

太陽電池を用いる照明光通信の研究

上野 良太, 天野 翔一, 柴谷 嘉彦, 藤本 暢宏

A Study on Illumination Light Communication Using a Solar Cell

Ryota UENO* , Shouichi AMANO** , Yoshihiko SHIBATANI** and Nobuhiro FUJIMOTO**

synopsis

A solar cell is available for the optical detector of illumination lite communication system. It enables the long distance illumination lite communication system using white LEDs. The proposed system using a solar cell can achieve three times longer transmission distance than the conventional system using a Si-PD. Experimental results show that the proposed system can play a key role in long distance illumination light communication systems.

Keywords : white LED, illumination lite communication

1. はじめに

白色 LED (Light Emitting Diode: 発光ダイオード) を用いた照明光通信システム [1] はユビキタスネットワーク実現のための有望なインフラの一つである。本システムにおいて白色 LED は照明機器として使われるだけでなく、情報通信にも使われる。白色 LED は、小型で低電圧駆動であり、さらには、省電力・長寿命であるため、交通信号灯・携帯電話や電子機器のバックラ

イトなどに利用されており、最近では環境への配慮から白熱電球の代わりとして LED 電球が製品化され利用され始めている。

今回の報告書では、照明光通信システムにおける通信可能距離の長距離化を目的として、太陽電池 [2] を受光素子として用いる構成を検討し、試作回路によりその基本動作を確認したので報告する。

*近畿大学大学院システム工学研究科

Graduate School of Systems Engineering, Kinki University

**近畿大学工学部電子情報工学科

Department of Electronic Engineering and Computer Science, School of Engineering Kinki University

2. 長距離化の方法

まずは長距離化するために必要な点について考える。光無線通信における最大伝送距離は以下で表される。

$$l_{\max} = \frac{Pt - (Pr_{\min} + Pd)}{\alpha} \quad (1)$$

ここで l_{\max} は最大伝送距離、 Pt は送信出力光電力、 Pr_{\min} は最小受信光電力、 Pd は受光感度劣化、 α は空間伝送路平均損失を表している。また、LED の放射パターンはランベルト放射で近似でき、受信光電力は以下で表される [3]。

$$Pr = \frac{(m+1)A}{2\pi l^2} Pt \cos^m(\phi) Ts(\psi) g(\psi) \cos(\psi) \quad (2)$$

ここで Pr は受信光電力、 A は受光検波面積、 Pt は送信出力光電力、 l は伝送距離、 ϕ は放射角、 m は放射パターンの指向性、 ψ は入射角、 $Ts(\psi)$ は光フィルタのゲイン、 $g(\psi)$ は集光器のゲインを表している。図1に式(2)に対応させた図を示す。さらに放射パターンの指向性 m は放射強度半値角 $\Phi_{1/2}$ を用いて以下のように表される [4]。

$$m = -\frac{\ln(2)}{\ln(\cos \Phi_{1/2})} \quad (3)$$

長距離化を行うために、まず光送信器側に必要な点を考える。式(1)から、光送信器に用いる LED を高光度な物にし、送信出力光電力 Pt を大きくすることで、最大伝送距離 l_{\max} を拡大することが可能である。式(3)からは、指向性の狭い LED を用いることで、放射強度半値角 $\Phi_{1/2}$ の値を小さくし、放射パターンの指向性 m の値を大きくすることが可能である。 m が大きくなると式(2)から受信光電力 Pr が大きくなるため、距離の伸張が可能である。さらに式(2)から、光受信器側の受光面の中心点に対面するように、LED の光の放射角 ϕ を限りなく 0 度にする必要がある。次に、光受信器側に必要な点を考える。式(2)から、光受信器に用いる受光素子の受光検波面積 A を大きくすることで、受

信光電力 Pr が大きくなり距離の伸張が可能となる。また受光面を LED の発光面の中心点に対面するように設置し、受光面に入射する光の角度、入射角 ψ を限りなく 0 度にする必要がある。

図2に距離の伸張方法外略図を示す。今回は、主に受光検波面積 A を大きくすることで、通信距離の伸張に対してどれほどの効果を得ることが出来るのかを測定する実験であるため、光フィルタや集光器は用いないことにする。そのため、式(2)にある光フィルタのゲイン $Ts(\psi)$ と集光器のゲイン $g(\psi)$ は考えないものとする。

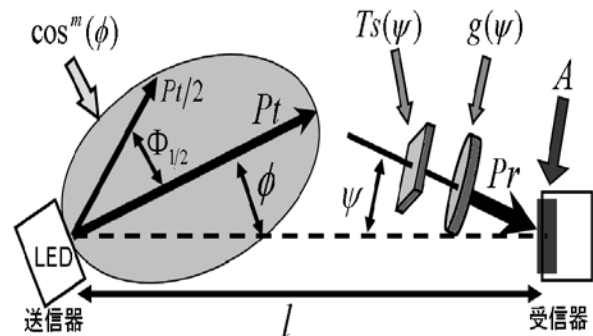


図1. 光送受信器の関係図

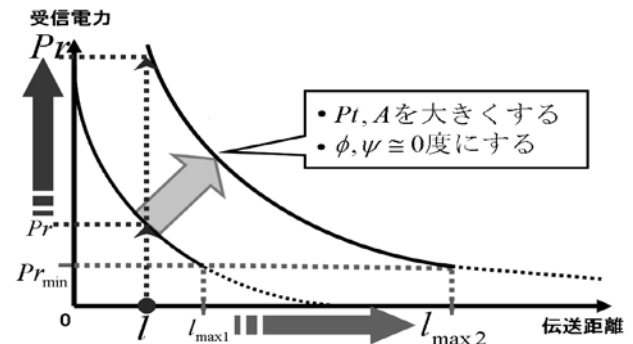


図2. 距離の伸張方法概略図

3. 光送信器に使用する LED

先ほど述べたように、通信距離を伸張するためには高光度であり、指向性が狭い LED を用いる必要がある。その条件で選定した結果、図3に示すような LUXEON 社の LXHL-NWE8 を用いることに決定した。LXHL-NWE8 の特徴として、中心平均光度は 500cd であり、放射強度半値角 $\Phi_{1/2}$ は 5 度である。例えば、一般的な砲弾

型 LED の平均光度は約 2cd 程度であり、放射強度半値角 $\Phi_{1/2}$ は 20 度であるため、LXHL-NWE8 はその値の差からも見て取れるように、高光度であり指向性が狭い LED であることがわかる。



図 3. LXHL-NWE8 とその特徴

4. 光受信器に使用する受光素子

次に、光受信器に使用する受光素子を選定する。当研究室で用いられている受光素子(Si-PD)で一番大きい受光検波面積を持つ素子は S1223 で、6.6mm²である。通信距離の伸張を目的とした本実験では、この大きさでも非常に小さい。そのため、受光検波面積の大きい受光素子を模索した結果、太陽電池を受光素子として応用することが可能だと考えた。基本動作としては、太陽電池は PD と同じく光起電力効果を用いて電流を発生させる。そのため、太陽電池も受光した光パワーの強弱によって流れる電流に変化が出るため、光無線通信に応用できると考えられる。また、太陽電池は発電を目的としているため、大面積であるものが多い。通信距離の伸張のために大面積受光素子が必要な本研究にとって、太陽電池は十分な面積を確保できる素子であると言える。以上のことから、本研究では受光素子として、Si-PD の代わりに太陽電池を用いることにした。

5. 太陽電池の選定

現在実用化されている代表的なシリコン太陽電池には、単結晶型(single crystal)、多結晶型(polycrystal)、アモルファス型(amorphous)の3種類がある。今回は市販品で簡単に購入できるものから通信に向いている太陽電池を選定した。ここで、図4に

太陽電池の等価回路を示す。太陽電池の等価回路は、電流源とダイオード、コンデンサの並列接続であると考えられている。今回、受光素子として用いる条件を、コンデンサの並列容量Cの値が小さいものとする。この容量Cが小さいほど広帯域に対応できる素子であると考えられるためである。

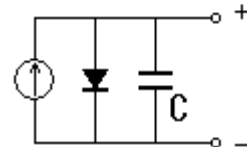


図 4. 太陽電池の等価回路

6. 太陽電池の最適抵抗値

一般的に、太陽電池には適した負荷抵抗 R_L を使用する必要がある。図5に太陽電池における電流 I 、電圧 V 、負荷抵抗 R_L の関係図を示す。例えば、 R_L が大きすぎると I_{RL} が小さくなり太陽電池から取り出せる電力が小さくなる。また、 R_L が小さすぎると V_{RL} が小さくなり、やはり取り出せる電力が小さくなる。そのため、取り出せる電力を最大にするには R_L を最適な値にする必要があり、その抵抗値は最適抵抗値と呼ばれている。

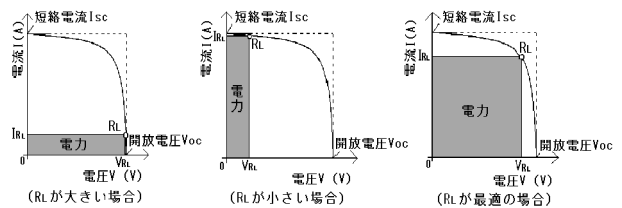


図 5. 最適抵抗値

7. 太陽電池の容量Cの測定

図6に、太陽電池の容量Cを測定するために用いた光送受信回路のブロック図を図5に示す。まず、ネットワークアナライザを用いて、光送信器-光受信器間の3dB利得低下周波数(f_c)を測定する。次に、式(4)から f_c と R_L を用いて各太陽電池の容量Cを求める。

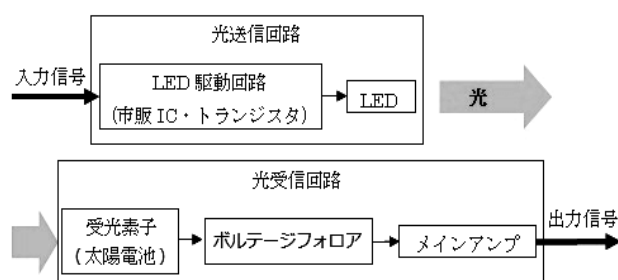


図6. 回路ブロック図

$$C = \frac{1}{2\pi R_L fc} \quad (4)$$

ここでCは容量、 R_L は負荷抵抗、 fc は3dB利得低下周波数を表している。

8. 太陽電池の開放電圧、短絡電流の測定

表1に購入してきた太陽電池全体の受光面積(A)、および実測した開放電圧(V_{oc})、短絡電流(I_{sc})の測定結果を示す。測定環境は晴天下で太陽光108000luxの時である。

表1. 太陽電池の V_{oc} , I_{sc}

	アモルファス		多結晶		単結晶	
	a1	a2	p1	p2	s1	s2
A(c m ²)	36.6	25.8	19.2	39.6	3.6	8.8
V_{oc} (V)	5.0	5.2	0.6	2.3	1.8	6.6
I_{sc} (mA)	60.2	44.3	224	325	49.1	25.1

9-1. アモルファス型太陽電池での測定結果

まず、アモルファス型太陽電池の容量Cを求めた。 V_{oc} 、 I_{sc} より、アモルファス型太陽電池[a1]、[a2]の最適抵抗値を求めた結果、 R_L は83 Ω と117 Ω となった。光受信器の R_L を変化させ利得周波数特性を測定し、計算により求めた容量Cを図7に示す。

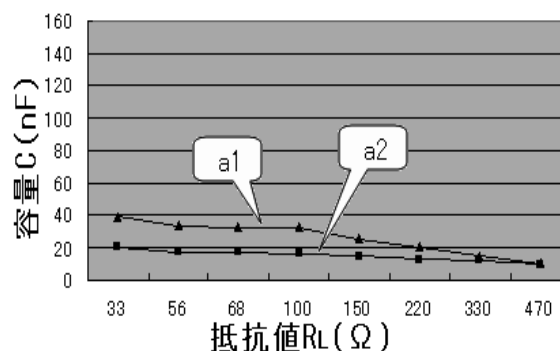


図7. アモルファス型太陽電池の容量C

図7より最適抵抗値付近の太陽電池[a1]、[a2]の容量Cは約32.1nF、約16.5nFとなり、太陽電池[a2]の方が小さくなった。この結果より、 I_{sc} が小さいと容量Cは小さくなると考えられる。

9-2. 多結晶型太陽電池での測定結果

次に、多結晶型太陽電池の容量Cを求めた。 V_{oc} 、 I_{sc} より多結晶型太陽電池[p1]、[p2]の最適抵抗値を求めた結果、 R_L は2.7 Ω と7.3 Ω となった。光受信器の R_L を変化させ利得周波数特性を測定し、計算により求めた容量Cを図8に示す。

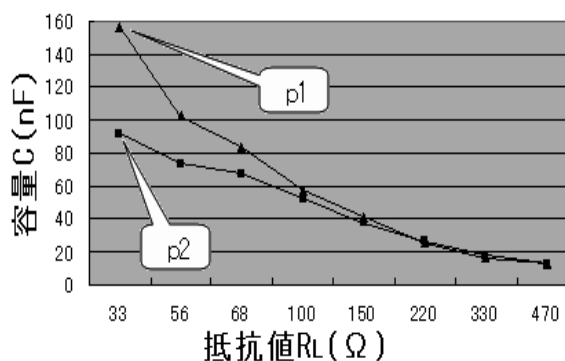


図8. 多結晶型太陽電池の容量C

しかし、太陽電池[p1]、[p2]の最適抵抗値は非常に小さく、図8を見て分かるように測定精度の低さから、計算により求めた容量Cは大きく変動しており、正確な値を求めることはできなかった。

9-3. 単結晶型太陽電池での測定結果

次に、単結晶型太陽電池の容量 C を求めた。Voc、Isc より単結晶型太陽電池[s1]、[s2]の最適抵抗値を求めた結果、 R_L は 37.4Ω と 262Ω となった。光受信器の R_L を変化させ利得周波数特性を測定し、計算により求めた容量 C を図9に示す。

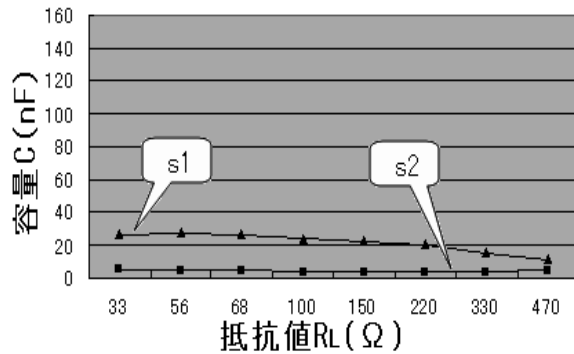


図9. 単結晶型太陽電池の容量 C

図9より最適抵抗値付近の太陽電池[s1]、[s2]の容量 C は約 26.7nF と約 3.5nF となり、太陽電池[s2]の方が小さいことが分かった。

以上の実験結果から、購入できた太陽電池では、単結晶型太陽電池[s2]の容量 C が一番小さかった。よって、太陽電池[s2]を光受光素子として用いることにした。

10. 原理確認実験

提案手法の有効性を確認するために原理確認実験を行った。図10に光送受信回路のブロック図を示す。光送信回路では、LED駆動回路に市販ICとトランジスタを用いた。さらに受光素子としてSi-PD、もしくは太陽電池を用い、市販オペアンプをプリアンプとして、識別ICを組み合わせて光受信回路を組んだ。

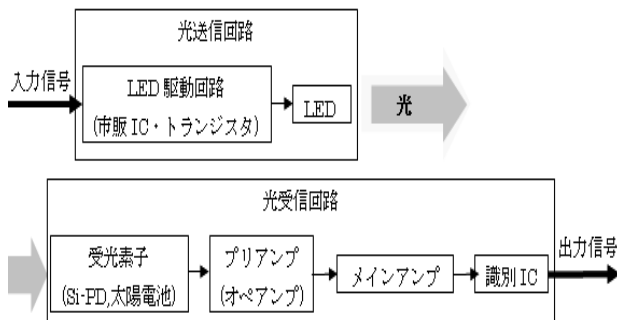


図10. 回路ブロック図

11-1. 光送信器-PD(S5971)光受信器での測定

まず、広帯域に対応したPD(S5971)を用いた光受信器での測定を行った。S5971の受光検波面積は 1.1mm^2 である。また、すべての実験において光変調方式は、IM-DD(強度変調-直接検波)方式を用い、PN(擬似ランダムパターン)9段信号で測定を行った。図11に光送信器-光受信器間の周波数応答特性を示す。図11より、 -3dB 利得周波数 f_c は 28.0MHz である。図12に光送信器-光受信器間でのビット誤り率の測定結果を示す。図12より、 10Mbps でのエラーフリー (0.0×10^{-8}) を確保できた距離は 14.5cm であった。

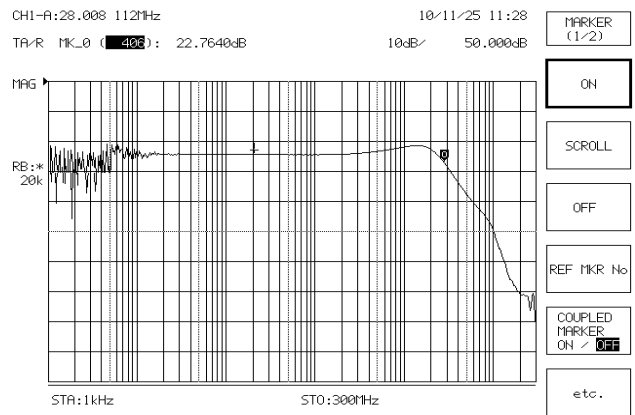


図11. 光送信器-光受信器間での周波数応答特性

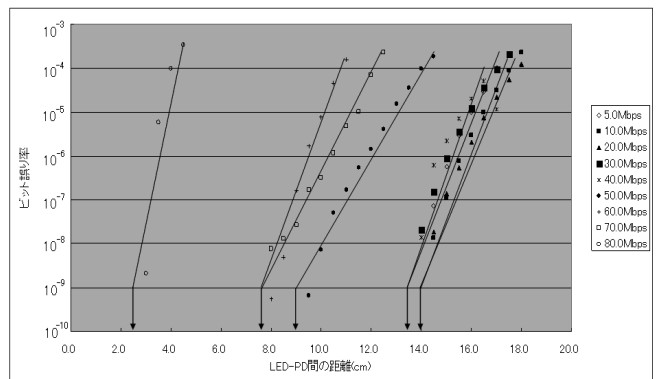


図12. 光送信器-光受信器間でのビット誤り率

1 1 - 2. 光送信器-太陽電池光受信器での測定

次に、太陽電池[s2]を受光素子にした光受信機での測定を行った。図13に光送信器-光受信器間の周波数応答特性を示す。図13より、-3dB利得周波数 f_c は4.4MHzである。図14に光送信器-光受信器間でのビット誤り率の測定結果を示す。図14より、10Mbpsでのエラーフリー(0.0×10^{-6})を確保できた距離は43.8cmであった。

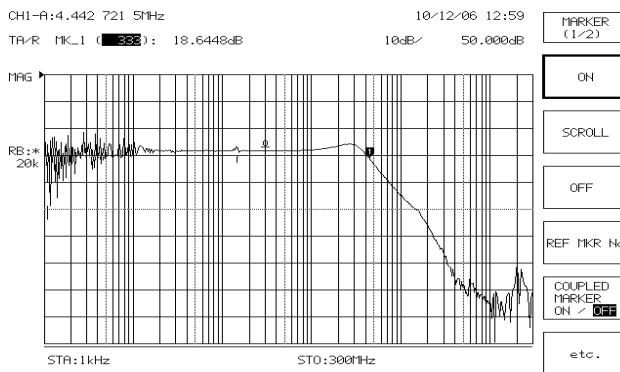


図13. 光送信器-光受信器間での周波数応答特性

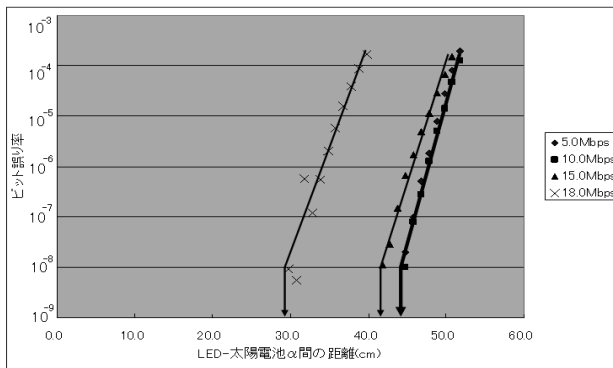


図14. 光送信器-光受信器間でのビット誤り率

1 1 - 3. PD と太陽電池での通信距離の比較

図15に10Mbpsでの、PDと太陽電池でのエラーフリーを確保できた距離を示す。図15からわかるようにPDに比べ太陽電池を受光素子に用いた場合は、約3倍の通信可能距離を確保できた。

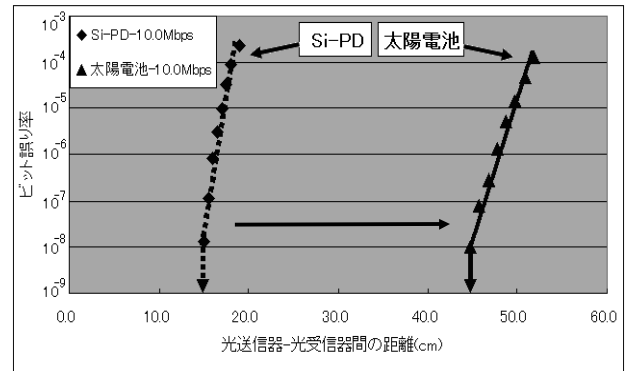


図15. PDと太陽電池での比較

1 2. 結論

PDの代わりとして、太陽電池を受光素子として用いても光無線通信が行えるということが分かった。また、太陽電池を受光素子として用いることで、受光検波面積を大きくすることができ、光無線通信の距離の伸張が可能であることを確認できた。

参考文献

- [1] Y. Tanaka and M. Nakagawa, "Indoor visible light data transmission system utilizing white LED lights", IEICE Tran. Commun., vol. E86-B, no. 8, pp. 2440-2454, 2003
- [2] トコトンやさしい太陽電池の本 産業技術総合研究所太陽光発電研究センター編著
- [3] Joseph M. Kahn and John R. Barry, "Wireless Infrared Communications", Proceedings of the IEEE, Vol. 85, No. 2, February 1997.
- [4] 平成17年度卒業研究予稿集 2-1~2-2