

(301) 通信工学

プリディストーションと非線形歪雑音除去を用いた LED 可視光通信方式 LED Visible Light Communications by Pre-Distortion and Non-Linear Distortion Noise Canceling

平井 啓太郎† 富里 繁 田野 哲 上原 一浩
Keitaro Hirai† Shigeru Tomisato Satoshi Denno Kazuhiro Uehara
岡山大学 大学院自然科学研究科

1. まえがき

次世代の無線通信方式では、トラフィックの大幅な増大に対応するため使用帯域の広帯域化が求められており、可視光領域を用いる新たな無線通信技術である LED 照明を用いた可視光無線通信が研究されている[1][2].

この LED 可視光通信で用いる LED 回路は、入出力特性における線形領域が狭く、通信距離を延ばすために入力電力を大きくした場合、非線形歪が発生し、受信特性が劣化する。この問題を解決するため、この非線形歪の逆特性を送信信号にあらかじめ乗算してデジタル信号処理で非線形歪補償を行うプリディストーション手法が検討されてきた[3]。この手法では、LED 入力信号を増大して飽和領域の非線形歪を線形化するが、この場合、LED 回路の入力電力が過大となる。このため、LED 回路の入力電力を制限する処理が必要となり、この入力電力制限により発生する非線形歪により線形化が不完全となる。

一方、OFDM 信号の送信機におけるクリッピング処理により発生する非線形歪雑音を受信機で再生成して除去するキャンセル手法が検討されている[4]。この手法では、受信機で仮判定した復調信号から非線形歪雑音成分を再生して除去を行う。しかしながら LED 回路のような非線形性が大きく非線形歪雑音電力が大きい場合、仮判定した信号のビット誤りが多くなるため雑音キャンセル効果が不十分となり、受信特性改善効果が低下する。

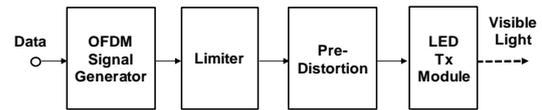
そこで本研究では、LED 回路の非線形歪を送信機のプリディストーション処理で線形化し、その処理で残留する非線形歪雑音を受信機の非線形歪雑音キャンセラで除去する手法を提案する。このように 2 つの手法を用いて送受協調して線形化を行うことにより、送信側で残留する非線形歪を受信機側で補償でき、また、送信側のプリディストーション処理により非線形歪雑音を低減できるため、受信機におけるキャンセル効果低下の原因となる仮判定時のビット誤りを低減できる。このため、いずれか 1 つの手法のみで線形化を行う場合と比較して、大幅に線形化効果を大きくすることが可能となる。

本研究では、まず、提案手法の原理と構成を示し、次に、この提案手法を用いた場合の受信特性改善効果を計算機シミュレーションにより評価する。

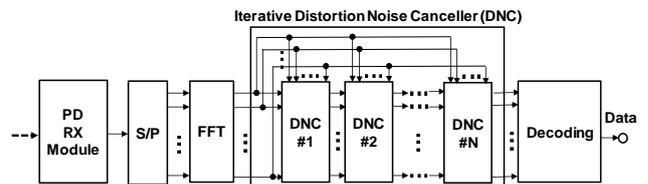
2. 提案手法

2.1 送受信機構成

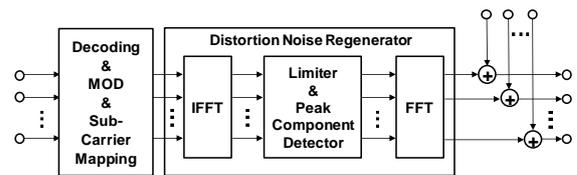
図 1 に提案手法を用いた LED 可視光無線通信送受信機構成を示す。送信機は OFDM 信号生成回路、プリディストーション処理回路、及び可視光通信用の LED 送信回路から構成される。また、受信機は受光回路と OFDM 信号受信回路、非線形歪雑音キャンセラ (Distortion Noise Canceller: DNC), 及び復号回路から構成される。



(a) 送信機構成



(b) 受信機構成



(c) 非線形歪雑音キャンセラ

図 1 提案手法を用いた送受信機構成

2.2 プリディストーション処理

本研究では LED 送信回路の入出力特性を以下の式で表される Rapp モデルでモデル化した[5].

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

ここで G_0 は増幅利得, $A_{in}(t)$ は LED 回路の入力信号振幅, $A_{out}(t)$ は LED 回路の出力信号振幅を表している. A_{sat} は飽和入力振幅を表し, p は LED 回路の非線形性を決定する定数を表している.

図 1 (a) に示す送信機では, LED 回路の非線形歪を補償するためプリディストーション処理を行っている. このため, OFDM 信号に LED 回路の入出力特性の逆特性をあらかじめ乗算する. この逆特性は,

(1) 式の G_0 を 1 とした場合の逆関数で表すことができる. この関数は以下の式で表される.

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

ここで, $A'_{in}(t)$ と $A'_{out}(t)$ は, 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. 図 2 で示すように, プリディストーション処理を行うことで, 飽和入力までの入力信号に対して出力信号を線形化できる.

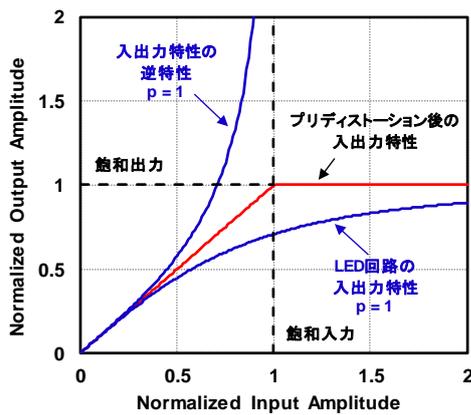


図 2 プリディストーションの原理

2.3 リミタ処理

このプリディストーション処理では, 図 2 から分かるように, 飽和入力を超える場合にはプリディストーション処理回路出力が無窮大となるため, 補償が不可能となる. このため, 図 2 に示すプリディストーション処理後の入出力特性において, 飽和入力以上の入力電力に対しては非線形性が残留する. また, 飽和入力付近ではプリディストーション処理回路の出力電力が大幅に増大するため, 過大な電力が LED 回路に入力することになる. そこで, このような LED 回路への過大な入力を回避するため, 図 1 (a) に示すように, プリディストーション処理回路の入力電力が LED の飽和入力以下になるように, OFDM 信号の振幅を制限するリミタ処理を行っている. こ

の処理では, 事前に設定した閾値以上の入力振幅を全て閾値に制限しており, 以下の式で表される.

$$\begin{aligned} S'_i &= \frac{A_{sat} - A_m}{A'_m} \cdot S_i \\ S'_q &= \frac{A_{sat} - A_m}{A'_m} \cdot S_q \\ A'_m &= \sqrt{S_i^2 + S_q^2} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで, S_i と S_q はリミタ回路の入力信号の実部と虚部を表し, S'_i と S'_q はリミタ処理後の出力信号の実部と虚部を表している. また A'_m は入力振幅を表し, A_m は飽和入力 A_{sat} からのマージンである. このため, $A_{sat} - A_m$ がリミタ処理の閾値となる. このマージンは式 (1) で表される LED 回路の入出力特性に応じて, 式 (2) の値が過大にならないように設定される. このリミタ処理により OFDM 信号のピーク電力成分が除去され, プリディストーション処理時に LED 回路入力が過大になることを回避できる.

2.4 非線形歪雑音除去手法

図 1 (b) に示す受信機では, 受信回路における受信処理後に, FFT により OFDM 信号の時間波形を各サブキャリア信号に変換する. 次に非線形歪雑音キャンセラを用いて送信機のリミタ処理で生じる非線形歪雑音を除去する.

図 1 (c) に非線形歪雑音キャンセラの構成を示す. 非線形歪雑音キャンセラでは, まず受信信号に対して仮の符号判定を行い, 仮判定した信号から再び OFDM 信号を生成する. 次に再生成した OFDM 信号に対して, 送信機側と同じ閾値によるリミタ処理を用いて OFDM 信号のピーク電力成分を取り出すことにより, リミタ処理により発生した非線形歪雑音成分を検出できる. この検出した非線形歪雑音成分を FFT することにより, OFDM 信号の各サブキャリアに付加されている非線形歪雑音を受信機側で再生成できる. この再生成した非線形歪雑音を仮判定前の受信信号から減算することにより非線形歪雑音が除去された受信信号を生成できる. この受信信号を用いて符号判定を行うことにより, 仮判定時と比較して精度よく復号できる.

このように送信側で残留する非線形歪雑音を受信信号から除去することで受信品質を改善できる. また, 図 1 (b) に示すように, この非線形歪雑音除去を繰り返し行っている. 繰り返し処理を行うことで, より正確な非線形歪雑音を生成することができるため, さらに符号判定精度を向上できる. このため, 線形化効果が増大し, より一層, 受信品質を改善することが可能となる.

3. 受信特性評価

3.1 シミュレーション条件

提案手法の受信特性改善効果を評価するため、計算機シミュレーションを行った。表1にシミュレーション条件を示す。伝送方式を OFDM 方式とし、OFDM 信号のサブキャリア数は 1200、変調方式は 64QAM とした。式 (1) と (2) の p については実際の LED 回路の非線形性を考慮して 1 とした。LED 回路の入力バックオフは飽和領域で使用することを想定して、2dB 及び 4dB とした。また、リミタ処理時の閾値は平均入力電力に対する閾値の電力比で定義し、LED 回路の入力バックオフに対応して、入力バックオフの値よりそれぞれ 0.5dB 小さい 1.5dB 及び 3.5dB とした。本研究では、可視光通信における伝搬路の変動は電力減衰のみを考慮することとし、このため伝送路は加法性白色ガウス (Additive White Gaussian Noise: AWGN) チャンネルとした。

表1 シミュレーション条件

| | |
|--------------------|----------|
| 伝送方式 | OFDM |
| 変調方式 | 64QAM |
| サブキャリア数 | 1200 |
| LED 回路非線形定数: p | 1 |
| LED 回路入力バックオフ (dB) | 2, 4 |
| リミタ処理時の制限電力比 (dB) | 1.5, 3.5 |
| 伝送路 | AWGN |

3.2 BER 特性

提案手法による BER 特性を図3に示す。比較のため、プリディストーション処理のみを用いた場合 (Pre_D)、及び非線形歪雑音キャンセラのみを用いた場合 (DNC) の BER 特性も示す。

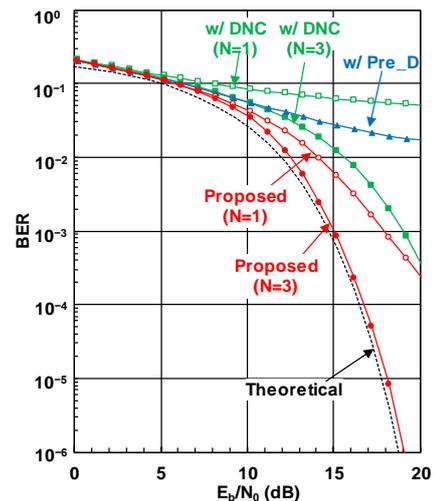
図3 (a) では LED 回路の入力バックオフを 4dB とした。図3 (a) から、提案手法はプリディストーション処理のみ及び非線形歪雑音キャンセラのみを用いた従来手法よりも受信特性を改善できることが分かる。またキャンセラの繰り返し回数 N を 3 回としたときに理論値とほぼ同等の BER 特性が得られていることから、LED の入出力特性をより精度良く線形化できていると考えられる。

図3 (b) に、LED 回路をさらに飽和領域で使用することを考慮し、入力バックオフを 2dB とした場合の BER 特性を示す。図3 (b) から分かるように、プリディストーション処理のみ及び非線形歪雑音キャンセラのみを用いた従来手法では、BER 特性が大幅に劣化し、非線形歪雑音キャンセラの繰り返し処理を 10 回行った場合でも十分な BER 特性改善効果が得られない。

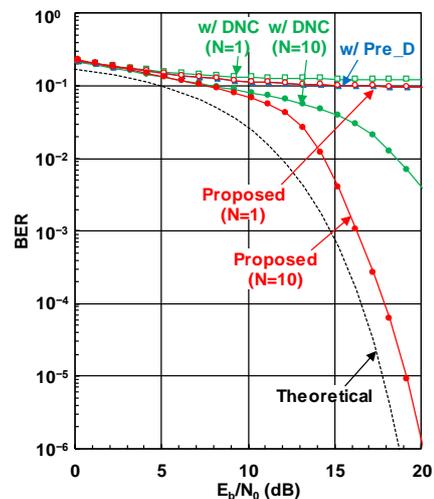
一方、提案手法では、非線形歪雑音キャンセラの繰り返し回数が少ないときは改善効果が得られず、

従来手法と同様な BER 特性となる。これは送信側のプリディストーション処理後に多くの非線形歪雑音成分が受信信号に残留するため、受信側のキャンセラにおいて仮判定時のビット誤りが多くなり、非線形歪雑音成分を精度良く生成できなかったためと考えられる。これに対して繰り返し回数 N を 10 回とした場合は BER 特性を改善でき、BER = 10^{-3} における所要 E_b/N_0 特性の劣化を BER の理論値と比較して 1.5dB に低減できていることが分かる。これは、仮判定時のビット誤りを繰り返し処理で段階的に減らすことができ、それに伴い非線形歪雑音成分の生成精度が向上し、最終的なビット誤りを減少できるためと考えられる。

以上の結果から、送信側のプリディストーション処理手法と受信側の非線形歪雑音除去手法を組み合わせることにより、各手法の不完全性を補うことが可能となり、最終的な受信品質を向上できることが明らかとなった。



(a) Back-off : 4dB



(b) Back-off : 2dB

図3 提案手法の BER 特性

4. まとめ

本論文では、LED 可視光通信で通信距離を延ばすために、LED 回路を飽和領域で使用した場合に発生する非線形歪を補償する手法を提案し、その受信特性改善効果を評価した。提案手法では、送信側のプリディストーション処理手法と受信側の非線形歪雑音除去手法を組み合わせている。この組み合わせにより、どちらか一方を用いる従来手法で生じる不完全性を補うことが可能となる。計算機シミュレーションによる評価から、提案手法が従来手法と比較して、線形化効果を大幅に増大でき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] 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.
- [4] Y. Mori, S. Tomisato, M. Hata, H. Fujii, T. Asai, and Y. Okumura, “A clipping noise canceller for iterative clipping and filtering in wireless OFDMA systems with nonlinear distortion,” Proc. of the 12th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC2009), pp.1-5, Sept. 2009.
- [5] 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.