

주파수 선택적 Rayleigh 페이딩 채널에서 고차 PS QAM 채널 보상에 대한 연구

김 정 수*

A Research on Multiple PS QAM for Channel Compensation in Frequency-Selective Rayleigh Fading Channels

Jeong-Su Kim *

요 약

본 논문에서는 파일럿 심벌을 이용하여 플랫 페이딩 채널에서 페이딩 정보를 예측하여 보상하는 방식인 PSAM(Pilot Symbol Assisted Modulation) 방식에 대해 주파수 선택적 Rayleigh 페이딩 채널에서 지연파의 영향을 받는 경우 발생하는 문제점 등을 분석하고 이를 개선하기 위하여 고차 PS(Pilot Symbol) QAM 채널 보상 방식을 제안한다. 기존의 PSAM 방식은 지연파의 지연강도가 조금만 영향을 미치더라도 SNR(Signal-to-Noise Ratio)에 상관없이 심각한 성능저하를 보이지만 제안된 방식은 지연파의 지연강도에 영향을 받지않고 안정적인 성능 개선을 보인다.

▶ Keywords : 플랫 페이딩, 주파수 선택적 Rayleigh 페이딩, 채널 보상, PSAM

Abstract

In this paper, the method of multiple PS(pilot symbol) QAM channel compensation is suggested in order to analyze and improve occurring problems in case of delay waves in Frequency-Selective Rayleigh fading channels through Pilot Symbol Assisted Modulation(PSAM) which is a method predicting and compensating fading information, using Pilot Symbol in flat fading channels. This suggested method shows stable improvement in its performance even though it is effected by the level of delay on delay waves while the existing PSAM method has severe malfunction with a small amount of level of delay on delay waves regardless of signal-to-noise ratio(SNR).

•제1저자 : 김정수 •교신저자 : 김정수

•투고일 : 2013. 4. 30, 심사일 : 2013. 6. 16, 게재확정일 : 2013. 7. 2.

* 송실사이버대학교 컴퓨터정보통신학과(Dept. of Computer, Information & Communication, Korea Soongsil Cyber University)

▶ Keywords : Flat fading, Frequency-Selective Rayleigh fading, Channel Compensation, PSAM

I. 서 론

스마트 미디어시대의 고속 이동 중 대용량 데이터의 신뢰성을 높이기 위해서는 고차 변조 기술 및 다중경로 페이딩 보상 기법이 요구되고 있다. 이동통신 전송로에서 다중 경로에 의한 페이딩은 수신파의 진폭이나 위상에 불규칙한 변동을 주어 통신 정보의 품질을 열하시키는 주된 원인이 된다. 고속 전송의 경우에는 신호가 점유하는 대역폭이 넓게 되어 주파수 선택적 Rayleigh 페이딩을 겪게 되는데 이로 인해 ISI(Inter Symbol Interference)을 유발하므로 신호의 왜곡이 더욱 심각하게 되어 오류가 급격히 증가하게 된다. 이러한 환경 하에서는 산발 오류 뿐만 아니라 연접 오류가 발생하고 정보의 신뢰도가 급격히 떨어진다. 수신된 신호에서 주파수 선택적 페이딩의 영향을 보상하는 방법에 대해 다양한 연구가 이루어져 왔다. 이 중에는 파일럿 톤 동기 복조 방식, MAP(Maximum A Posteriori) 검색기, MLE(Maximum Likelihood Estimation) 기법 등이 있으나 복잡한 신호처리 알고리즘과 구조를 요구한다. 본 논문에서는 파일럿 심벌을 이용한 단순한 신호처리 기술로 페이딩 전송로에서 야기되는 신호 레벨 예측 및 위상 보상을 통해 ISI를 극복할 수 있는 채널 추정 및 보상 방법을 연구한다. 또한 이동 통신에서 제한된 유용 주파수로 인해 스펙트럼 효율이 우수한 QAM 변조 방식을 이용한다. 파일럿 심벌을 이용하여 플랫폼 페이딩 전송로에서 야기되는 진폭 및 위상 왜곡을 예측하여 보상하는 단일 파일럿 방식인 PSAM(Pilot Symbol Assisted Modulation)에 대한 한 심벌 이내의 지연파의 영향을 받는 경우 발생하는 문제점 등을 분석하고, 이를 개선하기 위하여 복수의 파일럿을 이용하는 다중 보상 기법을 제안한다. 기존의 PSAM 방식에서는 파일럿 심벌을 이용하여 수신단에서 페이딩을 추정할 때 지연파의 간섭에 의해 페이딩 추정의 신뢰도가 떨어지게 된다. 이를 보완하기 위하여 각 프레임의 선두에 3개의 파일럿 심벌을 이용하면 한 신호 주기 이내의 지연파의 영향을 받는 경우 두 번째 파일럿 심벌은 지연파의 영향을 받더라도 세 번째 파일럿 심벌 역시 페이딩 추정 보상에 이용되기 때문에 채널 환경 추정의 신뢰도를 높일 수 있다. 기존의

PSAM 방식과 비교해 보면, 한 심벌 주기 이내의 지연파의 간섭이 있는 환경에서 지연파의 지연강도가 조금만 증가하더라도 급격한 성능 저하를 보이지만 제안하는 다중 보상 방식은 지연파의 지연강도에 크게 영향을 받지 않고 안정된 성능을 보임을 확인할 수 있다. 다수 개의 부반송파를 사용하는 OFDM, MIMO 등 이동 대용량 데이터 전송시스템[1-2]에 제안 방식을 이용하여 데이터의 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

II. 주파수 선택적 Rayleigh 페이딩 채널에서 페이딩 보상 기법

플랫 페이딩 채널에서 PSAM 방식은 정해진 파일럿 심벌을 매 주기마다 추가로 전송하여 수신단에서 데이터 심벌의 페이딩 왜곡을 추정하는 방법으로 신호처리가 간단하다. 기존의 PSAM을 이용한 보상 방법은 플랫 페이딩 채널에서는 어느 정도 효과적이거나 주파수 선택적 Rayleigh 페이딩 환경 하에서는 파일럿 심벌 자체가 ISI에 의하여 심하게 왜곡되기 때문에 성능이 열리다. 이를 극복하기 위해 다양한 방법 등이 연구되고 있다[3-8]. 본 논문에서는 다중 파일럿 심벌을 이용하는 페이딩 보상 방법을 연구한다. 다중 파일럿 심벌에 의한 페이딩 보상 방법은 복 수개의 파일럿 심벌을 추가하여 페이딩을 추정 보상하는 방법으로 데이터 심벌 뿐 아니라 파일럿 심벌들 간의 왜곡 정도 추정이 가능하므로 성능을 향상시킬 수 있다.

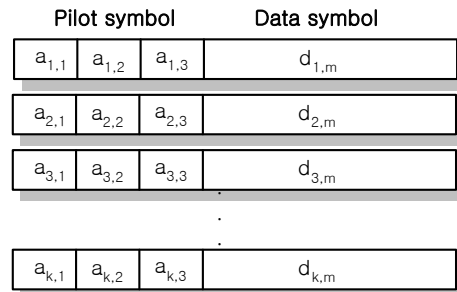


그림 1. 제안 방식의 프레임의 구조
Fig. 1. The proposed frame Structure

그림 1은 제안 방식의 프레임 구조를 나타낸다. $a_{k,m}$ 은 k 번째 프레임의 m 번째 파일럿 심벌이고 $d_{k,m}$ 은 k 번째 프레임의 m 번째 데이터 심벌이다. 한 프레임의 길이가 N 이면 데이터 심벌은 $N-3$ 이고, 파일럿 심벌은 0, $3+3j$, 0 값으로 3개가 삽입된다. 잡음 전력 N_0 가 매우 작다고 가정하고, 수신된 신호를 2파 모델(2-ray Rayleigh model)에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t) = c_1(t)a(t) + c_2(t)a(t-\tau) \quad (1)$$

$c_1(t)$, $c_2(t)$ 는 각각 독립적인 Rayleigh 페이딩 신호이고 $a(t)$ 는 지연되지 않는 원 신호이고 $a(t-\tau)$ 는 인접한 심벌이 τ 만큼 지연됨을 의미하며, $a(t-1)$ 는 한 심벌 지연된 인접 신호를 뜻한다. 따라서 선형 예측방식을 이용하여 지연된 신호를 수식으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$a(t-\tau) = a(t) + \tau[a(t-1) - a(t)] \quad (2)$$

송수신시간의 동기가 이상적으로 맞다고 가정하면, 식 (1), (2)에 의해 수신된 첫 번째 프레임의 파일럿의 위치에서 두 번째와 세 번째 파일럿의 수신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기에서, $a_{k,m}$, $d_{k,m}$ 은 각각 k 번째 프레임 상에서 m 번째 파일럿 심벌과 데이터 심벌에 해당된다. 또한 $a_{1,1}$, $a_{1,3}$ 는 각각 크기 값이 0인 파일럿 심벌이고 $a_{1,2}$ 는 크기 값이 $3+3j$ 에 해당되는 파일럿 심벌이 된다.

$$y(a_{1,2}) = c_1(a_{1,2})a_{1,2} + c_2(a_{1,2})[a_{1,2} + \tau(a_{1,1} - a_{1,2})] = [c_1(a_{1,2}) + c_2(a_{1,2}) \cdot (1-\tau)]a_{1,2} \quad (3)$$

$$y(a_{1,3}) = c_1(a_{1,3})a_{1,3} + c_2(a_{1,3})[a_{1,3} + \tau(a_{1,2} - a_{1,3})] = \tau c_2(a_{1,3})a_{1,2} \quad (4)$$

일반식을 유도하고자 두 번째 프레임의 파일럿 위치에서 마찬가지로 방법으로 수신 신호를 구하면 다음과 같은 수식을 얻을 수 있다. 여기에서, $a_{2,1}$, $a_{2,3}$ 는 크기 값이 0인 파일럿 심벌이다.

$$y(a_{2,2}) = c_1(a_{2,2})a_{2,2} + c_2(a_{2,2})[a_{2,2} + \tau(a_{2,1} - a_{2,2})] = [c_1(a_{2,2}) + c_2(a_{2,2}) \cdot (1-\tau)]a_{2,2} \quad (5)$$

$$y(a_{2,3}) = c_1(a_{2,3})a_{2,3} + c_2(a_{2,3})[a_{2,3} + \tau(a_{2,2} - a_{2,3})] = \tau c_2(a_{2,3})a_{2,2} \quad (6)$$

식 (3), (4), (5), (6)식에서 각각의 파일럿 심벌의 크기 값 $3+3j$ 으로 나누어주면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(a_{1,2})/a_{1,2} = [c_1(a_{1,2}) + c_2(a_{1,2}) \cdot (1-\tau)] \quad (7)$$

$$y(a_{1,3})/a_{1,2} = \tau c_2(a_{1,3}) \quad (8)$$

$$y(a_{2,2})/a_{2,2} = [c_1(a_{2,2}) + c_2(a_{2,2}) \cdot (1-\tau)] \quad (9)$$

$$y(a_{2,3})/a_{2,2} = \tau c_2(a_{2,3}) \quad (10)$$

따라서 k 번째 프레임의 수신된 파일럿에서 페이딩 추정 인자를 $y(a_{k,2})/a_{k,2} = c_{e1}(a_{k,2})$ 라 하면, (7), (9)식으로부터 (11)식이 유도되고 마찬가지로 (8), (10)식으로부터 (12)식이 유도된다.

$$c_{e1}(a_{k,2}) = [c_1(a_{k,2}) + c_2(a_{k,2}) \cdot (1-\tau)] \quad (11)$$

$$c_{e2}(a_{k,3}) = \tau c_2(a_{k,3}) \quad (12)$$

수신된 k 번째 프레임의 m 번째 데이터 심벌을 $d_{k,m}$ 이라 하면 $d_{1,1}$, $d_{1,2}$ 는 식 (13), (14)와 같이 표현된다. 여기에서 $a_{1,3}$ 는 크기 값이 0인 파일럿 심벌이다.

$$y(d_{1,1}) = c_1(d_{1,1})d_{1,1} + c_2(d_{1,1})[d_{1,1} + \tau(a_{1,3} - d_{1,1})] = [c_1(d_{1,1}) + c_2(d_{1,1}) \cdot (1-\tau)]d_{1,1} \quad (13)$$

$$y(d_{1,2}) = c_1(d_{1,2})d_{1,2} + c_2(d_{1,2})[d_{1,2} + \tau(d_{1,1} - d_{1,2})] = [c_1(d_{1,2}) + c_2(d_{1,2}) \cdot (1-\tau)]d_{1,2} + \tau c_2(d_{1,2})d_{1,1} \quad (14)$$

페이딩을 추정하기 위하여 1차, 2차 가우시안 보간법을 사용하는데 본 논문에서는 페이딩 추정 확률을 높일 수 있는 2차 가우시안 보간법을 이용한다. 프레임의 길이를 N 이라 할 때 k 번째 프레임의 m 번째 데이터 심벌 $d_{k,m}$ 에 대하여 첫 번째와 두 번째 공통인자로 다음 식 (15), (16)과 같이 각각의 페이딩을 추정한다.

$$c_{e1}(d_{k,m}) = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{m+1}{N} \right)^2 - \frac{m+1}{N} \right\} c_{e1}(a_{k-1,2}) \quad (15)$$

$$+ \left\{ 1 - \left(\frac{m+1}{N} \right)^2 \right\} c_{e1}(a_{k,2})$$

$$+ \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{m+1}{N} \right)^2 + \frac{m+1}{N} \right\} c_{e1}(a_{k+1,2})$$

$$c_{e2}(d_{k,m}) = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{m}{N} \right)^2 - \frac{m}{N} \right\} c_{e2}(a_{k-1,3}) \quad (16)$$

$$+ \left\{ 1 - \left(\frac{m}{N} \right)^2 \right\} c_{e2}(a_{k,3})$$

$$+ \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{m}{N} \right)^2 + \frac{m}{N} \right\} c_{e2}(a_{k+1,3})$$

식 (13)과 (14)에서 데이터 심벌 $d_{1,1}$, $d_{1,2}$ 을 구하면 다음과 같다.

$$d_{1,1} = y(d_{1,1}) / [c_1(d_{1,1}) + c_2(d_{1,1}) \cdot (1-\tau)] \quad (17)$$

$$d_{1,2} = [y(d_{1,2}) - \tau c_2(d_{1,2}) \cdot d_{1,1}] \quad (18)$$

$$/ [c_1(d_{1,2}) + c_2(d_{1,2}) \cdot (1-\tau)]$$

식 (17), (18)을 일반화하여 k 번째 프레임의 m 번째 추정된 데이터 심벌 $\hat{d}_{k,m}$ 은 다음과 같이 구한다.

$$\hat{d}_{k,1} = y(d_{k,1}) / [c_1(d_{k,1}) + c_2(d_{k,1}) \cdot (1-\tau)] \quad (19)$$

$$\hat{d}_{k,m} = \frac{[y(d_{k,m}) - \tau c_2(d_{k,m}) \cdot \tilde{d}_{k,m-1}]}{[c_1(d_{k,m}) + c_2(d_{k,m}) \cdot (1-\tau)]} \quad (20)$$

식 (19), (20)에서 첫 번째 데이터 심벌 $\hat{d}_{k,1}$ 은 수신 신호를 첫 번째 공통인자를 이용한 추정된 페이딩으로 나누어줌으로서 식 (21)과 같이 나타낼 수 있고, 두 번째 부터 추정된 데이터 심벌 $\hat{d}_{k,m}$ 은 식 (22)과 같이 구할 수 있다. 여기에서 $\tilde{d}_{k,m-1}$ 은 추정된 데이터 심벌 $\hat{d}_{k,m}$ 의 전 심벌을 의미한다.

$$\hat{d}_{k,1} = y(d_{k,1}) / c_{e1}(d_{k,1}) \quad (21)$$

$$\hat{d}_{k,m} = \frac{[y(d_{k,m}) - c_{e2}(d_{k,m}) \cdot \tilde{d}_{k,m-1}]}{c_{e1}(d_{k,m})} \quad (22)$$

추정된 데이터 심벌 $\hat{d}_{k,m}$ 는 검파과정을 통해 보내진 신호를 얻어 낼 수 있다.

III. 성능평가

그림 2는 주파수 선택적 Rayleigh 페이딩 채널에서 제안 방식의 다중 파일럿을 이용한 페이딩 보상 전후의 QAM 신호 성상도이다. $f_d T = 0.003$ (f_d : Maximum Doppler frequency, T : Symbol duration) 이고, 한 심벌 지연을 1로 가정할 때 지연파의 지연 정도를 0.5, dB=30dB로 하여 시뮬레이션을 하였고 이때 BER=10⁻³이다. 결과적으로 페이딩 추정을 통해 성상도상에서 각 점에 집중되어 있음을 알 수 있다. 수신된 신호는 검파과정을 통해 보내진 신호를 얻어 낼 수 있다.

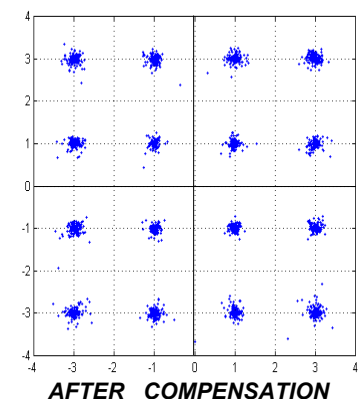
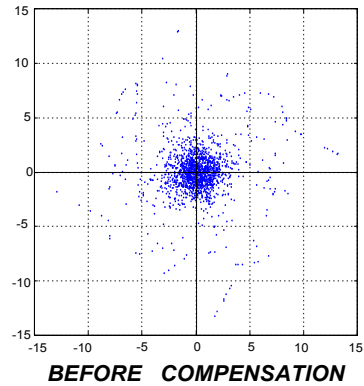


그림 2. 주파수 선택적 Rayleigh 페이딩 채널에서 신호 성상도

Fig. 2. Signal constellation in frequency selective Rayleigh fading channels

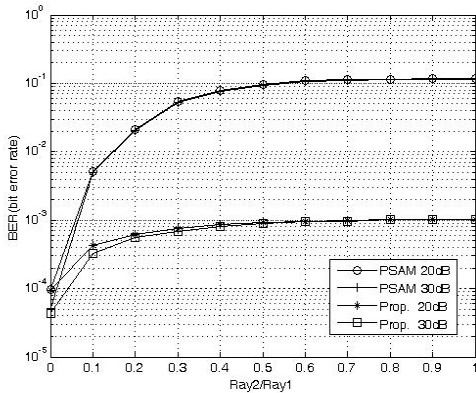


그림 3. Ray2/Ray1에 따른 BER 성능 (SNR 20dB, 30dB)
Fig. 3. BER performance of system based on Ray2/Ray1 (SNR 20dB, 30dB)

그림 3은 $f_d T = 0.005$ ($f_d = 1250, T_s = 1/250000$), 프레임 길이를 16, 지연파의 지연을 0.5, SNR를 각각 20dB, 30dB으로 하여 지연파의 지연강도에 따른 PSAM 시스템과 제안시스템의 성능을 분석해 보았다. Ray1은 직접파의 지연강도, Ray2는 지연파의 지연강도를 의미하고 Ray2/Ray1는 직접파에 대한 지연파의 상대적인 지연강도를 나타낸다. PSAM의 경우 지연파의 영향이 없는 경우 20dB에서 10^{-4} 정도의 BER 성능을 보이고 Ray2/Ray1가 0.6 이상에서는 10^{-1} 이하의 성능저하를 보인다. 지연파의 지연강도 조금만 증가하더라도 SNR에 상관없이 심한 성능열하를 보임을 알 수 있다. 제안된 방식의 경우 30dB의 경우 10^{-4} 이하의 성능을 보이고 Ray2/Ray1가 0.6이상에서 10^{-3} 정도의 성능을 보인다.

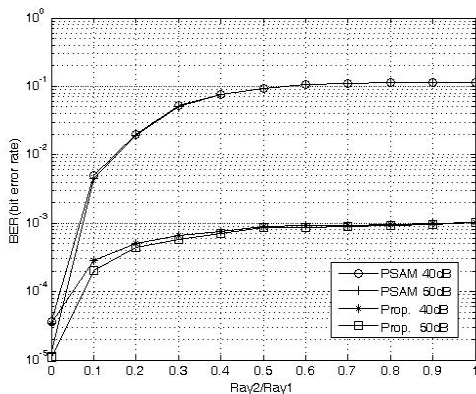


그림 4. Ray2/Ray1에 따른 BER 성능 (SNR 40dB, 50dB)
Fig. 4. BER performance of system based on Ray2/Ray1 (SNR 40dB, 50dB)

그림 4는 $f_d T = 0.005$ ($f_d = 1250, T_s = 1/250000$), 프레임 길이를 16, 지연파의 지연을 0.5, SNR를 각각 40dB, 50dB로 하여 지연파의 지연강도에 따른 PSAM 방식과 제안된 시스템의 BER 특성을 보여주고 있다. PSAM은 지연파의 영향이 없는 경우 10^{-4} 이하의 BER 성능을 보이고 Ray2/Ray1가 0.5 이상에서는 10^{-1} 정도의 성능저하를 보인다. 지연파의 지연강도 조금만 커지더라도 SNR에 상관없이 심한 성능열하를 보임을 알 수 있다. 제안된 방식은 SNR이 50dB에서 10^{-5} 정도의 성능을 보이고 Ray2/Ray1가 0.5 이상일 때 SNR에 관계없이 10^{-3} 정도의 오율곡선을 보인다. PSAM 방식과 제안 방식은 지연파의 영향이 없는 경우 비슷한 성능을 보이지만 지연파의 지연강도의 영향을 받는 경우 PSAM의 경우 급격한 성능 저하를 보이고 제안된 방식의 경우 PSAM에 비해 성능이 개선됨을 알 수 있다.

IV. 결론

주파수 비선택적 페이딩 채널에서 효율적으로 페이딩을 보상할 수 있는 PSAM 방식은 지연파의 지연강도의 영향을 받지 않을 경우 제안 방식과 거의 비슷한 성능을 보이지만 지연강도가 조금만 증가하더라도 심한 성능열하를 보인다. PSAM의 경우 지연파의 지연강도가 0.6이상에서는 10^{-1} 이하의 BER 성능 저하를 보인다. 제안 방식은 지연파의 지연강도에 의해 영향을 받지만 지연강도의 영향이 심한 경우에도 10^{-3} 정도의 안정된 성능을 보임을 알 수 있다. 제안시스템은 추가 파일럿 심벌을 삽입하지만 평균 전력소모를 늘리지 않은 제로 파일럿 심벌 삽입 방법을 제안하여 주파수 선택적 Rayleigh 페이딩 채널에서 지연파의 영향을 극복하여 데이터 신뢰도를 높일 수 있었다. 다수 개의 부반송파를 사용하는 OFDM, MIMO 시스템의 경우 고속 데이터 전송 시 연접 오류가 발생되어 성능 저하의 원인이 된다. 연접오류에는 인터리버 기술, 컨벌루션 코딩, 재귀적 채널코딩 기법이 효과적이며 향후 이들 시스템에 제안 기술을 활용하면 데이터 신뢰도를 높일 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] Lee, Jong-Chan, Lee, Moon-Ho, "A QoS Provisioning Based on Load Balancing for Hand-over in OFDMA System," Journal of The

- Korea Society of Computer and Information, Vol. 18, No. 2, pp. 59-68, Nov. 2013.
- [2] Kim, Jang-Wook, "Performance Enhancement of OFDM Systems (Using Interference cancellation schemes of TD(Transmit Diversity))," Journal of The Korea Society of Computer and Information, Vol. 17, No. 7, pp. 77-86, Nov. 2012.
- [3] M. Jafar Taghiyar, Sami Muhaidat, Jie Liang, "On the Performance of Pilot Symbol Assisted Modulation for Cooperative Systems with Imperfect Channel Estimation", in Proc. IEEE WCNC 10, pp. 1-5, Apr. 2010.
- [4] M. Jafar Taghiyar, Sami Muhaidat, Jie Liang, "On Pilot-Symbol-Assisted Cooperative Systems with Cascaded Rayleigh and Rayleigh Fading Channels with Imperfect CSI," Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Telecommunications (JSAT), pp.24 -31, November Edition, 2010.
- [5] H. Muhaidat, M. Uysal, and R. Adve, "Pilot-symbol-assisted detection scheme for distributed orthogonal space-time block coding," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 8, no. 3, pp. 1057-1061, March 2009.
- [6] Lei Chen and Bernard Mulgrew "A robust channel estimator at the high doppler frequency via matching pursuit technique", (EUSIPCO 2008), Lausanne, Switzerland, August 25-29, 2008.
- [7] Z. Tang, R. C. Cannizzaro, G. Leus, and P. Banelli, "Pilot assisted time-varying channel estimation for OFDM systems," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 55, no. 5, pp. 2226-2238, May 2007.
- [8] T. Zemen and C. F. Mecklenbr, "auker, "Time-variant channel estimation using discrete prolate spheroidal sequences," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 53, no. 9, pp. 3597-3607, Sept. 2005.

저 자 소개



김 정 수

1996: 순천대학교

전자공학과 공학사

1998: 전북대학교

정보통신공학과 공학석사

2003: 전북대학교

컴퓨터공학과 공학박사

현 재: 송실사이버대학교

컴퓨터정보통신학과 부교수

관심분야: 컴퓨터정보통신

Email : kjs@mail.kcu.ac