

# 高速移動体通信対応 大容量LCX無線通信技術

大橋章範\* 石津文雄\*  
西本 浩\*\* 田中謙一郎\*\*\*  
岡崎彰浩\* 坏 浩行\*\*\*

High-Data Rate Leaky Coaxial Cable Communication Technologies for High-speed Vehicles

Akinori Ohashi, Hiroshi Nishimoto, Akihiro Okazaki, Fumio Ishizu, Kenichiro Tanaka, Hiroyuki Akutsu

## 要 旨

漏洩(ろうえい)同軸ケーブル(Leaky CoaXial cable : LCX)無線通信は高品質な通信を実現するシステムであり、列車無線、高速道路等の移動体通信に用いられている。

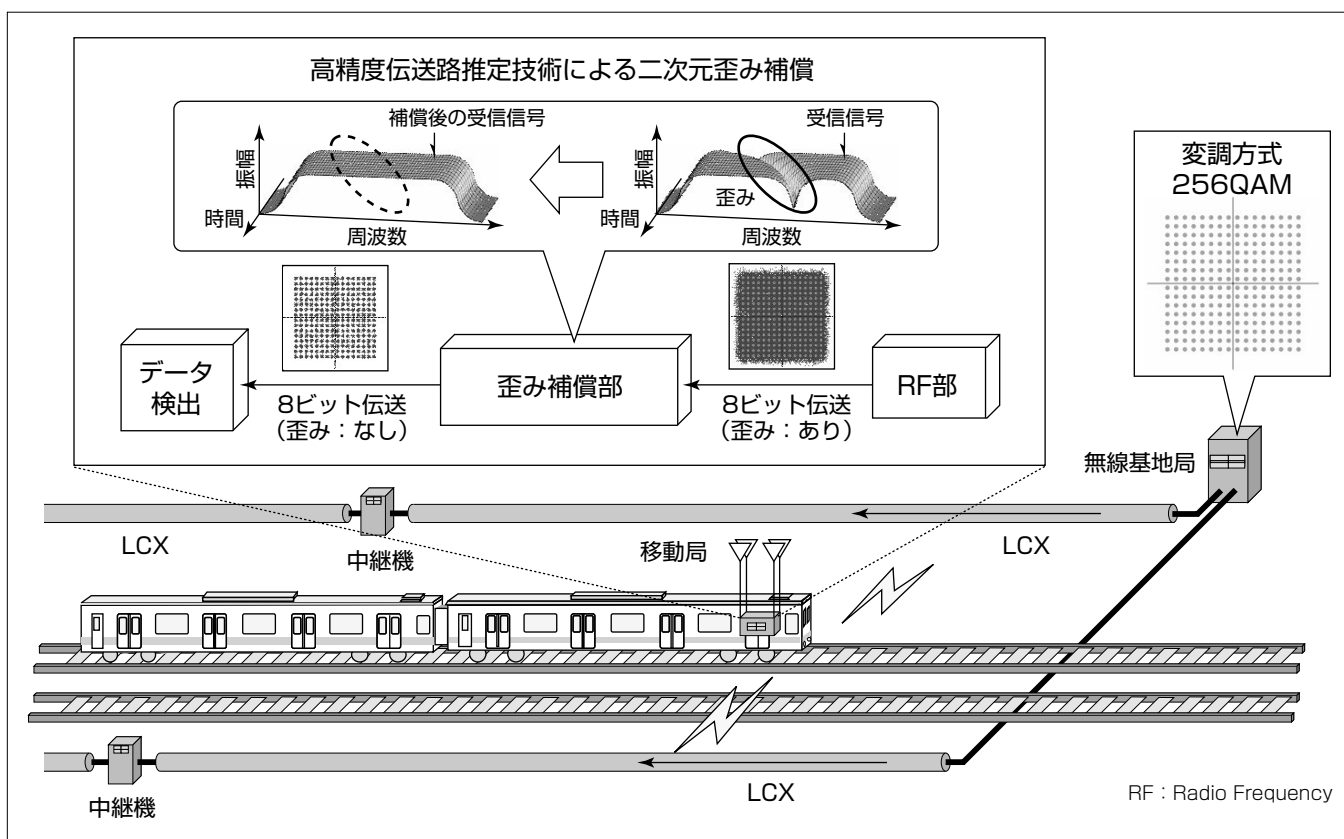
現在、これらのサービスの多様化に伴い、LCXシステムの大容量化が求められている。しかし、LCXシステムでは、十分な受信強度が得られるが利用できる周波数が限られているという制約があり、大容量化には周波数利用効率の向上が必要である。

三菱電機は、低演算量で高速移動体通信に対応する高精度伝送路推定技術を確立した。これによって、多値変調(256QAM(Quadrature Amplitude Modulation))を用いたLCX無線通信技術を開発し、高速移動体通信対応LCXシステムで世界最高水準の周波数利用効率4.3bps/Hzを実現

した。

また、LCXシステムの更なる大容量化、高信頼化を図る将来技術として、次の要素技術を開発した。

- (1) LCX-MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)技術  
複数の送受信アンテナを用いた大容量化技術
  - (2) 高効率多値化技術  
ピーク電力を低減するSC(Single-Carrier)ブロック伝送技術
  - (3) 一般化階層変調技術  
高信頼回線と大容量回線を同時に実現する変調技術
- 本稿では、大容量LCX無線通信技術と、更なる大容量化・高信頼化を図る将来技術について述べる。



## 高速移動体通信対応大容量LCX無線通信システム

移動局の両側に敷設されたLCXを用いて無線基地局と移動局間で無線通信するLCX無線通信システムの構成を示す。この構成は、無線基地局から移動局への下り通信を示しており、無線基地局から送信された256QAM変調信号はLCXを介して移動局で受信される。移動局では復調する際に受信信号の時間、周波数の二次元歪(ひず)みを補償する。歪み補償には、新たに開発した高精度伝送路推定技術を用い、最小自乗フィルタによって時間、周波数の二次元歪みを高精度に推定する。これによって、256QAM変調信号による大容量無線通信が可能となる。

1. ま え が き

漏洩同軸ケーブル(LCX)無線通信の多様化に伴い、LCXシステムの大容量化が求められている。しかし、LCXシステムでは、十分な電界が得られるが利用できる周波数が限られているという課題があり、大容量化には周波数利用効率の向上が必要である。

本稿では、新たに開発した大容量LCX無線通信技術と、更なる大容量化・高信頼化を図る将来技術について述べる。

2. LCX無線通信システム

LCX無線通信システムは、主に無線基地局、移動局、中継機で構成し、敷設したLCXを介して、その区間内を移動する移動局と区間内に設置する無線基地局との間で通信を行う<sup>(1)</sup>。LCX無線通信システムの利点は、LCX周辺を通信エリアとすることから次元移動する移動局との無線通信に適しており、安定した通信が可能である。現在、この利点を活用して、列車無線や、高速道路等にLCX無線通信システムが用いられている。

3. 大容量LCX無線通信技術

一般的な無線通信では、反射波が存在すると周波数歪みが発生する。さらに、この環境で無線機が移動すると、移動速度に比例して信号が変動し、時間・周波数の二次元歪みが生じる。そのため、高速移動時での大容量通信を実現するためには、この二次元歪みを高精度に補償する必要がある。

この課題を解決するため、高速な時間変動に対応し、周波数歪みを高精度に推定可能な伝送路推定技術<sup>(2)</sup>を開発した。

3.1 高精度伝送路推定技術

図1に高精度伝送路推定における歪み補償方法を示す。受信局では、受信信号から分散配置されたパイロット信号だけを抽出し、送信局と受信局間で発生した歪みをパイロット信号の変化量から算出する。この歪み情報は時間、周波数方向の離散データであるため、パイロット信号以外の受信信号に対する歪みを補間する必要がある。

一般的な補間方法として線形補間があるが、大容量化を実現するためには、平均2乗誤差を最小化する二次元MMSE(Minimum Mean Square Error)フィルタが有効である。二次元MMSEフィルタは伝送路パラメータである正規化ドップラー周波数、最大遅延サンプル数、平均信号受信電力対雑音電力比(Signal-to-Noise power Ratio: SNR)を用いて設計する<sup>(3)</sup>。一方、移動体通信では、これらの伝送路パラメータは環境によって変動するため、最適なフィルタ係数算出が困難である。この解決策として、あらかじめ複数の伝送路を想定し、伝送路パラメータ推定と

伝送路推定を同時に実現する伝送路推定方式を開発した。これによって、リアルタイムにおけるフィルタ係数算出が不要となり、従来の二次元MMSEフィルタによる伝送路推定よりも約1/100に演算量を削減した<sup>(2)</sup>。

3.2 推定精度

図2に伝送路推定の平均2乗誤差(Mean Square Error: MSE)特性を示す。この特性は、計算機によって、正規化ドップラー周波数0.50%の移動環境で評価した。提案方式は、従来方式である線形補間と比較して大きく特性を改善し、理想特性(MMSE)に近い推定精度を達成している。

3.3 伝送実験

高精度伝送路推定技術を搭載したOFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)無線通信試作機を開発し、伝送実験によって実現性を検証した。

表1に伝送実験の諸元、図3に伝送実験系の構成を示す。試作機のデジタル信号処理部は、FPGA(Field Programmable Gate Array)に実装した。変調方式には多値変調(256QAM)を用いた。また、高速移動に伴う時間、周波数の二次元歪みはフェージングシミュレータによって模擬した。

図4に、正規化ドップラー周波数対ビット誤り率特性の伝送実験結果を示す。正規化ドップラー周波数はRF周波

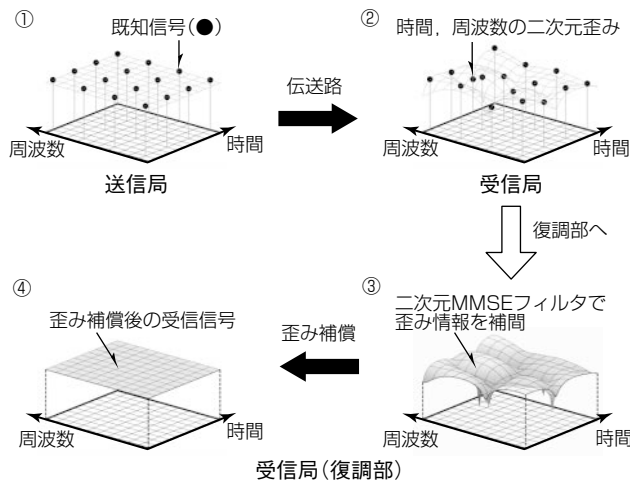


図1. 高精度伝送路推定技術による歪み補償方法

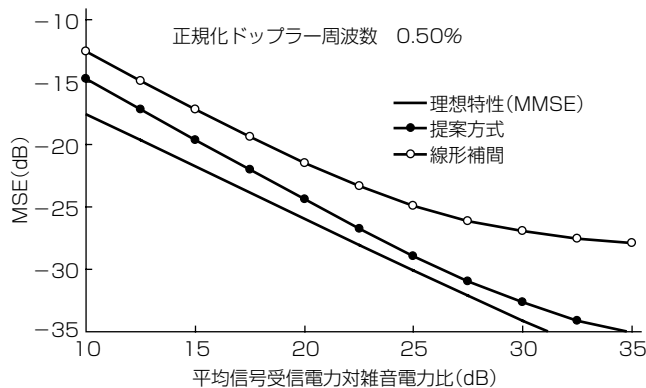


図2. 伝送路推定MSE特性

表 1. 伝送実験の諸元

項目	諸元
変調方式	256QAM
伝送方式	OFDM
誤り訂正符号	ターボ符号(符号化率: 3/4)
フレーム利用効率	72%
アンテナ構成	1送信, 4受信
周波数利用効率	4.3bps/Hz

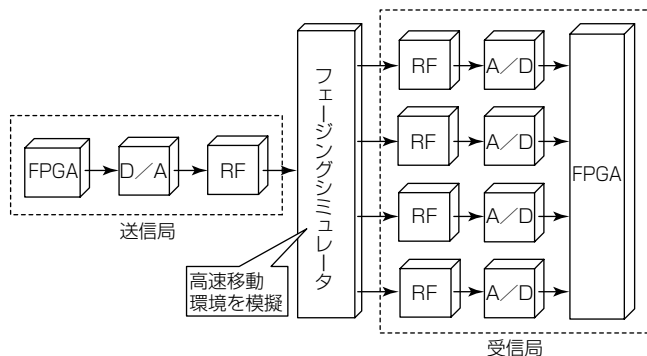


図 3. 伝送実験系の構成

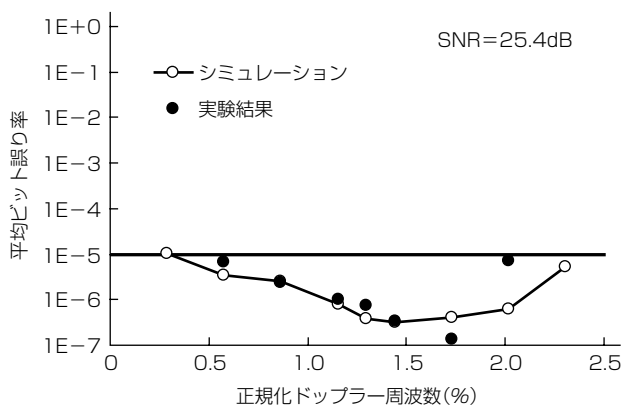


図 4. 正規化ドップラー周波数対平均ビット誤り率特性

数, 移動速度, シンボル周期によって決定される伝送路パラメータであり, RF周波数500MHz, 移動速度500km/h, シンボル周期50 $\mu$ sの場合, 正規化ドップラー周波数は約1.16%である。実験結果から, 正規化ドップラー周波数2.0%の高速移動環境まで高精度な歪みを補償でき, 平均ビット誤り率 $10^{-5}$ 以下を達成した。これによって, 周波数利用効率4.3bps/Hzを実現できることを実証した。

#### 4. LCX無線通信の将来技術

この章では, LCX無線通信で, 更なる大容量化と高信頼化を図る将来技術について述べる。

##### 4.1 LCX-MIMO技術

無線通信の大容量化技術として, 送受信に複数のアンテナを備え, 空間資源を有効利用するMIMO技術<sup>(4)</sup>がある。図5に, 4本のLCXから異なる信号を送信する4多重のLCX-MIMO伝送システムの構成を示す。

図6に, LCX-MIMO技術における周波数利用効率を示

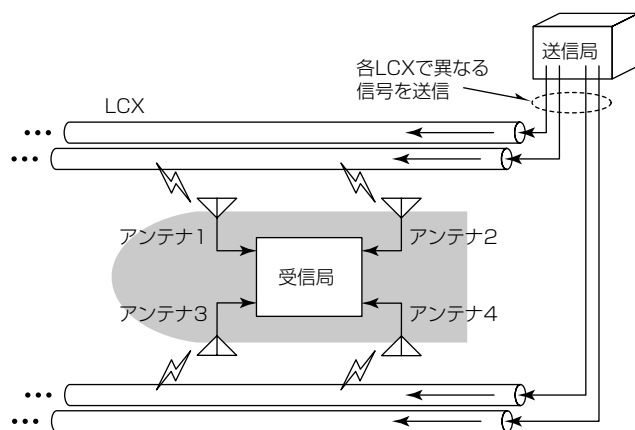


図 5. LCX-MIMO伝送システム(4LCX・4多重)

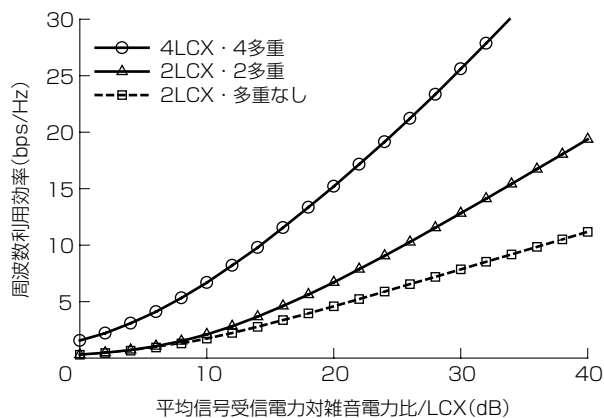


図 6. 場所率99.99%以上での周波数利用効率特性

す。横軸はLCX 1本に対するSNRであり, 縦軸は場所率99.99%以上を実現する周波数利用効率(シャノン限界)<sup>(4)</sup>である。ここで, 受信アンテナ数は4本としている。2LCX・多重なしは2本のLCXから同一信号を送信するSIMO(Single-Input Multiple-Output)構成であり, 2LCX・2多重は2本のLCXから異なる信号を送信するMIMO構成である。同図から, SIMOに比べ, MIMOを適用することで大容量化が可能であり, 特にSNRが高いほど効果が大きいことが分かる。

##### 4.2 高効率多値化技術

SCシンボル系列をブロック化して送信するSCブロック伝送は, 図7に示すように, OFDMと比べて低ピーク電力を維持しながら, OFDMと同等の周波数利用効率を実現する伝送方式である。一方, 高速移動環境では, 3.1節で示した分散パイロットが有効である。しかし, SCブロック伝送に分散パイロットを多重することによって低ピーク電力の利点が損なわれる。

この課題に対して, データとパイロットのタイミングをずらして多重することで, 通常のSCブロック伝送と同等のピーク電力まで抑圧可能な高効率送信技術を開発した<sup>(5)</sup>。受信機では, 3章で述べた二次元歪み補償によって受信信号の歪みを補償する。これらの技術を組み合わせることで,

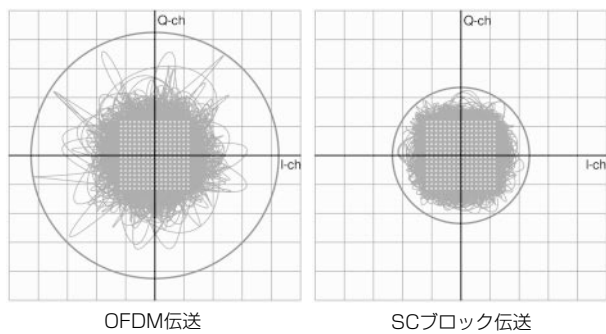


図7. 256QAM変調信号のコンスタレーション

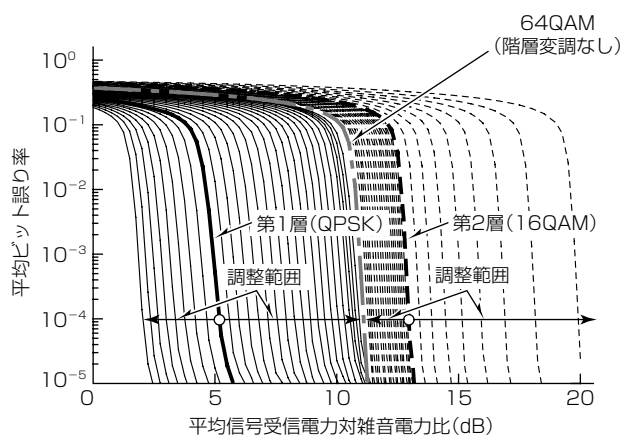


図9. 一般化階層変調適用時の平均ビット誤り率特性

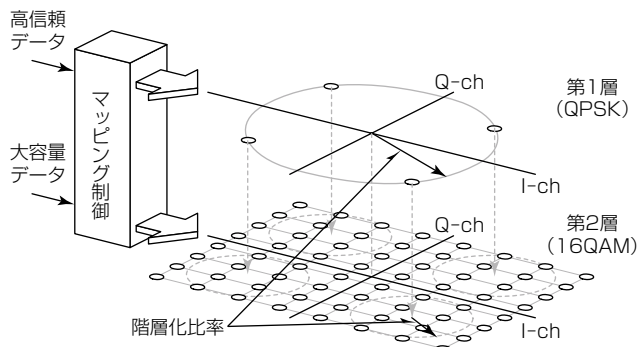


図8. 階層変調の概念(QPSK+16QAMの例)

高速移動環境でも最大1,024QAMまでの多値MIMO伝送が可能であることを試作機によって実証している<sup>6)</sup>。

4.3 一般化階層変調技術

データの優先度や伝送速度が異なる複数のデータストリームを同時送信する方法の一つとして、個別にマッピングされた各信号を階層的に重畳する階層変調がある。

図8に階層変調の概念を示す。階層変調によって2ストリームを多重する場合、QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)などの高信頼回線(第1層)と、第1層に重畳するQAMなどの大容量回線(第2層)に分かれる。図8の例では、第2層は一つの象限に16QAMが配置されるため、第1層と比較して、伝送速度は高いが回線品質は低い。これまでの階層変調技術では、各回線品質は重畳後のビット品質によって決定されるため、回線設計の自由度が低いという課題があった。この課題に対し、①重畳時の信号点サイズを規定する階層化比率、②各層へのビットマッピングを制御するマッピング制御、を導入することで階層変調を一般化した。これによって、図9に示すように、パラメータ調整によって第1層、第2層ともに柔軟な回線品質設計が可能となる<sup>7)</sup>。

5. むすび

LCX無線通信における高速移動体通信に対応する大容量化技術として、当社が開発した高精度伝送路推定技術について述べた。また、更なる大容量化、高信頼化を実現する将来技術として、LCX-MIMO技術、高効率多値化技術、一般化階層変調技術について述べた。今後、これらの技術を適用した大容量LCX無線通信システムを実現する。

参考文献

- (1) 佐々木 伸, ほか: LCX通信システム, 電子通信学会 (1982)
- (2) 田中謙一郎, ほか: フェージング環境下における分散パイロットによる演算量削減型時間・周波数伝送路推定法, 電子情報通信学会論文誌B, J94-B, No.12, 1605~1610 (2011)
- (3) Hoehner, P., et al.: Two-dimensional pilot-symbol-aided channel estimation by Wiener filtering, IEEE ICASSP-97, 3, 1845~1848 (1997)
- (4) 大鐘武雄, 小川恭孝: わかりやすいMIMOシステム技術, オーム社 (2009)
- (5) Hasegawa, F., et al.: A novel PAPR reduction scheme for SC-OFDM with frequency domain multiplexed pilots, IEEE Commun. Lett., 16, No.9, 1345~1348 (2012)
- (6) 増田進二, ほか: パイロット多重型シングルキャリアブロック伝送の実験評価(1)~(3), 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-5-42~44 (2012)
- (7) 西本 浩, ほか: 階層変調方式における回線品質調整に関する検討, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-5-62 (2012)