

시변 다중입출력 방송 채널을 위한 채널예측이 적용된 협력 빔형성 시스템

준회원 김진*, 정회원 강진환*, 종신회원 김상호*

Coordinated Beamforming Systems with Channel Prediction in Time-varying MIMO Broadcast Channel

Jin Kim* Associate Member, Jin Whan Kang* Regular Member, Sang-Hyo Kim* Lifelong Member

요약

본 논문에서는 시변 다중 입출력(multiple-input multiple-output) 방송(broadcast) 채널에서 피드백 양자화와 지연을 고려한 협력 빔형성(coordinated beamforming: CBF) 시스템을 제안한다. 다중 데이터 스트림을 전송하는 CBF 시스템에 피드백 양자화 기법을 적용하고, 구현 복잡도와 피드백 오버헤드 측면에서 효율적인 CBF 시스템을 제시한다. 또한, 실제적인 무선통신 환경에서 발생하는 피드백 지연에 의한 오류를 최소화하기 위하여 사용자 단말에 선형 채널 예측기를 적용한다. 선형 예측기로 Wiener 필터를 이용하여 피드백 지연시간 후의 미래 채널을 예측하고, 이를 토대로 피드백 정보를 생성함으로써 지연된 피드백 정보를 이용하는 CBF 시스템의 성능을 향상시킨다. 모의실험을 통해 다양한 도플러(Doppler) 주파수의 MIMO 방송 채널에서 양자화와 Wiener 필터를 적용한 CBF 시스템의 향상된 심볼 오류율과 합 전송률 성능을 확인한다.

Key Words : Multi-user MIMO, Coordinated Beamforming, Feedback Quantization, Wiener Filter

ABSTRACT

In this paper we propose a coordinated beamforming(CBF) scheme considering the effects of feedback quantization and delay in time-varying multiple-input multiple-output(MIMO) broadcast channels. By equal power allocation per data stream, the proposed CBF scheme transmits multiple data streams per user terminals without additional feedback overhead when quantized feedback information is used. The proposed CBF scheme also applies a linear channel predictor to each user terminals to prevent errors due to feedback delays that are not evitable in practical wireless systems. Each user terminal utilizes Wiener filter to predict future channel responses and generates feedback information based on the predicted channels. Consequently the proposed CBF scheme adapting Wiener filter improves system performances compared with the conventional scheme using delayed feedback.

1. 서론

최근 여러 사용자가 동시에 통신을 할 수 있도록 스케줄링하는 다중 사용자 MIMO(multiple input multiple

output) 시스템이 널리 연구되고 있다^[1]. 방송 채널(broadcast channel)의 채널용량은 dirty paper coding(DPC) 기법을 통해 달성할 수 있지만 기지국(base station)에서 채널환경을 완벽히 알아야 하며, 복잡도가

※ 이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2010-0010005)

* 성균관대학교 정보통신공학부 통신 및 부호이론 연구실(mjkjskku@gmail.com, jinhwan@skku.edu, iamshkim@skku.edu) (°: 교신저자)
 논문번호: KICS2011-03-141, 접수일자: 2011년 3월 9일, 최종논문접수일자: 2011년 5월 2일

높아 실제적으로 적용하기 어려운 문제점이 있다^[2].

DPC의 전송용량에 근접하면서 낮은 복잡도를 가지며 실제적으로 적용하기 위한 방법으로 선형 프리코딩(linear precoding) 기술이 활발히 연구되고 있다. 선형 프리코딩 빔형성(beamforming) 방법으로는 zero-forcing 빔형성(ZFBF), block diagonalization(BD) 등이 있다^[3,4]. 하지만 이 방법은 기지국의 안테나의 개수와 데이터 스트림의 개수가 일치해야 한다. 이를 보완하기 위한 방법으로 협력 빔형성(coordinated beamforming: CBF) 기법이 제안되었다^[5,6]. CBF 방법은 ZFBF 방법보다 기지국과 사용자 단말(user terminal)의 안테나의 개수 설정을 보다 자유롭게 설정할 수 있다는 장점이 있다.

하지만 시스템이 사용자간 간섭을 없애면서 통신을 하기 위해서는 기지국에서 채널 정보(channel state information: CSI)를 완벽히 알아야 하는데, 실제적인 통신환경에서는 피드백 채널의 작은 용량 때문에 채널 정보를 완벽히 피드백 하는 것이 불가능하다. 부분적인 정보를 피드백 시키면서 발생하는 성능 열화를 최소화 하기 위한 많은 연구들이 있었으며, CBF 시스템에서는 대표적으로 채널 변수들의 확률 밀도 함수(probability density function: pdf)를 이용해 양자화 하는 방법이 사용되었다^[6].

기존에 연구된 다중 사용자 MIMO에서의 CBF 시스템은 지연을 고려하지 않았다. 하지만 실제 통신환경에서는 이러한 피드백 지연에 의한 채널 정보의 오류는 불가피하다. 실제로 채널의 느린 변화에도 시스템의 성능은 크게 저하된다. 이 같은 문제를 해결하기 위해 기존 연구들은 단일 사용자 MIMO에서 선형 예측기를 추가하여 미리 저장된 과거 채널 값들을 통해 미래의 채널 상태를 예측하여 통신시스템의 성능을 개선시켰다^[8,9]. 예측기를 사용하지 않고 현재 채널의 상태를 이용한 수신기법을 이용해 피드백 지연 오류에 의한 효과를 경감시키는 연구도 있었지만, 다중 사용자

MIMO와 스케줄링을 고려하는 시스템에는 적용이 어렵다^[10].

본 논문에서는 양자화된 채널 정보를 피드백 받는 CBF 시스템에서 적합한 빔형성 방법을 제시하고, 시변 채널에서 피드백 지연이 있을 때를 가정하였다. 예측기로는 Wiener 필터를 사용한다. 본 논문은 채널 정보가 완벽하게 피드백 되었을 때와 양자화되어 피드백 되었을 때 두 가지 경우에 대해 채널 정보 피드백 지연을 고려하지 않은 기존의 연구들의 성능과 피드백 지연을 고려했을 때의 성능을 비교하고 선형 예측기를 추가하였을 때 성능이 얼마나 향상 되는지 비교한다.

II. 시스템 모형

본 논문에서는 하나의 기지국과 두 사용자 단말로 구성된 무선 네트워크를 고려한다. 기지국은 N_t 개의 안테나를 가지고, 각 사용자 단말은 N_r 개의 안테나를 갖는다. 기지국은 N_t 개의 안테나를 이용하여 사용자 단말당 m_k 개의 데이터 스트림을 전송한다. k 번째 사용자 단말에서 수신처리 과정 후의 신호를 벡터 식으로 표현하면 다음과 같다^[7].

$$y_k = \mathbf{W}_k^H \mathbf{H}_k \mathbf{T}_k x_k + \sum_{\substack{k',j=1 \\ k' \neq k}}^2 \mathbf{W}_k^H \mathbf{H}_k \mathbf{T}_{j'} x_{j'} + \mathbf{W}_k^H \mathbf{n}_k, \quad (1)$$

여기서 x_k 는 길이 m_k 인 송신 심볼 벡터로 기지국의 평균 송신전력은 $E[\|x_k\|^2] = P_T$ 이다. y_k 는 k 번째 사용자 단말에서 수신처리 과정 후의 길이 m_k 인 신호 벡터이다. \mathbf{n}_k 은 평균이 0이고 공분산 행렬이 $E[\mathbf{n}_k \mathbf{n}_k^H] = \mathbf{I}_{N_r}$ 인 복소수 부가백색 정규 잡음 벡터이다. \mathbf{T}_k , \mathbf{W}_k 는 각각 차원이 $(N_t \times m_k)$, $(N_r \times m_k)$ 인 k 번째 사용자 단말을 위한 송신 빔형성 행렬, 수신 가중치 행렬을 나타낸다. 그리고 \mathbf{H}_k 는 차원이 $(N_r \times N_t)$ 인 k 번째 사용자 단말의 채널 행렬이며, 행렬의 각 성분은 평균이 0이고 분산이 1인 가우시안(Gaussian) 분포를 따른다.

실제 무선통신 환경에서 현재 채널 행렬 $\mathbf{H}_k(n)$ 은 과거의 채널 행렬과 시간적으로 상관성을 갖는다. k 번째 사용자 단말에서 현재 채널 행렬 $\mathbf{H}_k(n)$ 과 n_d 시간 이전의 과거 채널 행렬 $\mathbf{H}_k(n-n_d)$ 의 상관관계를 Jake 모형으로 나타내면 아래와 같다^[7].

$$E[h_{k,i_j}^*(n) h_{k,i_j}(n-n_d)] = J_0(2\pi f_d n_d T_s), \quad (2)$$

여기서 $h_{k,i_j}(n)$ 은 시간 n 에서 j 번째 기지국 안테나

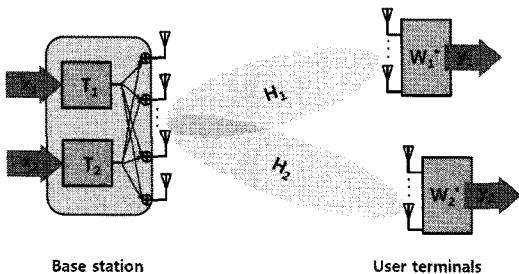


그림 1. 하나의 기지국과 두 사용자 단말로 구성된 MIMO 무선 네트워크
Fig. 1. multi-user MIMO system for two user terminal

에서 k 번째 사용자 단말의 i 번째 안테나로의 채널응답 계수이다. f_d 는 도플러(Doppler) 주파수, T_s 는 심볼 전송주기를 나타낸다. 그리고 $J_0(\cdot)$ 는 제 1종 0차 Bessel 함수이다. 식 (2)와 같은 채널의 시간 상관성을 이용하여 피드백 지연시간 n_d 후의 채널을 예측하고 피드백 지연에 의한 성능 열화를 최소화할 수 있다.

III. CBF 시스템 및 피드백 양자화

3.1 기존의 CBF 시스템

MIMO 방송 채널에서 CBF 시스템은 T_k 와 W_k 이 협력적으로 작용하여 다중 사용자간 간섭을 제거하고 사용자 단말 사후(post-processing) SINR(signal to interference and noise ratio)값을 최대화 한다. 본 절에서는 본 논문에서 사용하는 기본시스템인 사용자 단말의 수가 2인 경우에 비반복적인 방법으로 T_k 와 W_k 를 구하는 CBF 시스템^[6,7]을 소개한다.

단일 데이터 스트림을 보내는 [6]의 연구에서는 우선 채널정보를 나타내는 정규 정합 채널 $R_k = H_k^H H_k / \|H_k\|_F^2$ 을 정의한다. 이 행렬의 역행렬이 존재한다고 가정했을 때, $R_k T = \lambda R_k T$ 로 표현되는 R_k 의 일반 고유행렬(generalized eigen matrix) $T = [t_1, \dots, t_N]$ 의 각 열벡터들이 각 사용자 단말의 데이터 스트림에 대응하는 송신 빔형성 벡터 t_k 가 된다. 그리고 수신 가중치 벡터 w_k 는 정합(matched) 필터 형태로 $w_k = H_k t_k$ 로 나타낼 수 있다. 이러한 CBF 시스템은 일반 고유행렬의 특성으로 인해 다른 사용자간 간섭이 모두 제거 된다. T 의 각 열벡터들은 합 전송률을 최대로 하는 쌍을 선택하여 t_k 로 결정되어진다.

위 시스템은 기지국이 각 사용자 단말에게 단일 데이터 스트림을 전송하기 때문에 다중화 이득을 얻지 못한다. 이를 보완하기 위해 다중 데이터 스트림을 각 사용자 단말에게 전송하는 방법을 제안되었다^[7]. 각 사용자 단말의 R_k 에서 일반 고유행렬 T 를 구한 후 이 행렬의 열벡터들의 부분집합인 V_k 를 구한다. 각 사용자 단말의 V_k 를 QR 분해하면 Q_k 는 사용자간 간섭을 0으로 만들어주는 V_k 의 성질을 그대로 보존한다. 여기서 송신 빔형성 행렬 T_k 를 $T_k = Q_k B_k$ 로 설정해준다면 (1)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$y_k = B_k^H Q_k^H H_k^H H_k Q_k B_k x_k + \sum_{\substack{k, j=1 \\ k \neq j}}^2 B_k^H Q_k^H H_k^H H_k Q_j B_j x_j + B_k^H Q_k^H H_k^H n_k, \quad (3)$$

여기서 $Q_k^H H_k^H H_k Q_k$ 를 eigen 분해를 하게 되면 $U_k A_k U_k^H$ 로 나타나게 되고 여기의 U_k 를 B_k 로 설정하여 T_k 를 설계한다. 이 값들을 이용해 아래와 같은 water-filling(WF)을 이용한 식으로 데이터 스트림별 로 전력을 차별화하여 합전송률을 계산한다.

$$R(V_1, V_2) = \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^{m_k} \left[\log_2 \left(\mu \frac{[A_k]_{jj}}{\sigma_k^2} \right) \right]^+, \quad (4)$$

여기서 a^+ 는 $\max(0, a)$ 를 나타내며 $[\cdot]_{jj}$ 는 행렬의 j 번째 행과 열의 성분을 나타낸다. μ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^{m_k} \left[\log_2 \left(\mu - \frac{\sigma_k^2}{[A_k]_{jj}} \right) \right]^+ = P_T, \quad (5)$$

여기서 P_T 는 전체 송신 전력을 의미한다. 합전송률을 최대로 하는 V_1, V_2 의 쌍을 찾아 T_k 를 계산하게 된다.

3.2 채널 피드백 양자화

채널 정보를 포함하는 정규 정합 채널 R_k 의 대각성분 및 비대각 성분은 베타 분포(beta distribution)를 따른다^[5]. 대각 성분은 (0,1)범위 내에 분포하고 $(N_r, (N_r - 1)N_r)$ 의 자유도를 가지며 비대각 성분의 실수와 허수 성분은 (-0.5,0.5)의 범위를 가진다. 따라서 시스템에는 대각성분과 비대각성분을 표현하는 코드북(codebook) 2개가 필요하며 Q 비트의 대각성분의 코드북을 구성하기 위해 다음과 같은 식으로 부호어(codeword)를 생성한다.

$$\int_{c_{i-1}}^{c_i} f_{R_{kk}}(x) dx = \frac{1}{2^Q + 1} \quad i = 1, 2, \dots, 2^Q, \quad (6)$$

$c_0 = 0$ 이며 $f_{R_{kk}}(x)$ 는 R_k 행렬의 k 번째 대각성분의 베타 분포 pdf이다. 비대각 성분에 대해서도 0.5 만큼 이동시킨 후 위와 같은 방법으로 부호어를 생성한다.

에르미트(Hermitian) 행렬 R_k 의 대칭성과 대각 성분의 합이 1인 점을 고려하면 R_k 행렬의 총 오버헤드는 $(N_r^2 - 1)Q$ 비트가 된다^[6]. 하지만 N_r 가 증가할수록 총 오버헤드가 기하급수적으로 증가하는 단점이 있다.

IV. 피드백 양자화와 지연을 고려한 CBF 시스템

4.1 피드백 양자화를 고려한 CBF 시스템

사용자 단말당 다중 스트림을 전송하고 WF 기법에

의해 송신 전력을 최적으로 할당하는 CBF 시스템^[7]은 MIMO 방송 채널의 다중화 이득(multiplexing gain)을 모두 얻는 이점을 가진다. 하지만 WF 기법을 적용하기 위해서는 기지국에서 크기 정보가 추가적으로 필요하며 이는 피드백 오버헤드를 증가시킨다.

따라서 본 논문에서는 사용자 단말당 다중 스트림을 전송하지만 데이터 스트림당 동일한 송신 전력을 할당하는 CBF 시스템을 적용한다. 즉, T_k 와 W_k 는 3.1절과 같이 생성하고 데이터 스트림당 송신 전력은 식 (7)과 같다.

$$P_{k,i} = P_T / \left(\sum_{k=1}^2 m_k \right), \quad i = 1, 2, \dots, m_k. \quad (7)$$

이러한 CBF 시스템은 기지국에서 채널의 크기 정보가 필요하지 않기에 피드백 오버헤드가 [6]과 같다. 또한, 그림 2에서 확인할 수 있듯이 기존의 WF를 사용하는 CBF 시스템^[7]에 근접한 합 전송률을 보인다. 여기서 WF를 사용하는 CBF 시스템은 채널 크기 정보를 완벽히 알고 채널 방향 정보를 나타내는 R_k 행렬만 양자화 한다고 가정하였다.

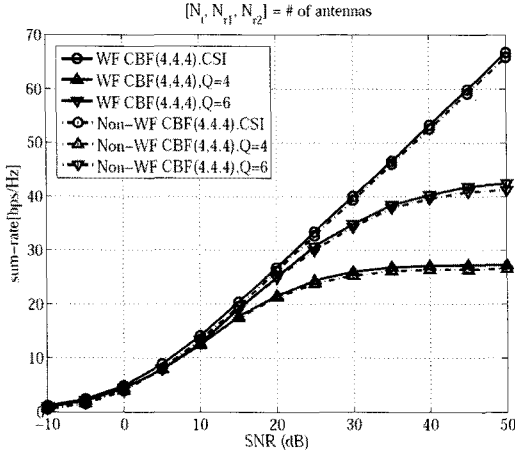


그림 2. CBF 시스템의 합 전송률 성능 비교
Fig. 2. Comparison of sum-rate between proposed scheme and CBF system using WF

4.2 피드백 지연을 고려한 CBF 시스템

실제 무선통신 시스템에서는 하드웨어 처리 시간, 전송 지연 등으로 인해 피드백 지연이 발생한다. 이러한 시간 지연에 따라 T_k 가 과거 채널 정보에 기반을 두어 생성되고, 이에 따라 다중 사용자간 간섭이 제대로 제거되지 못하여 CBF 시스템의 성능을 저하시킨다. 특히 사용자 단말이 고속으로 이동하는 채널 환경에서

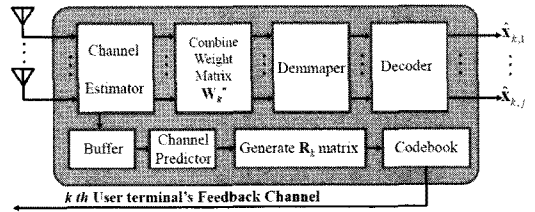


그림 3. 선형 예측기가 적용된 k번째 사용자 단말의 블록도
Fig. 3. k-th user terminal's block diagram adapted linear predictor

는 성능 저하가 더욱 뚜렷하게 나타난다.

본 논문에서는 선형 예측기를 사용자 단말에 적용하여 피드백 지연 시간 n_d 후의 채널을 예측하고, 이를 토대로 R_k 를 생성하여 피드백한다. 선형 예측기로는 평균 제곱 오차를 최소화 하는 Wiener 필터를 사용한다. 시간 n 에서 k 번째 사용자 단말의 채널 성분 $h_{k,ij}$ 에 대한 Wiener 필터계수 벡터 w 는 식 (8)과 같다^[8].

$$w = R_{h_{k,ij}(n+n_d)h_{k,ij}}^{-1} r_{h_{k,ij}(n+n_d)h_{k,ij}}, \quad (8)$$

$$R_{h_{k,ij}} = E[h_{k,ij} h_{k,ij}^H], \quad (9)$$

$$r_{h_{k,ij}(n+n_d)h_{k,ij}} = E[h_{k,ij}(n+n_d)h_{k,ij}^H], \quad (10)$$

여기서 벡터 w 의 길이는 p 이고, p 는 예측 차수를 의미한다. $h_{k,ij}$ 는 길이가 p 인 $h_{k,ij} = [h_{i,j}(n), h_{i,j}(n-1), \dots, h_{i,j}(n-p+1)]^H$ 형태의 열벡터로 현재 채널 성분과 과거 $p-1$ 시간 동안의 과거 채널 성분을 갖는다. $R_{h_{k,ij}}$ 은 $(p \times p)$ 차원의 자기상관(autocorrelation) 행렬이고, $r_{h_{k,ij}(n+n_d)h_{k,ij}}$ 은 길이가 p 인 자기상관 벡터이다. 본 논문에서는 채널 행렬 성분 간에는 공간적으로 독립적이고 시간적으로는 동일하게 Jake 모형을 가정하므로 각 채널 성분을 예측할 때 식 (8)의 Wiener 필터 계수를 공통적으로 사용한다.

시간 n 에서 지연 시간 n_d 후의 채널 성분은 Wiener 필터 계수 w 를 이용한 FIR(finite impulse response) 필터링을 통해 예측 가능하다. k 번째 사용자 단말의 예측된 채널 성분 $\hat{h}_{k,ij}$ 는 다음과 같다.

$$\hat{h}_{k,ij}[n+n_d] = \sum_{m=0}^{p-1} w_m h_{k,ij}[n-m] = w \cdot h_{k,ij}. \quad (11)$$

사용자 단말은 $N_r N_c$ 개의 채널 성분들을 식 (11)과 같이 예측하여 시간 $n+n_d$ 에서의 미래 채널 행렬을 생

성하고, 이를 토대로 R_k 를 계산하여 피드백한다.

V. 성능 분석

이 장에서는 4장에서 설계한 시스템을 다양한 환경에서 모의실험을 하였다. 실험에 사용된 도플러 주파수 f_d 는 각각 20, 30, 60Hz이다. 다중 사용자 MIMO 채널의 반송파 주파수가 2GHz일 경우, 각각의 f_d 에 대한 사용자 단말의 속도는 10.8, 16.2, 32.4km/h이다. Wiener 필터의 예측치수 p 는 50으로 설정하였다. 채널 피드백 지연 시간은 8ms이며, 사용자 단말에서는 채널 정보를 완벽히 안다고 가정한다.

그림 4와 5는 세 가지 경우의 f_d 에서 심볼 오류(symbol error probability: SEP)과 합전송률(sum-rate)을 보여주고 있다. f_d 가 20, 30Hz일 때, 즉 MIMO

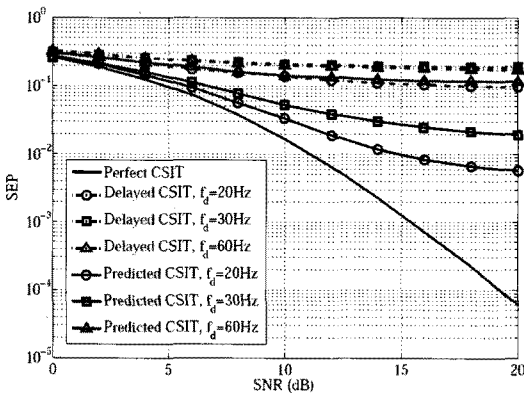


그림 4. 다양한 f_d 에 따른 심볼 오류 성능 비교
Fig. 4. SEP vs. SNR for various f_d [N_t, N_r, N_{r2}] = [2 2 2], f_d : 20,30,60Hz

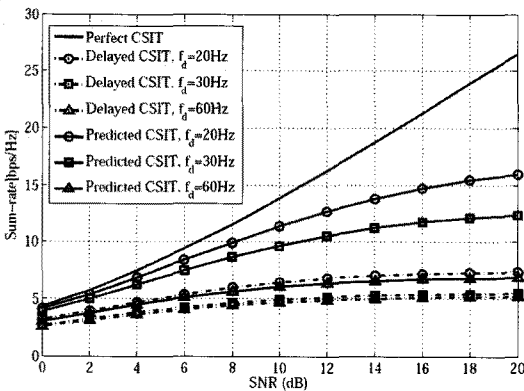


그림 5. 다양한 f_d 에 따른 합전송률 성능 비교
Fig. 5. sum rates vs. SNR for various f_d [N_t, N_r, N_{r2}] = [4 4 4], f_d : 20,30,60Hz

채널이 느리게 변화 할 때에도 피드백 지연된 채널 정보를 사용한 시스템은 현저한 성능열화를 보인다. 이러한 문제점을 Wiener 필터가 효과적으로 보완한다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 단말기의 속도가 빨라지게 되면($f_d=60$ Hz) 채널 환경이 시간에 따라 급격하게 변해 Wiener 필터를 사용해도 효과적으로 채널을 예측하지 못하고 성능 항상 폭이 크지 않다.

그림 6과 7은 기지국이 양자화된 채널 피드백 정보를 이용할 때의 합전송률 성능을 보여주고 있다. 주목할 점은 낮은 f_d 에서는 양자화 오류가 예측오류보다 커서 Wiener 필터의 성능이 양자화 오류 때문에 나타나지 않으며, 높은 f_d 에서는 그 반대가 된다. 단, 그림 7에서 Q가 3비트 정도로 작게 할당이 된다면 양자화 오류도 나타난다. N_t 가 4일 때의 시스템은 양자화 기법 특성상 오버헤드가 많아지는 단점이 있지만 피드백

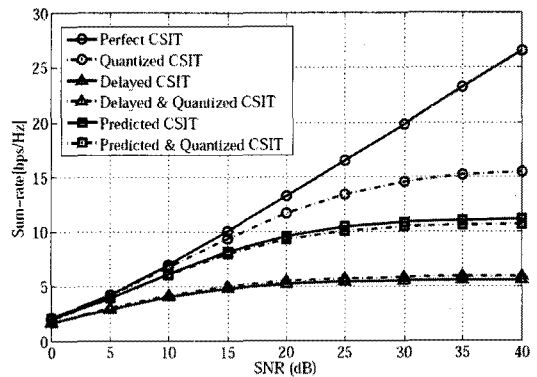


그림 6. $f_d = 20$ Hz에서 양자화가 고려된 합전송률 성능 비교
Fig. 6. sum rates vs. SNR considering quantization [N_t, N_r, N_{r2}] = [4 4 4], Q = 3, 6bits

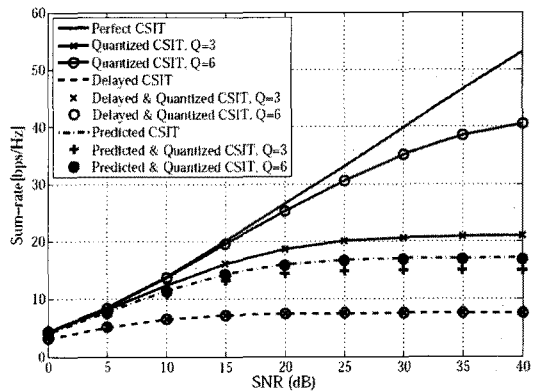


그림 7. $f_d = 60$ Hz에서 양자화가 고려된 합전송률 성능 비교
Fig. 7. sum rates vs. SNR considering quantization [N_t, N_r, N_{r2}] = [4 4 4], Q = 3, 6bits

지연이 고려된 시스템에서 f_d 가 클 때, 즉 사용자 단말의 이동속도가 빠를 때는 양자화 오류가 지연 오류보다 크지 않게 Q 를 낮추더라도 지연 오류에 의해 성능이 크게 변하지 않는다는 것을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 시간 상관성이 고려된 다중 입출력 MIMO 방송 채널에서 양자화된 채널 정보를 피드백 받은 CBF 시스템에 적합한 빔형성 방법을 고려하였고, 사용자 단말에서 Wiener 필터로 채널을 예측하여 피드백 지연을 고려하지 않은 시스템에 비해 큰 성능향상을 얻었다. 그리고 사용자 단말의 속도에 따라 예측 오류와 양자화 오류의 관계가 달라지는 것을 확인했다. 이는 사용자 단말의 속도와 N_t , p 와 Q 의 조절을 통해 효율적으로 피드백 오버헤드 및 시스템 복잡도를 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

향후 채널의 자기상관 함수에 대한 정보가 부족할 때 쓰이는 적응 예측기(adaptive predictor)를 이용한 최소 평균제곱(least-mean-square: LMS) 알고리즘으로 구현한 연구가 필요하다. 또한 단말기의 속도가 빠를 때에도 채널 예측을 효과적으로 수행할 수 있는 예측 기법에 대한 연구가 진행되어야 한다.

참 고 문 헌

[1] D. Gesbert, M. Kountouris, R. W. Heath Jr., C.-B. Chae, and T. Salzer, "Shifting the MIMO paradigm: From single user to multiuser communications", *IEEE Sig. Proc. Mag.*, Vol.24, No.5, pp.36-46, Oct. 2007.

[2] H. Weingarten, Y. Steinberg, and S. Shamai (Shitz), "The capacity region of the Gaussian multiple-input multiple-output broadcast channel", *IEEE Trans. Info. Theory*, Vol.52, No.9, pp.3936-3964, Sep. 2006.

[3] Q. H. Spencer, A. L. Swindlehurst, and M. Maardt, "Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels", *IEEE Trans. Sig. Proc.*, Vol.52, No.2, pp.461-471, Feb. 2004.

[4] C.-B. Chae, R. W. Heath Jr., and D. Mazzarese, "Achievable sum rate bounds of zero-forcing based linear multi-user MIMO systems", in

Proc. Allerton Conf. on Comm. Control and Comp., pp.1134-1140, Sep. 2006.

[5] J. He and M. Salehi, "Low-complexity coordinated interference-aware beamforming for MIMO broadcast channels", in *Proc. IEEE Vehi. Tech. Conf.*, pp.685-689, Sep. 30-Oct. 3 2007.

[6] C.-B. Chae, D. Mazzarese, N. Jindal, and R. W. Heath, Jr., "Coordinated beamforming with limited feedback in the MIMO broadcast channel", *IEEE Jour. Select. Areas in Comm.*, Vol.26, No.8, pp.1505-1515, Oct. 2008.

[7] K.-H. Park, Y.-C. Ko, M.-S. Alouini, and J. Kim, "Low complexity coordinated beamforming in 2-user MIMO systems", in *Proc. IEEE Int. Conf. Comm., Dresden, Germany*, June, 2009.

[8] K. Kobayashi, T. Ohtsuki, T. Kaneko, "Throughput maximization transmission control scheme using precoding for MIMO systems", in *Proc. IEEE Int. Conf. Comm.*, Dec. 2007.

[9] J.-W. Kang, W.-S. Park, S.-H. Kim, "Adaptive modulation and coding for MIMO-OFDM systems using LMS Channel Prediction and CQI Table Adaptation", in *proc. ACM ICUIMC, Seoul, Korea*, Feb, 2011.

[10] K. Kobayashi, T. Ohtsuki, and T. Kaneko, "MIMO systems in the presence of feedback delay," in *proc. ICC.*, pp.4102-4106, 2006,

김 진 (Jin Kim)

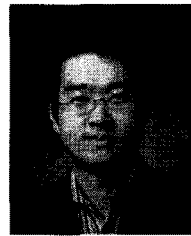
준회원



2010년 2월 성균관대학교 바이오메카트로닉스학과 학사
2010년 3월~현재 성균관대학교 이동통신공학과 석사과정
<관심분야> 다중 안테나 시스템, 오류정정부호

김 상 호 (Sang-Hyo Kim)

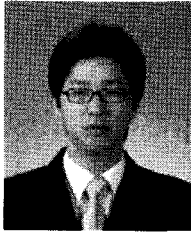
종신회원



1998년 2월 서울대학교 전기공학부 학사
2000년 2월 서울대학교 전기공학부 석사
2004년 2월 서울대학교 전자·컴퓨터공학부 박사
2004년 3월~2006년 7월 삼성전자, 책임연구원
2006년 8월~2007년 8월 박사후 연구원(USC)
2007년 9월~현재 성균관대학교 정보통신공학부 조교수
<관심분야> 극부호, 오류정정부호, 다중 안테나 시스템, 시퀀스, 협력 통신

강 진 환 (Jin Whan Kang)

정회원



2008년 2월 성균관대학교 전기공학학과 학사
2010년 2월 성균관대학교 휴대폰학과 석사
2010년 3월~현재 성균관대학교 휴대폰학과 박사과정
<관심분야> 다중 안테나 시스템, 오류정정부호