

논문 2008-5-4

채널 사운딩 기반의 MIMO-OFDM 채널용량 측정

Channel Sounding-based Channel Capacity Measurement of MIMO-OFDM

박방훈*, 조주필**, 김성권***, 차재상****

Bang-Hun Park, Ju-Phil Cho, Seong Kwon Kim and Jae Sang Cha

요약 본 논문에서는 송수신 안테나간의 상관관계가 존재하는 MIMO-OFDM 시스템에서 채널의 페이딩에 의한 영향을 완화시키고 통신링크 성능향상과 신뢰성을 증대시킬 수 있는 CS(channel sounding) 기법을 제안하며, sounding 신호를 통해 채널 전파특성을 측정하여 CS기법으로 추정 오차가 최적화된 송신단과 수신단간의 채널 전파특성을 추정한다. 이 제안된 기법을 통해 수신단에서 간단한 연산을 통하여 채널 용량을 증가시켜 주며, 송신단에서 채널의 정보를 이용하여 최적의 전력을 할당 할 수 있고, 채널 용량의 증가를 얻을 수 있게 된다. 또한 안테나 개수가 증가함에 따라서 본 기법을 이용한 경우의 채널용량의 증가를 가져옴을 알 수 있다. 따라서 더욱 복잡한 송수신 안테나 시스템에서 본 기법을 이용한 성능 증대가 기대된다.

Abstract In this paper, we propose the channel sounding scheme which improves the reliability and performance of communication link and mitigate the fading effect of channel in MIMO-OFDM system having correlation between Tx and Rx antennas. And we estimate the channel propagation characteristics of channels between the transmitter and receiver with CS scheme by measuring the channel propagation characteristics using sounding signal. Multi agent system models can be used to analyze the path of the system within any time frame. Further, using this proposed method, we can increase the channel capacity by simple calculation in receiver and transmitter and allocate the optimal power by channel information in transmitter. Also, the increment of channel capacity using the proposed method is induced as the number of antenna is increased. So, we can anticipate the performance improvement with the presented scheme in more complicated Tx and Rx antenna system.

Key Words : 채널 사운딩, 직교주파수분할다중화 기법, 다중 안테나기법

1. 서 론

최근 들어 전세계적으로 무선통신 분야에서는 WLAN (wireless local area network), WPAN (wireless personal area network) 등의 근거리 무선통신망에 관한 연구 및 개발 경쟁이 가속화되고 있으며 시장 전망으로

볼 때 향후 이 분야에 대한 수요가 폭발적으로 증가할 것으로 예측되고 있다. 특히 WPAN은 수십 센티미터에서 수 미터에 이르는 맥내 및 근거리 데이터 전송과 더불어 주변 장치간의 원활한 통신을 위해개인화된 무선 네트워크를 지칭하며 일상생활을 보다 생산적이고 효율적으로 만들어 가는데 근본적인 목표를 두고 있다.

예를 들어 개인용 컴퓨터와 그 주변 기기들간의 유선 케이블을 무선으로 대체하고 디지털 카메라와 노트북 간의 파일 교환을 하나의 리모콘으로 제어하며 무선 위치 인식 서비스를 통해 보다 효율적인 업무를 수행하는 등

*정회원, 전북대학교 전자공학과

**정회원, 군산대학교 전자정보공학부, 교신저자,

***정회원, 목포해양대학교 해양전자통신공학부

****정회원, 서울산업대학교 매체공학과
접수일자 2008.7.10, 수정완료 2008.9.19

의 일련의 일들이 WPAN의 개념을 통해 가능하게 된다 [1][2]. 이를 위하여 IEEE 802.15 TG3는 2.4GHz 대역에서 고속 데이터 전송을 목표로 하는 Wireless PAN 기술을 연구하고 있으며, 이를 위해 10m거리에서 55Mbps 데이터 전송속도를 얻고자 하고 있다.

고속 WPAN의 기술표준인 IEEE 802.15.3은 WLAN의 표준인 IEEE 802.11b보다 좁은 반경 50미터 내에서 2.4 GHz~2.4835 GHz ISM 대역을 이용해 11, 22, 33, 44, 55Mbps속도의 다양한 데이터 전송을 지원한다. 이 표준에서는 전력 소모량이 매우 낮은 것이 특징이며 멀티미디어 데이터 스트리밍의 QOS (quality of service)를 보장할수 있도록 사용자에게 시간 슬롯을 할당하는 TDMA 방식을 채택하고 있다.

표 1에 향후 무선 홈 네트워킹을 위한 IEEE 802.15.3과 IEEE 802.11x 기술들의 개요를 나타내고 있다.

또한 이 표준을 사용하는 네트워크는 무선기거나 다른 네트워크로부터 간섭을 받게 되면 자동으로 채널을 변경할 수 있으며 기존의 블루투스를 비롯한 IEEE 802.11 및 IEEE 802.11b 등과의 공존이 가능하다 [2], [3].

본 논문에서는 2장에서 기존의 기법들과 제안된 채널 사운딩 기법에 대해 기술하며, 채널 용량을 얻기 위한 이론적 접근을 시도하여 그 수식을 유도하고 있다. 3장에서는 제안된 기법을 근거로 한 실험결과를 보이고 있다. 결과에서 보는 바와 같이 모든 SNR의 경우에 있어서 제안된 기법을 이용하여 채널 정보를 알 때, 채널용량이 증가됨을 알 수 있다. 또한, 안테나 개수가 증가하는 경우 더욱 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 마지막으로 4장에서는 결론 및 향후 방향에 대해 언급하고 있다. 제안된 기법은 더욱 다양한 시스템에서 그 성능을 보일 것으로 기대된다.

표 1. IEEE 802.15.3과 IEEE 802.11x 기술 비교.
Table 1. Comparison of technology between IEEE 802.15.3 and IEEE 802.11x

	802.11b,g	802.11a	802.11n	802.15.3	Bluetooth 1.1
Freq. Band (GHz)	2.4	5	5	2.4	2.4
Data rate (Mb/s)	22	54	108	55	1
# of Video Ch.	2	5	-	4	None
Complexity	3X	4X	-	1.5X	1X
Connect Time	N/A	N/A	-	<<1sec	~5sec

II. 기존 기법과 제안 기법

MIMO-OFDM시스템의 채널 환경인송신측과 수신측 수신 안테나 어레이의 측면에서 θ 의 각도와 τ 의 시간지연을 갖는 위치에 scatterer가 위치한다고 가정하고 그 위치에서의 복소 크기가 $S(\theta, \tau)$ 라고 가정하자.

송신 안테나 어레이의 측면에서는 ϕ 의 각도에 같은 scatterer가 존재한다고 할 수 있다. 채널특성 변수는 θ, ϕ, τ 가 되며 ϕ 는 θ 에 의해 변하는 값이다. MIMO-OFDM시스템에서 채널 임펄스 응답에 관해간략하게 나타내면 다음과 같이 표현할수 있다[4][5].

$$H(\tau) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\tau_{\max}} S(\theta, \tau') a(\phi_i, \theta_i) g(\tau - \tau') d\tau' d\theta \quad (1)$$

여기에서 τ_{\max} 는 채널의 최대 확산 지연이며, $g(\tau)$ 는 송신단의 펄스 정형 필터와 수신단의 정합필터의 결합된 응답을 의미한다. 식 (1)에서 크기, 위상, 지연을 측정하기 위해서 여러 번 'snapshots'하며, 무선 채널의 통계적인 변수값을 이끌어 내어 평균을 취하면 된다[6]. 여러 전파 환경에 관한정보는 무선 채널 임펄스 응답으로 기술되는 변수에 의해서 주변측정을 할 수 있다.

이런 측정은 채널sounding을 필요로 하며, 채널의 정보를 파악하는데 도움이 되는sounding 신호를 송신측에서 보내고 수신측 channel sounder가 sounding 신호를 수신하면 channel sounding 기법에 의해서 채널 정보를 알 수 있다. Wireless PAN에 의한 MIMO-OFDM시스템에서의 채널 sounder는 무선 채널의 임펄스 응답과 관련된 변수의 측정을 허용하는 장치이다.

2.1 MIMO-OFDM 에서 사운딩신호 이용

MIMO-OFDM 시스템은 sounding 신호로 채널 상태를 파악하고, 이러한 최적화된 채널을 이용해 고속데이터 통신을 가능하게 할 수 있다. 채널 특성을 얻기 위하여 transmitter에서 보내지는 sounding 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$s(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \alpha_i \delta(t - iT) \cos(w_n(t - iT)t) \quad (2)$$

식 (2)에서 sounding 신호는 여러 경로를 걸쳐 수신기에 도달한다. 다중경로 채널에서 수신된 신호는 전송된 신호 세기의 감쇠(α_i), 시간지연(τ_i), 위상천이(ϕ_i)가 된 신호가 된다. 감쇠, 시간지연, 위상천이는 채널의 상태에 관한 정보를 알려주는 값이다. sounding 구간에서 수신된 j 번째 신호 벡터를 행렬을 이용한 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$S = \begin{bmatrix} s_1(L-1)...s_1(0) & \dots & s_{n_r}(L-1)...s_{n_r}(0) \\ \dots & \dots & \dots \\ s_1(M-1)...s_1(M-L)...s_{n_r}(M-1)...s_{n_r}(M-L) \end{bmatrix} \quad (3)$$

행렬 S 는 sounding 신호로 이루어진 $(M-L+1) \cdot n_r L$ block-Toeplitz 행렬이다. MIMO채널에서 j 번째 송신 안테나로부터 i 번째 수신 안테나 사이의 시변 채널 임펄스 응답(time-varying channel impulse response)은 시간 t 에서 $(t-\tau)$ 사이에 임펄스가 가해졌을 때 행렬 $H(t, \tau)$ 로 표현할 수 있다.

식 (4)는 MIMO-OFDM 시스템의 송신측과 수신측간의 채널 행렬의 모델링이다. MIMO-OFDM시스템에서 sounding 신호는 임펄스 형태의 자기 상관 함수를 가질 뿐만 아니라 송신 안테나간의 서로 다른 sounding 신호는 서로 통계적으로 상관성이 없는 신호이어야 한다.

$$H(t, \tau) = \sum_{l=0}^L \begin{bmatrix} s_{\theta 1}(\Omega_l) & s_{\phi 1}(\Omega_l) \\ s_{\theta 2}(\Omega_l) & s_{\phi 2}(\Omega_l) \\ \dots & \dots \\ s_{\theta N}(\Omega_l) & s_{\phi N}(\Omega_l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_l^{\theta\theta} & \gamma_l^{\theta\phi} \\ \gamma_l^{\phi\theta} & \gamma_l^{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{\theta 1}^*(\Omega_l) & s_{\theta 2}^*(\Omega_l) & \dots & s_{\theta N}^*(\Omega_l) \\ s_{\phi 1}^*(\Omega_l) & s_{\phi 2}^*(\Omega_l) & \dots & s_{\phi M}^*(\Omega_l) \end{bmatrix} \quad (4)$$

n_T 개의 송신 안테나와 n_R 개의 수신 안테나를 갖는 MIMO 채널에서 j 번째 수신 안테나에서 시간 τ 에서 수신된 신호는 다음과 같다

$$y_j(\tau) = \sum_{i=0}^{n_T} \sum_{k=0}^{L-1} h_{i,j}(k) s_i(t-k) + w_j(\tau) \quad (5)$$

식(5)에서 $h_{i,j}$ 는 i 번째 송신 안테나로부터 j 번째 수신 안테나까지의 채널 임펄스 응답을 의미한다. S_i 는 i 번째 송신 안테나로부터 송신되는 sounding 신호이며 w_j 는 j 번째 수신 안테나에 더해지는 부가 잡음이다. sounding 구간에서는 서로 다른 sounding 신호가 전송되며 수신단에서 sounding 신호를 이용한 채널 파악이 가능한 충분히 긴 M 개로 가정한다. 다른 경로들은 $\sum_{k=1}^M s_k(\tau_p) s_k(\tau_r)$ 에 의한 자기상관 sounding 신호를 통하여 결합된다[7][8].

$$\sum_{k=1}^M Y_k s_k(\tau_p) = \sum_{r=0}^{P-1} a_r e^{j\theta_r} \sum_{k=1}^M s_k(\tau_p) s_k(\tau_r) \quad (6)$$

이미 말한 것과 같이 $\sum_{k=1}^M s_k(\tau_p) s_k(\tau_r)$ 은 $\tau_p = \tau_r - \tau_p$ 에 대한 자기 상관 sounding 신호로 표현한다. 자기 상관으로 표현된 $R_s(\tau_p)$ 에 관한 식 (6)은 다음과 같은 식으로 표현 할 수 있다.

$$S^T(\tau) Y = R(\tau) \hat{C} \quad (7)$$

여기서 $S(\tau)$ 는 지연된 sounding 신호 $s_k(\tau_p)$ $M \times P$ 행렬의 열로 구성되고, R 은 ij^{th} 요소인 $R_s(\tau_{ij})$ $P \times P$ 행렬이다. Y 는 $M \times 1$ 벡터, \hat{C} 은 각각의 다중경로 성분 에 결합된 실제 복소수 크기 $C = \{\beta_i\}_{i=0}^{r-1}$ 의 $P \times 1$ 감쇄 벡터를 포함한 추정치이다.

2.2 CS기법을 이용한 채널 용량 추정

MIMO-OFDM시스템의 CS기법은 다음과 같이 이루어진다.

$$\begin{aligned} \hat{h}_j^{CS} &= \arg \min |r_j - Sh|^2 \\ &= (S^H S)^{-1} S^H r_j \\ &= h_j + (S^H S)^{-1} S^H \end{aligned} \quad (8)$$

CS기법의 평균자승오차(mean square error: MSE)은 다음과 같다

$$\begin{aligned}
 MSE &= E \left[|h_j - \hat{h}_j^{CS}|^2 \right] \\
 &= \text{tr} \left[(S^H S)^{-1} S^H S (S^H S)^{-1} \right] \\
 &= \sigma^2 \cdot \text{tr} \left[(S^H S)^{-1} \right]
 \end{aligned} \tag{9}$$

식 (9)에서 sounding 신호 S 는 CS 의 추정오차를 최소화 하도록 최적화 될 수 있다. 그리고 sounding 신호의 전력이 σ_t^2 인 경우의 최소 CS 추정오차는 다음과 같은 필요충분조건으로부터 얻을 수 있다.

$$S^H S = \sigma_t^2 I_{n_{ti}} \cdot (N_t - L + 1) \tag{10}$$

CS기법의 최소평균 자승 오차(minimum MSE)은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 MMSE &= \min E \left[|h_j - \hat{h}_j^{CS}|^2 \right] \\
 &= \frac{n_t L \sigma^2}{\sigma_t^2 (N_t - L + 1)}
 \end{aligned} \tag{11}$$

MIMO-OFDM시스템에서 채널 행렬은송신단과 수신단의 안테나간의 간격등으로 인한 공간 페이딩 상관성이 발생한다.

송신단에서 채널의 정보를 모르는 경우는 MIMO-OFDM 채널의 채널 용량은 R 개의 동일한 전력을 갖는 병렬로 연결된 SISO 형태의 부채널들의 채널용량의 합과 같다. 하지만 송신단에서 채널의 정보를 알고 있다면 송신단과 수신단에서 간단한 연산을 통하여 채널 용량을 증가시킬 수 있다.

$$\tilde{y} = \sqrt{\frac{E_s}{n_t}} U^H H U D \tilde{s} + U^H d \tag{12}$$

식 (12)는 수신단에서 수신된 신호이다. 송신단에서 채널의 정보를 아는 경우에 채널 행렬 주파수응답이 병렬로 연결된 R개의 SISO채널로 분해될 수 있음을 보여 준다. MIMO-OFDM 채널 용량은 다음과 같다[9][10].

$$C_{know} = \sum_{i=0}^{N-1} \log_2 \left[1 + \frac{N\alpha^2}{L\sigma^2} \lambda_i \gamma_i \right] \tag{13}$$

식 (13) 에서 $\lambda_i (i=1,2,\dots,N-1)$ 는 행렬 HH^H 의 양수의 고유값을 의미한다. $\gamma_i = E[|s_i|^2]$ 는 i 번째 부채널의 전송 전력을 의미하며 $\sum_{i=0}^{N-1} \lambda_i = n_r$ 를 만족한다. 채널 정보를 알고 있는 채널 용량은 송신단에서 최적의 전력 할당을 하여 채널 용량의 증가를 얻을 수 있다.

III. 시뮬레이션 및 실험결과

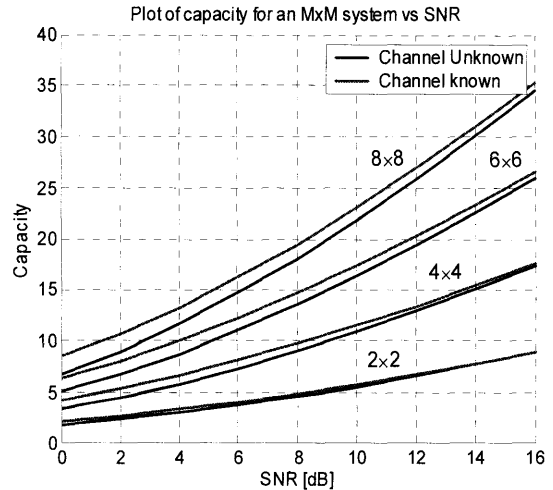


그림 1. 송신측의 채널의 정보를 아는 경우와 모르는 경우의 채널용량
 Fig. 1 Channel capacity in case channel information of Tx. is known and unknown, respectively

그림 1은 신호 대 잡음비에 대해 채널정보를 아는 경우와 모르는 경우에 대한 MIMO-OFDM 채널의 채널용량을 보이고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 전체 시스템의 채널용량은 송신단과 수신단의 안테나의 계수에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 송신단에서 채널의 정보를 아는 경우에는 각각 Ergodic MIMO-OFDM 채널 용량과 10% Outage MIMO-OFDM 채널 용량을 나타낸 것이다. 이때 최적의 전력 할당 기법을 위해서 Water-pouring 알고리즘을 이용하였다.

송신단에서 채널의 정보를 이용하여 최적의 전력 할

당을 한 경우에 채널용량의 증가를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 안테나가 2*2인 경우와 4*4인 경우에는 전체 SNR에 대해서 채널상태를 모르는 경우와 아는 경우에서 채널 용량 차이가 거의 없었지만, 안테나 개수가 증가하여 6*6, 8*8인 경우에는 SNR이 증가함에 따라서 채널상태를 아는 경우의 채널용량이 더욱 증가함을 확인할 수 있었다.

IV. 결론

본 논문은 CS기법을 이용하여 MIMO-OFDM채널용량 측정 기법을 제안하였다. Sounding 신호를 이용하여 채널 정보를 파악하여 채널 용량을 최대화하기 위해서 각 부채널별로 전력을 Water-pouring알고리즘을 이용하여 할당 하였다. 송신측에서 각 송신 안테나별로 독립적이고 동일한 전력을 갖는 신호를 송신한다. 채널용량을 최대화하기 위해서는 각 부채널별로 전력을 Water-pouring알고리즘을 이용하여 할당 하였다.

IEEE 802.15.3에서 제시하는 채널 모델에서 CS기법을 이용한 시뮬레이션 결과를 보면, 송신단에서 채널 정보를 아는 경우에 채널 용량의 증가를 얻을 수 있음을 보였다. 특히, 송수신단의 안테나 개수가 증가하는 경우 SNR의 증가에 따른 채널 용량의 증가도 함께 수반됨을 확인할 수 있었다. 따라서 앞으로는 CS기법을 이용한 시변 채널에서 정확한 채널 추정할 수 있는 알고리즘의 개발 및 연구가 이루어져야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] 신요안, 양석철, 오중욱, "IEEE 802.15 WPAN 기술 표준화 동향" Telecommunications Review, 제 14권, 제 2호, pp. 130147, 2004년 4월
- [2] J. Karaoguz, "High-rate wireless personal area networks," IEEE Commun. Mag., vol. 39, no. 12, pp. 96102, Dec. 2001.
- [3] IEEE 802.15 Working Group for WPAN: <http://ieee802.org/15>
- [4] A. Paulaj, R. Nabar, and D. Gore, Introduction to Space-Time Wireless Communications. Cambridge, U. K.: Cambridge University Press, 2003.
- [5] A. J. Paulaj, D. A. Gore, R. U. Nabar, and H. Bolcskei, "An overview of MIMO communicationsA key to gigabit wireless," Proc. of IEEE, vol. 92, no. 2, pp. 198218, Feb. 2004
- [6] Braun W., Dersch U. "A Physical Mobile Radio Channel Model." IEEE Transactions on Mobile Technology, Vol. 40, No. 2, May 1991
- [7] Michael P. Fitz, P. Schniter., "A wideband channel Sounder." pp18-22, 2001
- [8] A. Paulaj, R. Nabar, and D. Gore, Introduction to Space-Time Wireless Communications. Cambridge, U. K.: Cambridge University Press, 2003.
- [9] A. J. Paulaj, D. A. Gore, R. U. Nabar, and H. Bolcskei, "An overview of MIMO communicationsA key to gigabit wireless," Proc. of IEEE, vol. 92, no. 2, pp.

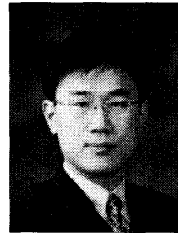
※ 본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 (No. R01-2006-000-11183-0(2008)) 지원으로 수행되었음.

저자 소개

박 방 훈(정회원)

- 2006년 2월 : 전북대학교 전자공학과(공학사)
 - 2009년 2월 : 전북대학교 전자공학과(공학석사)
- <관심분야> : WPAN, Channel Sounding

조 주 필(정회원)



- 1992년 전북대학교 정보통신공학과 졸업 (공학사)
 - 1994년 전북대학교 전자공학과 (공학석사)
 - 2001년 전북대학교 전자공학과 (공학박사)
 - 2000년~2005년 한국전자통신연구원(ETRI) 이동통신연구단 선임연구원
 - 2005년 3월~현재 국립군산대학교 전자정보공학부 조교수
- <주관심분야 : 적응신호처리, 차세대이동통신기술, Cognitive Radio, WiBro>

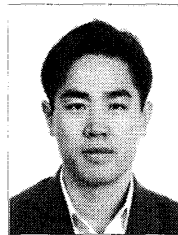
김 성 권(정회원)



- 1996년 인하대학교 전자재료공과 졸업 (공학사)
- 2002년 일본 Tohoku 대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
- 2002년 일본 Tohoku 대학 전기통신 연구소 조수 및 Research Fellow
- 2004년 8월~현재 목포해양대학교 해양전자통신공학부 조교수

<주관심분야 : 디지털 음향 및 멀티미디어 회로 설계, OFDM용 LSI 설계, 주파수분배정책 및 주파수의 효율적 사용에 관한 연구, 고주파 회로설계, 무선통신회로>

차 재 상(정회원)



- 1991년 : 성균관대학교 전기공학과 졸업(공학사)
 - 1997년 : 성균관대학교 전기공학과 (공학석사)
 - 2000년 : 일본 Tohoku 대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
 - 2000년~2002년 : 한국전자통신연구원(ETRI) 무선방송기술연구소 선임연구원
 - 2002년~2005년 : 서경대학교 정보통신공학과 전임강사
 - 2005년~현재 : 서울산업대학교 매체공학과 조교수
- <주관심분야 : 디지털 방송전송기술, Cognitive Radio, UWB, 홈네트워크 무선통신기술, 대역확산 및 다중접속 기술, 4세대 이동통신기술>