

수정된 Sinc 보간법을 이용한 새로운 Rayleigh 페이딩 보상 알고리즘

정희원 이창재*, 황성현*, 최형진*

An Improved Rayleigh Fading Compensation Algorithm with Modified Sinc Interpolation

Chang Jae Lee*, Sung Hyun Hwang* and Hyung Jin Choi* *Regular Members*

요 약

Sinc 보간법을 이용한 PSAM은 Cavers의 최적 Wiener 필터를 사용한 알고리즘보다 구현은 간단하면서도 채널추정 성능은 거의 동일하다. 그러나 이 알고리즘은 window 함수와 같이 사용해야만 우수한 채널추정 성능을 갖는다. 본 논문에서는 이러한 기존의 sinc 보간법 (conventional sinc interpolation : CSI) 의 단점을 보완한 수정된 sinc 보간법 (modified sinc interpolation : MSI) 을 제안한다. MSI 알고리즘의 성능평가를 위해 다중반송파 QAM 시스템과 주파수 선택성 페이딩을 고려한 최적 프레임구조를 사용하였다. 성능평가에서 window 함수를 사용하지 않은 MSI 알고리즘은 더 적은 수의 파일럿 심볼을 사용하면서도, window 함수를 사용한 CSI 알고리즘과 거의 동일한 BER 성능을 보였다. 아울러, window 함수를 사용한 MSI 알고리즘의 성능은 PSAM을 적용한 이론적인 16QAM의 성능과 거의 일치하였다.

ABSTRACT

Pilot symbol aided modulation (PSAM) using the conventional sinc interpolation (CSI) achieves nearly the same BER performance as Cavers' optimal Wiener interpolation but with much less complexity. The CSI, however, has to use a non-rectangular window function that is applied to the sinc function to smooth out the abrupt truncation of rectangular window. In this paper, we propose the modified sinc interpolation (MSI). With the weighting factor, the MSI scheme with no window has almost the same BER performance as the CSI scheme using window. In addition, if we use the MSI with a window, its BER performance gets close to that of the theoretical one. We assume the multicarrier QAM system and an optimal frame structure for performance evaluation.

핵심 단어 : Pilot symbol aided modulation (PSAM), sinc interpolation, Rayleigh fading, quadrature amplitude modulation (QAM).

I. 서 론

증가하는 수요에 대한 시스템 채널용량 부족은 디지털통신에서 심각한 문제이고 이것을 해결하기 위해 주파수 효율이 우수한 QAM(Quadrature Amplitude Modulation) 기술이 연구되고 있다. 그

러나 QAM은 진폭과 위상을 동시에 사용하기 때문에 Rayleigh 페이딩에 매우 열악하여 정확한 채널 보상기술을 필요로 한다.

채널추정은 페이딩에 의한 신호왜곡을 보상하기 위한 효과적인 기술이다. 파일럿을 이용한 채널추정 및 보상방식에는 대표적으로 두 가지가 있다. 그것

* 성균관 대학교 전기전자 컴퓨터 공학부 통신시스템연구실
논문번호: 00141-0501, 접수일자: 2000년 5월 1일

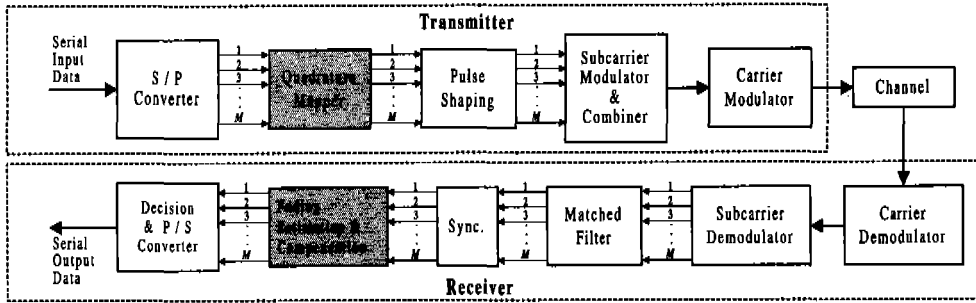


그림 1. 다중반송파 QAM의 시스템 블록도

은 파일럿 톤을 이용하는 방식과 파일럿 심볼을 이용하는 방식이다. 그러나 파일럿 톤 방식은 알고리즘의 복잡도를 포함한 몇 가지 단점이 있어, 이런 문제점들이 없는 파일럿 심볼을 사용한 채널 추정 기술이 활발히 연구되고 있다^[1].

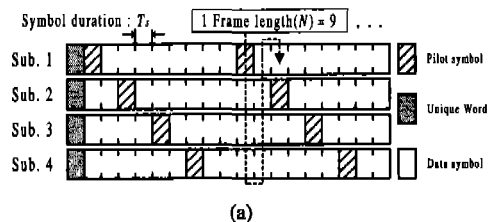
파일럿 심볼을 사용한 채널추정방식(PSAM)은 1989년 이후 많은 연구가 진행되어 왔다. Nyquist 보간법은 PSAM에서 채널추정을 위한 이상적인 알고리즘이다. 그러나 무한개의 파일럿 심볼을 사용하기 때문에 구현이 불가능하다^[2]. 유한개의 파일럿 심볼을 사용하면서 가장 우수한 채널추정 성능을 갖는 PSAM 알고리즘은 최적의 Wiener 필터를 사용하여 추정에러의 크기를 줄이는 것이다^[3]. 그러나 이 알고리즘은 연산과정이 복잡한 비실용적인 알고리즘이다. Sinc 보간법 (conventional sinc interpolation : CSI) 은 Wiener 필터를 사용한 방식과 거의 유사한 성능을 갖음에도 구조는 훨씬 간단한 채널추정 알고리즘이다^[4]. 그러나 이 알고리즘은 window 함수와 같이 사용해야 우수한 채널추정 성능을 갖는다. 왜냐하면, 추정영역 밖에서 갑자기 0 값을 갖는 CSI의 불연속지점에 대해 window 함수가 연속성을 부여하기 때문이다^{[4],[5]}. 2차 Gaussian 보간법은 간단한 하드웨어 구조와 더불어 낮은 Doppler 주파수에서 비교적 좋은 추정성능을 갖는다^[1]. 그러나 이 알고리즘의 채널추정성능은 프레임의 길이가 커지면서 급격히 저하된다^[4]. FFT와 IFFT를 사용한 PSAM 알고리즘은 CSI와 같이 채널추정성능이 우수하다. 그러나 이 보간법은 사용하는 파일럿 심볼 수의 증가에 따라 FFT, IFFT 구현의 부담이 증가한다^[6]. 전체적인 PSAM의 동작기법은 여러 논문들에 [1]-[4] 자세히 설명되어 있으므로 본 논문은 바로 채널추정 알고리즘에 대해 언급한다.

다중반송파 QAM 시스템과 주파수 선택성 페이딩을 고려한 최적 프레임구조를 사용하여 제안하는 MSI알고리즘의 성능을 평가하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2절은 다중반송파 QAM 시스템을 설명하고, 3절은 새로운 채널추정 알고리즘을 제안한다. 4절에서는 제안하는 수정된 sinc 보간법 (modified sinc interpolation : MSI) 의 성능을 다중반송파 QAM 시스템과 최적의 프레임구조를 사용하여 분석하였다.

II. 시스템 모델

다중반송파 QAM 시스템과 그것의 프레임 구조를 그림 1과 2에 각각 나타내었다. 그림 1에서 M 은 사용하는 다중반송파의 숫자이고, 그림 2에서 T_s 는 심볼주기이고, N 은 프레임의 길이이다. 송신기의 quadrature mapper에서 파일럿 심볼은 데이터 심볼 사이에 규칙적으로 삽입된다. 수신기의 페이딩 추정 및 보상단계에서는 파일럿 심볼의 페이딩 성분 추출되고, 이것을 이용하여 데이터 심볼의 페이딩 성분을 추정하고 보상한다. 일반적으로 파일럿 심볼은 한 프레임의 맨 앞에 삽입되며, 그 값으로는 SNR이 가장 우수한 성좌도내의 최외각 심볼을 사용한다. 다중반송파 QAM 시스템에 대한 보다 자세한 구조는 참고문헌 [7]을 이용할 수 있다.



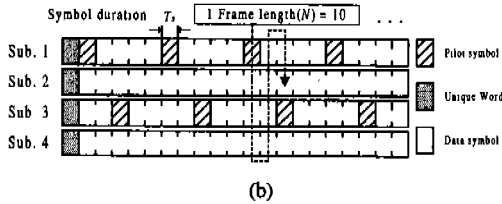


그림 2. 다중반송파 QAM의 프레임구조, M=4.
(a) N=9. (b) N=10.

수신기의 정합필터를 통과하고, 심볼주기 T_s 에 정확하게 동기된, 기저대역 복소 이산신호는 다음과 같다.

$$r_k = c_k z_k + n_k, \tag{1}$$

식에서 z_k 는 송신된 기저대역의 QAM 혹은 파일럿 심볼이고, c_k 는 페이딩 왜곡성분, 그리고 n_k 는 등가 저역통과 AWGN 성분이다. 수신기의 페이딩 추정 및 보상단계에서, 파일럿 심볼을 A 라고 할 때, i 번째 프레임의 파일럿 심볼에 포함된 페이딩 왜곡 성분은 수신신호를 파일럿 심볼 A 로 나누면 추출할 수 있다.

$$\hat{c}_i = r_i / A = c_i + n_i / A, \tag{2}$$

III. 제안하는 채널추정 알고리즘

진폭과 위상에러가 존재하지 않는 주파수 비선택성 Rayleigh 페이딩 채널, 즉 AWGN 채널을 가정하면, 수신된 데이터와 파일럿 심볼의 페이딩성분을 직선 $c_k = 1$ 로 표현할 수 있다. 이러한 페이딩 성분은 Nyquist 혹은 2차 Gaussian 보간법을 사용하면 정확하게 추정할 수 있는데, 각 보간 다항식들은 참고문헌 [3]에 제시되어 있다. 그러나 기존의 sinc 보간법 (conventional sinc interpolation : CSI) 을 사용하면 직선과 같은 페이딩성분을 정확하게 추정하지 못한다. 그것은 보간법이 유한개의 파일럿 심볼을 사용하기 때문이다. 따라서, CSI는 AWGN 채널에서 BER 성능을 저하시킨다. 이 문제는 sinc 보간법이 무한개의 파일럿 심볼을 사용하면 해결되지만, 이것은 Nyquist 보간법과 같기 때문에 구현이 불가능하다.

제안하는 수정된 sinc 보간법 (modified sinc interpolation : MSI) 은 CSI의 단점을 보완한 알고리즘으로, AWGN 채널의 페이딩 성분인 직선을 정확하게 추정한다. MSI는 따로 계산된 weighting factor를 CSI에 곱한 형태로서, 만약 채널추정을 위

해 L 개의 가장 인접한 파일럿 심볼을 사용한다면, n 번째 프레임에 있는 l 번째 데이터 심볼의 페이딩 성분은 다음과 같다.

$$\hat{c}_n^l = \sum_{k=-\lfloor(L-1)/2\rfloor}^{\lfloor L/2\rfloor} \left\{ \text{sinc}\left(\frac{l}{N} - k\right) \cdot \hat{c}_{n+k} \cdot (\text{Weighting factor}) \right\} = 1 \tag{3}$$

식에서 $l=1, \dots, N-1$ 은 한 프레임내의 추정하는 데이터심볼의 시간성분이고, $\text{sinc}(l/N - k)$ 는 보간계수이다. 여기서 보간계수 $\text{sinc}(l/N - k)$ 는 시간축에 대칭이기 때문에, 수신기가 L 개의 파일럿 심볼을 사용하여 채널을 추정한다면, 최대 $L/2$ 개의 weighting factor를 사용하는 것이 가능하다. 그리고 L 이 홀수라면 최대 $(L+1)/2$ 의 weighting factor를 사용하는 것이 가능하다. 그러나 본 논문에서는 W_1, W_2 즉, 두개의 weighting factor만을 사용한다. 왜냐하면 W_1, W_2 는 현재 추정하고 있는 프레임에 포함된 직선의 면적을 이용하면 간단히 구할 수 있기 때문이다. (3)에서 W_1 은 $-\lfloor(L-1)/2\rfloor + 1 \leq k \leq \lfloor L/2\rfloor - 1$ 의 구간에 적용되고, W_2 는 $k = -\lfloor(L-1)/2\rfloor$ 와 $\lfloor L/2\rfloor$ 에 적용된다.

Weighting factor를 구하기 위한 면적 S 는 페이딩 성분 c_n^{-1} 과 프레임길이 N 을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \int_0^N \hat{c}_n^l dl = 1 \cdot \left[\sum_{k=-\lfloor(L-1)/2\rfloor}^{\lfloor L/2\rfloor} \int_0^N \text{sinc}\left(\frac{l}{N} - k\right) dl \right] \cdot W_1 + \left[\int_0^N \text{sinc}\left(\frac{l}{N} + \frac{L}{2} - 1\right) dl + \int_0^N \text{sinc}\left(\frac{l}{N} - \frac{L}{2}\right) dl \right] \cdot W_2 = 1 \cdot \left[\int_{-\lfloor(L-1)/2\rfloor}^{\lfloor L/2\rfloor} \text{sinc}\left(\frac{l}{N}\right) dl \right] \cdot W_1 + \left[\int_{-\lfloor(L-1)/2\rfloor}^{\lfloor L/2\rfloor} \text{sinc}\left(\frac{l}{N}\right) dl + \int_{(L/2-1)N}^{LN/2} \text{sinc}\left(\frac{l}{N}\right) dl \right] \cdot W_2 = 2 \cdot \left[\int_0^{(L/2-1)N} \text{sinc}\left(\frac{l}{N}\right) dl \right] \cdot W_1 + \left[\int_{(L/2-1)N}^{LN/2} \text{sinc}\left(\frac{l}{N}\right) dl \right] \cdot W_2 \tag{4}$$

직관적으로, 면적 S 는 $1 \times N = N$ 과 같다. 따라서

$$N = 2 \cdot \left[\int_0^{(L/2-1)N} \text{sinc}\left(\frac{l}{N}\right) dl \right] \cdot W_1 + \left[\int_{(L/2-1)N}^{LN/2} \text{sinc}\left(\frac{l}{N}\right) dl \right] \cdot W_2 \tag{5}$$

데이터 심볼의 채널추정 과정에서, 파일럿 심볼의 페이딩성분을 정확하게 반영하기 위해 $W_1 = 1$ 을 선택한다. 따라서 W_2 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$W_2 = \left\{ \frac{N}{2} - \int_0^{(L/2-1)N} \text{sinc}\left(\frac{l}{N}\right) dl \right\} / \int_{(L/2-1)N}^{LN/2} \text{sinc}\left(\frac{l}{N}\right) dl \text{ for } k = -\lfloor(L-1)/2\rfloor, k = \lfloor L/2\rfloor \tag{6}$$

W_1 값은 채널추정을 위해 사용하는 파일럿 심볼의 수 L 과 프레임 길이 N 에 상관없이 항상 1과 같기 때문에, 실제로는 단지 W_2 만 계산하면 된다. 그림 3에 제안하는 MSI와 CSI, 그리고 weighting factor를 나타내었다.

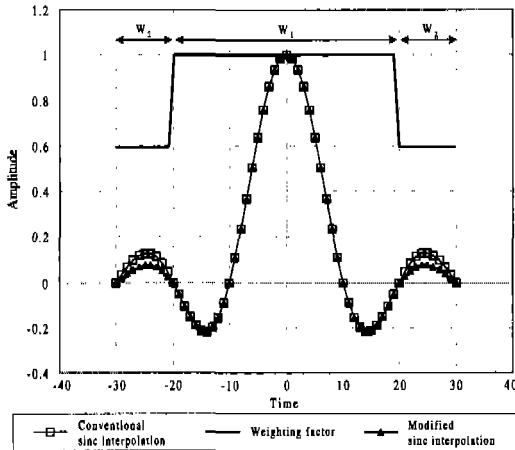


그림 3. 수정된 sinc 보간함수 : MSI, $L=6$, $N=10$.

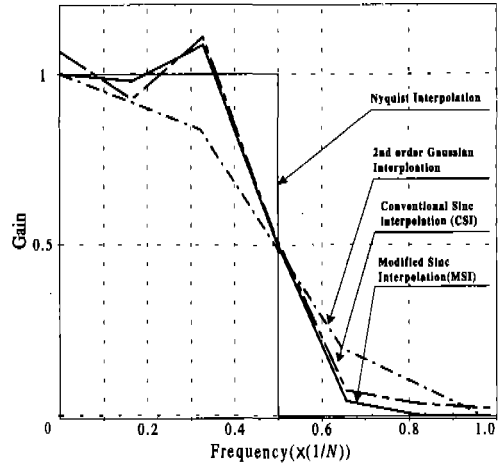
IV. 채널추정 알고리즘의 성능평가

여러 PSAM 채널추정 방식들에 대한 Monte Carlo 모의 성능평가를 주파수 비선택성 Rayleigh 페이딩 채널에서 수행하였다. 4개의 부반송파를 사용하는 16QAM (4-16QAM) 변조방식과 Gray 코딩된 직각 QAM 성좌도를 사용하였다. 이러한 시스템은 기본적으로 단일반송파 시스템에 비해 주파수 선택성 페이딩에 강한 특성을 갖는다^[7]. 송수신기는 50%의 초과대역폭을 갖는 square-root-raised-cosine 필터를 각각 사용하였고, 수신기에 대한 심볼 및 프레임 동기는 완벽하다고 가정하였다.

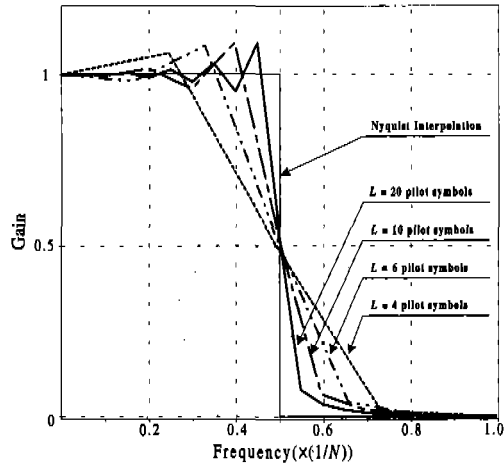
1. 채널추정 알고리즘들의 주파수특성

그림 4(a), (b)에 채널추정 알고리즘들에 대한 주파수 응답 특성을 나타내었다. 그림 4(a)의 $f \leq 0.5/N$ 의 범위에서 Nyquist 보간법을 제외하면, 제안하는 수정된 sinc 보간법(modified sinc interpolation : MSI)의 주파수 특성이 가장 우수하다. 그림 4(b)는 L 이 증가함에 따라 MSI의 주파수 응답이 이상적인 Nyquist 보간법의 특징에 가까워지는 것을 보여준다.

2. Rayleigh 페이딩 환경에서의 BER 성능평가



(a)



(b)

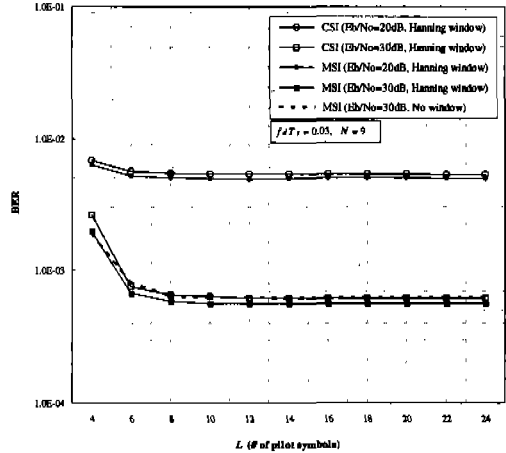
그림 4. 주파수 응답 특성. (a) $L=6$, $N=10$. (b) MSI, $N=10$.

PSAM을 다중반송파 시스템에 사용하게 되면, 각 부반송파마다 다른 시점에 위치한 파일럿 심볼들을 이용하여, 단일반송파에 비해 페이딩성분을 빠르게 추출할 수 있다^[7]. 주파수 선택성 페이딩을 고려하여, 4개의 부반송파에 동일한 수의 파일럿 심볼을 배치한다. 그림 2(b)와 같이 프레임길이 $N=10$ 이면 부채널 1과 3에 파일럿 심볼이 집중되어 주파수 선택성 페이딩에 취약해질 수 있다. 만약 프레임길이 $N=8$ 이면 부채널 1에 모든 파일럿 심볼이 집중되어 주파수 선택성 페이딩에 더욱 취약해질 수 있다. 따라서 4개의 부채널에 동일하게 파일럿 심볼을 삽입되는 것이 가장 이상적이다. 이것은 프레임길이 N 이 9의 배수일 경우에만 가능한데, 여기서 $N=9$ 일 때 가장

우수한 채널추정 성능을 기대할 수 있다. 왜냐하면 sinc 보간법의 채널추정 성능은 프레임길이 $N > 16$ 의 범위에서 열화되기 때문이다^[4]. 그림 2(a)에 프레임길이 $N = 9$ 인 다중반송파 QAM 프레임 구조를 나타내었고, 이 구조를 모든 성능평가에 적용하였다.

그림 5(a)와 (b)에 채널추정 알고리즘에 대한 window 함수의 효과를 나타내었다. 성능평가를 위해 정규화 된 Doppler 주파수 $f_d T_s = 0.03$ 과 Hanning window 함수를 사용하였다. f_d 와 T_s 는 각각 Doppler 주파수와 심볼의 주기이다. $L = 10$ 과 $E_b/N_0 = 30$ dB의 조건에서, window 함수를 사용하지 않은 기존의 sinc 보간법 (conventional sinc interpolation : CSI) 1.07×10^{-3} 은 의 BER 성능을 갖고, window 함수를 사용한 CSI는 6.34×10^{-4} 의 BER 성능을 갖는다. 그리고, window 함수를 사용하지 않은 수정된 sinc 보간법 (modified sinc interpolation : MSI)은 6.28×10^{-4} 의 BER 성능을 갖고, window 함수를 사용한 MSI는 5.64×10^{-4} 의 BER 성능을 갖는다. $E_b/N_0 = 30$ dB의 조건에서, 전체적으로 window 함수를 사용하지 않은 MSI와 window 함수를 사용한 CSI가 거의 동일한 BER 성능을 갖고 있음을 확인할 수 있다. 또 다른 예로서 $L = 7$ 의 조건에서 window 함수를 사용한 MSI의 성능은, $L = 10$ 의 조건에서 window 함수를 사용하지 않은 MSI, 그리고 $L = 12$ 의 조건에서 window 함수를 사용한 CSI의 성능과 거의 동일함을 확인할 수 있다.

그림 6(a), (b)에는 각각 Doppler 주파수와 E_b/N_0 의 변화에 따른 BER 성능을 나타내었는데, window 함수를 사용한 MSI의 성능이 가장 우수하다. 그림 6(b)에서 window 함수를 사용한 MSI의 성능은 이



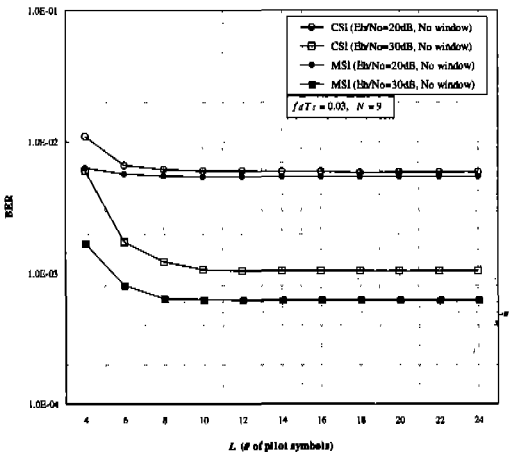
(b)

그림 5. Window 함수사용에 따른 성능평가, $f_d T_s = 0.03$.

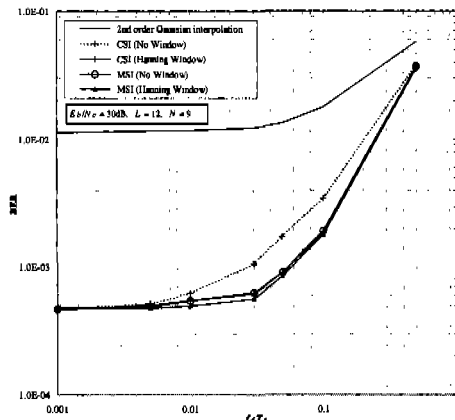
(a) No window function, (b) Hanning window.

론적인 16QAM의 성능과 약 2.5 dB 차이를 보였다. PSAM을 사용한 16QAM의 이론적인 BER 성능이 16QAM의 이론적인 BER 성능과 약 2.5 dB 차이가 있음을 고려하면^[5], 제안하는 MSI의 성능이 이론적인 PSAM의 성능에 가까움을 알 수 있다. 16QAM의 이론적인 BER 성능은 참고문헌 [1]을 통해 확인할 수 있고 이것을 그림 6(b)에 나타내었다.

수신기에서 L 개의 인접한 파일럿 심볼을 사용하여 페이딩 성분을 추정할 때, CSI 알고리즘은 window 함수를 사용하기 위해 계산을 L 번 하지만, MSI 알고리즘은 단지 2번의 계산만으로도 weighting factor를 적용할 수 있다. 따라서, 제안하는 MSI는 연산량과 메모리 소비 그리고 BER 성능에 있어서, CSI보다 우수하다.



(a)



(a)

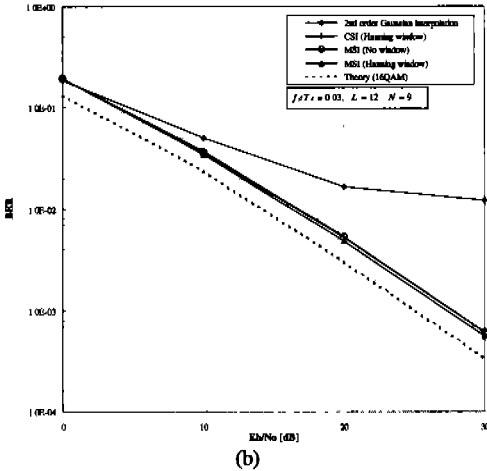


그림 6. PSAM 채널추정 알고리즘들에 대한 BER 성능평가 $L = 12, N = 9$. (a) BER vs. Doppler 주파수, $E_b/N_0 = 30$ dB. (b) BER vs. $E_b/N_0, f_d T_s = 0.03$.

V. 결론

본 논문에서는 PSAM의 채널추정 알고리즘으로서 기존의 sinc 보간법 (conventional sinc interpolation : CSI) 의 단점을 개선한 수정된 sinc 보간법 (modified sinc interpolation : MSI) 을 제안하였다. CSI 알고리즘은 주파수 비선택성 Rayleigh 페이딩에 우수한 채널추정 성능을 갖고 있음에도 불구하고, 오히려 AWGN에서는 채널추정이 정확하지 못하다. 그리고 이 알고리즘은 우수한 채널추정 성능을 위해 window 함수를 같이 사용해야 한다. 그러나 제안하는 MSI 알고리즘은 CSI의 단점들을 간단히 weighting factor를 사용하여 보완하였다. 모의 성능평가를 통해, MSI가 주파수 특성과 BER성능에 있어서 CSI보다 우수함을 증명하였는데, 특히 주파수 비선택성 Rayleigh 페이딩 채널에서 window 함수를 사용한 MSI 알고리즘의 BER 성능은 PSAM을 사용한 16QAM의 이론적인 BER 성능에 근접하였다. 따라서 제안하는 MSI 알고리즘은 성능과 구현측면에서 PSAM의 채널추정 알고리즘으로서 가장 효과적이다.

참고 문헌

[1] S. Sampei and T. Sunaga, "Rayleigh fading compensation for QAM in land mobile radio

communications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.42, pp. 137-147, May 1993.

[2] J. G. Proakis and D. G. Manolakis, *Digital Signal Processing principles, algorithms and applications*, Prentice-Hall, 1996.

[3] J. K. Carvers, "An analysis of pilot symbol assisted modulation for Rayleigh fading channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.40, pp. 686-693, Nov. 1991.

[4] Y. S. Kim, "New Rayleigh fading channel estimator based on PSAM channel sounding technique," in *Proc. IEEE ICC'97*, pp.1518-1520, June 1997.

[5] X. Tang, M.-S. Alouini, and A. J. Goldsmith, "Effect of channel estimation error on M-QAM BER performance in Rayleigh fading," *IEEE Trans. Commun.*, vol.47, pp. 1856-1864, Dec. 1999.

[6] E. Okamoto, H. -B. Li, and T. Ikegami, "Rayleigh fading compensation for 16QAM using FFT," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.48, no.5, Sept. 1999.

[7] T. Kuroda and T. Matsumoto, "Multicarrier signal detection and parameter estimation in frequency-selective Rayleigh fading channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.46, pp. 882-889, Nov. 1997.

이 창 재(Chang Jae Lee)

정회원



1999년 2월 : 성균관대학교

전자공학과 졸업

1999년 3월 ~ 현재 : 성균관대학교

전기전자 및 컴퓨터공학과

석사과정

<주관심 분야> 디지털통신, 신호처리, 부호화 그리고 시뮬레이션 기법 등임

