

## 8. データリンク LDACS1 のビット誤り率特性

監視通信領域 ※北折 潤、塩見 格一、住谷 泰人、石出 明

### 1. はじめに

国際民間航空機関は、将来の航空通信需要の増大に備えるため、高速データリンクシステムの技術的検討を欧米共同作業 FCS (Future Communication Study) に委ねた。FCS 最終報告では、新たなデータ通信システムが必要であるとの見解を示しており、また洋上通信、対空通信、空港面通信と、通信用途に応じて適切な航空通信システムを選択し使用することを推奨している。対空通信においては、VHF 帯で用いられている現行の VDL (VHF Digital Link) Mode2 や ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System) に代わるデータ通信システム候補として、L バンドにおける高速データリンク LDACS (L-band Digital Aeronautical Communications System) を提案している [1]。しかし現在までのところ、LDACS の規格自体が LDACS1[2] と LDACS2[3] という 2 種類の規格案が並立している段階に留まっており、LDACS の本格的な規格化にはまだ時間がかかるものと考えられている。

これまでに電子航法研究所では、LDACS 物理層実験システムを作成し [4]、一部の性能について検証してきた [5, 6]。本報告では LDACS1 について基本的な通信性能指標である BER (Bit Error Rate; ビット誤り率) 特性の評価結果について報告する。

### 2. LDACS1 概要

LDACS1 は VDL Mode2 等と異なり地上局 → 航空機局方向の FL (Forward Link) と航空機局 → 地上局方向の RL (Reverse Link) とで別々の周波数チャンネルを割り当てる。FL は地上局から OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) 信号を連続送信し、各航空機局に対して個別指定または同時通報の伝送が行えるチャンネルである。一方、RL は地上局からの要求に応じて割り当てられた航空機局がバースト状に送信する OFDMA-TDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access-Time Division Multiple Access) 方式のチャンネルである。

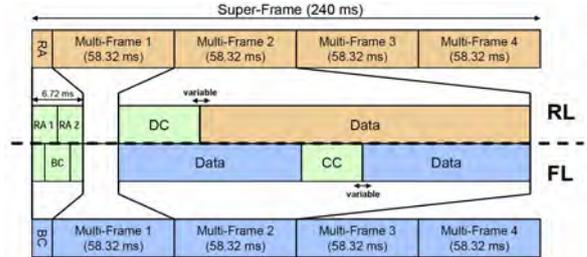


図1 LDACS1 スーパーフレーム構成 [2]

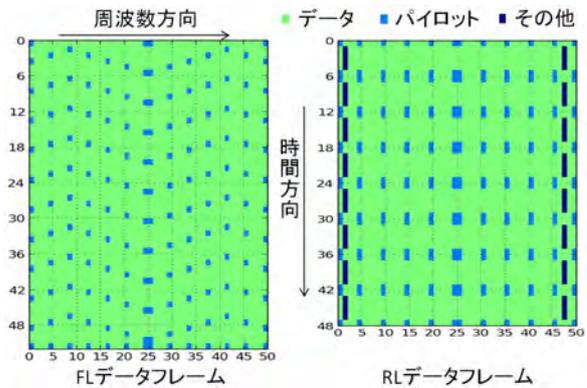


図2 パイロット信号配置例

LDACS1 の送信フォーマットを図 1 に示す。長さ 240 ms のスーパーフレームを基本単位として、さらに細かい単位のフレームに分割している。また FL と RL とでは異なるフレームフォーマットを用いる。二次変調では 50 本のサブキャリアを FFT (Fast Fourier Transform、サイズ 64) で時間信号に変換する。さらに、RL では 50 本のサブキャリアを低い周波数の 25 本と高い周波数の 25 本の 2 つに分け、別々のユーザに使用する。また、OFDM でチャンネル推定に使用するパイロット信号の配置もフレームの型に応じて決められている。例として、図 2 にユーザデータ伝送に用いる FL データフレームと RL データフレームのパイロット信号配置を示す。

なお、受信性能評価に使われる参照 BER 値は「誤り訂正後の BER が  $10^{-6}$ 」と規定されている [2]。LDACS1 の主要諸元を表 1 に示す。

表 1 LDACS1 主要諸元

使用周波数帯	960—1164[MHz]
複信方式	周波数分割
アクセス方式	OFDMA
変調方式	4/16/64QAM+OFDM
チャンネル幅	498.05[kHz] x 2
ビット伝送速度	833.33—2500.0[kbps]
誤り訂正	外符号 リードソロモン 内符号 (パンクチャド) 畳み込み
FFT サイズ	64
サンプリング時間	1.6[μs]
OFDM シンボル長	120[μs]
サブキャリア数	50
サブキャリア間隔	9.765625[kHz]

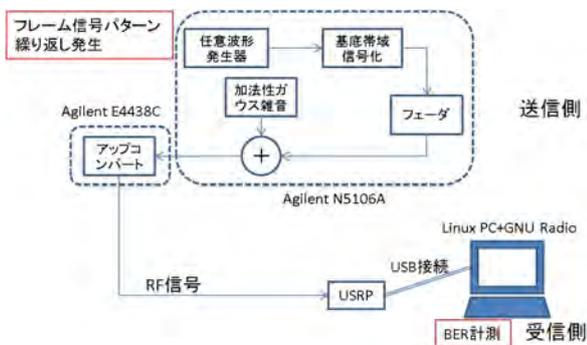


図 3 実験構成図

### 3. 実験方法

LDACS 物理層実験システムは、PC と信号送受信フロントエンド USRP (Universal Software Radio Peripheral) で構成される [4]。PC 上で信号処理ライブラリ GNURadio[7] を用いた LDACS 物理層動作プログラム等を走らせて実験を行った。

本稿では、図 3 に示すように、送信信号は任意波形発生器でプリアンプを付加したフレームを繰り返し発生させ、受信側の PC で誤り訂正前後の BER を測定した。なお、本稿では LDACS1 の各種フレームのうち FL データフレーム (長さ 52 OFDM シンボル) 及び RL データフレーム (長さ 6 OFDM シンボル) を対象とした。

## 4. BER 特性実験結果

### 4.1 静的通信環境

LDACS1 の一次変調は QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) =4QAM (Quadrature Amplitude Modulation)、16QAM、64QAM の 3 種類が

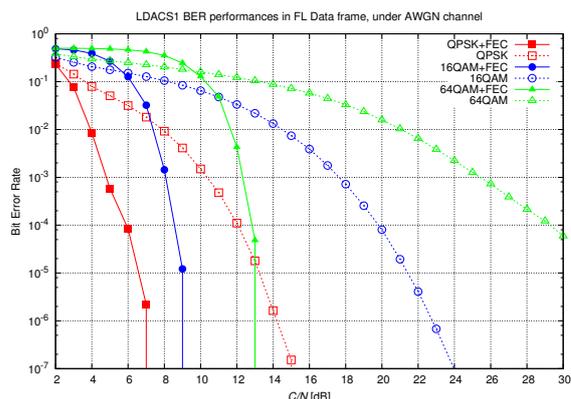


図 4 FL データフレーム変調方式別 BER 特性

定義されている。フェージングのない静的通信環境下での変調方式別 FL データフレーム BER 特性を図 4 に示す。誤り訂正前 BER は理論上の特性に比べいずれも劣化が見られるが、4QAM は劣化度合いが少なく良好な特性であった。また誤り訂正前 BER が  $10^{-2} \sim 10^{-1}$  程度以下で訂正符号が効き、4QAM で  $C/N = 8$  [dB]、64QAM でも  $C/N = 14$  [dB] で誤り訂正後の BER が 0 となった。

### 4.2 周波数シフト耐性

ドップラシフトに代表されるように、受信信号に周波数シフトが発生することがある。信号搬送波周波数に周波数シフトを発生させ受信させた場合の BER 特性を図 5 に示す。FL では周波数シフトが  $\pm 1.5$  kHz でも誤り訂正後 BER = 0 であった。これは搬送波周波数 970 MHz の場合約 1670 km/h (900 ノット) の移動速度に相当する。一方 RL ではシフトが  $\pm 300$  Hz 程度で誤り訂正後 BER  $> 10^{-6}$  となった。

### 4.3 フェージング環境

航空機の移動に伴いマルチパスフェージングが発生する。文献 [2]App.A にある代表的な通信チャネルモデル例を参考にして、フェージング環境を表 2 のように定め BER 特性を測定した。図 6 に ENR 環境、図 7 に TM 環境、図 8 に APT 環境における BER 特性を示す。FL は ENR、TM で参照 BER 値に対応する  $C/N$  がそれぞれ 9 dB、15 dB となったが、APT では参照 BER 値に対応する  $C/N$  は得られなかった。また、RL につい

表 2 フェージング環境設定

環境名	フェージングタイプ	遅延 [ $\mu$ s]	減衰 [dB]	最大ドップラシフト [Hz]
ENR (エンルート)	ピュアドップラ	0	0	997
	レイリー	0.3	16	603
	レイリー	15	22	-594
TM (ターミナル)	ライス ( $K = 10$ [dB])	0	0	498
APT (空港面)	レイリー	0	0	330

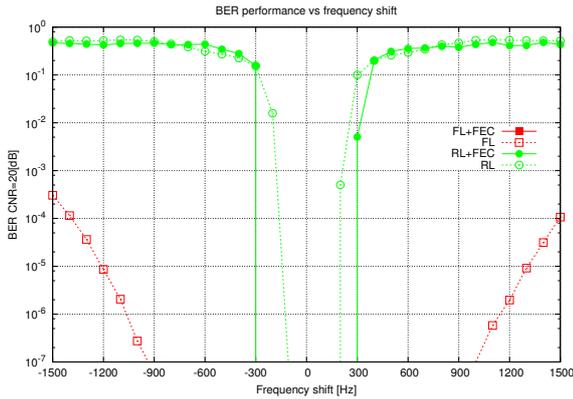


図 5 周波数シフト耐性

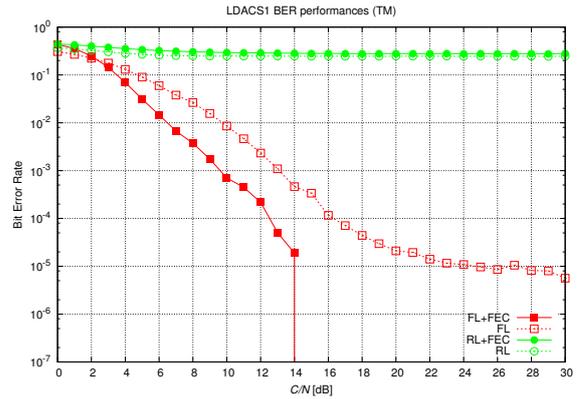


図 7 TM 環境 BER 特性

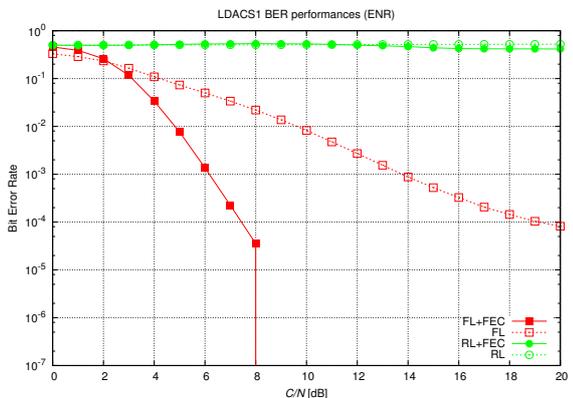


図 6 ENR 環境 BER 特性

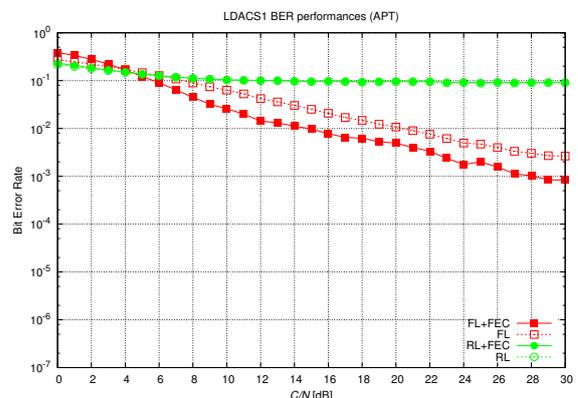


図 8 APT 環境 BER 特性

てはいずれも参照 BER 値に対応する  $C/N$  は得られなかった。

#### 4.4 考察

周波数シフト耐性やフェージング環境下での BER 特性は特に RL での劣化が顕著であった。4.2 節の周波数シフト耐性では、FL は  $\pm 1.5$  kHz まで十分な耐性があったのに対して、RL は  $\pm 300$  Hz のシフトつまり速度約 334 km/h (180 ノット) でも受信 BER 基準を超えた。今回パイロット信号を利用した等化処理として、一般的な DFE

(Decision Feedback Equalizer) アルゴリズムを実装していたが、FL と RL とで特性が大きく異なった。これは、図 2 からわかるように FL は毎 OFDM シンボルにパイロット信号が配置されているのに対して、RL はパイロット信号の時間的配置が飛び飛びであるために、毎 OFDM シンボルでの等化処理とはならず、適切なチャネル推定が行えなかったものと考えられる。そこで、RL のパイロット信号配置に適した内挿等化アルゴリズムで同様の周波数シフト耐性を求めてみたところ、図 9 のように  $\pm 700$  Hz 程度まで耐性

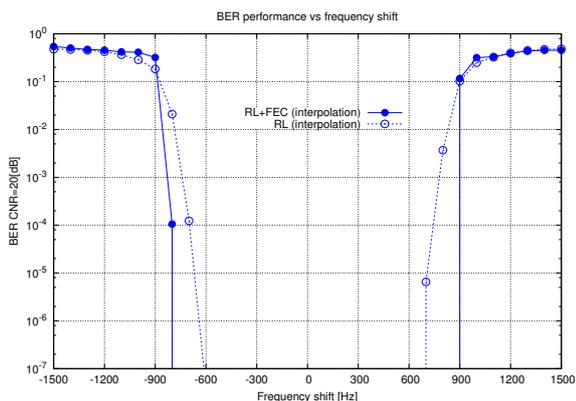


図9 周波数シフト耐性（内挿等化）

が改善された。なお、LDACS1 受信機の受信感度定義では移動速度 850 ノットに相当する周波数シフト時にも対応することが求められており [2]、RL についてはさらなる改善が必要と考えられる。

図 6、図 7、図 8 の各フェージング環境下の BER 特性でも、等化処理は前述の DFE アルゴリズムで行った。FL では APT のようなレイリーフェージング環境では  $C/N$  が高くても BER が大きく、プロトコル上位層での再送機構等によるデータ補償を併用する必要がある。一方で、ENR や TM のような強い直接波を受けられる環境では高い  $C/N$  では誤り訂正が効き、BER を抑えることができた。しかし、RL では 3 種類の環境の最良値でも誤り訂正後 BER が 0.08 程度以上あったため、この状態では再送が頻繁に発生しデータ伝送に不適である。RL については等化アルゴリズムを内挿等化に変更したところ、ENR については  $C/N = 30$  [dB] で誤り訂正後 BER が 0.3 程度と依然高かった。ENR は直接波と 2 遅延波の合成されたエンルート飛行中の通信を想定した伝搬モデルであるが、最も信号振幅が大きい直接波のドップラシフトが約 1 kHz と大きく前述の周波数シフト耐性の範囲を超えているため  $C/N$  によらず BER が劣化したものと考えられる。また APT と TM では内挿等化アルゴリズムによって BER 特性の改善は見られたが、いずれも FL の結果より悪かった。特に APT のようなレイリーフェージング環境ではデータの再送が頻発する可能性がある。

以上の結果より、LDACS1 の BER 特性等は

FL と RL とで大きく異なることがわかった。同一の等化アルゴリズムを用いた場合での特性が異なることから、パイロット信号配置が影響していると言える。つまり、FL と RL とでそれぞれ適切な BER 特性を得るためには個別に等化アルゴリズムを検討していく必要がある。

## 5. まとめ

LDACS1 では FL と RL とでフレーム構成及びパイロット信号配置が異なり、同一の等化アルゴリズムでは十分な BER 特性は得られないことがわかった。またレイリーフェージング環境では十分な誤り訂正が行われず、データの再送が頻発する可能性がある。今後は FL と RL にそれぞれ適した等化アルゴリズムを求め、評価していく予定である。また、等化以外にも信号同期等の処理が受信性能を左右することから、これらについても検証していく予定である。

## 参考文献

- [1] Nicolaos Fistas, Brent Phillips, and James Budinger. Future communications study — action plan 17, final conclusions and recommendations report. In *26th DASC*, pp. 1–14., 4.B.6, IEEE, Oct 2007.
- [2] EUROCONTROL. Updated LDACS1 System Specification. SESAR Joint Undertaking, Aug 2011.
- [3] EUROCONTROL. L-DACS2 System Definition Proposal. Deliverable D2, EUROCONTROL, 2009.
- [4] 北折潤, 住谷泰人, 石出明. 対空データリンク LDACS 物理層の実装. 第 11 回独立行政法人電子航法研究所発表会講演概要, pp. 25–28, June 2011.
- [5] 北折潤, 住谷泰人, 石出明. 航空用高速データリンク LDACS の BER 特性. 電子情報通信学会 技術研究報告 SANE, Vol. 112, No. 360, pp. 37–42, Dec. 2012.
- [6] Jun KITAORI. Results of LDACS PHY BER performances with GNU Radio. ICAO ACP WG-M20/IP-8, Jan 2013.
- [7] Eric Blossom. Gnu radio: tools for exploring the radio frequency spectrum. *Linux J.*, Vol. 2004, No. 122, pp. 4–, June 2004.