949–1972, Sept. 2019.
- [2] M. Di Renzo, H. Haas, A. Ghrayeb, S. Sugiura and L. Hanzo, "Spatial Modulation for Generalized MIMO: Challenges, Opportunities, and Implementation," Proceedings of the IEEE, vol. 102, no. 1, pp. 56-103, Jan. 2014.
- [3] Y. Hou, S. Tsukamoto, S. Li, T. Higashino, K. Kobayashi and M. Okada, "Capacity evaluation of MIMO channel with one leaky coaxial cable used as two antennas over linear-cell environments," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 66, no. 6, pp. 4636–4646, June. 2017.
- [4] N. Nakamura, H. Tsunomachi, R. Fukui, "Road vehicle communication system for vehicle control using leaky coaxial cable," IEEE Communications Magazine, vol. 34, no. 10, pp. 84–89, Oct. 1996.
- [5] J. W. Huang, K. K. Mei, "Theory and analysis of leaky coaxial cables with periodic slots," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 49, no. 12, pp. 1723–1732, Dec. 2001.
- [6] Junjie Zhu, Yafei Hou, Kenta Nagayama, Satoshi Denno, "Capacity loss from localization error in MIMO channel using leaky coaxial cable," IEEE Access, vol. 9, pp. 15929–15938, 2021.
- [7] K. Zhang, F. Zhang, G. Zheng, A. Saleem, "GBSB model for MIMO channel using leaky coaxial cables in tunnel," IEEE Access, vol. 7, pp. 67646-67655, 2019.
- [8] K. F. Man, K. S. Tang and S. Kwong, "Genetic algorithms; concepts and applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 43, no. 5, pp. 519-534, Oct. 1996.

| 題名 | 掲載誌・学会名等 | 発表年月 |
|--|---|-------------|
| LCX のスロット開閉による空間変調の提案 | 2021年電子情報通信学会ソサイエティ大会 | 2021年9月 |
| Prediction evaluation for RSSI data | 2022 IEEE International Conference on | 2022 年 1 月 |
| generated from leaky coaxial cables over | Consumer Electronics (ICCE 2022) | |
| indoor environment | | |
| Two-dimensional RSSI-based indoor | IEEE Access, vol. 10, pp. 21109–21119, | 2022 年 1 月 |
| localization using multiple leaky coaxial | 2022 | |
| cables with a probabilistic neural network | | |
| A proposal of spatial modulation using | IEEE 4th Global Conference on Life | 2022 年 2 日 |
| on/off the slots of leaky coaxial cable | Sciences and Technologies (LifeTech 2022) | 2022 年 3 月 |
| Genetic algorithm based channel pattern | Submitted to 25th International | 2022 年 10 月 |
| Selection for spatial modulation using slots | Symposium on Wireless Personal | |
| of leaky coaxial cable | Multimedia Communications (WPMC'22) | |

〈発表資料〉