

(300) 通信

## 非線形歪補償を用いた LED 可視光無線通信の空間並列伝送時の伝送特性

### Transmission Performance of Spatially Parallel Transmission in LED Visible Light Wireless Communications by Non-Linear Distortion Compensation

恵良 紗呂磨<sup>†</sup> 富里 繁 田野 哲 上原 一浩  
Saroma Era Shigeru Tomisato Satoshi Denno Kazuhiro Uehara

<sup>†</sup>岡山大学 大学院自然科学研究科

#### 1 まえがき

モバイル通信機器の普及や IoT の進展によるトラフィックの急速な増大に対応するため、LED 照明を用いた可視光無線通信が検討されている[1][2]。LED 可視光通信は光の強度を変化させることで情報信号を送信するが、通信距離や LED 照明と受光素子の配置方法により受信電力が変動する。このため、LED 照明と受光素子の配置方法の最適化が必要で、伝送速度の高速化のために複数の LED 照明と受光素子を用いて空間的に並列な信号伝送を行う場合の配置方法が検討されている[3][4]。

本研究では、この空間並列伝送時に受信品質を確保できる受信電力を得るために LED を飽和領域で使用することを検討し、このときに発生する非線形歪をデジタル信号処理によるプリディストーション手法[5]で補償した場合の受信特性を評価する。

#### 2 空間的並列信号伝送

LED 可視光通信における空間的並列伝送方式を図 1 に示す。複数の LED 照明と受光素子を用いて、異なる情報信号を同じ波長で同時に送信する。可視光通信では受光エネルギーを増大させるため、受光素子でミラーやレンズを用いて集光している。このため、受光素子の受光可能範囲が制限されるが、この制限を利用することで複数の LED 照明から同じ波長で同時に異なる信号を送信した場合でも、各受光素子は 1 対 1 の通信を行えると考えられ、受信側で複雑な信号処理を行わずに空間的に信号伝送を並列化できる。

図 2 に本研究のシステム構成を示す。距離  $R$  だけ離れた LED 照明#1~#5 と同じ場所に設置した受光素子を用いて空間的並列伝送を行う。送信信号は各受光素子の受光方向に応じて LED 照明に適応的に分配され、複数の LED 照明から並列に送信された信号を複数の受光素子で同時に受信することにより空間的並列信号伝送を実現する。本研究では、床面に対して垂直に配置した受光素子を A、角度  $\theta$  だけ受光する方向が異なる隣接する受光素子を B とした。また、A に対しては LED 照明#3 からの光を希望波とし、一方、B に対しては#2 からの光を希望波とした。さらに、各 LED 照明と受光素子は点として扱い、受光素子は同じ点に位置するとした。

通信距離  $r$  が天井高  $d$  と等しい場合の受光素子の受

信電力を  $P_0$  とすると、受光素子の受信電力  $P$  は以下の式で表される。

$$P = GP_0 \left( \frac{r}{d} \right)^{-\alpha} \quad (1)$$

ここで  $G$  は入射角度による受光素子における受信電力の利得を表しており、図 3 に示すように実測値[6]に基づいて近似した値を用いている。また、 $\alpha$  は距離減衰定数を表している。

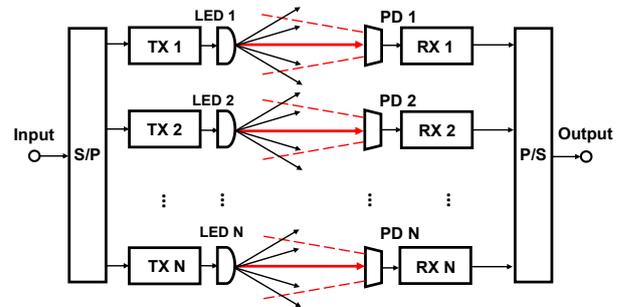


図 1 空間的並列伝送方式

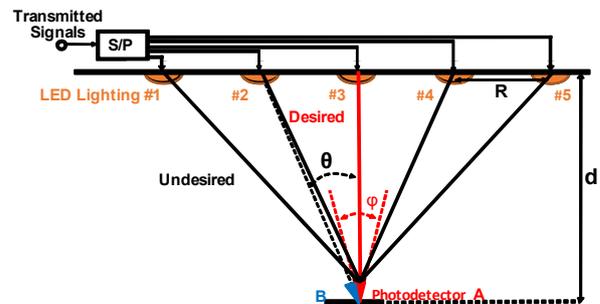


図 2 空間的並列伝送システム構成

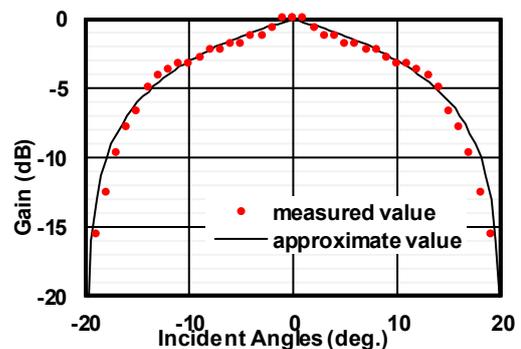


図 3 入射角度に対する受光素子の利得

### 3 非線形歪補償

本研究では、LED 可視光通信用送信機における LED 回路の非線形性の補償方法として、送信信号にその逆特性を乗算するデジタル信号処理で非線形歪を補償するプリディストーション手法を用いる。本研究で用いる送受信機構成を図 4 に示す。

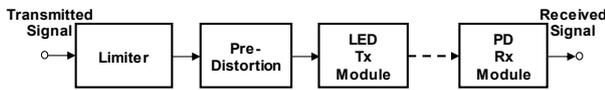


図 4 送受信機構成

また、LED 回路の入出力特性における非線形性は、以下の Rapp モデルを用いてモデル化した[7].

$$A_{out}(t) = \frac{G_0 A_m(t)}{\left[1 + \left(\frac{A_m(t)}{A_{sat}}\right)^{2p}\right]^{\frac{1}{2p}}} \quad (2)$$

ここで  $G_0$  は増幅利得、 $A_m(t)$  と  $A_{out}(t)$  は、それぞれ LED 回路の入力信号振幅と出力信号振幅を表す。 $A_{sat}$  は飽和入力振幅を表す。また、式(2)の  $G_0$  を 1 とした場合の逆特性を以下に示す。

$$A'_{out}(t) = \frac{A'_m(t)}{\left[1 - \left(\frac{A'_m(t)}{A_{sat}}\right)^{2p}\right]^{\frac{1}{2p}}} \quad (3)$$

ここで  $A'_m(t)$  と  $A'_{out}(t)$  は、それぞれプリディストーション処理回路の入力信号振幅と出力信号振幅を表す。本研究では、この(3)式を用いてプリディストーション処理を行う。このプリディストーション処理では、LED 回路の飽和入力付近の入力があると式 (3) の結果が非常に大きくなる。このため、LED 回路への入力電力が過大となる。そこで、本研究では、図 4 に示すように、プリディストーション処理前にリミタ処理を行い、プリディストーション処理回路の入力電力を LED 回路の飽和入力以下に制限する。

## 4 受信特性評価

### 4.1 シミュレーション条件

空間的並列信号伝送時の非線形歪補償の有効性を明らかにするため、各受光素子における BER 特性を評価した。表 1 にシミュレーション条件を示す。本研究では OFDM 伝送を用いることとし、変調方式を 16QAM とした。OFDM 伝送のサブキャリア数を 1200 とし、受光素子の受光範囲を  $\pm 20^\circ$  とした。また、受光素子 A と B の素子間角度を  $20^\circ$  に設定した。LED 回路の非線形定数  $p$  は実際の値に基づいて 1 とした。LED 照明と受光素子間の伝搬路における距離減衰定数  $\alpha$  は実測値に基づき 3 とし、BER 特性評価時の伝送路は加法性白色ガウス雑音 (Additive White Gaussian Noise: AWGN) チャネル

とした。このときの CNR は  $P_0$  と雑音の電力比とした。本研究では、LED 照明間距離  $R$  は天井高  $d$  で正規化して表すこととした。

表 1 シミュレーション条件

伝送方式	OFDM
変調方式	16QAM
サブキャリア数	1200
受光可能範囲 $\varphi$	$\pm 20^\circ$
受光素子間角度 $\theta$	$20^\circ$
距離減衰定数 $\alpha$	3
非線形定数 $p$	1
入力バックオフ (dB)	6
伝送路	AWGN チャネル

### 4.2 BER 特性

受光素子 A と B における LED 照明間距離に対する BER 特性を図 4 に示す。CNR = 20dB とした。図 4 ではプリディストーション処理を用いない場合 (w/o Predistortion) とプリディストーション処理を行う場合 (w/ Predistortion) の受信特性を示している。図 4 より、LED 照明間距離が  $0.42d$  のときに受光素子 A 及び B で BER が最も小さくなるのが分かる。これは、受光素子 A 及び B に希望する LED 照明以外の照明からの干渉波が入射しなくなるからである。また、照明間距離が  $0.42d$  より大きくなると受光素子 B の BER 特性が劣化するが、これは希望する LED 照明からの入射角度が大きくなることで図 3 に示したように受光時の利得が下がること、距離減衰が大きくなるためである。また、プリディストーションを用いた非線形歪補償を行うことで照明間距離が  $0.42d \sim 0.48d$  の範囲において、受光素子 A と B における BER が共に  $10^{-3}$  以下となることが分かる。このことは、照明間距離をこの範囲に設定すれば複数の受光素子で同時に良好な品質で信号を受信でき、空間的に並列な信号伝送が可能であることを示している。

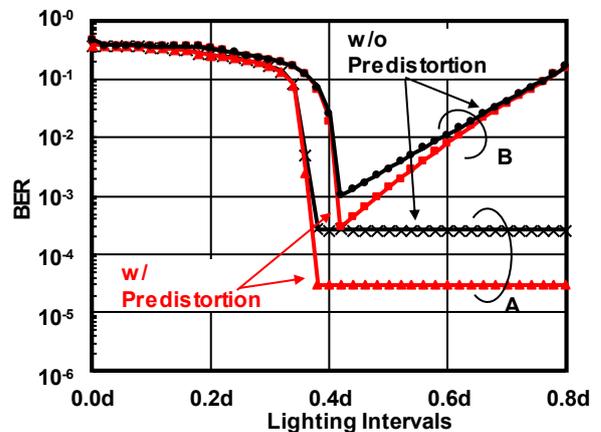


図 4 LED 照明間距離に対する BER 特性

次に、LED 照明間距離  $R$  を BER が最小となる  $0.42d$  とした場合の受光素子 A の BER 特性を図 5 に示す。比較のため、LED 回路の入出力特性を完全に線形とした場合の BER 特性も示す。図 5 より、非線形歪の影響で線形な場合と比較して BER =  $10^{-3}$  における所要  $E_b/N_0$  特性が 1.8dB 劣化するが、非線形歪補償を行うことにより、1.2dB 改善することが分かる。

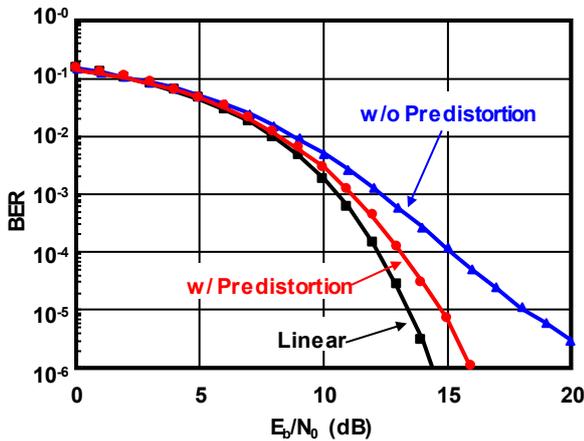


図 5 受光素子 A の BER 特性 ( $R = 0.42d$ )

また、同様に  $R = 0.42d$  とした場合の受光素子 B における BER 特性を図 6 に示す。図 6 より、LED 回路の非線形歪補償を行うことにより BER 特性が改善し、BER =  $10^{-3}$  における所要  $E_b/N_0$  特性の改善量は 1.2dB となることが分かる。

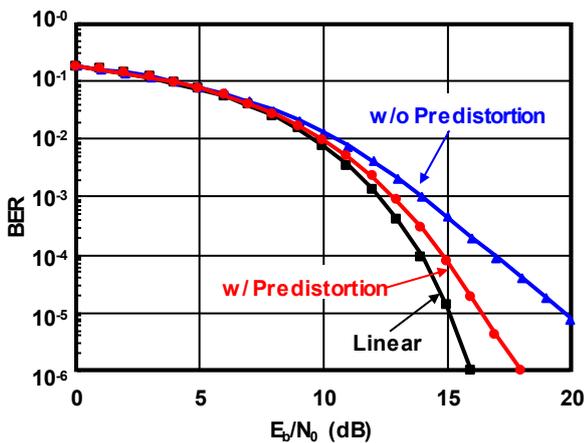


図 6 受光素子 B の BER 特性 ( $R = 0.42d$ )

## 5 まとめ

LED 可視光無線通信において、複数の LED 照明と受光素子を用いた空間的並列信号伝送時に、プリディストーション処理による非線形歪補償を行う場合の受信特性改善効果を評価した。評価結果から、非線形歪補償により各受光素子における受信特性が改善し、並列信号伝送が可能となる LED 照明間距離の範囲が広がることを明らかにした。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 18K04143 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] 中川正雄, “ユビキタス可視光通信,” 信学論, vol.J88-B, no.2, pp.351-359, Feb.2005.
- [2] 春山真一郎, “可視光通信,” 信学誌, vol.94, no.12, pp.1055-1059, Dec. 2011.
- [3] 亀井裕典, 富里繁, 田野哲, 上原一浩, “LED 可視光通信における照明配置方法による干渉特性評価,” 信学技報 SRW2018-32, 2018 年 11 月.
- [4] 亀井裕典, 富里繁, 田野哲, 上原一浩, “LED 可視光通信における空間的並列信号伝送のための照明配置方法の検討,” 信学技報 SRW2018-64, 2019 年 3 月.
- [5] 熊谷貴明, 近森太洋, 富里繁, 田野哲, 古野辰男, 小田恭弘, “LED 可視光通信用送受信回路の非線形歪補償法,” 映像情報メディア学会誌, vol.71, no.2, pp.J80-J86, 2017.
- [6] 松野弘明, 富里繁, 田野哲, 秦正治, 古野辰男, 小田恭弘, “LED 可視光通信における変調精度の実験的検討,” 2015 信学総大, B-19-14, 2015 年 3 月.
- [7] C. Rapp, “Effects of HPA-nonlinearity on a 4DPSK/OFDM signal for a digital sound broadcasting system,” Proc. of the Second European Conference on Satellite Communications, pp.179-184, Oct. 1991.