

OFDM 시스템의 PAPR 감소를 위한 Bitwise 선택사상기법

김규홍, 노형석, 허석중, 노종선*, 신동준**

*서울대학교 전기·컴퓨터 공학부

adageneral@ccl.snu.ac.kr, imeanu@ccl.snu.ac.kr, hsjbest@ccl.snu.ac.kr, jsno@snu.ac.kr

**한양대학교 전자·통신·컴퓨터 공학부

djshin@hanyang.ac.kr

Bitwise SLM Scheme for Peak to Average Power Ratio Reduction in OFDM Systems

Kyu-Hong Kim, Hyung-Suk Noh, Seok-Joong Heo, Jong-Seon No*, Dong-Joon Shin**

*Department of EECS, Seoul National University

**Division of ECE, Hanyang University

요약

본 논문에서는 직교 주파수 분할 다중화 (orthogonal frequency division multiplexing; OFDM) 시스템에서 최대전력 대 평균전력의 비 (peak to average power ratio; PAPR)를 줄일 수 있는 새로운 선택사상기법(selected mapping; SLM) 방법을 제안한다. 기존의 SLM 방법이 심볼의 위상을 회전시켜 전송 후보 시퀀스를 발생시키는 반면 제안된 방법은 비트에 특정 시퀀스를 곱해 주어 전송 후보 시퀀스를 발생시킨다. 제안된 방법의 PAPR 감소 성능은 기존의 SLM에 비해 향상되었고, 모의실험 결과로부터 적은 수의 부 반송파를 사용하는 시스템에서 더 좋은 성능을 보이는 것을 확인하였다.

1. 서론

직교 주파수 분할 다중화 (orthogonal frequency division multiplexing; OFDM) 방식은 높은 데이터 전송률과 다채널 상에서의 강건성 때문에 고속 데이터 전송에 적합한 기술로 여겨지고 이에 따라 이 전송기술은 여러 분야에서 응용되고 있다. [1] OFDM은 디지털 오디오 방송 (DAB) [2], 디지털 비디오 방송 (DVB) [3], IEEE 802.11 무선 근거리 통신망 등과 같은 다양한 무선 통신 시스템에서 표준으로 사용되고 있다 [4]. OFDM 시스템의 가장 큰 단점은 전송 신호가 매우 큰 최대전력 대 평균전력의 비 (peak to average power ratio; PAPR)를 갖는 것인데, 이는 시스템에서 사용되는 부 반송파의 수에 비례한다. 이런 큰 PAPR 때문에 고전력 증폭기 (high power amplifier; HPA)에서 대역 내 왜곡 또는 대역 외 방사 등의 신호왜곡이 발생하게 되어 비트오류율 (bit error rate; BER)의 열화를 가져온다 [5], [6]. 이러한 이유로 OFDM 신호의 PAPR을 줄여 HPA에서의 전송신호 왜곡을 줄이는 것은 중요한 연구 관심사가 되어왔다.

OFDM 신호의 PAPR을 감소시키기 위한 여러 가지 방법들이 제안되어 왔다. 그 중의 하나가 클리핑 방법인데, 이는 미리 정해놓은 최대치를 기준으로 최대치보다 큰 OFDM 신호를 잘라내는 방법이다. 클리핑 방법은 비선형 적이기 때문에, 신호의 왜곡을 발생시킨다 [7]–[10].

이렇듯 PAPR을 주어진 최대치 이하로 제한하는 방법을 결정적 방법이라 분류하고, 이의 다른 예로 톤 예약방법 (tone reservation; TR)을 들 수 있다. 이러한 결정적 방법과는 다른 접근 방법으로 확률적 방법이 있다. 확률적 방법은 통계적으로 OFDM 신호가 갖는 PAPR의 분포 특성을 개선하는 방법으로 선택사상기법 (selected mapping; SLM) [11]–[13]과 부분 전송 수열 (partial transmit sequence; PTS) [14]–[16]과 같은 방법을 들 수 있다. 이러한 기법들은 여러 개의 동일한 정보를 갖는 여러 개의 신호들을 생성하여 가장 작은 PAPR을 갖는 신호를 선택하여 전송하는 방법으로 SLM은 전송하고자 하는 몇 개의 후보군, 즉 원 신호에 위상 시퀀스를 곱하고 역 푸리에변환 (inverse fast fourier transform; IFFT)을 해 준 신호 중 가장 작은 PAPR을 갖는 신호를 전송하는 방법이고, PTS는 위상 시퀀스와 신호벡터를 그룹별로 곱하여 위상을 회전시키는 방법으로 후보군을 생성시키는 방법이다. 확률적 방법은 결정적 방법에 비해 신호의 왜곡이 없는 장점을 가진다. 본 논문에서는 기존 SLM 방법의 전송 후보군 생성 방법과는 다른, 원 신호의 비트단에 위상 시퀀스로 m -시퀀스를 곱하여 전송 후보군들을 생성하는 bitwise SLM을 제안한다. m -시퀀스의 특성상 생성한 m -시퀀스를 원순환 시키면 상관관계가 매우 적은 새로운 신호가 생성되므로 [17] 이 시퀀스들을 위상 시퀀스로 이용해서 전송 후보군들을 생성한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 OFDM 시스템과

기존의 SLM 시스템 모델에 대해서 설명한다. 3장에서는 bitwise SLM 방법을 설명하였고, 4장에서는 기존 SLM을 방법과 제안된 방법을 사용한 경우의 모의실험 결과가 비교되었다. 마지막으로 5장에서는 논문의 결론을 맺었다.

2. OFDM 시스템 및 SLM 시스템 모델

$N=2^n$ 의 부반송파를 갖는 OFDM 신호의 주파수 영역에서 k 번째 부반송파에 실린 복소 데이터를 A_k 라고 정의할 때 입력 심볼 시퀀스는 $\mathbf{A}=[A_0A_1 \cdots A_{N-1}]$ 과 같이 표현된다. OFDM 신호는 $1/T$ 의 주파수 만큼 간격을 갖는 N 개의 변조된 부반송파를 더하여 전송된다. t 가 연속된 시간을 나타낼 때 시간 영역에서의 OFDM 신호는 수식 (1)과 같이 표현된다.

$$a_t = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{j2\pi \frac{n}{NT}t}, \quad 0 \leq t < T \quad (1)$$

Nyquist rate로 샘플링된 OFDM 신호는 벡터 형태로 나타나게 되며 신호 시퀀스 $\mathbf{a}=[a_0a_1 \cdots a_{N-1}]$ 로 표현된다. \mathbf{A} 의 IFFT된 신호인 \mathbf{a} 는 다음과 같이 표현된다.

$$a_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{j2\pi \frac{nk}{NT}}, \quad k=0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

OFDM 신호 시퀀스 \mathbf{a} 의 PAPR은 최대 전력 대 평균 전력의 비율로 정의된다. OFDM 신호 시퀀스의 PAPR은 다음과 같이 표현된다.

$$\text{PAPR}(\mathbf{a}) \triangleq \frac{\max_{0 \leq k \leq N-1} |a_k|^2}{E[|a_k|^2]} \quad (3)$$

보통 OFDM 신호는 디지털 회로에 의해 처리되므로, PAPR을 이산 신호로 표현해야 한다. 만약 연속신호로 PAPR을 계산한다면 신호의 최대치 중 몇 개를 놓칠 수 있고, 이는 실제 PAPR보다 더 나은 결과를 초래할 수 있다. 따라서 실제 PAPR에 근접시키기 위해 계수 L 로 과표본한 신호를 사용해야 한다. 논문 [7]에서 실제 PAPR에 근접하는 과표본 계수가 4임을 확인할 수 있다.

SLM은 OFDM 시스템에서 PAPR을 줄이기 위해 잘 알려진 PAPR 방법의 하나로 신호의 왜곡이 없는 장점을 가진다. SLM은 입력 심볼 시퀀스 \mathbf{A} 와 U 개의 위상 시퀀스 $\mathbf{P}=[P_{u,0}P_{u,1} \cdots P_{u,N-1}]$, $1 \leq u \leq U$ 를 동일한 위치의 캐리어에 곱하여 U 개의 서로 다른 입력 심볼 시퀀스 \mathbf{A}_u 를 생성한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_u &= [A_{u,0}A_{u,1} \cdots A_{u,N-1}] \\ &= \mathbf{A} \otimes \mathbf{P}_u \\ &= [A_0P_{u,0} A_1P_{u,1} \cdots A_{N-1}P_{u,N-1}] \end{aligned} \quad (4)$$

수식 (4)에서 \otimes 는 각 벡터의 동일한 위치에 있는 요소들의 곱을 의미한다. 위상 시퀀스 \mathbf{P}_u 는 $\phi_{u,n}$ 이 0과 2π 사이의 값을 갖고 ($\phi_{u,n} \in [0, 2\pi)$), u 가 $1 \leq u \leq U$ 에 존재할 때 단위 크기를 갖는 복

소수 $P_{u,n} = e^{j\phi_{u,n}}$, $0 \leq n \leq N-1$ 을 원소로 갖는 벡터다. 일반적으로 $P_{u,n}$ 은 $\{\pm 1\}$, $\{\pm 1, \pm j\}$ 의 집합의 원소를 갖는다.

확률적으로 독립이고 동일한 정보를 갖고 있는 U 개의 서로 다른 입력 심볼 시퀀스 $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_U$ 에 대하여 각각 IFFT를 취하여 OFDM 신호 시퀀스를 생성한다.

$$\mathbf{a}_u = \text{IFFT}(\mathbf{A}_u) = \text{IFFT}(\mathbf{A} \otimes \mathbf{P}_u) \quad (5)$$

U 개의 동일한 정보를 갖고 있는 신호 중 PAPR이 가장 작은 OFDM 신호 시퀀스 \mathbf{a}_u 를 생성시켜 전송한다. U 가 증가할수록 OFDM 신호 시퀀스의 PAPR 감소량은 증가하게 되지만 U 번의 IFFT가 필요하기 때문에 계산 복잡도가 선형적으로 증가하게 된다.

3. Bitwise SLM 기법

본 논문에서 제안하는 bitwise SLM 방법은 신호의 비트 표현에 특정 시퀀스를 곱하여 발생시킨 U 개의 독립적인 수열 중 가장 작은 PAPR을 가지는 신호를 선택해서 전송하는 방법으로 그림 1과 같다. 원 신호에 곱하는 시퀀스는 최적의 자기상관 특성을 가지고, 기존의 SLM 방법에서 좋은 성능을 보이는 m -시퀀스를 사용한다 [17].

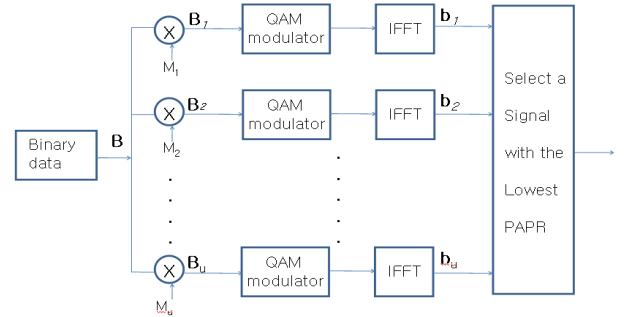


그림 1. Bitwise SLM의 블록도

곱하는 위상 시퀀스인 m -시퀀스의 길이는 원 신호의 비트 표현의 길이와 동일한 것으로 선택한다. 즉 M-QAM 신호에 곱하는 m -시퀀스의 길이는 $N(\log_2 M)$ 이다. 예를 들어 변조 방법이 16-QAM 이고, $N=64$ 인 OFDM 시스템일 경우 위상시퀀스의 길이가 256인 m -시퀀스를 사용한다. 이는 길이가 원 신호에 비해서 짧은 m -시퀀스를 연결 후 계산하여 생성된 신호가 신호와 길이가 같은 m -시퀀스를 이용해서 계산하여 생성된 신호에 비해 신호간의 상관관계가 커져 성능이 저하되기 때문이다.

Bitwise SLM은 입력 심볼 시퀀스 \mathbf{B} 와 m -시퀀스를 U 번 cyclic 이동시킨 U 개의 시퀀스 $\mathbf{M}_u=[M_{u,0}M_{u,1} \cdots M_{u,N(\log_2 M)}]$, $1 \leq u \leq U$ 를 비트의 동일한 위치에 곱하여 U 개의 서로 다른 입력 심볼 시퀀스 \mathbf{B}_u 를 생성한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_u &= [B_{u,0}B_{u,1} \cdots B_{u,N(\log_2 M)}] \\ &= \mathbf{B} \otimes \mathbf{M}_u \\ &= [B_0M_{u,0} B_1M_{u,1} \cdots B_{N(\log_2 M)}M_{u,N(\log_2 M)}] \end{aligned} \quad (6)$$

수식 (6)에서 \otimes 는 각 비트의 동일한 위치에 있는 요소들의 곱을 의미하고, 이 때 \mathbf{M}_u 는 순열의 값이 $\{\pm 1\}$, u 가 $1 \leq u \leq U$ 인 시퀀스 벡터이다.

단순한 이진 계산을 거쳐 생성된 확률적으로 독립이고 동일한 정보를 갖고 있는 U 개의 서로 다른 입력 심볼 시퀀스 $\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \dots, \mathbf{B}_U$ 에 대하여 각각 IFFT를 취하여 OFDM 신호 시퀀스를 생성한다.

$$\mathbf{b}_u = \text{IFFT}(\mathbf{B}_u) = \text{IFFT}(\mathbf{B} \otimes \mathbf{M}_u) \quad (7)$$

U 개의 동일한 정보를 갖고 있는 신호 중 PAPR이 가장 작은 OFDM 신호 시퀀스 \mathbf{B}_u 를 생성시켜 전송한다.

본 논문에서 새로 제안한 방법의 계산량은 기존의 SLM의 계산량과 동일하다. 하지만, OFDM 신호 시퀀스를 생성할 때, 기존의 SLM 방법이 위상 회전을 통해서 새로운 신호 시퀀스들을 생성하는 것에 비해 본 논문에서 제안한 bitwise SLM 방법은 M-QAM 신호의 비트 표현 자체를 변경시켜 신호 시퀀스를 생성하기 때문에, 신호의 위상 회전 효과 뿐만 아니라 성상도 상에서 신호 재배열을 통한 신호의 크기 변화 효과도 더해지게 된다. 이러한 효과로 인해 생성된 신호들 간의 상관관계가 더욱 작아지고 그 결과로 PAPR이 더 작은 신호가 생성될 확률이 높아질 것으로 기대된다.

기존의 SLM과 같이 본 논문에서 제안한 방법은 사용된 신호의 정보를 알려주기 위해 전송하는 부가 정보를 이용해서 수신측에서 복원된다.

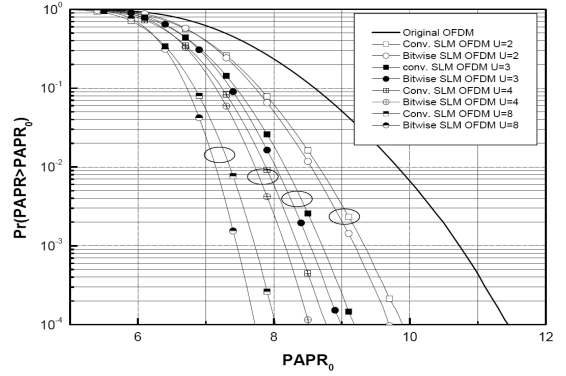
4. 모의실험 결과

기존의 SLM방법과 본 논문에서 제안한 bitwise SLM방법의 PAPR 감소 성능을 모의실험을 통하여 비교해 보았다. 모의실험에 사용된 OFDM 시스템의 부반송파 갯수 $N=64, 128$, 변조방법은 16-QAM, 64-QAM이며 과표본 계수는 4를 적용하였다. $U=2, 3, 4, 8$ 를 이용한 기존 SLM 방법과, 동일한 수의 U 를 적용한 bitwise SLM의 PAPR의 상보 누적 분포 함수 (complementary cumulative distribution function; CCDF)가 모의실험을 통해 표현되었다. SLM 방법에 사용한 위상 시퀀스로는 원 신호와 길이가 같은 m -시퀀스를 사용하였고, bitwise SLM 방법에 사용한 시퀀스로는 신호의 비트 표현시와 같은 길이의 m -시퀀스를 사용하였다. 10^6 개의 입력 심볼 시퀀스를 생성하였을 때의 모의실험 결과가 그림 2, 3에 보여진다. 그림 2는 부반송파 개수가 $N=64$ 일 때, 그림 3은 $N=128$ 일 때의 시뮬레이션 결과를 보여준다.

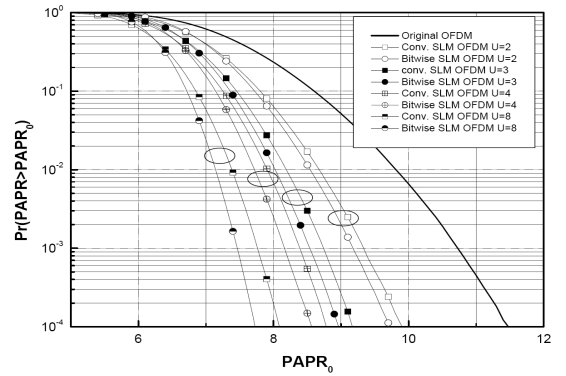
표 1. $\Pr(\text{PAPR} > \text{PAPR}_0) = 10^{-4}$ 에서의 SLM과 bit-wise SLM의 성능차이(단위 : dB)

변조방법		U			
		2	3	4	8
16-QAM	$N=64$	0.15	0.2	0.25	0.3
	$N=128$	0.05	0.1	0.15	0.2
64-QAM	$N=64$	0.15	0.2	0.25	0.35
	$N=128$	0.1	0.1	0.15	0.25

표 1은 $\Pr(\text{PAPR} > \text{PAPR}_0) = 10^{-4}$ 에서 변조방법, N 과 U 에 따른 기존의 SLM 방법과 제안된 bitwise SLM 방법의 성능차이를 나타낸다.

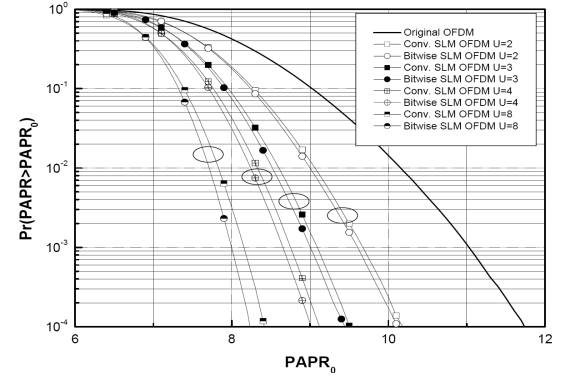


(a) 16-QAM

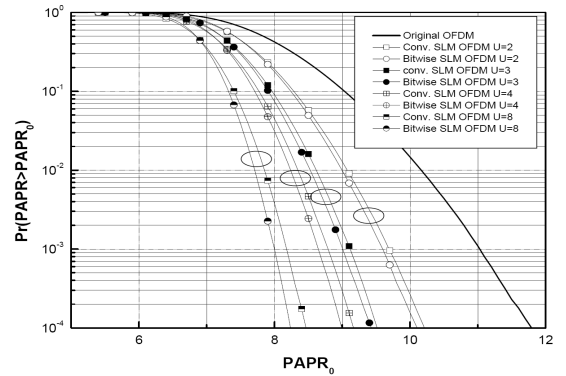


(b) 64-QAM

그림 2. $N=64$ 일 때의 CCDF.



(a) 16-QAM



(b) 64-QAM

그림 3. $N=128$ 일 때의 CCDF.

모의실험 결과 16-QAM, 64-QAM, $U=2, 3, 4, 8$ 인 경우 모두 bitwise SLM이 기존의 SLM에 비해 더 나은 성능을 보였다. 특히 부반송파의 개수가 적을 때, 변조 order, 그리고 U 가 클 때 더 우수한 성능을 보이는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 OFDM 시스템에서 PAPR을 줄이기 위한 bitwise SLM 방법에 대해서 제안하였다. 이는 M-QAM 신호의 비트 표현에 m -시퀀스를 곱하여 발생시킨 U 개의 독립적인 수열 중 가장 작은 PAPR을 갖는 신호를 선택해서 전송하는 방법이다. 컴퓨터 모의실험은 기존의 SLM방법에 비해 제안된 방법이 PAPR 감소 측면에서 더 우수한 성능을 보여준다. 제안된 방법은 부반송파의 개수가 적고, 변조 order가 큰 OFDM 시스템에 더 효율적으로 적용 될 수 있다. 또한 더 많은 랜덤 벡터 발생 및 IFFT 블록을 사용하면 더 큰 PAPR 감소 효과를 얻을 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] R. van Nee and R. Prasad. OFDM for Wireless Multimedia mmunications. Boston, MA:Artech House, 2000.
- [2] "Radio broadcasting system: Digital audio broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers," ETSI, ETS 300 401, 1.3.2 ed.,2000.
- [3] "Digital video broadcasting(DVB):Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television," ETSI, EN 300 744, 1.3.1 ed., 2000.
- [4] IEEE Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-Speed Physical Layer in the 5Ghz Band, IEEE Std. 802. 11a-1999, Sep. 1999.
- [5] R. O'neal and L. N. Lopes, "Envelope variation and spectral splatter in clipped multicarrier signals," in Proc. 1995 IEEE Int. Symp. Personal, Indoor and Mobile Radio Commun. (PIMRC '95), Sep. 1995, pp 71-75.
- [6] J. Tellado, Multicarrier Modulation with Low PAR:Applications to DSL and Wireless. Norwell, MA:Kluwer, 2000.
- [7] D. Wulich and L. Goldfeld, "Reduction of peak factor in orthogonal multicarrier modulation by amplitude limiting and coding," IEEE Trans. Commun, vol. 47, no. 1. pp.18-21, Jan. 1999.
- [8] X. Li and L. J. Cimini Jr, "Effects of clipping and filtering on the performance of OFDM," IEEE Commun. Lett., vol. 2, no. 5, pp. 131-133, May 1998.
- [9] D. J. G. Mestdagh, P. Spruyt, and B. Biran, "Analysis of clipping effect in DMT-based ADSL system," in Proc. 1994 IEEE ICC '94, col. 1, May 1994, pp. 293-300.
- [10] R. Gross and D. Veeneman, "Clipping distortion in DMT ADSL systems," Electron. Lett., vol. 29, pp. 2080-2081, Nov. 1993.
- [11] M. Breiling, S. H Muller, and J. B Huber, "SLM peak-power reduction without explicit side information," IEEE Commun. Lett., vol 5, pp. 239-241, Jun 2001.
- [12] S. Muller, R. Bauml, R. Fischer, and J. Huber, "OFDM with reduced peak to-average power ratio by multiple signal representation," Ann. Telecommun., vol. 52, pp. 2056-2057. Oct. 1996.
- [13] C. L. Wang, M. Y. Hsu, and Y. Ouyang, "Low-complexity selected mapping schemes for peak-to-average power ratio reduction in OFDM systems," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 53, No.12, pp.4652-4660, Dec. 2005.
- [14] S. H. Muller and J. B. Huber, "A novel peak power reduction scheme for OFDM," in Proc. 1997 IEEE Int. Symp. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC '97), vol.3. Helsinki, Finland, Sep. 1997, pp. 1090-1094.
- [15] S. H. Muller and J. B. Huber, "OFDM with reduced peak-to-average power ratio by optimum combination of partial transmit sequences,"Electron. Lett., vol. 33, pp. 368-369, Feb. 1997.
- [16] S. G. Kang, J. G. Kim, and E. K. Joo, "A novel subblock partition scheme for partial transmit sequence OFDM," IEEE Trans. Commun., vol. 45, no. 9, pp. 333-338, Sep. 1999.
- [17] D. W. Lim, S. J. Heo, and J. S. No, "On the phase sequence set of SLM OFDM scheme for a crest factor reduction," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 54, no. 5, pp.1931-1935, May 2006.