

# MISO 빔포밍 시스템에서 효율적인 QEGT 코드북 탐색 기법

## Efficient QEGT Codebook Searching Technique for a MISO Beamforming System

박 노 윤 · 김 영 주\*

Noe-Yoon Park · Young-Ju Kim\*

### 요 약

본 논문은 Rayleigh 플랫 페이딩 채널에서 MISO 빔포밍 시스템의 효율적인 양자화된 등 이득 전송 코드북 인덱스 탐색 기법을 제안한다. 코드북의 사이즈가 선형적으로 증가함에 따라 비트 오류 성능은 증가하지만, 최적의 가중치 벡터를 찾는 시간은 지수적으로 증가한다. 따라서 본 논문에서 새로운 간단한 메트릭을 이용하여 2개에서 5개의 후보 벡터들만 찾아내는 빠른 탐색 기법을 제안한다. 후보 벡터들에는 기존의 정확한 탐색 기법을 적용하여 최적의 벡터를 찾아낸다. 제안하는 기법은 전반적인 탐색 시간을 줄이면서도 비트 오류에는 거의 영향을 주지 않는다. 더욱이 코드북의 사이즈가 증가함에 따라 탐색 시간도 기존의 기법에 비해 매우 감소된다.

### Abstract

This paper presents an efficient Quantized Equal Gain Transmission(QEGT) codebook index searching technique for MISO beamforming system in a Rayleigh flat fading channel. The searching time for the optimum weight vector among the codebook vectors increases exponentially when the codebook size increases linearly, although the bit error rate decreases. So, newly defined simple metric is proposed for fast searching, which determines a few candidates. Then the conventional method combined with accurate search algorithm selects the optimal index. This strategy significantly reduces the overall search time, while maintaining almost the same bit error rate performance. Furthermore, as the codebook size increases, the search time is considerably decreased compared to that of the conventional approach.

Key words : Beamforming, Codebook, Closed-Loop MISO, Equal Gain Transmission

### I. 서 론

과거 2세대 이동 통신 기술이었던 CDMA에서 앞으로 다가올 LTE, WiMAX와 같은 4세대 이동 통신 기술에 이르기까지 최근 이동 통신 시스템의 발전 속도는 사용자의 끊임없는 욕구와 이를 충족시켜 주는 동시에 새로운 시장을 확보하려는 시스템 개발자들의 노력에 의해 점점 가속화되고 있다. 이러한 차세대 이동 통신 기술은 대역폭의 효율적 이용과 빠

른 데이터 전송률, 그리고 낮은 오류율 등을 반드시 충족시켜야 한다. 이를 충족시키기 위해 다양한 다이버시티 기법들이 각각 제안되었는데, 이 중 다중 안테나를 이용한 공간 다이버시티 기법은 페이딩 채널에서 평균 신호 세기와 신호 레벨간의 변동 감소를 향상시키기 위해 일반적으로 사용된다<sup>[1]</sup>. 특히 다중 안테나를 이용한 송신단에서는 빔포밍 시스템을 이용한 여러 공간 다이버시티 기법이 구현되고 있으며, 이에 대한 많은 연구가 현재 이루어지고 있다<sup>[2]~[6]</sup>.

\*이 논문 또는 저서는 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-331-D00370).」

충북대학교 정보통신공학과(Division of Information & Communication Engineering, Chungbuk National University)

\*충북대학교 전자정보대학(College of Electrical & Computer Engineering, Chungbuk National University)

· 논문 번호 : 20090908-103

· 수정완료일자 : 2009년 11월 3일

여러 가지 빔포밍 기법 중 동 이득 전송(EGT) 기법은 선택적 다이버시티 기법보다 성능이 우수하며, 최대 비 전송 기법과는 달리 송신 신호의 진폭을 가변하지 않기 때문에 선형 증폭기가 필요하지 않다<sup>[6],[7]</sup>. 이러한 동이득 전송 기법을 통해 채널 상태 정보를 송신단으로 피드백 전송 시, 정확한 채널 상태 정보를 전송하기 위해서는 상향 링크 내의 대역폭이 커지게 된다. 만약 특정 크기의 인덱스 벡터로 이루어진 코드북이 송·수신단에 각각 구성되어 있을 때, 채널 상태 정보와 유사한 코드워드를 갖는 코드북 인덱스를 전송한다면 대역폭은 감소하면서 전체 채널 상태 정보를 전송하였을 경우와 유사한 다이버시티 이득을 얻을 수 있다<sup>[8],[9]</sup>.

생성 효율성 및 저장 메모리에 최적화되어 있는 여러 가지 코드북 중에서 David J. Love가 제안한 QEQT(Quantized Equal Gain Transmission) 코드북은  $L$  비트의 최적 인덱스를 송신단에 피드백 전송하는 기법으로 이상적인 동 이득 전송 시스템 모델과 성능이 거의 동일하다<sup>[10]</sup>. 이 때, 송신 안테나 수가 선형적으로 증가하면 적은 수의 인덱스를 가진 코드북보다 많은 수의 인덱스를 가진 코드북을 이용하였을 경우 이상적인 성능에 더욱 근접하나, 최적의 인덱스를 찾기 위한 탐색 시간이 지수적으로 증가하는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 보다 효율적인 인덱스 탐색 기법이 필요하다.

본 논문에서는 QEQT 코드북에서 기존의 인덱스 탐색 기법과 비교하여 계산량 및 탐색 시간이 줄어들면서 시스템 성능 차이를 크게 보이지 않는 효율적인 인덱스 탐색 기법을 제안하고 이 탐색 기법의 성능을 Monte Carlo 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 측정 한 후, 준정적 플랫 페이딩 채널에서 이상적인 EGT 다이버시티 기법과 기존의 인덱스 탐색 기법과의 성능 및 탐색 시간을 비교·분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 QEQT 코드북 시스템에 대해 간단히 설명한다. 제 III장에서는 본 논문에서 제안하는 QEQT 코드북을 이용한 효율적인 인덱스 탐색 기법에 대한 시스템 모델을 수식적으로 기술하며 분석한다. 제 IV장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 준정적 플랫 페이딩 채널에서 다이버시티 성능을 보임과 동시에 탐색 속도의 향상을 증명한다. 마지막으로 제 V장에서는

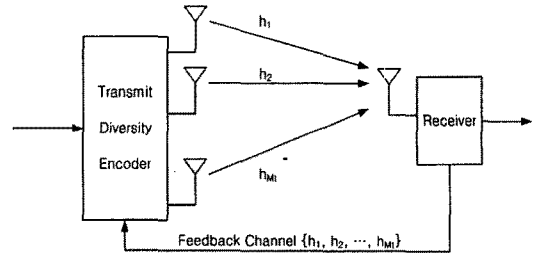


그림 1. 폐 루프 송신 다이버시티 블록 다이어그램  
Fig. 1. Block diagram of closed-loop transmit diversity.

결론과 차후의 연구 진행 방향에 대해 서술한다.

## II. 양자화된 EGT(QEQT) 시스템

그림 1은 빔포밍 시스템이 적용되는 폐 루프 송신 다이버시티에 대한 블록 다이어그램을 나타낸 것으로, 송신단에서는 빔 형성을 통해 피드백된 채널 상태 정보를 통해 신호 세기가 큰 채널 경로 즉, 페이딩 영향이 적은 채널 경로를 선택할 수 있으며, 이를 통해 채널 용량을 최대화 할 수 있는 가중치인 최적화된 선부호화 벡터(optimum precoding vector)를 계산할 수 있다. 동 이득 전송 기법에서 상기의 최적화된 선부호화 벡터  $w$ 는 식 (1)로써 나타낸다.

$$w = [w_1 \dots w_{M_t}]^T = \frac{1}{\sqrt{M_t}} [e^{j\theta_1} \dots e^{j\theta_{M_t}}]^T, \quad \theta_i \in (0, 2\pi) \quad (1)$$

이 때, 전체 송신 안테나 수를  $M_t$ 라 하면  $l$  번째 ( $1 \leq l \leq M_t$ ) 송신 안테나에 대한 가중치  $w_l$ 의 크기는 동 이득 전송 특성상 모두  $1/\sqrt{M_t}$ 로 동일하며, 위상 정보  $\theta$ 만이 다르다. 식 (1)을 통해 모든 채널 상태 정보를 완벽히 피드백 전송하기 위해서는 상향 링크 대역폭이 증가하는 문제가 발생한다. 특히 채널 상태 정보를 송신단으로 피드백하기 위해 일정 대역폭의 피드백 채널 즉, 사용자의 데이터 전송률을 크게 하기 위해서 제어 데이터 오버헤드(control data overhead)가 제한되어 있는 주파수 분할 방식의 페루프 시스템에서는 많은 어려움이 발생한다. 또한, 임의의 송신 안테나에 대해 동 이득 전송 시스템에서는 근사해를 갖지 않기 때문에 수 많은 클럭 사이클을 통한 반복이 이루어져야 하므로 복잡도가 증가하게 되는 문제가 발생한다<sup>[10]</sup>.

이러한 문제를 해결하기 위해 특정 형태로 양자화된 채널 상태 정보 전송 기법이 IEEE 802.16e에서 크게 5가지로 제안되었는데, 그 중에 많이 사용되는 기법이 코드북을 기반으로 한 피드백 방법이다<sup>9)</sup>. 코드북을 사용하면 전체 채널 상태 정보를 피드백하는 대신에 다양한 수의 채널 상태 정보를 사전에 임의의 벡터로 양자화 한 후, 양자화된 채널 상태 정보 벡터에 해당하는 특정 인덱스 정보만 피드백 채널을 통해 송신단으로 전송할 수 있는데, 인덱스 크기는  $L$  비트로 이루어져 있어 작은 상향 링크 대역폭을 통해서도 충분한 채널 용량 획득 및 다이버시티 성능을 얻을 수 있는 장점이 있다. 이 때, 코드북은 생성 효율성 및 저장 메모리에 최적화되어 있으며, 송·수신단 모두 동일한 코드북을 가지고 있다.

David J. Love에 의해 제안된 양자화된 동 이득 전송(QEGT) 기법은 식 (1)에서  $\theta$ 를 양자화한 특정 크기의 코드북을 사용함으로써 상기에서 설명한 동 이득 전송에서의 문제점을 해결하였다<sup>10)</sup>. QEGT 기법에서 사용하기 위한 코드북은 6가지 단계를 통해 생성되며<sup>10)</sup>, 이 때, 코드북 생성 시 사용되는 계수로서 각각의 위상 각도를 코드화시키기 위해 사용된 비트인  $B$ 가 주어질 때, 각각의 코드북 인덱스는  $L = B \times (M_t - 1)$  비트의 크기를 가지며, 전체 인덱스 수는  $N = 2^L$ 이 된다. 생성되는 QEGT 코드북은 다른 송신 안테나와는 달리 첫 번째 송신 안테나에 해당하는 모든 코드워드의 위상 각도는 0이 되어 복소수가 아닌 실수 벡터 값을 취하는 특징을 갖는다. 기술상의 편의를 위해 QEGT 코드북에 대한 표기법  $C(M_t, L)$ 을 정의한다. 예를 들어  $C(3, 6)$  코드북에서 전체 인덱스 수는  $N = 64$ 이다. 표 1은 다양한 QEGT 코드북의 크기를 보여준다.

그림 2는 송신 안테나  $M_t$ 가 3인 MISO 채널 모델에서 모든 채널 상태 정보를 완벽히 피드백 전송한 이상적인 동 이득 전송과 QEGT 코드북을 이용한 전

표 1. QEGT 코드북 크기  $N/L$

Table 1. QEGT codebook size  $N/L$ .

	$B=2$	$B=3$	$B=4$
$M_t=2$	4 / 2	8 / 3	16 / 4
$M_t=3$	16 / 4	64 / 6	256 / 8
$M_t=4$	64 / 6	512 / 9	4,096 / 12

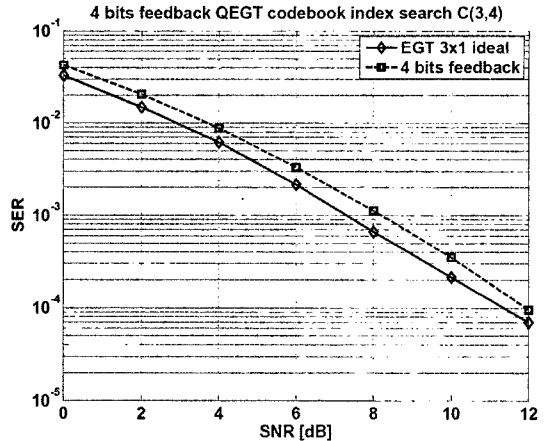


그림 2. QEGT 코드북을 MISO 채널에서의 평균 에러 발생 확률( $M_t=3$ )

Fig. 2. Average probability of symbol error for MISO channel using QEGT codebook ( $M_t=3$ ).

송 기법의 성능을 나타낸 것으로 코드북을 이용시 약간의 성능 저하를 보이지만 이상적인 성능과 거의 유사한 다이버시티 성능을 보인다.

이처럼 QEGT 코드북을 이용한 다이버시티 기법은 무한대 대역의 피드백을 가정하는 이상적인 동 이득 전송 기법과 큰 성능 차이를 보이지 않는다. 그러나 송신 안테나 수가 선형적으로 증가하면 이상적인 성능에 근접하기 위해 요구되는 코드북의 인덱스 수 또한 증가하여, 결국 최적의 인덱스 선택을 위한 탐색 시간이 지수적으로 증가하는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위한 효율적인 인덱스 탐색 기법을 제 III장에서 제안한다.

### III. 제안하는 효율적인 인덱스 탐색 기법

QEGT 코드북의 각 인덱스에서는  $L$  비트에 관계 없이 첫 번째 송신 안테나에 해당하는 모든 코드워드의 위상 각도는 0으로 복소수가 아닌 실수 벡터 값을 갖는다. 그리고 두 번째 송신 안테나부터는 실수가 아닌 복소수로 구성된 벡터값을 갖기 때문에 모든 코드워드는 특정 위상 각도를 갖는다.

본 논문에서 제안하는 효율적인 인덱스 탐색 기법은 이러한 QEGT 코드북의 특성을 이용한 것으로 수신단에서 추정된 채널 상태 정보에서 복소수로 이루어진 첫 번째 송신 안테나의 벡터 값을 코드북과 동일하게 즉, 위상 각도가 0인 실수 벡터값으로 변

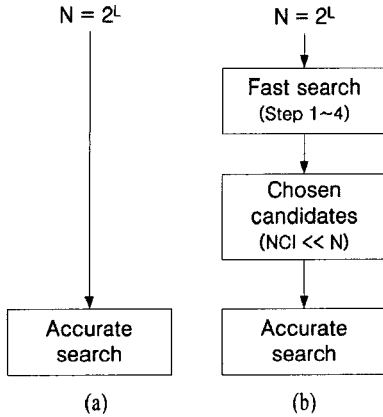


그림 3. (a) 기존 인덱스 탐색 기법에 대한 블록 다이어그램, (b) 효율적인 인덱스 탐색 기법에 대한 블록 다이어그램

Fig. 3. (a) Block diagram of conventional index search technique, (b) Block diagram of efficient index search technique.

환해 주고, 이 때 변환에 필요한 위상 각도를 첫 번째 송신 안테나를 제외한 나머지 송신 안테나에 보상을 한 뒤, 첫 번째 안테나를 제외한 나머지의 코드북 위상 각도와 채널 상태 정보 사이의 근접도를 측정하여 특정 근접도를 만족시키는 코드북의 인덱스만을 선택한 뒤, 이들 인덱스에서 다이버시티 이득을 최대로 하는 최적의 코드북 인덱스를 선택하는 것이다. 이를 위해 제안하는 기법은 후보 인덱스 벡터를 선택하기 위해 4단계로 구성된 fast searching과 후보 인덱스 벡터 중에서 최적의 가중치 벡터 인덱스를 선택하는 accurate searching으로 구성된다. 이 때, 후보 인덱스 벡터의 수를  $NCI$ (Number of Candidate Indices)라 정의한다.  $NCI$  값은 전체 인덱스 수  $N$ 보다 항상 작기 때문에 최적 인덱스 탐색 시간은 기존 탐색 기법에 비해 감소한다. 그림 3은 기존의 인덱스 탐색 기법과 본 논문에서 제안하는 효율적인 인덱스 탐색 기법에 대한 블록 다이어그램을 나타낸다.

QEGT 코드북에서  $k(1 \leq k \leq N)$  번째 코드북 인덱스에 의한 최적의 선부호화 벡터  $w(k)$ 가 전체 인덱스 수  $N=2^L$ 에서 선택될 때, 제안하는 탐색 기법에 의해 구성되는 후보 인덱스 벡터 그룹  $G$ 는 식 (2), (3)을 통해 결정된다.

$$G = \{k \in \{1, \dots, 2^L\} : |f(H') - f(w(k))| < \theta\} \quad (2)$$

$$f(\psi) = \sum_{l=1}^{M_1} |\theta(\psi(l)) - \theta(\psi(1))| \quad (3)$$

이 때,  $H$ 는  $CN(0, 1)$ 의 분포로써 준정적 레일레이 페이딩 채널 벡터이며, 심벌 전송에 있어 심벌 전송 구간 동안 채널 특성이 일정하다고 가정한다. 즉, 무선 채널 모델에서의 페이딩 현상은 각 심벌마다 독립적으로 발생한다.  $f(\cdot)$ 는 빠른 탐색을 위한 새로운 벡터의 함수이며,  $\theta'$ 은 사전에 결정된 시스템 성능과 탐색 복잡도 사이의 유연한 관계에 의해 결정된 최적화 위상 경계(threshold) 각도이다.  $f(H')$ 는 본 논문에서 제안한 새로운 채널 벡터로서 아래에서 상세히 설명한다.  $\psi$  역시 벡터이며,  $\theta(\psi(l))$ 은  $\psi(l)$ 의 위상 각도를 의미한다.

복소수로 구성된 MISO 채널  $H$ 가 식 (4)로 표현될 때, 1~4단계로 이루어진 fast searching의 첫 번째 단계는 채널 벡터에서 첫 번째 안테나의 벡터 값을 QEGT 코드북과 동일하게 위상 각도가 0인 실수 벡터 값으로 변환해 주고, 나머지 안테나에 대해 변환에 필요한 위상 각도를 보정한 뒤, 각각의 모든 송신 안테나에 대한 보상된 위상 각도의 절대값을 취하여 이를 더해줌으로써 새로운 채널 벡터인  $f(H')$ 을 계산하는 것이다.

$$H = (h_1 \ h_2 \ \dots \ h_{M_1}) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} H' &= H e^{-j\theta_1} \\ &= (h_1 e^{-j\theta_1} \ h_2 e^{-j\theta_1} \ \dots \ h_{M_1} e^{-j\theta_1}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$f(H') = f(H e^{-j\theta_1}) = \sum_{l=1}^{M_1} |h_l e^{-j\theta_1}| \quad (6)$$

이 때,  $\theta_1$ 은 첫 번째 송신 안테나에 대한 채널 벡터인  $h_1$ 의 위상 각도를 의미한다.

두 번째 단계는 식 (2)에서  $f(w(k))$ 을 계산하는 것이다. QEGT 코드북 인덱스의 첫 번째 송신 안테나에 대한 벡터 값은 상기에서 설명한 바와 같이 모두 위상 각도가 0인 실수 벡터 값이기 때문에 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(w(k)) = \sum_{j=2}^{M_1} |\theta_{k,j}| = |\theta_{k,2}| + \dots + |\theta_{k,M_1}| \quad (7)$$

$\theta_{k,j}$ 은 QEGT 코드북 인덱스가  $k=1, \dots, N$ 일 때, 각 인덱스의 위상 각도를 의미한다.

세 번째 단계는 식 (8)을 이용하여 근접도(proximity)  $PRX$ 를 계산하는 것이다.

$$PRX = |f(\mathbf{H}^T) - f(\mathbf{w}(k))| \quad (8)$$

Fast searching의 마지막 단계는 식 (9)를 이용하여 후보 인덱스 벡터 그룹  $G$ 를 구성하기 위해 특정 근접도를 만족시키는 벡터를 선택하는 것이다.

$$G = \begin{cases} \arg \min\{PRX\}, & M_i = 2 \\ PRX < \theta', & M_i \geq 3 \end{cases} \quad (9)$$

$M_i = 2$ 인 경우, 가장 작은  $PRX$  값을 가지는 QEGT 코드북 인덱스를 후보 인덱스 벡터 그룹으로 선택하는데, 이것은 그림 4에서 보듯이 하나의 복소 평면 상에서 표현되는  $M_i = 2$ 인 코드북에서 두 번째 안테나에 대한 벡터 값은 모두 순환적 대칭을 이루기 때문에 후보 인덱스 수는 항상 2가 된다.

$M_i \geq 3$ 인 경우, 시스템 설계자가 정한 적절한 최적화 위상 경계 각도  $\theta'$ 보다 작은  $PRX$ 를 선택하는데, 이는  $M_i \geq 3$ 인 QEGT 코드북들은 첫 번째 송신 안테나를 제외한 나머지 송신 안테나들이 최소 2개 이상의 복소 평면에서 표현되기 때문이다. 이때, 최적화 위상 경계 각도  $\theta'$ 를 작은 값으로 선택하면 인덱스 탐색 시간은 감소하지만, 후보 인덱스 수 감소로 인해 성능이 저하된다.

Fast searching에 의해 후보 인덱스가 선택되면, 그림 3에서 보듯이 기존 인덱스 탐색 기법과 동일하게 accurate searching 방법을 이용하여 최적의 QEGT

코드북 인덱스를 선택한다. 이는 식 (10)과 같다.

$$k_{opt} = \arg \max_{k \in G} \| \mathbf{H} \mathbf{w}(k) \|_1 \quad (10)$$

이 때,  $k_{opt}$ 는 후보 인덱스 벡터 그룹에서 식 (10)에 의해 선택된 최적의  $k(1 \leq k \leq N)$  번째 QEGT 코드북 인덱스를 나타낸다. 상기에 제안된 기법을 통해  $NCI$ 는  $N$ 보다 그 수가 항상 작기 때문에 보다 효율적인 탐색이 이루어질 수 있다.

#### IV. 시뮬레이션 결과

Monte Carlo 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 협대역 BPSK 송·수신 시스템을 이용하여 본 논문에서 새롭게 제안된 효율적인 QEGT 코드북 인덱스 탐색 기법에 대한 다이버시티 성능을 측정하였다. 표 2는 시뮬레이션을 위한 가정 및 파라미터를 정리한 것이다.

표 2에서 나타낸 바와 같이 컴퓨터 시뮬레이션에서 사용한 무선 채널 모델은  $CM(0, 1)$ 의 분포로써 준정적 플랫폼 페이딩을 가지며, 심벌 전송에 있어 채널 특성이 일정하다고 가정한다. 즉, 무선 채널 모델에서의 페이딩 현상은 각 심벌마다 독립적으로 발생한다. 또한 잡음은  $CM(0, N_0)$ 의 분포를 가지는 가산성 백색 가우시안 잡음(AWGN)이며, 이때  $CM(\cdot)$ 은 복소 정규 분포를 의미한다.

표 2. 시뮬레이션 가정 및 파라미터

Table 2. Simulation assumptions and parameters.

Carrier frequency	2 GHz
Data rate	9.6 kbps
Data modulation format	BPSK
Channel	multi-input single-output
Number of Tx antennas	2, 3
Fading	quasi-static Rayleigh fading
Mobile speed	3, 60 km/h
Threshold angle( $\theta'$ )	1.5
Channel estimation	perfect
Synchronization	perfect
Antenna correlations	perfect
Detection	hard decision
Number of iterations	$> 2 \times 10^6$

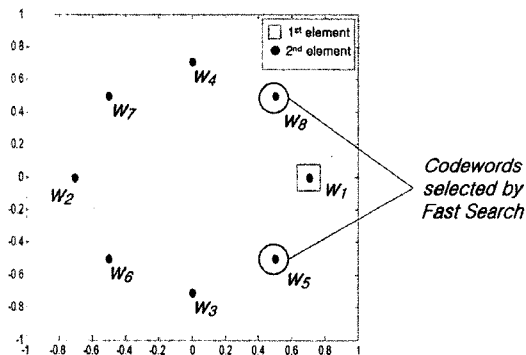


그림 4. QEGT 코드북  $C(2, 3)$ 에서 fast searching에 의해 선택된 임의의 후보 인덱스 벡터 그룹  
Fig. 4. QEGT codebook  $C(2, 3)$  candidate indices vector group selected by fast searching.

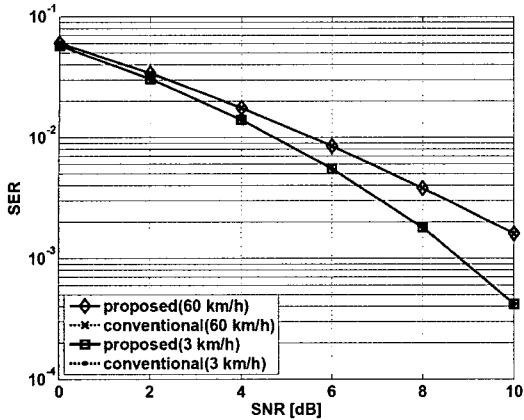


그림 5. QEGT 코드북 C(2, 3)에서 효율적인 인덱스 탐색 기법의 성능 곡선  
 Fig. 5. The SER performance of QEGT codebook C(2, 3) using efficient index search technique.

그림 5, 6은 mobile speed에 따라 기존의 인덱스 탐색 기법과 본 논문에서 제안하는 인덱스 탐색 기법의 SER 성능 곡선을 나타낸다. 이 때, 채널의 feedback delay에 의한 채널 추정 오류가 발생하여 mobile speed가 증가되면 SER 성능이 저하된다. 그림 5, 6에서 보듯이 이동 속도에 따라 송신 안테나 수가 2인 경우에는 기존의 인덱스 탐색 기법과 비교하여 동일한 다이버시티 성능을 얻고, 송신 안테나 수가 3인 경우에는 기존의 인덱스 탐색 기법보다 성능이 약 0.1~0.7 dB 저하됨을 확인할 수 있다. 상기 시뮬레이션 환경에서는 최적화 위상 경계 각도 값을 1.5로 정하였는데, 이는 표 3을 토대로 결정하였다. 표 3에서는 mobile speed가 3 km/h 또는 60 km/h일 때, 최적화 위상 경계 각도 값을 1.0보다는 1.5 또는 2.0

표 3. 최적화 위상 경계 각도에 따른 후보 인덱스 벡터의 수 및 평균 SER 감소율 비교

Table 3. Comparison of number of candidate indices & average SER loss rate with optimal phase threshold angle.

	Optimal phase threshold angle		
	1.0	1.5	2.0
NCI	27	38	47
Average SER loss rate(3 km/h)	3 dB	0 dB	0 dB
Average SER loss rate(60 km/h)	3 dB	0 dB	0 dB

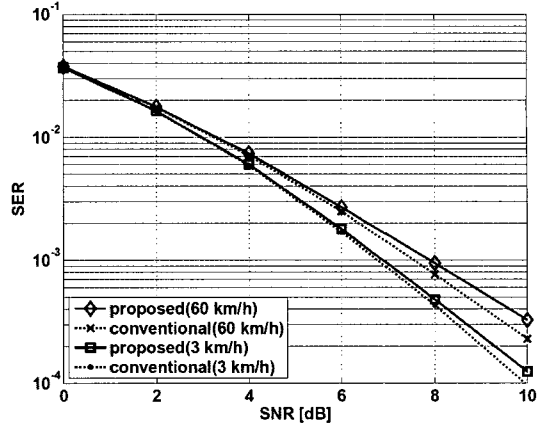


그림 6. QEGT 코드북 C(3, 6)에서 효율적인 인덱스 탐색 기법의 성능 비교  
 Fig. 6. The SER performance of QEGT codebook C(3, 6) using efficient index search technique.

으로 결정하는 것이 평균 SER 감소가 적다. 또한, 2.0보다는 1.5로 결정하는 것이 후보 인덱스 벡터의 수(NCI)가 적기 때문에 탐색 시간이 줄어든다. 즉, 세 가지 경우의 수 중에서 최적화 위상 경계 각도 값을 1.5로 결정하는 것이 최적의 선택이다.

그림 7은 송신 안테나 수가 2 또는 3인 경우 다양한 QEGT 코드북에 대해 기존의 인덱스 벡터 탐색 기법과 본 논문에서 제안한 효율적인 QEGT 인덱스 탐색 기법의 동작 시간을 비교한 것이다. 그림 7(a)는 송신 안테나 수가 2일 때 피드백 비트수가 5인 경

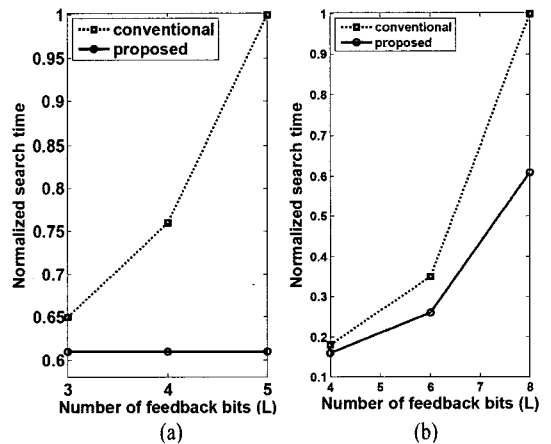


그림 7. 제안하는 효율적인 QEGT 코드북의 실행 시간 비교 (a)  $M_i=2$ , (b)  $M_i=3$   
 Fig. 7. Search time comparison among proposed efficient QEGT codebook (a)  $M_i=2$ , (b)  $M_i=3$ .

표 4. 평균 후보 인덱스 벡터 수 및 탐색 인덱스 감소율

Table 4. Comparisons among the number of average candidate weight vectors under two systems considered.

$C(M_r, L)$	$N=2^L$	$NCI$	$SRI(= \frac{N-NCI}{N})\%$
$C(2, 3)$	8	2	75.0
$C(2, 4)$	16	2	87.5
$C(2, 5)$	32	2	93.8
$C(3, 4)$	16	$7(\theta' = 1)$	56.3
		$10(\theta' = 1.5)$	37.5
$C(3, 6)$	64	$27(\theta' = 1)$	57.8
		$38(\theta' = 1.5)$	40.6
$C(3, 8)$	256	$106(\theta' = 1)$	58.6
		$150(\theta' = 1.5)$	41.4

우의 실행 시간을 1로 정규화한 뒤, 피드백 비트수가 3~4일 때의 실행 시간을 나타낸 것이다. 그림 7(b)는 송신 안테나 수가 3일 때 피드백 비트수가 8인 경우의 실행 시간을 1로 정규화한 뒤, 피드백 비트수가 4~6일 때의 실행 시간을 나타낸 것이다. 동일한 컴퓨터 시뮬레이션 환경에서 코드북 크기가 증가할수록 즉, 코드북 인덱스 비트의 수인  $L$ 이 증가할수록 QEGT 코드북의 탐색 시간이 기존의 인덱스 탐색 시간에 비해 현저히 감소함을 알 수 있다.

표 4는 본 논문에서 제안하는 효율적인 인덱스 탐색 기법을 이용하여 수신 안테나가 1인 동 이득 전송 MISO 채널에서 QEGT 코드북을 사용할 경우 각각의 코드북에 대한 평균 후보 인덱스 수  $NCI$ 를 나타낸 것이다. 이 때, 평균  $NCI$  값은 동일한 컴퓨터 시뮬레이션 환경에서 각각의 QEGT 코드북을 10만 회 이상 반복하여 획득한 값이다.

표 4는 기존 인덱스 탐색 기법에서의 인덱스 수  $N$ 보다  $NCI$ 가 적음을 보여준다. 또한 탐색 시간 감소율인  $SRI$ (Searching Time Reduction Indicator)를 통해 빠른 인덱스 탐색 기법을 사용할 경우, 전체 인덱스 탐색 시간이 매우 감소함을 알 수 있다. 또한, 사전에 시스템 성능과 탐색 복잡도 간의 유연한 관계에 의해 결정된 최적화 위상 경계 각도  $\theta'$ 에 대해 송신 안테나가 3 이상인 경우, 그 값이 커지면  $NCI$ 는 증가하는 대신  $SRI$ 는 감소하고, 그 값이 작아지면  $NCI$ 는 감소하는 대신  $SRI$ 가 증가함을 보인다.

표 4에서  $\theta'$  값을 1 또는 1.5로 설정한 경우의 후보 인덱스 수와 탐색 시간 감소율을 보이는데, 만약 시스템 설계자가 최적화 위상 경계 각도를 적절히 선택한다면 인덱스 탐색 시간과 시스템 성능 사이에서 유연한 tradeoff를 활용할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 코드북을 이용한 양자화된 동 이득 전송(QEGT) 시스템에서 새롭게 제안하는 간단한 매트릭을 적용하여 상호 근접도를 통한 특정 후보 인덱스를 선택함으로써 최적의 인덱스를 찾기 위해 전체 인덱스 수  $N$ 이 아닌 최소 근접값 또는 최적화 위상 경계 각도 이하의 값을 갖는 특정 후보 벡터 인덱스인  $NCI$ 개의 인덱스만을 고려하여 기존의 코드북 탐색 기법보다 인덱스 탐색 수가 줄어들면서 계산량이 감소하는 효율적인 인덱스 탐색 기법을 제안하였다.

본 논문에서 제안된 빠른 인덱스 탐색 기법은 송신 안테나 수  $M_r$  벡터 인덱스를 나타내기 위한 필요한 비트의 수인  $L$ 이 변할 경우에도 항상 적용할 수 있으며, 또한 시스템 설계자가 적절한 최적화 위상 경계 각도를 선택함으로써 좀 더 유연한 성능을 획득할 수 있는 장점이 있다.

양자화된 동 이득 전송 시스템을 중심으로 진행한 본 연구는 향후, 차세대 이동 통신 시스템으로 현재 표준화가 진행 중인 WiMAX 또는 LTE 시스템에서 사용 가능한 코드북에 대해 본 논문에서 제안한 기법이 적용가능함을 확인하고 제안한 기법보다 좀 더 효율적인 코드북 탐색 방법에 대해 계속 연구하고자 한다.

## 참 고 문 헌

- [1] J. B. Andersen, "Antenna arrays in mobile communications: Gain, diversity and channel capacity", *IEEE Antennas Propagat. Mag.*, vol. 42, pp. 12-16, Apr. 2000.
- [2] V. Tarokh, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communication: Performance criterion and code construction", *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 44, pp. 744-

- 765, Mar. 1998.
- [3] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A. R. Calderbank, "Space-time block codes from orthogonal designs", *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 45, pp. 1456-1467, Jul. 1999.
- [4] D. G. Brennan, "Linear diversity combining techniques", *Proc. IRE*, vol. 47, pp. 1075-1102, Jun. 1959.
- [5] A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, *Introduction to Space Time Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2003.
- [6] Q. T. Zhang, "Probability of error for equal-gain combiners over Rayleigh channels: Some closed-form solutions", *IEEE Trans. Comm.*, vol. 45, pp. 270-273, Mar. 1997.
- [7] Q. T. Zhang, "A simple approach to probability of error for equal gain combiners over Rayleigh channels", *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 48, pp. 1151-1154, Jul. 1999.
- [8] IEEE 802.16Rev2/D0b, "DRAFT standard for local and metropolitan area networks - Part 16: Air interface for broadband wireless access systems", Jun. 2007.
- [9] J. G. Andrews, A. Ghosh, and R. Muhamed, *Fundamentals of WiMAX Understanding Broadband Wireless Networking*, Prentice Hall, 2007.
- [10] D. J. Love, R. W. Heath, "Equal gain transmission in multiple-input multiple-output wireless systems", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, pp. 1102-1110, Jul. 2003.

박 노 윤



2007년 2월: 충북대학교 정보통신 공학과 (공학사)  
 2009년 2월: 충북대학교 정보통신 공학과 (공학석사)  
 2009년 3월~현재: 충북대학교 정보통신공학과 박사과정  
 [주 관심분야] LTE, Femtocell, 스마트 안테나, MIMO 등

김 영 주



1988년 2월: 고려대학교 전자전산 공학과 (공학사)  
 1996년 2월: 한국과학기술원 정보통신공학과 (공학석사)  
 2001년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)  
 1987년 11월~1993년 12월: (주)금성사  
 1996년 2월~1997년 2월: 동경공업대학교 연구원  
 2001년 1월~2003년 8월: (주)엘지전자 UMTS 연구소  
 2003년 8월~현재: 충북대학교 전자정보대학 정보통신공학과 교수  
 [주 관심분야] 이동 통신시스템, LTE, MIMO, 중계기 등