

다경로 환경에서 WLAN 시스템을 위한 스마트 안테나의 성능 분석에 관한 연구

A Study on Performance Analysis of Smart Antennas for WLAN System in a Multipath Environment

김 현 웅 · 장 병 건

Hyun-Woong Kim · Byong-Kun Chang

요 약

본 논문에서는 IEEE 802.11b WLAN 시스템에서 간섭 억제에 관한 효과적인 기술을 제시하였다. 선형 제약형 적응 어레이 처리기는 동일 채널 간섭 신호와 다중 경로 효과를 효과적으로 감소시켜 WLAN 장치의 수신 성능 향상을 위하여 제안되었다. 공간 유향 방법은 다중경로 환경에서 원하는 신호의 왜곡을 방지하는데 사용되며, integral null 지정 방법은 실내 환경에서 어레이 성능을 향상시키기 위해 제안하였다. 공간 유향 방법이 선형 제약형 방법보다 성능이 보다 우수하였으며, integral null 지정 방법을 적용한 어레이 시스템이 가장 좋은 성능을 나타내었다. 본 논문에서 제안된 방법은 동일 채널 신호, 다중 경로 신호, 그리고 WPAN 간섭을 효과적으로 제거함으로써 WLAN의 성능이 향상될 것으로 기대된다.

Abstract

This paper presents an efficient technique for interference suppression in IEEE 802.11b WLAN systems. A linearly constrained adaptive array processor which may improve reception performance of WLAN device by reducing co-channel interference signal and multipath effects effectively was proposed. A spatial smoothing method is used to prevent cancellation of a desired signal in a coherent environment and also integral nulling method is employed to improve the array performance in indoor environment. It was shown that the integral nulling approach performed best while the spatial smoothing method performed better than linearly constrained array processing. The performance of the WLAN system may be improved by the proposed methods which reduce co-channel, coherent, and WPAN interferences effectively.

Key words : WLAN, WPAN, Array, Smart Antenna

I. 서 론

IEEE 802.11b를 기반으로 하는 WLAN(Wireless Local Area Network)은 전파를 이용한 고속, 근거리, 양 방향 데이터 통신 시스템이며, 일반적으로 PDA나 노트북과 같은 휴대형 단말기를 이용하여 가정이나

기업 또는 특정 무선랜 서비스 제공지역에서 무선으로 초고속 인터넷에 접속이 가능하게 한다^[1]. 그러나 무선랜 시스템은 환경의 특성상 다중경로 신호로 인한 신호 왜곡 가능성이 있으며, 채널 수가 한정되어 있기 때문에 사용자가 늘어날수록 사용자간의 채널 공유로 인한 간섭을 초래하는 문제가 있다. 또한, 2.4

「이 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 인천대학교 멀티미디어연구센터의 지원으로 연구되었음.」

인천대학교 전기공학과(Department of Electric Engineering, University of Incheon)

· 논문 번호 : 20041105-12S

· 수정완료일자 : 2004년 12월 23일

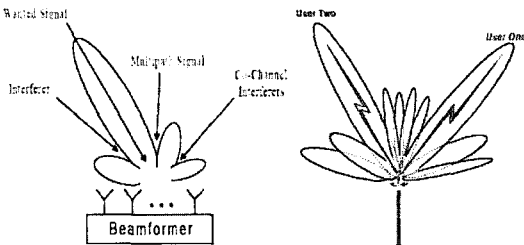
GHz 대역을 사용하는 다른 근거리 무선 통신 기술이나 가정용 기기와의 상호 간섭 문제도 중요한 이슈로 떠오르고 있다. 이러한 주파수 간섭은 대부분의 경우 전송 속도(throughput)의 저하를 초래하고, 심각한 경우에는 블로킹(blocking)이 일어나 통신이 두절되는 현상이 발생하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 무선랜 시스템에 선형제약형 적응 어레이 처리기와 공간 유화 방법, 그리고 Integral Null 지정 방법을 이용한 스마트 안테나 기술을 적용하여, 기존의 무선랜 시스템에서 사용하고 있는 안테나의 빔 패턴 및 수신 신호와 비교하여 HR/DSSS WLAN의 수신 성능을 분석하였다.

II. 스마트 안테나의 개요 및 적용

2-1 스마트 안테나의 개요

스마트 안테나 기술은 전 방향으로 빔 패턴을 형성하는 대신 해당 사용자에게만 지향성의 빔을 방사함으로써 셀(Cell) 내에서 활동하고 있는 다른 간섭 신호원으로부터의 간섭 효과를 최소화함으로써 통신 품질과 용량을 높일 수 있는 기술이다. 그림 1에서는 다중 접속 환경에서 스마트 안테나가 간섭 신호를 최소화하는 개념도를 나타낸다.

스마트 안테나를 사용함으로써 신호의 이득이 증가하게 되고, 커버리지가 확장되므로 WLAN 시스템에서 AP(Access Point)의 수를 줄일 수 있게 된다. 또한 SINR(Signal to Interference plus Noise Ratio)이 증가함으로써 간섭 신호를 최소화 할 수 있고, 다중 경로 효과의 감소도 기대할 수 있다.



(a) 빔패턴 (b) 2 사용자의 경우
(a) Beam pattern (b) Beam pattern for 2-user

그림 1. 다중접속환경을 위한 beamforming 개념
Fig. 1. Beamforming concept for multiple access.

2-2 선형 제약형 적응 어레이 처리 방법

선형 제약형 적응 어레이 처리 방법은 원하는 신호의 방향과 주파수 성분에 대한 정보를 선형 제약 조건으로 하여 어레이 출력을 최소화시키도록 어레이 계수를 반복적으로 조정하는 방법이다. 이와 같이 출력을 최적화시키기 위하여 아래와 같은 선형 제약형 LMS(Linearly Constrained Least Mean Squares) 알고리즘^[2]을 사용한다.

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{P}[\mathbf{w}(k) - \mu \mathbf{y}(k) \mathbf{x}(k)] + \mathbf{Q} \quad (1)$$

여기서

$$\mathbf{P} = \mathbf{I} - \mathbf{C}(\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \quad (2)$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{C}(\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{h} \quad (3)$$

이다. $\mathbf{w}(k)$ 는 계수벡터이고 μ 는 수렴계수이며, $\mathbf{x}(k)$ 는 입력 신호 벡터이고, $\mathbf{y}(k)$ 는 어레이 출력이며, k 는 이산시간 표시 기호이다. \mathbf{P} 는 전치 선형 제약 조건 행렬의 null space에 대한 투사(projection) 행렬이며, \mathbf{Q} 는 선형 제약 hyperplane에 수직인 벡터로서 초기계수로 사용되어 적응 알고리즘 수행 중 발생하는 반올림 오차나 축적되는 오차를 방지하는 역할을 한다.

2-3 공간 유화 방법

선형 제약형 어레이 처리기를 사용할 경우 원하는 신호와 간섭 신호가 서로 상관관계가 있으면 두 신호간의 상호 상쇄 작용으로 인하여 원하는 신호를 제대로 추정하지 못하게 된다. 이와 같은 현상을 방지하기 위하여 공간 유화 방법^[3]을 사용할 수 있다.

그림 2에 N 개의 안테나로 구성된 어레이 내에 M 개로 구성된 서브어레이를 구성하였다.

서브어레이간의 간격을 d 라고 하면 첫 번째 서브어레이부터 시작하여 l 번째 서브어레이의 입력 신호 벡터는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}_l(k) = \mathbf{A} \mathbf{B}^{(l-1)} \mathbf{s}(k) + \mathbf{r}(k) \quad (4)$$

여기서 신호 벡터 $\mathbf{s}(k)$ 는 원하는 신호와 상관관계가 있는 간섭 신호를 포함한 입력 신호 벡터이며, 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{s}(k) = [\mathbf{s}_0(k) \ \mathbf{s}_1(k) \ \cdots \ \mathbf{s}_{I-1}(k)]^T \quad (5)$$

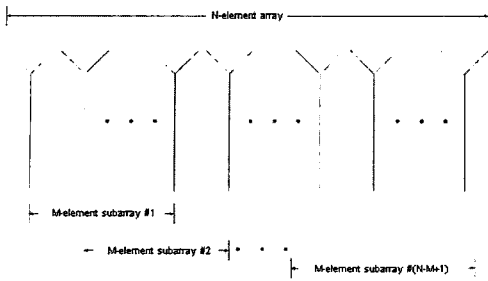


그림 2. 공간유화방법에서의 subarray 구조
Fig. 2. Subarray structure in spatial smoothing method.

여기서 $s_0(k)$ 를 원하는 신호라고 가정한다.

B 는 대각행렬로서 다음과 같이 주어진다.

$$B = \text{diag}\{ e^{-j\phi_0}, e^{-j\phi_1}, \dots, e^{-j\phi_{I-1}} \} \quad (6)$$

여기서

$$\phi_i = \omega d \sin \theta_i / v, 0 \leq i \leq (I-1) \quad (7)$$

ω 는 입력 신호의 radian 주파수이고, θ_i 는 i 번째 간섭 신호의 입사 각도, v 는 입력 신호의 전파 속도이며 $j = \sqrt{-1}$ 이다. $r(k)$ 는 각 안테나 소자에서 발생하는 잡음으로 구성된 잡음 벡터로서 백색 Gaussian 잡음으로 가정한다.

A 는 서브어레이에 대하여 식 (8)과 같이 정의되며, $M \times I$ 행렬이다.

$$A = [a_0 \quad a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_{I-1}]^T \quad (8)$$

여기서 $a_i, 1 \leq i \leq (I-1)$ 는 i 번째 간섭 신호의 조정 벡터(steering vector)이며

$$a_i = [e^{-j\phi_i}, e^{-j2\phi_i}, \dots, e^{-j(M-1)\phi_i}]^T \quad (9)$$

l 번째 서브어레이의 입력신호의 상관행렬을 구하면

$$R'_{xx} = AB^{(l-1)} R_{ss} B^{(l-1)H} A^H + \sigma^2 I \quad (10)$$

여기서 $R_{ss} = E[s(t) s^H(t)]$ 이며, σ^2 은 잡음신호의 전력이다. 각 서브어레이의 상관행렬의 평균을 구하면

$$R_{ave} = \frac{1}{N-M+1} \sum_{l=1}^{N-M+1} R'_{xx} \quad (11)$$

이 되고 식 (10)을 식 (11)에 대입하여 정리하면

$$R_{ave} = A \hat{R}_{ss} A^H + \sigma^2 I \quad (12)$$

여기서

$$\hat{R}_{ss} = \frac{1}{N-M+1} \sum_{l=1}^{N-M+1} B^{(l-1)} R_{ss} (B^{(l-1)})^H \quad (13)$$

이 된다. 식 (13)에서 각 l 에 대하여 R_{ss} 각 행을 $B^{(l-1)}$ 만큼 회전시키고 다시 $B^{(l-1)H}$ 만큼 역회전시키는데 diagonal 방향의 요소들은 그대로 보존되고 off-diagonal 요소는 각 회전간의 위상 정도가 차이가 나게 되어 모든 l 에 대하여 회전된 행렬 성분을 더하게 되면 diagonal 요소들은 일정하게 유지되고 off-diagonal 요소들은 줄어들게 되어, R_{ss} 의 rank는 1이지만 \hat{R}_{ss} 의 rank는 I 로 된다. 따라서 R_{ave} 를 입력 신호의 상관 행렬로 사용할 경우에는 입력되는 원하는 신호와 간섭 신호들 상호간의 상관관계가 없는 것으로 간주되어 간섭 신호가 효율적으로 제거되게 된다.

2.4 Integral Null 지정 방법

Integral null 지정 방법^[4]은 간섭 신호가 공간적으로 넓은 대역에 걸쳐서 입사될 경우 해당 범위에 넓은 null을 형성하여 일련의 간섭 신호를 제거하는데 효율적이다. 이것은 건물의 실내 공간에서와 같이 다경로 신호가 한 범위에 집중적으로 입사되는 상황에 사용할 때 효과적이다.

N 개의 안테나와 각 안테나에 M taps로 이루어진 선형 광대역 어레이에 평면파가 입사될 때 공간에 관한 응답함수는 다음과 같이 주어진다.

$$H(u) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=0}^{M-1} w_{ik} e^{-j\omega(idu + kT)} \quad (14)$$

여기서 $\omega = 2\pi f$, d 는 안테나간의 거리, $u = \sin \theta$, T 는 sampling 시간이며 tap 간격이 된다.

신호의 입사범위가 $u_l(\sin \theta_l) \sim u_u(\sin \theta_u)$ 라고 가정하고, 공간 응답함수를 이 범위에서 u 에 대하여 적분하면 아래와 같은 공간 적분응답함수를 구할 수 있다.

$$\int_{u_l}^{u_u} H(u) du = \sum_{i=1}^N \sum_{k=0}^{M-1} w_{ik} \frac{e^{-j\omega(idu_u + kT)} - e^{-j\omega(idu_l + kT)}}{-j\omega id} \quad (15)$$

식 (15)를 실수부와 허수부로 구분하여 선형 제약 조건으로 나타내면,

$$c^T w = 0 \tag{16}$$

$$s^T w = 0 \tag{17}$$

여기서

$$w = [w_{11} \ w_{21} \ \dots \ w_{M1} \ w_{12} \ w_{22} \ \dots \ w_{N2} \ \dots \ w_{1(M-1)} \ w_{2(M-1)} \ \dots \ w_{N(M-1)}] \tag{18}$$

$NM \times 1$ 열벡터인 c 와 s 의 i 번째 요소는 다음과 같다.

$$c_i = \frac{\sin[-\omega(rdu_u + qT)] - \sin[-\omega(rdu_l + qT)]}{-\omega rd} \tag{19}$$

$$s_i = \frac{-\cos[-\omega(rdu_u + qT)] + \cos[-\omega(rdu_l + qT)]}{-\omega rd} \tag{20}$$

r 은 $N/(i-1)$ 의 나머지이고 q 는 뚫이 된다.

선형 제약형 적응 어레이 처리기에 integral null을 적용하기 위하여 식 (2)와 식 (3)에 주어진 제약 행렬 C 와 제약 벡터 h 를 integral null을 수용하도록 다음과 같이 변형하게 된다.

$$C = [c_0 \ c_1 \ \dots \ c_m \ \dots \ c_{M-1} \ c_s] \tag{21}$$

$$h = [h_0 \ h_1 \ \dots \ h_{M-1} \ 0 \ 0]^T \tag{22}$$

이와 같이 수정된 C 와 h 를 식 (1)의 선형 제약형 LMS 알고리즘에 적용하여 입력신호를 처리하게 된다.

III. 모의실험

잡음 신호를 효과적으로 제거하기 위한 모의실험은 2-element 어레이, 7-element 공간 유화 방법을 적용한 어레이, 그리고 integral null 지정 방법을 사용한 경우를 수행하였다. 2-element 어레이에 대한 실험은 기존의 어레이 안테나와의 성능 비교를 위하여 포함시켰다. 모의실험은 WLAN간의 간섭일 경우와, WLAN과 WPAN간의 간섭이 발생하였을 경우를 구분하여 수행하였으며, 모의실험의 구성은 표 1과 같다.

WPAN의 신호원으로는 대표적으로 Bluetooth와 ZigBee의 신호를 채택하였으며, 원하는 신호는 모두 WLAN(IEEE 802.11b) 신호로 설정하였다.

공간 유화 방법의 경우, 스마트 안테나는 13개의 안테나로 구성된 7개의 서브어레이로 구성하였고,

표 1. 모의실험의 구성

Table 1. Simulation configuration.

Cases	Source	Desired Signal	Interference Signal
WLANs	CASE 1	WLAN Signal	Cochannel Interference Desired Signal's Coherent Cochannel Signal's Coherent
	CASE 2	WLAN Signal	Desired Signal's Coherent #1 Desired Signal's Coherent #2 Desired Signal's Coherent #3
WLAN and WPAN	CASE 3	WLAN Signal	Bluetooth Signal ZigBee Signal Desired Signal's Coherent Bluetooth Signal's Coherent ZigBee Signal's Coherent

원하는 신호는 어레이 축과 수직인 방향으로 입사하며, 센서 측정 잡음은 없는 것으로 가정하였다.

WLAN 신호원은 CCK 변조를 통하여 모의실험을 하였으며, Bluetooth 신호원은 GFSK, 그리고 ZigBee 신호원은 O-QPSK 변조를 통해 모의실험을 하였다.

그림 3은 WLAN의 동일 채널 환경(CASE 1)에서의 주파수 간섭에 대한 빔 패턴 결과이다. 간섭 신호는 동일 채널을 사용하는 WLAN 신호와 그 동일 채널 신호에 대한 다중 경로 신호, 그리고 원하는 신호에 대한 다중 경로 신호이다. 동일 채널 신호는 원하는 신호를 기준으로 -36° 로 입사되고, 동일 채널에 대한 다중 경로 신호는 $+43.5^\circ$, 그리고 원하는 신호의 다중 경로 신호는 $+41^\circ$ 에서 입사되는 것으로 가

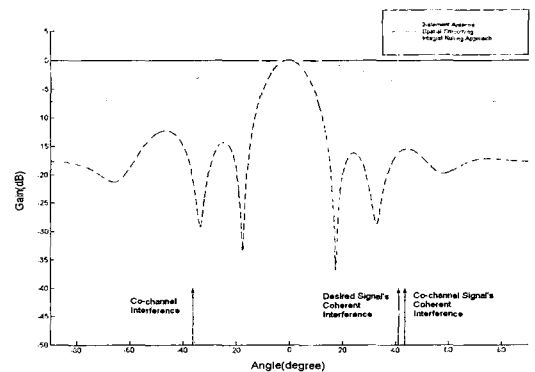


그림 3. CASE 1에서 Inphase 신호에 대한 각 시스템의 빔 패턴

Fig. 3. Beam pattern of each system for Inphase signal in CASE 1.

표 2. 동일채널환경에서의 SIR 성능 비교

Table 2. SIR of each system in cochannel environment.

System	Ratio	SIR (dB)
2-element Array		2.41
Spatial Smoothing		12.39
Integral Nulling Approach		12.84

정하였다. 동일 채널 간섭 환경의 모의실험에서 간섭 신호의 안테나 이득은 2-element 어레이, 공간 유화 방법, integral null 지정 방법 순으로 감소되었다. 특히 integral null 지정 방법은 (-35°)~(-36°)와 40°~45°까지의 범위에 Null을 형성하여 해당 범위에서 입사되는 간섭 신호들의 안테나 이득을 큰 폭으로 감소시켰다. 표 2에는 CASE 1에 적용된 각 방법별 SIR(Signal to Interference Ratio)을 나타내었다.

CASE 2에서는 동일 채널이나 인접 채널 또는 다른 기종의 주파수 간섭은 없는 것으로 가정하였고, 원하는 신호에 대한 서로 다른 3개의 다중 경로 신호가 입사되는 환경에서 모의 실험하였다. 다중 경로 환경의 모의 실험은 2-element 어레이, 7-element 선형 제약형 적응 어레이 처리기, 공간 유화 방법, 그리고 integral null 지정 방법을 사용한 스마트 안테나를 비교하였다. 다중 경로 환경에서의 모의 실험에서는 다른 환경에서의 모의 실험과는 달리 선형 제약형 적응 어레이 처리기에 관한 모의 실험이 추가되었는데, 이는 선형 제약형 적응 어레이 처리기가 다중 경로 신호에 대해서 성능이 저하되는 단점이 있고, 이러한 단점으로 인해 공간 유화 방법을 적용하였기 때문에, 두 처리 방법의 성능을 비교함으로써 공간 유화 방법의 성능 향상을 확인하기 위한 것이다.

간섭 신호의 방향은 원하는 신호를 기준으로 Coherent Interference #1은 -36°, Coherent Interference #2와 #3은 각각 +41°, +43.5°에서 입사되는 것으로 가정하였고, integral null 지정 범위는 (-35°)~(-36°)와 40°~45°이다.

그림 4와 표 3은 각각 CASE 2에서의 빔 패턴과 SIR을 나타낸 것이다. 그림 4에 나타난 바와 같이, 다중 경로 신호의 안테나 이득은 2-element 어레이,

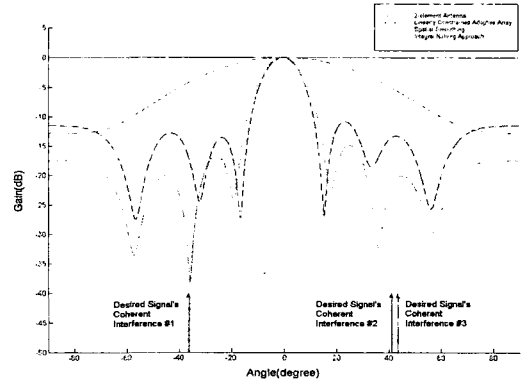


그림 4. CASE 2에서 Inphase 신호에 대한 각 시스템의 빔 패턴

Fig. 4. Beam pattern of each system for Inphase signal in CASE 2.

표 3. 다중경로환경에서의 SIR 성능 비교

Table 3. SIR of each system in coherent environment.

System	Ratio	SIR (dB)
2-element Array		3.96
Linearly Constrained LMS Algorithm		6.67
Spatial Smoothing		8.72
Integral Nulling Approach		9.13

선형 제약형 적응 어레이 처리기, 공간 유화 방법, integral null 방법 순으로 떨어진다. 또한 원하는 신호와 출력 신호 간의 오차도 감소하며, 이에 따라 SIR이 증가되는 것으로 나타났다. SIR의 증가는 간섭 신호 제거 효과가 있음을 나타내는 것이며, 그만큼 안테나의 성능이 향상되었음을 의미한다.

CASE 3에서는 WPAN 시스템의 신호가 WLAN 시스템에 미치는 영향을 알아보고, 이에 대응하는 스마트 안테나의 성능을 분석하기 위하여 수행되었으며, WPAN 시스템 중 Bluetooth와 ZigBee를 선정하여 모의 실험을 하였다. WPAN 시스템의 전파 특성상 WLAN에 비해 대역폭이 작기 때문에, WPAN 신호는 WLAN 신호의 일부분에만 간섭을 일으킨다. 본 논문에서는 WLAN과 WPAN이 간섭되는 구간만을 실험하였다.

표 4는 WPAN 간섭 환경에서의 간섭 신호의 입사 각과 전력을 나타내고 있다. 이 환경에서 각 간섭 신호들의 다중 경로 신호들은 일정 범위 내에서 입사

표 4. WPAN 간섭 환경에서 각 간섭신호의 특성

Table 4. Statistics and incident angles of relevant signals in WPAN interference environment.

	Desired signal	Bluetooth signal	ZigBee signal	Desired signal's coherent	Bluetooth signal's coherent	ZigBee signal's coherent
Angle	0°	-36°	-18°	+41°	+43.5°	+46°
Variance	1	0.25	0.09	0.64	0.18	0.06

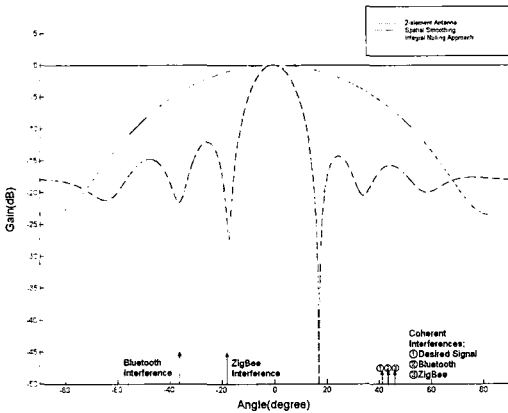


그림 5. CASE 3에서 Inphase 신호에 대한 각 시스템의 빔 패턴

Fig. 5. Beam pattern of each system for Inphase signal in CASE 3.

표 5. WPAN 간섭 환경에서의 SIR 성능 비교

Table 5. SIR of each system in WPAN interference environment.

System	Ratio	SIR (dB)
2-element Array		3.09
Spatial Smoothing		11.08
Integral Nulling Approach		12.02

되는 것으로 가정하였다.

CASE 3에서도 그림 5에 나타난 빔 패턴 결과와 같이 공간 유화 방법, integral null 지정 방법은 간섭 신호의 안테나 이득을 크게 감소시키는 것으로 나타났다. 2-element 경우와 공간 유화 방법, Integral Null 지정 방법 순으로 SIR이 증가하였다. CASE 3의 SIR은 표 5에 나타내었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 2.4 GHz의 ISM 대역에서 동시에

운용되고 있는 WLAN과 WPAN의 간섭 현상에 대해 WLAN 시스템에 7-element의 스마트 안테나를 적용하여, 모의 실험을 통해서 스마트 안테나의 성능을 분석하였고 그에 따른 성능 향상을 비교, 확인하였다. 모의 실험 결과, 공간 유화 방법이 선형 제약형 어레이 처리방법보다 우수한 성능을 나타내었으며, 특히 integral null 지정 방식에서 가장 우수한 성능 개선 효과를 볼 수 있었다.

현재 WLAN의 보급률이 급격한 증가 추이를 보이고 있고, 앞으로 2.4 GHz 대역에서 사용될 WPAN 기술의 발전이 급속하게 이루어지고 있는 점에 비추어 볼 때, 2.4 GHz 대역에서의 주파수 간섭 문제는 더욱 심각해질 것으로 예상된다.

본 논문에서는 이러한 상황에 대비하여, WLAN 시스템에 스마트 안테나를 적용함으로써 다중 경로 환경에서 WLAN의 동일 채널 간섭으로 인한 송·수신 장애 문제, 다중 경로 신호로 인한 왜곡 문제와 더불어 WPAN 기기와의 간섭을 최소화하여 WLAN의 안정된 성능을 보장할 수 있는 방안을 제안하였다.

참 고 문 헌

- [1] 고순주, "공중 무선랜서비스의 제공현황 분석", 전자통신동향분석, 19(2), pp. 7-46, 2004년.
- [2] O. L. Frost, "An algorithm for linearly constrained adaptive array processing", *Proc. of the IEEE*, vol. 60, no. 8, 1972.
- [3] T. J. Shan, T. Kailath, "Adaptive beamforming for coherent signals and interference", *IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. ASSP-33, no. 3, Jun. 1985.
- [4] B. K. Chang, N. Ahmed, "Adaptive broadband beamforming : an integral nulling approach", *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech and Signal Proc.*,

Glasgow, Swtland, pp. 2776-2778, Apr. 1989.

김 현 응

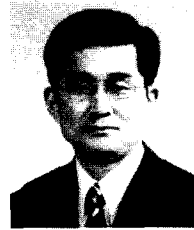


2002년 2월: 인천대학교 전기공학과 (공학사)

2004년 8월: 인천대학교 전기공학과 (공학석사)

[주 관심분야] WLAN, WPAN, Smart Antenna 등

장 병 건



1975년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)

1985년 5월: 미국 University of Iowa 전기 및 컴퓨터공학과 (공학석사)

1991년 5월: 미국 University of New Mexico 전기 및 컴퓨터공학과 (공학박사)

1997년~2004년: 인천대학교 멀티미디어연구센터 소장

1994년~현재: 인천대학교 전기공학과 교수

[주 관심분야] 신호처리, 적응신호처리, 안테나어레이설계 등