

## 비동기 채널의 직접수열 부호분할 다중 계통에서 안테나 배열을 쓴 다사용자 검파

김 광 순, 박 소 령, 배 진 수, 김 선 용\*, 송 익 호  
한국과학기술원 전기및전자공학과, \*한림대학교 전자공학과

### Multiuser Detection Using Antenna Arrays in Asynchronous DS/CDMA Systems

Kwang Soon Kim, So Ryoung Park, Jinsoo Bae, Sun Yong Kim\*, Ickho Song  
Dept. of EE, KAIST, \*Dept. of EE, Hallym Univ.

#### 요 약

이 논문에서는 비동기 채널에서 안테나 배열을 쓰는 역방향 연결 계통의 유사 최대우도 (Maximum-Likelihood: ML) 검파기를 살펴본다. 제한된 유사 최대우도 검파기는 안테나 배열 입력으로 빔을 만든 다음 상관관계를 없애는 방식이며 이제까지의 방식보다 성능이 뛰어남을 보인다. 또한 사용자 수와 안테나 배열 수가 늘어날수록 이제까지의 다른 상관관계 제거 방식보다 성능 이득이 커짐을 볼 수 있다.

#### 1. 머리 말

직접수열 부호분할 다중접속 (Direct Sequence Code Division Multiple Access: DS/CDMA) 방식은 그 독특한 특징과 큰 용량으로 말미암아 각광받는 연구 분야가 되고 있다 [1]. 이 방식은 다른 방식들보다 대역 효율이 높고 바람직한 특징들을 많이 가지고 있기는 하지만, 사용자사이 간섭과 원근 (near-far) 문제에서 약점을 지니고 있으며, 그 큰 용량조차도 이동통신의 폭발적 수요를 충족시키기에는 모자랄 것이 예상된다. 이에 대역 효율을 더욱 높일 수 있는 안테나 배열 다양성 (diversity) 방식이 [2]에서, 사용자사이 간섭을 없애고 원근 문제에 대처할 수 있는 여러 방식이 [3]-[7]에서 연구되었다. 최적 다중 사용자 검파기는 성능이 가장 좋으나 사용자 수가 늘어나면 판단 알고리즘이 지수적으로 복잡해 지므로, 몇몇 준최적 검파기가 고려되었는데 [6][7], [6]에서는 간단한 준최적 다중 사용자 검파기로써 상관관계 제거 방식을 고려하였다. 그러나 이 계통들은 상관관계 제거가 잡음을 커지게, 또 상관있게 하며, 교차 상관 계수와 사용자 수가 커질수록 그러한 단점이 더욱 커진다.

#### 2. 계통 모형

비동기 채널에서 이동국으로부터 안테나 배열을 쓰는 기지국으로의 역방향 연결을 생각해 보자. 채널은 넓은 의미에서 정상이고 서로 관계없이 흩어진다고 둔다. 또한 채널이 느리게 바뀌는 레일리 특성을 띠는다고 두자. 이동국에서 정보 비트들에 확산 수열과

반송파를 곱한 뒤 이진 위상 천이 변조로 보낸다고 하면, 이 때, 주파수가  $f_c$  인 ( $f_c \ll 1/T_s$ ) 반송파로 변조된 전송 신호는 다음과 같다.

$$u_k(t) = \sqrt{P_k} \text{Re}\{x_k(t) c_k(t) \exp[j(\omega_c t + \phi_k)]\}. \quad (1)$$

여기서  $x_k(t)$ 은  $k$ 제 사용자의 기저대역 정보 신호 파형,  $c_k(n)$ 은  $k$ 제 사용자의  $n$ 제 칩,  $\omega_c = 2\pi f_c$  이고,  $\phi_k$ 는  $k$ 제 반송파의 위상,  $P_k$ 는  $k$ 제 사용자의 전송 전력이다.

갈퀴 다경로 다양성을 쓰는 때를 생각해 보자. 다중 경로의 지연 확산이 신호 대역폭의 역수와 견줄만할 때, 기지국 수신기에서 수신된  $M \times 1$  신호 벡터는 다음과 같다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L s_{k,l}(t - \tau_{k,l}) c_k(t - \tau_{k,l}) a_{k,l} + n(t). \quad (2)$$

여기서  $s_{k,l}(t) = \sqrt{P_k} a_{k,l} x_k(t) e^{j\phi_{k,l}}$  이고,  $a_{k,l}$ 은  $k$ 제 사용자의  $l$ 제 경로의 감쇠 요소이며,  $L$ 은 서로 나눌 수 있는 경로수이다. ( $\phi_k = 0$ 이라고 가정한 위상 동기 수신에서)  $\phi_{k,l} = \phi_k - \omega_c \tau_{k,l}$ 이고,  $a_{k,l}$ 은  $k$ 제 사용자의  $l$ 제 경로에서의  $M \times 1$  채널 벡터이며,  $n(t)$ 는 공분산행렬이  $\sigma_n^2$ 이고 시공간적으로 백색인  $M \times 1$  가산 복소 정규 잡음 벡터이다.

갈퀴 다중 경로 다양성을 쓰는 수신기의 열개가 그림 1에 나타나있다. 갈퀴 수신기  $Y(n)$ 에서 출력되는  $M \times KL$  행렬은 다음과 같다.

$$Y(n) = \begin{bmatrix} y_{1,1}(n) & \dots & y_{1,L}(n) & y_{2,1}(n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{2,L}(n) & \dots & y_{K,1}(n) & \dots & y_{K,L}(n) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

여기서,

$$y_{p,q}(n) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{m=-1}^1 s_{k,l}(n+m) \gamma_{p,q,k,l}^{(m)} a_{k,l} + n_{p,q}(n) \quad (4)$$

은  $q$ 째 경로에서  $p$ 째 사용자의 갈퀴 수신기로 출력되는  $M \times 1$  열벡터이고,  $\gamma_{p,q,k,l}^{(-1)}$ ,  $\gamma_{p,q,k,l}^{(0)}$ ,  $\gamma_{p,q,k,l}^{(1)}$ 는  $q$ 째 경로에서  $n$ 째 심볼 구간 동안의  $p$ 째 사용자 서명 파형과,  $l$ 째 경로에서 각각  $n-1$ ,  $n$ ,  $n+1$ 째 심볼 구간 동안의  $k$ 째 사용자 서명 파형의 교차 상관 계수들이다. 그리고,

$$n_{p,q}(n) = \frac{1}{T_s} \int_{\tau_{p,q} + (n-1)T_s}^{\tau_{p,q} + nT_s} n(t) c_p(t - \tau_{p,q}) dt \quad (5)$$

은  $M \times 1$  잡음 열벡터이다.

서명 파형은 이미 알고 있고 각 사용자의 시간 지연은 여러 [2] 방법으로 추정할 수 있으므로  $\gamma_{p,q,k,l}^{(-1)}$ ,  $\gamma_{p,q,k,l}^{(0)}$ ,  $\gamma_{p,q,k,l}^{(1)}$ 을 계산할 수 있다. 한편  $n_{p,q}(n)$ 과  $n_{k,l}(n+m)$ 의 교차 공분산 행렬은 다음과 같다.

$$E\{n_{p,q}(n) n_{k,l}^H(n+m)\} = \begin{cases} \gamma_{p,q,k,l}^{(m)} \sigma_n'^2 I & m = -1, 0, 1 \text{ 일 때,} \\ 0 & \text{그 밖에.} \end{cases} \quad (6)$$

여기서  $\sigma_n'^2 = \frac{\sigma_n^2}{T_s}$ 이다.

### 3. 유사 최대우도 검파 기법

이제,  $p$ 째 사용자의  $q$ 째 경로를 거쳐 나오는 표본화된 부호 상관기 출력  $y_{p,q}(n)$ 의 우도 함수  $L_{p,q}(n)$ 에 로그를 취하고 편미분하여 그 결과를 0으로 놓자. 그리고  $R_{nn,p,q} = E\{n_{p,q}(n) n_{p,q}^H(n)\} = \sigma_n'^2 I$ , 곧, 잡음이 시공간적으로 백색이므로,  $s_{p,q}(n)$ 의 우도 추정값은 다음과 같이 간단해진다.

$$\hat{s}_{p,q}(n) = (\gamma_{p,q,p,q}^{(0)} \|a_{p,q}\|)^{-1} \cdot [a_{p,q}^H y_{p,q}(n) / \|a_{p,q}\| - \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{m=-1}^1 s_{k,l}(n+m) \cdot \gamma_{p,q,k,l}^{(m)} a_{k,l}^H a_{k,l} / \|a_{p,q}\|] \quad (7)$$

위의 식에서  $s_{k,l}(n+m)$ 을 추정값  $\hat{s}_{k,l}(n+m)$ ,  $k=1, \dots, K$ ,  $l=1, \dots, L$ 로 바꾸고 각 사용자 경로에 대한 모든 우도 함수를 고려하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$Y_a(n) = QW \hat{X}_a(n). \quad (8)$$

여기서,

$$Q = \Lambda^{(-1)} \cdot D + \Lambda^{(0)} + \Lambda^{(1)} \cdot D^{-1}, \quad (9)$$

$$W = \text{diag}([w_{1,1} \dots w_{1,L} \ w_{2,1} \dots w_{2,L} \dots w_{K,1} \dots w_{K,L}]) \quad (10)$$

$$X_a(n) = [x_{a,1,1}(n) \dots x_{a,1,L}(n) \dots x_{a,K,1}(n) \dots x_{a,K,L}(n)]^T \quad (11)$$

$$Y_a(n) = [a_{1,1}^H y_{1,1}(n) / \|a_{1,1}\| \dots a_{1,L}^H y_{1,L}(n) / \|a_{1,L}\| \dots a_{K,L}^H y_{K,L}(n) / \|a_{K,L}\|]^T \quad (12)$$

이고  $w_{k,l} = \sqrt{P_k} a_{k,l} e^{j\theta_{k,l}}$ ,  $\Lambda^{(m)}$ 는  $(p-1)L+q$ ,  $(k-1)L+l$ 째 원소가  $\gamma_{p,q,k,l}^{(m)} d_{p,q,k,l}$ 인  $KL \times KL$  행렬이다.  $\hat{X}_a(n)$ 은  $X_a(n)$ 의 추정값이며,  $d_{p,q,k,l} = a_{p,q}^H a_{k,l} / \|a_{p,q}\| \|a_{k,l}\|$ 이고,  $x_{a,k,l}(n) = \|a_{k,l}\| x_k(n)$ 이다.

$Q$ 의 원소가  $D$ 의 다항식이므로  $Q^{-1}$ 의 원소는 일반적으로  $D$ 의 유리 함수라는 것을 알 수 있다. 그러므로  $W \hat{X}_a(n)$ 은  $Y_a(n)$ , 지연된  $Y_a(n)$ 들, 그리고 지연된  $W \hat{X}_a(n)$ 들의 선형 결합이 되어, 입력이  $Y_a(n)$ 이고 출력이  $W \hat{X}_a(n)$ 인 역여파기를 설계할 수 있다. 서명 파형과 채널 벡터를 안다면 여파기의 계수들을 계산할 수 있다.

[4]와 [6]에서 연구된 것처럼 전달 함수가  $\gamma(Z) = (\Gamma^{(-1)} Z^{-1} + \Gamma^{(0)} + \Gamma^{(1)} Z^1)^{-1}$ 인  $K$ -입력  $K$ -출력 상관제거기를 생각해 보자. 여기서  $\Gamma^{(m)}$ 의  $i, j$ 째 원소는  $\gamma_{i,j}^{(m)}$ 이다. 이때 여파기 출력  $B(n)$ 은

$$B(n) = [b_{1,1}(n) \dots b_{1,L}(n) \dots b_{K,1}(n) \dots b_{K,L}(n)] \quad (13)$$

이고 여기서,

$$b_{p,q}(n) = s_{p,q}(n) a_{p,q} + n'_{p,q}(n), \quad (14)$$

$$E\{n'_{p,q}(n) n'_{p,q}^H(n)\} = [F(0)]_{p,q,p,q} \sigma_n'^2 I, \quad (15)$$

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} F(k) Z^{-k} = \gamma(Z) R_n(Z) \gamma^H(1/Z^*) \quad (16)$$

이며,  $[R]_{i,j}$ 는  $R$ 의  $i, j$ 째 원소이고,  $R_n(Z) = \Gamma^{(-1)} Z^{-1} + \Gamma^{(0)} + \Gamma^{(1)} Z^1$ 은 잡음의 공분산 행렬을  $Z$ -변환한 것이다. 이제,  $b_{p,q}(n)$ 의 공분산 행렬은 다음과 같다.

$$R_{bb,p,q}(n) = E\{b_{p,q}(n) b_{p,q}^H(n)\} = P_{p,q} a_{p,q}^2 a_{p,q}^H a_{p,q} + [F(0)]_{p,q,p,q} \sigma_n'^2 I. \quad (17)$$

그러므로 최대 고유값에 대응되는 고유 벡터로  $p$ 째 사용자의 채널 벡터를 추정할 수 있다. 서명 파형을 알고 있으면  $d_{p,q,k,l}$ 와 여파기의 계수들을 계산할 수 있고, 역여파기가 다음과 같은 형태라는 것을 쉽게 알 수 있다.

$$G(Z) = [\Lambda^{(-1)} Z^{-1} + \Lambda^{(0)} + \Lambda^{(1)} Z]^1. \quad (18)$$

다른 [4][6] 논문에서 제안된 계통에서도 전달함수가  $r(Z)$ 인 여파기가 비동기 다중 사용자 검파에 쓰이지만, 이 논문에서 제안한 계통에서는 여파기의 계수들이 채널 벡터에 독립이다. 그러므로 기억 장치와 곱셈기를 조금 더 덧붙임으로써 제안한 여파기를 쉽게 구현할 수 있고, 이 여파기는 조금 더 복잡하지만, 성능 이득을 얻을 수 있음을 뒤에 보일 것이다.

이제까지의 상관제거 방법에서는 빔을 만들기 전에 상관을 없앤다. 한편, 제안된 계통에서는 수신 신호로 먼저 빔을 만들고 다음에 상관을 없앤다. 제안된 방법은 상관제거로 말미암아 피할 수 없이 생기는 잡음 성분의 강화와 상관을 줄이는 장점이 있다.

이제까지의 상관제거기에서  $k$ 째 사용자의 원근 (near-far) 저항성 접근 효율은 다음과 같다.

$$\bar{\eta}_k^d = \left[ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [\Gamma^{(1)} e^{j\omega} + \Gamma^{(0)} + \Gamma^{(-1)} e^{-j\omega}]^{-1} d\omega \right]^{-1} \quad (19)$$

제안된 계통에서  $k$ 째 사용자의 원근 저항성 접근 효율은 비슷한 방법으로 얻을 수 있다.

$$\bar{\eta}_k^p = \left[ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [\Lambda^{(1)} e^{j\omega} + \Lambda^{(0)} + \Lambda^{(-1)} e^{-j\omega}]^{-1} d\omega \right]^{-1} \quad (20)$$

여기서  $\Lambda^{(1)}, \Lambda^{(0)}, \Lambda^{(-1)}$ 이 각각  $\Gamma^{(-1)}, \Gamma^{(0)}, \Gamma^{(1)}$ 보다 작은 비대각원소를 가진다는 것을 쉽게 알 수 있다. 그러므로 이제까지의 계통보다 제안된 계통의 원근 저항성과 접근 효율이 높다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 성능 분석

먼저, 첫째 사용자 신호를 바라는 신호라 하자. 첫째 사용자의 여파기 출력은 다음과 같다.

$$V_1(n) = W_1 x_1(n) + N_{g,1}(n). \quad (21)$$

여기서  $W_1 = [w_{1,1} \| a_{1,1} \| w_{1,2} \| a_{1,2} \| \dots \| w_{1,L} \| a_{1,L} \|^T$ ,  $N_{g,1}(n) = [n_{g,1,1}(n) \ n_{g,1,2}(n) \ \dots \ n_{g,1,L}(n)]^T$ ,  $N_g(n) = [N_{g,1}^T \ N_{g,2}^T \ \dots \ N_{g,K}^T]^T$ 이다. 잡음 벡터의 상관 행렬의 Z-변환은  $R_n(Z) = \Lambda^{(-1)} Z^{-1} + \Lambda^{(0)} + \Lambda^{(1)} Z$ 이다. 여파된 정규 잡음의 공분산 행렬을  $T(0)$ 이라 하고  $[T(0)]_L$ 을  $ij$ 째 원소가  $T(0)$ 의  $ij$ 째 원소인  $L \times L$  행렬이라 할 때,  $N_{g,1}(n)$ 의 상관 행렬은  $\sigma_n^2 [T(0)]_L$ 이다. 그러므로 콜레스키 (Cholesky) 분해법으로  $(\Phi_1^{-1})(\Phi_1^{-1})^H = [T(0)]_L$ 인  $L \times L$  백색화 행렬  $\Phi_1$ 을 얻을 수 있다 [8]. 그러면, 백색화 여파 결과는 다음과 같다.

$$v_{1,w}(n) = \Phi_1 W_1 x_1(n) + n_{1,w}(n). \quad (22)$$

여기서  $E\{n_{1,w}(n) n_{1,w}^*(n)\} = \sigma_n^2 I$ 이다. 최대 유효 결합 (Maximum Ratio Combining: MRC) 위상

동기 수신을 가정하면 결정 변수  $\rho_1(n)$ 을 얻을 수 있고,

$$\rho_1(n) = W_1^H \Phi_1^H v_{1,w}(n) = W_1^H \Phi_1^H \Phi W_1 x_1(n) + W_1^H \Phi_1^H n_{1,w}(n). \quad (23)$$

$\rho_1(n)$ 의 순간 신호대 잡음비  $\nu_1$ 은

$$\begin{aligned} \nu_1 &= \frac{(W_1^H (\Phi_1^H \Phi_1) W_1)^2}{2 \sigma_n^2 W_1^H (\Phi_1^H \Phi_1) W_1} \\ &= \frac{W_1^H (\Phi_1^H \Phi_1) W_1}{2 \sigma_n^2} \\ &= \frac{E_1 W_1^H ([T(0)]_L)^{-1} W_1}{2 \sigma_n^2} \end{aligned} \quad (24)$$

이며,  $W_1 = W_1' \sqrt{P_1}$ 이다. 여기서,  $W_1'$ 는 평균이 0이고 공분산 행렬이 아래와 같은 복소 정규 행렬이다.

$$R_{W_1' W_1'} = \text{diag}(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_L). \quad (25)$$

여기서  $\mu_i = E\{a_{1,i}^2\} a_1^H a_1$ 이다.  $R_{W_1' W_1'} ([T(0)]_L)^{-1}$ 가 대칭 행렬이므로 [9]의 결과를 써서  $\rho_1(n)$ 의 특성 함수를 얻을 수 있다.

$$\Phi_{\rho_1}(\omega) = \frac{1}{\prod_{j=1}^L (1 + 2j\omega \xi_{1,j})}. \quad (26)$$

여기서  $\xi_{1,j}$ 는  $R_{W_1' W_1'} ([T(0)]_L)^{-1}$ 의 고유값이다. [10]의 결과를 쓰면 비트 오류율은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{b,1} &= \int_0^\infty \frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{x}) f_{\rho_1}(x) dx \\ &= \sum_{l=1}^L \frac{\pi_{1,l}}{2} \left[ 1 - \sqrt{\frac{x_{1,l}}{1+x_{1,l}}} \right]. \end{aligned} \quad (27)$$

여기서  $\pi_{1,l} = \prod_{j=1, j \neq l}^L \frac{\xi_{1,l}}{\xi_{1,l} - \xi_{1,j}}$ 이고  $x_{1,l} = \frac{E_1 \xi_{1,l}}{2\sigma_n^2}$

이다.

#### 5. 모의 실험 결과

서로 나눌 수 있는 경로마다, 각이  $[0, 2\pi]$ 에 균일하게 분포하는 배열 응답 벡터 20개의 선형 조합으로 채널 응답 벡터를 만들었다. 계수들은 표준 복소 정규 확률 분포를 따르도록 만들었다. (곧, 계수들의 합이 1이다.) 서로 나눌 수 있는 경로의 시간 지연  $\tau_{k,l}$ 도 균일하게 분포한다. 길이 63 골드 부호를 쓰고 모든 경로에서 레일리 매개변수를 0.1로 ( $E\{a^2\} = 0.1$ ) 두었다.

그림 2와 3은 갈퀴 다양성이 쓰였고 서로 나눌 수 있는 경로가 3개, 사용자가 각각 10, 20 사람일 때 두 계통의 비트 오류율을 보여준다. 여기서 실선은 안테나 수가 2, 3, 4일 때 제안된 계통의 비트 오류율 곡선이고, 점선은 이제까지 계통의 곡선이다. 안테나 수가 커지고 사용자가 많아지면, 이제까지의 계통보다 성능 이득이 커짐을 볼 수 있다. 곧, 제안된

계통을 써서 높은 대역 효율을 얻을 수 있고, 사용자 수와 안테나 수가 커질수록 이제까지의 상관제거 계통보다 제안된 계통의 성능 이득도 늘어난다는 것을 뚜렷이 알 수 있다.

## 6. 맺음말

이 논문에서는 비동기 채널에서 안테나 배열을 쓰는 유사 최대 우도 검파기를 제안하였다. 이제까지의 계통은 먼저 상관을 제거한 뒤에 빔을 만들지만, 제안된 유사 최대우도 검파기는 먼저 빔을 만든 뒤 상관을 없애는 계통으로 생각할 수 있다. 채널의 매개변수를 추정하고자 역역파된 신호의 상관 행렬 고유분해법에 바탕을 둔 방법을 제안하였다. 또한 제안된 계통의 성능을 분석하여, 이제까지 계통의 주 결점인 잡음의 강화와 상관을 줄일 수 있음을 관찰하였다. 이제까지의 상관제거 계통보다 성능이 좋음을 보일 수 있고 사용자 수와 안테나 수가 늘어나면 그 차이가 더욱 커짐을 보았다. 그러므로 이제까지의 상관제거기보다 제안된 계통에서 훨씬 더 큰 용량을 기대할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 한국과학재단이 지원한 1997년 핵심전문연구 971-0916-097-2 로 이루어진 연구 결과의 하나이며, 이에 그 고마운 뜻을 적습니다.

## 참고 문헌

- [1] R.L. Pickholtz, L.B. Milstein, and D.L. Schilling, "Spread spectrum for mobile communications," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, Vol. VT-40, pp. 313-322, May 1991.
- [2] A.F. Naguib and A. Paulraj, "Performance enhancement and trade-offs of smart antennas in CDMA cellular networks," *Proc IEEE VTC*, Chicago, IL, pp. 40-44, July 1995.
- [3] R. Lupas and S. Verdú, "Near-far resistance of multiuser detector in asynchronous channels," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. COM-38, pp. 496-508, April 1990.
- [4] S. Verdú, "Multiuser Detection," in *Advances in Signal Processing* (H.V. Poor and J.B. Thomas, eds.), Vol. 2: Signal Detection, pp. 369-409, CT: JAI Press, 1992.
- [5] C. Kchao and G. Stuber, "Performance analysis of a single cell direct sequencemobile radio system," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. COM-41, pp. 1507-1516, October 1993.
- [6] Z. Zvonar, "Combined multiuser detection and diversity reception for wireless CDMA

systems," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, Vol. VT-45, pp. 205-211, February 1996.

- [7] B.-P. Paris, "Finite precision decorrelating receivers for multiuser CDMA communication systems," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. COM-44, pp. 496-507, April 1996.
- [8] C.W. Therrien, *Discrete Random Signals and Statistical Signal Processing*, NJ: Prentice-Hall, 1992.
- [9] L.L. Scharf, *Statistical Signal Processing*, MA: Addison-Wesley, 1991.
- [10] J.G. Proakis, *Digital Communication, 3rd ed.*, NY: McGraw-Hill, 1995.

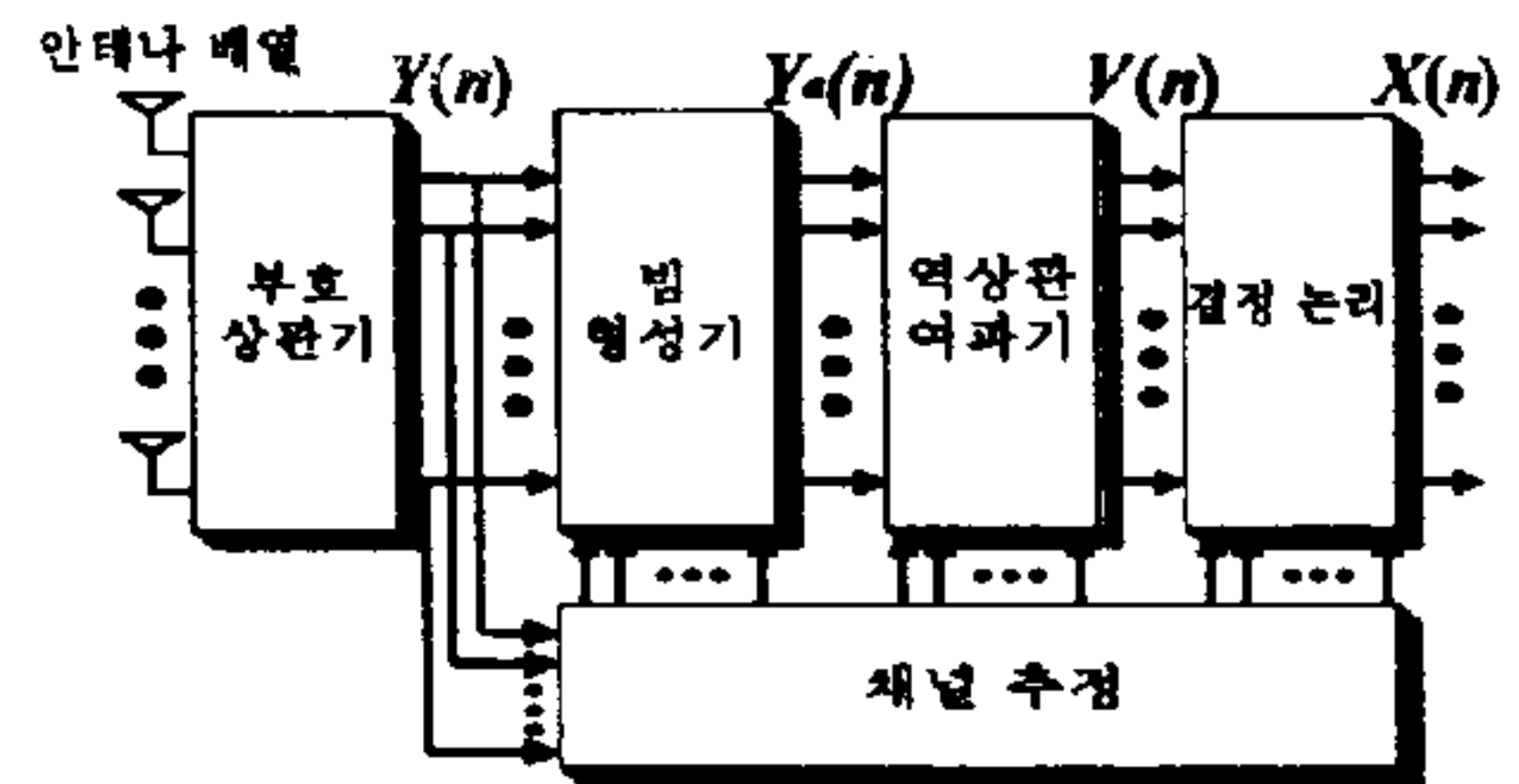


그림 1: 갈퀴 다중 경로 다양성을 썼을 때의 수신기 열개

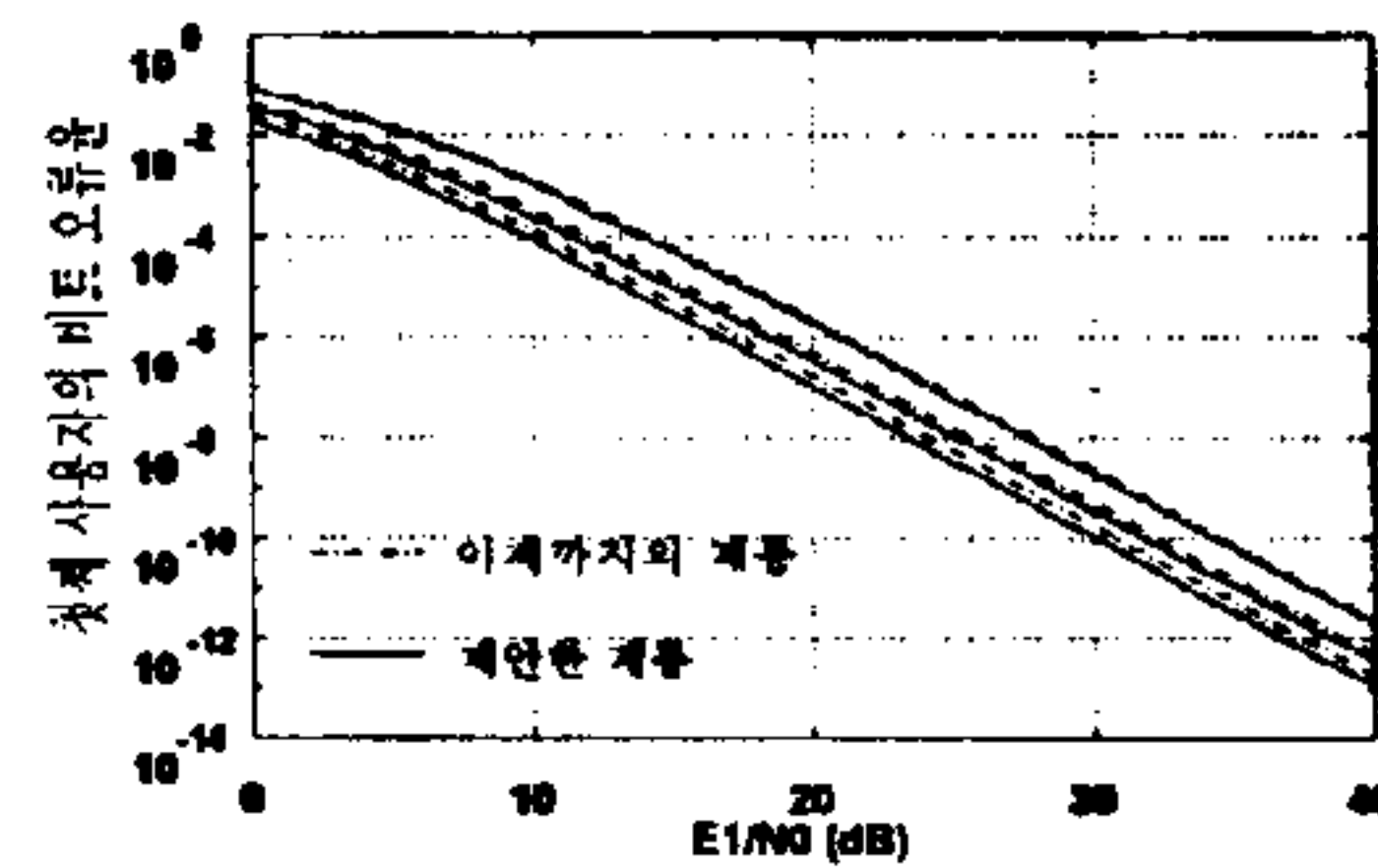


그림 2: 사용자수  $K=10$ , 서로 나눌 수 있는 경로 수  $L=3$ , 안테나 수  $M=2, 3, 4$ 이고, 골드수열의 주기는 63, 레일리 분포의 매개변수는 0.1일 때, 두 계통의 비트 오류율 비교

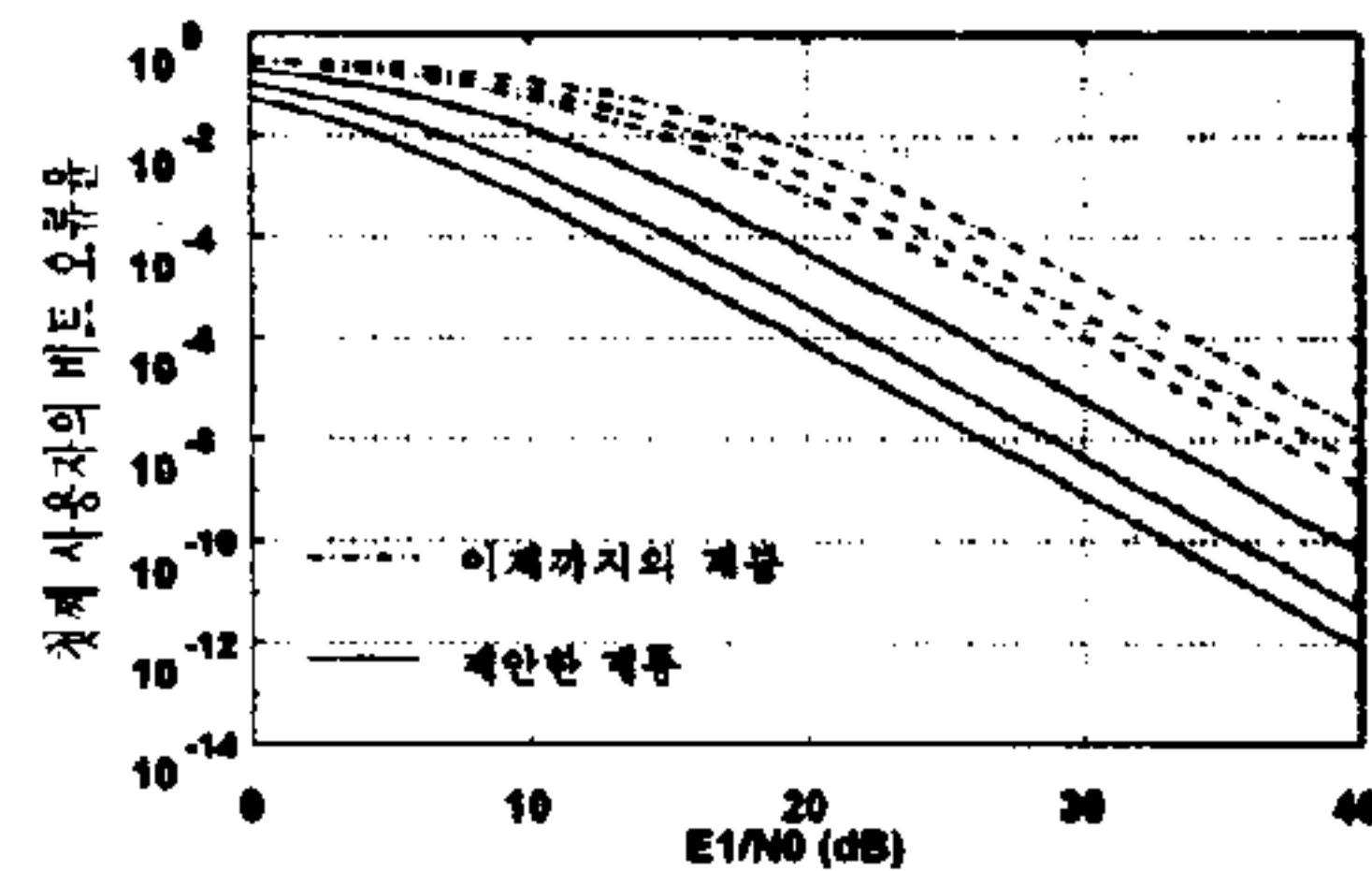


그림 3: 사용자수  $K=20$ , 서로 나눌 수 있는 경로 수  $L=3$ , 안테나 수  $M=2, 3, 4$ 이고, 골드수열의 주기는 63, 레일리 분포의 매개변수는 0.1일 때, 두 계통의 비트 오류율 비교