

# 다중 안테나 이동 통신 시스템을 위한 전력 절감 기법

정회원 류 선 회\*, 종신회원 박 세 응\*

## Energy Saving MAC for MIMO Wireless Systems

Sunheui Ryoo\* *Regular Member*, Saewoong Bahk\* *Lifelong Member*

### 요 약

본 논문은 다중안테나를 구비한 전송단과 수신단의 활성화된 안테나 개수를 조절하여 통신 시스템의 소비전력을 최소화함으로써 동작시간을 최대화하는 전력절감 MAC 기법에 관한 것이다. 제안기법은 전력절감을 목적으로 다중안테나 시스템의 전송 방식인 멀티플렉싱 기법과 다이버서티 기법을 채널 상황에 따라 선택한다. 이러한 다중안테나 전력절감을 위한 MAC 기법은 무선단말에서 소모하는 전력을 고려한다. 이때 전송전력 뿐 아니라 활성화된 안테나 개수와 비례하는 회로 소모 에너지를 고려하기 때문에 성능분석 결과, 기존의 용량증대 접근 방법과는 다른 다중안테나 방안을 선택한다. 따라서 제안하는 다중안테나 전력절감 방식은 무선단말의 소비에너지 면에서 성능 향상을 보인다.

**Key Words** : MIMO; power saving; diversity gain; multiplexing gain; circuit power.

### ABSTRACT

Over the last decade multiple-input and multiple-output (MIMO) systems have been actively researched and started to be deployed in wireless communications owing to the significant increase in channel capacity. In this paper, we propose a energy saving MAC protocol in systems by focusing on energy efficiency instead of capacity maximization. We considers the energy consumption together with the tradeoff between reliability (i.e., diversity) and throughput (i.e., multiplexing gain), and dynamically chooses an appropriate number of antennas for transmission. In computing the total energy consumption, we counts circuit energy as well as transmission energy. Naturally the circuit energy consumption is directly proportional to the number of active antennas. Through numerical analysis, we confirm that our power saving MAC scheme for MIMO considerably saves energy consumption compared to conventional capacity maximization schemes that use a fixed number of MIMO channels, for a given outage constraint. Our finding is that the capacity maximizing communication which possibly can be regarded best in terms of energy efficiency gives a different solution from the energy minimizing communication.

### I. 서 론

최근 차세대 무선 통신 시스템의 주요 기술로 주목받고 있는 다중안테나 시스템은 복수의 독립적인 전파 경로(transmission path)를 이용하여 통신 신호

도를 높일 수 있다는 장점 및 독립적인 공간 채널(spatial channel)을 이용하여 통신 전송률을 높일 수 있다는 장점을 가지고 있다. 전자의 장점 및 후자의 장점은 각각 다이버서티 이득(diversity gain) 및 멀티플렉싱 이득(multiplexing gain)과 관련이 있

\* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 육성·지원사업 (IITA-2009-C1090-0902-0006)의 연구결과로 수행되었음.

\* 서울대학교 전기컴퓨터공학부, 뉴미디어통신공동연구소, (shryoo@netlab.snu.ac.kr, sbahk@netlab.snu.ac.kr)

논문번호 : KICS2008-11-494, 접수일자 : 2008년 11월 8일, 최종논문접수일자 : 2009년 2월 26일

다. 이러한 두 이득은 서로 공존하며 하나의 이득이 늘어나면 다른 하나는 감소하는 DMT (multiplexing and diversity tradeoff) 관계를 갖는다. 이와 관련한 종래 기술로는 데이터 전송률을 최대화하는 측면에서 다중안테나 기법 연구<sup>[1]</sup> 및 다중 접속 시 페이딩 환경에서의 성능 검증<sup>[2]</sup>이 이루어졌다. 또한 이러한 다중안테나 성능 특성을 통신 전송률과 신뢰도 측면에서 살펴본 연구<sup>[3]</sup>가 수행되었다.

한편, 무선 통신시스템이 보편화 되면서 가볍고 작고 이동 가능한 무선기기로도 유비쿼터스 네트워크가 가능해졌다. 이러한 모바일 무선기기들에도 상술한 장점을 가진 다중 안테나 기술이 도입되고 있다. 모바일 기기들 대부분은 배터리로 구동되기 때문에, 그 동작 시간에 한계가 있으며, 충전 또는 배터리 교환 등의 불편함을 수반한다. 배터리 기술은 프로세싱 및 통신 기술만큼 빠르게 발전하지 못하고 있다. 따라서 가볍고 수명이 긴 배터리의 고안은 무선단말기기를 위한 기반기술로 주요한 해결과제가 되고 있다. 이러한 배경을 볼 때, 한정된 에너지를 가진 다중 안테나 시스템에서 전력 절감적인 송신 방법이 요구된다.

기존의 다중안테나에 대한 대부분의 연구가 이론적인 성능 특성 연구 [1]-[3]에 주안점을 둔 반면, 보다 실용적인 접근방안으로 한정된 개수의 다중안테나 전송방식을 전환하는 기법에 대한 연구 [4]-[6] 역시 이루어졌다. 그러나 이러한 연구는 분리되어 구현된 한정된 개수의 다중안테나 모드들을 전환 (switch)하는 방법이 주를 이룬다. 또한 기존의 다중안테나 전환 기법은 데이터 전송률을 최대화 하는 것을 목표로 한다.

본 연구에서는 통신시스템에서 다중안테나 기법의 전환을 통한 전력절감 MAC 기법을 제안하고자 한다. 제안하는 방법에서는 기존의 네트워크 용량 최대화 기법과는 달리 전력 절감을 위한 다중안테나 기법을 선택 제어한다. 이는 전송 전력뿐 아니라 회로 전력<sup>[7]</sup>까지 함께 고려한다. 제안하는 방식은 최소 에너지 소모를 목표로 활성화된 다중 안테나 개수를 조절하며 기존의 네트워크 용량 최대화를 위한 다중안테나 기법과는 다른 양상으로 다중안테나 기법이 멀티플렉싱 및 멀티플렉싱 이득을 선택하게 된다.

본 논문은 II장에서 다중안테나 전력절감을 위한 MAC 기법의 개념을 소개하고 전력소비 모델을 제시한 후 비용 함수로 무선단말의 소비 에너지를 최소화하는 수식을 제시한다. III장에서 다중안테나 전

력절감을 위한 MAC 알고리즘을 제안하고 IV장에서는 분석을 통해 제안된 방식의 전력절감 성능을 보인다. 마지막으로 V장에서 마무리 짓고자 한다.

## II. 다중안테나 전력절감 MAC 제어 기법

본 장에서는 다중안테나 기술을 사용하는 무선단말의 전력절감을 위한 MAC 기법을 제안한다. 본 기법은 단말이 채널용량보다는 전력절감에 우선순위를 두고 있을 때의 동작으로 전체 에너지 소비를 최소화하고자 한다.

그림 1은 IEEE 802.11n 표준안 [8]에서 무선 단말이 멀티플렉싱 모드를 지원하는 경우에 에너지 절감을 위해서 다중안테나를 사용하는 모드와 단일 안테나를 사용하는 모드로 전환하는 기법을 보여준다.

다중안테나와 관련된 전력절감 MAC의 상태 (state)는 3개이다. 다중안테나 모두를 사용하는 full MIMO active 상태는 단말에 구비된 모든 안테나를 동작시키며 전력절감을 하지 않는 모드이다. 정적 모드인 단일안테나 (SISO: single-input and single-output)모드는 송/수신기 사이에 하나의 링크만 활성화하여 기본적인 제어 신호를 수신하고 나머지 안테나는 끄는 동작 모드이다. 이러한 다중 안테나 동작모드와 단일 안테나 동작모드의 전환 과정에서 동적 전환 (dynamic) 모드가 사용된다. 전환모드 (dynamic mode)는 RTS/CTS와 같은 제어 프레임을 사용하여 수신기에게 다중안테나 동작의 시작을 알려주고 NAV(network allocation vector)로 설정된 기간 동안만 다중안테나가 활성화되어 동작하고 이후에 단일안테나 모드로 회귀한다. IEEE 802.11n의

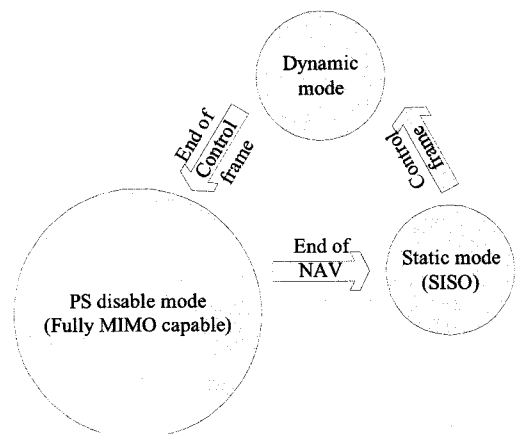


그림 1. 다중안테나 전력절감을 위한 MAC 상태 변이.

표준에서 이러한 변화는 트래픽 상황변화에 따라 일어난다. 다중안테나 관련된 이러한 MAC 상태의 정의는 주로 트래픽 상황에 따라 조절되며 전송 전력만을 고려한다.

그러나 단말에서 소모되는 전체 에너지를 최적화 하려면 전송전력 이외에도 안테나 관련 회로의 소모전력 역시 고려해야 한다. 또한 전체 다중안테나를 멀티플렉싱 모드뿐만 아니라 동작하는 모드뿐 아니라 멀티플렉싱 및 다이버시티 이득의 특성을 고려하여 전환하는 동작을 고려할 수 있다. 즉 다중안테나의 멀티플렉싱 이득과 다이버시티 이득은 공존할 수 있으며 다만 하나의 이득이 증가하면 다른 이득은 감소하는 관계성을 가진다<sup>[1]</sup>.

본 논문에서는 전체 다중안테나를 활성화하는 동작을 복수개의 다중안테나 기법의 하위 상태(sub-state)로 세분화 한다. 제안된 다중안테나 전력절감을 위한 MAC 기법은 채널 상황에 유동적으로 에너지 소모 면에서 최적인 하위 상태-다중안테나 모드를 선택한다.

### 2.1 다중안테나 전력 소모 모델

다중안테나를 구비한 무선단말기의 전체 에너지 소비는 송수신단의 모든 신호 프로세싱 블록을 포함한다. 이러한 에너지 소비는 안테나 개수에 비례한다.

전체 평균 전력 소모는 크게 두 개 부분, 송신기의 전력 증폭기  $P_t$ 와 아날로그 회로 전력  $P_c$ 이다. 이때 송신기, 수신기에서 안테나 하나당 소모하는 전력을 각각  $P_{ct}$ ,  $P_{cr}$ 이라 두고 안테나 개수를  $m$ 과  $n$ 이라고 하면, 회로 전력<sup>[7]</sup>은 다음과 같다.

$$P_c \approx mP_{ct} + nP_{cr} \\ = m(P_{DAC} + P_{mix} + P_{fil}) + P_{syn} + P_{syn} + n(P_{LNA} + P_{mix} + P_{IFA} + P_{filr} + P_{ADC}) \quad (1)$$

여기서 송수신단에서 안테나와 관련된 아날로그 회로와 그 소모 전력은 다음과 같다. 먼저 DAC (Digital-to-Analog Converter)모듈에 해당하는  $P_{DAC}$ , 2개의 필터에서 소모하는  $P_{fil}$ , 믹서  $P_{mix}$ , 낮은 잡음 증폭기(Low Noise Amplifier: LNA)  $P_{LNA}$ , 주파수 증폭기 (Intermediate Frequency Amplifier: IFA)  $P_{IFA}$ , ADC (Analog to Digital Converter)  $P_{ADC}$ , 그리고 주파수 동기 블록  $P_{syn}$ 를 포함한다. 전체 비트당 에너지 소모는 다음과 같다.

$$E_{bt} = (P_t + P_c)/R_b \quad (2)$$

여기서  $R_b$ 는 시간당 전송 비트 수이다. 다중안테나 기술은 주어진 시간당 전송률을 높임으로써 전력 효율은 높이는 측면이 있다. 그러나 기존의 방식들은 전송 전력만을 고려한다. 다중안테나 개수에 비례하는 회로 전력 소모를 고려하면 기존의 방식과 다른 다중안테나 동작방식이 유리할 수 있다.

### 2.2 에너지 소모 최소화식

다중안테나를 구비한 무선 통신 시스템에서 비용 함수(cost function)는 프레임당 에너지 소모로 다음과 같다.

$$E_{Total} = (E_{TX}S_T) + (mS_T E_{cirTx} + nS_R E_{cirRx}) \quad (3)$$

에너지 소모비용을 최소화하기 위해 다중안테나에 적합한 멀티플렉싱 이득을 찾자 할 때 전체 에너지  $E_{Total}$ 은 전송에너지  $E_{TX}$ 와 송수신 회로 에너지  $E_{cirTx}$ ,  $E_{cirRx}$  합으로 나타난다. 여기서  $m$ 과  $n$ 은 송신 단말과, 수신단말의 안테나 개수를 나타낸다. 송수신단이 각각 전력절감을 최우선으로 하는 상황 인지를 나타내는 지표로  $S_T$ 와  $S_R$ 을 1 혹은 0으로 설정한다. 전원을 유선으로 공급받는 AP (Access Point)와 WiMax서비스를 받으며 한정된 전력량으로 동작하는 이동 단말이 무선링크를 이루는 경우, 하향링크에서는  $S_T = 0$ ,  $S_R = 1$ 로 설정되는 반면 상향링크에서는  $S_T = 1$ ,  $S_R = 0$ 로 설정된다.

소모 에너지는 전송시간과 전력의 곱으로 각각 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{TX} = \frac{P_t}{m} mT_{on} = P_t T_{on} \quad (4)$$

$$E_{cirTx} = P_{ct} T_{on}, E_{cirRx} = P_{cr} T_{on} \quad (5)$$

전송 전력  $P_t$ 는  $P_T$ 로 고정하고, 회로 전력은  $P_{ct}$ 와  $P_{cr}$ 이다. 전체 에너지 소모는 다음과 같이 표현된다.

$$E_{Total} = (S_T(P_T + mP_{ct}) + S_R(nP_{cr}))T_{on} \quad (6)$$

여기서 한 패킷을 전송하기 위한 시간은  $T_{on} = L/R_i = L/r_i \log(\rho)$  이다. 전송 시간  $T_{on}$ 과 패킷당 에너지 소모는 패킷 길이  $L$ 에 비례하고 전송률  $R_i$ 에 반비례한다. 이때 전송률  $R_i$ 는 멀티플렉싱 이득  $r_i$ 과 SNR (singal to noise ratio)  $\rho$ 의 로그의 곱이다. 멀티플렉싱 이득  $r_i$ 가 증가할수록 다이버시티 이

득  $d_i$ 은 감소하고 이때 오율 성능  $P_o$ 는 성능 요구사항(6)을 만족시켜야 한다. 즉, 채널 환경에 따라 요구되는 최소 다이버시티 이득  $d_i$ 이 정해진다. 이때 멀티플렉싱 이득인  $r_i$ 는 해당 다이버시티 이득  $d_i$ 에 의해 최대값이 제한된다.

즉 전체 에너지 소모를 최소화하되 다음 성능 요구사항을 만족해야 한다.

$$P_o = \Pr \left( \log \det \left( I_n + \frac{P_i}{m} HH^H \right) < R_i \right) \leq P_{req} \quad (7)$$

다중안테나의 오율 성능(outage performance)은 주어진 채널 상호정보(mutual information)가 의도하는 전송률  $R_i$ 를 지원할 수 없을 경우가 발생할 확률로 정의 된다<sup>9)</sup>. 따라서 시스템의 최대 오율 성능은 시스템 요구 성능  $P_{req}$  보다 작아야 한다. 크기  $n$ 의 자가 행렬은  $I_n$ , 다중안테나 채널 행렬은  $H$ 로 두고  $H^H$ 는 transpose 및 conjugate를 나타낸다.

### III. 다중안테나 전력절감 MAC 알고리즘

제안하는 다중안테나 시스템을 위한 전력절감 MAC 알고리즘을 그림 2에 나타내었다. 먼저 0단계인 초기화 과정을 통해, 송수신단 안테나 수를 바탕으로 다이버시티-멀티플렉싱 이득 특성에 따른 다중안테나 모드들을 설정한다. 수신단은 해당 다중안테나 모드의 전송률과 채널상황에 따른 오율 성능

(outage probability)표를 미리 저장한다.

다음으로 1단계에서는 다중 안테나와 단일 안테나 중 어떤 모드를 선택할 것인지 결정한다. 이때  $D_{sh}$ 는 결정기준 (criterion)이다. 식 (8)에서 나타내는 바와 같이  $D_{sh}$ 의 분모는 다중안테나 전력소모를 분자는 단일안테나 전력소모를 의미한다.

$$D_1 = \frac{(S_T(P_T + P_{ct}) + S_R(P_{cr})) \cdot T_{on\_SISO}}{(S_T(P_T + mP_{ct}) + S_R(nP_{cr})) \cdot T_{on\_MIMO}} = \frac{(S_T(P_T + P_{ct}) + S_R(P_{cr})) \cdot r_i}{(S_T(P_T + mP_{ct}) + S_R(nP_{cr}))} \quad (8)$$

여기서  $T_{on\_SISO}$ 와  $T_{on\_MIMO}$ 는 각각 다중안테나 및 단일 안테나의 전송시간을 나타낸다. 단일안테나 시스템이 에너지 효율 면에서 유리하다면, 즉  $D_{sh} > 1$  이면, 다중 안테나에서 단일 안테나 전송모드로 전환된다.

송수신단의 전력절감모드 설정상황에 따라 다음 세 가지 경우를 생각해보자.

- 1) 수신단만 전력절감모드인 경우,  
즉  $S_T = 0, S_R = 1$ 이면  $D_{sh} = r_i/n$ 이다.
- 2) 송수신단만 전력절감모드인 경우,  
 $S_T = 1, S_R = 0, D_{sh} = (P_T + P_{ct})r_i / (P_T + mP_{ct})$
- 3) 송/수신단 모두 전력절감모드이면,  
 $S_T = 1, S_R = 1,$   
 $D_{sh} = (P_T + P_{ct} + P_{cr})r_i / (P_T + mP_{ct} + nP_{cr})$

수신기가 송신기 근처에 있을 경우, 전송 전력  $P_T$ 가 회로 전력  $P_{ct}$ 보다 상대적으로 작은 값이 되므로 (i.e.  $P_T \ll P_{ct}$ ),  $D_{sh}$ 는  $r_i/m$ 이다. 1)과 2)의 경우에 높은 SNR 환경에서,  $P_{ct}$ 와  $P_T$ 값에 상관없이  $D_{sh}$ 는  $P_{cr}$ 에 좌우된다. 멀티플렉싱 이득  $r_i$ 는 항상  $n$ 이나  $m$ 보다 작기 때문에 이 경우 단일안테나 기법이 다중안테나 보다 유리하게 된다.

수신기와 송신기 거리가 멀 경우, 2)의 상황에서 송신 전력은 전체 전력소비에 주요한 영향을 준다 (i.e.  $P_T \gg P_{ct}$ ). 따라서  $D_{sh} = r_i$ 이다. 멀티플렉싱 이득  $r_i$ 가 적어도 1이면  $D_{sh}$ 이 1보다 커지게 된다. 다시 말하면, 다중안테나 시스템이 단일안테나의 경우보다 전력 소모 면에서 유리하다. 또한 송수신기의 거리가 중간 정도의 상황에서 전송이 이루어질 경우에는  $D_{sh} = (P_T + P_{ct})r_i / (P_T + mP_{ct})$ 이다.

에너지 효율 면에서 최적인 모드로 다중안테나 모드를 선택하기 위한 최소 멀티플렉싱 이득을  $r_{min}$

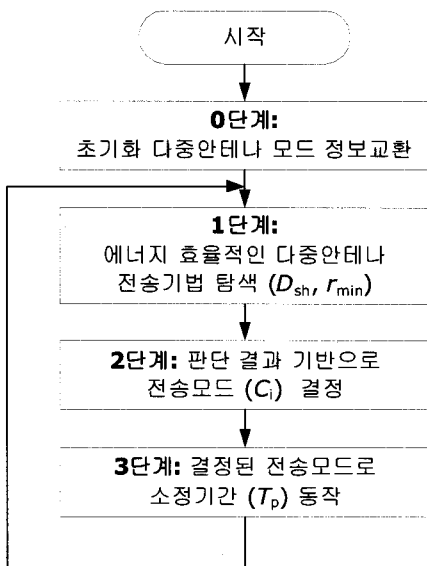


그림 2. 다중안테나를 위한 전력절감 알고리즘.

라 두자. 이때  $r_{\min}$ 는 다중안테나 기법이 단일안테나에 비해 에너지 효율 면에서 얼마나 효과적인지를 나타내며 다음과 같이 계산된다.

$$r_{\min} = \frac{(S_T(P_T + mP_{cl}) + S_R(nP_{cr}))}{(S_T(P_T + P_{cl}) + S_R(P_{cr}))} \quad (9)$$

이 경우, 다중안테나 모드에 따른 전송률  $R_i$ 는 주어진 채널 SNR  $\rho$ 에 따라 최소 멀티플렉싱 이득에 대한 함수  $r_{\min} \log(\rho)$  이상이어야 한다.

1단계에서 다중안테나 동작이 결정되면, 2단계에서 단말은 에너지 효율 면에서 최적인 다중안테나 전송모드  $C_i$ 를 결정하기 위해 에너지 소모량  $E_i$ 를 계산하여 비교한다.

$$C_i = \arg \min_{i \in \Theta} \frac{RE_T L}{r_i \log(\rho)} (S_T(P_i + mP_{cl}) + S_R nP_{cr}) \quad (10)$$

가능한 다중안테나 코드는 식 (9)를 만족하는 집합으로  $\Theta$ 이다. 다중안테나 멀티플렉싱 이득  $r_i$ 이 커질수록 주어진 채널 환경  $\rho$ 에서 전송률  $R_i$ 가 커지므로 전송 시간은 줄어들게 된다. 동시에 다이버서티 이득이 감소하므로 주어진 요구 성능을 만족시키기 위해 더 큰 전송전력이 필요하거나 추가의 재전송 과정  $RE_T$ 이 필요하게 된다. 이때 필요 재전송 회수  $RE_T$ 는 주어진 다중안테나 전송률과 채널 상황 그리고 요구하는 오율 성능에 따라 정해진다. 반대로 전송률이 감소하면 다중안테나 다이버서티-멀티플렉싱 이득 특성(MIMO DMT)에 따라 다이버서티 이득이 강화되어 필요한 전송 전력이 감소한다. 이 경우 전송시간이 증가하여 에너지 소모가 증가한다.

수신기는 다중안테나 채널  $H$ 에 적합한 다중안테나 모드  $C_i$ 를 선택하여 송신기에 피드백 정보로 알려준다. 다중안테나가 송수신 안테나를 각각  $m, n$  개씩 구비하고 있기 때문에 전체  $m \cdot n$ 개의 링크에 대한 모든 채널 정보를 전송하는 방안은 피드백 정보의 부담이 크다. 따라서 수신기는 채널 행렬의 SNR 영역을 매 시간 주기로 갱신하며 이를 다중안테나 동작 모드  $C_i$ 로 송신기에 알려준다.

2단계에서 선택된 통신모드는 3단계에서의 일정 기간 피드백 주기  $T_p$ 기간 동안 유지되면서 동작한다. WiMax 서비스를 사용하는 노트북이나 센서 네트워크 등의 응용 시스템에서 시속 3 km 이내의 도보 혹은 저속이동 환경을 고려할 때 채널 변화는

빈번히 일어나지 않으므로 피드백 주기  $T_p$ 는 비교적 크게 설정될 수 있다. 이러한 다중안테나를 위한 전력절감 MAC 기법은 채널 상황뿐 아니라 네트워크 트래픽이나 QoS 레벨을 반영하여 확장 동작할 수 있다. 활성화된 안테나 개수 선택방식 역시, 전체  $m \times n$  개의 안테나 중  $i \times j$  개의 안테나만 부분적으로 활성화 되어 동작 하는 다중안테나 모드로 세분화할 수 있다.

#### IV. 성능 분석

본 장에서는 제안된 무선단말의 다중안테나 전력 절감을 위한 MAC 알고리즘의 성능을 분석하고 이를 고정 전송률 다중안테나 전송기법과 채널 용량 최대화 기법과 비교한다.

블록 페이딩 다중안테나 채널에서 동작하는 다중안테나를 구비한 무선통신 기기를 고려한다. 송수신기는 각각 3개의 다중안테나를 구비하고 있다고 가정하였다. 본 분석에서는 이상적 DMT 곡선 [1]을 이용하여 다중안테나 다이버서티-멀티플렉싱 특성을 사용한다. 무선단말에 다중안테나 설비가 존재할 때 다중안테나 DMT특성을 이용한 전송 기법들의 집합  $\{C_i\}$ , 코드들이 존재한다. 예를 들어 D-BLAST 기법과 같이, 해당 다중안테나의 전송기법을 스위칭하는 방법을 고려한다. 주어진 채널 환경  $H$ 에서 특정 다중안테나 전송기법  $C_i$ 가 전송률  $R_i$ 로 전송할 때 오율 확률은  $P_o(R_i, \rho)$ 이다. 이러한 예에서 다중안테나 모드  $C_i$ 는 해당하는 멀티플렉싱 이득과 다이버서티 이득을 가지게 된다. 다중안테나의 수율(throughput)과 신뢰도(reliability) 성능 관계식의 유도는 [3]에서 수행되었다.

성능 유도의 간편화를 위하여 4x4 안테나 상황을 가정하였으며 그림 3은 멀티플렉싱-다이버서티 이득의 이론적인 상관관계를 나타낸다. 즉 멀티플렉싱 이득이 늘어나면 다이버서티 이득이 줄어드는 관계를 나타낸 것이다. 그림 4는 이러한 관계를 이용하여 전송률과 채널 SNR 영역에 따라 변화하는 멀티플렉싱 이득을 보여준다. 그림 5에서는 고정된 전송률  $R_i$ 에 대한 다중안테나 시스템의 오율 (outage) 성능을 나타낸다. 고정된 채널 SNR 환경에서 전송률이 높을수록 다중안테나의 멀티플렉싱 이득이 크고 따라서 다이버서티 이득이 작다. 즉 신뢰도 성능이 저하됨을 확인할 수 있다. 반대로 다이버서티 이득이 높을 경우, 멀티플렉싱 이득이 줄어들어 전송률이 낮아지게 된다.

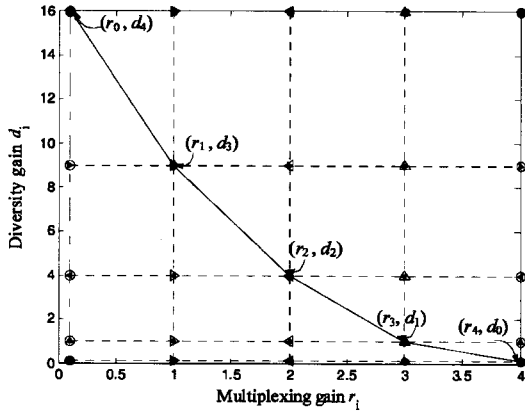


그림 3. 멀티플렉싱-다이버서티 상관관계, 4x4 다중안테나.

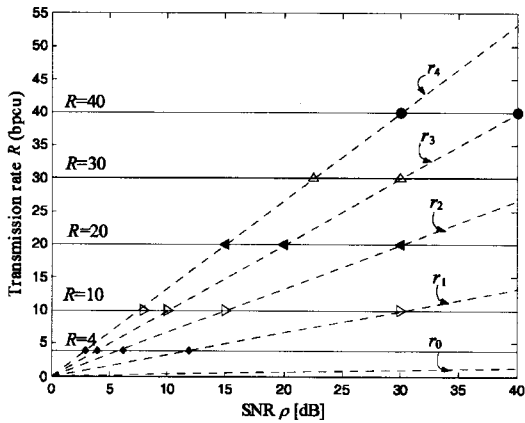


그림 4. 전송률과 전송모드 관계, 4x4 다중안테나 환경.

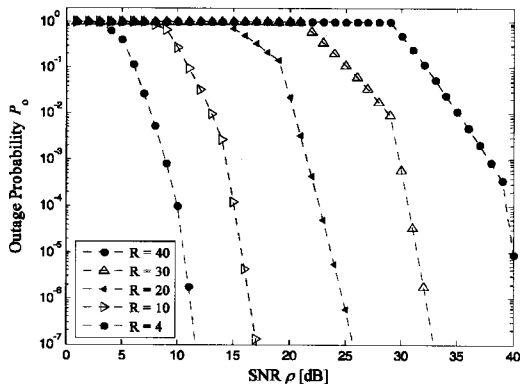


그림 5. 전송률에 따른 Outage 성능, 4X4 다중안테나 채널.

다음에서 이어지는 에너지 소모량 성능비교에서는 단일 안테나 동작에서의 전체 에너지 소모와 고정된 전송률의 다중안테나 모드, 그리고 제안하는 전력절감 다중안테나 MAC기법을 비교하였다. 이때 전송 전력뿐 아니라 다중안테나 RF회로에 관련되는

최로전력까지 함께 고려하였다. 채널용량 최대화 기법은 전송에 성공한 비트를 고려하여  $R(1-P_o)$ 를 처리율로 보고 최대 처리율을 선택하는 방법을 말한다. 따라서 최대 채널용량기법은 채널 SNR의 로그 그래프를 따라 증가하게 된다.

그림 6에서 성공적으로 전송된 패킷 당 전체 에너지 소모를 비교하였다. 전송 패킷의 길이는 1024 비트로 수신단만 전력절감을 우선하는 경우이다. ( $S_T = 0, S_R = 1$ ) 단일 안테나 시스템의 경우 성공 전송한 전송률을  $\log(\rho)$ 라고 가정하였다. 채널 SNR이 18dB 이하인 영역에서는 단일안테나로 동작하는 경우 에너지를 최소로 소비한다. 이는 고전적인 접근 방식 즉, 기존의 채널 용량 최대화 기법으로 다중안테나 모드 중에서 선택하는 경우와 차이가 있다.

다중안테나 기법의 멀티플렉싱 이득의 상위 한정 영역(upper bound)은  $r^* \leq \min\{m, n\}$ 이므로, 단일 안테나와 다중 안테나 동작모드를 선택하는 경계값  $D_{sh} (=r/n)$ 은 항상 1보다 작거나 같게 된다. 따라서 에너지 절감 면에서 단일안테나가 유리함을 알 수 있다. 채널 상황이 개선될수록 멀티플렉싱 이득  $r_i$ 는 최대치  $r^*$ 에 가까워지므로 전력 절감 면에서 다중안테나가 더 유리해지는 채널영역이 존재한다. 따라서 제안하는 다중안테나를 위한 전력절감 방식이 기존의 채널 용량 최대화 기법과 일치하는 SNR 영역도 존재한다.

그림 7에서는 전송 거리에 따른 에너지 소모를 나타내었다. 여기서 채널 감쇠 지수는 4로 가정하였다. 송수신기 모두 처리율보다는 전력절감을 최상위로 두고 동작하는 상황을 가정하였다. 높은 다중안테나 멀티플렉싱 이득은 전송시간을 줄임으로써 에너지 절감 효과를 보인다. 그러나 전송거리가 멀어질수록 주어진 멀티플렉싱 이득에 해당하는 다이버서티 이득이 시스템 요구 성능을 만족시키지 못하게 된다. 그림 3에서 나타나는 소비 에너지의 불연속 지점은 재전송으로 인해 추가에너지 소비를 하기 때문에 나타난다. 시스템 요구 성능  $P_{req}$ 는  $10^{-3}$ 로 설정하고 전송 실패할 경우 최대 3번 재전송하는 것으로 가정하였다.

그림 6과 7에서 제안하는 다중안테나 전력절감기법과 기존의 채널 용량 최대화 기법의 전체 에너지 소모를 각각 비교하여 보였다. 기존의 채널용량 최대화 기법이 주어진 시간 내에 더 많은 데이터를 전송함에도 불구하고 제안기법은 에너지 효율 면에서 우수한 성능을 보였다. 이는 채널 용량 최대화 선택 기법이 처리율만을 최대화하기 위해 다중안테나 다이버서티-멀티플렉싱 상관특성을 이용하는 것과는 달리 제안기

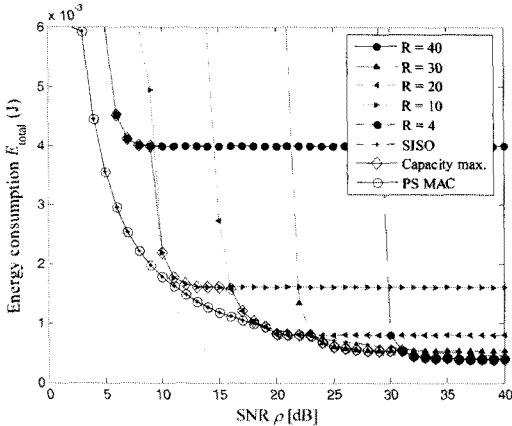


그림 6. 에너지 소모 성능 비교, 다중안테나 4x4 환경, 고정 전송 전력, 수신기만 전력절감모드인 경우.

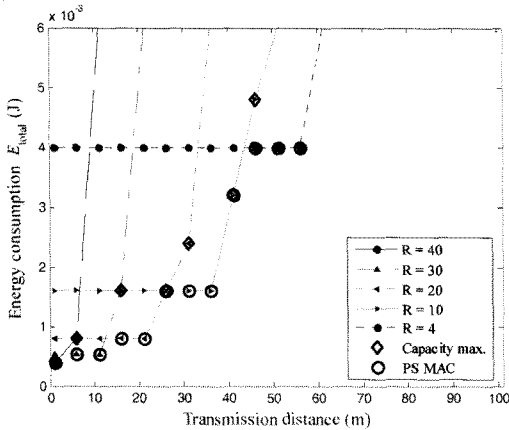


그림 7. 에너지 소모 성능 비교, 다중안테나 4x4 환경 고정 전송전력, 재전송 수행, 송수신기 모두 전력 절감 모드동작.

법이 MAC 계층에서의 전송전력 및 회로전력을 포함한 전체 소비 에너지의 효율을 고려하기 때문이다.

본 분석에서는 초당 전송전력과 회로전력이 1980 mW로 동일하다고 가정하였다. 이동통신 단말에서 전체 소모 에너지 중에 다중안테나 회로전력의 비중이 커질수록 기존의 채널용량 최대화 기법대비 제안하는 전력절감 다중안테나 MAC 기법은 에너지 소비 성능 면에서 향상을 보일 것이다.

### V. 결 론

본 논문에서는 다중안테나를 구비한 통신 시스템의 소비 전력을 최소화함으로써 동작시간을 최대화하는 전력절감 MAC 제어 기법을 제안하였다. 또한 전력 절감을 목적으로 다중안테나 시스템의 전송 방식인 멀티플렉싱 기법과 다이버서티 기법을 채널

상황에 따라 선택한다. 이 방식을 적용한 다중안테나 전력절감을 위한 MAC기법은 활성화된 안테나 개수와 비례하는 회로 소모 전력을 고려한다. 성능 분석 결과 제안하는 다중안테나 전력절감 방식은 기존의 용량증대 접근방법과 다른 다중안테나 동작 방안으로 시스템 요구 성능을 만족시키면서 최소의 에너지를 소모하는 방식을 선택한다.

### 참 고 문 헌

- [1] L. Zheng and D. Tse, "Diversity and multiplexing: A fundamental tradeoff in multiple-antenna channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 49, pp. 1073 - 1096, May 2003.
- [2] D. Tse, P. Viswanath, and L. Zheng, "Diversity-multiplexing tradeoff in multiple-access channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 50, pp. 1859 - 1874, Sept. 2004.
- [3] K. Azarian and H. Gamal, "The throughput-reliability tradeoff in block-fading MIMO channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 53, no. 2, pp. 488-501, Feb. 2007.
- [4] R. Heath and A. Paulraj, "Switching between diversity and multiplexing in MIMO systems," *IEEE trans. on wireless comm.*, June 2005
- [5] B. Muquet, E. Biglieri, and H. Sari, "Switching between diversity and multiplexing in MIMO systems," *IEEE WCNC 2007*.
- [6] E Courses, T Surveys, "Throughput-based switching between diversity and multiplexing in MIMO systems," *TENCON 2007-2007 IEEE Region 10 Conference*, 2007
- [7] S. Cui, A. Goldsmith, and A. Bahai, "Energy-efficiency of MIMO and Cooperative MIMO in Sensor Networks," *IEEE J. Select. Areas of Commun.*, pp. 1089-1098, Vol. 22, No. 6, August, 2004.
- [8] IEEE 802.11n/D1.04, part 11: wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical layer (PHY) specifications, September 2006.
- [9] T. Kim and M. Skoglund, "Diversity - multiplexing tradeoff in MIMO Channels with partial CSIT," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 53, no. 8, Aug. 2007.

류 선 희 (Sunheui Ryoo)

정회원



2001년 2월 포항공대 전자공학과  
학사

2003년 2월 포항공대 전자공학과  
석사

2003년~2006년 한국전자통신 연  
구원

2006년 9월~현재 서울대학교 전  
기컴퓨터공학부 박사과정

<관심분야> 차세대 무선네트워크, 무선자원관리기법

박 세 응 (Saewoong Bahk)

종신회원



1984년 2월 서울대학교 전기공  
학과 학사

1986년 2월 서울대학교 전기공  
학과 석사

1991년 2월 Univ. of Pennsylvania  
박사

1991년~1994년 AT&T Bell Lab.

1994년~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학과 교수

<관심분야> 차세대 무선네트워크, 네트워크 최적화