

## 5. 対空データリンクL-DACS物理層の実装

通信・航法・監視領域 ※北折 潤、住谷 泰人、石出 明

### 1. はじめに

航空機の軌道情報に従って運航する TBO (Trajectory Based Operations) では、航空機の動態情報、軌道情報や運航に影響する気象情報等、従来に比べて大量かつ多様なデータの送受信が前提となる。しかし現行の航空用対空データ通信システムは VDL (VHF Digital Link) モード 2 や ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System) が主流であり、いずれも TBO 実施に十分な伝送速度とは言えない。つまり TBO の実現には通信の高速化が課題となる。

国際民間航空機関では、将来の対空データ通信システムとして L バンドにおける高速データリンク L-DACS (L-band Digital Aeronautical Communications System) を提案している [1]。航空用 L バンドは 1 GHz 付近の周波数帯を指し、VHF 帯より高い周波数帯であるため高速伝送に必要な帯域を確保しやすいが、既に DME (Distance Measuring Equipment) 等の他の航空無線システムが運用されている。このことから、L-DACS と他システム間の電波干渉の影響について検証する必要がある。また現時点においては L-DACS の規格が統一されていないことから、規格統一のための評価手段も考慮しなければならない。

電子航法研究所では、L-DACS 規格に準拠した L-DACS 物理層実験システムを製作中である。本稿では、L-DACS 物理層実験システム送信部（以下、物理層送信部）の実装状況と発生信号の評価結果について報告する。

### 2. 物理層送信部の実装

#### 2.1 L-DACS 概要

2003 年の国際民間航空機関第 11 回航空航法会議は、軌道情報に基づく航空交通管理システムの必要性について勧告した。これを受け欧州は SESAR (Single European Sky Air traffic management Research)、米国は NextGen (Next Generation Air Transportation System) 構想を打ち出し、次いで欧米協調作業となる Action Plan 17 — FCS (Future Communication Study) を実

施した。FCS 最終報告では、対空データ通信システム候補として、いずれも L バンドを使う 4 つの異なる規格が併記されていた。これら 4 つの規格を L-DACS と総称したことが L-DACS の始まりである。

FCS 最終報告以後様々な議論を経て、L-DACS は L-DACS1 と L-DACS2 という 2 つの規格に集約され現在に至っている。表 1 に L-DACS1 及び L-DACS2 の主な諸元を示す [2, 3]。両者の主な違いは、L-DACS1 が上り下り回線を周波数分割によって区別するのに対して L-DACS2 は時分割で区別する点にある。また L-DACS1 は OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) で 50 本の副搬送波を利用するため、L-DACS2 に比べてビット伝送速度が高いスペックとなっている。ただし、両者とも誤り訂正符号はリードソロモン符号と畳み込み符号の組み合わせしており、情報誤り訂正能力が高い代わりにユーザデータのスループットは表 1 のビット伝送速度よりいずれも低い。

#### 2.2 実装機器

実装には PC と汎用ソフトウェア無線装置 USRP (Universal Software Radio Peripheral) を利用した。

PC は、CPU が Intel Core2 Duo 2.66 GHz、OS が Ubuntu Linux 10.04 で、これに GNU Radio 3.3.0 をインストールした。GNU Radio は無料で利用できる信号処理ソフトウェアである。GNU Radio は、C++ で書かれた信号処理ライブラリ部分と Python からこのライブラリを呼び出すインターフェイス部分からなり、ソフトウェア無線プログラムを Python スクリプトとして実行することができる。

また USRP は PC から USB 経由で接続する USRP1 を用いた。USRPs はマザーボードと daughter board で構成される。マザーボードは D/A (Digital/Analog) 変換及び PC とのインターフェイス等を担当し、daughter board により様々な周波数帯に対応できる。GNU Radio と USRP を一緒

表 1 L-DACS1/2 主要諸元比較表

名称	L-DACS1	L-DACS2
使用周波数帯	960—1164[MHz]	960—975[MHz]
複信方式	周波数分割	時分割
アクセス方式	OFDMA	TDMA
変調方式	(QPSK, 16QAM, 64QAM)+OFDM	GMSK
チャンネル幅	498.05[kHz] x 2	200[kHz]
ビット伝送速度	833.33—2500.0[kbps]	270.83[kbps]
誤り訂正符号 外符号 内符号	リードソロモン符号 パンクチャド畳み込み符号	リードソロモン符号 パンクチャド畳み込み符号



図 1 GNU Radio 搭載 PC と USRP 外観図

に利用することでソフトウェア無線機を作成することができる。実際の PC と USRP の外観を図 1 に示す。

### 2.3 プログラム構成

実際の GNU Radio による物理層送信部のプログラム構成例を図 2 に示す。この例では L-DACS1/2 とも信号を連続送信する。プログラム起動時のオプション設定により L-DACS1 か L-DACS2 かを選択できる。L-DACS2 については別途、時分割複信方式を模擬したバースト状信号を発生させるプログラムも作成した。

## 3. 発生信号の評価

### 3.1 信号評価機器構成

発生信号の評価は図 3 のような構成で行った。PC 上の GNU Radio Python プログラムで作成したベースバンド信号は、USB を経由して USRP へ出力され搬送波周波数までアップコンバート及び D/A 変換されて RF 信号となる。今回は、50 MHz — 2.2 GHz の周波数範囲に対応してい

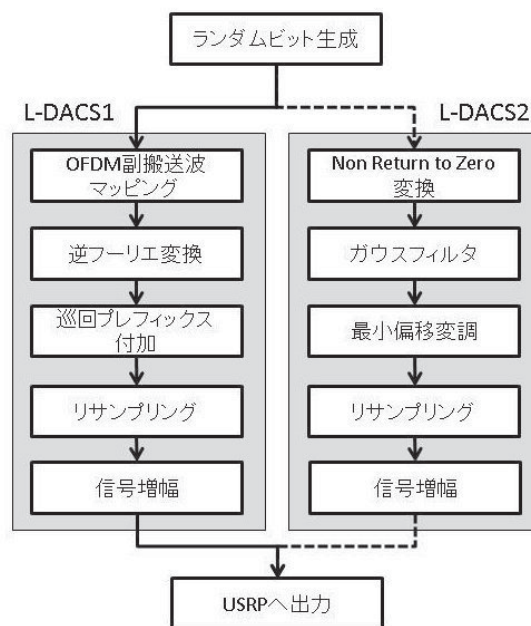


図 2 L-DACS 物理層送信部プログラム構成例

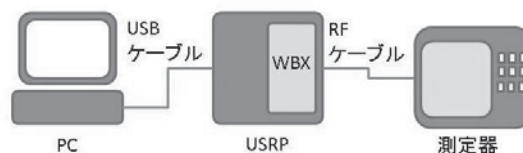


図 3 信号評価機器構成

る WBX ドータボードを使用し、物理層送信部の発生信号についてスペクトラムアナライザ等で観測した。

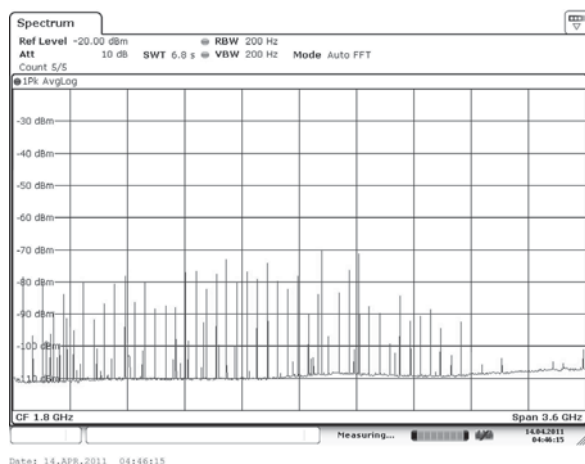


図 4 アイドル状態 USRP 出力スペクトラム

### 3.2 USRP/WBX 基本特性

まず、物理層送信部に使用している USRP 及び WBX ドータボードの出力特性について調査した。

GNU Radio で生成した正弦波の測定周波数と設定周波数とのずれを 100 MHz—2 GHz の範囲に渡り測定した。周波数は同範囲内で百万分率にして  $5.8 \pm 1.4$  ppm 程度低域へずれていた。このずれは USRP の内部クロックの偏差（公称最大 20 ppm、室温時 5 ppm 程度）によるものと考えられる。

また、アイドル状態のピーク出力周波数特性を図 4 に示す。同図よりほぼ等間隔の線スペクトルが最大 3 GHz 付近まで発生していることがわかった。この間隔は 64 MHz に等しいことから、USRP の内部クロックとその高調波の漏れと考えられる。

### 3.3 L-DACS スペクトラム

搬送波周波数を 970 MHz として、物理層送信部で L-DACS1 連続送信信号を生成しそのスペクトラムを観測した。図 5 に L-DACS1 スペクトラムを示す。中心周波数からのオフセットが  $\pm 270$  kHz 付近及び  $\pm 700$  kHz 以遠でスペクトラムマスクを逸脱していた。また図 5 では判別できないが、L-DACS1 では使用しないベースバンド信号の直流成分が、RF 帯域の搬送波成分として出現していた。これは局部発信器から漏れた信号が周波数ミキサによって搬送波成分に変換

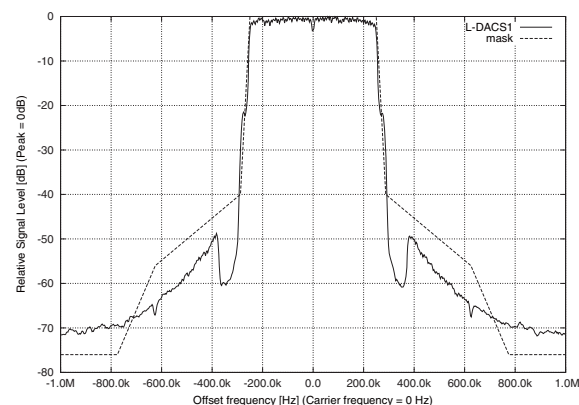


図 5 L-DACS1 スペクトラム

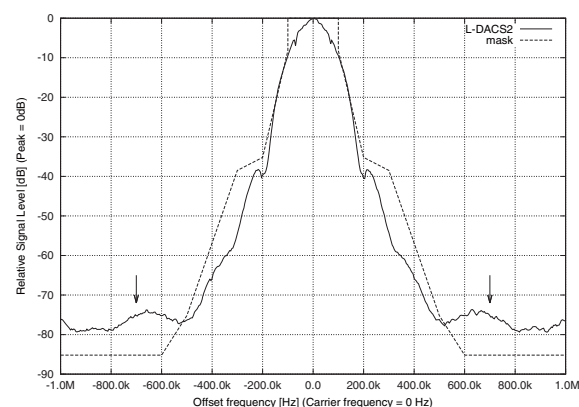


図 6 L-DACS2 スペクトラム

されたことが原因と推察される。

同様に L-DACS2 連続送信スペクトラムを図 6 に示す。こちらも  $\pm 130$  kHz 付近、 $\pm 500$  kHz 以遠でマスク逸脱が見られた。また信号発生器の GMSK スペクトラムと比較するとオフセットが  $\pm 700$  kHz 程度のところ等にわずかなサイドローブが見られた。これは L-DACS2 のビットレートから USRP の D/A サンプリングレートへのレート変換が整数比にならないために、インターポーレーション（補間）時のフィルタリングによって起こった現象と考えられる。

スプリアスについては、L-DACS1/2 も搬送波周波数の 2 倍である 1.94 GHz 付近に搬送波より約 40 dB 小さい高調波を確認した。

マスク逸脱については、L-DACS1/2 も低信号レベルでの逸脱はドータボードのノイズフロアレベルとダイナミックレンジからくる制約と考えられる。一方で必要周波数帯幅近傍での逸脱は隣接チャネルへの影響が懸念される。しか

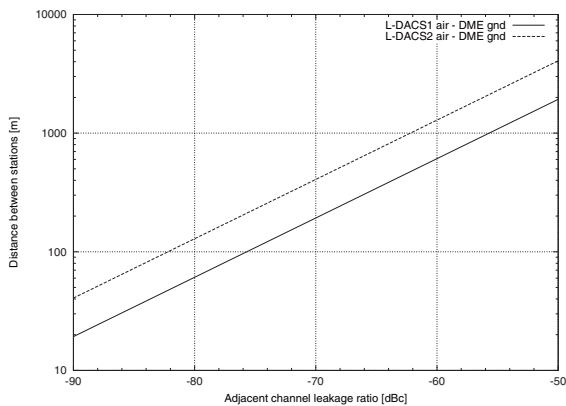


図 7 隣接チャンネル漏洩電力比対局間距離

し、以下の理由等から今後規定が変更される可能性がある。

- ベースバンド信号自体はソフトウェアで合成されており論理的誤りがない限り理想的なものであること。
- 現在 L-DACS の規定 [2, 3] は案の段階であり流動的であること。
- 他システムのスペクトラムマスク [4] よりも厳しいこと。

我々は今後の L-DACS システム設計の議論を踏まえて対応する必要がある。

### 3.4 対 DME 電波干渉

ここでは L-DACS が同じバンドで運用されている DME に対して電波干渉の影響が生じないレベルについて試算してみる。航空機局に L-DACS1 または L-DACS2 送信機、地上局に DME トランスポンダがあり、空間減衰は自由空間伝搬損失を仮定する。また、DME の干渉閾値  $-99$  dBm にマージン  $6$  dB を加味した  $-105$  dBm 以下 [4] ならば干渉による DME 運用への影響がないとする。送信機実効放射電力等のパラメータを文献 [2, 3] に準じて設定した場合の隣接チャンネル漏洩電力比対局間距離（離隔距離）を図 7 に示す。例えば、L-DACS1 の  $1$  MHz 隣接チャンネル漏洩電力比は本 L-DACS 物理層送信部の実測で  $-62.4$  dBc であったことから、同図より離隔距離は  $462.4$  m と求めることができる。

## 4. まとめ

L バンドにおける高速データリンクとして提案されている L-DACS について、電波干渉の影

響や規格を評価・調査するために、GNU Radio と USRP を用いて L-DACS 物理層実験システムの RF 信号を送信する送信部を実装した。信号のスペクトラムは若干マスク逸脱はあるものの、安価な L-DACS 評価用装置として利用できる。ただし、以下の各点に留意して設計等を行う必要がある。

- USRP 内部クロックの偏差による搬送波周波数のずれ
- USRP 内部クロック高調波成分の存在
- サンプリングレート変換時フィルタリングによるサイドローブの出現
- RF 信号での搬送波成分の出現

いずれも PC 内部でのベースバンド信号生成時には出現しない問題のため、RF 信号にさらなる忠実性を要求する場合は、物理層送信部の外で対処する必要がある。

L-DACS の運用予定バンドは他の電波航法システムと重なっているが、中でも DME は L-DACS と運用周波数が近く、電波干渉の影響が大きいと考えられる。今後 DME との電波干渉についてさらに検証していくとともに、物理層受信部を作成し通信性能についても測定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. L-DACS1 System Definition Proposal. Deliverable D2, EUROCONTROL, 2009.
- [3] EUROCONTROL. L-DACS2 System Definition Proposal. Deliverable D2, EUROCONTROL, 2009.
- [4] ECC. Compatibility between UMTS and existing and planned aeronautical systems above 960 MHz, Nov. 2010.