

19. LDACS1 のビット誤り率特性の改善

監視通信領域 ※北折 潤, 塩見 格一

1 はじめに

国際民間航空機関は、ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System) や VDL (VHF Digital Link) Mode2 に代わる陸域における将来の空地高速データ通信システムとして LDACS (L-band Digital Aeronautical Communications System) を提案している [1]。LDACS は Lバンド (1GHz 帯) を使用するシステム規格案である。国際規格の策定に当たっては、LDACS の通信性能を明らかにするとともに他の ARNS (Aeronautical Radio Navigation Service) システムとの共用問題などを解決していく必要がある。なお、LDACS 規格案には現在 LDACS1 [2], LDACS2 [3] の 2 種類が提案されており、両者に互換性はない。LDACS1 は LDACS2 に比べてビット伝送レートが高く、ビット誤り訂正能力が高い等の特徴から、現時点では LDACS1 が性能上優位と見られているが、本格的な国際規格化には今しばらく時間がかかるものと考えられている。

これまで、電子航法研究所では LPES (LDACS Physical layer Experimental System; LDACS 物理層実験システム) を作成し [4], LDACS1 の物理層性能について検証してきた [5-7]。その結果、LDACS1 の誤り訂正適用後の BER (Bit Error Rate; ビット誤り率) 特性が AWGN (Additive White Gaussian Noise; 加法性白色ガウス雑音) 伝送路に比べマルチパスフェージング環境下で劣化すること、特に航空機局 → 地上局方向の RL (Reverse Link) は地上局 → 航空機局方向の FL (Forward Link) に比べて BER 劣化が大きいことが確認されている [8,9]。本稿では、LDACS1 受信機側での信号処理を見直すことによる、マルチパスフェージング環境 (以下、単にフェージング環境と記述する) 下での BER 特性の改善策とその適用結果について報告する。

2 LDACS1 概要

LDACS1 は OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) をベースとしたシステムで、FL と RL とで異なる周波数チャンネルを割り当てて

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 内符号
	リードソロモン (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]

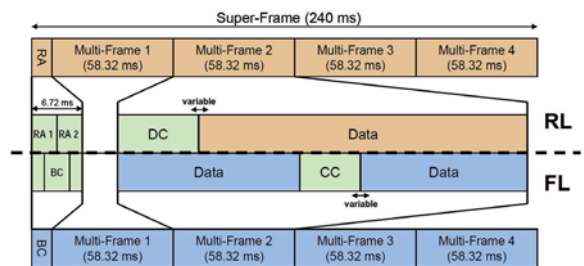


図 1 LDACS1 スーパーフレーム構成 [2]

いる。FL は地上局から OFDM 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。一方、RL は地上局からの要求に応じて割り当てられた各航空機局がバースト状に送信する。

LDACS1 の主要諸元を表 1 に、LDACS1 の送信フォーマットを図 1 に示す。送信フォーマットは、長さ 240 ms のスーパーフレーム内にデータや制御用等の各種フレームを格納している。OFDM 二次変調では 50 本のサブキャリアをサイズ 64 の FFT (Fast Fourier Transform) で時間信号に変換する。OFDM でチャンネル推定に使用するパイロット信号配置は、FL 及び RL のフレームの種類に応じて決められている。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、図 2 に示す。なお、FL データフレームは 52 OFDM シンボル長である一方で、RL データフレームは 6 OFDM

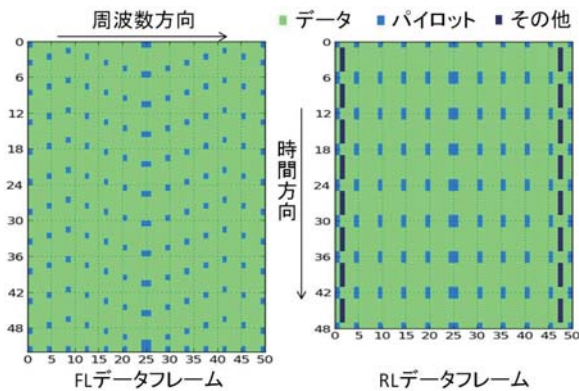


図2 パイロット信号配置例

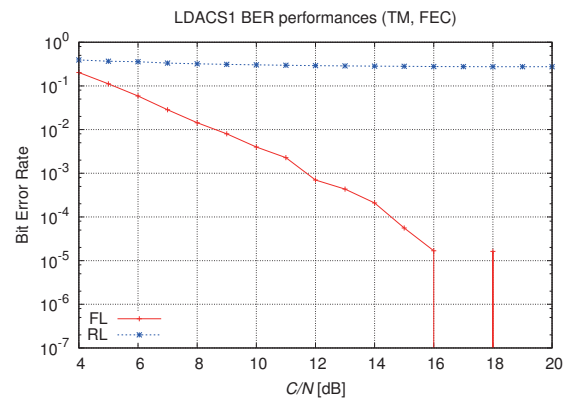


図3 TM環境下BER特性例

表2 フェージングシナリオ設定

ENR	Rice フェージング (K ファクタ 15dB) 直接波と2 遅延波 (0.3 μ s, 15 μ s) 移動体速度 (600knot)
TM	Rice フェージング (K ファクタ 10dB) ドップラモデル (Jakes) 移動体速度 (300knot)
APT	Rayleigh フェージング ドップラモデル (Jakes) 移動体速度 (200knot)

シンボル長である。図2では連続するRLデータフレームを縦に8つ並べて表示している。

3 フェージング環境下のLDACS1 BER特性

マルチパスによるフェージング環境は、一般に遅延プロファイルによってモデル化される。航空機の飛行状況及び周囲状況は多岐にわたるため、モデルを一意に決定はできないが、代表的なフェージング環境例がいくつか定義されている[2,10]。本研究では、文献[2]付録Aにある3種類のシナリオENR, TM, APTを参考にして、表2のようにフェージングシナリオを設定した。これらのシナリオをフェージングシミュレータで模擬することによって、フェージング環境におけるLDACS1のBER特性を取得した[8,9]。なおENR, TM, APTは、それぞれエンルート環境、ターミナル空域環境、空港面環境を意味する。

図3に、LPES初期実装でのTMにおけるFLデータフレーム及びRLデータフレームの誤り訂正適用後BER特性を示す。初期実装では、FLデータフレームがC/Nが大きくなるにつれて

BERが減少する一方、RLデータフレームではBERがほぼ変わらず全く誤り訂正が効かない状態であった。

3.1 改善策

フェージング環境下であっても、通信チャネル状態を正確に推定し等化できればビット誤りは減少する。一般的にOFDMシステムではパイロット信号がフレームに配置されており、パイロット信号位置の推定チャネル状態から補間・補外計算によって各データ信号を等化する。LPESの初期実装では、判定帰還型の等化器を実装した。

LDACS1のRLデータフレームは図2に示した通り、特定のOFDMシンボルのみにパイロット信号が配置されている。このため、判定帰還型では時間変化への追従が不十分であると考え、時間方向も補間計算する等化器を別途実装した。本稿では便宜上、内挿型等化器と呼ぶ。さらに推定時に伝送路特性行列 H を用いるかその逆行列 H^{-1} を用いるかという要素も加え、等化器によるRLデータフレームBER特性の改善を試みた。表3に実装した等化器一覧を示す。同表中、線形按分とは2つの複素数の単純な内分比で補間計算する方法、位相按分とは2つの複素数間の位相差の内分比と各振幅の対数の内分比から補間計算する方法を表す。

また、RLデータフレームのデータ長及び誤り訂正符号長をLDACS1規格と同一とした上で、パイロット信号の配置パターンを図4のように置き換えた場合にBERの改善効果があるかにつ

表3 実装等化器一覧

等化器番号	等化方式	補間計算	補間対象行列
1	判定帰還型, ゼロフォーシング	線形按分	H^{-1}
2	内挿型, ゼロフォーシング	線形按分	H
3	内挿型, ゼロフォーシング	線形按分	H
4	内挿型, ゼロフォーシング	位相按分	H
5	判定帰還型, ゼロフォーシング	位相按分	H^{-1}
6	判定帰還型, 最小平均二乗誤差	位相按分	H^{-1}
7	内挿型, 最小平均二乗誤差	位相按分	H
8	判定帰還型, 最小平均二乗誤差	位相按分	H

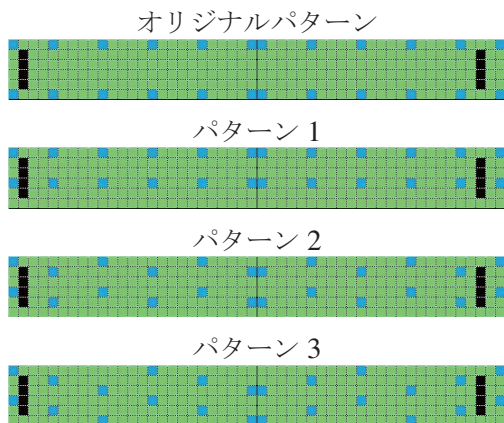


図4 RL データフレームパイロット信号配置パターン

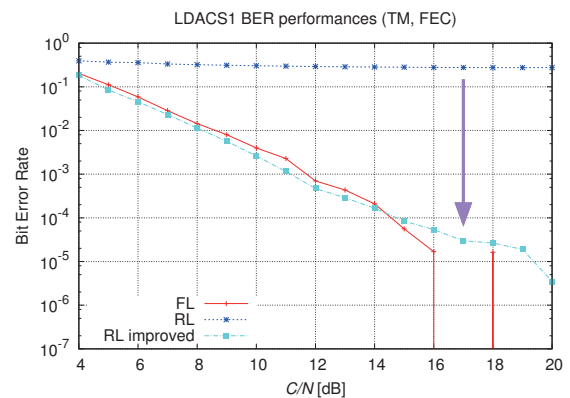


図5 TM 環境下 BER 特性改善結果

いても実施した。

3.2 適用結果

等化器 8 種とパイロット配置パターン 3 種の組み合わせを試した結果, RL データフレームの BER 特性改善に最も効果が高かった方法は, 等化器 8 番とパターン 3 の組み合わせであった。図 5, 図 6 に TM 環境及び ENR 環境における BER 特性改善結果を示す。いずれも, FL データフレームに近い BER 特性まで改善された。

オリジナルパターンでは, どのサブキャリアにもパイロット信号がない OFDM シンボルが 4 つ連続している。本稿の判定帰還型等化器は OFDM シンボル内のパイロット信号を使って 1 シンボル前のチャンネル推定状態を更新していくため, パイロット信号がない場合はチャンネル推定状態の更新が起こらない。つまり古いチャンネル推定状態のまま等化することから, ビット誤りの低減に結びつきにくい。これに対して, パターン 3 では各 OFDM シンボルにパイロット信号をま

んべんなく分散するスキヤッタドパイロットとしたため, 各 OFDM シンボル内の補間精度は下がるもののシンボル毎にチャンネル推定状態が更新され, FL データフレームに近い特性が得られたと考えられる。

なお, 内挿型等化器はオリジナルパターンには一定の BER 改善効果が見られたものの, パターン 1, 2, 3 では判定帰還型ほどの改善効果は得られなかった。これは, オリジナルパターン以外では時間方向に補外計算を行うことになるため, 計算結果が適切な範囲外となることもありチャンネル推定結果が不正確になったものと考えられる。

一方, APT 環境においても等化器 8 番とパターン 3 の組み合わせで RL データフレームの BER 特性は FL データフレーム並になった。しかし図 7 に示すように, $C/N = 20[\text{dB}]$ での誤り訂正適用後 BER が 10^{-2} 程度であった。APT 環境では Jakes モデルの Rayleigh フェージングを仮定しており, 図 7 は BER 特性にとってワーストケースとなると思われる。なお実際の空港面

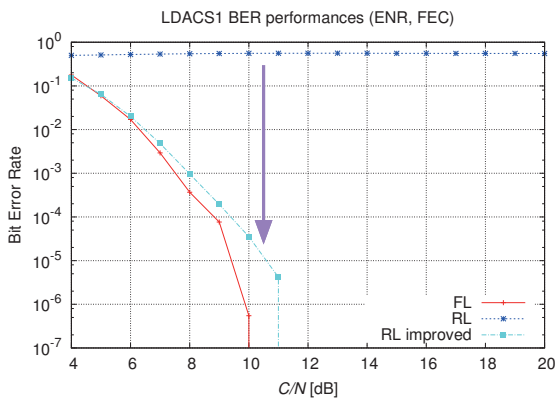


図6 ENR 環境下 BER 特性改善結果

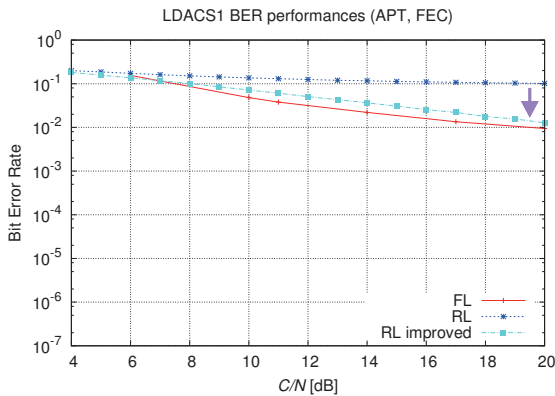


図7 APT 環境下 BER 特性改善結果

では、室内環境等と異なり受信点に到来する各素波の電力は到来方向によって分布に偏りがあるものと想定される。直接波など何らかの優勢な素波が存在すれば Rice フェージングに近い状況となり、空港面においても BER は図7の結果よりも低下すると期待できる。誤り訂正適用後 BER が 10^{-4} 程度以下であれば FL データフレームでもフレーム当たり 2 ビット程度以下の誤りとなり、上位層の再送機能等によって伝送情報の補償が可能である。

4 まとめ

著者らは LPES 及びフェージングシミュレータを利用して、フェージング環境における LDACS1 の BER 特性を調査してきた。その結果、現在定義されている RL データフレームのパイロット信号配置ではフェージング環境に弱く、FL データフレームに比べて著しく BER 特性が劣化することがわかった。このため RL データフ

レームにおける BER 特性の改善策について検証した。等化方式自体は判定帰還型を使うもののパイロット信号配置をスキップドパイロットとした場合に、FL データフレーム程度まで BER 特性を改善できると判明した。

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] 北折潤, 塩見格一, 住谷泰人, 石出明. データリンク LDACS1 のビット誤り率特性. 第 14 回独立行政法人電子航法研究所発表会講演概要, pp. 41–44, June 2014.
- [8] 北折潤, 塩見格一. フェージング環境下における LDACS1 ビット誤り率特性. 電子情報通信学会 技術研究報告 SANE, Vol. 114, No. 397, pp. 95–99, Jan. 2015.
- [9] Jun KITAORI. Updated LDACS1 BER performances with LPES. ICAO ACP WG-M21/IP-2, Jul 2014.
- [10] Erik Haas. Aeronautical Channel Modeling. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. 51, No. 2, pp. 254–264, Mar. 2002.