

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「モバイル可視光通信を実現する組込ソフトウェア技術の開発」

成果報告書

平成24年 3月

委託者 内閣府沖縄総合事務局

委託先 株式会社 国建システム

目 次

第1章 研究開発の概要

1-1. 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2. 研究体制	3
1-3. 成果概要	4
1-4. 当該研究開発の連絡窓口	5

第2章 本論

2-1. ①複数PA(PhotoAcceptor)の並列接続制御を実現する組込ソフトウェアの開発	6
【株式会社アウトスタンディングテクノロジー、国立大学法人信州大学】	
2-2. ②AGCオートゲインコントロールによるLED光源制御を実現する組込ソフトウェアの開発	7
【株式会社国建システム】	
2-3. ③信号のデジタル変調・復調処理の組込ソフトウェア制御	16
【株式会社アウトスタンディングテクノロジー、国立大学法人信州大学】	
2-4. ④信号のデジタル変調・復調処理に対応した通信プロトコルの開発	19
【学校法人慶応義塾大学】	
2-5. ⑤既存インタフェースとモバイル可視光通信を相互接続する組込ソフトウェアの開発.	26
【株式会社国建システム】	
2-6. ⑥モバイル可視光通信基板を利用したワンセグ自主放送システムの開発	37
【株式会社国建システム】	
2-7. ⑦モバイル可視光通信基板を利用した機器組込み無線通信システム	62
【株式会社アウトスタンディングテクノロジー、国立大学法人信州大学】	

最終章 全体総括（1・2年度目は省略可）	68
--------------------------------	----

巻末 用語解説

第1章 研究開発の概要

ロボットをはじめとする可動部における可視光領域の電磁波を用いた無線通信技術の確立に向けて、数mm～数mの距離レンジをカバーする高感度な受光素子、それと対になるLEDのドライブ回路、高速通信に必要なプロトコル等の開発課題について研究を行い以下の7つのサブテーマについて必要なプロジェクト体制を敷き研究目標に向かって技術目標値達成を目指した。

- ① 複数PA(PhotoAcceptor)の並列接続制御を実現する組込ソフトウェアの開発
- ② AGCオートゲインコントロールによるLED光源制御を実現する組込ソフトウェアの開発
- ③ 信号のデジタル変調・復調処理の組込ソフトウェア制御
- ④ 信号のデジタル変調・復調処理に対応した通信プロトコルの開発
- ⑤ 既存インターフェースとモバイル可視光通信を相互接続する組込ソフトウェアの開発
- ⑥ モバイル可視光通信基板を利用したワンセグ自主放送システムの開発
- ⑦ モバイル可視光通信基板を利用した機器組込無線通信システム

1-1. 研究開発の背景・研究目的及び目標

1) 研究の目的

産業用機械、産業用ロボット産業では信頼性と安全性確保のニーズがあり、情報家電及び携帯電話では安心して使える高速無線通信技術へのニーズがある。本計画では現在、移動状態での使用が困難な可視光通信の課題を解決し、モバイル可視光通信を実現する組込みソフトウェア技術を確立する。

- ①産業用機械及び産業用ロボットに関して、信頼性・安全性の確保(機能安全確保を含む)を実現するため、以下の高度化目標を実現する。

- ・フラットケーブル等による接続配線を廃し、電磁ノイズを発生しない可視光領域の電磁波を用いたセンサーコントローラ～各種デバイス間の通信を無線化する通信技術を開発する。

現状) 可視光通信の発光部(発信機)と受光部(受信機)の光源の向きの変化や、移動に対しての通信が脆弱で安定性に欠ける。数%の光源角度のずれや、数ミリの移動にも耐えられず通信遮断となる。

↓

目標) 光源の向き、加速度、移動速度をリアルタイムに演算し、発信・受信機の可動、移動の振る舞いに対応できる組込みソフトウェアを開発する。その成果によって、秒速10mの移動体通信を実現する。

- ②情報家電及び携帯電話に関して、ネットワークサービスの多様化やだれもが安心して使える機器を実現するため、以下の高度化目標を実現する。

- ・モバイル環境でも利用できる可視光通信機能の実現

現状) 産業用機械及び産業用ロボットに関する事項でも述べたように、可視光による移動体通信は実現されていない。また、太陽光を含む他の光源の影響も排除できず、特に屋外での通信安定性に欠ける。また、可視光通信の利用・普及には既存通信ネットワークや機器との接続は不可欠であるが、現時点ではTCP/IP やイーサネット、USB との接続が研究的に行われているだ

けで、実用化には至っていない。



目標) データ転送性能の高速安定を図るために、AGC 組み込みソフトウェアを開発し、100m の距離で 1Mbps の通信速度の実現を目指す。

また、既存のネットワークや機器との接続では、TCP/IP やイーサネットのみならず、機器制御用 (Interbus、ControlNet、Device Net、CC-Link、AS-I、PROFIBUS-DP、PROFIBUS-PA、Modbus、Foundation Fieldbus、EC-NET 等)、自動車用 (CAN、CAN Open、FL-net) といった多様な既存フィールドバス方式機器やワンセグ受信機との接続のための信号のデジタル変調・復調処理の組み込みソフトウェア制御および通信プロトコル、インターフェースを順次開発する。さらに、その中でも特に、街灯、防犯灯、LED照明を利用したワンセグ自主放送の実現を想定し、RF-可視光相互変換ユニットと自主放送アプリケーションを開発する。

研究開発の技術的目標値として、

<1. 可視光通信の可動、移動への対応>

平成 22 年度達成度 30% (机上検討、予備実験達成)

平成 23 年度技術的目標値: 秒速~10m の移動に対応(従来は移動不可)

車対車、車対路肩、人対人、などの実験に成功し移動体通信が可能となった。

<2. 可視光通信の高速/遠距離通信への対応>

平成 22 年度達成度 20% (mM値 20 = 4m の距離で 5Mbps)

平成 23 年度目標値 mM100 (100m で 1Mbps の通信速度)

目標をクリアーし、10m の距離で 15Mbps、mM150 を達成!

<3. 既存インターフェースと可視光通信との相互接続の実現>

平成 22 年度達成度 50% (試作回路完成)

平成 23 年度目標値 RF インターフェースとの接続の実現を目指す。

TCP-I/P 接続、デジタル接点入力等の双方向信号接続が可能になった。

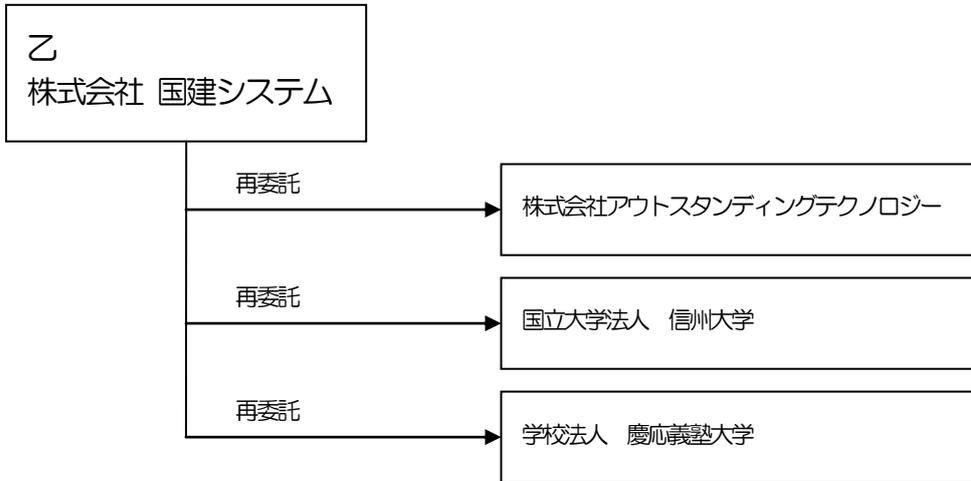
地デジRF 信号 (OFDM 信号) の伝送が可能になった。

1-2. 研究体制

(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織 (全体)



総括研究代表者 (PL)
株式会社アウトスタンディングテクノロジー
取締役 黒川裕之

副総括研究代表者 (SL)
株式会社国建システム
企画担当 豊 耕一郎

1-3. 成果概要

① 複数PA (PhotoAcceptor) の並列接続制御を実現する組込ソフトウェアの開発

【株式会社アウトスタンディングテクノロジー、国立大学法人信州大学】

成果：a. 複数の素子を並列に配置した受信信号をデジタル処理するプラットフォームの設計試作を行い、動作を確認した。

成果は、電気学会A部門「光応用一般」光応用・視覚研究会で発表を行った。

<https://workshop.iee.or.jp/sbtk/cgi-bin/sbtk-showprogram.cgi?workshopid=SBW00001423>

素子の改良に時間が取られ、複数の信号処理を行うソフトウェア開発の時間が少なくなり、追尾制御プログラム開発は、達成できなかった。

b. 信号フィルタリング処理、光源の向き、加速度、移動速度などを動的に処理する上で必要な光路シミュレーションを行う為の技術指導とアドバイスを国立大学法人信州大学半田教授から受け、予備実験を行った。

c. 照度と可視光に重畳されている高周波信号の強度だけを計測する機器を作り、可視光通信の置かれる環境を定量計測を行った。

長距離通信における空間伝搬の様子をこの機材を使い実測を行った。

実測結果、考察は論文にまとめ、信州大学が“可視光通信の伝搬環境に関する検討”と題して、電子情報通信学会信州部会で発表を行った。

<http://www.ieice.org/shinetsu/data/h21student-su.htm>

② AGCオートゲインコントロールによるLED光源制御を実現する組込ソフトウェアの開発

【株式会社国建システム】

成果：a. AGC処理を組み込みで実装した。また、ソフトウェア上で実証実験を行った。

b. AGC処理をソフトウェア上で行えるようMATLAB上にAGC処理を実装した

c. 受光した信号をAD変換しFPGAを介してMATLAB上に波形データを入力することができた。

d. 入力された受光信号データをリアルタイムでAGC処理することができた。

③ 信号のデジタル変調・復調処理の組込ソフトウェア制御

【株式会社アウトスタンディングテクノロジー、国立大学法人信州大学】

成果：a. 変復調アルゴリズムを実装するFPGA開発テストベンチの選定が済み購入した。

変復調ロジックを実装し、可視光通信の物理レイヤー性能を測定する機能を初めに構築しいくつかのOE変換 (Optical/Electrical Converter) 基板の性能を評価を行った。

b. FPGA基板上に可視光通信システムを実際に搭載し課題となっている高速通信に必要なプロトコル開発課題について実際に動作する環境を作り動作を確認した。成果を論文にし、電子情報通信学会信州部会で発表を行った。

“FPGA基板を用いた可視光通信システムの検討”と題して発表を行った。

<http://www.ieice.org/shinetsu/data/h21student-su.htm>

④ 信号のデジタル変調・復調処理に対応した通信プロトコルの開発

【学校法人慶応義塾大学】

成果：a. OSI 参照モデルに基づく 1 : n 通信に対応し可視光通信特性に合わせた通信プロトコルを設計開発、検証を行った。結果 10m の距離で 5Mbps のデジタルデータ通信を安定して送信する事ができた。

⑤ 既存インターフェースとモバイル可視光通信を相互接続する組込ソフトウェアの開発

【株式会社国建システム】

成果：a. 自動車の車内機器間通信や、FA(Factory Automation)での機器間の通信に使用されている有線通信プロトコル「CAN」を可視光を用いて通信可能な構成を研究・構築し検証を行った。その結果、約8cmの通信距離においてCANプロトコルによる双方向の可視光通信を実現した。

⑥ モバイル可視光通信基板を利用したワンセグ自主放送システムの開発

【株式会社国建システム】

成果：a. 地上デジタル放送信号を可視光通信で送受信する装置を考案・開発した。
b. 地上デジタル放送信号の可視光送受信検証実験を行った。

⑦ モバイル可視光通信基板を利用した機器組込無線通信システム

【株式会社アウトスタンディングテクノロジー、国立大学法人信州大学】

成果：a. 移動体通信用機器を製作し車対車、人対人、などのモバイル環境による移動体間通信実験を行い目標を達成できた。
デジタル信号双方向通信モデムのプロトタイプを使い展示会に出展した。FA市場への可能性を示す組込可能なモジュール基板群の試作に成功した。

1-4. 当該研究開発の連絡窓口

株式会社国建システム 担当：企画コンサル推進部 豊耕一郎

TEL:098-867-7584 FAX:098-866-5965

E-mail:kouichiro_yutaka@kunisys.co.jp

株式会社アウトスタンディングテクノロジー 担当：研究開発室 黒川裕之

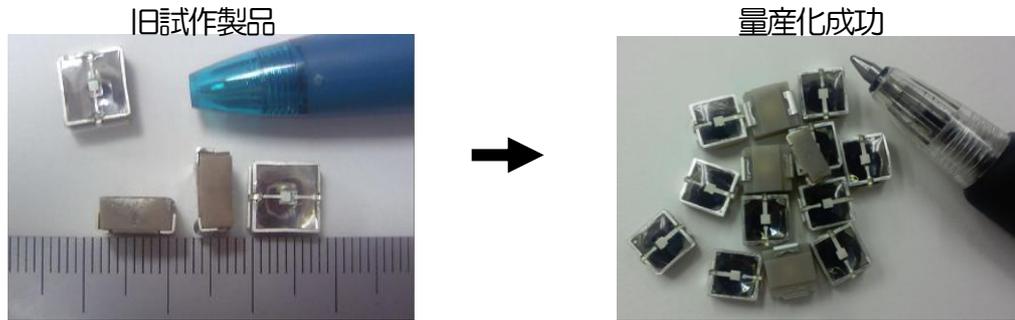
TEL:03-6265-1780 FAX:03-6265-1781

E-mail:h_kurokawa@ot-c.co.jp

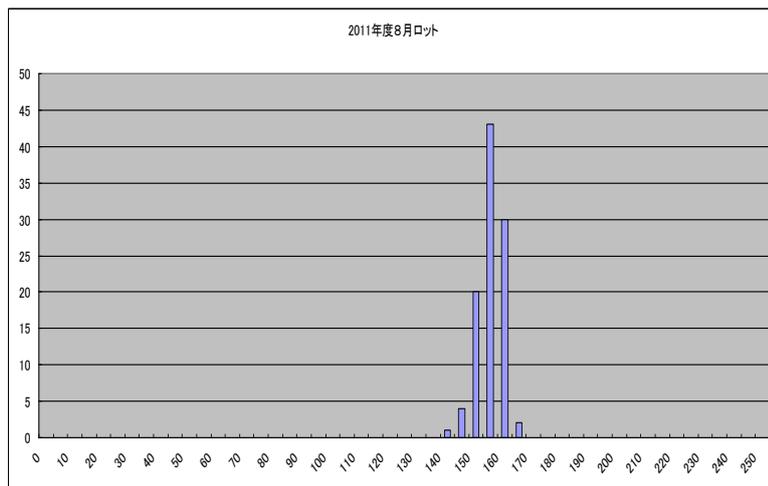
第2章 本論

2-1. ①複数PA (PhotoAcceptor) の並列接続制御を実現する組込ソフトウェアの開発

成果：a, 複数の素子を並列に配置した受信信号をデジタル処理するプラットフォームの設計、試作を行い、デバックを開始した。



平成20年度から21年度に掛けて総務省SCOPE研究テーマとして「次世代照明を活用した創発型コンテキスト・サービスの研究開発」で得られた成果の一部を使い、今回さらに改良が進んだ新しい受光素子 (LEC-RP) の中で感度が改良された広角バージョンを採用しさらに改良、量産化にまでこぎ着けた。



H23年度量産化にめどが立ち改良が進む。
感度ばらつきをおさえ品質が安定した。
感度と視野角を最適化し品質の安定化に努めた結果、左図のように安定した。
社内計測値で
平均値：158.8
標準偏差：3.2 となった

図2-1-1. 量産品 LEC-RP ヒストグラム

H23バージョン
量産ロット

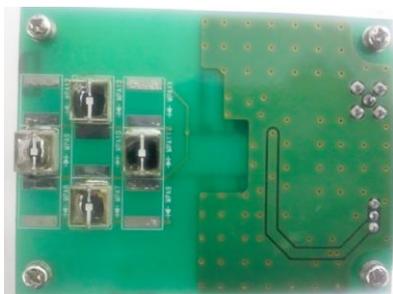


図2-1-2. 高速高感度基板の例

2-2. ②AGC(オートゲインコントロール)による LED 光源制御を実現する組込みソフトウェアの開発

この章では、組み込みで実装した AGC の実証実験として、MATLAB 上に AGC 処理を実装し、実際にソフトウェア上でリアルタイムに AGC 処理を行った際の、MATLAB 上で実装した AGC プログラムの原理、AD 変換や FPGA 等のハードウェア構成がどのようになっているかを説明し、実証実験の結果からどのようなことが実証できたのか、またどのような展望が望めるかをまとめて述べる。

2-2-1. 原理

(1) AGC(オートゲインコントロール)

AGC とは、自動利得制御という名の通り、信号が弱ければ増幅し、信号が強ければ減衰するシステムの事で、入力信号の強弱に関わらず出力を常に一定に保つ為の補助機能の事である。今回の実証実験では、本研究にて開発した組み込みソフトウェアを利用して、あらゆる場面に適応可能な AGC 処理の検証を行なっている。可視光通信は発光-受光間の距離が変わると、距離に比例するように受光する信号が弱くなってしまう。そこでソフトウェアによる AGC を組み込むことによって、信号のレベルに合わせた増幅・減衰を行い、距離が離れていても安定した、一定の信号受信が行えることが期待できる。

(2) AD 変換

AD 変換とは、アナログ信号をデジタル信号に変換する事である。

今回の実証実験では、受光基板から得られるアナログ信号を AD 変換チップを用いることでデジタル信号に変え、後述する FPGA に入力している。

今回使用した AD 変換チップの性能は、基準クロック 5[MHz]、12bit、250kSPS、2ch の AD 変換チップ AD7921 を用いている。

(3) FPGA

FPGA とは、ハードウェア記述言語を用いて、論理機能の構成を設計できる集積回路の事である。今回は特殊電子回路株式会社の Spartan-6 評価ボードを使用した。このボードは 64 本の汎用 I/O 端子があり、それぞれに入出力を設定することが出来る。

今回このボードが持つ機能は、AD 変換された受光信号を受信し、それをボード上の SDRAM に保存する、という役割を担っている。また、AD7921 を動作させるための基準クロックや、Din、Dout 端子の制御信号も FPGA から出力している。

(4) MATLAB

MATLAB とは、MathWorks 社が開発・販売している数値解析ソフトウェアである。行列計算やグラフィックスに優れており、また信号処理等の各種シミュレーションも行えるソフトウェアである。今回の検証にも、開発した組み込みソフトウェアの動作シミュレーションのために、MATLAB を活用した。具体的には、上記 Spartan-6 ボードの DDR2SDRAM に保存されている波形データを読み取り、MATLAB 上にて AGC 処理をシミュレートしている。

(5) AGC 処理の流れ

AGC 処理は、入力波形信号の強弱に関わらず出力を常に一定に保つ。ここで、入力波形信号の強弱とは振幅の大きさを指している。即ち出力を常に一定に保つということは、AGC 処理後の波形の振幅の大きさは、常に一定となっているということである。

今回作成した MATLAB 上での AGC 処理プログラムの流れを以下に示す。

- 1) ユーザーが希望する出力波形の振幅を設定する。ここで設定した振幅が AGC 処理後の波形の振幅となる。
- 2) FPGA から入力波形のデータを読み込み、最大値と最小値を検出し、それらの差を算出する。これが入力波形データの振幅となる。
- 3) 増幅値を算出する。今回の計算式は単純に、振幅の比による乗算、除算を行う。式は以下のようになる。
増幅値 = 目標波形の振幅 / 入力波形の振幅
- 4) 算出した増幅値を、入力波形のデータ全体に乗算することで、入力波形の増幅・減衰を行う。

以上が AGC 処理プログラムの流れである。以下に具体的な数値を用いた例を示す。

まず目標波形の振幅を設定する。例として目標となる振幅の値を 500 と設定する。（500 という数値は MATLAB 上の数値であり、実測値に換算すると約 1[V]となる。）

次に、FPGA から入力波形のデータを読み込む。ここで仮に、読み込んだ入力波形の振幅が目標振幅値よりも低く、200 だったとする。この場合の増幅値は

$$500 / 200 = 2.5$$

となるので、入力波形のデータ全体を 2.5 倍に増幅することで、目標とする振幅の 500 を達成することができる。

仮に入力波形の振幅が目標となる振幅の値よりも大きい場合も、分母が大きくなるので結果的に入力波形のデータ全体を除算することになるので、目標の振幅より大きい振幅が入力された場合は、増幅値 < 1 となり、除算が行われる事がわかる。以上の処理をリアルタイムで行うことにより、光源から受光基板が離れた場合でも、一定の振幅を得ることができる。

これが今回の AGC プログラムの流れとなる。

2-2-2. 実証実験の流れと仕組み

(1) 実証実験概要

LC 発振回路による正弦波出力回路を作成し、正弦波信号を発光基板に入力した。発光基板の出力光を受光基板で受光し、受け取った信号を AD 変換後、FPGA 上の SDRAM で保存し、MATLAB 上で AGC 処理を行い、AGC 後の波形の振幅が設定値に達しているかどうかを検証した。図 2-2-1 に今回の実証実験の概要図を示す。

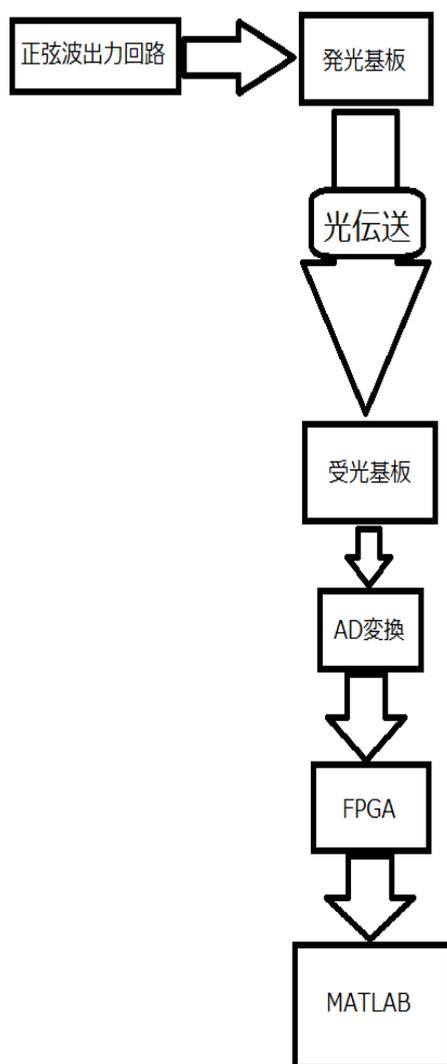


図 2-2-1. AGC 装置概要

(2) 正弦波出力回路

今回発光素子に入力する信号として、LC 発振回路による正弦波を入力した。作成した LC 発振回路を図 2-2-2 に示す。また、図 2-2-2 の回路による出力波形を図 2-2-3 に示す。

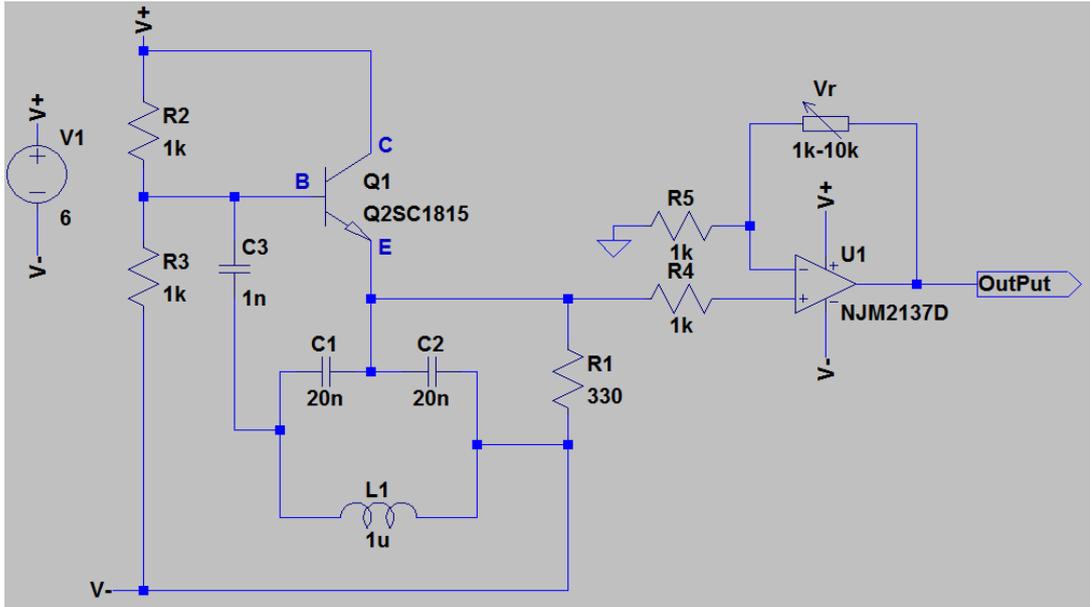


図 2-2-2. 正弦波出力回路

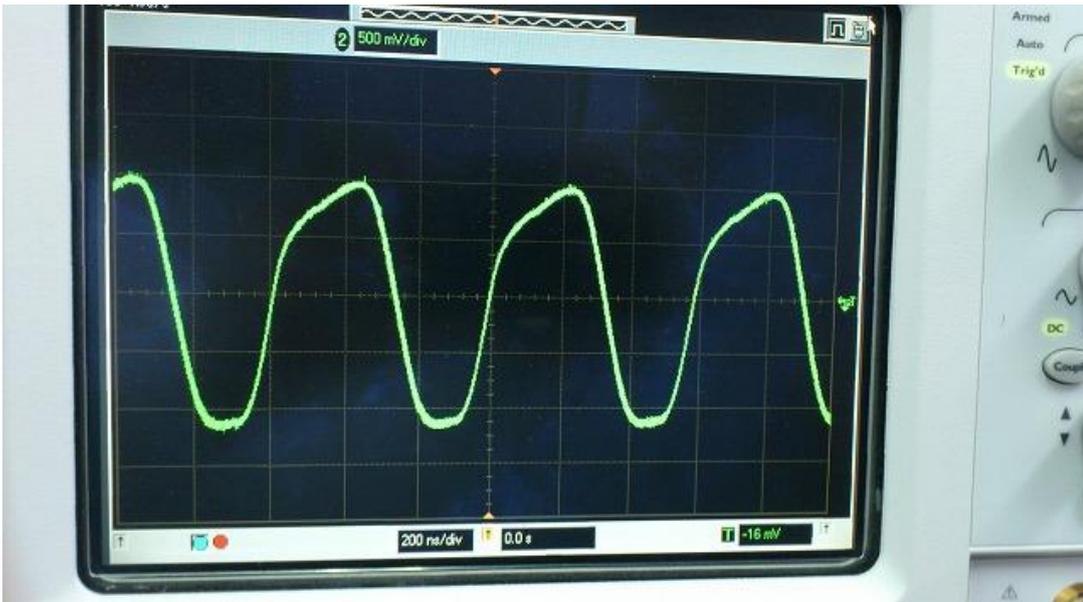


図 2-2-3. LC 正弦波出力回路から出力した波形

図 2-2-2 で示した LC 発振回路の発振周波数の理論値を計算すると

$$f = 1/2\pi \sqrt{LC} \quad (C = (C1 \times C2) / (C1 + C2))$$

$$f = 1.59 [\text{MHz}]$$

となる。実際の出力波形の周波数は 1.7 [MHz] となった。

今回、図 2-2-2 のような正弦波を選択した理由は、MATLAB 上の AGC 処理プログラムにおいて、入力された波形の最大値と最小値を最もシンプルに確認できる波形を考えた際、振幅のピークが分かりやすいのは正弦波であった為、LC 回路による正弦波を選択した。また、今回の実験で中波帯である 1.7 [MHz] の波形を AGC 処理出来れば、低周波域の信号や音声信号などに AGC 処理を行うことが期待できる。

発振回路から出力した信号（図 2-2-3）を発光基板に入力して光伝送し、その光を受信した受光基板が出力した波形を図 2-2-4 に示す。



図 2-2-4. 正弦波受光波形

今回の実証実験では、図 2-2-4 の波形を FPGA に入力した。FPGA から波形データを正しく取り出した場合は、MATLAB 上で図 2-2-4 のような波形が確認できるはずである。

(3) 受光側の回路

受光基板から AD 変換チップ、FPGA、PC 接続までの回路図を図 2-2-5 に示す。また、実際に作成した回路を図 2-2-6 に示す。

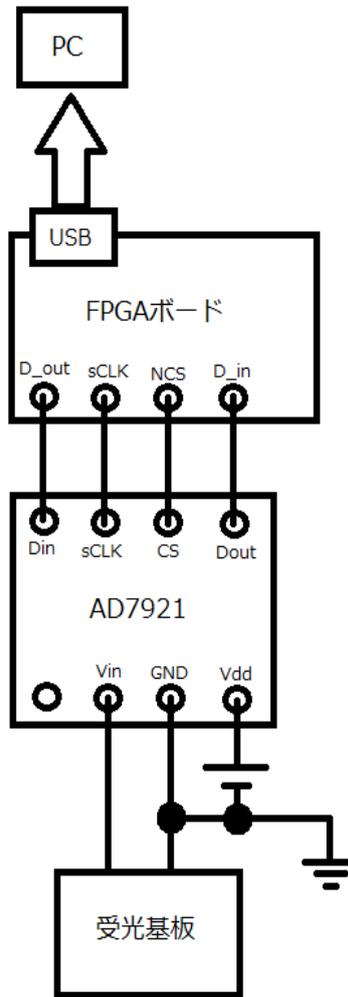


図 2-2-5. 受光基板-PC までの回路図

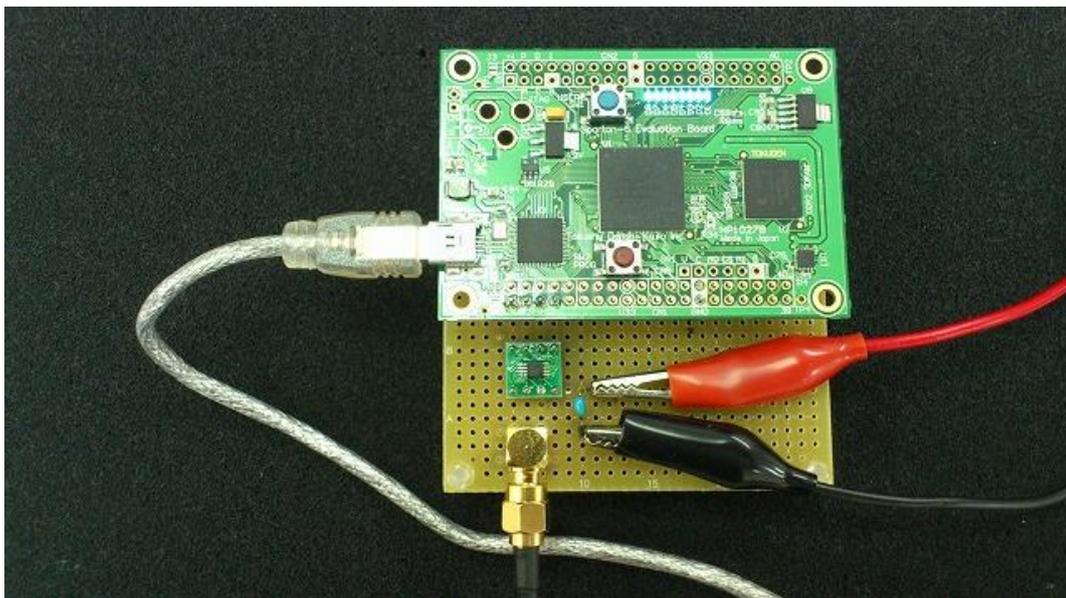


図 2-2-6. 受光基板-PC までの接続図

2-2-3. 使用機材

実証実験に使用した機材を表 2-2-1 を示す。

表 2-2-1. 使用機材

名称	規格	社名	補足
AD7921	12bit, 2ch, 250kSPS	ANALOG DEVICES	AD 変換チップ
Spartan-6 FPGA 評価ボード XC6SLX45	43661 ロジックセル DSP48 スライス 58 個 18kB ブロック RAM116 個	特殊電子回路株式会社	FPGA ボード
PC	Windows7 Ultimate	Microsoft	Service Pack 1
MATLAB		MathWorks	32bit
汎用 LED 送信モジュール SRLED DV1ch-L	帯域 0.1~10 [MHz]	Outstanding Technology	一灯タイプの 発光モジュール
汎用 LED 送信モジュール SRLED DV16	帯域 0.1~10 [MHz]	Outstanding Technology	16 灯タイプの 発光モジュール

2-2-4. 実証実験の結果

発光-受光間の距離を徐々に離していくと、受信している信号が弱くなっていく。この信号に AGC 処理を行い、その前後の波形を見比べることで AGC が行われているかを検証した。

実際の実証実験風景を図 2-2-7 に示す。



図 2-2-7. 実験風景

今回の実証実験では、発光-受光間の距離を 20cm~40cm までとし、5cm 間隔で測定した。距離測定にはメジャーを用い、ズレが発生しないようビニルテープを用いて固定した。また、AGC プログラムの振幅設定値は、MATLAB 上での設定数値として 1500 とした。なおこの 1500 という数値は、実測値としては 3[V] に相当する数値となっている。実証実験の結果を以下図 2-2-8~図 2-2-12 に示す。

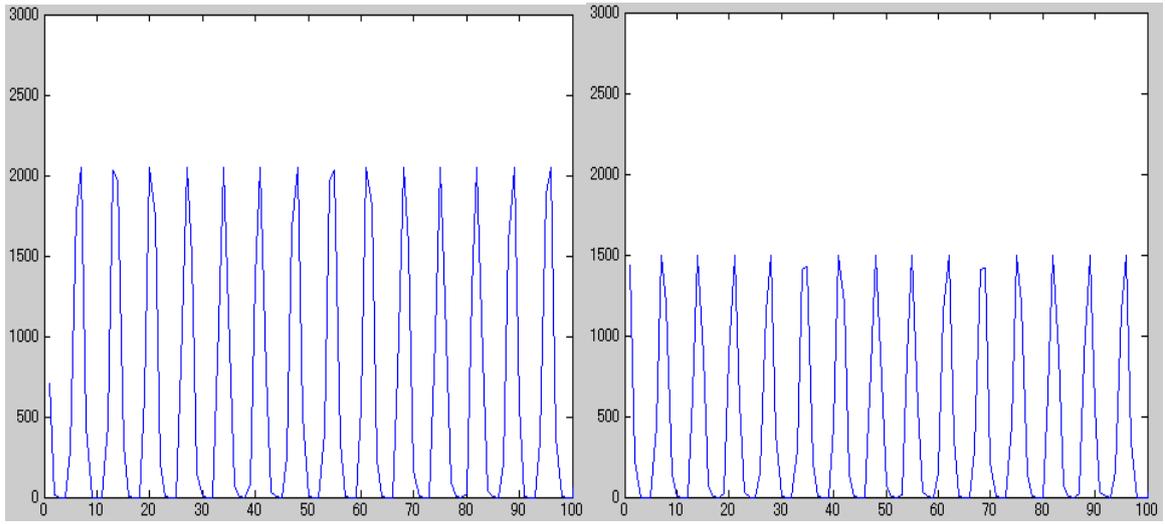


图 2-2-8. 発光-受光間隔 20cm(左:受信波形, 右:AGC 処理後)

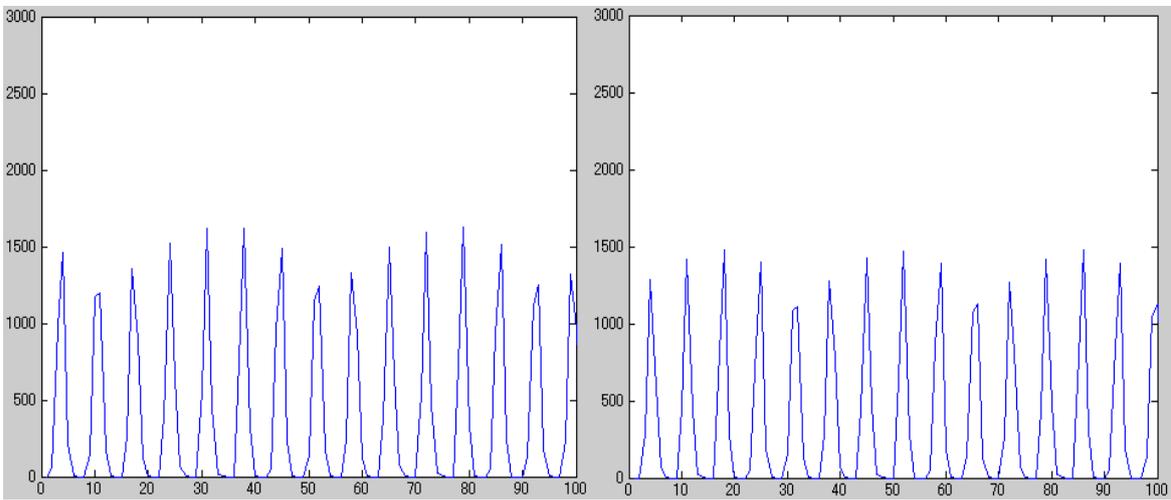


图 2-2-9. 発光-受光間隔 25cm(左:受信波形, 右:AGC 処理後)

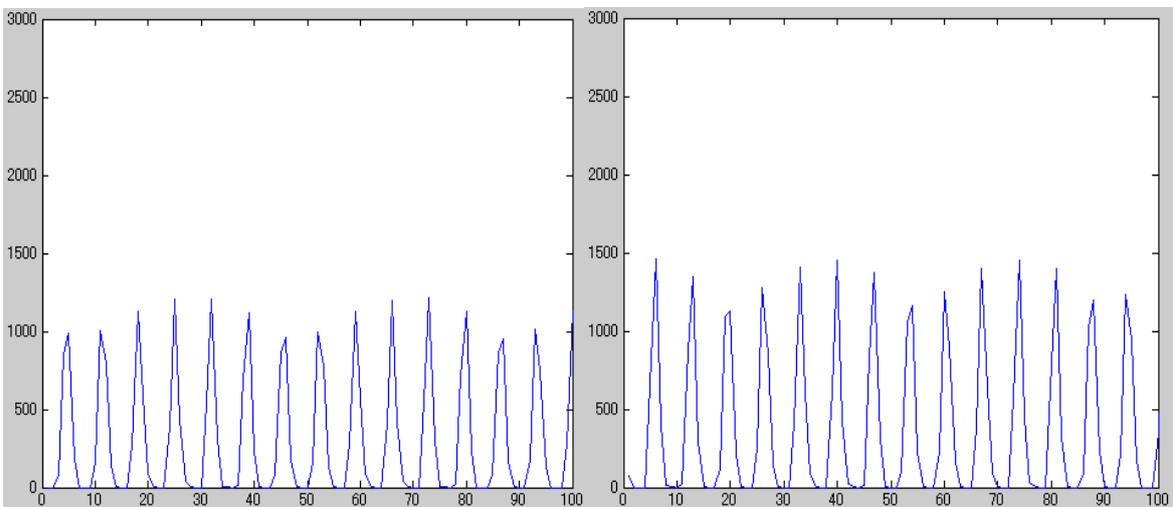


图 2-2-10. 発光-受光間隔 30cm(左:受信波形, 右:AGC 処理後)

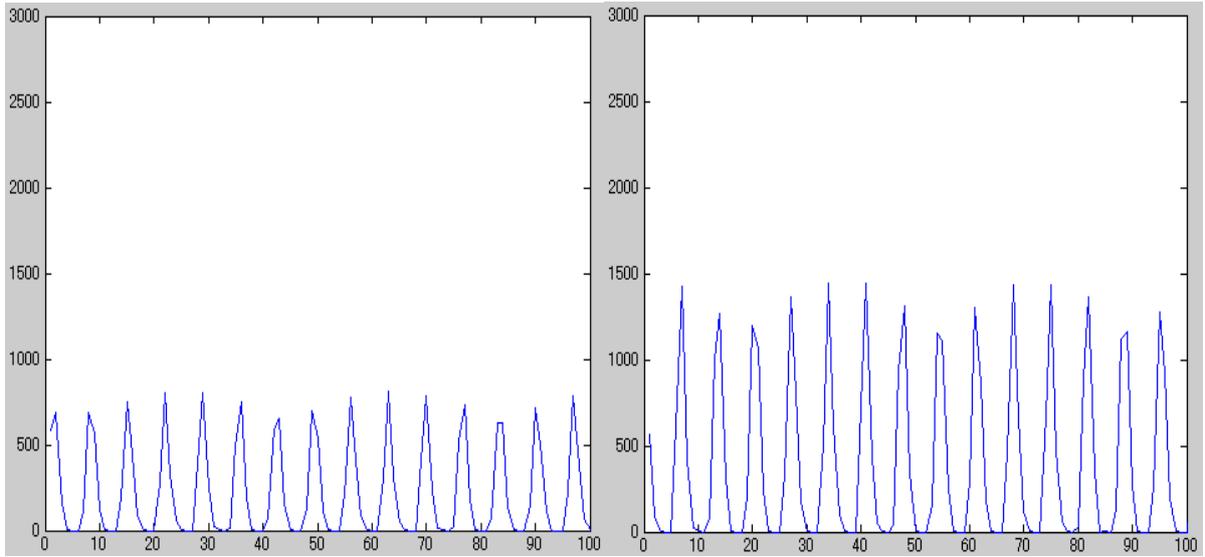


图 2-2-11. 発光-受光間隔 35cm(左:受信波形, 右:AGC 処理後)

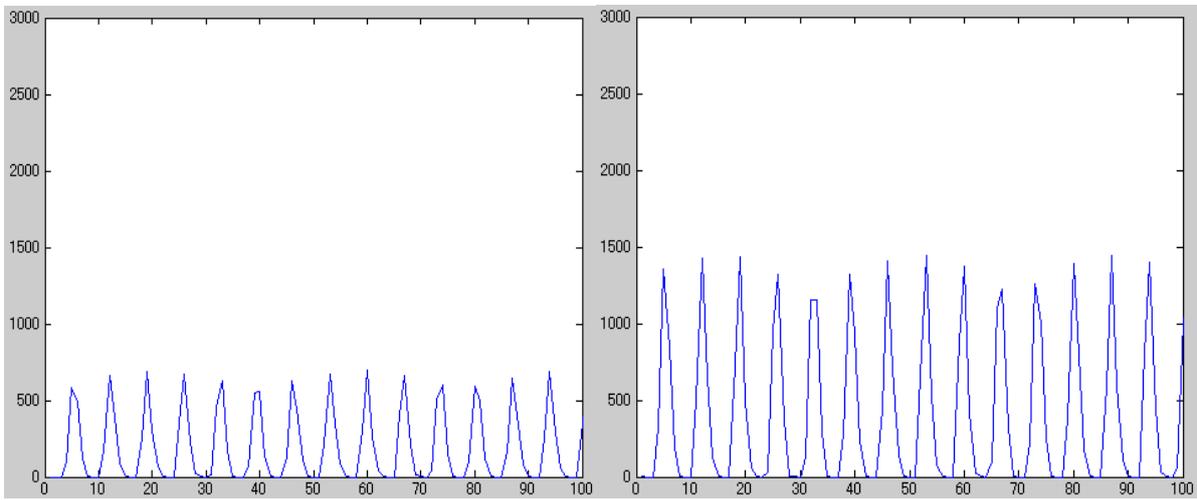


图 2-2-12. 発光-受光間隔 40cm(左:受信波形, 右:AGC 処)

2-2-5. 実証実験の結果

実証実験の結果より、受光した信号を AD 変換し、FPGA を介して MATLAB 上に波形データとして入力出来ていることを実証できた。また、発光-受光間の距離が近く、入力信号の振幅が強いときは、AGC 処理を行った波形は元の波形よりも振幅が小さくなっており、逆に発光-受光間の距離が遠く、入力信号の振幅が小さい時は AGC 処理後の波形の方が振幅は大きくなっていることが確認でき、MATLAB 上で設定した振幅の数値 1500 をほぼ維持出来ていることも確認できた。

これより、実証実験として AGC 処理がソフトウェア上で行えるよう、MATLAB 上で AGC 処理が実装でき、更に処理がリアルタイムで行われていることが実証できた。

2-2-6. まとめ

組み込みで実装することができた AGC の実証実験として、AGC 処理をソフトウェア上で行えるよう、MATLAB 上に AGC 処理を実装し、ソフトウェア上でリアルタイムに AGC 処理を行った。

結果より、ソフトウェアによる AGC 処理が実装出来ており、実際に組み込みで AGC 処理が動作可能であることが実証できた。

AGC 処理をソフトウェアで行なえることが実証できた為、更に細かい機能を組み込みに追加実装することも容易になる事が期待できる。例えば特定周波数を遮断するフィルター機能や、逆に特定周波数のみを通すバンドパスフィルタのような機能が実装可能であることが考えられる。また MATLAB プログラムは C 言語として実装することも可能である為、場面場面に応じた AGC のソフトウェアカスタマイズを行い、その都度組み込みに実装することで、あらゆる場面に適応可能な AGC 処理が、ソフトウェアと組み込みによって実装可能であることが期待できる。

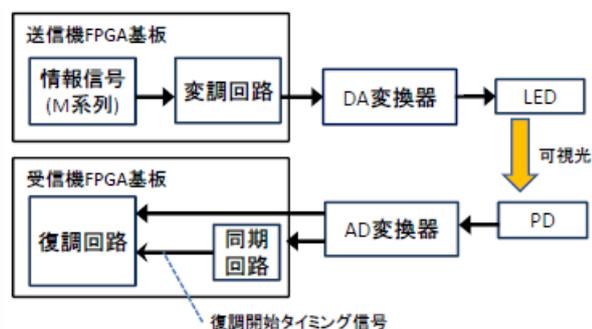
2-3. ②信号のデジタル変調・復調処理の組込ソフトウェア制御

成果：a. 変復調アルゴリズムを実装するFPGA開発テストベンチの選定が済み購入した。変復調ロジックを実装し、可視光通信の物理レイヤー性能を測定する機能を初めに構築しいくつかのOE変換(Optical/Electrical Converter)基板の性能を評価を行った。

b. FPGA基板上に可視光通信システムを実際に搭載し課題となっている高速通信に必要なプロトコル開発課題について実際に動作する環境を作り動作を確認した。成果を論文にし、電子情報通信学会信州部会で発表を行った。“FPGA基板を用いた可視光通信システムの検討”と題して発表を行った。

<http://www.ieice.org/shinetsu/data/h21student-su.htm>

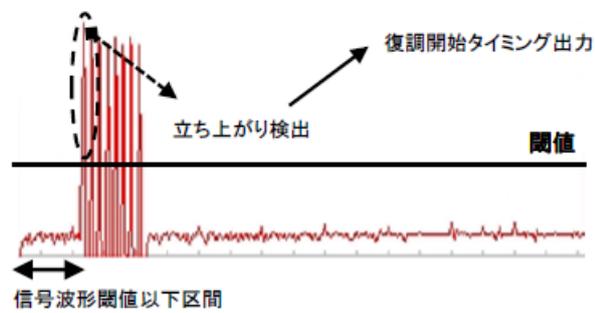
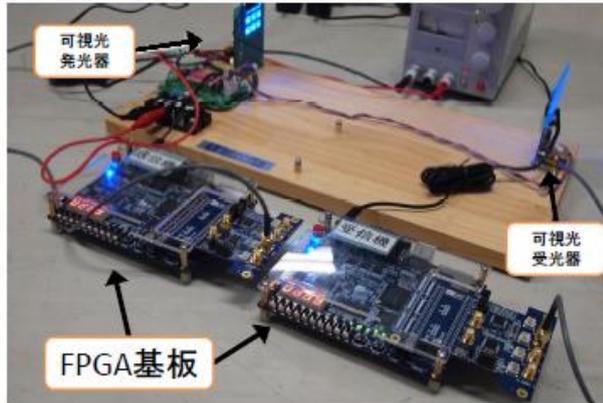
システムの概要



FPGA基板を用いて、周期1023のM系列情報信号をPWM変調する変調信号を送波に乗算した後にDA変換器によりアナログ信号に変換する。

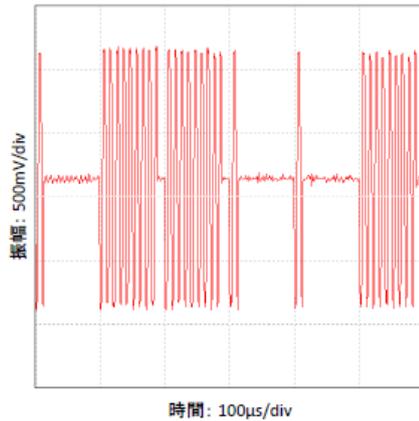
受信側は、OE変換後AD変換器によりデジタル信号に変換し、復調回路に入力する。

システム全体

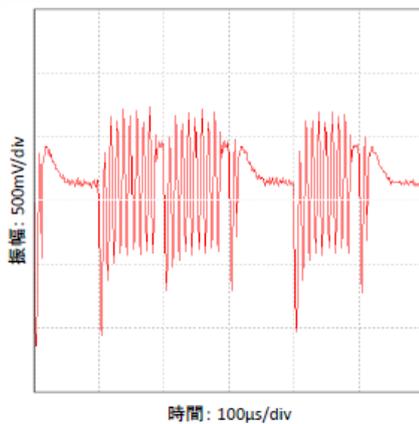


OE変換後のアナログ波形は、上図のようにノイズ成分を含む、このため、入力信号の立ち上がりを検出し一定期間閾値設定アルゴリズムを開発した。

送信信波形と受信波形の例



DA 変換された PWM 変調波形出力



PD の出力電圧波形

移動体通信における可視光通信では、受信信号強度の激しい変動が予想され本研究で採用した PWM 方式は、この振幅方向の変動には、元々強い様式である。

しかし、実際には、閾値を設定するアルゴリズムが極めて重要であり今回、verilog-HDL を用いて回路設計を行うことで、回路機能の改善や、変更をしやすい利点を生かし、閾値の AGC 回路を開発できた。

このアルゴリズムは、ソフト資産として汎用性があり言語レベルで互換性がある。実際に、距離、角度に応じた AGC 回路の特性まで十分に把握できなかったが、汎用 FPGA 基板上にアルゴリズムを展開し一定の効果を確認した。

2-4. ④信号のデジタル変調・復調処理に対応した通信プロトコルの開発

成果：OSI 参照モデルに準拠した、可視光通信の特性に合わせた専用プロトコルを新規に設計し、USRP と GNU Radio 上に構築。検証を行った。結果、10m の範囲において、5 M bps の通信測度にて、安定した通信性能を発揮することができた。



テストの様様

2-4-1. 可視光通信 IP 対応プロトコル

(1) プロトコルスタック

可視光通信プロトコルスタックの構造はレイヤーと呼ばれる複数のブロックで構成される。

各レイヤーは上位層のために用意された特定のサービスを実行する。データエンティティはデータ転送サービスを提供し、マネージメントエンティティはその他のサービスを提供する。各サービスエンティティは上位層に対し、サービスアクセスポイント (SAP) によってインターフェースを提供する。また、各 SAP は要求された機能を達成するために必要な多くのサービスプリミティブをサポートする。

可視光通信プロトコルは、ネットワーク層とアプリケーション層 フレームワークを提

供する。アプリケーション層フレームワークは、アプリケーションサポートサブ層および可視光通信デバイスオブジェクトから構成される。

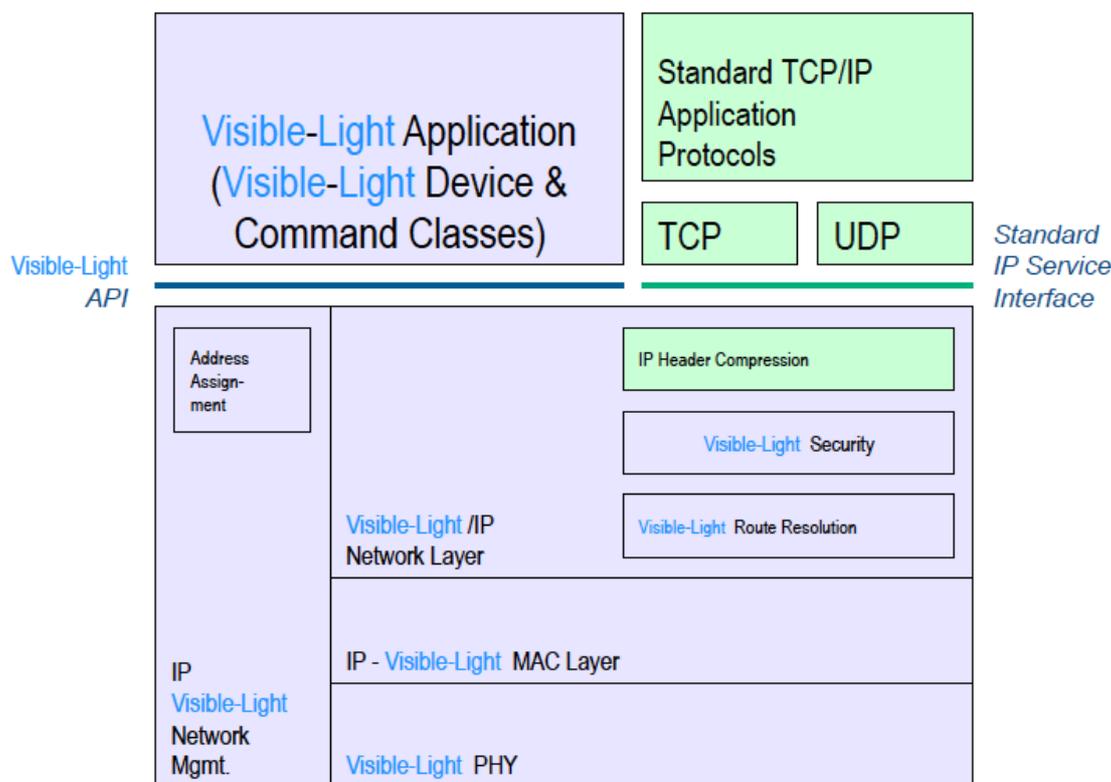


図 2-4-1. プロトコルスタック

2-5-2. レイヤー詳細

(1) MAC レイヤー

中継器ユニットは、物理システムトポロジーを拡張するためのものであり、複数のセグメント 接続を提供する。実際の可視光通信機器の場合、有線側を RJ-45 コネクタによる 100BASE-TX 接続とし、可視光通信側を可視光通信媒体駆動装置と検出装置の対向で構成される中継ユニット同士の通信の形式を採る。図 2-4-2 のような中継装置が想定される。可視光通信の場合は 1 対 n の可視光通信トポロジーでは可視光を共有結合媒体として用い、半二重通信を行う形式においては、AUTONEG を実装しない構成として図 2-4-3 のような可視光通信装置が想定される。100BASE 系で媒体共有結合は想定していない。このため、可視光通信側での衝突検出に、有線側と異なる方式を用いることも可能であり、図 2-4-3 に示すリピータユニット(100BASE-T Baseband Repeater Unit)内に RS 層あるいは MAC 層の機能まで内蔵して、光無線装置を構成することも可能である。

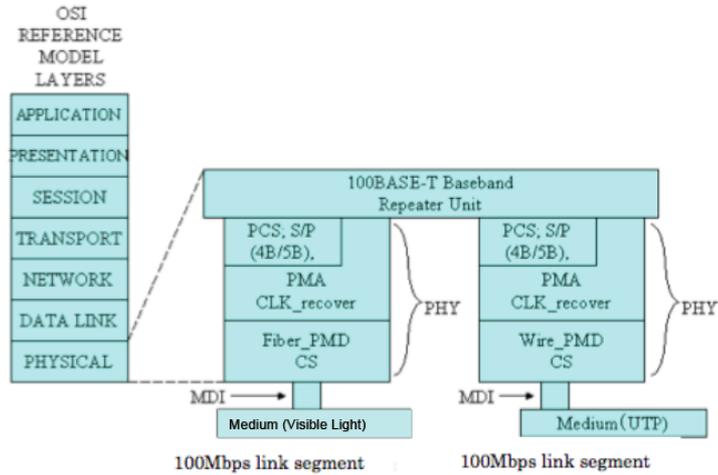


図 2-4-2. IP 層モデル

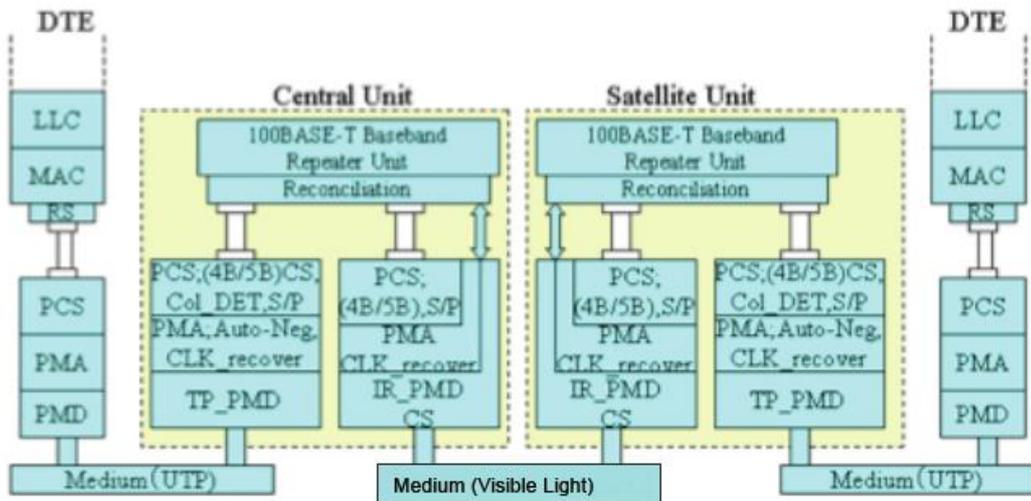


図 2-4-3. 1 : n 対応システムモデル

(2) 物理レイヤー

定義 本項では 100Mbps ベースバンド光無線の物理層及び中継器ユニット等に関する用語を定義する。

- ビット時間(bit time、BT) 1 ビットのシンボル時間幅(1/BR)
- 衝突(collision) 同時複数伝送によって生じた望ましくない状況
- 媒体非依存インターフェース(Media Independent Interface:MII) MAC 層からのサービスプリミティブを光無線形式物理層へ転送するための電気的インターフェースで、RS 層と PCS 層との間をつなぐもの
- リコンシリエーション副層(Reconciliation Sublayer:RS) MAC 層からのサービスプ

リミティブを MII 信号に変換する

- 物理層装置(Physical Layer Device:PHY) 物理的なメディアの駆動部(PMD)と信号の検出(PMA)及び変復調(PCS)により構成され、MII、RS 経由でデータリンク層(MAC)に論理的信号を提供する。 可視光通信装置では、可視光通信形式 PHY と有線 PHY を各 1 組持ち、異なる媒体をそれぞれの媒体に適した PHY で結合する事により、中継装置を構成している
- 単方向リンクセグメント終端コネクタを含む複数の可視光通信形式 PHY 間の無線パス
- 可視光通信リンク可視光通信のリンクセグメント及びそれに接続された 2 個の PHY
- 可視光通信リンクセグメント 2 個の PHY を接続するための可視光通信空間

(3)ネットワークレイヤー

スター、ツリー、メッシュの各トポロジーをサポート する。

スタートポロジでは、ネットワークは可視光通信基地局と呼ばれる 1 台のデバイスによって管理される。可視光通信基地局は、ネットワークを開始してネットワーク内のデバイスを管理する責務があり、エンドデバイスと呼ばれるこの他の全てのデバイスは、可視光通信基地局と直接通信する。

メッシュとツリーのトポロジーでは、可視光通信基地局がネットワークの開始、およびネットワークの主要なパラメータを確実に選択する責務がある。また、ネットワークは可視光通信のルータを使用することにより拡張することができる。

ツリーネットワークでは、ルータが階層型ルーティング・ストラテジを使用したネットワークにより、データと制御メッセージを受け渡す。IEEE 802.15.4 系の仕様に記述されるようなビーコンによる通信を行うこともできる。

メッシュネットワークは完全なピア・ツー・ピア通信を可能にする。

2-4-3. ネットワークレイヤートポロジー

100Mbps ベースバンド光無線システムには、1 対 n 型システムのトポロジーとする。

100BASE-T の有線側インターフェースとの接続、信号変換、可視光インターフェースが組み込まれ、ネットワーク(100BASE-T)の拡張手段として捉えることができる。

1 対 n 型システムは、基地局となる 1 つの可視光通信ユニットと配下の複数の可視光通信ユニットを接続する機能を有するシステムである。この時、子機となる複数の光無線ユニットと親機の間で干渉(混信)が無いように可視光通信パスを確立し、かつパスを独占しないためのプロトコルが組み込まれている。

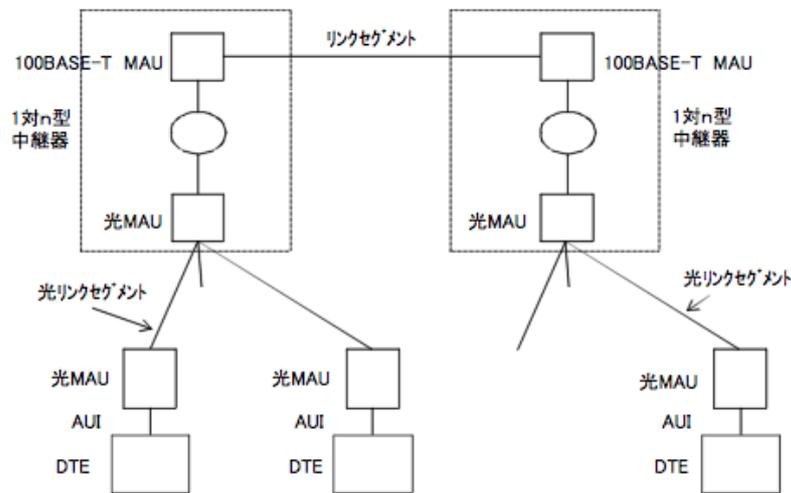


図 2-4-4. システムトポロジ

1 対 n 型システム 本システムは中距離(数 m)の 1 対 n 型システム例である。本システムを構成するコンポーネントとして、1 対 n 型中継器及び 1 対 n 型子機がある。いずれも、100BASE-TX の有線から可視光回線側へは、有線の PHY 構成を通った後、物理符号化副層 (Physical Coding Sublayer:PCS)により、4B/5B 符号化され、アイドル用コードグループと制御用コードグループを付加し、シリアライズ(直列化)された信号は、物理媒体接続層 (Physical Media Attachment:PMA)で NRZI (Non-Return to Zero Inverted)形式に変換され、次の物理媒体依存層 (Physical Media Dependent:PMD)に送られる。PMD(媒体依存インタフェース (MDI)も含む)では可視光受発光素子の駆動に適した FX 信号形式で、駆動信号が生成される。これらを 100BASE Baseband Repeater Set とする。これらの機能は上り下り一対が一体になったもので、前者は主に天井、壁等に設置し、後者は主に机上等に設置して使用することを想定している。

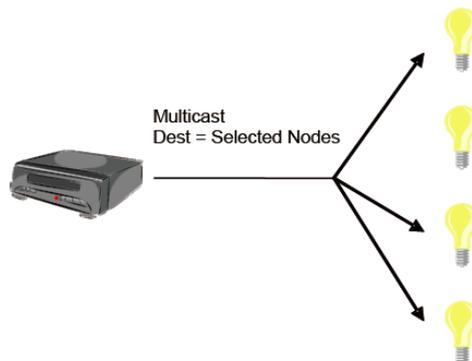
天井等に設置された 1 対 n 型中継器と、机上等に設置された複数の 1 対 n 型子機を用いることで、机上等のより対線リンクセグメントを、簡単に他のより対線リンクセグメント(半二重通信)と接続することが可能となる。1 対 n 型子機は、光学部に指向性を持たせており、同一空間内に複数配置できるようにしている。一方、1 対 n 型中継器は、複数の 1 対 n 型子機と接続するために、指向性を広くしている。本システムのトポロジー例を図 2-4-4 に示す。1 対 n 型中継器では、赤外線 FX 信号の媒体共有結合に於ける衝突検出を、回線調停副層 (Reconciliation Sublayer(RS 層))により実現する。したがって、ある 1 対 n 型子機から、この回線調停を介して光無線リンクセグメントを経由し、本中継器に入力された信号は、本中継器リピータユニットを経由して 100BASE-TX 側に送り出される。この後、1 対 n 型(中距離用)中継器が保持した信号は可視光通信光リンクセグメントにも送り出され、別の 1 対 n 型子機で受信される。

7	6	5	4	3	2	1	0
Home ID (0)							
Home ID (1)							
Home ID (2)							
Home ID (3)							
Source Node ID							
Routed	Ack	Low Power	Reserved	Header Type			
Reserved							
Length							
Address offset			Number of mask bytes				
Mask byte 0							
Mask byte 1							
...							
Mask byte 28							
Payload byte 0-x							
..							
Checksum							

図 2-4-5. トランスファーフレームタイプ 1対n仕様

Multicast ベース

- トランスの選定値は1から2 3 2 ノード
- Acknowledge フレームは返信しない



本プロトコルを用いた可視光通信 I P ルーターのリファレンスデザインを以下に示す。



2-5. ⑤既存インタフェースとモバイル可視光通信を相互接続する組み込みソフトウェアの開発

成果：自動車の車内機器間通信や、FA (Factory Automation) での機器間の通信に使用されている有線の通信プロトコル「CAN」の通信媒体に可視光を用いて通信可能な構成を研究・構築した。CAN の通信で使われている伝送方式の差動信号方式を、可視光通信を行う上で最適な伝送方式のシングルエンド信号方式に置き換えて可視光通信を行うという方法にて検証し、その結果、約 8 cm の通信距離において CAN プロトコルによる双方向の可視光通信を実現した。

2-5-1. プロトコル概要

(1) プロトコル選定理由

CAN プロトコルは車載ネットワークにおいて事実上の業界標準(=デファクトスタンダード)であり、このプロトコルの省配線化は世界中の自動車メーカーからニーズがあると考えられる。

また、通信速度は最速 1 Mbps となっており、その他の制御信号通信プロトコルと比較した際、通信速度は中程度であり、CAN プロトコルを可視光通信で実装できれば CAN プロトコルと通信速度が同程度の制御信号通信プロトコル、あるいはそれよりも低速なプロトコルであれば可視光通信で実現は可能であると考えられる。以上のことを踏まえ、本研究では CAN プロトコルを選定した。

(2) CAN とは

Control Area Network の略で、機械や電子回路間で制御信号の通信を行うためのシリアル通信プロトコルである。もともとは自動車内での複数の ECU (Electronic Control Unit.. 電子回路) を接続して通信するために、ドイツの電装機器メーカーのロバート・ボッシュ社によって開発されたシリアル通信プロトコルである。現在では ISO にて標準規格化され、その性能と柔軟性から FA (Factory Automation) や産業機器、医療機器などのネットワークとして広く導入されている。

(3) CAN の通信方式

CAN プロトコルの通信方式には、半二重通信の差動信号方式と、同じく半二重通信のシングルエンド信号方式を用いた方式がある。差動信号方式とは、信号の伝送を行う際、2本の信号線を使い 1 ビットの信号を転送する方式である。一方の信号線は通常の ON/OFF 信号、もう一方の信号線には前記の信号の位相を反転(逆位相)させた信号を使用する方式である。

それに対し、信号線は 1 本で、ON/OFF 信号をそのまま伝送に使用する方式をシングルエンド信号方式という。

CAN を実装する際、通信方式を前述の 2 つから選択することになるが、今回、可視光で通信を行うに当たりシングルエンド信号方式を用いた。その理由として、有線の CAN 通信の多くは差動信号方式を使用しているため信号線を 2 本使用しているが、差動信号をそのまま光に変換し送受信を行おうとすると光-電気変換を行う際に一方の光信号がもう一方の光信号に干渉を起こしてしまう可能性がある。実際に通信を行なっている回路の受光素子に直流の光信号や光に変換したパルス信号を照射したところ、通信が途切れたことがあり、その点を踏まえ差動信号方式を使用せず、シングルエンド信号方式とした。

以下に CAN プロトコルの仕様(抜粋)とシングルエンド信号方式の CAN 通信の概要図を記す。

表 2-5-1.CAN プロトコルの仕様(抜粋)

項目	仕様
伝送方式	半二重シリアル通信(差動信号方式)
媒体アクセス制御方式	CSMA/CA
ネットワークトポロジ	バス型(マルチマスタ方式)
最大通信速度	1Mbps (ISO11898), 125Kbps (ISO11519)
同期方式	調歩同期、位相補正

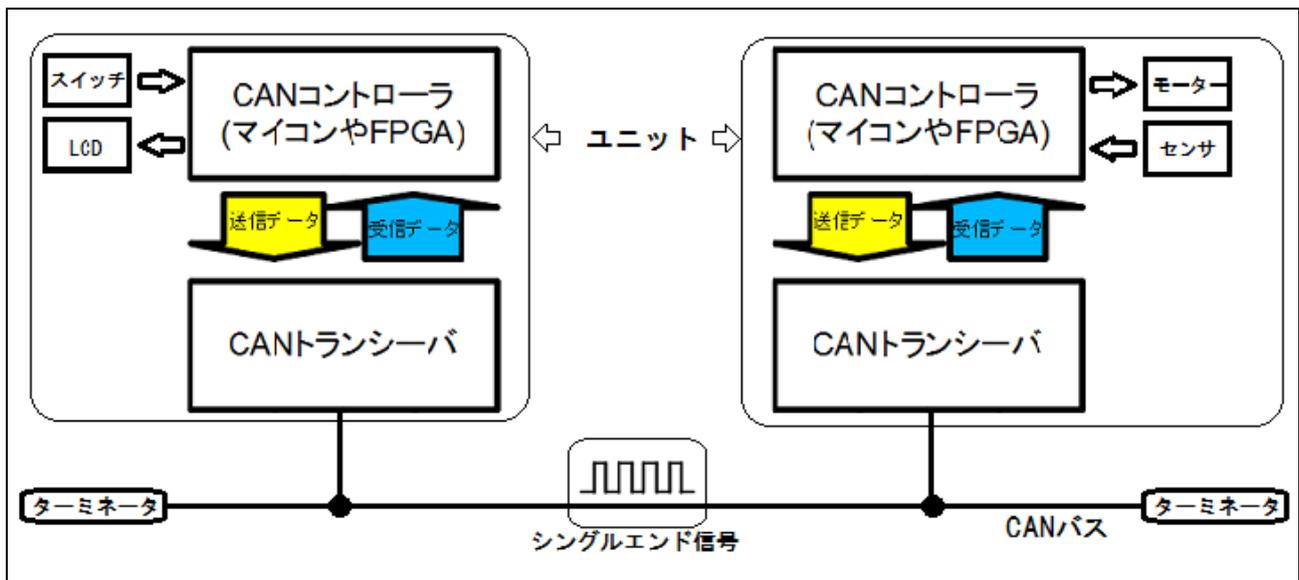


図 2-5-1. シングルエンド信号方式を用いた CAN プロトコルの概要

(4) CAN 通信の流れ

信号の送信・受信の一連の通信の流れを図 2-5-2 を参照しながら解説する。例としてユニット 1 を信号送信ユニット。ユニット 3 を信号受信ユニットとする。ユニットとは、CAN トランシーバ・CAN コントローラ及びその周辺回路を組み合わせたものである。ユニットの構成は図 2-5-1 を参照。また、下記の番号と図の番号は対応している。

- ①信号を送信するユニット 1 が CAN バスに ID の入った信号を送信し、CAN バスに接続されているユニット 2、3、4 全てがその信号を受信する。
- ②信号を受信したユニットでは信号の ID でどのユニット宛の信号なのかを判断する。
- ③信号を受信するべきユニット 3 であればその信号に沿った処理を行い、それ以外のユニットのユニット 2、4 は受信した信号を破棄する。
- ④ユニット 3 はユニット 1 からの信号に沿った処理ができたのであれば CAN バスに ACK 信号を送信し、そうでなければ NACK 信号を送信する。
- ⑤ユニット 1 が ACK 信号を受信すれば通信は正常に行えたと判断し通信は終了となる。NACK 信号を受信した場合は再送信処理などのエラー処理を行う。

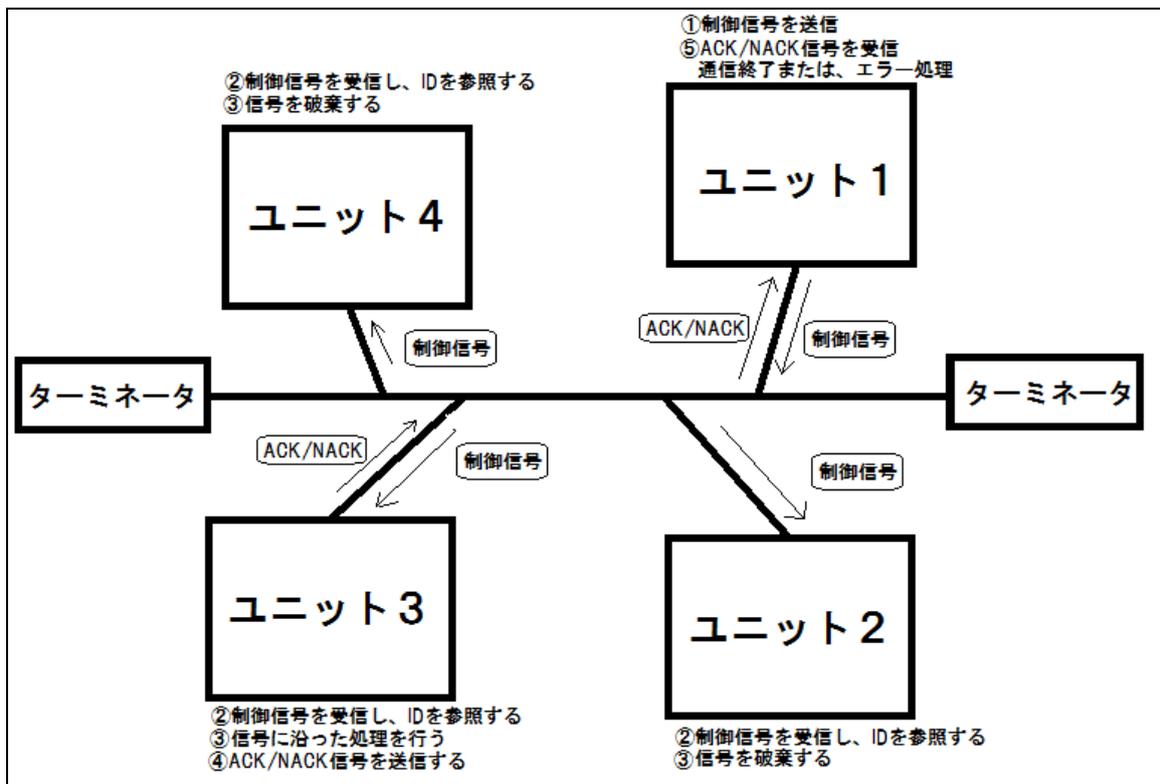


図 2-5-2. バス型のトポロジ

2-5-2. 使用機器・部品

CAN を実装するには CAN コントローラ IC を接続した PIC やマイコン、CAN コントローラが内蔵されたマイコン、CAN 通信専用の IP をロードした FPGA などを使用する。IP とは Intellectual Property の略称で、FPGA ベンダーなどから提供される特定の機能に特化したマクロコードのことである。使用するにはベンダーからライセンスを取得する必要がある。

またそれぞれ CAN トランシーバ IC を接続する必要がある。

参考価格として、CAN コントローラ IC を使用する場合は 2 千円程、CAN コントローラを内蔵したマイコンを使用する場合は 2 千円程、FPG 基板を使用する場合は 1 5 0 万円程(ライセンス料含む)かかる。

今回は比較的入手が容易で且つ即座に開発可能な汎用のマイコン「RX62N」を使用した。



図 2-5-3. RX62N マイコンの外観

表 2-5-2. RX62N の仕様(抜粋)

最大動作周波数	100MHz
GPIO	最大 128 本
CAN モジュール	1 ch
メモリ	RAM として 96 KByte
その他	通信機能としてイーサネットコントローラや I2C バスインタフェースを内蔵

表 2-5-3. 使用部品

名称	社名
CAN トランシーバ MCP2551	MicroChip
超高輝度白色 LED	OptoSupply
PIN フォトダイオード S6775	浜松ホトニクス
1 / 4 W カーボン抵抗器各種	クニ産業株式会社
トランジスタ 2SC1815, 2SC3964	東芝
ショットキーダイオード	PANJIT Semiconductor
積層セラミックコンデンサ各種	株式会社村田製作所

2-5-3. 実験概要

有線の CAN 通信ではユニットを複数 CAN バスに接続し、通信を行う。しかし、有線の通信を可視光を用いた通信に置き換えるに当たり、光信号を CAN バスに接続して光-電気変換・電気-光変換を繰り返すことによる信号の歪みやノイズの混入などのリスクがある。今回の実験の趣旨は CAN プロトコルを可視光通信で実現することが目的なので、ノイズ等の外部要因が原因で通信不能となることを避けるべく、光-電気変換・電気-光変換を行う回数が必要最小限となる 1 体 1 の対向通信とした。

下記の図 2-5-4 及び図 2-5-5 の構成の回路をブレッドボード上に構築し、可視光対向通信を実験した。送受信確認のため、

- ①送信側でファンを回転させる信号を送信すると、受信側ではファンが回転しオンボード LED が消灯する。
- ②送信側でファンを停止させる信号を送信すると、受信側ではファンが停止し、オンボード LED が点灯する。

という 2 つの処理をプログラム上で組み実験を行った。加えて、

- ③通信距離に応じて光-電気変換した際の信号強度の変化の様子をオシロスコープで観測し、どの程度の信号強度であれば送受信可能かを測定する。

という実験を行った。実験番号は後述する実験結果の番号と対応している。

今回は便宜上送信回路・受信回路と表記しているが、実際には送信回路でも ACK 信号を受信しており信号を受信することは可能である。また、受信回路から送信回路に信号を送信することも可能である。

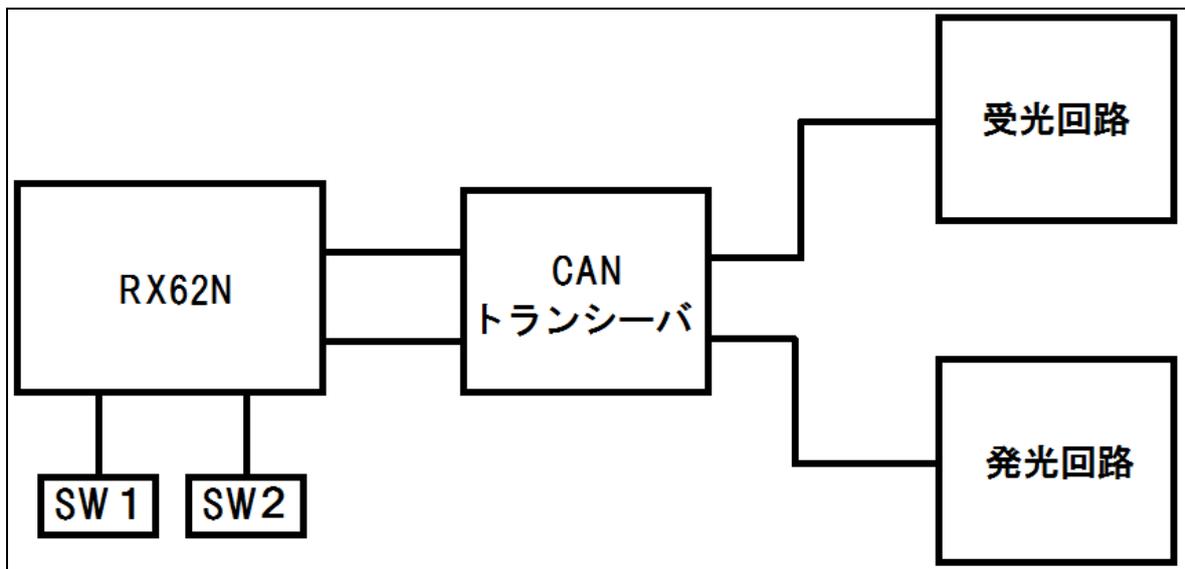


図 2-5-4. 送信回路ブロック図

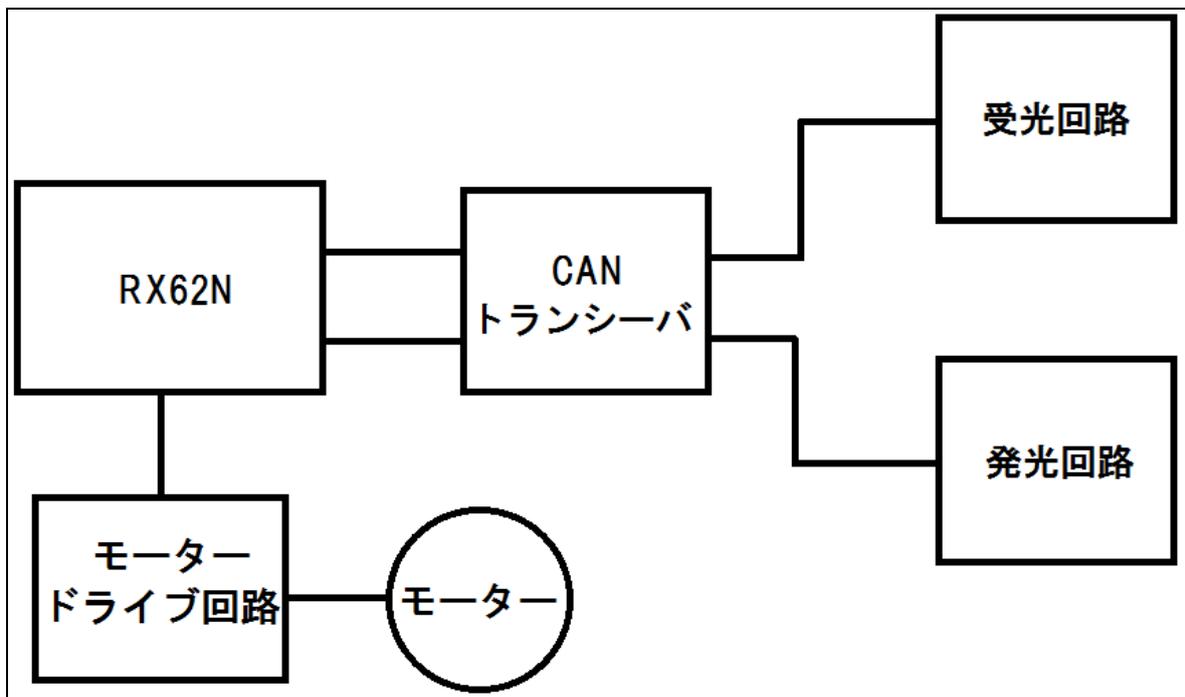


図 2-5-5. 受信回路ブロック図

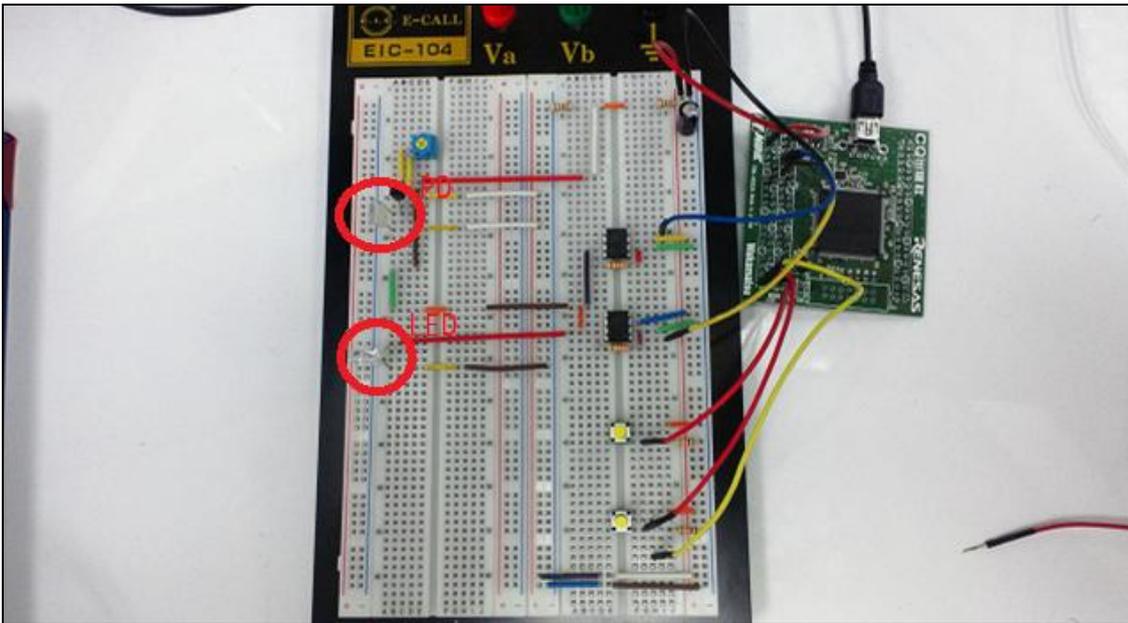


図 2-5-6. 実装した可視光送信回路

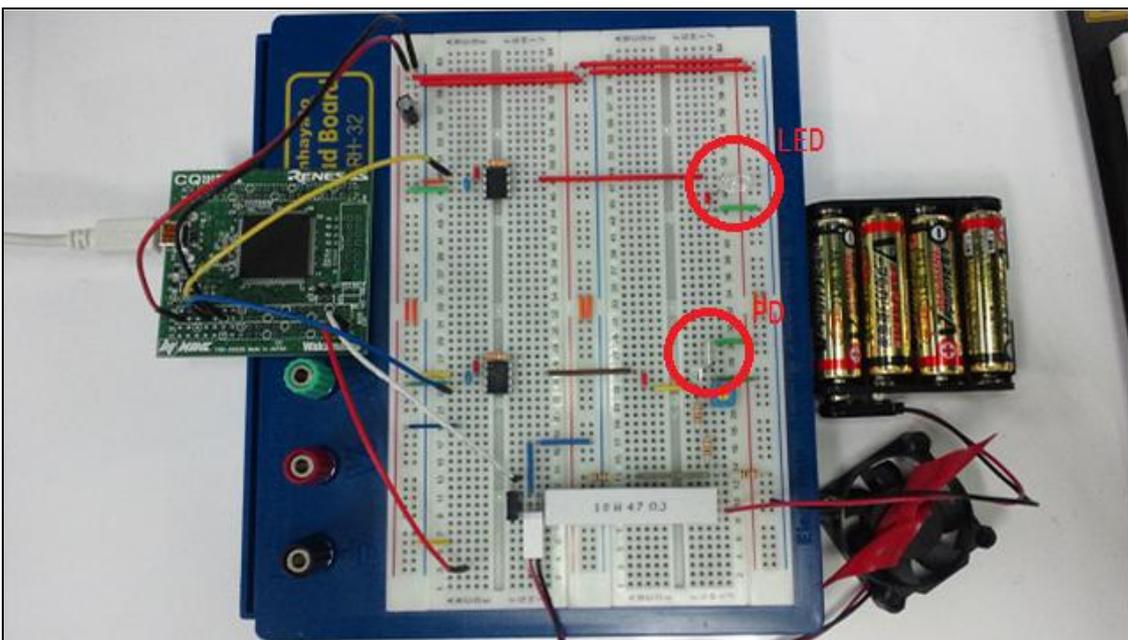


図 2-5-7. 実装した可視光受信回路

2-5-4. 実験結果

実験概要に示した①の実験を行う。

送信回路のスイッチ(ブロック図上の SW 1)を押し、ファンを回転させる信号を送信する。

プログラム通りにファンが回転するのが確認できた。また、オンボード上の LED が消灯していることが確認できた。

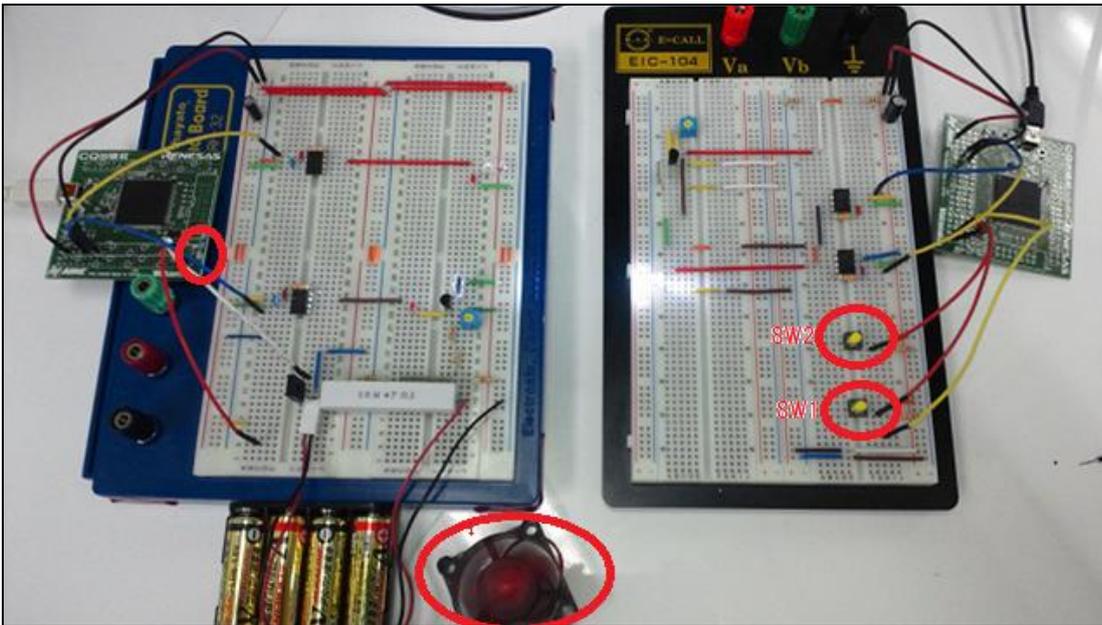


図 2-5-8. ファン回転信号を送受信した様子

続けて、実験概要に示した②の実験を行う。

送信回路のスイッチ(ブロック図上のSW 2)を押し、ファンを停止させる信号を送信する。

こちらもプログラム・回路通りに回転中のファンが停止し、オンボード上の LED が点灯することが確認できた。



図 2-5-9. ファン停止信号を送受信した様子

また、実験概要に示した③の実験を行う。

通信距離に応じて受信信号の強度がどのように変化するかをオシロスコープを用いて観測した。通信距離毎の信号波形を以下に記す。通信距離 3 cm 未満の信号は通信距離 3 cm の信号と大差なかったため割愛する。また、通信距離 9 cm 以上の信号に関して、ACK 信号は確認できたが、通信が行えていなかったため、同じく割愛する。

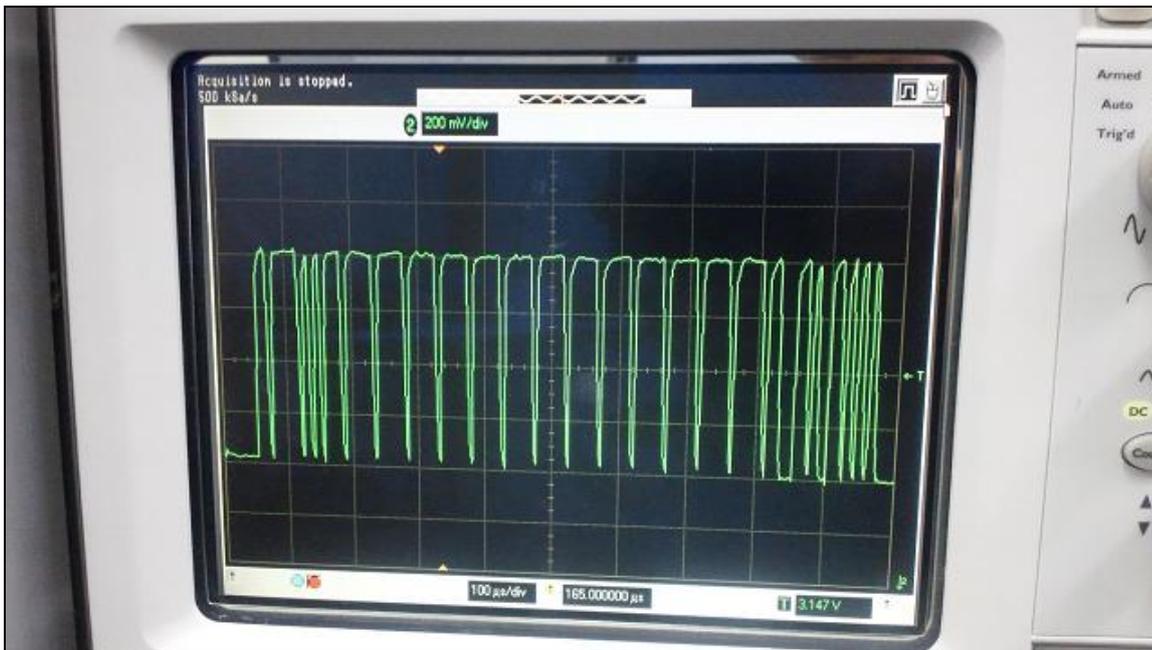


図 2-5-10. 通信距離 3 cm の信号

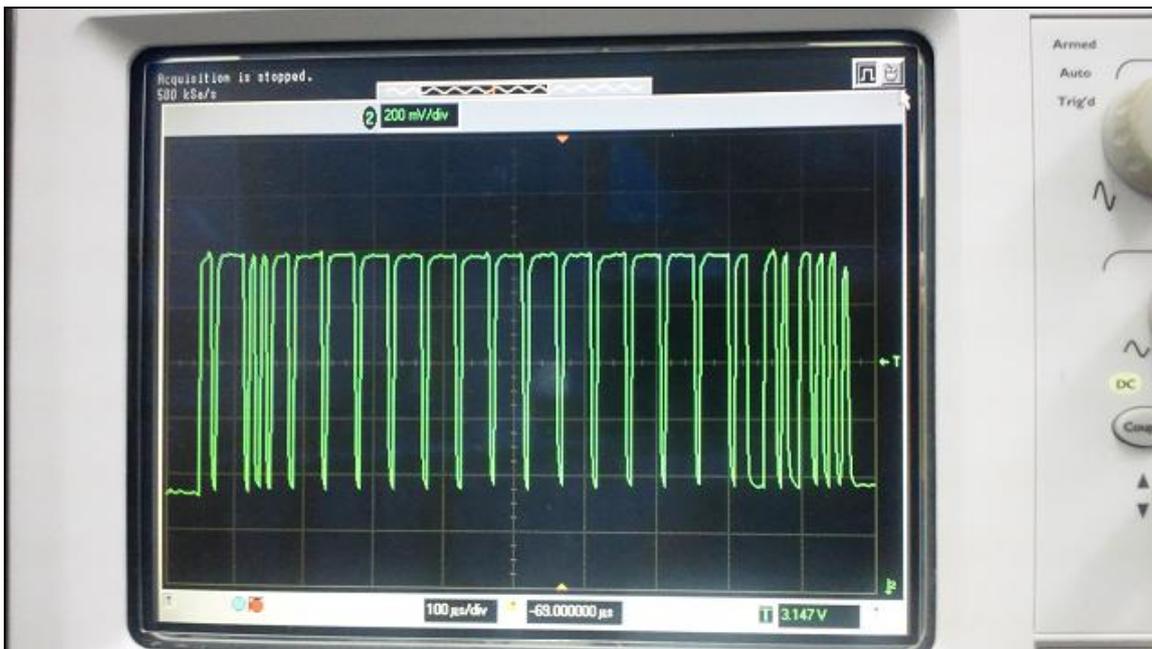


図 2-5-11. 通信距離 4 cm の信号



図 2-5-12. 通信距離 5 cm の信号



図 2-5-13. 通信距離 6 cm の信号



図 2-5-14. 通信距離 7 cm の信号

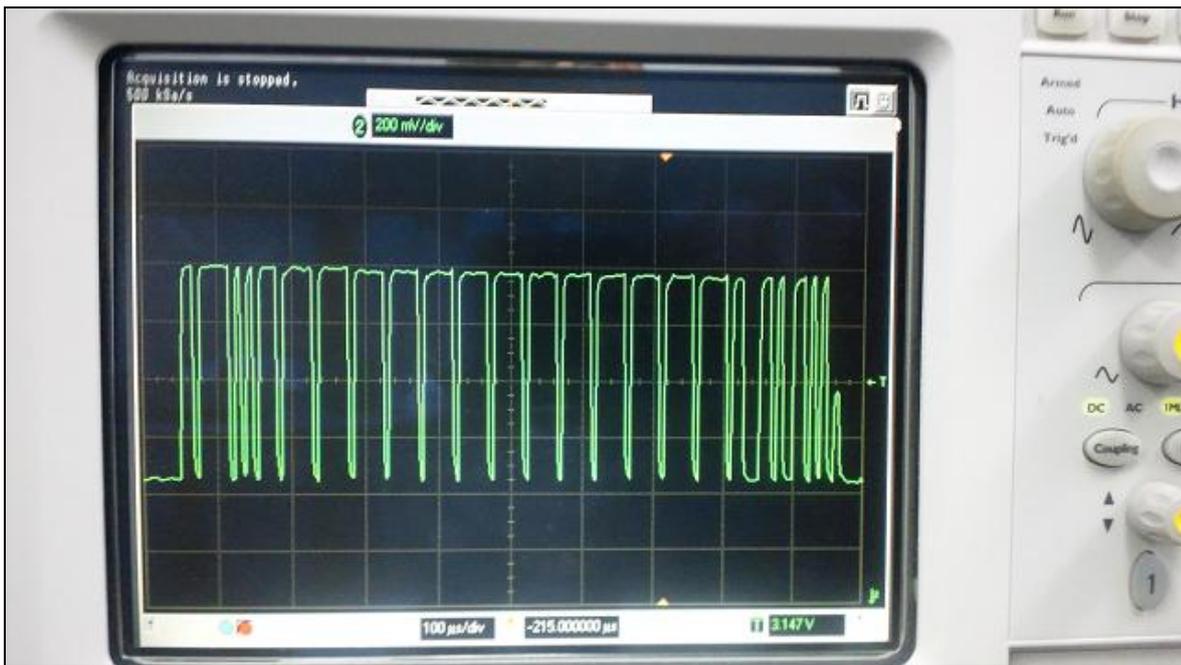


図 2-5-15. 通信距離 8 cm の信号

観測した結果を見てみると、通信距離が伸びるに従って右端の 1 ビットが徐々に弱まっているのが確認できる。この信号は受信回路から送信回路に伝送され、送信回路で測定した ACK 信号である。その他の矩形波は送信回路から送信される制御信号である。ACK 信号が弱まるに従って通信の安定性が落ちた。そのため、送信回路で受信する ACK 信号の信号強度と通信の安定性に相関があると予測されたため、通信距離、ACK 信号強度(オシロスコープ観測値)、通信の可否を調査し、下記の表にまとめた。

表 2-5-4. 通信距離・ACK 信号強度・通信の可否

通信距離	ACK 信号強度	通信の可否
3cm	800mV	可
4cm	720mV	可
5cm	680mV	可
6cm	610mV	可
7cm	490mV	断続的ながら可
8cm	370mV	不可

表 2-5-4 からわかるように、通信距離 7 c m程から通信が不安定になり、距離 8 c mでは通信が行えないことが確認できた。受信回路から ACK 信号が送信されているということは、送信回路から受信回路への制御信号の転送は正常に行えていると判断でき、送信回路で ACK 信号を受信できるかどうかは通信全体の安定性につながっていると考えることができる。

2-5-5. まとめ

実験の結果から、CAN の通信媒体を電気信号から可視光に置き換えても通信が可能であることが確認できた。しかし、安定した通信が行える距離は最長でも 6 c m程度、断続的に通信ができたのは 7 c m程度であり、それ以上に距離を伸ばすと通信できないことが確認できた。また、指向性が強く、直線に対向させないと通信できないことが確認できた。

距離については表 2-5-4 に示す ACK 信号を受信できるかで通信ができるかどうかが決まっているので、ACK 信号を増幅して LED の輝度を高くするか、パワーLEDなどに置き換える。または ACK 信号を受信する回路の増幅率を高くすることによって通信可能距離を伸ばす余地は十分にある。ただし、通信距離の延長については、本研究テーマの趣旨から外れるため、今回の実証実験において、その検証については深く探求しない。

指向性については受光素子の特性により大きく変わるので、指向性の弱い別の受光素子を用いることで、改善できる余地はあるが、こちらも本テーマの趣旨から外れるため、深く探求しない。

また、CAN プロトコルを可視光通信で実装可能であることが確認できたため、CAN プロトコルと同程度の通信速度やそれ以下の通信速度を扱う他の制御通信プロトコルについて、独自の通信方式を規定しているプロトコルを除けば、今回実装したモジュールと同じような構成で可視光通信を実装できる可能性が高い。

2-6. ⑥モバイル可視光通信基板を利用したワンセグ自主放送システムの開発
可視光通信による地上デジタル放送波の送受信検証

2-6-1. 原理

(1) ダブルバランスドミキサ

ダブルバランスドミキサとは、混合器とも呼ばれる、周波数変換器の事である。2つの周波数を入力すると、その和と差の周波数を出力する。ダブルバランスドミキサの内部構造を図 2-6-1 に示す。

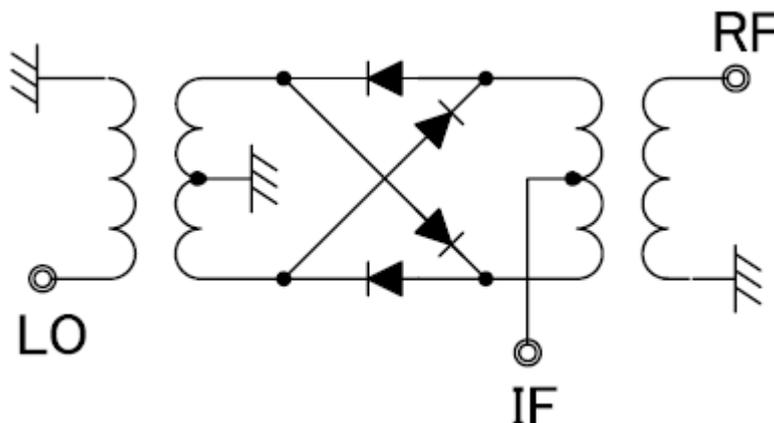


図 2-6-1. ダブルバランスドミキサの内部回路図

ダブルバランスドミキサは、2つのフェライト広帯域トランスと4本のダイオードで構成されている。ここで、図 2-6-1 中の RF 端子は高周波入力端子、LO 端子はダイオードにバイアス電流を促す為の入力高周波端子、IF 端子は出力端子と呼称されている。実際には、3つの端子の内、2つの端子に異なる周波数の信号を入力すると、残った1つの端子からその和と差の周波数を出力する仕組みとなっている。

(2) PLL

PLLとはPhase Locked Loopの略で、一定の発振周波数で信号を出力することができる発振回路の事である。入力信号や基準周波数と出力信号の周波数を一致させる電子回路であり、入力信号と出力信号の位相差を検出し、VCO(Voltage Controlled Oscillator・・・電圧制御発振器)や回路のループを制御することで、正確に同期した周波数の信号を出力することができる。このような発振周波数を一定に保つ他、カウンタを組み込むことで入力信号の整数倍の周波数で信号を出力することもできる。

(3) OFDM変調

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiple/ 直交周波数多重方式)とは、デジタル変調の一種で、情報を1つのキャリア(シングルキャリア)で伝送するのではなく、情報を分割し、いくつかのキャリア(マルチキャリア)に乗せる方式のこと。変調をかけた周波数の異なる各キャリア(サブキャリア)をIFFT(Inverse Fast Fourier Transform/ 逆高速フーリエ変換)で合成し、1つの波として伝送するマルチキャリア伝送方式。それぞれのサブキャリアはBPSKや64QAM等のデジタル変調方式で変調している。図 2-6-2 に OFDM 変調の概要を示す。

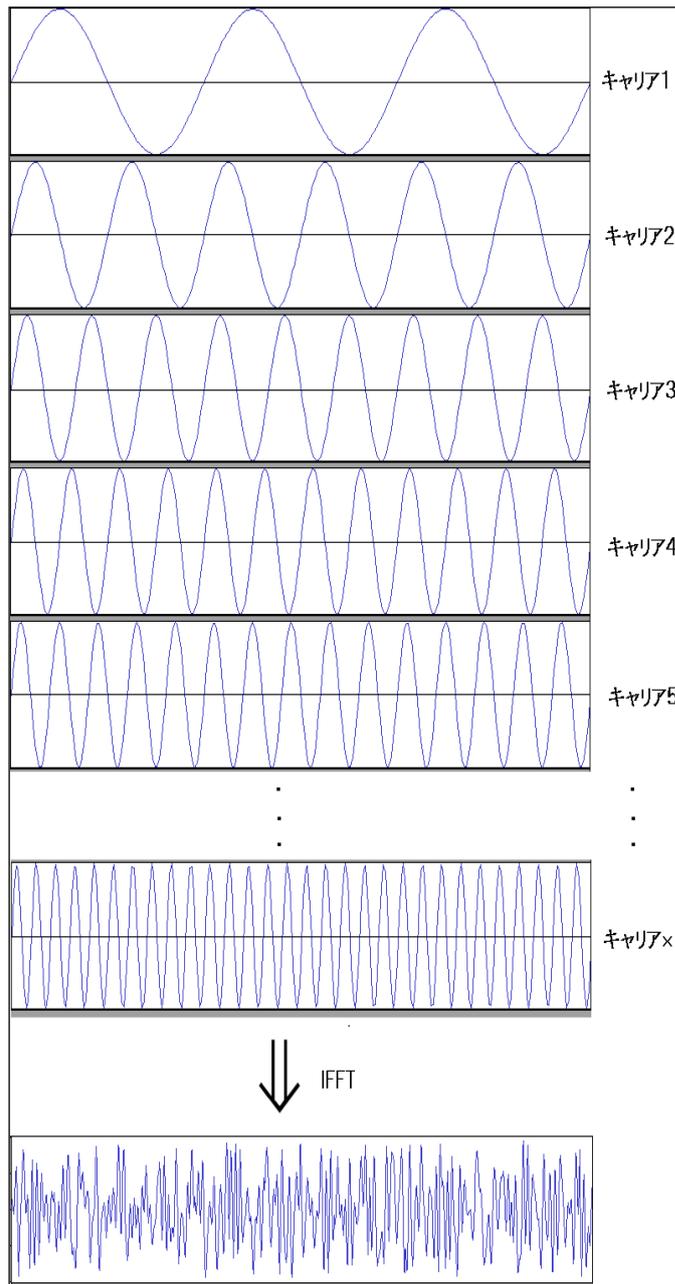


図 2-6-2. OFDM 変調

(4) 地上デジタル放送

地上のデジタル方式の無線局より行われるテレビ放送である。日本のデジタル放送の方式は、ISDB-T であり、映像符号化方式には MPEG-2 ビデオ(ビットレート約 16.8Mbps)、音声符号化方式には 5.1ch サラウンドに対応した MPEG-2AAC を用いている。従来の地上アナログ放送より高品質な放送を視聴することが可能である。

伝送路符号化方式は OFDM で、1 チャンネル(約 6MHz)は、13 の帯域(セグメント)とガードバンド(キャリア毎の間隔を取るための未使用の領域)に分割されている。この内、地上デジタルテレビ放送に利用されるのは 12 セグメントで、残りの 1 セグメントはワンセグ放送に使用される。表 2-6-1 に現行の地上デジタルテレビ放送方式の伝送パラメータを示す。

表 2-6-1. 現行の地上デジタルテレビ放送方式の伝送パラメータ

パラメータ	
OFDM セグメント数	13
帯域幅	5.572MHz
キャリア間隔	0.992MHz
キャリア数	5617
キャリア数/セグメント	432
変調方式	QPSK, 16QAM, 64QAM, DQPSK
有効シンボル長	1.008msec
ガード・インターバル長	有効シンボル長の 1/4, 1/8, 1/16, 1/32
内符号	畳み込み符号(1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8)
外符号	RS(204, 188)

(5) 地上デジタル放送信号の可視光伝送

通常、地上波の VHF Low バンドから対応している液晶テレビでは、中心周波数 93 [MHz] の放送信号から受信することが出来る。しかし現在アウトスタンディングテクノロジーが開発している発光・受光素子では、送信可能な最大周波数は約 25 [MHz] となっており、仮に放送信号を 25 [MHz] で送信し、液晶テレビに入力しても、地上波テレビ信号として認識することは不可能である。

そこで、発光・受光素子が送信可能な周波数帯で地上波テレビ信号を可視光で送信し、液晶テレビに入力する前に、前述したダブルバランスドミキサを用いて周波数をアップコンバートし、液晶テレビが認識可能な周波数帯にすることで、地上デジタルテレビ放送の可視光伝送が可能になることが考えられた。

今回の実験では、まず地上デジタルテレビ信号である OFDM 変調信号がダブルバランスドミキサで周波数変換可能かどうかを検証し、また周波数変換を用いることで、地上デジタルテレビ放送信号の可視光伝送が可能かどうか検証した。

2-6-2. 実験方法

今回、実験として以下 4 種類の実験を行った。

(1) 実験 1. 地上デジタル放送波の周波数変換実験

(TVtest) パソコンに保存した地上デジタル放送の 1 チャンネル分の放送データを、DekTec 社の DTA-2111 を用いて出力した。直接地デジのアンテナ線を接続しなかったのは、今回使用した PLL 発振器が出力可能な周波数範囲では、アンテナ線からの信号を上手く周波数変換することが難しかったことと、出力時に DekTec 社のソフトウェアである Stream Xpress を用いることで、周波数を調節することが出来るので、狙い通りの周波数に変換する事の確認が取りやすかったためである。

前述した Stream Xpress を用い、規格を ISDB-T、中心周波数を 333.143 [MHz] (CATV の 41ch に相当) に設定した。この信号を、ダブルバランスドミキサ MX140-0B を用いて周波数変換を行った。その際、局部発振器として PLL 発振キットの KEM-PLL-MB15 を用い、発振周波数を 102 [MHz] とした。

実験 1 における、PC 側の出力周波数、及び PLL 発振器の出力周波数を決めた要因としては、PLL 発振器の性能上、100 [MHz] 付近の発振が最も安定していた事と、ISDB-T の規格上、周波数変換の為に正弦波の周波数は 6 の倍数であることが望ましかったので、PLL の発振周波数は 102 [MHz] としている。またそれに合わせて、PC による地デジの放送データの周波数は CATV の周波数帯内に収まる適当な周波数として、333.143 [MHz] を選択した。

周波数変換を行った信号を、SONY 製の液晶テレビ BRAVIA に入力し、変換後の周波数帯域のチ

チャンネルで映像が確認できるかどうかを検証した。
実験 1 の概要図を図 2-6-3 に示す。

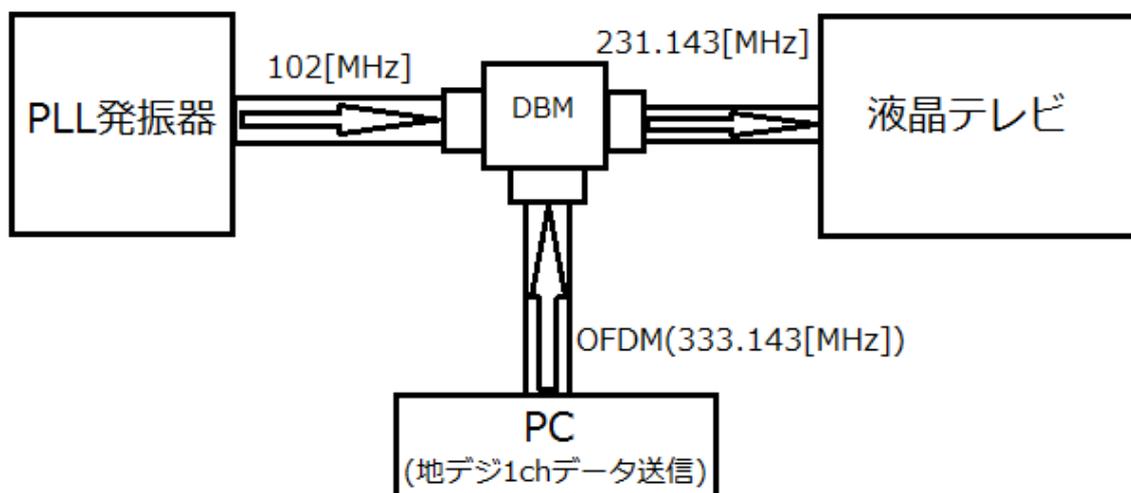


図 2-6-3. 実験 1 の概要図

(2) 実験 2. 地上デジタル放送波の光伝送実験

実験 1 と同様、パソコンに保存した地上デジタル放送の 1 チャンネル分の放送データを、Stream Xpress を用いて出力した。その際、規格を ISDB-T、中心周波数を 22.143MHz とした。この信号を、株式会社アウトスタンディングテクノロジーの汎用 LED 送信モジュールおよび汎用受光モジュールを用いて光伝送し、受光モジュールから出力された信号をダブルバランスドミキサ MX140-0B を用いて周波数変換を行った。その際、局部発振器として、貴田電子設計の KEM-PLL-MB15 を用い、その発振周波数を 101[MHz] とした。

実験 2 における、PC 側の出力周波数、及び PLL 発振器の出力周波数を決めた要因として、PLL 発振器の周波数の理由は、前述したように 100[MHz] 付近が安定する事と、Stream Xpress が出力可能な周波数の最低値が 20[MHz] である事、また今回使用した発光、受光素子に対応可能な最大周波数が 24[MHz] 辺りであることを総合して考えた結果、液晶テレビに受信させる周波数を 123[MHz] と予め決めておき、そこから逆算して最も安定して周波数変換出来ると考えられる周波数として、PLL からは 101[MHz]、Stream Xpress からは 22[MHz] をそれぞれ出力として設定したからである。

周波数変換を行った信号を、SONY 製の液晶テレビ BRAVIA に入力し、変換後の周波数帯域のチャンネルで映像が確認できるかどうかを検証した。

また、発光-受光間の距離を徐々に離し、どの程度の距離なら受信可能か、即ち液晶テレビでテレビ映像として表示可能かどうかを調べた。具体的には、今回使用した SONY 製の液晶テレビ BRAVIA の信号強度測定機能を用いて信号強度の数値を調べた。BRAVIA 固有の受信強度の数値であるため使用する液晶テレビ毎に数値は変動すると考えられるが、今回は受信の指標としてこの数値を用いる。

次に、受光基盤がどの程度地上デジタル放送波を受け取れているのかを調べ、先の実験によって得た受信可能距離との関係を検証した。具体的には、地上デジタル放送波を光伝送し、その発光-受光間の距離を 1[cm] 間隔で離していき、その時受光基盤が出力した波形の周波数スペクトルをオシロスコープを用いて計測し、発光-受光間の距離が離れた場合の周波数スペクトルの変化を調べた。なおこの際ミキサによる周波数変換は行なってはいないが、理由としては、今回はあくまで受光基盤がどの程度地上デジタル放送波を受け取れているのかを調べるためである事と、PLL が出力する正弦波によって周波数スペクトルが見えにくくなってしまうことが考えられる為である。

実験 2 の概要図を図 2-6-4 に示す。また、実際にテレビに接続する際のダブルバランスドミキサの接続風景を図 2-6-5 に、Stream Xpress が出力した地上デジタル放送波とその周波数スペクトルを図 2-6-6 に示す。

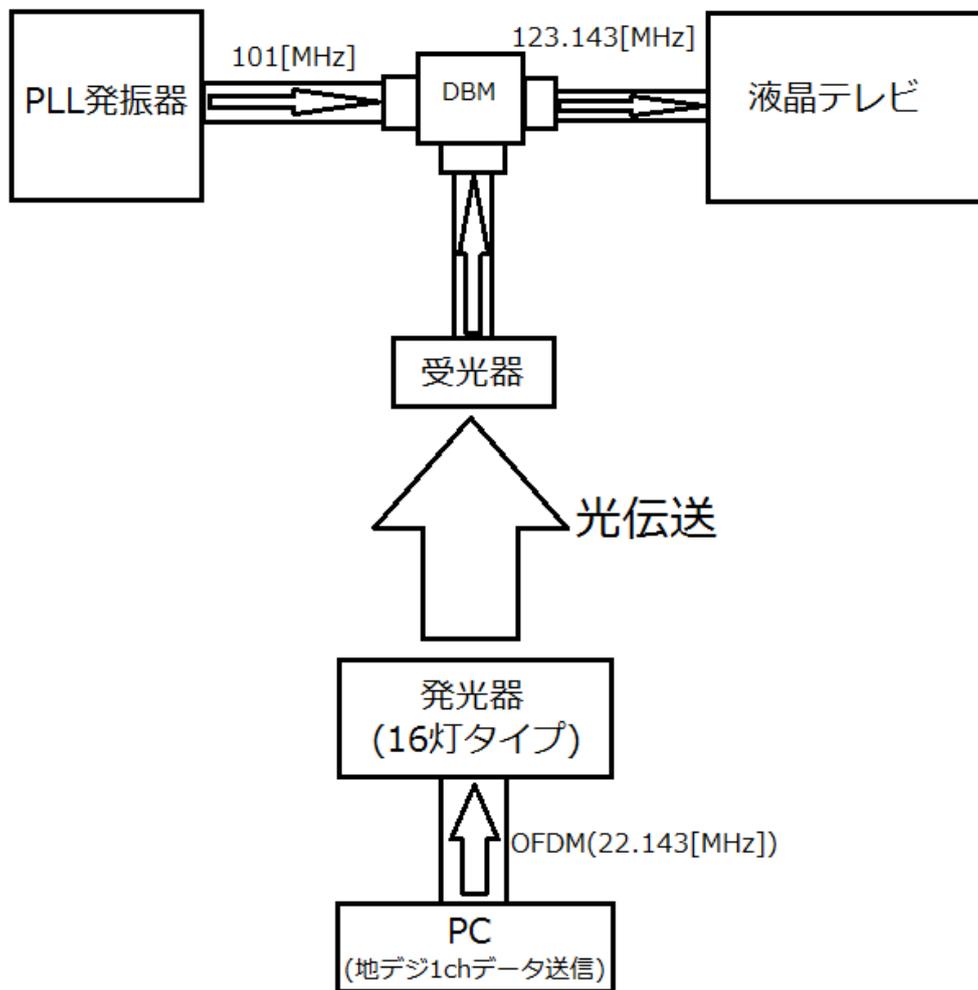


図 2-6-4. 実験 2 の概要図

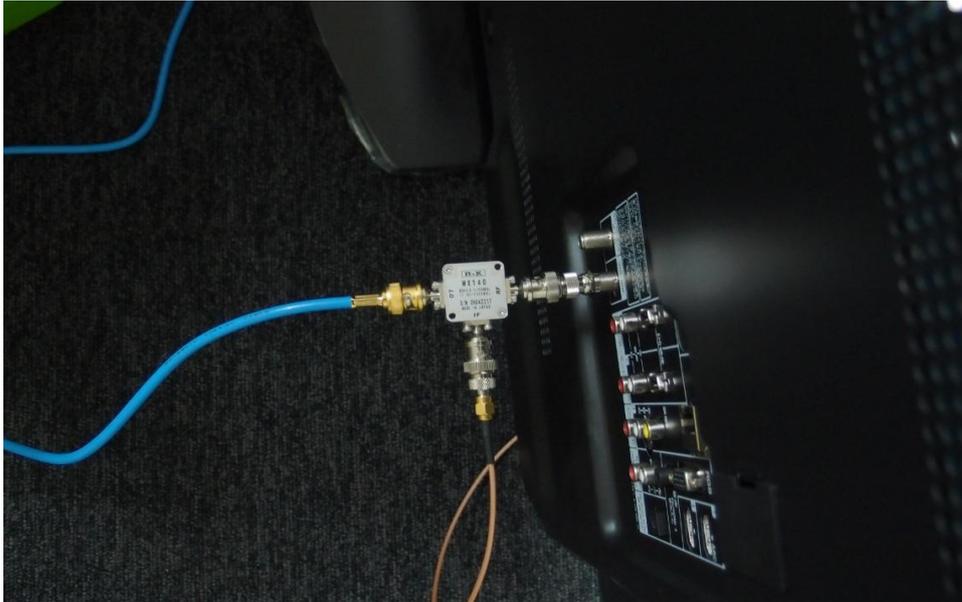


図 2-6-5. ダブルバランスドミキサの接続風

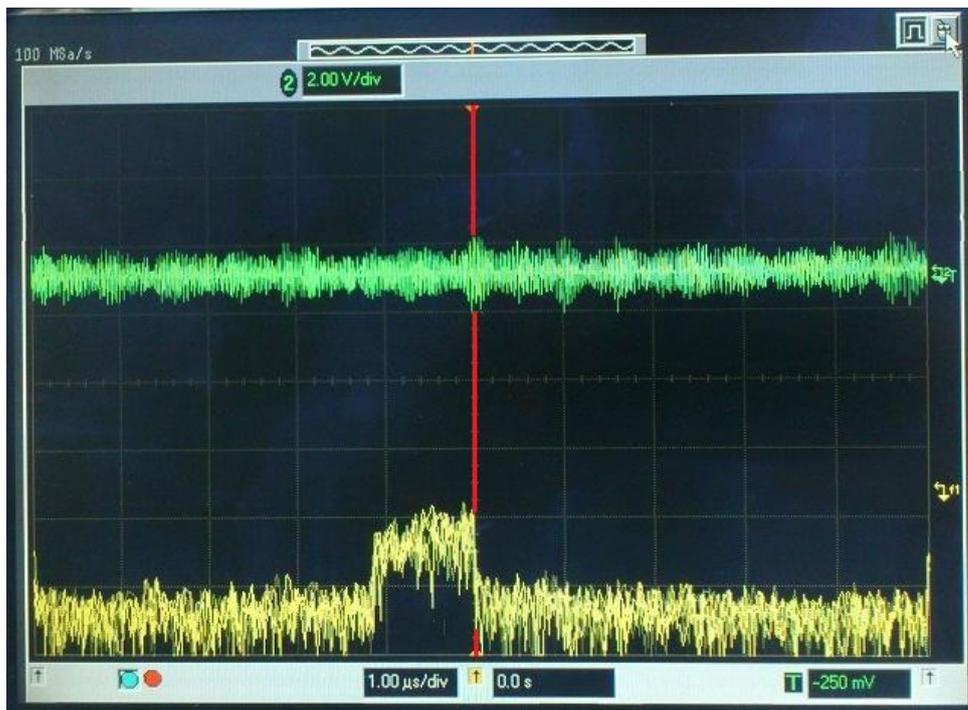


図 2-6-6. Stream Xpress が出力した地上デジタル放送波とその周波数スペクトル
 (上部波形：地上デジタルテレビ放送波，下部波形：周波数スペクトル)
 (周波数スペクトルのレンジ：中心線(赤線)25 [MHz], 5 [MHz]/div)

地上デジタル放送波の中心周波数は 22.143 [MHz]、ISDB-T 規格によって 6 [MHz] の帯域なので、中心線左側にその帯域が見て取れる。これが地上デジタル放送波の周波数スペクトルとなる。

(3) 実験3 レンズを用いた光伝送実験

実験2と同様の実験であるが、光伝送路上にレンズを配置し、実験2より距離が離れた場合での光伝送実験を行った。実験にはPanasonic製のレンズTKG139944-2を2個使用した。次に、受光基盤がどの程度地上デジタル放送波を受け取れているのかを調べた。具体的には、地上デジタル放送波を光伝送し、その発光-受光間の距離を1[m]間隔で離していき、その時受光基板が出力した波形の周波数スペクトルをオシロスコープを用いて計測し、発光-受光間の距離が離れた場合の周波数スペクトルの変化を調べた。なおこの際ミキサによる周波数変換は行なってはいないが、理由は、今回はあくまで受光基盤がどの程度地上デジタル放送波を受け取れているのかを調べるためである事と、PLLが出力する正弦波によって周波数スペクトルが見えにくくなってしまふことが考えられる為である。実験3の概要図を図2-6-7に示す。

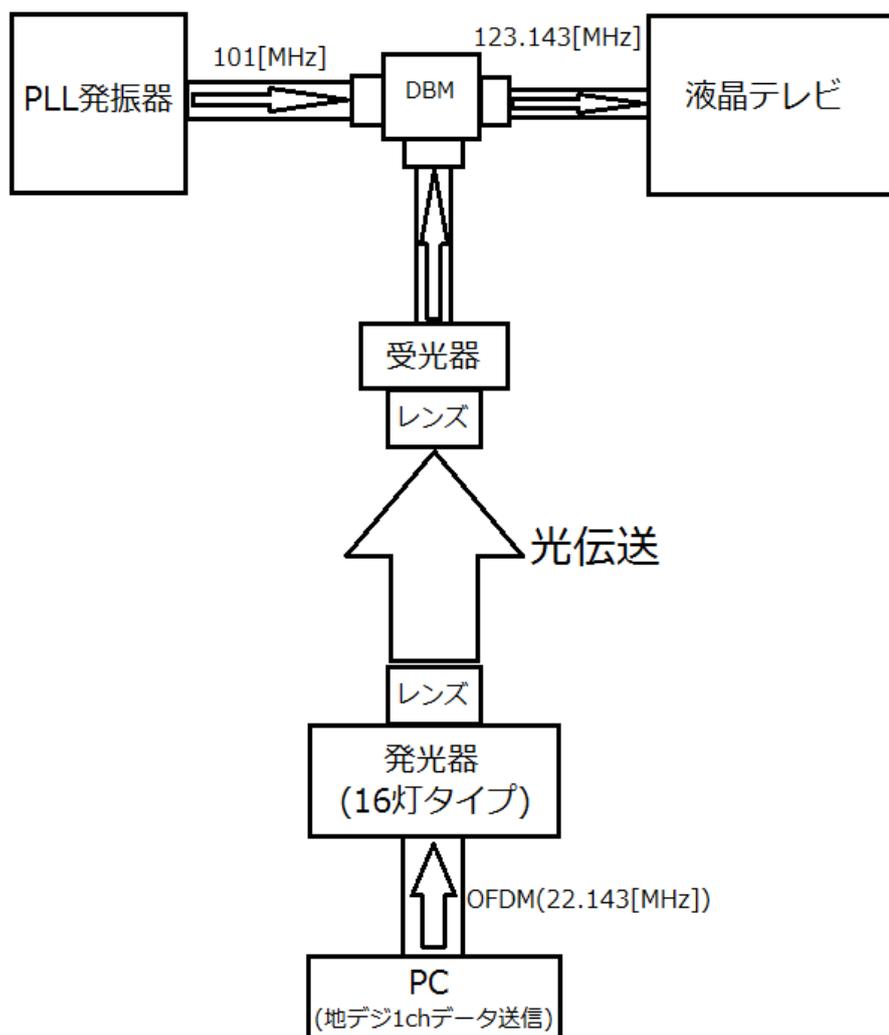


図 2-6-7. 実験3の概要図

- (4) 実験4 一灯タイプのLED送信モジュールを用いた光伝送実験
実験3と同様の実験であるが、LED発光モジュールを一灯タイプに変更して光伝送実験を行った。
実験4の概要図を図2-6-8に示す。

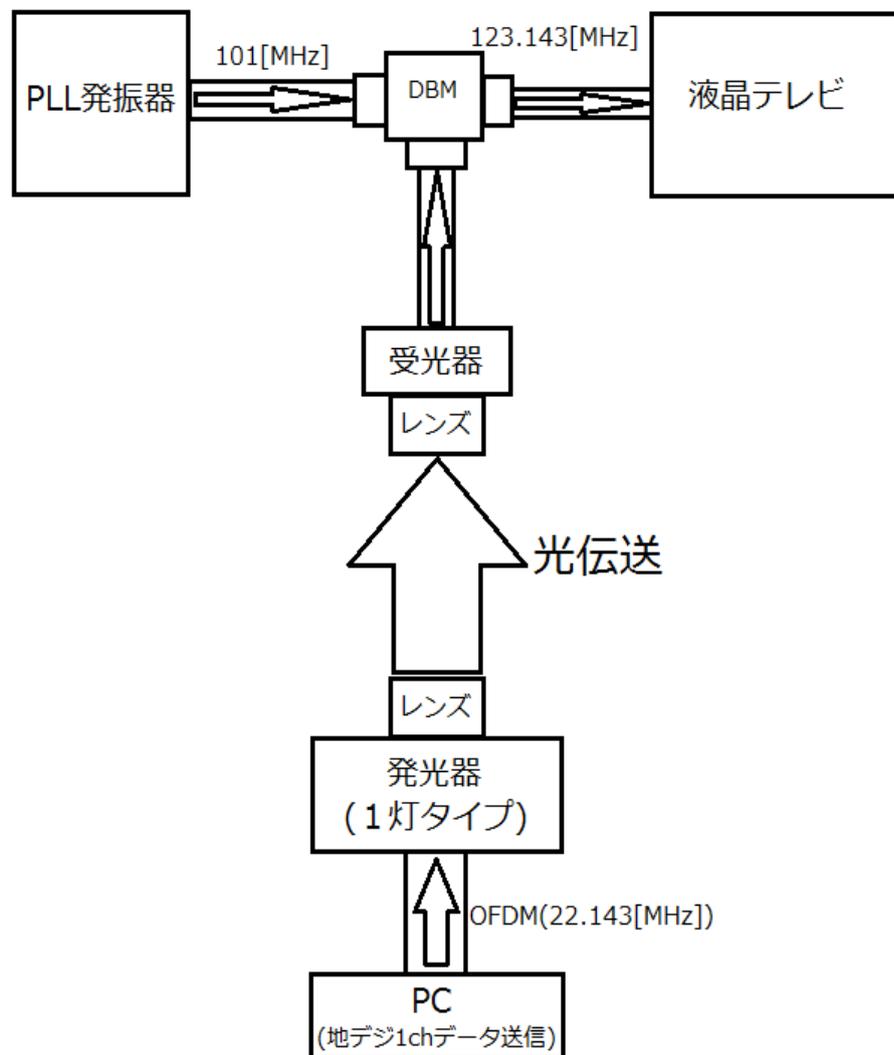


図 2-6-8. 実験4の概要図

2-6-3. 使用機材

実験に使用した機材を表 2-6-2 に示す。

表 2-6-2. 使用機材

名称	規格	社名	補足
R&K-MX140-0B	0.1~1000 [MHz] インピーダンス 50 [Ω]	株式会社 R&K	ダブルバランスド ミキサ
DTA-2111	中心周波数 20~1180 [MHz]	DekTec	使用ソフトウェア Stream Xpress
KEM-PLL-MB15	出力周波数 80~120 [MHz]	貴田電子設計	キットの為、可変周波 数範囲がサイト上の表 示と一致せず
PC	Windows7 Ultimate	Microsoft	Service Pack 1
BRAVIA		SONY	液晶テレビ
汎用 LED 送信モジュール SRLED DV1ch-L	帯域 0.1~10 [MHz]	Outstanding Technology	一灯タイプの 発光モジュール
汎用 LED 送信モジュール SRLED DV16	帯域 0.1~10 [MHz]	Outstanding Technology	16 灯タイプの 発光モジュール
汎用受光モジュール LEC-RP SM1C-L	帯域 0.1~30 [MHz]	Outstanding Technology	受光モジュール
TKG139944-2		Panasonic	レンズ

2-6-4. 実験結果

(1) 実験 1 の結果

Stream Xpress が出力するデジタル放送 1 チャンネル分の信号の中心周波数は 333.143 [MHz] であり、局部発振器が出力する周波数は 102 [MHz] であった。ダブルバランスドミキサにこれらの信号を入力すると、和と差の周波数を持つ信号が出力される。即ち、計算すると

$$333.143 + 102 = 435.143 \quad [\text{MHz}]$$

$$333.143 - 102 = 231.143 \quad [\text{MHz}]$$

の二種類の信号となる。これらはそれぞれ、435.143 [MHz] は CATV の C58 チャンネルに相当し、231.143 [MHz] は CATV の C24 チャンネルに相当する。実際にテレビ側の受信を C24 チャンネルに設定し、アンテナレベル(信号強度)を観測した結果を、図 2-6-9 に示す。

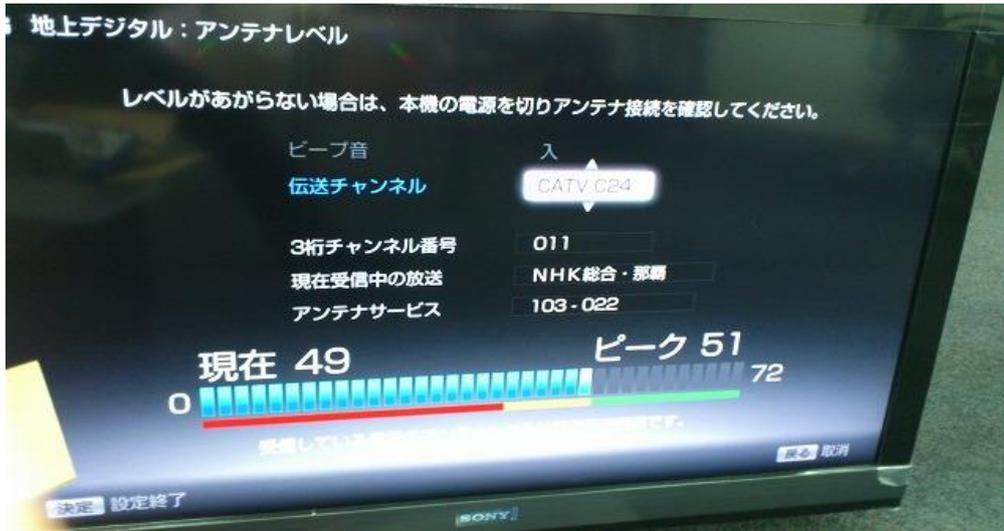


図 2-6-9. 実験 1 の出力信号をテレビ側 C24 チャンネルで受信した様子

信号強度 49 前後で受信できていることが確認できた。なお、この信号強度は SONY 製の液晶テレビ BRAVIA における信号強度であり、使用する液晶テレビが違えば信号強度の数値は変化するが、今回は映像として出力出来るかどうかの指標としてこの信号強度を使用する。信号強度は最低 0、最高 72 であり、信号強度が約 35 辺りを超えると、映像として液晶テレビへ出力することが可能となる。実際に図 2-6-9 の状態でテレビ映像を確認した様子を図 2-6-10 に示す。



図 2-6-10. 実験 1 のテレビ映像

PC に保存してある地上デジタル放送 1 チャンネル分のデータが受信できていることが確認でき

た。なお保存した映像データは、9月20日のNHK総合 大相撲秋場所10日目をを用いた。

(2) 実験2の結果

Stream Xpress が出力するデジタル放送1チャンネル分の信号の中心周波数は22.143[MHz]であり、局部発振器が出力する周波数は101[MHz]であった。ダブルバランスドミキサにこれらの信号を入力すると、和と差の周波数を持つ信号が出力される。和の方を計算すると

$$22.143 + 101 = 123.143 \quad [\text{MHz}]$$

となる。123.143[MHz]はCATVのC15チャンネルに相当する。実際にテレビ側の受信をC15チャンネルに設定し、アンテナレベル(信号強度)を観測した結果を図2-6-11に示す。



図 2-6-11. 実験2の光伝送風景

図2-6-11より、信号強度43前後で受信できていることが確認できた。なお実験の際、受光-発光間の距離は10cm程度であった。実際に図2-6-11の状態でのテレビ映像を確認した様子を図2-6-12に示す。



図 2-6-12. 実験2のテレビ映像確認風景(受光-発光間距離約10cm)

図 2-6-12 より、PC に保存してある地上デジタル放送 1 チャンネル分のデータが受信できていることが確認できた。また、この状態で地デジのデータ放送(d データ)を閲覧することも可能であった。なお今回使用した映像データは、10 月 13 日のフジテレビの番組を使用した。

次に、受光-発光間距離を 50cm にして同様の実験を行い、信号強度を観測した結果を図 2-6-13 に示す。



図 2-6-13. 受光-発光間距離を 50cm にした時の受信強度観測実験風景

図 2-6-13 より、信号強度 34 前後で受信できていることが確認できた。実際に図 2-6-13 の状態でテレビ映像を確認した様子を図 2-6-14 に示す。



図 2-6-14. 受光-発光間距離 50cm でのテレビ映像受信風景

図 2-6-14 より、映像を受信出来ていることが確認できたが、実際には時折画面に乱れが生じた。

次に、受光-発光間距離を 1m にして同様の実験を行い、信号強度を観測した結果を図 2-6-15 に示す。



図 2-6-15. 受光-発光間距離を 1m にした時の受信強度観測実験風景

図 2-6-15 より、信号強度 16 前後で受信出来ていることが確認できた。しかし、この状態ではテレビ映像として出力するには信号強度が足りず、映像をテレビに表示することはできなかった。

次に、発光-受光間の距離を 1[cm] から 100[cm] まで 1[cm] ずつ離していった時の信号強度の変化の様子を図 2-6-16 に示す。

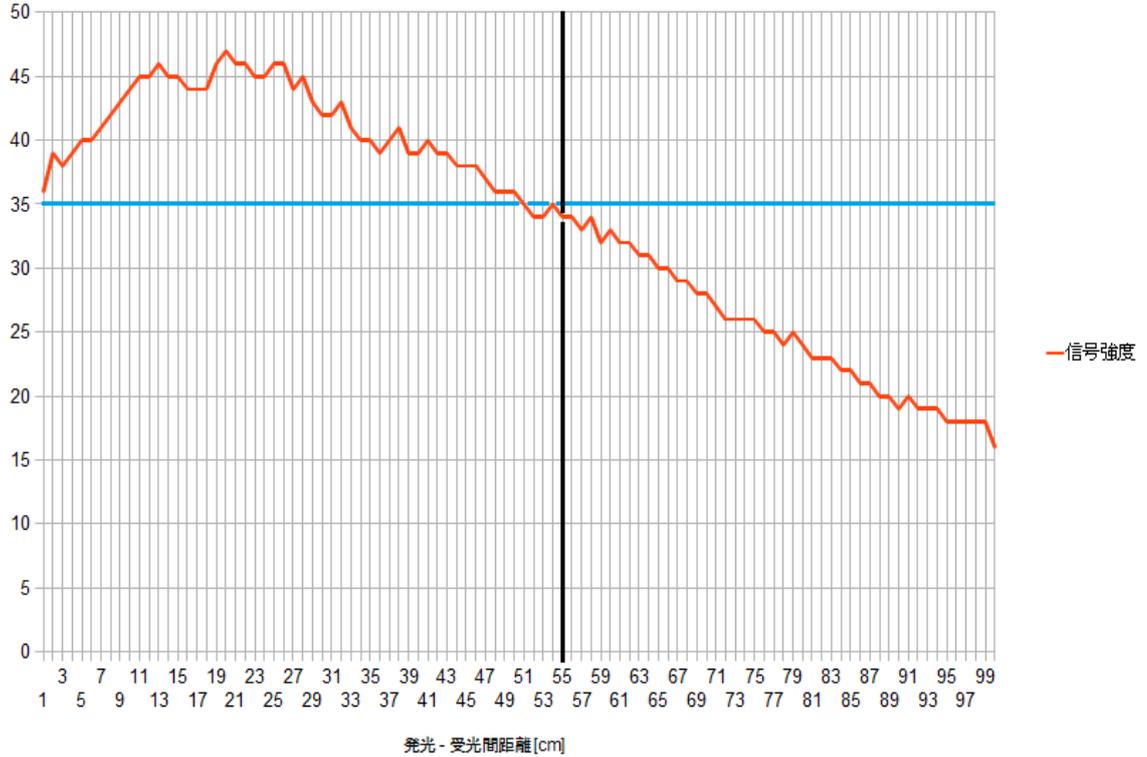


図 2-6-16. 発光-受光間距離対信号強度
 (青線：信号強度 35，黒線：受信限界距離 55[cm])

図 2-6-15 より、最も信号強度が高いのは発光-受光間の距離が 20[cm] 付近であることが確認できた。また、映像として受信可能な信号強度は、今回用いた SONY 製の液晶テレビ BRAVIA では約 35 以上なので、発光-受光間の距離がおよそ 55[cm] 付近が受信の限界であることが確認できた。

次に、発光-受光間の距離を 20[cm] から 60[cm] まで、10[cm] ずつ離していった時の周波数スペクトルの変化の様子を、オシロスコープで確認した。周波数スペクトルの変化を図 2-6-17 から図 2-6-21 に示す。なお、図中上部の緑線が信号の波形で、下部の黄線が周波数スペクトル、中心の赤線が中心周波数(25[MHz])となっており、発光基板に入力した地上デジタル放送波は図 2-6-6 と同様のもの(中心周波数が 22.143[MHz]，周波数帯域幅 6[MHz])である。この実験の際はミキサによる周波数変換は行なっておらず、距離によって放送信号がどう変化するかを検証している。

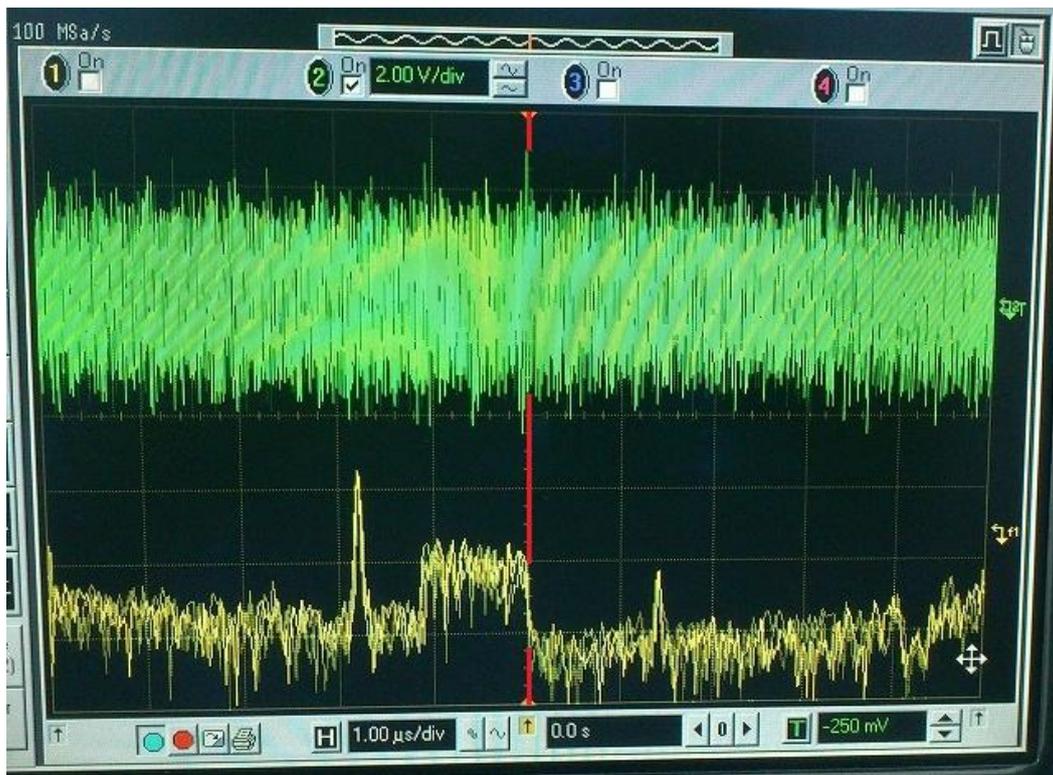


図 2-6-17. 発光-受光間距離 20[cm]の時の波形と周波数スペクトル
 (周波数スペクトルのレンジ：中心線(赤線)25[MHz], 5[MHz]/div)
 (地上デジタル放送波の周波数：22.143[MHz]中心に 6[MHz]の帯域)

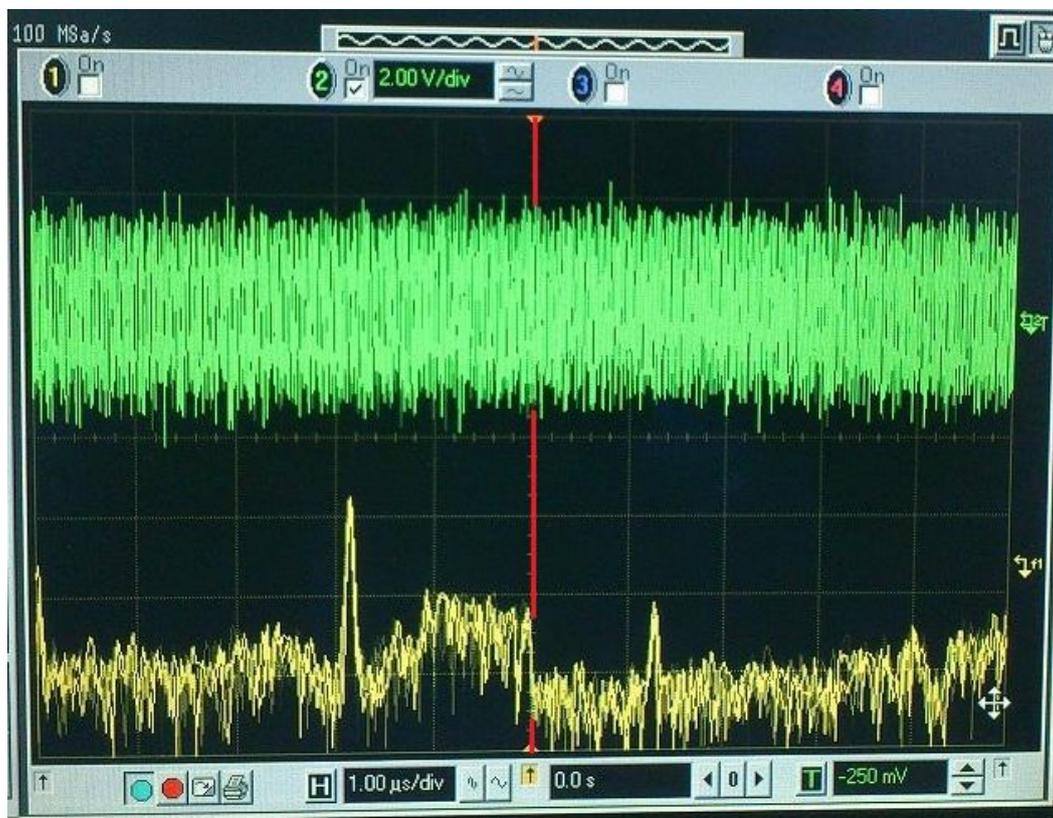


図 2-6-18. 発光-受光間距離 30[cm]の時の波形と周波数スペクトル
 (周波数スペクトルのレンジ：中心線(赤線)25[MHz], 5[MHz]/div)
 (地上デジタル放送波の周波数：22.143[MHz]中心に 6[MHz]の帯域)

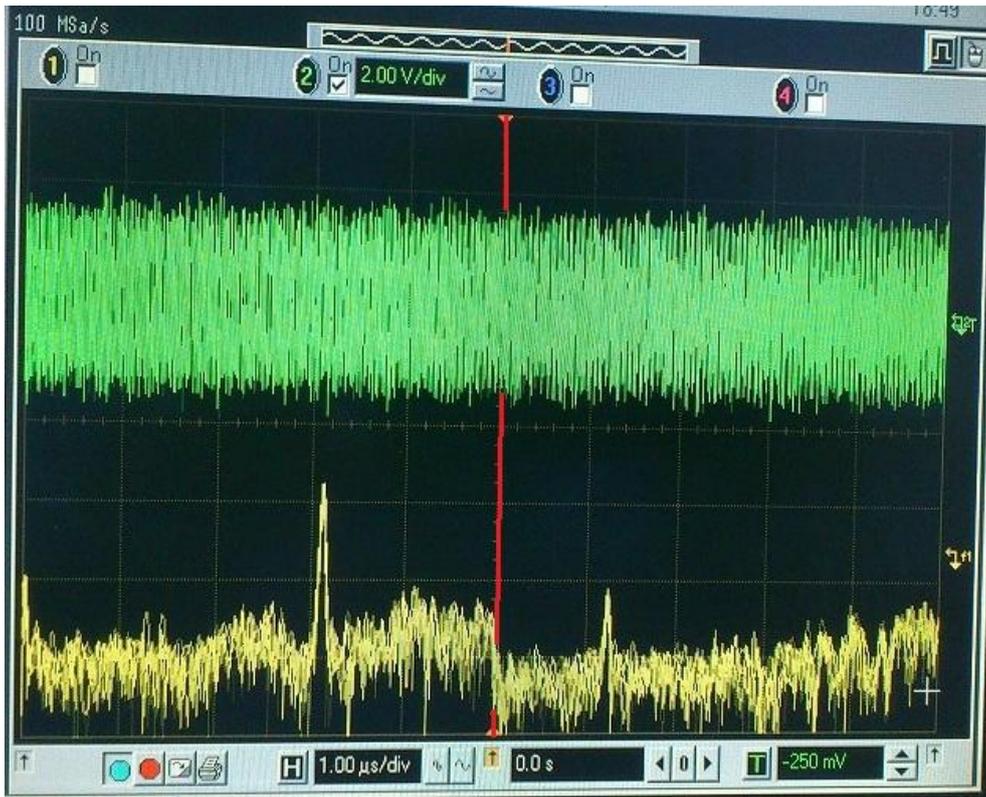


図 2-6-19. 発光-受光間距離 40 [cm] の時の波形と周波数スペクトル
 (周波数スペクトルのレンジ: 中心線(赤線)25 [MHz], 5 [MHz]/div)
 (地上デジタル放送波の周波数: 22.143 [MHz] 中心に 6 [MHz] の帯域)



図 2-6-20. 発光-受光間距離 50 [cm] の時の波形と周波数スペクトル
 (周波数スペクトルのレンジ: 中心線(赤線)25 [MHz], 5 [MHz]/div)
 (地上デジタル放送波の周波数: 22.143 [MHz] 中心に 6 [MHz] の帯域)

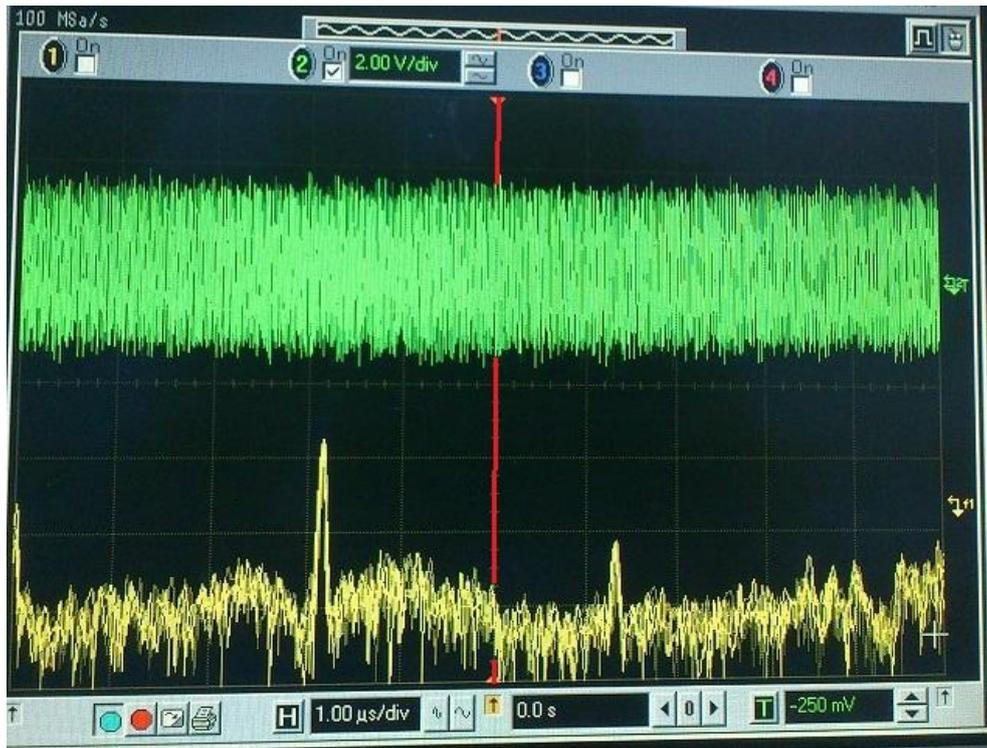


図 2-6-21. 発光-受光間距離 60[cm]の時の波形と周波数スペクトル
 (周波数スペクトルのレンジ：中心線(赤線)25[MHz], 5[MHz]/div)
 (地上デジタル放送波の周波数：22.143[MHz]中心に 6[MHz]の帯域)

図 2-6-17 から図 2-6-21 より、周波数スペクトル中、放送信号となっている中心周波数 22[MHz]付近を見てみると、20[cm]でははっきりと放送信号の周波数スペクトルが確認できるが、受信限界付近の 50[cm], 60[cm]では、ほぼ放送信号の周波数スペクトルを確認することができないことから、距離が離れることに比例して、放送信号の周波数スペクトルが小さくなっている事が確認できた。先の検証実験において確認できた、約 55[cm]が受信限界であることを踏まえると、地上デジタル放送波の周波数スペクトルが確認できなくなった頃、即ち受光基盤が地上デジタル放送波を受け取れにくくなった頃から受信が困難になることが実証できた。

(3) 実験 3 の結果

レンズを用いて集光し、実験 2 より距離が離れた状態で光伝送通信を行った様子として、図 2-6-22 に発光部を、図 2-6-23 に受光部を、図 2-6-24 に全体の様子をそれぞれ示す。なお図 2-6-22 から図 2-6-24 は、発光-受光間の距離が 6.5[m]時のものである。



図 2-6-22. レンズを用いた光伝送実験の様子(発光部)



図 2-6-23. レンズを用いた光伝送実験の様子(受光部)

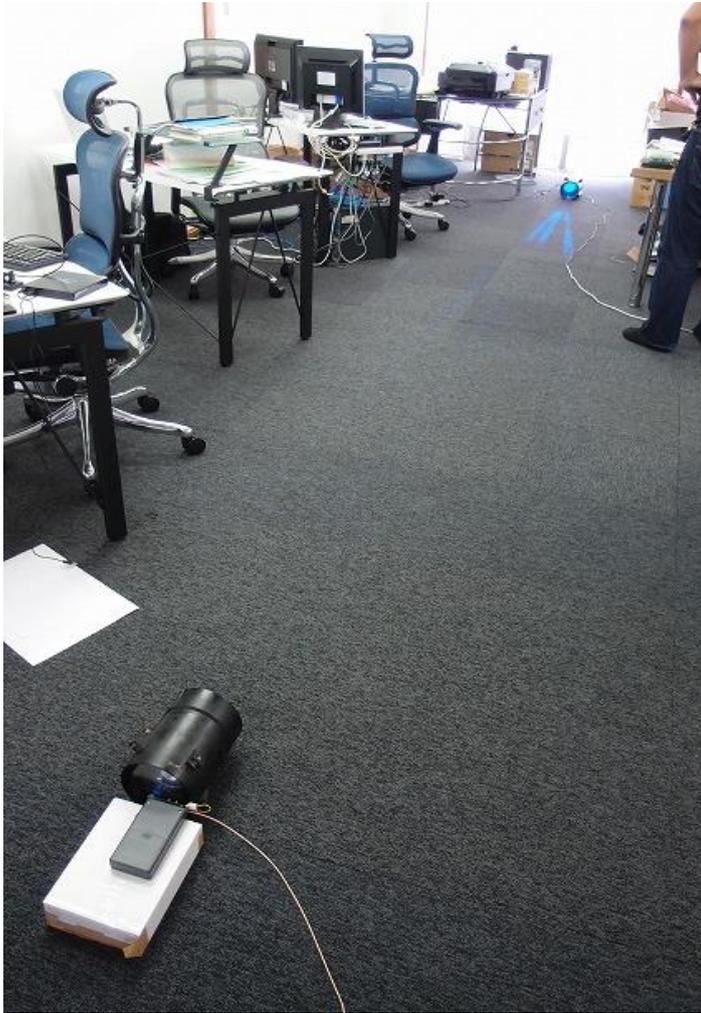


図 2-6-24. レンズを用いた光伝送実験の様子(全体図)

図 2-6-23 より、信号強度 36 前後で受信できていることが確認できた。実際にこの状態でテレビ映像を確認した様子を図 2-6-25 に示す。



図 2-6-25. レンズを用いた光伝送実験でのテレビ映像受信風景

図 2-6-25、レンズを用いて距離を伸ばすことで、ある程度の距離があってもテレビ映像は表示可能であることが確認できた。また、今回行った実験で 6.5[m] の距離であってもテレビ映像が表示可能であることが確認できた。

次に、ミキサによる周波数変換を行わない状態において、距離が 4[m] から 7[m] まで 1[m] ずつ離していった時の周波数スペクトルの様子をオシロスコープで観測した。結果を図 2-6-26 から図 2-6-29 に示す。

なお今回は BRAVIA の信号強度測定機能による信号強度と距離の関係は比較していない。理由として、レンズを用いた実験においては、レンズの位置調節は手作業で行なっているため再現性が低く、同じ距離でも毎回結果がバラバラになり信号強度の数値が安定しないため、データとして採用するのが難しいと判断した為である。

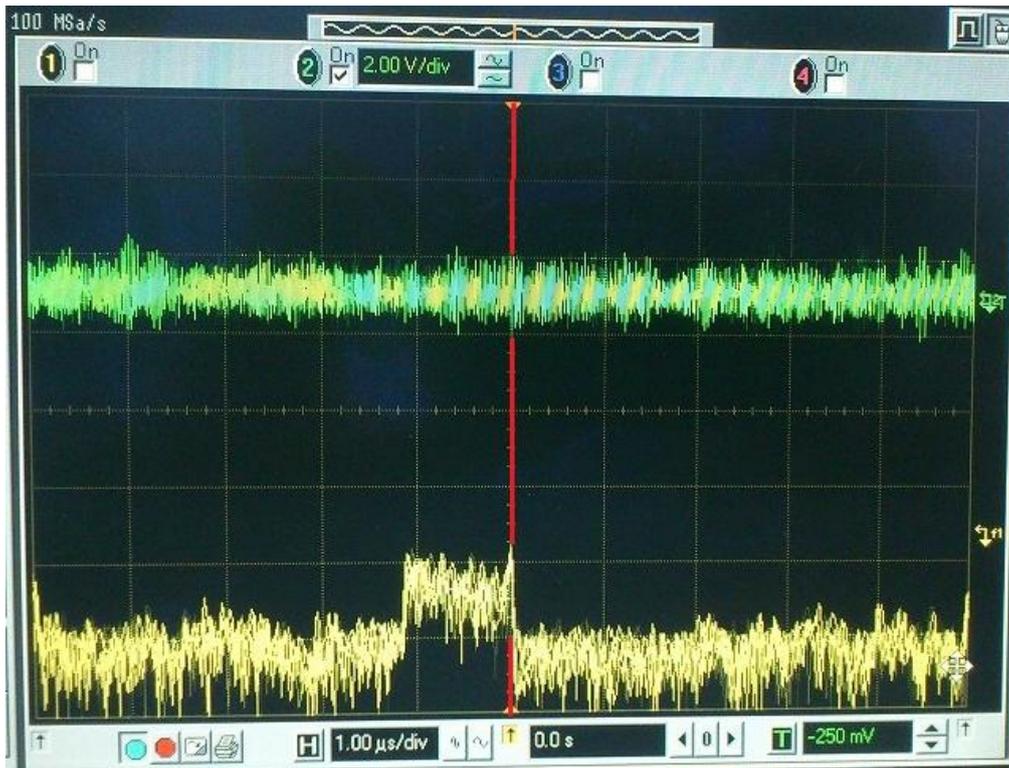


図 2-6-26. 発光-受光距離 4[m]時の受光波形と周波数スペクトル
 (周波数スペクトルのレンジ：中心線(赤線)25[MHz], 5[MHz]/div)
 (地上デジタル放送波の周波数：22.143[MHz]中心に6[MHz]の帯域)

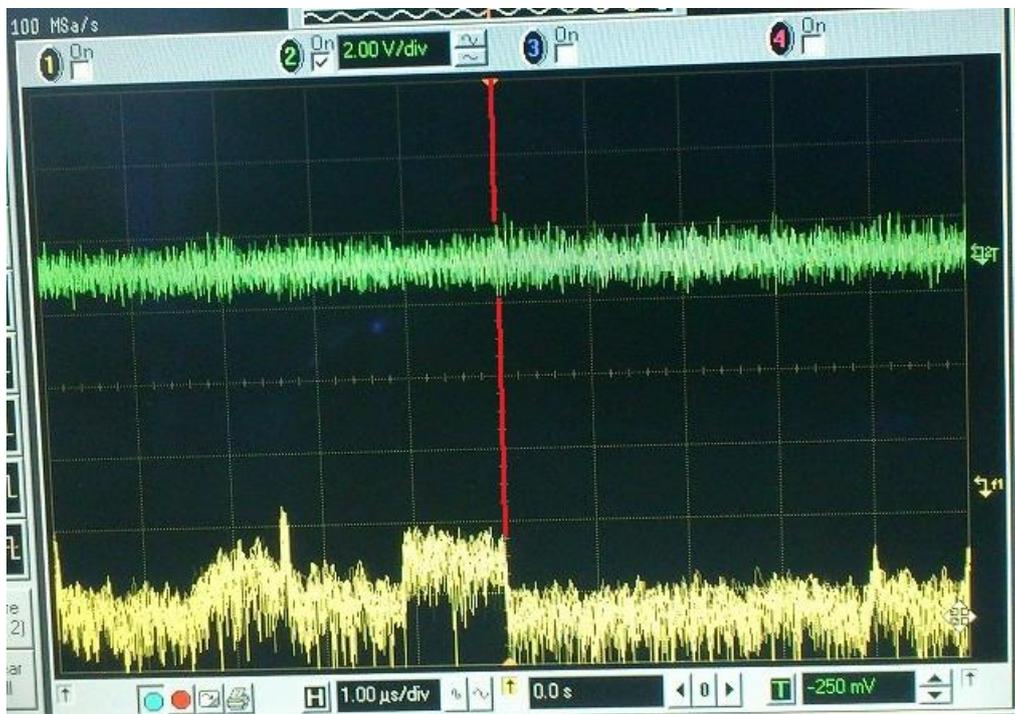


図 2-6-27. 発光-受光距離 5[m]時の受光波形と周波数スペクトル
 (周波数スペクトルのレンジ：中心線(赤線)25[MHz], 5[MHz]/div)
 (地上デジタル放送波の周波数：22.143[MHz]中心に6[MHz]の帯域)

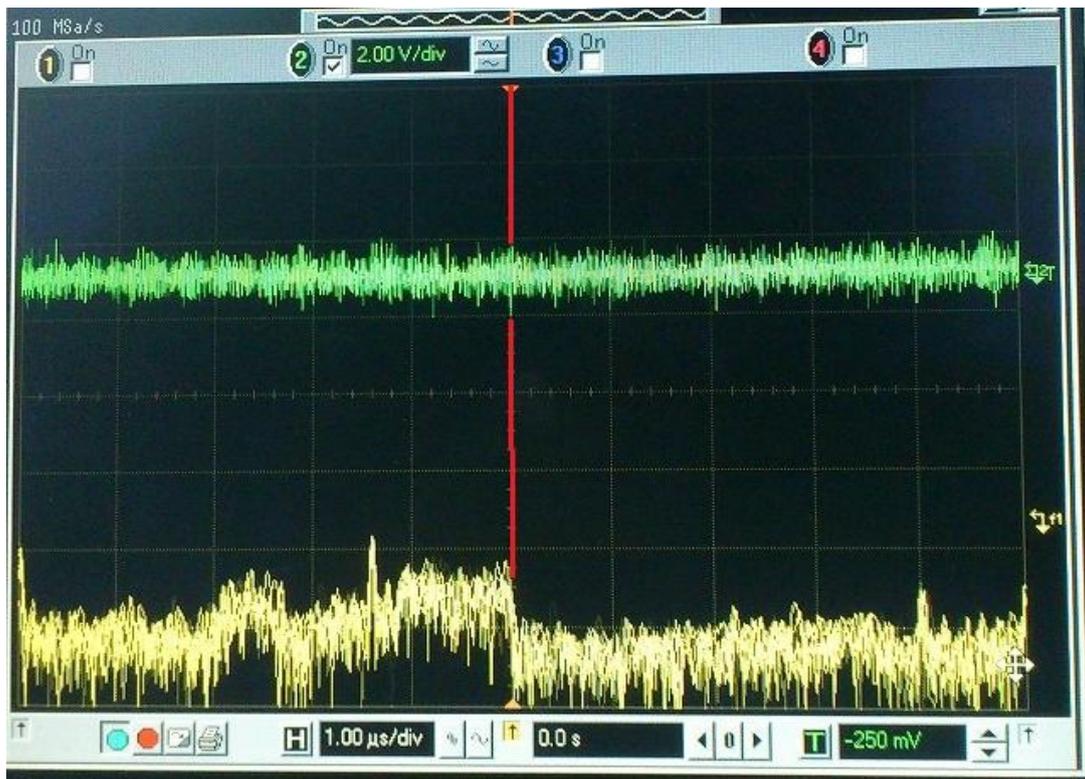
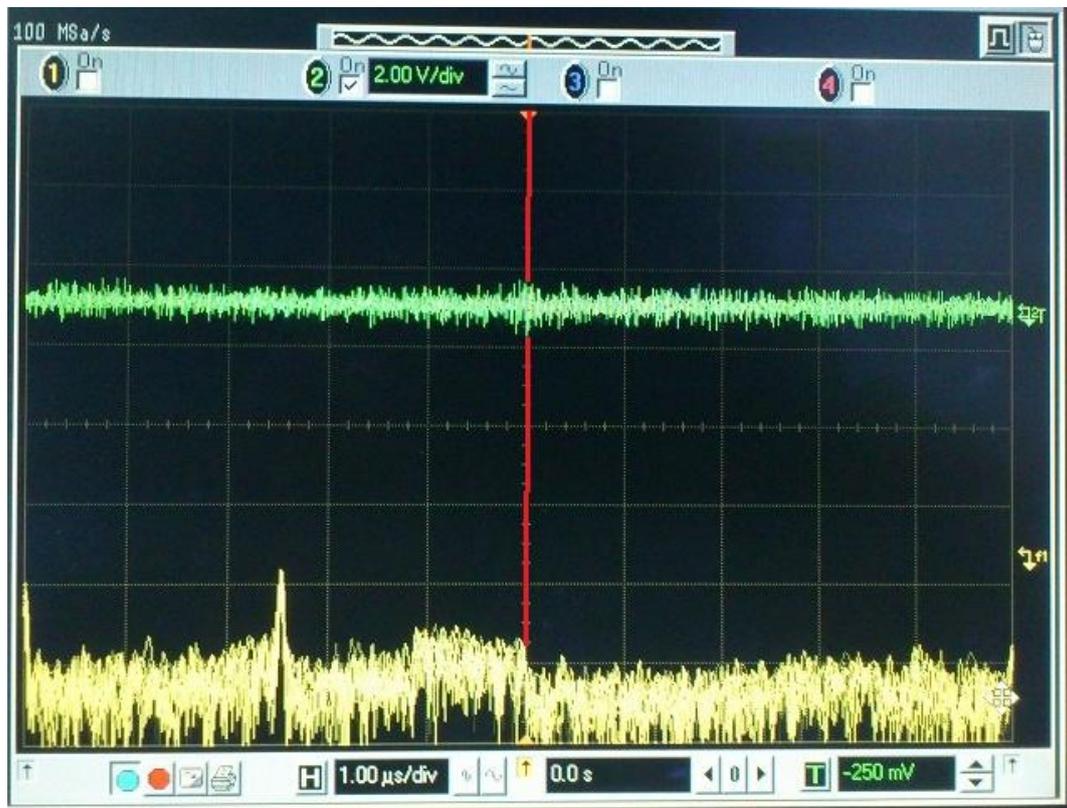


図 2-6-28. 発光-受光距離 6[m]時の受光波形と周波数スペクトル
 (周波数スペクトルのレンジ：中心線(赤線)25[MHz], 5[MHz]/div)



(地上デジタル放送波の周波数：22.143[MHz] 中心に 6[MHz]の帯域)
 図 2-6-29. 発光-受光距離 7[m]時の受光波形と周波数スペクトル
 (周波数スペクトルのレンジ：中心線(赤線)25[MHz], 5[MHz]/div)
 (地上デジタル放送波の周波数：22.143[MHz] 中心に 6[MHz]の帯域)

図 2-6-26 から図 2-6-29 より、発光-受光間の距離に比例して、地上デジタル放送波の周波数スペクトルは小さくなっていることが確認できる。距離 7[m]時には、地上デジタル放送波の周波数スペクトルがほぼ確認できない程小さくなっていることが確認できた。

実験 2 による実証実験において、地上デジタル放送波の周波数スペクトルが確認できなくなってしまうと、BRAVIA の信号強度測定機能による信号強度も下がり、映像として出力できなくなってしまう事が実証されているので、今回のレンズを用いた実験では、距離の限界は約 7[m]だということが予想できる。しかしこの結果は、今回用いたレンズ TKG139944-2 の集光性能によるところが大きく、より集光性能の高いレンズを用いることで、まだ光伝送距離が伸びる事が期待できる。また他の改善案として、AGC を用いた地上デジタル放送波の増幅処理によって改善できることが考えられる。

(4) 実験 4 の結果

実験 3 と同様の実験を、一灯タイプの発光器を用いて行った様子を、図 2-6-30 に発光部を、図 2-6-31 に受光部をそれぞれ示す。

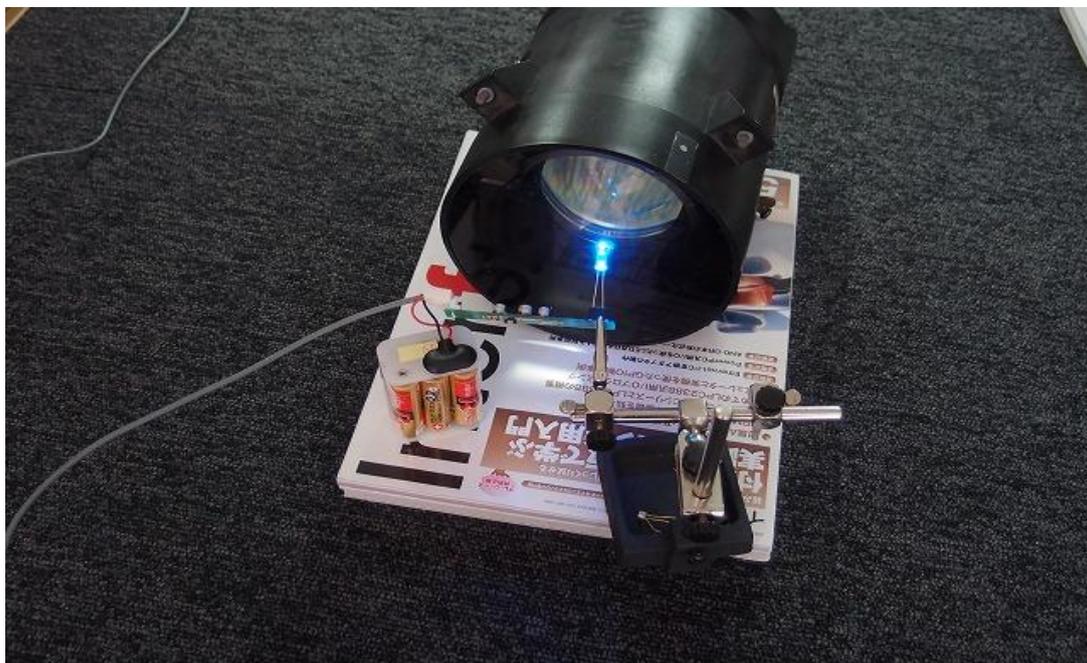


図 2-6-30. 一灯タイプの発光器を用いた光伝送実験の様子(発光部)



図 2-6-31. 一灯タイプの発光器を用いた光伝送実験の様子(受光部)

図 2-6-31 より、一灯タイプの発光器でも十分に光伝送が行えることが確認できた。なお、この状態でもテレビ映像の表示も確認できている。これより、発光素子の数によって伝送距離が変化するわけではなく、一灯でも集光できれば地上デジタル放送の可視光伝送は可能であるという検証結果が出た。

2-6-5. Inter BEE 2011 への出展とその評価

今回開発した可視光通信による地上デジタルテレビ放送波の伝送を、2011年11月16日～2011年11月18日まで開催された、Inter BEE2011にて出展を行い、光伝送により地上デジタル放送が送信できることへの関心と需要、またその応用例などの意見を調査した。出展の様子を図 2-6-32 に示す。



図 2-6-32. InterBEE2011 出展の様子

来場者の客層は、放送局の職員等、放送関係者が多かった。従来の電波法では、使用可能な周波数帯域が限られているが、可視光伝送を用いることで電波法の制約を受けることなくデータの送受信が可能になること、難視聴地域での地上デジタル放送の送受信が可能になることに対するニーズが来場者及び他の出展企業からのヒアリングにおいて確認できた。更に、可視光による地上デジタル放送の伝送には非常に興味があるが、送信可能距離は伸ばせるのか、また商品化を想定した時の価格はどの程度か、といった意見を頂いた。

送信可能距離は、受光・発光素子の改良、もしくは集光方法の改良によって改善が期待できる。また、InterBEE の会場にて他企業から出展されていた OFDM による地上デジタル放送信号が出力できるデバイスは、価格が数百万円と高価なものであった。一方、今回の可視光伝送システムを用いてダイレクトに地上デジタル放送線から伝送を行うとすると、その価格は十数万円となり、会場で確認した OFDM 変調デバイスに比べ遥かに安価で同機能が提供可能であることが期待できる。これにより、既存の製品より安価で同機能を提供することへのニーズが見え、商品化における今後の展開の方向性が見えた。

2-6-6. まとめ

地デジ放送信号を、可視光を用いて伝送する方法を考案・実装し、検証として実際に液晶テレビを用いて地デジ放送信号の可視光伝送実験を行った。

その結果、地デジ放送信号に可視光を用いて伝送する仕組みは想定通り動作することが検証できた。

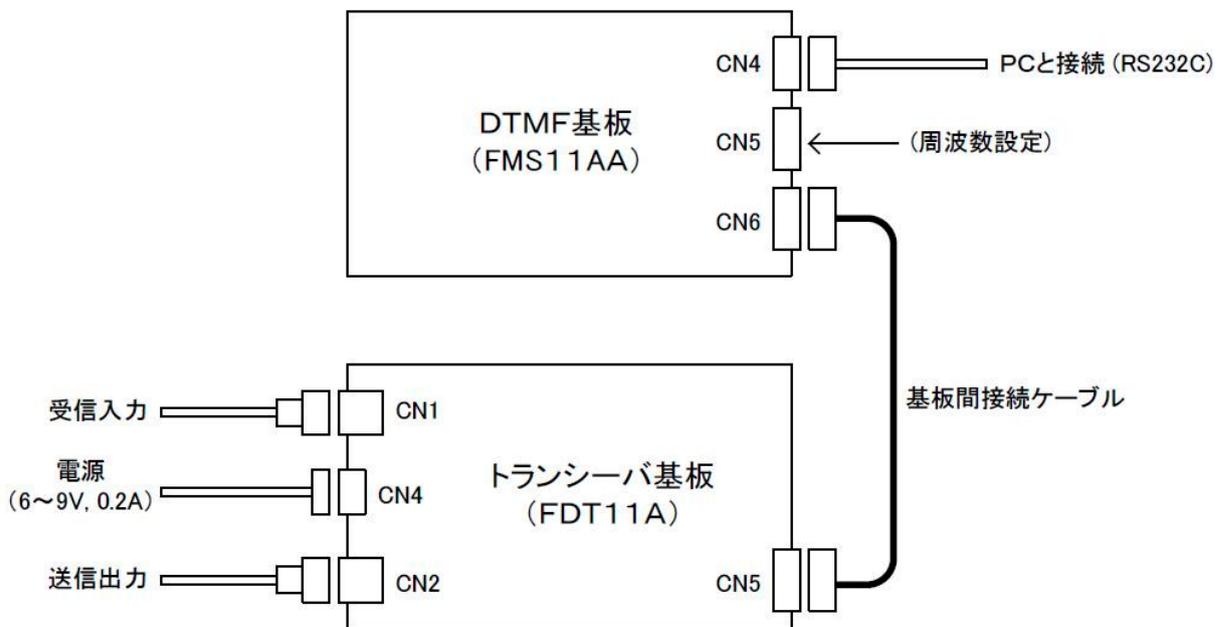
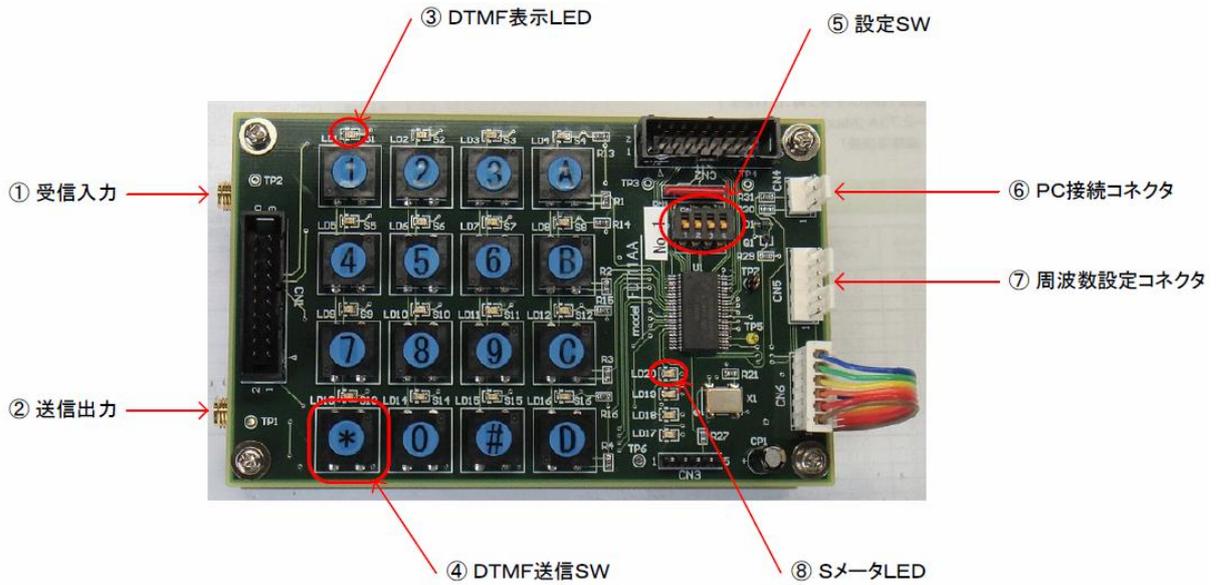
InterBEE2011 への出展を通して、地上デジタルテレビ放送波の可視光伝送についての関心は高く、既存の電波法の制約を受けることなくデータの送受信が出来る可能性が期待できること、またそのためには距離と商品化の際の価格が課題としてあげられる事が調査でき、商品化における今後の展開の方向性が見えた。

本研究開発を通じて得られた課題については、光学系の改善や AGC との組み合わせを用いた光伝送距離の延伸、周波数変換の多段化による地上デジタル放送の多チャンネル伝送の実装等を今後検討、実施していく予定である。

2-7. ⑦モバイル可視光通信基板を利用した機器組込み無線通信システム

2-7-1. 低速用途

高信頼が求められるFA用途をターゲットにした組込基板を作成し動作確認を行った。



デジタル双方向通信モジュールは、2枚の基板から構成されている。

入出力信号は、低速のDTMF信号へ変換され送受信される。FA用途では、低速信号でありながら確実な伝送路を確保する必要が高く、信頼性の高い変調方式を求められる。

そこで、前述のプロトコル検討の中で使われているFM系の変調回路にデジタル信号をもう一度DTMF (Dual Tone Multi-Frequency) 信号へ変換することで可視光伝送路での急激な信号強度の変化に強くなる。

エンコード、デコードをソフトウェアで行うプログラムを新たに開発し組み込んだ。

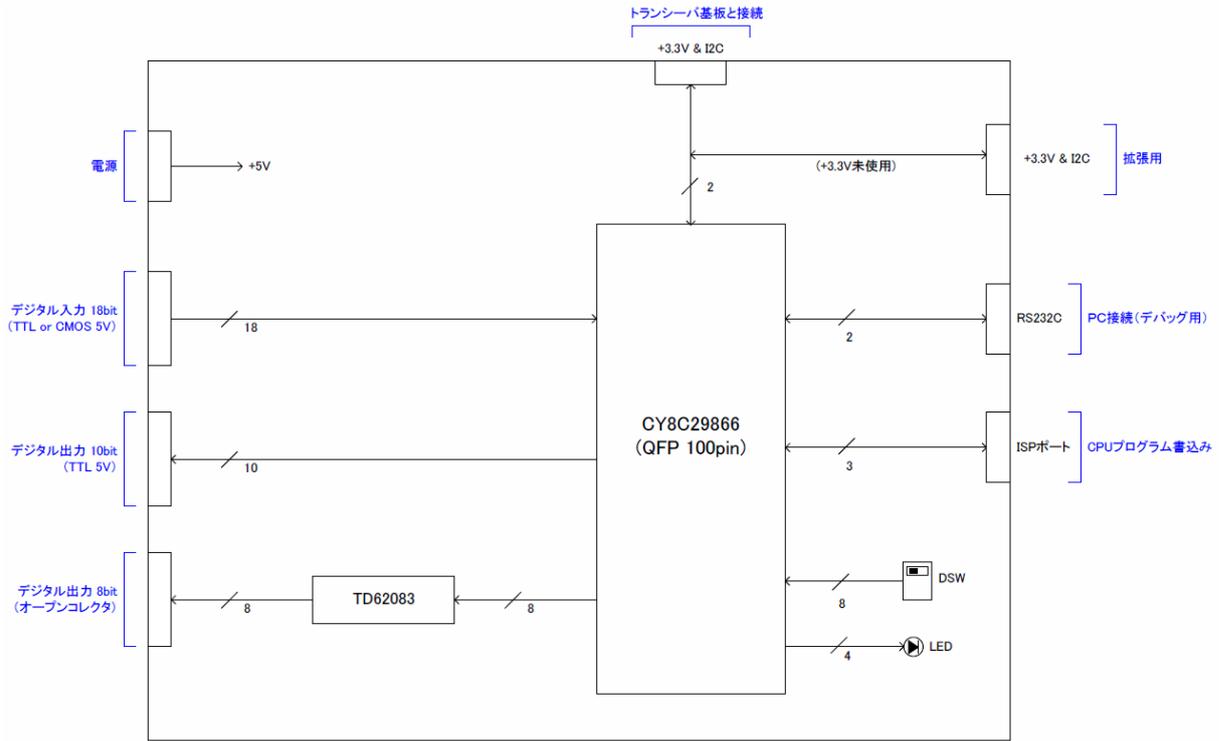


図2-7-1. デジタル to DTMF 変換ブロック図

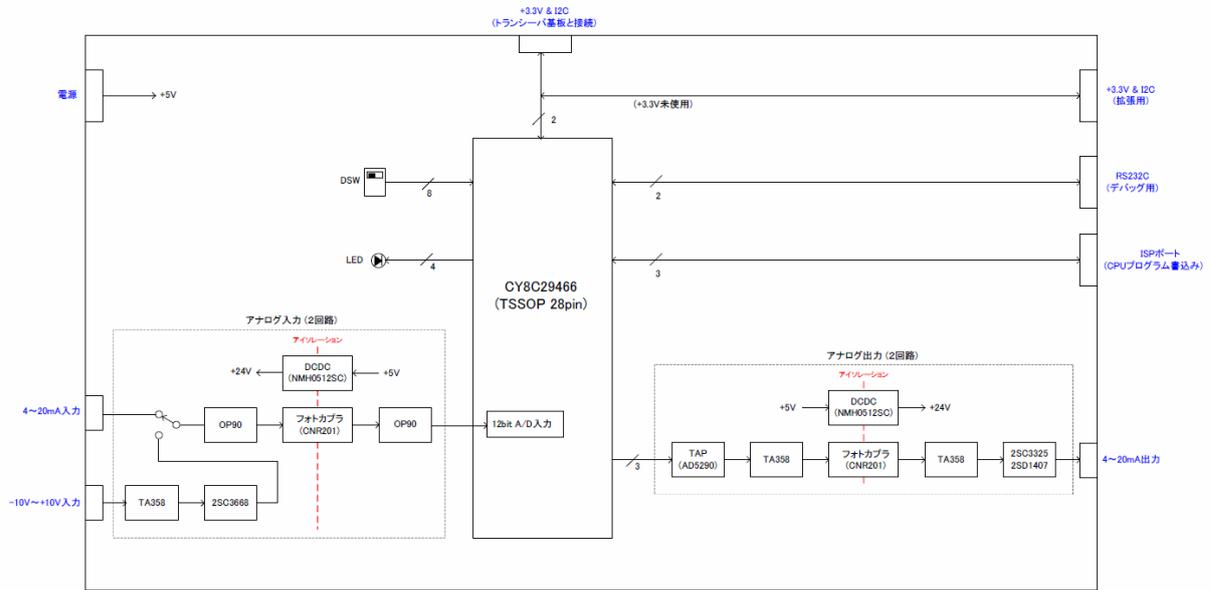


図2-7-2. 可視光トランシーバ信号送受信ブロック図

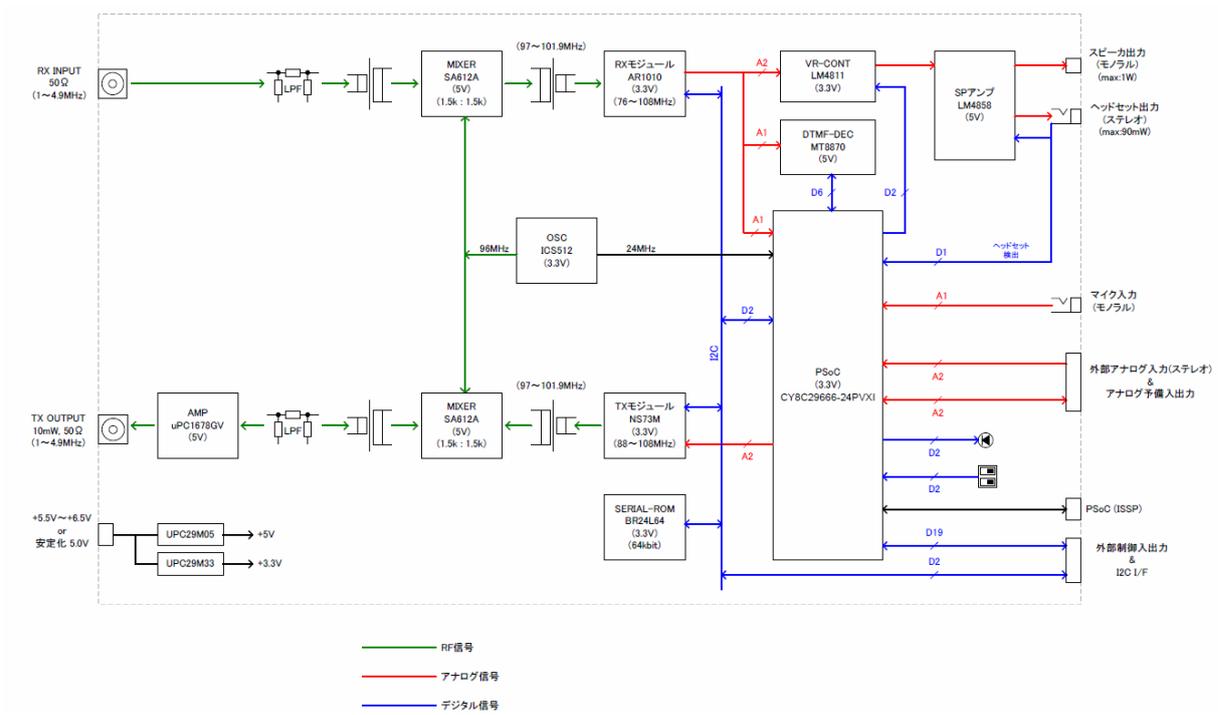
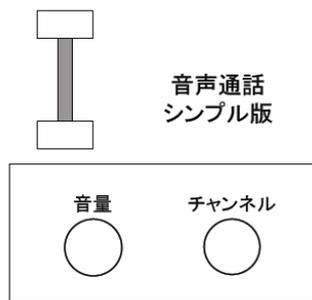


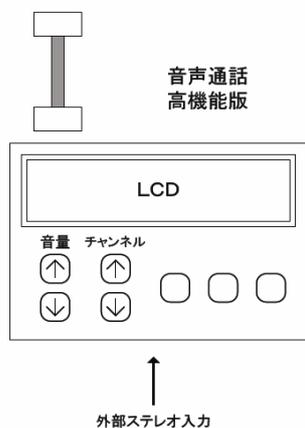
図 2-7-3. 可視光通信用RF信号生成ブロック図

組み込むプログラムを変更することで多彩な使用形態の可視光双方向通信機器を構成できる事が確認できた。

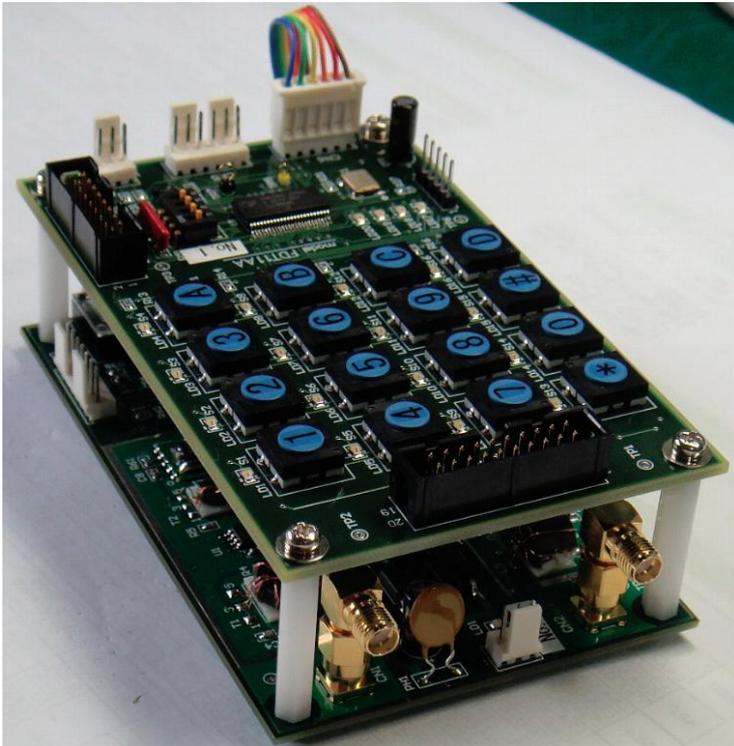
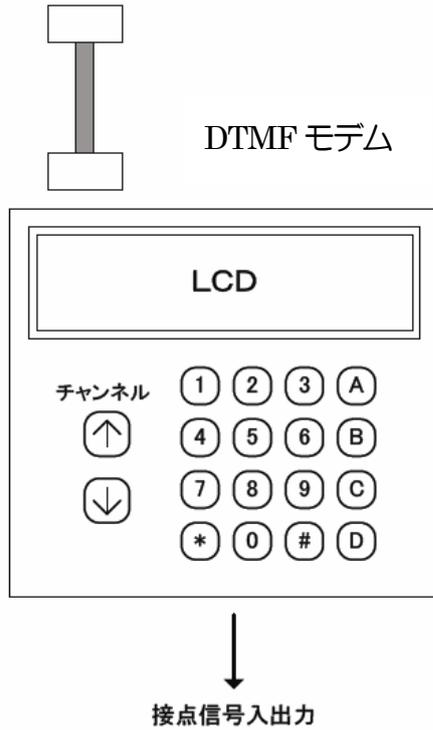
1) シンプル双方向音声通信システム



2) 高機能なステレオ双方向通信システム



3) デジタル信号双方向通信システム (FA制御用途)



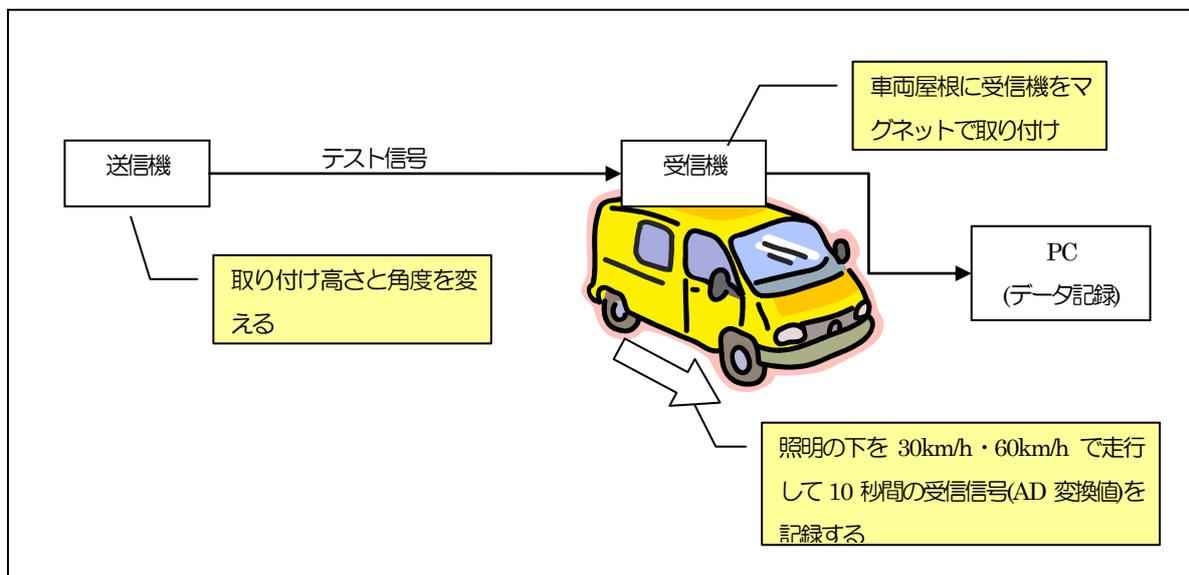
変復調モジュールとDTMF-KBデジタルI/F基板を組み合わせた例

この基板を組み込むことで、FA分野や制御系インフラの無線化可能になる。

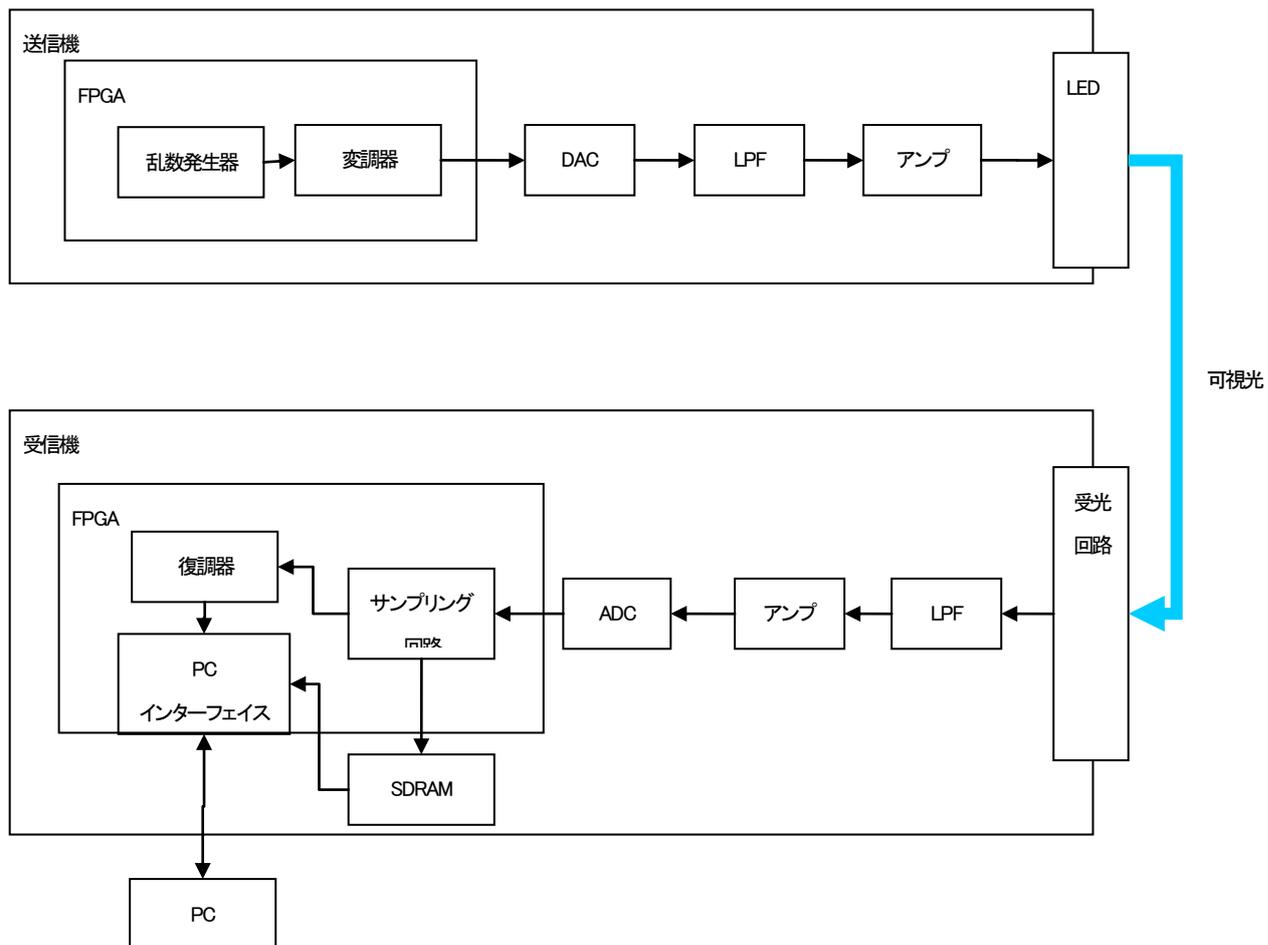
外形寸法 120mm×75mm

2-7-2. 高速移動用途

構成



システムブロック図



シミュレーション値と実測値。

取り付け高さ	移動速度	全フレーム数	エラーフレーム数	エラーレート	受信データ
5 [m]	20 [km/h]	2304	448	0.19	29.46 [kB]
	シミュレーション値(参考)	1827	773	0.423	16.73 [kB]
	40 [km/h]	1132	452	0.40	10.8 [kB]
	シミュレーション値(参考)	1134	573	0.51	8.9 [kB]
10 [m]	20 [km/h]	4156	880	0.21	52.0 [kB]
	シミュレーション値(参考)	3465	1530	0.44	30.7 [kB]

※送信機からの距離は正面位置で4.75m

エラーレート(実測値)

速度と受信データ量は理論上では反比例の関係であることが予測されるが、取り付け高さ 5m のとき、移動速度 20km/h と 40km/h では速度 2 倍に対して、受信データ量は 29.46kB と 10.8kB と約 2.7 分の 1 となっている。

また、設置高さ 5m に比べて、10m の方が正常に受信できたデータ量が多かったことがわかる。これは 2 章で述べたように、受光角度の関係に起因するものと考えられる。

実際の道路上を時速 80km で走行しながら受信することを想定しデータを元に計算すると

取り付け高さ 5m のとき	取り付け高さ 10m のとき
$\frac{29.46}{4} = 7.365(kB)$ (20km/h を基準)	$\frac{52.00}{4} = 13(kB)$

となり、照明のステータスなどの情報を伝達するには十分なデータ量を転送することが可能であると考えられる。

最終章 全体総括

1) 研究開発成果

産業用機械、産業用ロボット産業における信頼性と安全性確保、情報家電及び携帯電話では、安心して使える、高速無線通信技術へ向けて移動状態での使用が困難な可視光通信の課題を解決しモバイル可視光通信を実現する技術、組込みソフトウェア技術を確立した。

①産業用機械及び産業用ロボットに関して、信頼性・安全性の確保（機能安全確保を含む）を実現するため、輝度変化に強いFM系変調方式を使った可視光送受信モジュールにさらにDTMF方式を使った信号送信用ハードウェア、組込ソフトウェアを開発した。

成果：低速用途では、DTMF基板と変復調基板と一体化したデジタル双方向モジュールを開発した。
高速用途では、光源の向き、発信・受信機の可動、移動の振り舞いに対応できるシステムを構築し組込みソフトウェアを開発した。その成果によって、秒速10m以上の移動体通信を実現した。

②情報家電及び携帯電話に関して、ネットワークサービスの多様化やだれもが安心して使える機器を実現するため、モバイル環境でも利用できる可視光通信機能の実現。

成果：既存通信ネットワークや機器との接続はTCP/IP、イーサネットとの接続を実現しデータ転送性能の高速安定化を図った。AGC組込みソフトウェアを開発し、10mの距離で15Mbpsの通信速度の実現した。
また、ワンセグ受信機との接続のための信号のデジタル変調・復調処理の組込みソフトウェア制御および通信プロトコル、インターフェースを開発し、LED照明を利用したワンセグ自主放送の実現のめどを立てた。特にLED、PDによる地デジRF信号（OFDM信号）の伝送が可能となった。

③査読付き誌上発表リスト

(1) 委託研究に基づく発表リスト

“可視光通信の伝搬環境に関する検討”

“FPGA基板を用いた可視光通信システムの検討”

<http://www.ieice.org/shinetsu/data/h21student-su.htm>

“反射ミラー構造高感度可視光通信用受光素子の開発”

<https://workshop.iee.or.jp/sbtk/cgi-bin/sbtk-showprogram.cgi?workshopid=SBW00001423>

(2) 報道掲載リスト

“最長・最速の可視光通信 国建システムが共同開発”、琉球新報、2010年2月11日

<http://ryukyushimpo.jp/news/storyid-157322-storytopic-4.html>：沖縄ITまつりでデモ

(3) ホームページによる研究成果の公表等

http://www.ot-c.co.jp/topics/100201.html : 高速双方向通信、13Km 長距離通信実験に成功。

http://www.ot-c.co.jp/topics/100212.html : 国建システムへ成果物の FM 通信モジュールを提供。

http://jp-eri.jp/ : 掲載情報の概要 委託情報のみ

④ その他

- ・関西大手企業との共同研究時に本研究成果物の一部を提供した。内容詳細は、後日公開される予定。
- ・沖縄に拠点を置く株式会社国建システム

本研究開発による成果数一覧

	平成21年度	平成22年度	平成23年度	合計	当初目標*5
査読付き論文数*1	件(件)	件(件)	件(件)	件(件)	件
被引用論文数*2	件(件)	件(件)	件(件)	件(件)	—
その他の誌上発表数*3	件(件)	件(件)	件(件)	件(件)	—
口頭発表数*4	件(件)	件(件)	件(件)	件(件)	件
申請特許数	件(件)	件(件)	件(件)	件(件)	件
登録特許数	件(件)	件(件)	件(件)	件(件)	件
国際標準提案数	件(件)	件(件)	件(件)	件(件)	—
国際標準獲得数	件(件)	件(件)	件(件)	件(件)	—
受賞数	件(件)	件(件)	件(件)	件(件)	—
報道発表数	件(件)	件(件)	件(件)	件(件)	件

注：() 内は、海外分の件数を再掲する

2) モバイル可視光通信を実現する組み込みソフトウェア技術を用いた事業展開

①FA向け可視光通信製品

本事業の成果物であるモバイル可視光通信技術は、従来のイーサネット、シリアル通信、フィールド・バスなどの有線ネットワークを置き換えていくだけではなく、従来の有線方式では取扱いが難しいアプリケーションや、新しい通信インフラとして提供されていくことが期待されている。可視光通信は、ルータ、ゲートウェイを経由してバックボーンのイーサネット、シリアル通信、フィールド・バスなどの有線ネットワークと接続し、データアクセス端末等として構成される。可視光通信は主にホーム・オートメーション(PAN)、工業オートメーション(FA)などの分野で活用が期待されている。可視光通信のメリットとしては、例えば、FA分野では、計測制御機器の配線コストは、機器本体よりはるかに高い。例えば、千円以下のリミットスイッチでも、その配線ケーブルの費用や配線工事費が1万円以上になるケースもあるが、可視光通信を利用することで、ノイズレスの安価且つ安定したネットワークを構築することができる。大手ビールメーカー、医薬品製造メーカーの国内有数プラントエンジニアリングメーカーへのヒアリングと工場視察を昨年末行ったが、耐電磁波、無接点通信へのニーズの高さを実感した。接続安定性を確認の上、製品化につなげたい。

②組み込み向け可視光通信IPコアライセンスビジネス

モバイル可視光通信を実現する組み込みソフトウェアを実装した、専用ICチップを委託製造する場合、プロセス世代(=微細化程度)にもよるが、マスク代・設計・試験・検証・ファウンドリー費用で40

～100万ドル程度必要となる。本事業の成果を、我々が同費用をかけ、専用ICチップを量産提供するのではなく、FPGAの可視光通信IPを使用し、量産に移行可能なIPコア（回路情報）として、LSI開発側へライセンス提供するビジネスモデルを考えている。IPコア（intellectual property core：LSIを構成するための部分的な回路情報）は、FPGAとCPU/DSP側で動作するスタックで構成される。LSI開発側は、これをベースに専用ICを製造し、2ドル程度で販売（0.2ドル/個のライセンス収入）できれば、数億個のライセンス契約が期待できる。利益率の高い、短期間で大量の受注が見込めるビジネスが期待できる。IPコアプロバイダとしての地位を、本事業をきっかけに築いていきたい。

③Wi-Fi/携帯基地局向け可視光通信技術

川下ユーザーである国内外の通信機器メーカーへのヒアリングにおいては、エントツーエンドを可視光通信で結ぶマーケットよりも、例えば携帯電話や屋外Wi-Fiの基地局間を可視光通信で結ぶ製品を早急に提供すべきという意見をいただいた。近年、スマートフォンの登場により、急激なパケット通信の増加は、限りある帯域を使い切り、高速通信性能を發揮できない状況にある。可視光通信の高速大容量の新たな通信インフラを基地局間通信に提供する市場は、確実にあると考えている。

本事業の製品が市場に広がることにより、従来ワイヤレス技術の限界（周波数帯域のキャパシティ、規制）をクリアした、数億人が利用する新たなデータ通信インフラが生まれることを確信している。

これらの事業を提案、実施し、本事業の成果として、

平成24年度、2,000万円（試作サンプル製品の出荷）

平成25年度、50,000万円（IPコアのライセンス契約）

平成26年度、200,000万円（IPコアのライセンス契約、通信メーカー向け製品供給）

の売上の達成を予想し、成果を活かして行きたい。

※語句説明

ファウンドリー：半導体産業において、実際に半導体デバイス（半導体チップ）を生産する工場のことを指す。ファブ(fab)と呼ばれることもある。

マスク代：LSIなど集積回路の製造工程で使用される重要部材

FPGA：製造後に購入者や設計者が構成を設定できる集積回路

参考文献

- 1) 電気学会編集「光技術と照明設計」 ISBN4-88686-246-2
- 2) 映像情報メディア学会編集「わかりやすいOFDM技術」 ISBN4-274-20150-3
- 3) 電子情報通信学会 「デジタル無線通信の変復調」 ISBN4-88552-135-1
- 4) オプトロニクス社 「基礎からわかる光学部品」 ISBN4-902312-17-4
- 5) 総合電子出版「無線機RF回路実用設計ガイド」 ISBN4-915449-12-2
- 6) 日本工業出版 「光アライアンス 2008年11月号」
- 7) 日経エレクトロニクス「2010年5月3日号 NE Reports」
- 8) 電子情報通信学会北海道支部インターネットシンポジウム 2004
The Feed Method in Microstrip Antenna FDTD Analysis
- 9) 春山真一郎、「可視光通信」、電気通信学会論文誌 A Vol. J86-A No. 12 2003-12
- 10) デジタル情報機器相互運用基盤プロジェクト「デジタル情報機器のリモート管理基盤技術の開発」
平成19年度独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
- 11) 2010年以降の電波利用について
「独立行政法人 情報通信研究機構 新世代ワイヤレス研究センター」
- 12) 放送文化基金「研究報告」“地上デジタルテレビ放送の航空機による遅延波障害の研究”
- 13) CQ出版社 「高輝度/パワーLEDの活用テクニック」 ISBN978-4-7898-4124-5
- 14) CQ出版社 「無線通信とデジタル変復調技術」 ISBN4-7898-3034-9
- 15) CQ出版社 「オプト・デバイスの基礎と応用」 ISBN4-7898-3035-7
- 16) 中川研究所ホームページ <http://www.naka-lab.jp/>
- 17) 可視光通信コンソーシアム <http://www.vlcc.net/>
- 18) 川口 英/辰巳 博章 (2010) 『地デジ受信機のしくみ』 CQ出版
- 19) 伊丹 誠 (2005) 『わかりやすいOFDM技術』 オーム社
- 20) 遠坂 俊昭 (2003) 『PLL回路の設計と応用』 CQ出版
- 21) 鈴木 憲次 (1999) 『ラジオ&ワイヤレス回路の設計・制作』 CQ出版

用語解説

AGC(オートゲインコントロール)

AGCとは、自動利得制御という名の通り、信号が弱ければ増幅し、信号が強ければ減衰するシステムの事で、入力信号の強弱に関わらず出力を常に一定に保つ為の補助機能の事である。

今回の実証実験では、本研究にて開発した組み込みソフトウェアを利用して、あらゆる場面に適応可能なAGC処理の検証を行なっている。可視光通信は発光-受光間の距離が変わると、距離に比例するように受光する信号が弱くなってしまふ。そこでソフトウェアによるAGCを組み込むことによって、信号のレベルに合わせた増幅・減衰を行い、距離が離れていても安定した、一定の信号受信が行えることが期待できる。

可視光(visible light、visible radiation、visible ray、可視光、可視光線、可視光線波長域、可視光線領域)

可視光線(かしこうせん)とは、電磁波のうち、人間の目で見える波長のもの。いわゆる光のこと

可視光通信(visible light communication)

照明用高輝度LEDの空間情報伝送への利用を目的に、照明に固有IDを付加するフォーマットがLCC-SD-003として2007年6月制定された。

MATLAB

MATLABとは、MathWorks社が開発・販売している数値解析ソフトウェアである。行列計算やグラフィックスに優れており、また信号処理等の各種シミュレーションも行えるソフトウェアである。今回の検証にも、開発した組み込みソフトウェアの動作シミュレーションのために、MATLABを活用した。具体的には、上記Spartan-6ボードのDDR2SDRAMに保存されている波形データを読み取り、MATLAB上にてAGC処理をシミュレートしている。

CAN

Control Area Networkの略で、機械や電子回路間で制御信号の通信を行うためのシリアル通信プロトコルである。もともとは自動車内の複数のECU(Electronic Control Unit..電子回路)を接続して通信するために、ドイツの電装機器メーカーのロバート・ボッシュ社によって開発されたシリアル通信プロトコルである。現在ではISOにて標準規格化され、その性能と柔軟性からFA(Factory Automation)や産業機器、医療機器などのネットワークとして広く導入されている。

ダブルバランスドミキサ

ダブルバランスドミキサとは、混合器とも呼ばれる、周波数変換器の事である。2つの周波数を入力すると、その和

と差の周波数を出力する。ダブルバランスドミキサは、2つのフェライト広帯域トランスと4本のダイオードで構成されている。

PLL

PLLとはPhase Locked Loopの略で、一定の発振周波数で信号を出力することができる発振回路の事である。入力信号や基準周波数と出力信号の周波数を一致させる電子回路であり、入力信号と出力信号の位相差を検出し、VCO(Voltage Controlled Oscillator…電圧制御発振器)や回路のループを制御することで、正確に同期した周波数の信号を出力することができる。このような発振周波数を一定に保つ他、カウンタを組み込むことで入力信号の整数倍の周波数で信号を出力することもできる。

OFDM変調

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiple/直交周波数多重方式)とは、デジタル変調の一種で、情報を1つのキャリア(シングルキャリア)で伝送するのではなく、情報を分割し、いくつかのキャリア(マルチキャリア)に乗せる方式のこと。変調をかけた周波数の異なる各キャリア(サブキャリア)をIFFT(Inverse Fast Fourier Transform/逆高速フーリエ変換)で合成し、1つの波として伝送するマルチキャリア伝送方式。それぞれのサブキャリアはBPSKや64QAM等のデジタル変調方式で変調している。

地上デジタル放送

地上のデジタル方式の無線局より行われるテレビ放送である。日本のデジタル放送の方式は、ISDB-Tであり、映像符号化方式にはMPEG-2ビデオ(ビットレート約16.8Mbps)、音声符号化方式には5.1chサラウンドに対応したMPEG-2AACを用いている。従来の地上アナログ放送より高品質な放送を視聴することが可能である。伝送路符号化方式はOFDMで、1チャンネル(約6MHz)は、13の帯域(セグメント)とガードバンド(キャリア毎の間隔を取るための未使用の領域)に分割されている。この内、地上デジタルテレビ放送に利用されるのは12セグメントで、残りの1セグメントはワンセグ放送に使用される。

ファウンドリー

半導体産業において、実際に半導体デバイス(半導体チップ)を生産する工場のことを指す。ファブ(fab)と呼ばれることもある。

マスク代

LSIなど集積回路の製造工程で使用される重要部材

FPGA

Field Programmable Gate Array。利用者が独自の論理回路を書き込むことの出来るゲートアレイ(汎用的な回路素子の集合体で、後から仕様に依じて回路素子間の配線を行うセミカスタムIC)の一種で、プログラマブルロジックデバイスの中で特に再書き換え可能であるもの。