

5C-3 ホームネットワークにおける
IEEE 1394 赤外線ワイヤレス伝送技術

松田 淳一 丹生 隆之 土門 涉 山崎 俊太郎

NEC C&C メディア研究所

1. はじめに

近年、高性能PCの家庭への普及や家電のデジタル化に伴って、動画像のような大容量マルチメディアデータを家庭内でも扱いたいという要求が高まっている。さらに、家庭内のPCやデジタル家電機器を収容し、機器間での通信が自由に行えるホームネットワークに対する期待も大きい。このような背景のもと、高速シリアルバス IEEE 1394[1]が次世代のホームネットワークのインフラとして注目され始めている。IEEE 1394(以下、1394と記す)には、伝送速度が非常に高速(100Mbps(S100), 200Mbps(S200), 400Mbps(S400))・isochronous通信をサポートしておりリアルタイムデータの伝送が可能・Plug & Play, Hot-Plug-Inに対応しているといった特長があり、多くのPCやその周辺機器、AV機器が標準のデジタルインターフェースとして1394を搭載し始めている。

これまでに我々は1394をインフラに用いたホームネットワークの提案・開発を行ってきた[2]。図1-1に我々の提案する“1394マルチメディアホームネットワーク”の概念を示す。この1394ホームネットワークにおけるネットワークインフラのコア技術の一つとして、部屋内のワイヤリング技術があげられる。1394ホームネットワークにおいて部屋内での機器間接続は、IEEE1394規格に定められたメタルケーブルを用いて行うのが基本であるが、1394ワイヤレス技術をさらに適用することによって、より容易で扱いやすく柔軟な部屋内配線が実現できる。本論文では、この1394ワイヤレス技術を用いた部屋内配線用赤外線(IR)ワイヤレスアダプタの開発について報告する。

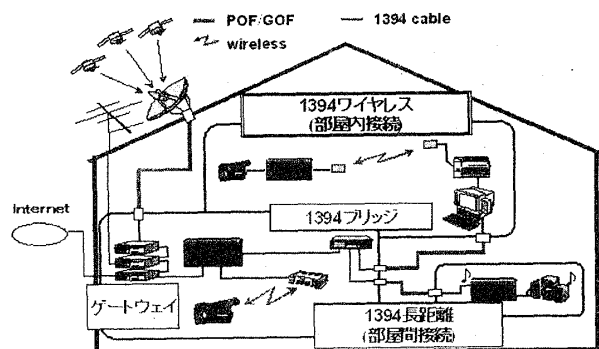


図 1-1 1394 マルチメディアホームネットワーク

2. ホームネットワークにおけるワイヤレス伝送技術

2.1. 1394 ホームネットワークの部屋内配線

図2-1は1394ホームネットワークにおける部屋内配線の概念を示したものである。1394ホームネットワークでは、部屋内の機器間接続には原則メタルケーブルを用いればよい。しかし、従来のメタルケーブルを用いた場合には機器間の距離は4.5m以下に制限される。多数の1394機器が部屋内に存在する場合、機器間の距離が4.5m以上になるケースが容易に起こりうる。それに対して、図2-1に示すように複数の中継器を用いることにより、メタルケーブルで機器間を接続することが可能だが、ケーブルの敷設・取り回しが煩雑、中継器の脱着が面倒、美観を損なうといった問題が発生する。

このような問題を解決する手段としてワイヤレス方式による1394伝送技術の検討を行った。

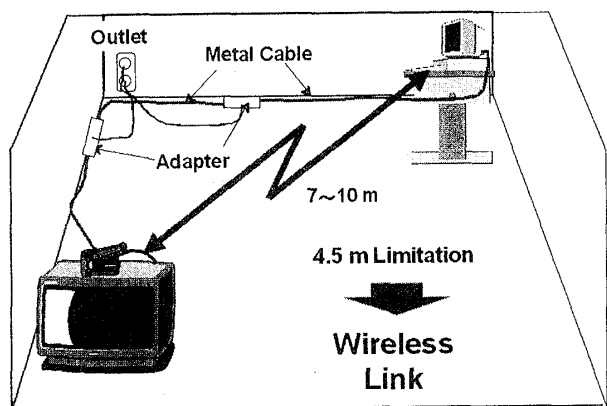


図 2-1 1394 ホームネットワークにおける部屋内配線

2.2. RF 方式と IR 方式の比較

1394 をワイヤレス化するにあたって物理層に要求されるのは以下の点である。

1. 伝送速度が 100Mbps 以上であること
2. エラーフリーであること
3. 他の家電機器の動作に対して影響を与えないこと

1394 の伝送速度は 100Mbps 以上と非常に高速である。ボトルネックをなくすためには、ワイヤレス通信方式にもこの伝送速度を実現することが要求される。また、isochronous モードでは物理層の符号誤りに対して確実なパケット転送を保証しないため物理層に対してエラーフリーであることを要求する。

さらには、家庭内で用いられる機器であるため、低コストであることが要求されるうえ、他の家電機器の動作に対して影響を与えないことや人体に対して安全であることが要求される。

ワイヤレス通信方式は電波(RF)を用いるものと赤外線(IR)を用いるものの二つに大別される。1394 をワイヤレス化するにあたり上記の点に関して両者の特性を比較した結果を表 2-1に示す。

RF 方式は一般に高いモビリティを実現できる。その反面、マルチパスフェージングの影響により品質を保ちつつ伝送速度を高速化するのは容易ではない。さらに、電磁放射の問題から他の家電機器の動作への影響が懸念される上、高度な変復調回路が必要となり低コスト化が難しい。

それに対して IR 方式は、ビームを十分に絞ることによりマルチパスフェージングの影響を排除でき、品質を保

持したまま伝送速度を高速化できる。さらに IR 方式では電磁放射による家電機器の動作に対する影響が抑えられる上に、単純な送受信器を使用できるため低コスト化も容易である。

以上のような検討から、今回 1394 をワイヤレス化するにあたって、我々は IR 方式を採用することとした。

表 2-1 RF 方式と IR 方式の比較

	RF 方式	IR 方式
高速伝送(100Mbps 以上)	△	○
エラーフリー伝送	△	○
家電機器への動作の影響	△	◎
コスト	△	◎

2.3. IR ワイヤレス方式の概要

図 2-2は代表的な IR ワイヤレス方式の概略を示したものである。IR ワイヤレス方式は、光送受信器を障害物で遮断されないように対向させて設置する見通し内(LOS: Line-Of-Site)方式と、壁・天井等からの反射を利用して通信を行うために光送受信器を対向させる必要のない見通し外(non-LOS)方式に大別できる。

LOS 方式は、設置時に光軸あわせを必要とするため機器のモビリティを制限してしまう反面、マルチパスフェージングの影響が少ないために高速化が比較的容易である。

一方、non-LOS 方式は設置時の光軸あわせが不要で機器のモビリティも高い。しかし、通信経路での信号パワーの損失が非常に大きいため、高出力ならびに高感度な光送受信器をアレイ状に用いたり、信号光の追尾機能などを用いるなどの対策が必要とされ、装置の小型化・低コスト化が困難である。さらに、マルチパスフェージングの問題のため高速化が難しく、現状実現できている伝送速度は 50Mbps 程度である[3]。

以上のような特性を考慮して、モビリティには制限があるが、高速性と低コスト性を兼ね備えた LOS 方式を我々は採用することとした。

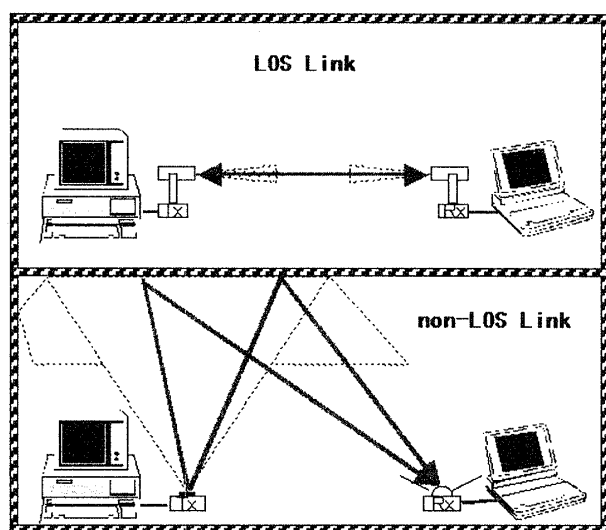


図 2-2 IR ワイヤレス方式の概要

3. 1394 S100 IR ワイヤレスアダプタの開発

3.1. IR ワイヤレスアダプタの基本コンセプト

部屋内における 1394 機器間のワイヤレス接続を実現するために、我々は前節の検討をもとに 1394IR ワイヤレスアダプタの開発を行った。このアダプタは現行の IEEE1394-1995 規格による電気データ信号と、光ワイヤレスデータ信号とを相互に変換する装置である。これを 2 台対向で用いることにより 1394 機器のワイヤレス接続が可能になる。

アダプタの構成を図 3-1 に示す。IR ワイヤレスアダプタは、IR ワイヤレストランシーバと P1394b[4] で審議中の 1394 長距離化機能を持つ 1394 b-PHY で構成され、2 つのメタルポートと IR ポートの計 3 つの 1394 ポートを持っている。メタルポートと IR ポート間の信号変換は、1394 b-PHY で行われる。つまり IR ワイヤレス方式自体は P1394b 非準拠であるが、これに準拠した長距離アダプタと、トランシーバ部以外は同じ構成となっている。

次節以降では、この IR ワイヤレスアダプタを実現する上で最も重要な IR ワイヤレストランシーバの開発について述べる。

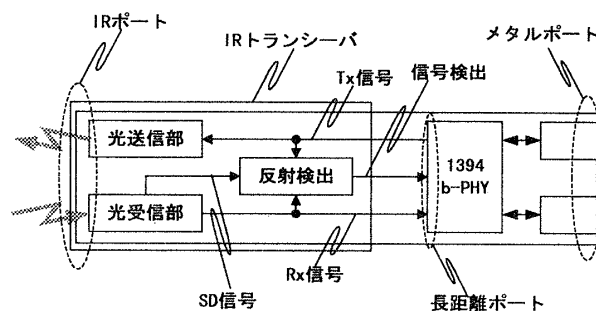


図 3-1 1394 IR ワイヤレスアダプタの構成

3.2. IR ワイヤレストランシーバへの要求事項

IR ワイヤレスアダプタを開発するにあたって、トランシーバに対して以下のようなことが要求される。

- i) 伝送距離 10m, 光軸あわせが容易
一般的な家屋の部屋内での最大距離は 7-10m と言われている。従って、最大伝送距離は 10m 程度が必要となる。また手での光軸合わせが可能でなければならず、許容オフセット角(図 3-2 参照)は $\pm 5^\circ$ 以上が必要である。
- ii) 眼に対する安全性
家庭内で使われるコンシューマ機器である以上人体、特に眼に対する安全性が確保されていなければならない。そこでレーザー機器の安全性に対する国際規格である IEC 60825-1[5]でもっとも厳しい Class 1 に準拠することとした。Class 1 とは光が目に入射しても本質的に安全なレベルを指す。
- iii) 反射光対策付き信号検出機能
1394 b-PHY の長距離ポートインターフェースはポートの接続状態を受信信号の有無により検出するための信号検出(Signal Detect, SD)を持つ。従って、IR トランシーバの光受信部も同様な SD 出力機能を備える必要がある。
さらに、IR ワイヤレス方式の場合には、通信経路が反射物で遮断された場合、自らの光送信部が送出した光信号が、光受信部に反射信号として入射することがある。このような場合、通常の SD では通信経路の遮断を検出できない。従って、光受信部に入射した光信号が反射信号であった場合には、通信経路が遮断されたものと判断し、1394 b-PHY に対して遮断を通知することができる信号検出回路が必要である。

iv) 安価

ホームネットワークへの適用を考えた場合、トランシーバは安価でなければならない。

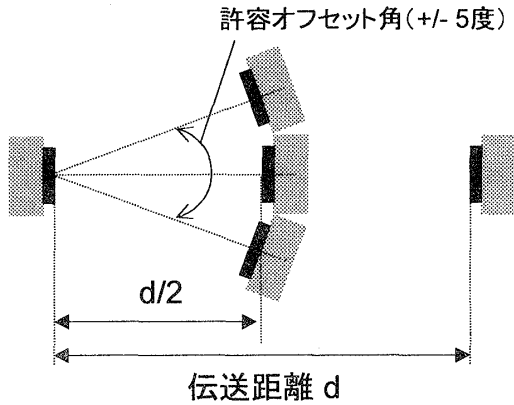


図 3-2 許容オフセット角の定義

3.3. 125 Mbps IR ワイヤレストランシーバの設計

具体的な設計にあたっては、前節で述べた要求事項を考慮し、表 3-1に示すような指針を設けた。

P1394b の長距離ポートでは、コーディング方式に 8B/10B 変換を用いる[4]。そのため、S100, S200, S400 をサポートするためにトランシーバに要求される伝送速度は 125Mbps, 250Mbps, 500Mbps となる。本節では 1394 S100 のサポートを目標とするため、IR ワイヤレストランシーバの動作速度は 125Mbps とした。

また、使用する波長を 850nm とすることで、発光直径が比較的大きく安全で安価な LED と、大面積・安価な Si-PD を利用することが可能になり、安価で十分な許容オフセット角をもったトランシーバを実現できる。

表 3-1 IR ワイヤレストランシーバの設計指針

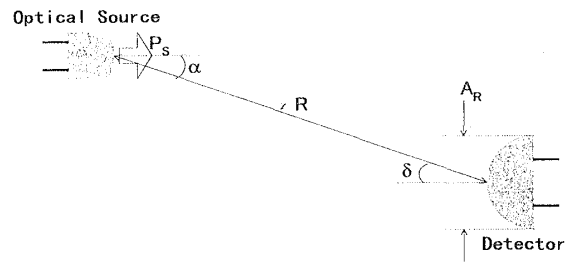
通信方式	LOS
伝送速度	125 Mbps
変調方式	OOK
許容オフセット角	+/-5° 以上
波長	850nm
使用素子	LED & Si PD
安全性	IEC 60825-1 Class 1 準拠
信号検出機能 (反射光対策付き)	有り

以上の設計指針に基づき、トランシーバの設計を行った。計算において、光源から空間に放射される光の分布はランバート分布に従うとした。この時、受信部に入射する光のパワー P は図 3-3に示すような式で表せる[6]。なお、計算では視野角 δ を 15° とした。

図 3-4に計算結果を示す。光受信部を直径 30mm の半球レンズと受光直径 14mm の Si-PD で構成し、その受光感度が -20dBm であった場合、光送信部に要求される光出力 P_s と放射角 α はそれぞれ $+16\text{dBm}$, $+/-4.5^\circ$ である。

一般的な LED を光源に用いた場合、 $+16\text{dBm}$ の光出力を 1 個の LED でまかなうことはできない。そこで、光送信部は 2 個の LED で構成することとした。また、放射角を最適化するために外部レンズ系をそれぞれの LED の前段に設置することとした。

また、安全性に関しては今回の設計では、発光部の直径が 5mm 以上とすることにより、Class 1 の安全性を満足することができる。



$$P = \frac{n+1}{2\pi} P_s \cos^n \alpha \cdot \cos \delta \cdot \text{rect}(\delta) \frac{A_R}{R^2}$$

P_s : 光源の端面出力

n : ランバート指数

ただし $\theta = \cos^{-1}(0.5)^{1/n}$

θ : 光源の放射角(半値)

$$\text{rect}(\delta) = \begin{cases} 1 & (\delta \leq FOV) \\ 0 & (\delta > FOV) \end{cases}$$

FOV : 受光部の視野角

A_R : 受光面積

R : 光源-受光素子間距離

図 3-3 トランシーバ設計に用いた計算式

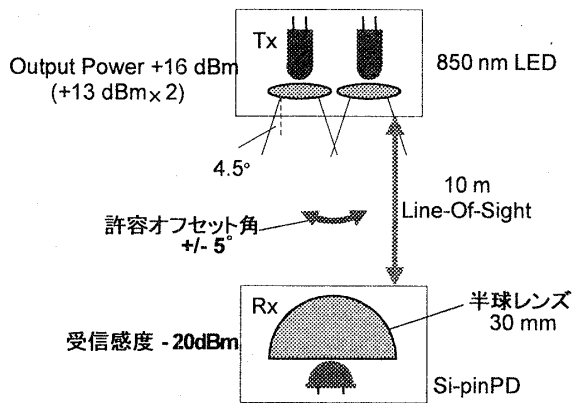


図 3-4 125Mbps IR ワイヤレストランシーバの設計

3.4. IR ワイヤレストランシーバの試作・評価

3.4.1. 光受信部・光送信部

前節の設計に基づき、IR ワイヤレストランシーバの試作を行った。光送信部での一組あたりの光出力および放射角はそれぞれ+12dBm, +/-4.3°であった。

図 3-5, 図 3-6に受信信号のアイパターンと試作した IR ワイヤレストランシーバの受光感度特性とを示す。アイ開口は良好で、受光感度は-21dBm@BER=10⁻⁹を実現した。測定された送信パワーと受光感度から、この IR ワイヤレストランシーバが伝送距離 10mを実現するのに必要なロスマージンを確保していることが確認された。さらに、光受信部の信号検出機能が正常に動作していることを確認した。

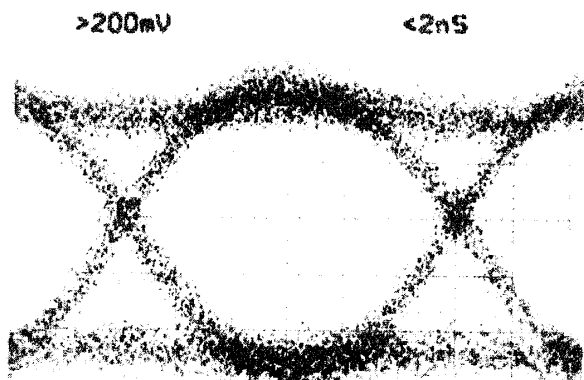


図 3-5 125Mbps IR トランシーバの受信アイパターン

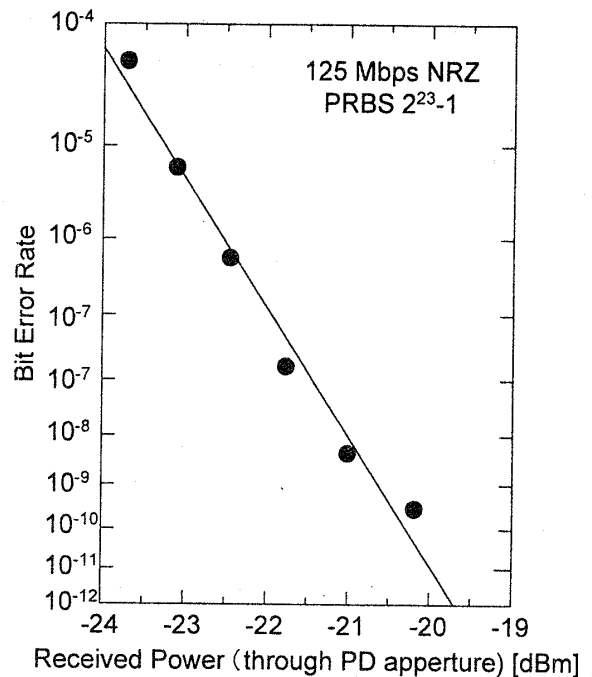


図 3-6 125Mbps IR トランシーバの受光感度特性

3.4.1. 反射信号検出部[7]

IR ワイヤレストランシーバは受信光信号の有無によって経路の遮断を認識している。通常の場合、経路が遮断された時にはトランシーバは 1394 b-PHY に対して経路の遮断を通知し、1394 b-PHY はバスの初期化・再構成を自動的に行う。

しかし、遮断の具合で反射信号が光受信部に入射している場合には、通常の SD 機能では遮断が検出できず、バスの初期化・再構成を行うことができない。そこで、反射信号検出回路を提案し、試作・評価を行った。

今回開発した反射信号検出回路のブロック図を図 3-7 に示す。反射信号を検出するためには、送信信号と受信信号の相関性を評価すればよい。ここでは二つの信号の排他的論理和をとることで信号間の相関を評価し反射信号を検出する構成とした。

ただし、反射の生じる位置は様々であるため、受信された反射信号の送信信号に対する伝搬遅延量は反射の生じた位置によって異なる。そこで 0~n ビット分だけ遅延させた複数の送信信号と反射信号の排他的論理和をとることとした。この場合、受信された反射信号はあらかじめ遅延させた送信信号の何れかと相関が強くなる。従って、全ての排他的論理和の出力の論理積をとることに

より、広範囲な伝搬遅延量に対応可能な反射信号検出回路が実現できる。その後、この反射信号検出回路の出力と光受信部が出力するSD信号との論理積をとり、判別結果を1394 b-PHYに通知することで、光受信部に反射信号が入射している場合であっても経路の遮断を認識できる。

今回設計した光ワイヤスリンクにおいてトランシーバ-反射点間距離は最大5mであり、反射光の伝搬時間は最大約33nsである。これは125Mbpsの信号の約4.2ビット分に相当するため、送信信号の遅延回路を5ビット分用意することにより、想定しうる全ての反射信号を検出することができる。

図3-8は試作した反射信号検出回路の評価結果を示したものである。測定はトランシーバの前に反射板を設置し、反射板とトランシーバ間の距離を変化させて行った。測定範囲は0-3.6mであり、3.6m以上の距離からの反射信号はレベルが低く、光信号として認識されなかった。この図に示されるように、測定範囲内において反射信号を正しく検出できることが確認された。

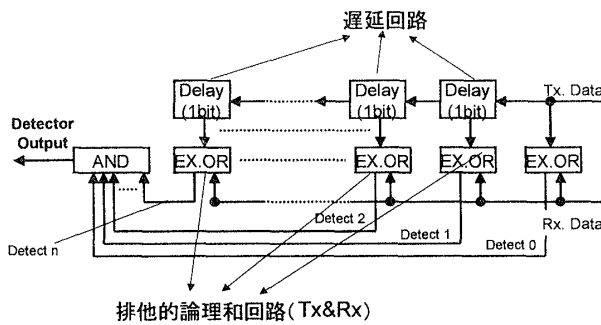


図 3-7 反射光検出回路の構成

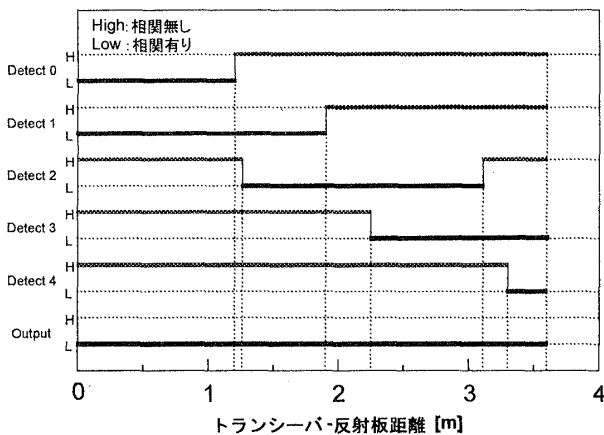


図 3-8 反射信号検出回路の評価結果

3.5. 1394 S100 IR ワイヤレスアダプタの試作・評価

前節で試作した IR ワイヤス トランシーバを用いて1394 S100 IRワイヤレスアダプタの試作・評価を行った。図3-9は試作したIRワイヤレスアダプタ“TERMBOY IR100”の外観である。外形寸法は130×160×50mm、消費電力は7Wである。

図3-10に試作したIR100の通信可能範囲を示す。本評価ではDV信号(約30MbpsのDigital Video信号)の伝送を行い、画質に劣化がなく伝送できる範囲を通信範囲として測定を行った。

この図に示すように最大伝送距離は10mだった。また、横方向の軸あわせトランスは距離5mの位置で最大±50cm(許容オフセット角±5°)であった。さらに、右斜線部(点線は測定限界)からの反射信号が入射している状態でも経路の遮断を正しく認識できることを確認した。なお、今回試作したIR100の光出力パワーは、Class 1の上限に対して1.4dBのマージンを確保していることをあわせて確認した。

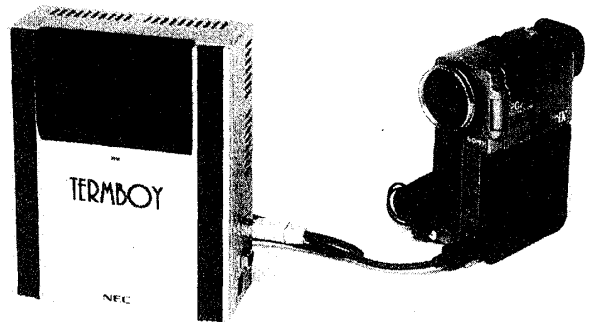


図 3-9 1394 S100 IR ワイヤレスアダプタ

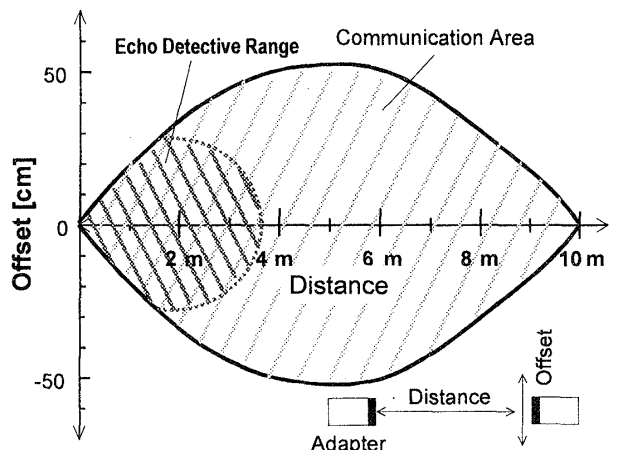


図 3-10 IR 100 の通信範囲

4. IR ワイヤレスアダプタの S200 サポートの検討

前節で開発した 1394 IR ワイヤレスアダプタは 1394 の最低速度である S100 にのみ対応している。しかし、今後 1394 機器が S200 以上のポートを持つようになることは容易に予測できる。そのため、IR ワイヤレスアダプタもホームネットワークでのボトルネックにならないために S200 以上のサポートが要求されるようになって考えられる。

IR ワイヤレスアダプタは、図 3-1 に示したように IR トランシーバと 1394 b-PHY で構成されているが、1394b-PHY はすでに S400 での動作が可能である。従って、S200 サポート可能な IR ワイヤレスアダプタを開発するには、より高速動作が可能な IR ワイヤレ스트ランシーバの開発が必要である。

そこで本節では、IR ワイヤレストランシーバの高速動作の検討・試作および 1394 S200 IR ワイヤレスアダプタの開発について述べる。

4.1. S200 IR ワイヤレストランシーバの試作・評価

S200 をサポートするためには、リンクロスマージンの確保と高速化を両立する必要がある。1394 b-PHY は 3.3 節で述べたように 8B/10B 変換を使用しているため、S200 サポートを実現するためには、IR ワイヤレストランシーバに対して伝送速度が 250Mbps 以上であることが要求される。しかし、125Mbps IR トランシーバで使用している低コストな光デバイスは十分な帯域を持っておらず、送信側では光出力パワーの低下、受信側では受光感度の劣化が予想される。これらのリンクロスマージンの劣化を補う手段としては、光送信部を複数の光源で構成して光出力パワーを増やし、ロスマージンの低下分をカバーすることが考えられる。

上記指針に基づき、まず IR ワイヤレストランシーバを試作し 250Mbps 伝送実験を行った。試作した 250Mbps IR ワイヤレストランシーバの構成を図 4-1 に示す。今回、光送信部は波長 850nm の LED と外部レンズの組み合わせを 4 組用いて構成した。また、光受信部は直径 14mm のモールドレンズ付 Si pin PD と直径 30mm の半球プラスチックレンズで構成した。光送信部の出力は光源一組あたり +6.8dBm、放射角は +/-4.3° であった。図 4-2、図 4-3 に受信信号のアイパターンと試作したトラン

シーバの受光感度特性とを示す。アイ開口は良好で受信感度は -13.5dBm@BER=10⁻⁹ を実現した。

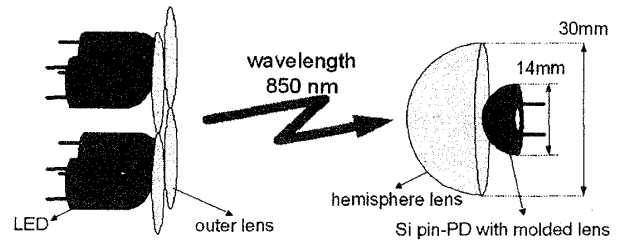


図 4-1 250Mbps IR ワイヤレストランシーバの構成

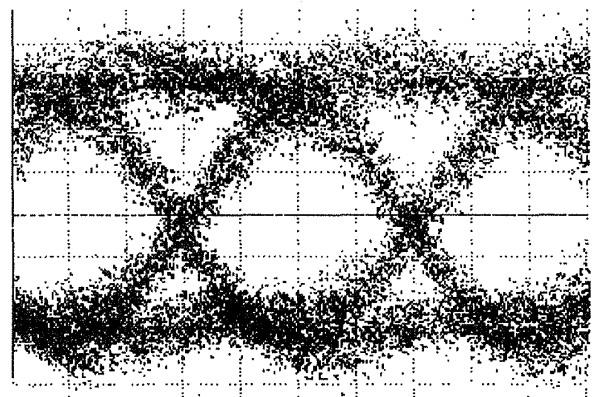


図 4-2 250Mbps IR トランシーバの受信アイパターン

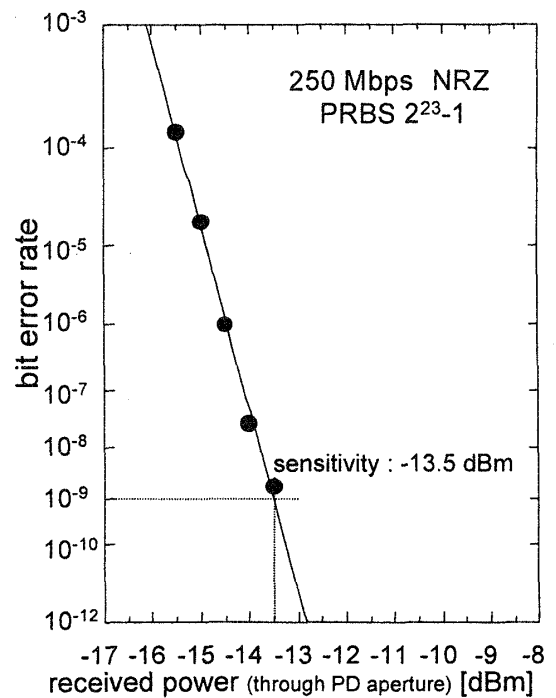


図 4-3 250Mbps IR トランシーバの受光感度特性

次に、このトランシーバを用いて 1394 S200 IR ワイヤレスアダプタの試作を行った。このアダプタを用いて DV 信号の伝送を行い S200 での基本動作の実証を行ったところ、最大伝送距離は 2.7m であった。また、許容オフセット角は、 $\pm 8^\circ$ であり、容易な光軸合わせ精度を実現できている。

4.2. 伝送距離改善の指針

部屋内での設置自由度を改善するためには、10m 程度の伝送距離が要求される。例えば、伝送距離 10m・許容オフセット角 $\pm 5^\circ$ という要求に対しては、光送信側は光源数を 8 個にして送信パワーをさらに増大させ、光受信側は直径の小さい PD を用いてマルチレーバ化し実効受光感度を改善することにより実現できると見積もられる。

5. まとめ

今回、我々は 1394 マルチメディアホームネットワークにおいて、容易な部屋内接続を実現する 1394 IR ワイヤレスアダプタの開発について報告した。

試作した 1394 S100 ワイヤレスアダプタは光軸合わせの容易さを保ちつつ、最大伝送距離 10m を実現できた。また、反射信号対策付き信号検出機能を備えたトランシーバを用いることにより、無線環境においても安定な 1394 バスを構成することができる。

さらにより高速な S200 IR ワイヤレスアダプタの検討と試作を行った。試作した S200 IR ワイヤレスアダプタを用いて S200 での基本動作の検証を行い、伝送距離 10m を実現するための設計指針を示した。

参考文献

- [1] "IEEE Std 1394-1995-IEEE Standard for a High Performance Serial Bus" Dec., 1995
- [2] 丹生, 松田, 山崎, "IEEE1394POF ホームネットワーク", 信学ノ大, SB-7-4, 1996.9
- [3] G. W. Marsh, J. M. Kahn, "Performance evaluation of experimental 50-Mb/s diffuse infrared wireless link using On-Off-Keying with Decision-Feedback equalization", IEEE Jour. on Selected Areas in Comm., March, 1995
- [4] "P1394b Draft Standard for a High Performance Serial Bus", Draft 0.14, Oct., 1998
- [5] "IEC 60825-1 Safety of laser products-Part 1", Nov. 1993
- [6] F. R. Gfeller, U. H. Bapst, "Wireless In-House Data Communication via Diffuse Infrared Radiation", Proc. IEEE, vol.67, no.11, pp.1474-1486, Nov., 1979
- [7] 松田, 丹生, 齊藤, 山崎, "IEEE1394 光ワイヤレスリピータの開発", 信学全大, B-7-164, 1998.3