

5C-6

S400 対応 IEEE 1394 長距離アダプタの開発丹生 隆之 齊藤 朝樹 山崎 俊太郎 竹内 純一* 高橋 幹* 中野 文雄*
NEC C&C メディア研究所、*C&C LSI 開発本部**1 はじめに**

近年、AV 機器や放送機器あるいは産業用制御機器のデジタル化が急速に進んでいる。一方、インターネットの商用化や操作性の向上に後押しされて、PC が家庭に浸透し、一般ユーザが PC を家電として扱うようになりつつある。このような状況から、(1)転送速度が 100Mb/s(S100)~400Mb/s(S400)と高速である、(2)非同期転送 (Asynchronous) と同期転送 (Isochronous) の両方をサポートしているため、映像、音声、データ等を同時に扱える、(3)コネクタ挿抜の検出、挿抜が起こった場合のバスの初期化、さらにバス構成に変化があった場合にはバスに接続された機器の情報収集、これら全てを機器が自動的に行うため取り扱いが容易である、(4) PMD (Physical Medium Dependent) までを一体化した IC 化による低コスト化の実現、という特徴を持つシリアルバス IEEE 1394[1] (以下 1394 と記す) が家電業界やコンピュータ業界あるいは放送業界といったさまざまな分野から注目を集めている。

1394 はシリアル SCSI という位置づけで仕様化が進められたため、1394 黎明期には PC とその周辺機器の接続、あるいは AV 機器間の接続といった局所的な使用法が主流となることが予想される。ところが今後さらに 1394 を標準装備した多様な機器が市場に現れれば、様々な場所にある様々な機器を相互接続したい、すなわち 1394 ネットワークを構築したいという要求がでてくることが予想される。ここで課題となるのが「ノード間距離は 4.5m 以下」という 1394 の制限である。

我々はこれまでに、各ノードに自動的に割り振られるノード ID を消費せずに、既存 1394 の電気信号を光信号に変換してリポートする、いわゆる Sub-PHY 方式での長距離アダプタ (S100 対応) [2] や 1394-1995 規格に準拠した PHY 機能を実装した、いわゆる Full-PHY 方式の長距離アダプタ (S200 対応) [3] を開発し、ホームネットワークへの適用を提案してきた。今回、我々は長距離伝送用ポートを備えた S400 対応の物理層 LSI を新規に開発し、高速・小型化した長距離アダプタにより 500m までの長距離化動作を市販の 1394 機器を使用して実現し、その有効性を確認したので報告する。

2 長距離 1394 の概要**2.1 1394 バスの構成**

既存 1394 の仕様では、1ノードが最大で 16 ポートまでをサポートすることが可能である。そのため、既存 1394 デバイスではブランチ接続やデイジーチェーン接続によりバスを構成することができる。バスの規模については(1)接続可能な最大ノード数、(2)最大許容遅延時間で定義される。最大ノード数は、各ノードに割り当てられる番号 (PHY_ID) を記載するレジスタ領域が 6 ビットで定義されていることから 63 ノードに制限さ

Development of IEEE 1394 Long-haul Adapter for Transmission Speed of S400*Takayuki Nyu, Tomoki Saito, Shuntaro Yamazaki,**Jun-ichi Takeuchi*, Miki Takahashi*, Fumio Nakano**

NEC Corporation C&C Media Research Laboratories, *C&C LSI Development Division

4-1-1 Miyazaki, Miyamae-ku, Kawasaki 26-8555, Japan

e-mail : new@ccm.cl.nec.co.jp

れる。また、Asynchronous パケット送信時にアービトレーションの公平性を維持する手順が規定されており、

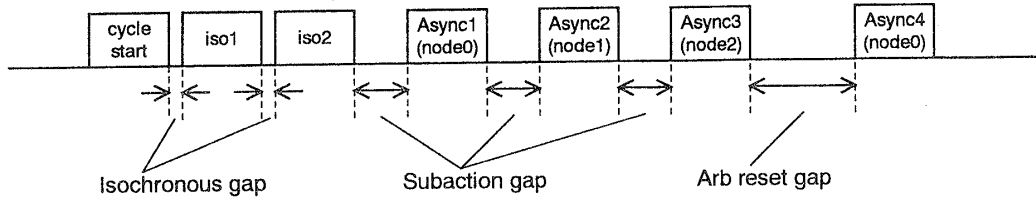


図 1:パケットインターバル

この規定により最大許容遅延時間が決定される。以下にこの許容遅延時間について示す。

1394 では (1) Isochronous 転送と (2) Asynchronous 転送の両方をサポートしている。

Isochronous 転送のフェーズと Asynchronous 転送のフェーズは図 1に示すように Subaction gap と呼ばれる gap により区別される。また、Subaction gap よりも大きい Arb reset gap と呼ばれる gap が定義されており、Arb reset gap から次の Arb reset gap までの区間は Fairness interval と呼ばれる。Fairness interval 区間では同一ノードは1つの Asynchronous パケット送信しか許されない。バスの最大許容遅延時間は、全てのノードが一樣に Fairness interval を検出できる範囲から決定される。具体的には [Arb reset gap > subaction gap +

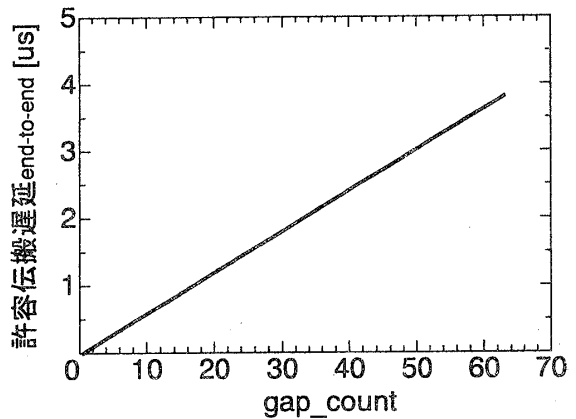


図 2:gap_count と許容遅延時間の関係

arb delay + 最大往復伝搬遅延時間]の関係式により決定される。ここで、arb delay はノードがバスに対してアービトレーションを開始するまでに待たなければならない時間である。なお、Arb reset gap、subaction gap および arb delay は gap_count と呼ばれるパラメータの関数であり、従って許容伝搬遅延時間は gap_countにより変更が可能である。許容伝搬遅延時間 (End-to-End)と gap_countの関係を図 2に示す。

gap_count=63 の場合には許容伝搬遅延時間は約 3.9us となる。

物理層でのポートからポートへのリピータ遅延(以下 PHY_DELAY と呼ぶ)が 1394-1995 規格で規定された最大値 144ns、ケーブル長が 1394-1995 および 1394a で規定された最大伝送距離 4.5m であると仮定した場合、gap_count=63 の場合には最大 23 ホップのダイジーチェーン接続が可能となる。このときバスの End-to-End の距離は図 3(a)に示す通り約 100m となる

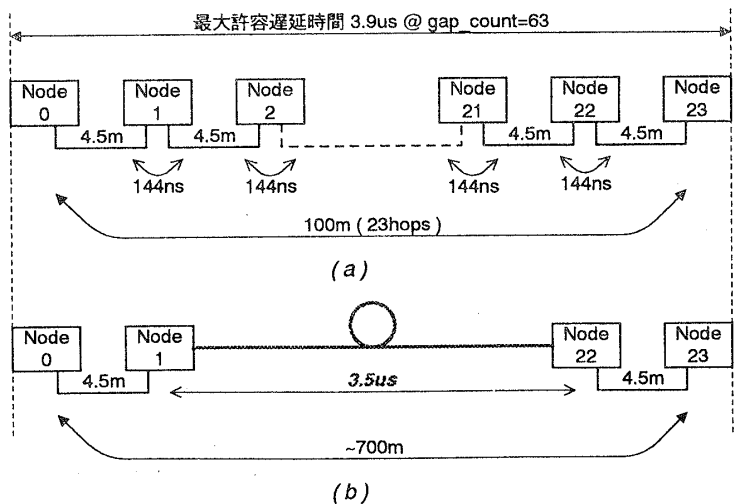


図 3:長距離バスの構成例

が、図 3(b)に示す様に PHY_DELAY を伝送路遅延に割り当てることにより End-to-End の伝送距離を延長するようなバス構成が期待できる。そこで、以下では図 3(b)の様なバス構成を可能とするための長距離化技術について示す。

2.2 長距離化における課題

既存 1394(1394-1995 および P1394a)においては、パケット送受信時に DS-Link 方式と呼ばれる伝送方式を採用している。DS-Link 方式は Data 信号と Strobe 信号の2つの信号を伝送し、受信側で2つの信号の排他的論理和をとることによりクロックを生成する方式である。このため伝送距離が延長された場合には、Data / Strobe 信号間のスキューが大きくなり受信側で正常にクロック生成が行えずパケット受信が行えなくなる。また、パケット送信の前にはそのパケットの速度を表す信号(speed signal と呼ばれる)が伝送される。speed signal はパケット速度を電圧レベルで表現した信号(例えば、S400 は 1.2V, S200 は 1.5V)である。そのため、伝送距離が延長されると伝送路損失のため受信側で正常にパケット速度を検出できなくなる。そこでノード間距離の長距離化を実現する場合には

- (1) データ伝送のシリアル化
- (2) speed signal 等のアナログ信号のデジタル化

を行う必要がある。また、本来 4.5m 以下のノード間距離を想定して仕様化されているため、ノード間距離を延長した場合にはバスが構成できない等の問題が生じる。そのため、ノード間距離を延長する場合には

- (3) バス構成手順の長距離化への対応

を行う必要がある。

2.3 P1394b の仕様概要

既存 1394 の高速化および長距離化を実現する拡張仕様[4]が現在 P1394b W.G.において審議されている。P1394b では主に(1)複数の伝送媒体の導入、(2)シリアル伝送用の符号化方式の導入、アナログ信号のデジタル信号へのマッピング、(3)シリアル伝送ポート(以下 Beta ポートと呼ぶ)の初期化手順の導入、および(4)パケット転送効率を上げるための新規バス調停手順の導入の検討が行われている。

新たに定義された伝送媒体とその適用範囲の関係を表1に示す。UTP CAT5(Unshielded Twisted Pair cable Category 5)は速度クラス S100(100Mb/s)に限定され、100m までの伝送が可能である。POF(Plastic Optical Fiber)および HPCF(Hard Polymer Clad Fiber)は速度クラス S200(200Mb/s)以下の速度で、POF は 50m まで、HPCF は 100m までの伝送がサポートされる。速度クラス S400(400Mb/s)以上では GI50 MMF(Multi-Mode Fiber)が定義され、その伝送距離は 100m までをサポートする。

シリアル伝送用の符号化方式としてはスクランブラとファイバチャネルやギガビットイーサネット等で使用されている 8B/10B ブロック符号化方式とを組み合わせた方式を採用している。また、パケットの速度情報を表す信号やパケット伝送時以外の領域で使用されるバス構成・調停用信号を表す 10 ビットコードを新たに定義している。

長距離化を実現する場合にはシリアル伝送を行うため、受信側にはクロックリカバリ回路が新たに必要になる。また、スクランブラが採用されていることから、Beta ポートにおいては(1)クロック再生、(2)シンボル同期確立、(3)スクランブラ・デスクランブラ同期確立までの初期化動作が必要となるため、新たにその手順が定義されている。

新たなバス調停手順(BOSS arbitration と呼ばれる)については長距離化のための必須項目ではないためここでは説明を省略する。

表 1: 伝送媒体とその適用範囲

伝送媒体	伝送距離	S100	S200	S400	S800	S1600	S3200
UTP CAT5	100m	●	×	×	×	×	×
POF	50m	●	●	×	×	×	×
HPCF	100m	●	●	×	×	×	×
GI50 MMF	100m	×	×	●	●	●	×

3 長距離伝送用物理 (PHY) 層 LSI

1394 の長距離化を実現する物理層 LSI を今回新たに開発した。以下にその詳細を示す。

3.1 アーキテクチャ

長距離伝送用物理層 LSI の構成を図 4 に示す。既に仕様化が凍結し、これから主流となることが予想される P1394a に準拠した S400 対応の物理層 LSI をベースに、既存の DS ポートのうち2ポートを残し、1ポートを長距離ポートとする構成を基本方針とした。これは、上位レイヤとのインタフェースである PHY/Link インタフェースとして P1394a 準拠のインタフェースを継承し、既存の AV 用途や PC 周辺機器用途 (SBP2 対応) に対応したリンクレイヤの LSI をそのまま使用することを可能にする。

長距離ポートの符号化方式はスクランブラと 8B10B ブロック符号化方式を組み合わせた方式を採用し、P1394b 草案準拠とした。また、2つのノードの長距離ポート間で行われる初期化手順 (図中 Port Connection State Machine) についても、P1394b 草案に記載の Tone 信号を使用した速度調停、同期コード (K28.5) によるシンボル同期確立、Training / Operation コードによるスクランブラ・デスクランブラ同期確立の手順に準拠している。

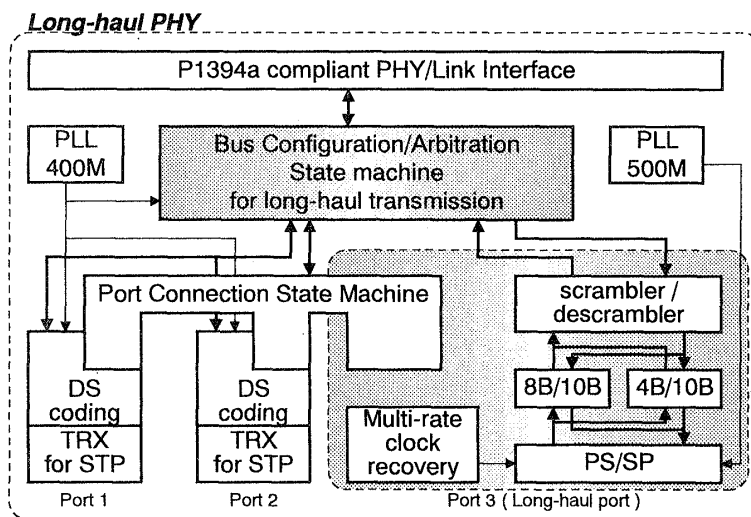


図 4: 長距離伝送用物理層 LSI のアーキテクチャ

クロック系は DS ポートで使用される 400MHz クロック、長距離ポートの送信側で使用される 500MHz クロック、長距離ポートの受信側で再生される 500MHz クロックの3系統からなる。

3.2 バス初期化手順の長距離化対応

物理層 LSI は Bus Reset プロセス、Tree ID プロセスあるいは Self ID プロセスと呼ばれるバス構成手順やパケット送信権獲得手順 (アービトレーション) が実装されている。この手順はノード間距離 4.5m を想定して仕様化されているため、長距離化した場合には期待通りに動作しない場合がある。以下にその問題点と開発した LSI で行った対策について示す。

[課題1: Short Bus Reset]

P1394a において、1394-1995 で仕様化されていたバスリセット動作 (Long Bus Reset と呼ぶ) に加えて、

Short Bus Reset と呼ばれるリセット処理が短時間で終了する手順が導入された。Long Bus Reset ではバスリセット信号の出力時間が166us であるのに対して、Short Bus Reset ではバスへの送信権を獲得した後にバスリセット信号を出力するために、その出力時間を1.3us と1/100 以下に短縮している。ここで Short Bus Reset が正常に動作するためにはノード間の往復伝搬遅延が1.3us 以下である必要がある。ところがノード間距離を延長した場合に Short Bus Reset が起こると、2つのノード間では図 6 の様な信号のやりとりが行われる。ノード間距離が長い場合に Node 1 は Reset 信号を出力し終わった際に、Idle 信号を検出し Tree ID プロセスへ移行する。Node 1 が出力した Reset 信号を受信した Node 2 が Reset 信号を1.3us 間出力する。この Reset 信号を Tree ID プロセスへ遷移した Node 1 が検出するために、Long Bus Reset を起こすことになる。そこでノード間距離が長いために遅れて到着する対向ノードからの Short Bus Reset 信号をマスク処理することにより、長距離伝送時においても Short Bus Reset の動作を保証している。

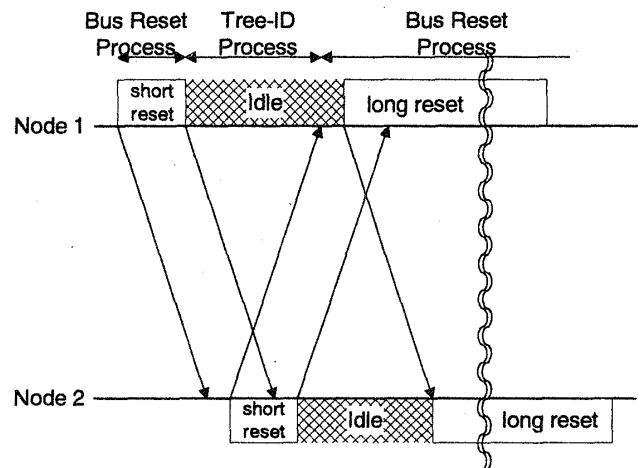


図 6: Short Bus Reset が正常に動作しない例

[課題2:Root Contention]

既存 1394 の Tree ID プロセスにおける手順を4つのノードで構成されたバスを例に図 5 に示す。まず最初に Node1 と Node2、Node3 と Node4 の間で Parent_Notify と Child_Notify 信号によるハンドシェイク手順によりそれぞれの親子関係が決定される。Node2、Node3 は Node1、Node4 に対して Child_Notify を送信すると同時に、Node2 と Node3 の親子関係を決めるために Parent_Notify をそれぞれ Node3、Node2 に対して送信する。送信するタイミングによっては、図 5 に示すように Parent_Notify が衝突 (Root Contention と呼ばれる) を起こす場合がある。長距離化した場合に問題となるのは、この衝突を解消する手順である。既存 1394 では衝突を検出したノードは、Parent_Notify の送信を停止すると同時にタイマーをスタートさせる。ある一定時間後にノードは再度 Parent_Notify の送信を開始する。この一定時間は ROOT_CONTEND_FAST (以下 FAST と略す) および ROOT_CONTEND_SLOW (以下 SLOW と略す) という2つの値が定義されており、どちらの値を採用するかはランダムに決められる。図 5 に示すように Root Contention を起こした Node2、Node3 がそれぞれ FAST、SLOW という様に異なった値を採用した場合に親子関係が決定され、ここでは Node3 が親 (root) としての役割を担うことになる。

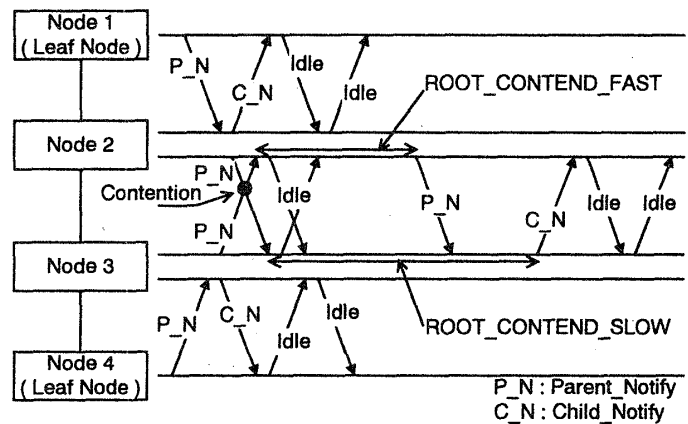


図 5: Tree ID プロセスの動作

それぞれ Node3、Node2 に対して送信する。送信するタイミングによっては、図 5 に示すように Parent_Notify が衝突 (Root Contention と呼ばれる) を起こす場合がある。長距離化した場合に問題となるのは、この衝突を解消する手順である。既存 1394 では衝突を検出したノードは、Parent_Notify の送信を停止すると同時にタイマーをスタートさせる。ある一定時間後にノードは再度 Parent_Notify の送信を開始する。この一定時間は ROOT_CONTEND_FAST (以下 FAST と略す) および ROOT_CONTEND_SLOW (以下 SLOW と略す) という2つの値が定義されており、どちらの値を採用するかはランダムに決められる。図 5 に示すように Root Contention を起こした Node2、Node3 がそれぞれ FAST、SLOW という様に異なった値を採用した場合に親子関係が決定され、ここでは Node3 が親 (root) としての役割を担うことになる。

Root Contention を解消するこの手順とノード間距離の関係は次式を満足する必要がある。

$$\text{FAST} > 2 * \text{Cable delay} + \text{PHY_DELAY} \quad \dots (1)$$

$$\text{SLOW} - \text{FAST} > 2 * \text{Cable delay} + \text{PHY_DELAY} \quad \dots (2)$$

P1394a では FAST = 760~800ns、SLOW = 1.6~1.64us、PHY_DELAY < 144 + 20 * n (n=0~15)と規定されている。長距離ポートでは符号化等の新たな処理が追加されているため PHY_DELAY は従来よりも大きな値となる。そこで仮に n=15 とするならば PHY_DELAY=444ns となり、ケーブル遅延を 5.5ns/m と仮定するならば、Root Contention を解消できるノード間距離は約 28m までとなる。従って、P1394a 仕様のまま長距離ポートを追加した場合には Root Contention を解消できないことが起こり得る。

そこで2つのタイマー値 (FAST, SLOW) を大きくすることによりノード間距離が延長された場合にも Root Contention が解消できるように変更を加えた。具体的には、バスの最大許容遅延 (3.9us) を考慮して、ROOT_CONTENTEND_FAST = 10us, ROOT_CONTENTEND_SLOW = 20us とした。

3.3 PHY レジスタへの速度設定

1394 バスの初期化プロセスの1つである Self ID プロセスでは、各ノードは自身の PHY ID や最大速度情報をパケット (Self ID パケットと呼ばれる) で全ノードに通知する。この最大速度情報は各ノードが持つ PHY register の Max_speed 領域の値を使用する。1394-1995 および P1394a 準拠の PHY はトランシーバを一体化した仕様であったため、伝送速度については PHY のロジック部とトランシーバで整合がとれており、Max_speed は固定値であ

った。ところが、長距離化を行う場合には、トランシーバと PHY が分離された形態となるため、トランシーバの伝送速度能力と PHY の伝送速度能力が必ずしも一致しない。

例えば、4つのノードで構成される図 7 の様なバスにおいて、Beta ポートに接続されるトランシーバの伝送能力が S100 であると仮定する。既存 1394 器機では、バスを構成するノードの速度情報は、Self ID パケットをベースに構築することが一般的となっている。そのため図 7(a) のように max_speed の値が Beta ポートのトランシーバ能力に依存して変化しない場合には、Node0 が Node3 に対してパケットを送信する場合には、Node1 と Node2 の間の伝送路が S100 に制限されているにもかかわらず、速度 S400 のパケットを出力するため、正常な通信が行えない。

そこで、PHY レジスタの max_speed 領域の値を固定値とせず、Beta ポートの速度能力に応じて変更可能とした。ただし、Beta ポートに接続がなく、アクティブ状態でない場合には max_speed 領域にはデフォルト値 (S400) が設定されることとし、必要以上に速度能力を制限しない仕様とした。例えば、図 7(b) では Beta ポートによる接続が Active であるため、max_speed は Beta ポートのトランシーバ速度である S100 に制限されている。これにより Node 0 と Node 3 との間の通信は S100 で行う必要があることが全ノードに通

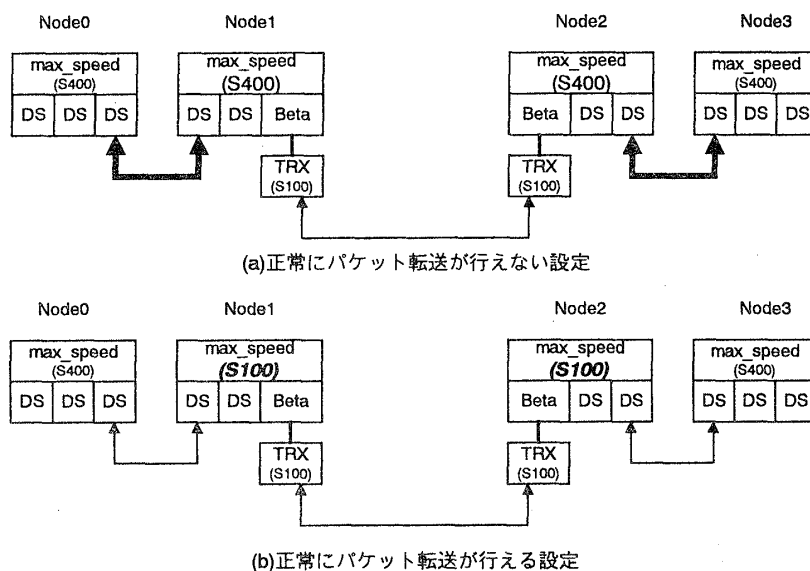


図 7: バスを構成するノードの速度情報

知され、パケット転送が正常に行える。

3.4 マルチレート・クロックリカバリ

速度自動認識&設定機能は 1394 の特徴の1つである。また、表1に記載されている様に伝送媒体によりサポートされる伝送速度は様々である。長距離ポートにおいて速度調停機能は P1394b 草案に記載の Tone 信号を使用した手順により実現している。また長距離ポートではクロックリカバリが必須となるが、このクロックリカバリは速度調停の結果に応じて、S100 (122.88MHz)、S200 (245.76MHz)、S400 (491.52MHz) のクロック再生が可能である。このことにより1つの PHY でいずれの伝送媒体をもサポートすることが可能となる。

表 2:主要諸元

項目	
パッケージ	144-pin LQFP (20mm x 20mm)
電源電圧	3.3V 単一
動作速度	速度クラス S100, S200, S400 をサポート
PHY/Link interface	P1394a draft2.0 準拠
ポート数	DS ポート x 2 長距離ポート x 1
長距離ポート	3.3V PECL レベル

3.5 主要諸元

開発した長距離伝送用ポート付き物理層 LSI の主要諸元を表2に示す。パッケージは 144 ピン LQFP、電源電圧は 3.3V 単一。動作速度は S400 まで対応可能である。上位のリンクレイヤとのインタフェースは P1394a に準拠し、ポート数は P1394a に準拠した DS ポートが2ポート、P1394b に準拠した Beta ポートを1ポートを備える3ポート PHY である。なお Beta ポートの電気レベルは、市販のトランシーバで幅広く採用されている PECL レベルとした。

3.6 長距離アダプタの構成

今回開発した LSI を使用した長距離アダプタおよび PCI ボードの外観をそれぞれ図 8、図 9に示す。DS ポートを2ポート備え、1394 ケーブルによる給電が可能となっている。長距離ポートには伝送媒体に依存したトランシーバを使用可能である。例えば、長距離ポートに石英ファイバ用トランシーバを実装し、伝送路に GI50-MMF を使用することにより、500m の DV 画像伝送を市販の 1394 器機を使用することにより確認している。

4 ホームネットワークへの適用例

今回試作した長距離アダプタをホームネットワークへ適用することも可能である。例えば、図 10 に示すように長距離アダプタを各部屋の“情報コンセント”として配置し、部屋間接続を POF/GOF/UTP により実現する。これによりアク



図 8:長距離アダプタの外観

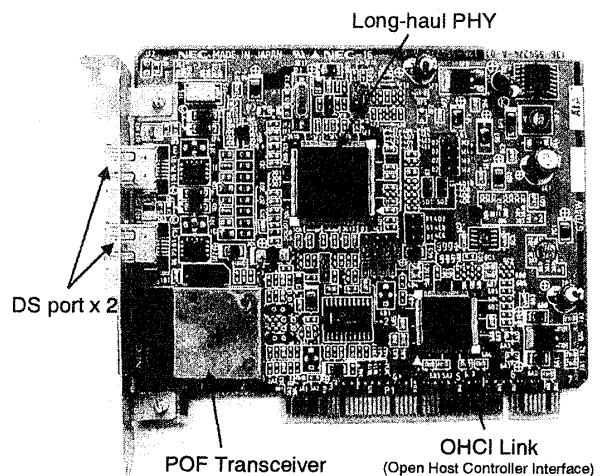


図 9:PCI ボードの外観

セス網とホームネットワークを繋ぐ Residential Gateway に対して全ての部屋からアクセスすることができ、各部屋からアクセス網へのアクセスが可能となる。室内は 1394-1995 および P1394a で規定されている 6pin および 4pin ケーブルを使用し、UNI の乱立によるユーザの混乱を防ぐ。

ホームネットワーク以外にも、FA の制御ネットワークや業務用 AV ネットワーク、あるいはオフィス LAN もアプリケーション領域として考えられる。

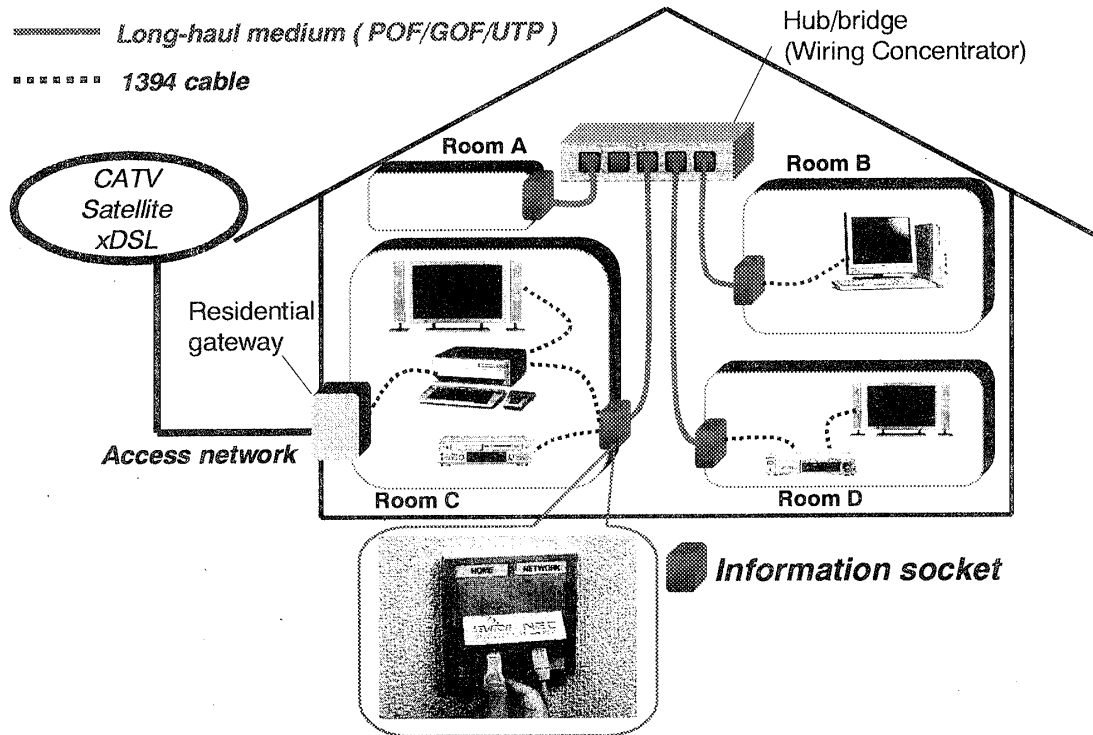


図 10:長距離アダプタを使用したホームネットワーク

5 まとめ

本報告では、新たに開発した長距離伝送用ポート付きの S400 対応物理層 LSI のアーキテクチャ、および長距離伝送を実現する上で必要となる既存 1394 仕様に対する変更点について明らかにした。また、これを使用した長距離アダプタと石英ファイバ、市販の 1394 器機を使用して、ノード間距離が 500m に延長された場合にも正常に動作することを確認した。

6 参考文献

- [1] IEEE Std 1394-1995 "IEEE Standard for a High Performance Serial Bus", Dec. 12, 1995
- [2] 丹生他, "IEEE 1394 POF ホームネットワーク", 信学ソ大 SB-7-4, 1996
- [3] 丹生他, "長距離 1394 アダプタ-TERMBOY-の開発", 信学ソ大 B-7-147, 1998
- [4] P1394b Draft 0.7 "P1394b Draft Standard for a High Performance Serial Bus (Supplement)", July 16, 1999
- [5] P1394a Draft 3.0 "P1394a Draft Standard for a High Performance Serial Bus (Supplement)", June 30, 1999