

EXTENDED 1553

新しい MIL-STD-1553 データバス

Extended-1553 の紹介

(通信の速度が 1Mbps から 100Mbps へ)

- ・ 既存の MIL-STD-1553B の配線を用いて 100Mbps の通信を可能にする技術
- ・ 既存の MIL-STD-1553B とは共存が可能、別途 100Mbps の通信路を確保

備考：

この記事は 2011 年 12 月号の“防衛技術ジャーナル”（一般財団法人防衛技術協会 発行）に掲載されたものです。

Extended-1553 はカナダ Edgewater Computer Systems, Inc が開発して Stanag7221 で標準化された技術です。

1. はじめに

軍事用の航空機などのアビオニクスデータバスとして広く使われている MIL-STD-1553 は 30 年以上前に標準化された古い技術である。通信速度は 1Mbps であり、現在われわれが利用しているコンピュータの通信速度と比較するととても遅い通信と言える。最近になってこの MIL-STD-1553 のワイヤをそのまま利用して 100Mbps の高速通信を追加できる技術が開発されて実用段階へと進んできた。その技術の名称は Extended-1553 または Broadband Real-Time Data Bus (B-RTDB) である。本稿では Extended-1553 が航空機などの近代化や能力向上のプログラムに対していかにメリットを出せるかについて紹介する。

2. 現在の MIL-STD-1553B について

① MIL-STD-1553 データバスの登場

1960 年頃のアビオニクスシステムは基本的にアナログのシステムで、航法、通信、航空管制、ディスプレイなどの多数のボックスが存在していた。それらボックス間の情報のやり取りは基本的にポイントトゥポイントで行われ、機体全体で膨大な配線とコネクタが必要とされていた。よって機体重量の制約に関して多くの問題を発生させていた。（図 1A 参照）1970 年後半にはデジタル化技術が到来して、航空機に搭載される各システムとサブシステムを結ぶ共通のデータ伝送手段が必要となってきた。そして 1973 年に最初の MIL-STD-1553 が軍用の半二重の時分割多重通信プロトコルとして標準化され、F-16 の機体に採用された。パラレルバスよりもシリアルバスの方が重量の点でメリットあると判断された。（図 1B 参照）その後 1978 年に現在のバージョンである MIL-STD-1553B がリリースされました。MIL-STD-1553B は、NATO と多くの外国政府にも採用され、履行されています。イギリスは、Def Stan 00-18 (Part 2) を刊行し、NATO は、STANAG 3838 AVS を出版しており、両方共に MIL-STD-1553B の亜種です。MIL-STD-1553B の広範囲な採用と応用は、他の標準化努力の発展も促進しています。MIL-STD-1773 は、1553B の光ファイバー版です。そして、MIL-STD-1760A, the Aircraft/Store Interconnect は、その中に 1553B を組み込んでいます。MIL-STD-1553 について詳しい情報は www.mil-std-1553.jp のサイトを参照いただきたい。このサイトでは日本語のチュートリアルが入手可能である。

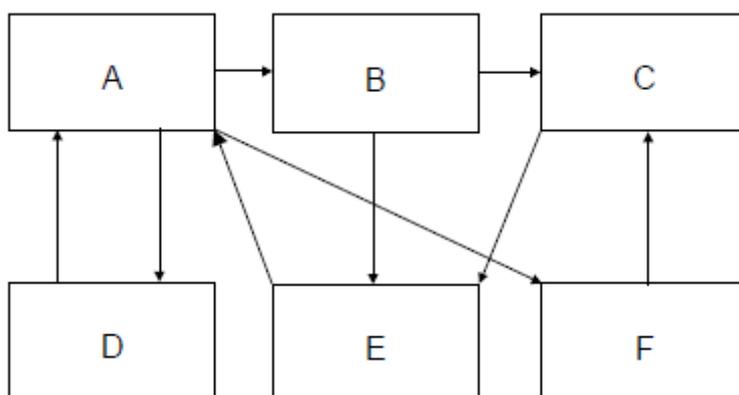


図1A

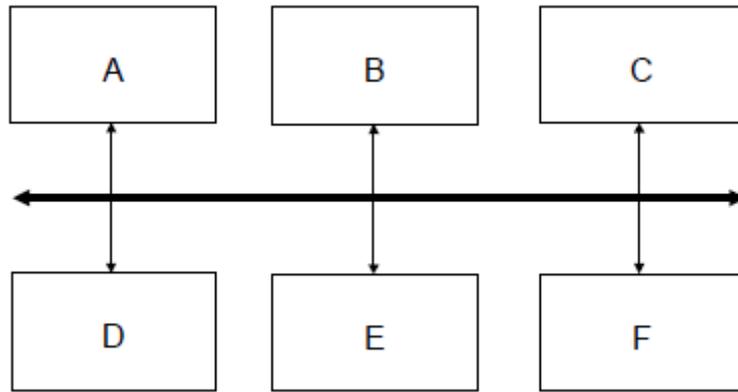


図1B

MIL-STD-1553B の定義を下に示す。

データ速度	1 MHz
ワード長	20 bit
データ・ビット/ワード	16 bit
メッセージ長	最大 32 データ・ワード
通信の技術	半二重 / 非同期
エンコード	二相マンチェスターII
プロトコル	コマンド/レスポンス
バス・コントローラ	単一又は複数
フォールト・トレランス	典型的に二重冗長。 もう1つのバスは「ホットバックアップ」状態
端末のタイプ	リモート・ターミナル（遠隔端末、RT） バス・コントローラ（バス制御装置、BC） バス・モニター（バス監視装置、BM）
メッセージ・フォーマット	BC to RT / RT to BC / RT to RT ブロードキャスト / システム制御
リモート・ターミナルの数	最大 31 個
伝送媒体	シールドツイストペア
結合	変圧器結合（トランスフォーマ カップリング） 直接結合（ダイレクト カップリング）

① MIL-STD-1553B の採用例

MIL-STD-1553 は当初は航空機に機体内のデータバスとして登場したが、冗長性が高く信頼性を重視する通信であることからいろいろな機体に採用されている。 軍事関係（大型輸送機、空中給油機、戦闘機、ヘリコプター、戦車、戦艦など）と宇宙関係（ロケットや衛星や国際宇宙ステーション）やが代用的な採用例である。 さらには地下鉄、湾岸地域高速線（BART）、生産ライン等の商業利用に例もある。 具体的な航空機名では A10、F-16、C17、F-15、B2、F1-11、Global Hawk、KC-10、Apache、F-18F、Tornado などに古い MIL-STD-1553 が使われているので、新たに Extended-1553 の採用が期待される。

3. 現状の MIL-STD-1553B の問題点

約 35 年前に標準化された MIL-STD-1553B の通信速度は 1Mbps であり、戦闘機に搭載のコンピュータ機器の近代化や能力向上や電子戦へ対応、戦術データリンクシステムの統合化とデータ量の増加などに伴いそのデータバス

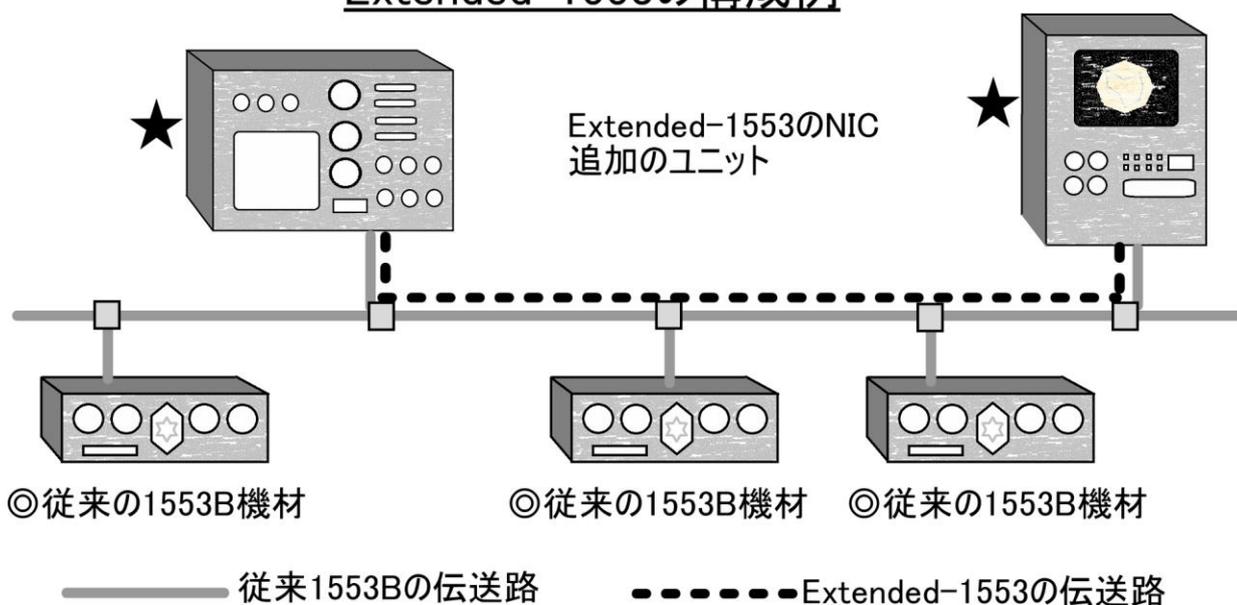
は飽和状態となってきた。特に FLIR (forward looking infra-red/前方監視赤外線) ビデオや標的画像データの高解像度化、運用即応性の改善、航行中の地図データとの連携、攻防能力の改善などで扱うデータ量はどんどん増加傾向にある。これらの問題を解決するために、米国空軍 (United States Air Force/USAF) が中心となって次世代のアビオニクスデータバス (Broadband - Real Time Data Bus) の選定の為のコンペティションが行われた。このコンペティションには Edgewater 社を含む 3 社が参加して、最終的に 2010 年 6 月に Edgewater 社の Extended-1553 が選定された。

4. Extended-1553 とは

① Extended-1553 の概念

高速のデジタル通信としては、イーサネットやファイバーチャンネルなど軍事用の機体に搭載実績があるものが存在する。Extended-1553 の基本コンセプトは、今あるワイヤを利用して機体の近代化/機能向上を目的とした高速デジタル通信へアップグレードする事である。航空機に新たにワイヤを追加するには再設計や機体全体の試験などで大きなコストが必要である。Extended-1553 の構成例を図に示す。図の中で★しるしのユニットに Extended-1553 が組み込まれ、100Mbps の通信が可能である。図の中の◎しるしのユニットは従来の 1553B で、Extended-1553 とは独立しており影響を受けないバスである。

Extended-1553の構成例



② ケーブルの実力

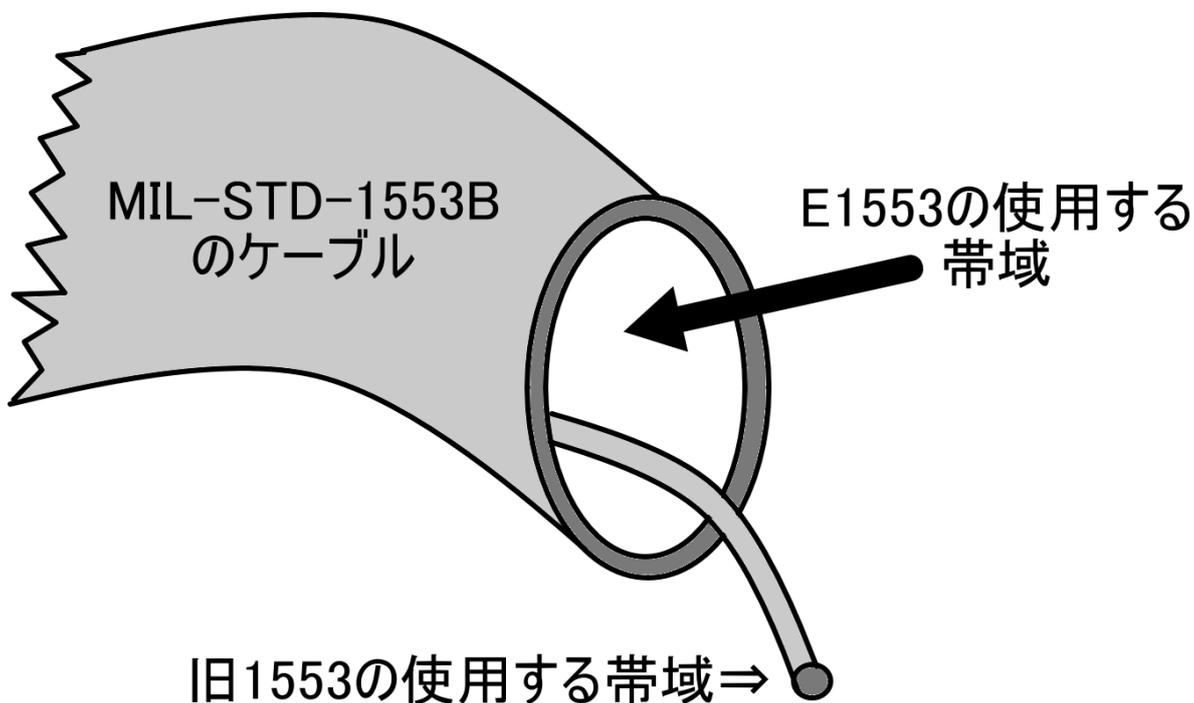
MIL-STD-1553B で使用されているケーブルは、伝送媒体 (データ・バス) は、メイン・バスと多数のスタブから成るツイスト・シールド・ペア伝送線として定義されます。バスに接続した端末毎に 1 つのスタブが存在します。メイン・データ・バスは、ケーブルの特性インピーダンスに等しい抵抗 ($\pm 2\%$) を有する終端で終結します。この終端は、データ・バスを電氣的に無限伝送線路のように振舞わせます。

ケーブル・タイプ	ツイスト・シールド・ペア
静電容量	最大 30.0 pF/ft. wire to wire
固有インピーダンス	70.0~85.0 Ω 、1 MHz
ケーブル減衰	最大 1.5 dB/100 ft.、1MHz
ケーブル・ツイスト	最小 4 Twists / ft.

シールド・カバー	最小 90% (Notice 2)
ケーブル終端	ケーブル・インピーダンス (±2%)
直結スタブ長	最大 1 ft (0.3048 m)
XFMR 変圧器スタブ長	最大 20 ft (6.096 m)

MIL-STD-1553 のコントローラを扱う DDC 社 (Data Device Corp.) の Michael G. Hegarty 氏のレポートによると、MIL-STD-1553 の通信路容量 (Shannon Capacity) は、バスの構成にも依存するが 332 から 811Mbps の実力があり。通信自体がミリタリー仕様と言うことでかなり高性能な (高級な) ワイヤを採用している。にもかかわらず MIL-STD-1553 ではその帯域の一部しか使用していなかったことになる。この点に着目して、使用していないバンド幅をフルにしようとしたのが Extended-1553 である。図 は Extended-1553 のコンセプトを絵で現したものである。参考までに MIL-STD-1553 のケーブルやスタブ写真を載せておく。

http://www.vmecritical.com/pdfs/DDC_Aug05.pdf



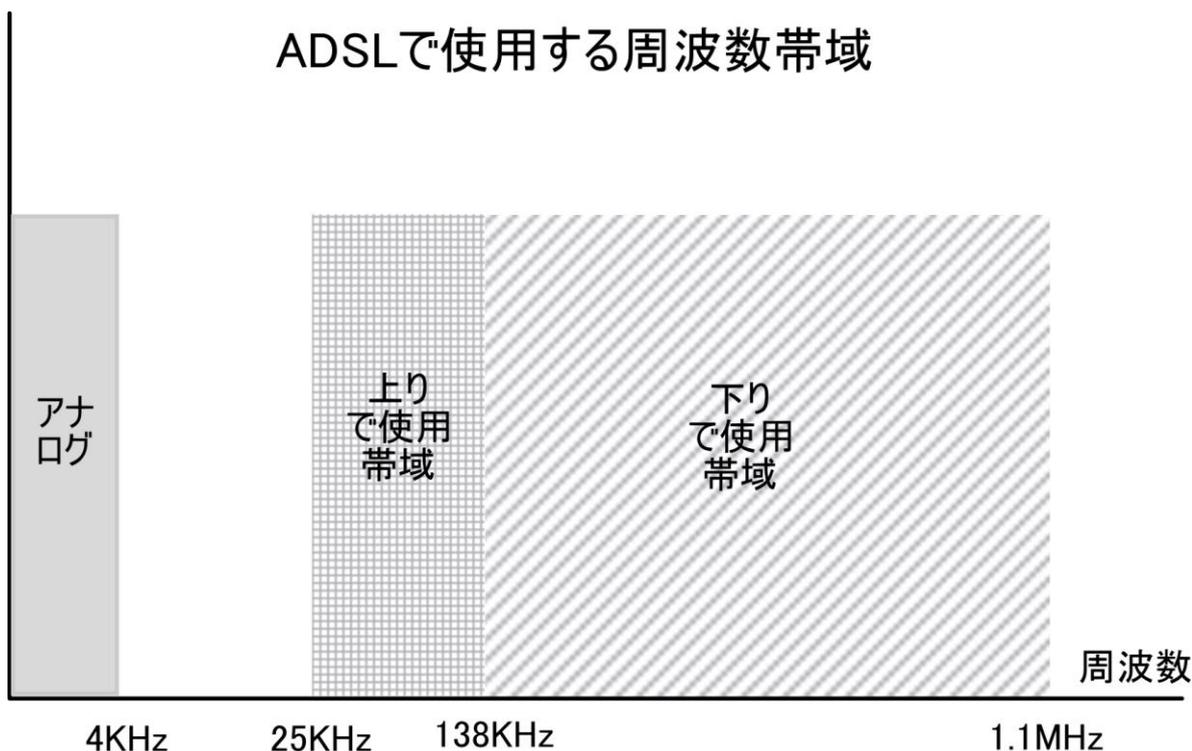
③ ADSL 技術の転用

現在のインターネット接続環境を見ると光ファイバーや高速無線通信が当たり前になっている。しかし 2000

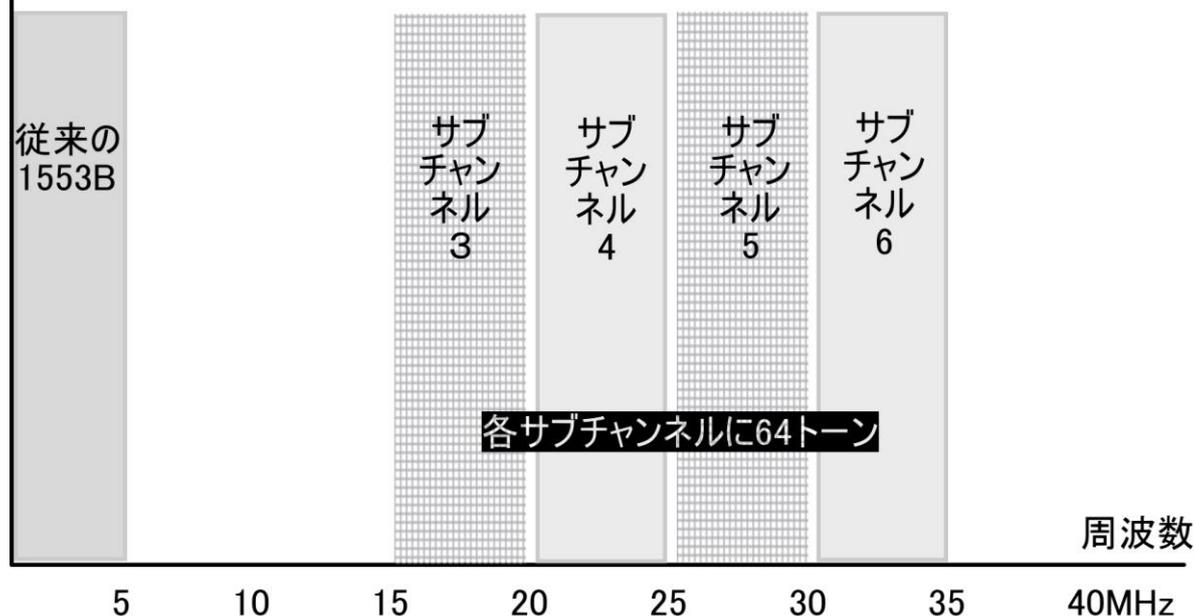
年頃には通常のアナログ電話回線（PSTN：ツイストペア）を使用して 9600bps/14.4kbps/56kbps などのモデムでインターネット通信が行われていた時代であった。その時 ADSL（Asymmetric Digital Subscriber Line：非対称デジタル加入者線）が登場して、インターネット通信が一気に高速化された事実がある。ここで重要な点が2つある、1つ目は既存のアナログ電話回線を使ったという点、2つ目は既存のアナログ通話を活かしつつ高速デジタル通信を追加したという点である。その後 2005 年頃から FTTH（Fiber To The Home）の光通信が登場し始めたが、光通信網を構築してサービスエリアを拡大するには多大なコストと時間を必要とした。FTTH は 2010 年には 35%の世帯普及率となりつつあるが、それまでの間に ADSL の果たした役割は大きかったと言える。ここで紹介する Extended-1553 は基本的には ADSL の技術の転用である。既存のケーブルを利用して空いているデータ転送領域（または使われていなかった周波数帯域）を活用して、新たなデジタル高速通信を追加する技術である。ADSL では電話で話しながらインターネットのデジタル通信が可能であった点は、Extended-1553 が従来の 1553B に影響しないで共存できる点と似ている。表 に ADSL と Extended-1553 に比較を示す。

	ADSL	Extended-1553 V1.1
サブキャリア	512 トーン/4Khz 間隔 下り：448-480 トーン 上り：32-64 トーン FDD（周波数分割複信）	512 トーン/76Khz 間隔 8 サブバンドで各 64 トーン TDMA（時分割多元接続）
トレーニング	連続トレーニング 開始時に受け側で制御	連続トレーニング バスのスケジュール制御
ポイントの数	2 か所（ポイントトゥポイント）	マルチドロップ RT×64 個まで
トーンマップ	トーンあたり可変ビット数	トーンあたり可変ビット数
古い信号との共存	音声帯域の信号と共存が可能	MIL-STD-1553B との共存が可能
エラーコレクション	トレリス符号化変調 +リードソロモン	符号連結畳み込みリードソロモン

ADSLで使用する周波数帯域



Extended-1553 周波数帯域



④ マルチキャリア方式/OFDM の技術について

ここで、ADSL や Extended-1553 で使われているマルチキャリア方式や QAM 直角位相振幅変調 (Quadrature Amplitude Modulation) について説明する。MIL-STD-1553B が使用している周波数帯域は 5MHz までの帯域である。先の“ケーブルの実力”で述べたように MIL-STD-1553B の通信路容量としては 300M 程度までである。そこでマルチキャリア変調方式を利用してより多くのデータを転送するのが Extended-1553 の基本概念である。さらに隣り合ったサブキャリアが干渉を起こしにくくて、より多くにサブキャリアを使える OFDM 方式 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing : 直交周波数分割多重) を利用している。

ウィキペディアの“OFDM”のページには次のような説明があるので参照していただきたい :

データを多数の搬送波 (サブキャリア) に乗せるのでマルチキャリア変調に属する。これらのサブキャリアは互いに直交しているため、普通は周波数軸上で重なりが生じる程に密に並べられるにも関わらず、従来の周波数分割多重化方式 (FDM) と異なり、互いに干渉しない利点がある。サブキャリアは高速フーリエ変換 (FFT) アルゴリズムを用いて効率的に区別できる。

OFDM は広帯域デジタル通信において、無線/有線の区別を問わず広く使われている。具体的な応用としてデジタルテレビや放送、ブロードバンドインターネット接続が挙げられる。

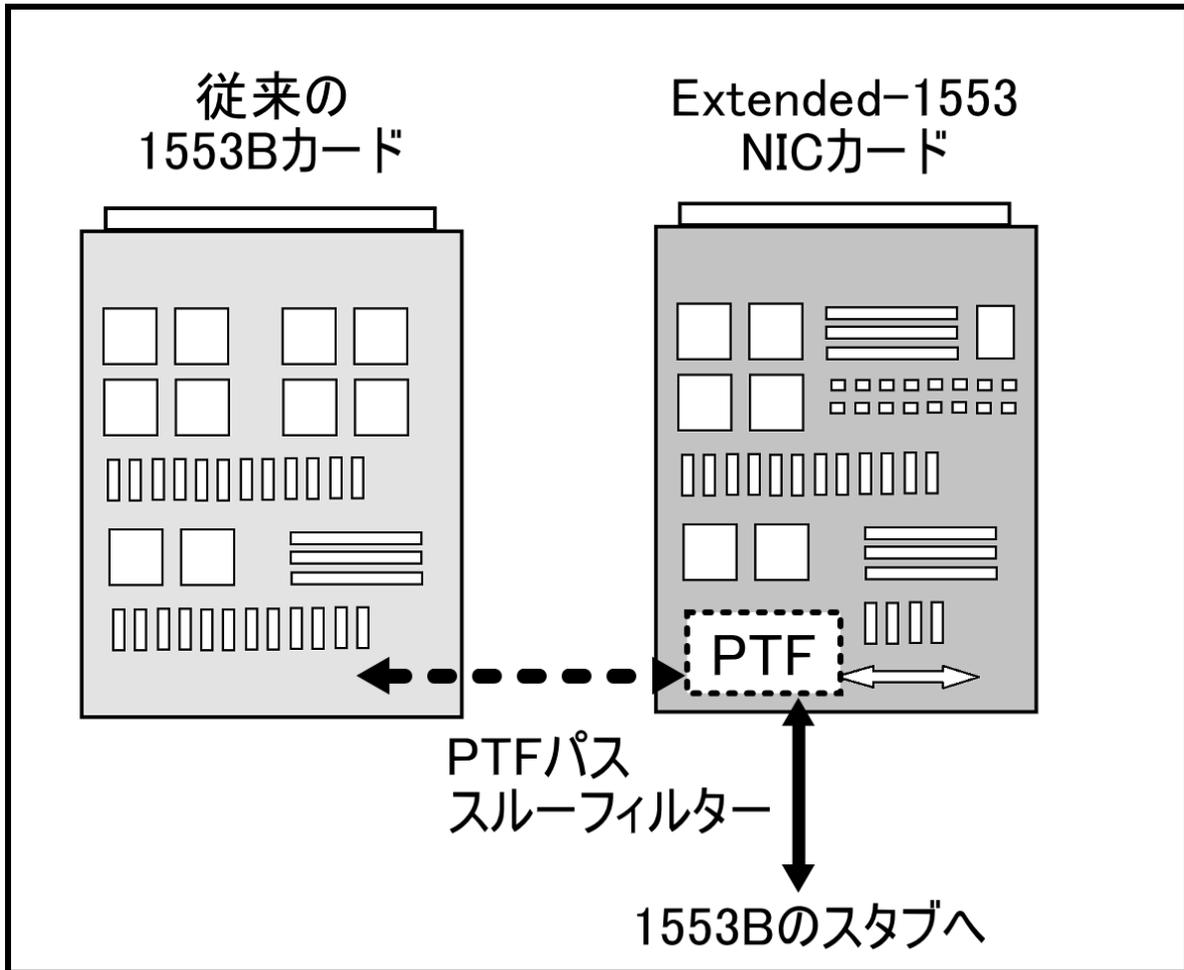
各々のサブキャリアは直交振幅変調 (QAM) 等の従来通りの方式で、低シンボルレートで変調される。この段階でのデータレートは、同じ帯域幅のシングルキャリア変調と比較すると同程度である。では主要な長所は何かと言うと、複雑なフィルタ回路なしでも悪い伝送路 (チャネル) 状況に対応できる点である。具体的には長い銅線による高周波の減衰、マルチパスによる狭帯域干渉や周波数選択性 (フェージング) 等に強い。OFDM は、高速の変調を受けた単一の広帯域幅信号ではなく、ゆっくりとした変調を受けた多数の狭帯域幅信号を使っているとみなせる。このためチャネルのイコライザは簡易で済む。

シンボルレートが低いおかげでシンボル間のガードインターバルが利用できるため、時間軸上での拡散への対処や、符号間干渉 (ISI) の除去が可能になる。さらにシングルキャリアネットワークの構成が容易になる利点もある。これは遠距離にある複数の送信機からの信号同士が強め合うように重ね合わせることができるため

ある

⑤ 従来の 1553B と Extended-1553 の共存

従来の MIL-STD-1553 と Extended-1553 の共存を考えると 2 つのトポロジーが考えられる。 1 番目は従来からの搭載機器 (LRU) に Extended-1553 を追加して同じスタブからの信号をシェアする場合。 この場合は新しい Extended-1553 の NIC (ネットワークインタフェースカード) に PTF (パススルーフィルター) を載せて、そこからの信号を旧 1553B へ接続することになる。 図 参照。 ADSL ではスプリッターを用いて音声電話帯域とデータ通信帯域を分けて同時通信を可能にしていた。 Extended-1553 の PTF の役目と同様である。



搭載機器 (LRU) が新旧の両方の 1553 ノードとの通信が必要な場合は、両方の NIC を持つ必要がある。この場合スタブからの 1 つの接続をこの PTF で振り分ける接続になる。

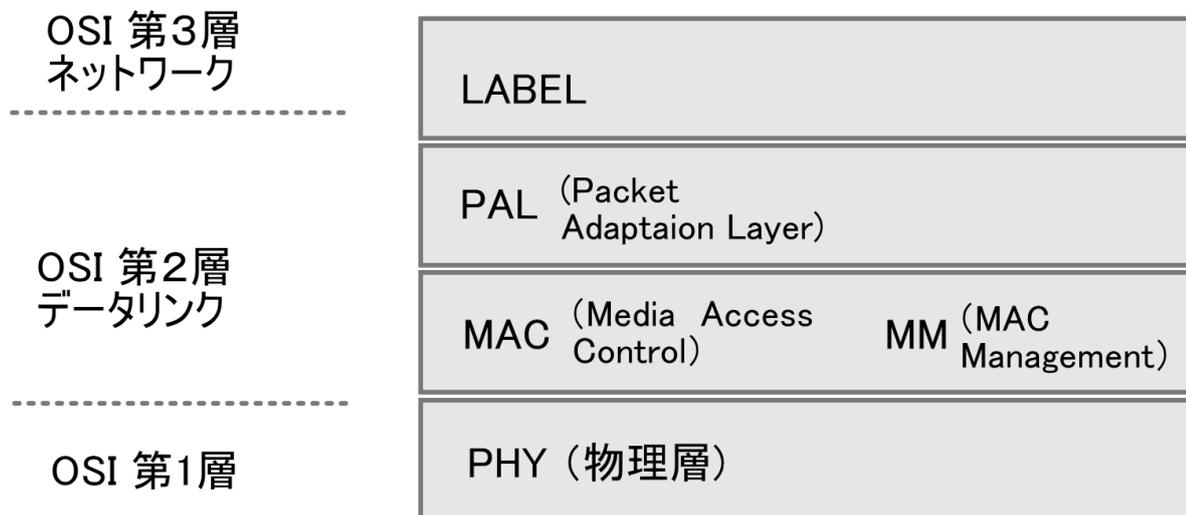
2 番目は同じバス上に別の搭載機器 (LRU) に新旧の 1553 が存在する場合である。 この場合は特別にフィルタなどを追加しなくても新旧の 1553 の信号が干渉しないことは確認済みである。 ここに Extended-1553 の動作検証も例を示す。 いずれの場合も実機で使われている搭載コンピュータとの動作検証である。

- 実機での飛行試験
 - A-3: 2006 年にフライト,
 - F-16: 2007 年にフライト
 - 安全性インテグリティレベル (Safety Integrity Level) での試験
 - C-17: 90m のケーブル上に 20 台の搭載機器 (LRU) を繋いでの検証試験
 - アパッチ: 20m のケーブル上に 15 台の搭載機器 (LRU) を繋いでの検証試験
- これらの他に F-18、C130、EH-10 などの機体でも動作検証行われた。

⑥ Extended-1553 のプロトコルレイヤーとフレーム

E-1553 のプロトコルレイヤーを説明する

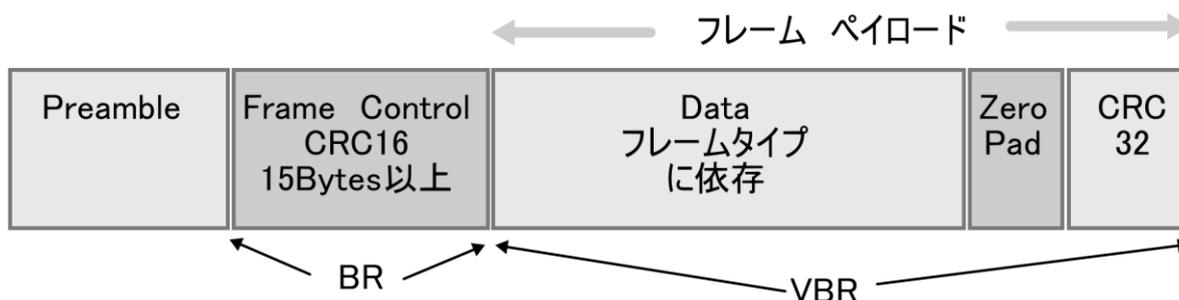
- レイヤー 1 : PHY 物理層
- レイヤー 2 : DLL (データリンクレイヤー) は次のサブレイヤーからなる
MAC (Media Access Control)、PAL (Packet Adaption Layer) ,
LABEL Layer、MM (MAC Management Layer)



E-1553 上の MCW には次の 2 つの信号が定義されている

- BR (Basic Rate) 基本レート
最も安定しているレート (1~5Mbps) で、ネットワークのブートやフレームコントロールなどを行う。バイナリーシフトキーイングで全ての RT が理解できる。
- VBR (Variable Bit Rate) 可変ビットレート
BR よりも高速通信で使われ信号で、コヒーレント QAM を使う。

Extended-1553 の基本的なフレームの構造を図 1 に示す。



VBR 可変ビットレートはトレーニングにより帯域幅の利用を最大限に生かすためにトーンマッピングが行われる。図 1 で示される各サブチャンネルのレベルはフラットになっているが実際は周波数が高くなるにつれてレベルが低くなる。トーンマッピングは RT ペアで行われ、MAC マネージメントの中のトーンマップメッセージで行われる。次に MAC フレームのタイプを示す。

- BCF (Bus command frame)
- TRF (Terminal response frame)
- TAF (Terminal acknowledgement frame)
- MMF (MAC management frame)

- TF (Training frame)
- ATF (Arbitrary test frame)

⑦ 他的高速通信にたいする優位性

Extended-1553 以外的高速通信を採用する場合とのコストの比較を下の表に示す。例として戦闘機 (F-16 Blk50、200 機分) の搭載ユニット 2 個 (コックピットディスプレイとミッションコンピュータ) を Extended-1553 対応に置き換えた場合の総費用の比較である。これはあくまで Edgewater 社の試算であることをコメントしておく。

	Extended-1553	Giga Ethernet	Fiber Channel
NRE コスト	\$ 1049K	\$ 1279K	\$ 1279K
組込み費用	\$ 1641K	\$ 65898K	\$ 65898K
部材代金	\$ 8775K	\$ 3636K	\$ 43425K
スペア代金	\$ 2193K	\$ 9090K	\$ 10856K
購買や管理費	\$ 1645K	\$ 6817K	\$ 8142K
全費用	\$ 15304K	\$ 119445K	\$ 129601K

5. E1553 の利用状況

① Stanag7221 で標準化

カナダの Edgewater 社が開発した Extended-1553 は、MIL-STD-1553 の新しい Noticed による標準化ではなく、STANAG7221 として標準化の作業中である。名称が Broadband - Real Time Data Bus (B-RTDB) となり、下記のサイトで詳しい情報が得られる。 <http://cobham.era.co.uk/stanag-7221/>

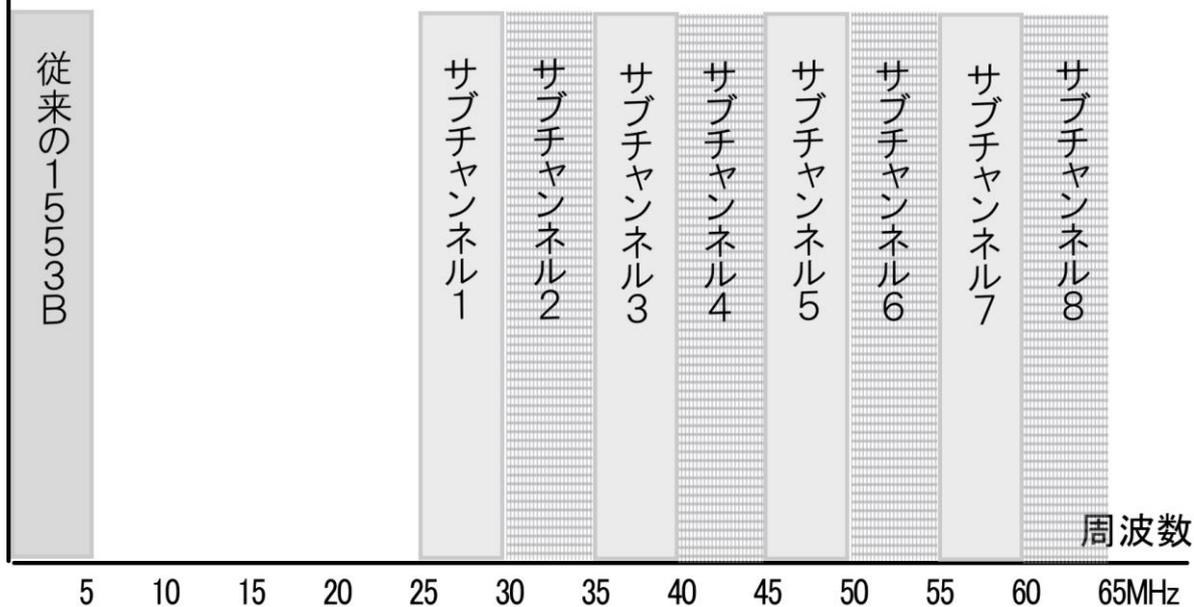
② LINK16 で大きく採用

統合戦術情報伝達システム (Joint Tactical Information Distribution System, JTIDS) は米軍や NATO 軍が使用している戦術データリンクの一つで日本の自衛隊でも導入の準備が進められている。陸海空のあらゆる軍用プラットフォームがひとつのネットワークとして接続させることができる。この JTIDS を元に運用されるリンク 16 のアップデートプログラムにおいて Extended-1553 が採用されることが決まった。具体的には MIDS-LVT 端末 (Multifunction Information Distribution System- Low Volume Terminal) の開発において 100Mbps の Extended-1553 が採用された。

③ 更なる改良

現在の Extended-1553 はバージョン 1.1 で 4 個のサブチャンネル (5 MHz の幅で 15 から 35MHz) を使っている。次の仕様 (バージョン 1.2) では使用する周波数帯域をシフトさせ 25MHz から 65MHz にして (バンドシフトして) 8 個のサブチャンネル使う予定である。これによりスループットは 200Mbps になる予定である。

Extended-1553 Ver1.2 周波数帯域



6. Extended-1553 の利用可能な製品

① Extended-1553 の PMC カード

現在 Edgewater 社から EHS-PMC5601 の型番で Extended-1553 の PMC カードが発売されている。この PMC カードは耐環境性を持ち（動作温度-40°Cから 85°C、振動・衝撃 MIL-STD-810F、コンダクションクーリングなど）軍用の機体に搭載可能である。既存の MIL-STD-1553B Notice 4 のネットワークのケーブルやカプラを利用して最大 100MBPS の高速通信を追加させることが可能である。

- Extended 1553/ STANAG7221 (B-RTDB) インタフェース
- MIL - STD-1553B Notice 4 と MACAIR 準拠
- Leon III Core を実装
- VxWorks 5.5.1 のドライバをサポート
- Single - width PMC (33/66 MHz PCI インタフェース)
- IEEE 1149 デバッグ・ポート
- 32 - bit PCI Host Bridge
- Built - in Hardware DMA
- バス・コントローラ又はリモート・ターミナル設定
- Built in Error 検知と修正
- ソフトウェア開発キット (SDK) サポート



② Extended-1553 の評価キット

このキットは既存の標準的な1553ケーブル、スタブ及びターミネータ上にE1553を「オーバーレイ」することにより、Extended-1553を迅速に評価する手段を提供します。

主な仕様は次のようである

- VxWorksの動くシングルボードコンピュータ2台（VMEまたはcPCIカード）
- ノートPC 2台
- MIL-STD-1553B 標準ケーブル、バスカプラ、ターミネータ
- EVKアプリケーションソフトウェア、Extended-1553モニタSW
- デモアプリケーション（高速ビデオの録画と再生）
- マニュアル、ドキュメント
- 可搬型のケース



③ ソフトウェア開発キット

Extended-1553 の評価キットとは別にユーザ毎のアプリケーション開発の為に GUI ベースのツールセットが提供されている。

- システム コンフィギュレーション ツール
- ネットワーク アセスメント ツール
チャンネルの評価、モディファイ、各パラメータのインポート&エクスポート

7. おわりに

ここまで紹介してきた新しい MIL-STD-1553 バスの特徴を要約して箇条書きにする

- 現在の MIL-STD-1553B のケーブル配線、カプラを使い新たに 100Mbps の高速通信を可能にする。
- 独立したバスコントローラ有して、従来の 1553 とは独立的にスケジュールされる。

- これまでの MIL-STD-1553B と共存かつ影響を与えない。(干渉しない)
- 航空機などの近代化に対してコストメリットがおおきい
- 高速通信を必要とするユニットのみに適応させる

参考文献

- Edgewater 社 Presentation
- Edgewater 社のホームページ <http://www.edgewater.ca/>
- GE Intelligent platforms 社 MIL-STD-1553 tutorial
- <http://www.vmecritical.com/pdfs/DDC.Aug05.pdf> (DDC 社 Michael G. Hegarty 氏レポート)
-