

研究速報

直交周波数分割多重変調を用いた衛星回線における
非線形ひずみ補償法による特性改善

阿萬 友洋^{†a)}(学生員) 山里 敬也[†](正員)
片山 正昭[†](正員) 小川 明^{††}(正員)

Mitigation of Satellite Non-linear Effect Using SLM and
Iterative Distortion Compensation for OFDM
in Satellite Channel

Tomohiro AMAN^{†a)}, Student Member, Takaya YAMAZATO[†],
Masaaki KATAYAMA[†], and Akira OGAWA^{††}, Members

[†]名古屋大学大学院工学研究科電子情報システム専攻, 名古屋市

Department of Electrical Engineering and Computer Science,
Nagoya University, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

^{††}名城大学理工学部情報工学科, 名古屋市

Department of Information Engineering, Meijo University,
Nagoya-shi, 468-8502 Japan

a) E-mail: aman@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp

あらまし OFDM は PAPR が高く衛星通信の
TWTA によって非線形増幅ひずみを生じる。この
ため、帯域外ふく射を招き、BER を劣化させる。本
論文では SLM で PAPR を抑制することで帯域外ふく
射を抑制し、反復ひずみ補償法により BER 特性の改
善を行う方式を提案する。

キーワード 衛星回線, OFDM, 非線形増幅ひず
み, 反復ひずみ補償法, 選択マッピング

1. まえがき

OFDM は周波数利用効率が高く大容量の伝送に有
効な変調方式である。しかし、OFDM は最大電力対
平均電力比 (PAPR) が高く、衛星通信で利用される
非線形増幅器 (TWTA) によって非線形ひずみが発生
し、帯域外ふく射、BER 特性の劣化を引き起こす。ま
た衛星回線では入力バックオフを十分にとることがで
きないため OFDM の衛星回線への適用は難しいと考
えられている。そこで本研究では入力バックオフが低
い状況においても帯域外ふく射、BER 特性をともに
抑制できる衛星回線に有効な方式を提案する。

本研究では低い入力バックオフでも帯域外ふく射を抑制
するため送信機において選択マッピング (SLM)[3]
を用い PAPR の低い OFDM を生成する。また SLM
のみでは BER 特性の改善が十分でないため受信機に
おいて反復ひずみ補償法 [7] によって非線形ひずみを
補償する衛星通信のための新しい方式を提案する。

2. SLM による帯域外ふく射の抑制

衛星通信で用いられる TWTA は非線形増幅特性を
もち (図 1), 信号電力が飽和電力 P_{sat} を超える信号
にひずみを生じさせ、帯域外ふく射を増加させる。

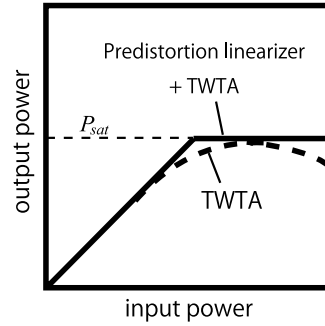


図 1 非線形増幅特性

Fig. 1 Character of nonlinear amplification.

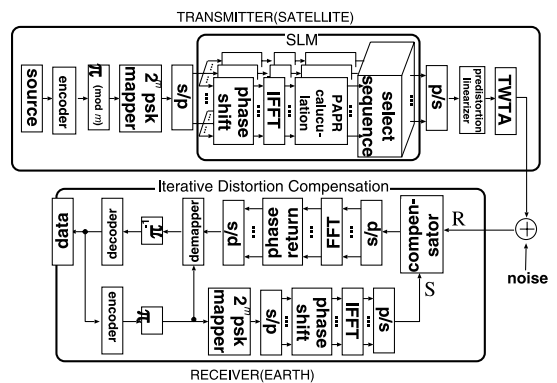


図 2 システムモデル

Fig. 2 System model.

PAPR の抑制手法としてはクリッピング [1] や符号
化、各サブキャリアの位相を回転させる手法などが
ある。クリッピングは信号ひずみを生じさせ、また符
号化は低 PAPR を実現できるが冗長が大きい。一方、
各サブキャリアの位相を回転させ PAPR を抑制する
SLM や部分系列伝送 (PTS) は少ない冗長で PAPR
を大きく抑制することができる。特に SLM は PTS に
比べると PAPR を大きく抑制できる [3]。SLM では図
に示すように、変調信号を全部で U 本のブランチにコ
ピーし、それぞれに対し回転位相系列に基づき位相を
回転させ OFDM 変調する。得られた OFDM 信号の
中から最も PAPR の低い信号を送信信号とする。

本論文では、送信側で SLM を採用することで帯域
外ふく射を抑制する。図 2 にシステムモデルを示す。

シミュレーション諸元を表 1 に示す。本論文では、
Predistortion linearizer によって飽和電力までは完全
に線形増幅できるとし、SLM のサイド情報は誤りな
く受信できるものと仮定した。

表 1 シミュレーション諸元
Table 1 Simulation parameter.

変調方式	8 PSK
サブキャリア数 (N)	64
符号化率	2/3
入力バックオフ	3 dB
回転位相系列	$0, \pi$ のランダム系列
回転位相系列候補数 (U)	128
通信路	AWGN
反復回数	2

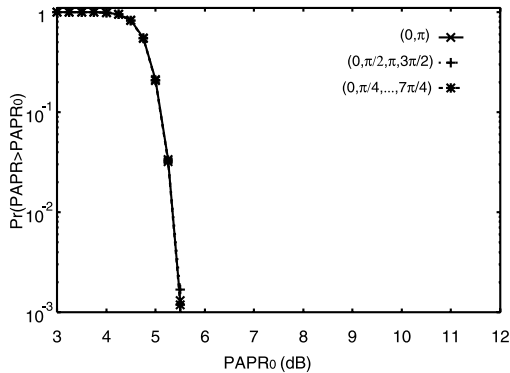


図 3 回転位相の組合せを変化させたときの PAPR の変化
Fig. 3 Effect of number of SLM phase.

SLM の回転位相系列の設計法に関しては文献 [4], [5] で研究されている．これらでは回転位相系列の設計法によって PAPR は大きく変化することが述べられており，ランダムな位相系列の PAPR 特性が良いことが示されているので本研究ではランダム位相系列を選択した．また図 3 に回転位相の組合せを $(0, \pi)$, $(0, \frac{1}{2}\pi, \pi, \frac{3}{2}\pi)$, $(0, \frac{1}{4}\pi, \dots, \frac{7}{4}\pi)$ としたときの PAPR の補累積分布特性を示す．これより PAPR は SLM の回転位相には依存しないことが分かる．したがって本研究では $(0, \pi)$ の回転位相を用いた．

図 4 に回転位相系列候補数 (U) を変えたときの SLM による PAPR の抑制効果を補累積分布特性で示す．図より SLM により少ない冗長 ($\log_2 U$ [bit]) で PAPR を大きく抑制することができ， U が大きいほど PAPR を抑制できる．しかし，次に評価する帯域外ふく射特性では $U = 128$ でほぼ線形増幅したときと同じ特性が得られるので本研究では $U = 128$ とした．

図 5 では SLM による帯域外ふく射の抑制効果を正規化電力スペクトル密度で示す．横軸を正規化周波数で表す．図より SLM で帯域外ふく射を線形増幅したときと同等の特性まで抑制できることが分かる．

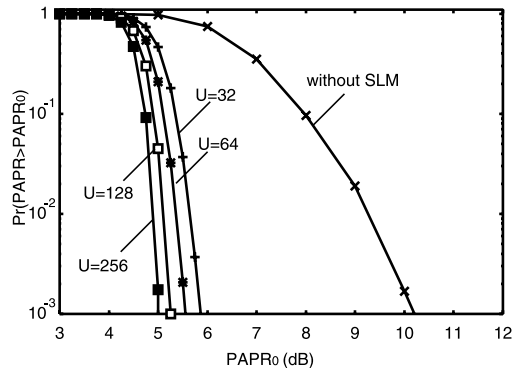


図 4 選択マッピング (SLM) による PAPR の抑制
Fig. 4 PAPR reduction by selected mapping.

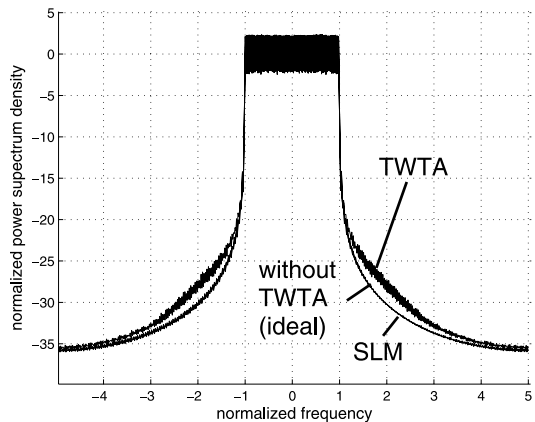


図 5 選択マッピング (SLM) による帯域外ふく射の抑制
Fig. 5 Suppression of out of band emission by selected mapping.

3. 反復ひずみ補償法による BER の改善

反復ひずみ補償法とは誤り訂正復号，非線形ひずみ補償を繰り返すことによって，BER 特性を改善する手法である [7] ．

図 6 に反復回数を変化させたときの SLM，反復ひずみ補償法 (図中では IDC と表記) の BER 特性を示す．これより反復回数を増やすと BER 特性を改善できることが分かる．しかし反復回数が 2 回の BER 特性と 3 回の BER 特性があまり変わらないので本研究では反復回数を 2 回とした．

図 7 に SLM，反復ひずみ補償法を行ったときの BER 特性の効果を示す．これより SLM のみでは BER 特性は十分でなく，反復ひずみ補償法により BER 特性を大きく改善できることが分かる．また SLM によって非線形ひずみを含んだ信号の割合を減らすことができ

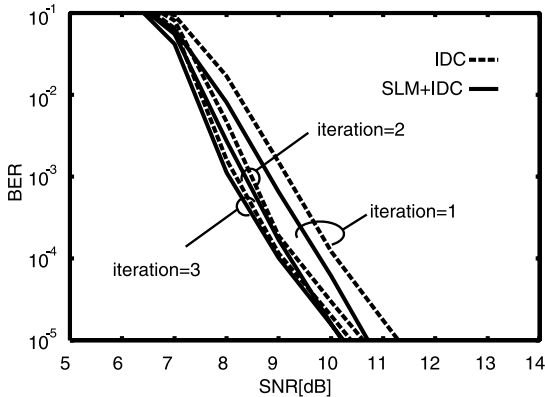


図6 反復回数を変化させたときの BER 特性の変化
Fig.6 Effect of number of iteration.

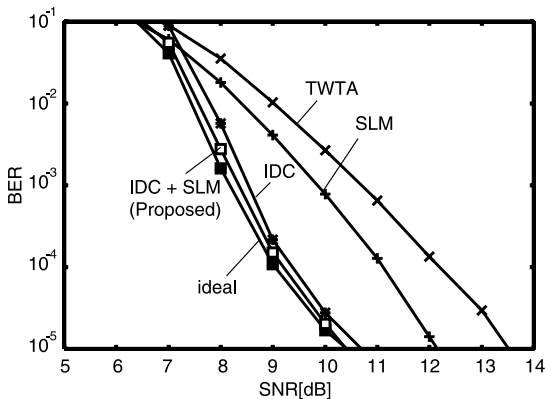


図7 選択マッピング (SLM), 反復ひずみ補償法 (IDC) による BER 特性の改善
Fig.7 Improvement of BER characteristic by selected mapping and iterative distortion compensation.

るので、提案方式 (SLM+IDC) では更に理想 (線形増幅し、誤り訂正を行ったとき) に近い特性まで BER 特性を改善できる。

4. むすび

本論文では OFDM を用いた入力バックオフの低い衛星回線において送信機で SLM を行い、受信機で反復ひずみ補償法を行った。

提案方式では反復ひずみ補償法では改善できない帯域外ふく射を送信機における SLM により抑制し、SLM のみでは改善が十分でない BER 特性を反復ひずみ補償法により改善した。更に提案方式は反復ひず

み補償法単体と比べ BER 特性をより理想 (線形増幅し、誤り訂正を行ったとき) に近い特性まで改善することができた。したがって提案方式は OFDM を用いた入力バックオフの低い衛星回線において有効であると考えられる。

ただし、提案方式では SLM, 反復ひずみ補償法による IFFT, FFT の回数が多く計算量が大きいと考えられ、またサイド情報に通信路誤りが生じると BER 特性が劣化する。そこで今後の課題として SLM の計算量を削減するアルゴリズムの検討 [8], [9], サイド情報の誤り訂正符号の検討が考えられる。

文 献

- [1] H. Chen and M. Alexander, "Iterative estimation and cancellation of clipping noise for OFDM signals," *IEEE Commun. Lett.*, vol.7, no.7, pp.305-307, April 2005.
- [2] S. Hee and J.H. Lee, "An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission," *IEEE Wireless Commun.*, vol.12, no.2, pp.56-65, July 2003.
- [3] H.-G. Ryu and T.P. Hoa, "Improvement of power efficiency of HPA by the PAPR reduction and predistortion," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol.50, no.1, pp.119-124, Feb. 2004.
- [4] N. Ohkubo and T. Ohtsuki, "Design criteria for phase sequence in selected mapping," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E86-B, no.9, pp.2628-2636, Sept. 2003.
- [5] D.-W. Lim and S.-J. Heo, "On the phase sequence set of SLM OFDM scheme for a crest factor reduction," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol.54, no.5, pp.1931-1935, May 2006.
- [6] P. Boonsrimuang and K. Mori, "Mitigation of satellite non-linear distortion using PTS and IDAR methods for QAM-OFDM system," *IEICE Technical Report, SAT2005-3*, May 2005.
- [7] 山岡智也, 山里敬也, 岡田 啓, 片山正昭, "非線形増幅ひずみの存在する衛星回線における符号化 8 PSK/OFDM 伝送の非線形増幅ひずみ補償法," *信学論 (B)*, vol.J90-B, no.2, pp.138-147, Feb. 2007.
- [8] D.-W. Lim and J.-S. No, "A new SLM OFDM scheme with low complexity for PAPR reduction," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol.12, no.2, pp.93-96, Feb. 2005.
- [9] S.-J. Heo and H.-S. Noh, "A modified SLM scheme with low complexity for PAPR reduction of OFDM systems," *IEEE Trans. Broadcast.*, vol.53, no.4, pp.804-808, Dec. 2007.

(平成 20 年 4 月 8 日受付, 7 月 17 日再受付)