DBpia

LR-UWB 시스템에서 특이값 분해를 이용한 IEEE 802.11a 간섭억압기법

준회원 김 동 희*, 김 태 훈*, 장 홍 모*, 박 호 환**, 종신회원 곽 경 섭***

IEEE 802.11a Interference Suppression Method Using by SVD Algorithm in LR-UWB Systems

Dong Hee Kim*, Tae Hun Kim*, Hong Mo Jang*, Ho Hwan Park**, *Associate Members*
Kyung Sup Kwak*** *Lifelong Member*

요 약

UWB(ultra wideband)는 기존의 무선통신망 시스템에게 간섭을 주지 않고 공존할 수 있는 매력적인 기술로 유비쿼터스 홈 실현을 위한 핵심기술로 인식되고 있다. 하지만 UWB 신호는 펄스 당 매우 낮은 에너지를 갖기 때문에 동일한 주파수 대역을 사용하는 협대역 통신시스템들에 의해서 강한 간섭을 받게 된다. 특별히 5GHz에서 작동하는 IEEE 802.11a 시스템은 FCC에서 규정한 UWB 신호의 대역폭과 겹쳐지게 되고 UWB 시스템에게 심각한 간섭효과를 준다. 본 논문에서는 IEEE 802.15.4a 채널환경에서 대역제한된 AWGN으로 모델링한 IEEE 802.11a 간섭신호가 DS-UWB 시스템에 미치는 간섭효과를 살펴보고 특이값 분해 알고리즘을 이용하여 수신된 신호로부터 IEEE 802.11a 신호를 추출하여 간섭을 억압하는 기법을 제안한다. 특이값 분해 알고리즘이 적용된 간섭억압기법을 통하여 단일 사용자 DS-UWB 시스템과 다중 사용자 DS-UWB 시스템에서 BER 성능이 향상된 것을 확인하였다.

Key Words : DS-UWB, SVD Algorithm, Wireless LAN, LR-Channel Model

ABSTRACT

UWB radio systems have drawn attention during the last few years. These systems are the core technique for ubiquitous home and enable to co-exist with other narrow band systems over the same frequency without interfering them. But UWB signals have a very low power per pulse, so they are affected by strong narrow band interferences. Specially, IEEE 802.11a systems which operate around 5GHz overlap the band of UWB signals and they will interfere with UWB systems significantly. In this paper, we propose a novel narrow band interference suppression method based on singular value decomposition (SVD) algorithm for DS-UWB in IEEE 802.15.4a channel model. The proposed method is very effective and robust for both a single user DS-UWB system and a multiuser DS-UWB system to reduce the narrow band interference.

※ 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학IT연구센터 지원 사업(IITA-2006-C1090-0603-0019)의 연구결과로 수행되었음.
※ 본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-10266-0)지원으로 수행되었음.
* 인하대학교 정보통신대학원 통신공학연구실 (fortune0603@hanmail.net, tata32@paran.com, daihyub0701@nate.com)
** 텔릿 연구원 (kenjo4056@hotmail.com)
*** 인하대학교 정보통신대학원 (kskwak@inha.ac.kr)
논문번호 : KICS2007-11-524, 접수일자 : 2007년 11월 22일, 최종논문접수일자: 2007년 12월 27일

www.dbpia.co.kr

Ⅰ. 서 론

UWB는 실내의 짧은 거리에서 임펄스를 사용하여 저속에서부터 고속 데이터 전송에 사용될 수 있는 기술로 최근에 커다란 관심을 받고 있다. UWB 통신시스템은 3.1GHz-10.6GHz의 주파수 대역을 사용하고 요구되는 전송 대역폭은 500MHz에서 7.5GHz이다[1]. UWB 신호는 -41.3dBm/MHz의 방사전력 제한을 갖기 때문에 낮은 전력의 백색잡음과 유사하여 동일한 주파수 대역에서 작동하고 있는 다른 장치들에게 커다란 영향을 미치지 않는다. 따라서 UWB 시스템은 기존의 무선통신망 시스템에게 간섭을 주지 않고 공존할 수 있는 매력적인 기술이다. 또한 저비용, 저전력소비로 통신뿐만 아니라 실내나 음영지역에서 수십 cm급 이내의 정밀한 위치인식/추적 기능을 줄 수 있어, 유비쿼터스 홈 실현을 위한 핵심기술로 인식되고 있다[2]. 하지만 UWB 신호는 다른 시스템과의 공존을 위한 규약들이 애매하게 제한되어 있고 펄스 당 매우 낮은 에너지를 갖기 때문에 그림 1에서 보이는 것처럼 동일한 주파수 대역을 사용하는 협대역 통신 시스템들에 의해서 강한 간섭을 받게 된다[3]. 특별히 5GHz에서 작동하는 IEEE 802.11a 시스템은 FCC에서 규정한 UWB 신호의 대역폭과 겹쳐지게 되고 UWB 시스템에게 심각한 간섭효과를 준다.

최근에 UWB 신호에 대한 협대역 간섭현상을 억압하기 위한 다양한 방법들이 발표되었다.

아날로그 대역제한 필터를 수신기에 적용하여 협대역 간섭을 제거하는 방법과 상관기에서 변형된 템플렛 파형을 사용하여 간섭을 억압하는 방법이 발표되었다[4].

그리고 협대역 간섭을 BPSK방식의 단일 반송파형으로 모델링한 후 레일리 채널환경에서 레이크 수신기를 사용한 DS(direct sequence)-UWB 시스템에 적용하여 성능을 평가한 연구들이 발표되었다[5].

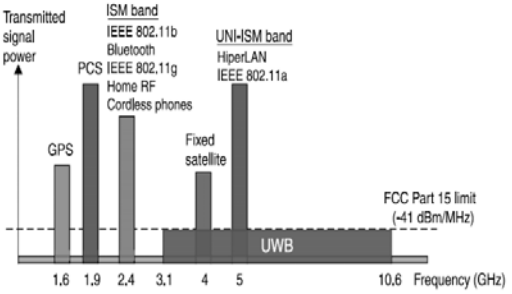


그림 1. UWB 시스템에 간섭을 주는 협대역 시스템

또한 MMSE(minimum mean square error) Rake 수신기를 TH(time hopping)-UWB 시스템에 적용하여 협대역 간섭을 억압하는 기법도 연구되었다[6]. 비록 협대역 간섭억압을 위해서 제안되었던 많은 방법들이 기존의 협대역 시스템 간섭에 대해서 효과적이었으나 수백 MHz의 대역폭을 갖는 IEEE 802.11a 간섭에 대해서는 BPSK나 연속적인 톤으로 간섭을 모델링할 수 없으므로 UWB 시스템에 대한 IEEE 802.11a의 간섭을 억압하는 방법으로 적절하지 못하다. 이에 IEEE 802.11a 신호를 대역제한된 AWGN으로 모델링하는 연구가 발표되었다[7]-[8].

본 논문에서는 IEEE 802.15.4a 채널환경에서 대역제한된 AWGN으로 모델링한 IEEE 802. 11a 간섭신호가 DS-UWB 시스템에 미치는 간섭효과를 살펴보고 특이값 분해 알고리즘을 이용하여 수신된 신호로부터 IEEE 802.11a 신호를 추출하여 간섭을 억압하는 기법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. Ⅱ장에서는 DS-UWB 시스템 모델과 이 시스템에 간섭을 주는 협대역 간섭 모델인 IEEE 802.11a에 대해서 살펴보고 LR(low rate)-UWB 채널인 IEEE 802.15.4a 채널 모델을 소개한다. Ⅲ장에서는 본 논문에서 제안된 특이값 분해 알고리즘에 대해 설명하고 알고리즘을 사용하여 협대역 통신시스템의 간섭을 회피하는 방법에 대하여 기술한다. Ⅳ장에서는 특이값 분해 알고리즘을 적용한 단일 사용자 DS-UWB 시스템과 다중 사용자 DS-UWB 시스템 성능을 분석한다. Ⅴ장에서는 제안된 간섭억압기법에 대한 모의실험 결과를 살펴보고, 마지막으로 Ⅵ장에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. DS-UWB 시스템 모델과 채널 모델

2.1 DS-UWB 시스템 모델

DS-UWB 시스템은 그림 2에서 보이는 것처럼 송신기에서 발생된 신호 $s(t)$가 LR-UWB 채널의 임펄스 응답 $h(t)$를 갖게 되고 그 후 협대역 간섭 $i(t)$와 AWGN인 $n(t)$를 거쳐서 수신기에 도달되게 된다. 수신된 신호는 식 (1)과 같이 표현되어진다.

$$r(t) = s(t) * h(t) + i(t) + n(t) \quad (1)$$

본 논문에서는 UWB 신호로 DS-BPSK방식을 사용하며 DS-UWB 시스템의 k번째 사용자의 전송신호는 식 (2)와 같이 나타내어진다.

www.dbpia.co.kr

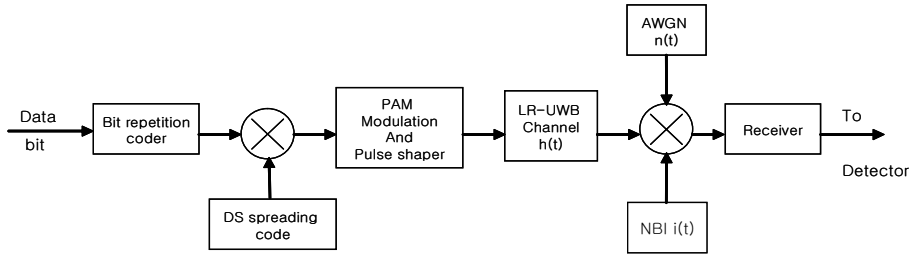


그림 2. LR-DS-UWB 시스템 모델

$$s_{tr}^{(k)}(t)=\sum_{j=iN_s}^{(i+1)N_s-1}\sum_{i=0}^{N_c-1}\sqrt{\frac{E_s}{N_s}^{(k)}}\,d_j^{(k)}c_i^{(k)}p(t-jT_f-iT_c) \tag{2}$$

여기서 j는 프레임색인, t는 클럭시간, $p(t)$는 전송된 펄스를 나타낸다. E_s는 모든 신호들에 대한 동일한 비트 에너지이고 N_s는 한 비트 전송을 위해서 필요한 펄스의 수이다. 프레임 주기 T_f는 펄스 반복 시간을 나타내며, 프레임 주기는 보통 펄스의 주기보다 수 백배 이상 길다. 따라서 한 비트의 주기 $T_b=N_sT_f$로 표현된다. $d_j^{(k)}$는 ±1을 나타내며 충돌을 피하기 위해서 DS코드 $c_i^{(k)}$를 사용한다. T_c는 DS코드의 칩 주기를 나타내며 $N_cT_c\le T_f$ 조건을 만족해야 한다. 다중 경로 채널과 협대역 간섭을 통과한 수신신호는 식 (3)과 같이 된다.

$$r_{single}(t)=\sum_{j=iN_s}^{(i+1)N_s-1}\sum_{l=0}^{L_p-1}\sum_{i=0}^{N_c-1}\sqrt{\frac{E_s}{N_s}}\,\alpha_l d_j c_i p(t-jT_f-iT_c-\tau_l)$$
$$+i(t)+n(t)\quad (Single\ user\ DS-UWB)$$

$$r^{(k)}(t)=\sum_{k=1}^{N_u}\sum_{j=iN_s}^{(i+1)N_s-1}\sum_{l=0}^{L_p-1}\sum_{i=0}^{N_c-1}\sqrt{\frac{E_s}{N_s}^{(k)}}\,\alpha_l^{(k)}d_j^{(k)}c_i^{(k)}$$
$$\cdot\ p(t-jT_f-iT_c-\tau_l^{(k)})+i(t)+n(t)$$
$$(Multiuser\ DS-UWB) \tag{3}$$

여기서 α_l은 채널감쇠이고 τ_l은 l번째 다중경로의 지연시간을 나타낸다. DS-UWB 시스템에서는 하나의 심볼주기 안에서 통계값을 가지는 2진 상관기가 사용된다.

$$v(t)=\sum_{j=iN_s}^{(i+1)N_s-1}\sum_{i=0}^{N_c-1}\sqrt{\frac{E_s}{N_s}}\,c_i\,p(t-jT_f-iT_c) \tag{4}$$

식 (4)에서 $v(t)$는 템플렛 신호를 나타내며 상관기를 통과한 신호는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$q(t)=\int_{(j-1)T_f}^{jT_f}r(t)\cdot v(t)\,dt \tag{5}$$

2.2 협대역 간섭 모델

5GHz UNII 대역에서 동작하는 IEEE 802.11a 시스템은 FCC에서 규정한 UWB 신호대역과 겹쳐지게 되고 UWB 신호는 IEEE 802.11a 시스템에 의해서 심각한 간섭을 받게 된다. 이 시스템은 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 전송기법을 사용하며 5.15-5.25, 5.25-5.35와 5.725-5.825GHz 대역에서 각 100 MHz의 대역폭을 갖는다. 이 주파수 대역폭은 다섯 개의 20MHz의 광대역 채널로 나누어지고 52개의(데이터 전송을 위한 48개와 채널추정을 위한 4개) 부반송파를 갖는다[7]. 중심극한정리에 의해서 복소기저대역 OFDM 신호는 사인반송파의 수가 클 때 대역제한된 AWGN 신호로 모델링된다[8][9]. 또한 간섭스펙트럼이 평평하고 스펙트럼의 사이드로브를 무시할 수 있다는 가정하에 IEEE 802.11a 신호는 그림 3과 같이 전력 스펙트럼 밀도 N_B를 가진 대역제한된 AWGN 신호로 모델링할 수 있다는 것을 확인하였다.

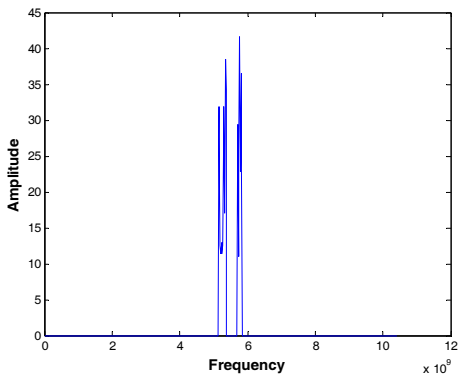


그림 3. 대역제한된 IEEE 802.11a 간섭모델

www.dbpia.co.kr

2.3 IEEE 802.15.4a 채널 모델

IEEE 802.15.4a 채널 모델은 IEEE 802.15.3a 채널 모델에 비해 보다 다양한 채널환경을 가지며 더 많은 측정 파라미터 값들을 갖는다.

IEEE 802.15.4a 채널 모델은 표 1과 같이 9개의 채널환경을 가지고 있으며 각각 다른 채널환경에 대해 LOS와 NLOS를 갖는다. IEEE 802.15.3a 채널 모델은 각 채널환경에서 대규모 페이딩에 대한 것을 파라미터로써 고려하지 않았지만 IEEE 802.15.4a 채널 모델에서는 경로손실과 섀도윙(shadowing)까지도 고려한다. 결론적으로, 각 채널환경에 대해서 보다 실제적으로 UWB 시스템에 대한 성능을 분석할 수 있다. Nakagami분포에서 파라미터들을 측정한 결과에 따라 지연시간의 증가로 인해 보다 큰 페이딩이 발생한다는 것을 알 수 있다. 따라서 짧은 지연에 대해서는 다중경로 요소들의 수가 적어지기 때문에 레일리분포가 적용될 수 있지만 긴 지연시간에 대해서는 다중경로 요소들의 증가로 인해서 레일리분포를 적용할 수 없다.

표 1. IEEE 802.15.4a 채널환경과 파라미터

4a	Indoor residential (7~20m)	LOS	CM1	PL_0 pathloss at 1m distance
		NLOS	CM2	n pathloss exponent
				σ_s shadowing standard deviation
	Indoor office (3~28m)	LOS	CM3	A_{ant} antenna loss
		NLOS	CM4	k frequency dependence of the pathloss
	Outdoor (5~17m)	LOS	CM5	$\bar{L}$ mean number of cluster
		NLOS	CM6	Λ inter-cluster arrival rate
	Industrial environments (2~8m)	LOS	CM7	$\lambda_1, \lambda_2, \beta$ ray arrival rates(mixed Poisson model parameters)
				Γ inter-cluster decay constant
		NLOS	CM8	k_γ, γ_0 intra-cluster decay time constant parameters
	Agricultual area /farms	NLOS	CM9	$\sigma_{cluster}$ cluster shadowing variance
				m_0, k_m Nakagami m factor mean
				$\widehat{m_0}, \widehat{k_m}$ Nakagami m factor variance
	Body-area network LOS/NLOS			$\widetilde{m_0}$ Nakagami m factor for strong components
				γ_{rise}, γ_1 and X parameters for alternative PDP shape

아래의 주어진 식에서, Nakagami분포는 파라미터 m이 1일 때, 레일리분포를 갖지만 로그노말 분포는 가질 수 없다. Nakagami분포의 확률밀도 함수는 식 (6)과 같다.

$$pdf(x) = \frac{2}{\Gamma(m)}\left(\frac{m}{\Omega}\right)^m x^{2m-1}\exp\left(-\frac{m}{\Omega}x^2\right) \qquad (6)$$

여기서 $m \geq 1/2$는 Nakagami계수이고 $\Gamma(m)$은 감마함수이며, Ω는 진폭의 평균 제곱값이다.

SV(Saleh Valenzuela)모델[10]의 임펄스 응답은 다음과 같다.

$$h_{discr}(t) = \sum_{l=0}^{L-1}\sum_{k=0}^{K-1}\alpha_{k,l}\exp(j\phi_{k,l})\,\delta(t - T_l - \tau_{k,l}) \qquad (7)$$

여기서 $\alpha_{k,l}$는 채널계수로써 l번째 클러스터의 k번째 레이의 다중경로 획득 상수이고 T_l는 l번째 클러스터의 도착시간이며, $\tau_{k,l}$는 l번째 클러스터내의 k번째 레이의 도착시간이다. l번째 클러스터 내의 첫 번째 레이의 도착시간 $\tau_{0,l} = 0$이다. 위상 $\phi_{k,l}$는 대역통과 시스템에 대해서 $[0, 2\pi]$ 범위에서 균일하게 분포되는 랜덤변수이며 클러스터 수 L은 채널 모델의 중요한 파라미터로 포아송분포를 갖는다.

$$pdf_L(L) = \frac{\overline{(L)}^L \exp\overline{(-L)}}{L!} \qquad (8)$$

식 (8)에서 L의 평균값 $\overline{(L)}$은 포아송분포의 특성 파라미터이다. 클러스터 도착시간은 포아송 프로세스에 의해서 다음과 같다.

$$P(T_l | T_{l-1}) = \Lambda_l \exp\left[-\Lambda_l\left(T_l - T_{l-1}\right)\right], l > 0 \qquad (9)$$

Λ_l는 클러스터의 도착율이고 레이 도착시간을 위해서 포와송 프로세스가 SV모델에서 사용된다. 실내의 주거와 실내 외 사무실 환경에서의 차이 때문에 두 개의 포아송 프로세스를 합쳐서 레이 도착시간을 모델링한다.

$$p(\tau_{k,l} | \tau_{(k-l),l}) = \beta\lambda_1 \exp\left[-\lambda_1(\tau_{k,l} - \tau_{(k-l),l})\right] + (\beta - 1)\lambda_2 \exp\left[-\lambda_2(\tau_{k,l} - \tau_{(k-l),l})\right], k > 0 \qquad (10)$$

β는 혼합 확률이고 λ_1과 λ_2는 레이 도착율이다.

www.dbpia.co.kr

클러스터와 레이의 개수 n_1과 n_2는 서로 독립이며 평균 전력지연 프로파일은 다음과 같다.

$$E\{|\alpha_{k,l}|^2\} = \Omega_l \frac{1}{\gamma_l[(1-\beta)\lambda_1 + \beta\lambda_2 + 1]} \exp(-\tau_{k,l}/\gamma_l) \quad (11)$$

식 (11)에서 각각의 클러스터나 총 클러스터의 전력이 지수적으로 감쇠한다는 것을 알 수 있다. Ω_l은 l번째 클러스터의 총 에너지이고 γ_l는 클러스터 내의 감쇠시간율이다. l번째 클러스터의 평균에너지는 일반적인 지수적 감쇠를 보여준다.

$$10\log(\Omega) = 10\log(\exp(-T_l/\Gamma)) + M_{duster} \quad (12)$$

M_{duster}는 표준편차 σ_{duster}를 가지는 분포변수이다. 특정 환경(사무실과 산업현장)의 NLOS를 위한 전력지연 프로파일의 형태는 약간 다르기 때문에 식 (13)과 같이 표현된다.

$$E\{|\alpha_{k,l}|^2\} = (1-\chi \cdot \exp(-\tau_{k,l}/\gamma_{rise}))\exp(-\tau_{k,l}/\gamma_1) \quad (13)$$
$$\cdot \frac{\gamma_1 + \gamma_{rise}}{\gamma_1} \frac{\Omega_1}{\gamma_1 + \gamma_{rise}(1-\chi)}$$

χ는 첫 번째 클러스터의 감쇠이며 γ_{rise}는 극대값에 대해 얼마나 빠르게 PDP가 증가하는가를 결정하고 γ_1는 지연 시간에서 감쇠를 결정한다.

Ⅲ. 특이값 분해를 이용한 협대역 간섭억압기법

본 장에서는 행렬을 근사화시키는 특이값 분해(singular value decomposition) 알고리즘을 사용하여 협대역 간섭을 UWB 신호로 부터 억압하는 기법을 제안한다. 이 같은 알고리즘은 데이터 압축, 신호처리, 패턴분석 등에 널리 사용되는 방법이다. 본 논문에서는 구조화된 행렬을 만들기 위한 최소제곱 근사법으로써 시스템과 제어이론에서 중요하게 사용되는 Hankel 행렬을 사용한다[11]. Hankel 행렬은 대칭행렬이며 반대 대각선위의 성분들이 서로 동일한 값을 가지므로 구조화된 행렬이라고 한다.

DS-UWB 시스템에서 송신된 신호는 IEEE 802.15.4a 채널을 통과하여 협대역 간섭과 AWGN 간섭을 지나친 후 수신기에 도달한다. 수신된 신호는 표본화된 후 다음과 같이 표현된다.

$$\mathrm{r(k)} = \mathrm{v(k)} + \mathrm{n(k)} + \mathrm{i(k)},\ \mathrm{k} = 1, 2, \ldots\ldots, \mathrm{M} \quad (14)$$

여기서 M은 수신된 신호에 대한 표본화 개수이며 이것은 시간 열 데이터에서 L=M-N+1 열과 N행으로 구성된 아래와 같은 Hankel 행렬로 표현된다.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathrm{r(1)} & \mathrm{r(2)} & \cdots & \mathrm{r(N)} \\ \mathrm{r(2)} & \mathrm{r(3)} & \cdots & \mathrm{r(N+1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \\ \mathrm{r(M-N+1)} & \mathrm{r(N-N+2)} & \cdots & \mathrm{r(M)} \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서 식 (14)를 식 (15)에 대입시키면 아래와 같이 H_{ln}이 구하여 진다.

$$\mathbf{H_{ln}} = \mathrm{r}(l+n-1), \quad \begin{matrix} l = 1, 2, \cdots, \mathrm{L} \\ n = 1, 2, \cdots, \mathrm{N} \end{matrix} \quad (16)$$

H는 특이값 분해에 의해서 식 (17)과 같이 특이값으로 인수분해 된다.

$$\mathbf{H} = \mathrm{U}\Sigma\mathrm{V}^{\mathrm{T}} = \sum_{i=1}^{p} \sigma_i u_i v_i^{\mathrm{T}} \quad (17)$$

여기서 U는 HH^{T}의 고유벡터로 L×L 유니터리 행렬이고 V는 $\mathrm{H}^{\mathrm{T}}\mathrm{H}$의 고유벡터인 N×N 유니터리 행렬을 말한다. $[\ ]^{\mathrm{T}}$는 공액전치행렬, $p = \min(l,n)$이고 $\Sigma = diag(\sigma_1, \sigma_2, \cdots, \sigma_p)$는 L×N 대각행렬을 나타낸다. Σ의 주대각선 위에 성분들은 H의 고유값이 아닌 고유값의 제곱근이며 특이값(σ_i)이라고 한다.

H의 계수 k가 $k \le \min(l,n)$일 때 특이값은 식 (18)과 같으므로

$$\sigma_1 \ge \sigma_2 \ge \cdots \ge \sigma_k > \sigma_{k+1} = \cdots = \sigma_p = 0 \quad (18)$$

Σ는 k개의 양의 실수와 $p-k$개의 영으로 되어 있는 대각행렬이 되고 대각행렬의 왼쪽 상단에는 가장 큰 특이값이 위치하게 된다.

백색잡음의 특성을 가지는 UWB 신호는 높은 에너지의 협대역 시스템의 간섭이 없을 때에는 거의 0에 가까운 특이값들을 가지게 된다. 하지만 UWB 시스템에 협대역 시스템의 간섭이 발생되면 높은 에너지의 간섭으로 인해서 보다 큰 값의 특이값들이 존재하게 된다. 이 같은 경우, 데이터행렬 H를 다음과 같이 두 개의 부분 공간으로 나눌 수 있다[12].

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_n & 0 \\ 0 & \Sigma_s \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\mathrm{U} = [\mathrm{U}_n\ \mathrm{U}_s] \quad (20)$$

$$\mathrm{V} = [\mathrm{V}_n\ \mathrm{V}_s]$$

www.dbpia.co.kr

협대역 시스템의 특이값들인 s가 $s \le k$일 때 U_n는 L×S 행렬, Σ_n는 S×S 대각행렬이고 V_n는 N×S 행렬로 표현되며 협대역 시스템의 강한 간섭신호와 관련된 성분들을 나타낸다. 반면 U_s는 L×(L-S) 행렬, Σ_s는 (L-S)×(N-S) 행렬, V_s는 N×(N-S) 행렬을 나타내며 협대역 시스템에 비해 상대적으로 낮은 에너지를 갖는 UWB 신호의 관련 성분들을 나타낸다.

$$\begin{aligned} H_n &= U_n \Sigma_n V_n^T \\ H_s &= U_s \Sigma_s V_s^T \\ H &= H_n + H_s \end{aligned} \tag{21}$$

식 (21)에서 H_n은 간섭 부분공간이고 H_s는 데이터 부분공간을 말한다. 따라서 수신된 H에서 간섭 부분공간인 H_n을 빼주게 되면 수신신호로부터 간섭이 억압된 UWB 신호의 데이터 행렬을 구할 수 있다.

이같이 특이값 분해를 사용하여 간섭을 제거하기 위해서는 다음과 같은 단계를 따른다.

첫 번째 $s < N < M - s$에서 N의 수를 정한다. 여기서 s는 높은 에너지를 가진 협대역 간섭의 큰 특이값들을 말하고 M은 DS-UWB 수신기에서 표본화된 지점들의 개수를 나타낸다.

두 번째 수신된 신호를 표본화시킨 신호벡터를 식 (15)와 같이 배열시켜서 Hankel 데이터 행렬을 생성한다.

세 번째 협대역 간섭 부분공간을 얻기 위해서 식 (17)을 이용하여 H의 특이값 분해를 계산하고 협대역 간섭이 억압된 UWB 데이터 행렬을 구하기 위해서 수신된 H에서 간섭 부분 공간인 H_n를 다음과 같이 빼준다.

$$\tilde{H} = H - H_n \tag{22}$$

마지막으로 식 (22)를 통하여 얻어진 행렬 $\tilde{H}$를 벡터로써 다시 배치하고 신호를 검출한다.

위에서 DS-UWB 시스템에 미치는 협대역 간섭을 억압하기 위해 제안된 특이값 분해 알고리즘의 성능은 다음과 같이 평가된다.

$H_s = U_s \Sigma_s V_s^T$는 협대역 간섭이 존재하지 않을 때 수신된 데이터 행렬의 특이값 분해이고 $\tilde{H} = \tilde{U}\tilde{\Sigma}\tilde{V}^T$는 제안된 기법에 의해서 협대역 간섭이 억압되었을 때 수신된 데이터 행렬의 특이값 분해이다. $\tilde{\Sigma}$는 식 (21)에 대각행렬 Σ 안에 배열된 k개의 특이값들을 0으로 대체시키므로 얻어진다. 이런 행렬의 근사화에서 최소제곱오차는 다음과 같다.

$$\delta^2_{SVD} = \| H_s - \tilde{H} \|^2 = trace\left[\left(H_s - \tilde{H}\right) - \left(H_s - \tilde{H}\right)^T \right] \tag{23}$$

식 (23)은 간단한 계산으로 식 (24)와 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \delta^2_{SVD} = trace[& U_s \Sigma_s^2 U_s^T - U_s \Sigma_s V_s^T \tilde{V} \tilde{\Sigma} \tilde{U}^T \\ & - \tilde{U} \tilde{\Sigma} \tilde{V}^T V_s \Sigma_s U_s^T + \tilde{U} \tilde{\Sigma}^2 \tilde{U}^2] \end{aligned} \tag{24}$$

$U_s \approx \tilde{U}$와 $V_s \approx \tilde{V}$라고 가정하면 특이값 분해 알고리즘의 성능은 식 (25)와 같이 근사화될 수 있다.

$$\delta^2_{SVD} \approx \sum_{i=1}^{k} \sigma_i^2 < k\sigma^2_{\max} \tag{25}$$

σ_i는 협대역 간섭이 존재하지 않을 때 H_s의 신호벡터의 특이값들을 나타내고 $\sigma_{\max}$는 특이값들 중에서 가장 큰 값을 의미한다. 0에 가까운 $\sigma_{\max}$ 값을 갖을 때, 최대 분산 δ^2_{SVD} 또한 작은 값을 갖게 되므로 특이값 분해를 이용하여 협대역 간섭을 효과적으로 억압할 수 있다. 또한 근사화를 통해 얻어진 데이터 행렬 $\tilde{H}$는 주어진 데이터 행렬 H_s에 대해 낮은 계수의 최소제곱 근사화를 갖게 된다.

Ⅳ. 단일 사용자 DS-UWB 시스템과 다중 사용자 DS-UWB 시스템의 성능분석

4.1 신호대 잡음비와 신호대 간섭비

$$SIR = P_{UWB} / P_{NBI}$$
(UWB 신호대 협대역 간섭비)

$$SNR = P_{UWB} / 2\sigma^2$$
(UWB 신호대 AWGN비)
(26)

여기서 P_{UWB}는 UWB 신호 전력이고 P_{NBI}는 협대역 간섭 전력을 나타내며 σ^2은 AWGN의 분산을 말한다. 대역제한된 전력 스펙트럼 밀도 N_B를 가진 AWGN으로 모델링된 IEEE 802.11a 신호전력 P_{NBI}

www.dbpia.co.kr

는 N_B와 협대역 간섭의 대역폭 B의 곱을 통해 구할 수 있다. 본 논문에서는 DS-UWB 시스템에 대해 IEEE 802.11a의 간섭이 최대가 되게 하기 위해서 협대역 간섭신호의 대역폭 B를 300MHz로 놓는다.

4.2 단일 사용자 DS-UWB 시스템 성능 분석

단일 사용자 DS-UWB 시스템 상관기의 출력신호로 부터 SNR과 SIR을 계산할 수 있다. 상관기의 출력신호 $q(t)$는 식 (4)를 식 (5)에 대입시켜서 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} q(t) &= \sum_{j=0}^{N_s-1} \int_{(j-1)T_f}^{jT_f} r_{single}(t) \cdot v(t) dt \\ &= U + I + N \end{aligned} \tag{27}$$

여기서 U는 단일 사용자 DS-UWB의 상관기 출력을 의미하고 식 (28)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} U = \sum_{j=0}^{N_s-1} \int_{(j-1)T_f}^{jT_f} [\sum_{l=0}^{L_u-1} \sum_{i=0}^{N_c-1} \sqrt{\frac{E_s}{N_s}} \alpha_l d_j c_i p(t - jT_f - iT_c - \tau_l) \\ \cdot \sum_{h=0}^{N_c-1} \sqrt{\frac{E_s}{N_s}} c_h p(t - jT_f - hT_c)] dt \end{aligned} \tag{28}$$

I는 협대역 간섭신호의 상관기 출력으로 식 (29)와 같이 표현되며

$$I = \sum_{j=0}^{N_s-1} \int_{(j-1)T_f}^{jT_f} i(t) \cdot \sum_{i=0}^{N_c-1} \sqrt{\frac{E_s}{N_s}} c_i p(t - jT_f - iT_c) dt \tag{29}$$

N은 평균값이 0이고, 분산이 $N_0 N_s N_c/2$를 갖는 가우시안 랜덤변수 AWGN의 상관기 출력으로 식 (30)과 같다.

$$N = \sum_{j=0}^{N_s-1} \int_{(j-1)T_f}^{jT_f} n(t) \cdot \sum_{i=0}^{N_c-1} \sqrt{\frac{E_s}{N_s}} c_i p(t - jT_f - iT_c) dt \tag{30}$$

따라서 단일 사용자 DS-UWB 시스템에서 상관기 출력신호로 부터 SIR과 SNR은 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} SIR_{out} &= \frac{E\{U^2\}}{E\{I^2\}} \\ SNR_{out} &= \frac{E\{U^2\}}{E\{N^2\}} = \frac{E\{U^2\}}{N_0 N_s N_c/2} \end{aligned} \tag{31}$$

여기서 $E\{\cdot\}$는 시간평균을 나타내기 위해서 사용되었다. 따라서 단일 사용자 DS-UWB 시스템의 비트 에러율(BER)은 아래와 같이 표현될 수 있다[13].

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{E\{U^2\}}{E\{I^2\} + E\{N^2\}}} \right) = Q\left(\sqrt{\frac{2E\{U^2\}}{2E\{I^2\} + N_o N_s N_c}} \right) \tag{32}$$

4.3 다중 사용자 DS-UWB 시스템 성능 분석

다중 사용자 DS-UWB 시스템의 상관기의 출력신호 $q(t)$는 식 (33)과 같다.

$$\begin{aligned} q(t) &= \sum_{j=0}^{N_s-1} \int_{(j-1)T_f}^{jT_f} r^{(k)}(t) \cdot v(t) dt \\ &= U + M + I + N \end{aligned} \tag{33}$$

여기서 U는 다중 사용자 DS-UWB의 상관기 출력을 의미하고 식 (34)와 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} U = \sum_{j=0}^{N_s-1} \int_{(j-1)T_f}^{jT_f} [\sum_{l=0}^{L_u-1} \sum_{i=0}^{N_c-1} \sqrt{\frac{E_s^{(1)}}{N_s}} \alpha_l^{(1)} d_j^{(1)} c_i^{(1)} p(t - jT_f - iT_c - \tau_l^{(1)}) \\ \cdot \sum_{h=0}^{N_c-1} \sqrt{\frac{E_s}{N_s}} c_h p(t - jT_f - hT_c)] dt \end{aligned} \tag{34}$$

상관함수를 식 (35)와 같이 정의하고

$$I(\delta) = \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{\frac{E_s}{N_s}} p(t) \cdot \sqrt{\frac{E_s}{N_s}} p(t - \delta) dt \tag{35}$$

$$\Delta^{(k)} = (c_i^{(1)} - c_i^{(k)}) T_c + (\tau_l^{(1)} - \tau_l^{(k)}) \tag{36}$$

$\Delta^{(k)}$를 식 (36)이라고 한다면 M의 상관기 출력은 식 (37)과 같다.

$$M = N_s N_c \sum_{k=2}^{N_u} \sum_{j=0}^{N_s-1} \alpha_l^{(k)} d_j^{(k)} I(\Delta^{(k)}) \tag{37}$$

www.dbpia.co.kr

I는 협대역 간섭신호의 상관기 출력으로 식 (29)와 같이 표현되며 평균값이 0이고 분산이 $I(0)N_0N_sN_c/2$를 갖는 N은 가우시안 랜덤변수 AWGN의 상관기 출력으로 식 (30)과 같다. 다중 사용자 DS-UWB 시스템에서 SIR과 SNR은 식 (38)과 같이 나타낼 수 있다.

$$SIR_{out} = \frac{E\{U^2\}}{E\{I^2\}} \tag{38}$$

$$SNR_{out} = \frac{E\{U^2\}}{E\{N^2\}} = \frac{E\{U^2\}}{I(0)N_0N_sN_c/2}$$

따라서 다중 사용자 DS-UWB 시스템의 비트 에러율(BER)은 식 (39)와 같이 표현될 수 있다.

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{E\{U^2\}}{E\{M^2\}E\{I^2\}+E\{N^2\}}}\right) \tag{39}$$

$$= Q\left(\sqrt{\frac{2E\{U^2\}}{2E\{M^2\}+2E\{I^2\}+I(0)N_oN_sN_c}}\right)$$

Ⅴ. 모의실험

모의실험에서는 DS-UWB 시스템에 심각한 영향을 주는 IEEE 802.11a 간섭을 억압하기 위해서 제안된 특이값 분해 알고리즘 간섭억압기법의 성능을 평가한다. DS-UWB 시스템에서 전송되는 신호는 표 2에 있는 파라미터 값에 따라 DS-BPSK 신호로 모델링된다.

표 2. DS-UWB 시스템의 파라미터 값

Parameter	Notation	Values
Frame Width	T_f	50ns
Chip Width	T_c	2ns
Pulse Width	T_p	1ns
Number of Users	N_u	1, 3, 7
Number of Chips per Frame	N_c	25
Channel environments (Indoor office LOS and NLOS)	CM	$CM3$ $CM4$

다중경로 채널 모델로써 IEEE 802.15.4a 채널 모델[10]인 실내 LOS 사무실 환경(CM3)과 실내 NLOS 사무실 환경(CM4)이 사용되었다.

특이값 분해 알고리즘이 적용된 단일 사용자 DS-UWB 시스템과 다중 사용자 DS-UWB 시스템의 간섭억압 성능을 평가하기 위해서 사용자 수 N_u = 1, 3, 7 에 대해 각각의 성능을 분석하였다. 그림 4는 CM3에서 각각 SIR=-10dB, -20dB, -30dB일 때 특이값 분해 알고리즘에 의해서 IEEE 802.11a 간섭신호가 억압된 결과를 보여준다. 협대역 간섭신호가 존재하지 않는 AWGN은 간섭억압기법이 적용된 DS-UWB 시스템의 성능을 평가하기 위해서 사용되었고 N의 수는 $s<N<M-s$에서 $N=M/4$로 정해주었다. 그림 4를 통해서 제안된 간섭억압기법은 IEEE 802.11a의 간섭을 DS-UWB 시스템에서 효과적으로 억압시킨 것을 확인할 수 있다.

SIR=-30dB에서 특이값 분해 알고리즘이 적용된 DS-UWB 시스템은 SIR=-10dB에서 특이값 분해 알고리즘이 적용되지 않은 DS-UWB 시스템에 비해 BER이 10^{-2}인 지점에서 4dB의 성능향상을 보여준다. 그림 5는 CM4에서 IEEE 802.11a 간섭신호가 제안된 간섭억압기법에 의해서 효과적으로 억압된 것을 확인할 수 있다. 특이값 분해 알고리즘이 적용된 DS-UWB 시스템은 적용되지 않은 DS-UWB 시스템에 비해 상당히 좋은 BER 성능향상을 보여준다. CM3에서 특이값 알고리즘이 적용된 DS-UWB 시스템과 비교했을 때 BER이 10^{-2}에서 약 2dB의 성능 저하를 보여준다. 이것은 NLOS 채널에서 발생된 다중경로 지연으로 인해서 보다 많은 ISI가 CM4에 발생한다는 것을 의미한다.

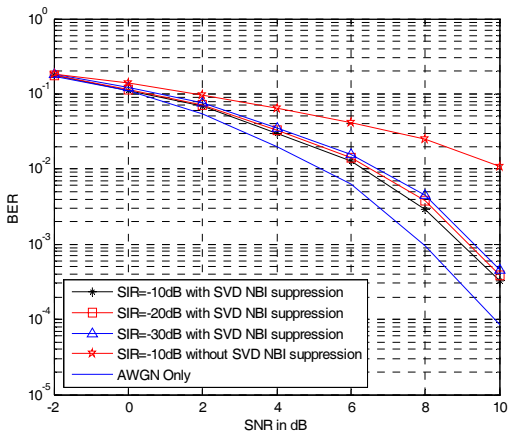


그림 4. CM3에서 간섭이 억압된 DS-UWB 시스템

www.dbpia.co.kr

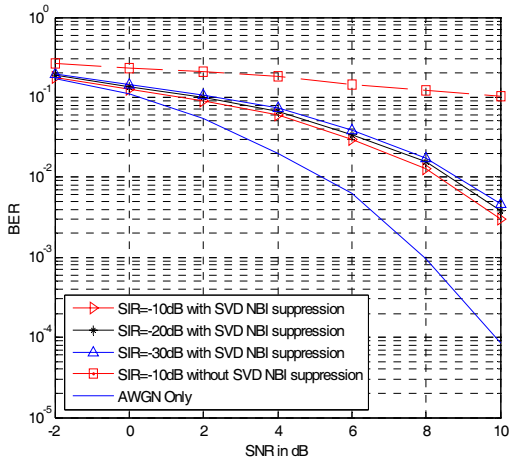


그림 5. CM4에서 간섭이 억압된 DS-UWB 시스템

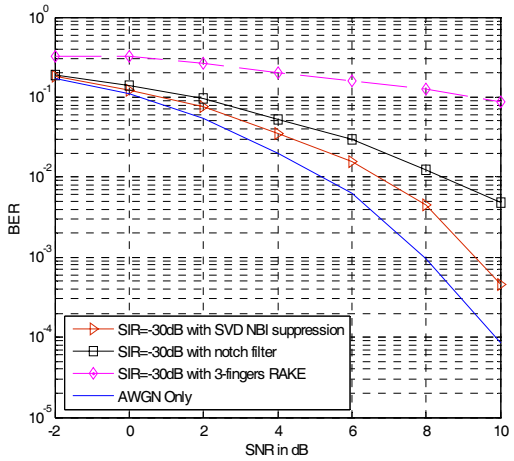


그림 6. CM3에서 기존의 간섭억압기법과 특이값 분해 알고리즘이 적용된 DS-UWB 시스템

그림 6에서는 특이값 분해 알고리즘을 사용한 간섭억압기법이 기존에 제안되었던 협대역 간섭억압기법보다 우수한 BER 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. SIR=-30dB일 때 CM3에서 특이값 분해 알고리즘이 적용된 단일 사용자 DS-UWB 시스템은 기존의 협대역 간섭억압기법으로 제안되었던 Notch필터에 비해서 10^{-2}에서 약 2dB 향상된 BER 성능을 보인다. 여기서 사용된 Notch필터는 ChebyshevII IIR 대역저지 필터로써 1dB 통과대역과 40dB의 저지 대역 감쇠를 갖는다. Rake 수신기가 사용된 DS-UWB 시스템에 대해서도 특이값 분해 알고리즘이 적용된 DS-UWB 시스템이 월등히 향상된 BER 성능을 보여준다.

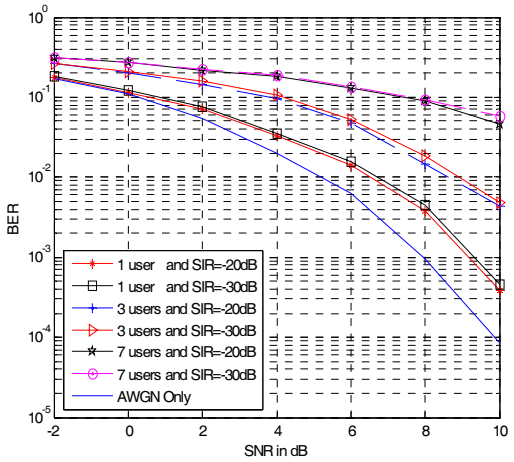


그림 7. CM3에서 간섭이 억압된 단일 사용자 DS-UWB 시스템과 다중 사용자 DS-UWB 시스템

그림 7은 간섭억압기법이 적용된 단일 사용자 DS-UWB 시스템과 다중 사용자 DS-UWB 시스템의 성능을 SIR=-20dB, -30dB일 때 분석하였다. 사용자 수 N_u가 각각 1, 3, 7일 때의 성능을 확인할 수 있다. 단일 사용자 DS-UWB 시스템에 비해 사용자 수가 3명인 다중 사용자 DS-UWB 시스템은 BER이 10^{-2}에서 약 2dB 정도의 성능 저하를 보인다. 이것은 다중 사용자 접속에 의해서 발생되는 간섭에 의한 것임을 알 수 있다. 하지만 그림 4의 SIR=-10dB 일 때 특이값 분해 알고리즘이 사용되지 않은 단일 사용자 DS-UWB 시스템과 비교하였을 때 사용자 수 3명인 다중 사용자 DS-UWB 시스템이 약 1dB의 향상된 BER 성능을 보여준다. 이를 통해 특이값 알고리즘이 사용된 간섭억압기법은 단일 사용자 DS-UWB 시스템뿐만 아니라 다중 사용자 DS-UWB 시스템에서도 BER 성능을 향상시키는 것을 확인할 수 있었다.

Ⅵ. 결 론

본 논문에서는 DS-UWB 시스템에 심각한 간섭을 미치는 IEEE 802.11a의 간섭을 억압하기 위해서 특이값 분해 알고리즘이 적용된 새로운 간섭억압기법을 제안하였다. 모의실험 결과를 통해서 데이터 행렬의 특이값 분해는 높은 에너지를 갖는 IEEE 802.11a 간섭에 대한 특이값을 찾는데 매우 효과적이고 이를 통해 IEEE 802.11a 간섭이 제거된 데이터를 얻을 수 있는 것을 확인하였다. 기존의 협대역

www.dbpia.co.kr

간섭억압기법과 제안된 새로운 억압기법을 비교한 결과 특이값 분해 알고리즘이 적용된 간섭억압기법이 IEEE 802.11a의 간섭을 억압하는데 보다 효과적이라는 것을 알 수 있었다. 제안된 간섭억압기법은 복잡도를 크게 줄이면서 협대역 간섭을 강력히 억압할 수 있는 방법으로 단일 사용자 DS-UWB 시스템뿐만 아니라 다중 사용자 DS-UWB 시스템에서도 BER 성능이 향상된 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

〔1〕 D. Porcino and W. Hirt, "Ultra-Wideband Radio Technology: Potential and Challenges Ahead," *IEEE Commun. Mag.*, pp.66-74, Jul. 2003.

〔2〕 오미경, 김명종, 김재영, "유비쿼터스홈 구축을 위한 저속 위치인식 UWB 기술," *전자통신동향분석* 제21권 제5호 pp.30-39, 2006년 10월.

〔3〕 J. Foerster, "Ultra-wideband Technology Enabling Low-power, High-rate Connectivity invited paper," in *Proc. IEEE Workshop Wireless Commun. Networking*, *Pasadena, CA*, Sep. 2002.

〔4〕 T. Ikegami and K. Ohno, "Interference Mitigation Study for UWB Impulse Radio," in *Proc. IEEE Personal, Indoor, Mobile Radio Communications (PIMRC)*, vol. 1, pp. 583 - 587, Sep. 2003.

〔5〕 J. R .Foerster, "The Performance of A Direct-Sequence Spread Ultra Wideband System in the Presence of Multipath, Narrowband Interference and Multiuser Interference," *IEEE Conf. on Ultra Wideband Systems and Technologies,* pp. 87-91, 2002.

〔6〕 I. Bergel, E. Fishler, and H. Messer, "Narrow-band Interference Suppression in Impulse Radio Systems," in *IEEE Conf. on UWB Systems Technology, Baltimore, MD*, pp. 303-307, May 2002.

〔7〕 J. Bellorado, S. S. Ghassemzadeh, L.J.Greenstein, T.Sveinsson, and V.Tarokh, "Coexistence of ultra-wideband systems with IEEE-802.11a wireless LANs," *IEEE Conf. Globecom 2003*, vol.1, pp.410-414, Dec. 2003.

〔8〕 R.Gross and D.Veeneman, "Clipping distortion in DMT ADSL systems," *Electronics Letters*, vol. 29, no. 24, pp.2080-2081, Nov. 1993.

〔9〕 P. Banelli, "Theoretical Analysis and Performance of OFDM Signals in Nonlinear Fading Channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 2, no. 2, pp. 284-293, Mar. 2003.

〔10〕 A.F. Molisch et al.,"IEEE 802.15.4a channel model-final report," *IEEE 802.15.4a subgroup*, Feb. 2005.

〔11〕 Shin-ho Wang, "System identification via singular value decomposition," *Electronics Letter*, vol.32, no.1, pp76-78 Jan. 1996.

〔12〕 Nalan Ozkurt and F.Acar Savaci, "Determination of Wavelet Ridges of Nonstationary Signals by Singular Value Decomposition,"*IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol.52, No.8, Aug. 2005.

〔13〕 Kwang Park, Jeungmin Joo, "Effects of Timing Jitter in Low-Band DS-BPSK UWB System Under Nakagami-m Fading Channels," *IEEE Tencon 2004*, vol.c.21-24, pp149-152 vol.3 Nov. 2004.

김 동 희 (Dong Hee Kim) 준회원

2006년 2월 경원대학교 전기 전자 공학부(전자공학 전공) 학사 졸업

2006년 3월~현재 인하대학교 정보통신대학원 석사과정

<관심분야> UWB, OFDM, Cognitive Radio

김 태 훈 (Tae Hun Kim) 준회원

2006년 2월 인하대학교 전자 전기 컴퓨터 공학부 (전기전공) 학사 졸업

2006년 3월~현재 인하대학교 정보통신대학원 석사과정

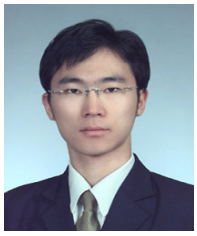
<관심분야> Cognitive Radio, UWB, OFDM, RFID

www.dbpia.co.kr

장 홍 모 (Hong Mo Jang) 준회원

2006년 2월 명지대학교 전기 전자 공학부(전자 공학 전공) 학사 졸업
2006년 3월~현재 인하대학교 정보통신대학원 석사과정
<관심분야> Cognitive Radio, UWB, OFDM

박 호 환 (Ho Hwan Park) 준회원



2004년 2월 인하대학교 전자공학과 학사 졸업
2006년 2월 인하대학교 정보통신대학원 석사 졸업
2006년 2월~현재 텔릿 연구원
<관심분야> UWB, OFDM, MIMO

곽 경 섭 (Kyung Sup Kwak) 종신회원

1977년 2월 인하대학교 전기공학과 학사 졸업
1981년 12월 미국 USC 전기공학과 석사 졸업
1988년 2월 미국 UCSD 통신이론 및 시스템 박사
1988년 2월~1989년 2월 미국 Hughes Network Systems 연구원
1989년 2월~1990년 3월 미국 IBM Network Analysis Center 연구원
2000년 3월~2002년 2월 인하대학교 정보통신대학원 원장
2006년 1월~2006년 12월 한국통신학회 회장
2000년 3월~현재 인하대학교 정보통신대학원 교수
2003년 8월~현재 인하대학교 초광대역 무선통신 연구센터(UWB-ITRC) 센터장
<관심분야> 위성 및 이동통신, UWB, 무선네트워크

www.dbpia.co.kr