

비동기 CDMA 시스템을 위한 반복적 역상관기의 수렴특성 분석

정회원 백시윤*, 임성빈*

Convergence Analysis of An Iterative Decorrelator for Asynchronous CDMA Systems

Siyoon Baik*, Sungbin Im* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 비동기 CDMA 시스템에서 다중 접속 간섭의 영향을 줄이기 위해 제안된 역상관기 중에서 반복 연산을 사용하여 계산량을 개선한 반복적 역상관기의 수렴특성에 대하여 분석하였고 이를 모의 실험을 통하여 검증하였다. 반복적 역상관기에서 수렴특성을 결정하는 수렴 인자를 유도하였고, 가장 빠른 수렴 특성을 보장하는 최적의 수렴 상수를 상관행렬의 최대 및 최소 고유값으로 나타낼 수 있음을 증명하였다. 또한 반복 과정의 중간 결과에 대한 최대 오차 범위를 유도하였다.

ABSTRACT

In this paper, we analyze the convergence characteristics of an iterative decorrelator that exploits iterative computation to improve the computational complexity of the decorrelator, which was proposed to mitigate the effect of multiple access interference in the asynchronous CDMA system. Furthermore, the analysis results are verified through computer simulation. The convergence factor that determines the convergence characteristics of the iterative decorrelator is derived and we show that the optimal convergence constant guaranteeing fast convergence can be expressed in terms of the maximum and minimum eigenvalues of the correlation matrix. In addition, the maximum error bound of an interim output during iteration process with respect to the convergent point is derived.

1. 서론

DS-CDMA (direct sequence CDMA) 시스템에서는 각 사용자의 정보 비트를 서로 다른 사용자 코드에 의하여 변조를 시키고 수신단에서는 모든 사용자의 신호를 수신하고 상관기로서 구성된 검파기는 이미 알고 있는 각 사용자의 코드, 지연 시간(비동기의 경우)등을 사용하여 수신된 신호에서 사용자의 정보 비트를 복구한다. 사용자간의 동기가 일치하지 않는 비동기 시스템의 경우 기존의 상관

기를 사용하는 경우 심한 다중 접속 간섭을 받게 되고 특히 완전한 전력 제어가 되지 않는 경우에 있어서는 간섭의 영향은 더욱 심해진다^{1,2)}.

다중 접속시 최적의 검파기는 Maximum Likelihood Sequence Estimate (MLSE) 검파기이다²⁾. 그러나 MLSE 검파기는 사용자수에 대하여 계산의 복잡도가 지수적으로 증가하는 단점을 갖고 있다. 이러한 단점으로 인하여 성능 측면에서는 상관기만을 사용하는 기존의 검파기보다는 우수하면서도 복잡

* 숭실대학교 정보통신전자공학부(sbi@amcs.ssu.ac.kr)

논문번호: K01096-0308, 접수일자: 2001년 3월 8일

※ 이 연구는 1999년도 숭실대학교 교내연구비의 지원에 의한 결과입니다.

도 측면에서는 MLSE 검파기보다 간단한 준 최적의 다양한 형태의 검파기들이 제안되었다^[3]. 이런 검파기들의 특징으로는 선형 연립 방정식을 푸는 형태를 취하고 있다. 준최적의 검파기 중에서 역상관기 (decorrelator)는 원근 문제에 대한 영향을 받지 않고 다중 사용자의 신호를 복조 할 수 있는 검파기이다. 그러나, 그 성능의 우수성에 비하여 역상관 과정에 요구되는 많은 계산량이 단점으로 지적되고 있으며 많은 연구자들에 의하여 계산량이 개선된 역상관기들이 제안되고 있다^[3,4,5]. 이 방법들의 특징은 계산량을 개선하기 위하여 반복적 연산을 이용하고 있다는 점이다. 이러한 반복적 역상관기들의 문제는 수렴의 보장과 수렴 속도 및 반복횟수의 결정 등이다.

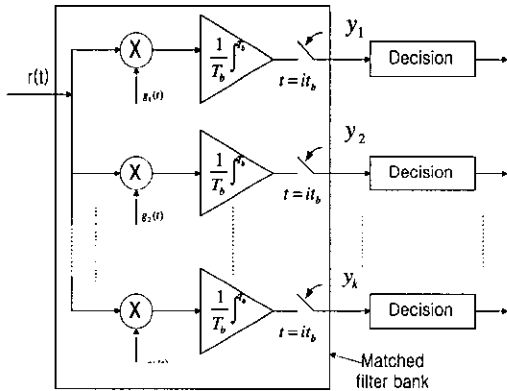


그림 1. 상관기를 사용한 DS-SS 검파기의 구조

본 논문에서는 저자가 참고 문헌 [5]에서 제안한 반복적 역상관기의 수렴 특성을 분석하였다. 이 반복적 역상관기는 반복적 연산과 다중 접속 간섭의 구조적 특성을 이용하여 계산량을 감소시키고 있다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 다음 절에서는 본 논문에서 고려하는 비동기 CDMA 시스템에 대한 모델을 설명하고 3절에서는 역상관기의 기본적 개념과 반복적 역상관기의 구조를 설명한다. 4절에서는 반복적 역상관기의 수렴 특성을 결정하는 수렴인자 및 오차 범위를 유도한다. 5절에서는 모의실험을 통하여 4절에서 유도된 이론값과 실험값에 대하여 검증하고, 끝으로 6절에서 결론을 맺는다.

II. 비동기 채널 모델

본 논문에서는 길이가 N 인 정보 비트를 전송하는 K 명의 사용자가 있는 비동기 CDMA 시스템을

고려한다. k 번째 사용자의 단위 에너지를 갖는 signature waveform을 g_k 로 표시하고 이 파형의 길이는 심벌 길이 $[0, T]$ 에서 정의된다. 일반적으로 사용자 k 의 지연시간 τ_k 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$0 = \tau_1 \leq \tau_2 \leq \dots \leq \tau_K \quad (1)$$

각 사용자의 지연시간에 대한 정보는 수신기에서 알 수 있다고 가정을 하면 수신 신호는 다음과 같다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N A_k b_k(i) g_k(t - iT - \tau_k) + n(t) \quad (2)$$

여기서 A_k 는 k 번째 사용자의 신호의 크기를 나타내며 $b_k(i)$ 는 k 번째 사용자의 i 번째 정보 비트 $\{+1, -1\}$ 를 나타낸다. 또한 $n(t)$ 는 채널의 AWGN(additive white Gaussian noise)을 나타낸다.

위의 수신신호를 그림 1에서 보여주는 기존의 상관기를 통과시키면 그 출력을 다음과 같은 행렬 형태로 표현할 수 있다.

$$y = R_N b + z \quad (3)$$

여기서 출력 벡터 y 은 다음과 같이 구성된다.

$$y = [y^1(1) \ y^1(2) \ \dots \ y^1(N)]^t \quad (4)$$

위 식에서 첨자 't'는 transpose를 나타내며 $y(i)$ 는 다음과 같다.

$$y(i) = [y_1(i) \ y_2(i) \ \dots \ y_K(i)]^t \quad (5)$$

사용자의 정보를 갖고 있는 b 는 다음과 같다.

$$b = [b^1(1) \ b^1(2) \ \dots \ b^1(N)]^t \quad (6)$$

$$b(i) = [A_1 b_1(i) \ A_2 b_2(i) \ \dots \ A_K b_K(i)]^t \quad (7)$$

잡음 성분을 나타내는 z 는 다음과 같이 구성된다.

$$z = [z^1(1) \ z^1(2) \ \dots \ z^1(N)]^t \quad (8)$$

$$z(i) = [z_1(i) \ z_2(i) \ \dots \ z_K(i)]^t \quad (9)$$

식(3)에서 R_N 은 사용자 코드간의 상관 함수 값

으로 구성된 다음과 같은 형태의 블록 행렬이다.

$$R_N = \begin{bmatrix} R(0) & R'(1) & 0 & \dots & \dots & 0 \\ R(1) & R(0) & R'(1) & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & R(1) & R(0) & R'(1) \\ 0 & 0 & 0 & \dots & R(1) & R(0) \end{bmatrix} \quad (10)$$

위에서 0는 $K \times K$ 영행렬을 나타내며 $R(m)$ 은 다음의 성분으로 구성된 $K \times K$ 행렬을 나타낸다.

$$R_M(m) = \int_{-\infty}^{\infty} g_k(t - \tau_k) g_l(t + mT - \tau_l) dt \quad (11)$$

위에서 $R_M(m)$ 은 m 번째 정보 비트에서 사용자 k 와 사용자 l 의 코드의 부분상호상관함수를 나타낸다. 따라서 R_N 의 크기는 $NK \times NK$ 이다.

III. 반복적 역상관기

역상관기에서는 식 (3)에 주어진 상관기의 출력 y 에 포함된 다른 사용자에 의한 간섭을 제거하기 위하여 코드상관행렬 R_N 의 역행렬을 사용한다.

R_N 의 역행렬은 앞에서 정의된 조건하에서는 항상 존재하는 것으로 알려져 있다^[2]. 즉 식 (3)으로부터, 정보 비트의 추정치는 다음과 같다.

$$\hat{b} = R_N^{-1} y = b + R_N^{-1} z = b + z_{dec} \quad (12)$$

식 (12)에서 보듯이, 검파기의 추정치는 각 사용자 간의 간섭이 분리된 정보비트와 잡음으로 구성된다. 역상관기는 심벌 간의 간섭을 완벽하게 제거하는 zero-forcing equalizer와 매우 유사하다. 역상관기는 다양한 측면에서 장점들을 보여주고 있으나 식 (12)에서 구현의 측면에서 코드상관행렬 R_N 의 역행렬 계산을 실시간에 수행하여야 하는 단점을 갖고 있다. 동기 시스템의 경우에 있어서는 코드상관행렬 R_N 의 크기가 사용자수에 의하여 결정되어 $K \times K$ 행렬로 줄어들지만 비동기 시스템의 경우에는 사용자수와 정보의 길이의 곱에 의하여 결정되어 그 크기가 $NK \times NK$ 로 증가한다. 이러한 많은 계산량의 단점을 개선하기 위하여 몇 가지의 제안된 방법들이 있다^[3,4,5]. 본 논문에서 고려하는 반복적 역상관기는 참고 문헌 [5]에서 제안된 것으로 반복적 역상관기의 반복 과정은 다음 식으로 표

현할 수 있다.

$$F(x) = x + \gamma(y - R_N x) \quad (13)$$

여기서 γ 는 상수이다. 만약 \hat{x} 이 다음의 행렬 방정식의 해가 되는 경우 $F(\hat{x}) = \hat{x}$ 가 성립된다.

$$R_N x = y \quad (14)$$

역으로, $F(\hat{x}) = \hat{x}$ 가 성립되는 경우 \hat{x} 은 식 (14)의 해가 된다. 여기서 우리가 고려할 점으로는 변환 $F(\cdot)$ 에 의한 반복적인 연산, $F(x_k) = x_{k+1}$ 에 의해 발생하는 수열 x_k 가 \hat{x} 으로 어떻게 수렴하는가에 대한 이론적 분석이 필요하다.

이 반복적 역상관기에서는 역행렬의 계산이 필요 없으므로 계산량 측면에서 기존의 역상관기에 비하여 적은 계산량을 요구하며 FFT 기반의 고속의 컨벌루션 알고리즘을 사용하면 계산량을 추가적으로 줄일 수 있다^[6].

IV. 수렴 특성

1. 최적의 γ_{opt} 결정

본 절에서는 앞에서 설명한 반복 연산 기반의 역상관기의 수렴 특성에 대하여 분석한다. 반복적 역상관기의 수렴 특성은 γ 의 값에 의하여 결정되므로 최적의 γ 를 얻기 위해서 먼저 식 (13)을 다음과 같이 변형한다.

$$x_{k+1} = M x_k + \gamma y \quad (15)$$

여기서 반복 행렬 (iteration matrix) M 은 다음과 같이 정의된다.

$$M = I - \gamma R_N \quad (16)$$

수렴 특성을 분석하기 위하여 다음과 같이 정의된 오차 벡터 e_k 를 도입한다.

$$e_k = \hat{x} - x_k \quad (17)$$

여기서 \hat{x} 은 식 (14)의 해이며, k 번째 반복 연산에서의 오차 벡터는 다음과 같다.

$$e_k = M^k e_0 \quad (18)$$

임의의 벡터 norm $\|\cdot\|$ 과 유도 행렬 norm (induced matrix norm)에 대하여, norm의 특성에 의해서 다음의 관계를 얻는다.

$$\|e_k\| = \|M^k e_0\| \leq \|M^k\| \|e_0\| \quad (19)$$

주어진 행렬 norm에 대하여 k 번째 반복에서 수렴 인자는 $\|M^k\|$ 이다. 따라서 임의의 초기값 x_0 에 대하여, \hat{x} 로 빠르게 수렴하기 위해서는 $\|M^k\|$ 를 최소화하여야 한다. 임의의 행렬 norm에 대하여 다음이 성립됨이 알려져 있다^[6].

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \|M^k\|^{1/k} = \rho(M) \quad (20)$$

여기서 $\rho(M)$ 은 행렬 M 의 스펙트럼 반경 (spectral radius)을 나타낸다. 즉 각 반복당 수렴 인자의 평균값은 상당히 큰 k 에 대하여 스펙트럼 반경으로 수렴한다. 또한 유클리디안 norm을 사용하는 경우, 대칭 행렬 M 에 대하여 $\|M^k\|_2^{1/k} = \rho(M)$ 이다^[7]. 따라서, 역상관기가 고속의 수렴 특성을 갖기 위해서는 반복 행렬 M 의 스펙트럼 반경 $\rho(M)$ 을 최소화하여야 한다. 즉

$$\gamma_{opt} = \arg \min_{\gamma} \rho(I - \gamma R_N) \quad (21)$$

식 (19)에서 유클리디안 norm을 사용하는 경우 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \|e_k\|_2 / \|e_0\|_2 &\leq \|M^k\|_2 = \rho(M)^k \\ &= \rho(I - \gamma R_N)^k = \left[\max_j |1 - \gamma \lambda_j| \right]^k \end{aligned} \quad (22)$$

위 식에서 λ_j 는 R_N 의 고유값 (eigenvalue)으로 R_N 이 대칭행렬이므로 λ_j 은 실수이다. 이 λ_j 중에 최대 고유값과 최소 고유값이 각각 $\lambda_{max}, \lambda_{min}$ 라고 하면 R_N 은 semi positive definite 이므로 $\lambda_{min} > 0$ 이다.

식 (22)의 마지막 부분은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} &\left[\max_j |1 - \gamma \lambda_j| \right]^k \\ &= \left[\max \{ |1 - \gamma \lambda_{max}|, |1 - \gamma \lambda_{min}| \} \right]^k \end{aligned} \quad (23)$$

따라서, $0 < \gamma < 2/\lambda_{max}$ 가 만족되면 반복적 역상관기

는 임의의 초기값 x_0 에 대하여 반드시 \hat{x} 으로 수렴한다. 또한 빠른 수렴 속도를 갖도록 하는 γ_{opt} 를 찾는 것은 다음과 같다.

$$\arg \min_{\gamma} [\max \{ |1 - \gamma \lambda_{max}|, |1 - \gamma \lambda_{min}| \}] \quad (24)$$

식 (24)를 만족하는 γ_{opt} 은 다음과 같다.

$$\gamma_{opt} = \frac{2}{\lambda_{min} + \lambda_{max}} \quad (25)$$

위 결과는 그림 2로부터 쉽게 얻을 수 있다. 참고적으로 γ_{opt} 에 대하여 최소가 되는 스펙트럼 반경은 다음과 같다.

$$\rho(I - \gamma_{opt} R_N) = \frac{1 - \lambda_{min}/\lambda_{max}}{1 + \lambda_{min}/\lambda_{max}} < 1 \quad (26)$$

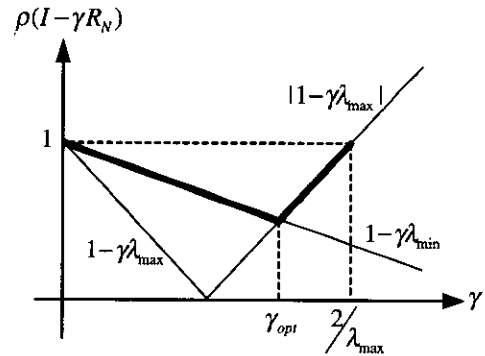


그림 2. γ 에 따른 스펙트럼 반경의 변화.

2. 반복 오차의 예측

위에서 찾은 γ_{opt} 를 사용하여 k 번째 반복 연산을 하여 얻은 x_k 와 식 (14)의 해 \hat{x} 간의 오차에 대한 범위는 다음과 같이 구할 수 있다. 식 (15)를 이용하면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$x_{k+1} - x_k = M(x_k - x_{k-1}) \quad (27)$$

위 식을 귀납법에 의하여 정리하면 다음의 결과를 얻는다.

$$x_{k+m+1} - x_{k+m} = M^{m+1}(x_k - x_{k-1}) \quad (28)$$

여기서 $m=0, 1, \dots$ 을 나타낸다. 또한 다음의 관계식이 성립됨을 알 수 있다.

$$\mathbf{x}_{k+p} - \mathbf{x}_k = \sum_{m=0}^{p-1} (\mathbf{x}_{k+m+1} - \mathbf{x}_{k+m}) \quad (29)$$

유클리디안 norm에 대하여 식 (28) 및 (29)에 삼각 부등식을 적용하면 다음의 부등식을 얻는다.

$$\|\mathbf{x}_{k+p} - \mathbf{x}_k\|_2 \leq \sum_{m=0}^{p-1} \|M^{m+1}\|_2 \|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}\|_2 \quad (30)$$

여기서 $p \rightarrow \infty$ 이면 \mathbf{x}_{k+p} 는 $\hat{\mathbf{x}}$ 로 수렴하고 $\sum_{m=0}^{p-1} \|M^{m+1}\|_2$ 는 $\|M\|_2 / (1 - \|M\|_2)$ 로 수렴한다. 따라서 식 (30)은 $\|M^k\|_2^{\frac{1}{k}} = \rho(M)$ 임을 사용하면 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} \|\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_k\|_2 &\leq \frac{\|M\|_2}{1 - \|M\|_2} \|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}\|_2 \\ &= \frac{\rho(M)}{1 - \rho(M)} \|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}\|_2 \end{aligned} \quad (31)$$

식 (31)에서 식 (26)의 결과를 사용하면 다음과 같이 정리된다.

$$\|\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_k\|_2 \leq \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{2\lambda_{\min}} \|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}\|_2 \quad (32)$$

위의 결과를 이용하면 현재 k 번째 반복에서 구한 \mathbf{x}_k 가 갖고 있는 최대 오차 범위는 $k-1$ 번째 구한 \mathbf{x}_{k-1} 과 R_N 의 최대 및 최소 고유값에 의하여 예측할 수 있으며 이것에 의하여 반복 연산의 정지 여부를 결정할 수 있다.

V. 모의 실험

이 절에서는 모의 실험을 통하여 앞에서 제안된 최적의 γ_{opt} 과 반복 오차 범위에 대하여 이론값과 실험값에 대하여 검증한다. 모의 실험에서는 다중 접속 사용자의 수를 8명으로 가정하고 사용자의 코드로는 주기가 127인 m -시퀀스를 사용하였다. 각 사용자간의 비동기성을 부여하기 위하여 8명의 사용자간의 시간 지연 간격을 심볼 주기 T 에 대하여 1/8씩을 사용하였다. 또한 가장 약한 신호의 사용자를 첫 번째 사용자로 가정하였으며 가장 강한 신호의 사용자에 대한 원근비 (NFR, Near-Far Ratio)는 $NFR=20\text{dB}$ 로 설정하였다.

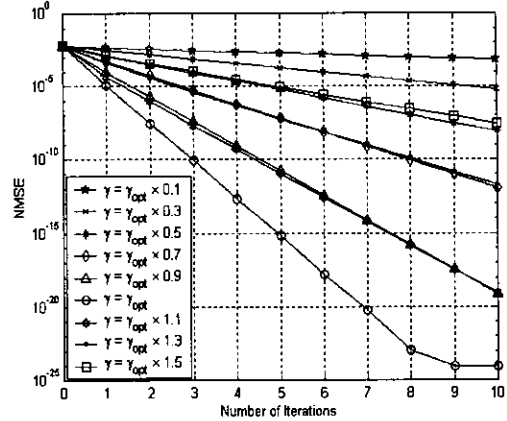


그림 3. 다양한 γ 에 대하여 반복 회수에 따른 NMSE의 변화

첫 번째 실험에서는 다양한 γ 값에 대하여 수렴 특성의 변화를 반복 연산 결과 \mathbf{x}_k 와 $\hat{\mathbf{x}}$ 간의 정규화된 평균제곱오차 (normalized mean squared error, NMSE) 관점에서 관측하였다. 이 실험에서 사용된 상관행렬 R_N 의 $\lambda_{\min} = 0.894$ 이고 $\lambda_{\max} = 1.077$ 이다. 따라서 식 (25)에 의하여 최적의 γ 인 $\gamma_{opt} = 1.015$ 이다. 이 실험에서는 각 사용자당 100개의 비트를 전송하는 것으로 설정하였다. 따라서 NMSE는 800개의 비트에 대하여 측정되었으며 다양한 γ 값을 사용하였다. 그림 3에 이 결과를 도시하였다. x 축은 반복 회수이며 y 축은 NMSE이다. 이 실험에서는 수렴에 미치는 γ 의 영향을 보기 위하여 사용된 채널은 잡음이 없는 단일 경로이고 앞에서 언급된 데로 사용자간 $NFR=20\text{dB}$ 이다. 그림 3에 나타난 것처럼 γ_{opt} 를 사용한 경우가 빠른 수렴 특성을 보여 주며 γ_{opt} 보다 작거나 큰 경우는 수렴 특성이 저하되는 것을 관측할 수 있다. 주목할 점으로는 γ_{opt} 을 사용하는 경우 8번의 반복 회수 이후부터 10^{-24} 정도의 NMSE에서 더 이상 감소하지 않는 것으로 나타났다.

두 번째 실험에서는 γ_{opt} 을 사용하는 경우 식 (32)에서 유도된 오차 범위에 대하여 검증을 하는 실험을 수행하였다. 이 실험에서는 잡음이 없는 경우와 E_b/N_0 가 3 dB인 경우를 가정하였다. 그림 4에 이 결과를 도시하였다. 그림 4에서 왼쪽 마름모로 표시된 곡선은 매 반복 계산의 결과 \mathbf{x}_k 와 $\hat{\mathbf{x}}$ 간의 유클리디안 norm을 표시하며 각각 3 dB 잡음과 잡음이 없는 경우를 표시한다. 반면에 사각형과 ‘*’

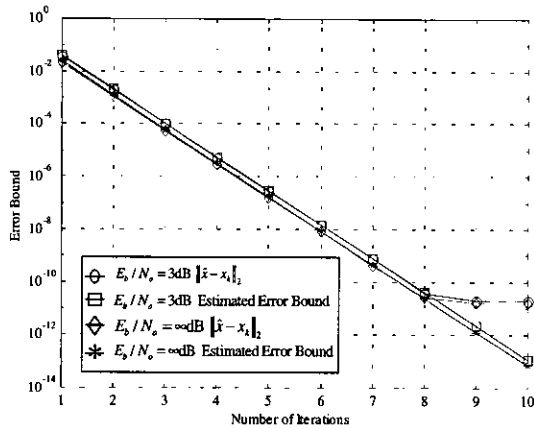


그림 4. 반복 회수에 따른 오차 범위의 변화.

로 표시된 곡선은 식 (32)의 좌변에 의하여 추정된 오차 범위를 나타내며 각각 $E_b/N_0=3$ dB와 잡음이 없는 경우이다. 주목할 점은 반복 회수가 8회일 때까지는 식 (32)의 결과가 유효하나 8회 이상의 반복에서는 식 (32)의 부등호가 성립하지 않는다. 이것은 실제 반복 계산에서 나오는 결과들이 수치상의 오차에 기인하여 감소하지 않고 비슷한 값을 갖기 때문이다.

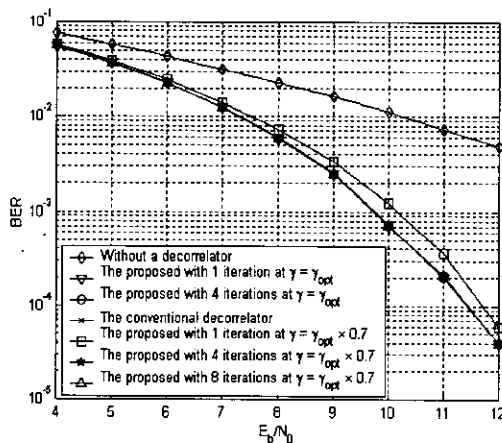


그림 5. $\gamma = \gamma_{opt}$ 과 $\gamma = 0.7 \times \gamma_{opt}$ 및 1, 4, 8회의 반복 회수에 대하여 E_b/N_0 에 따른 비트오율의 변화.

세 번째 실험에서는 몇 가지의 γ 와 반복 회수에 대하여 E_b/N_0 에 따른 비트 오율 특성을 비교하였다. 이 실험에서는 간섭의 영향을 가장 많이 받는 약한 사용자 신호의 비트 오율을 측정하였다. 이 결과는 그림 5에 도시하였다. 그림 5에서 마름모로 표시된 비트 오율 곡선은 역상관기를 사용하지 않고

상관기의 출력에 대한 비트 오율로서 성능이 가장 떨어지며 '*' 표시가 된 곡선은 기존의 역상관기를 사용하는 경우에 있어서의 성능을 보여주고 있다. γ_{opt} 를 사용하며 1회 및 4회 반복의 반복적 역상관기의 성능은 역삼각형과 원으로 표시된 곡선으로서 기존의 역상관기와 비슷한 성능을 보여주고 있다. $0.7 \times \gamma_{opt}$ 를 사용하며 1회, 4회, 8회 반복하는 경우에 대해서는 각각 사각형, 별표, 삼각형으로 표시된 곡선으로 1회를 제외하고는 모두 기존의 역상관기와 비슷한 성능을 보여 주고 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 비동기 CDMA 시스템에서 다중접속에 의한 간섭을 제거하는 역상관기 중에서 반복 연산을 사용하여 계산량을 개선한 반복적 역상관기의 수렴특성에 대하여 분석하고 모의 실험을 통하여 이를 검증하였다. 먼저 반복적 역상관기에서 수렴특성을 결정하는 수렴 인자를 유도하고 가장 빠른 수렴 특성을 보장하는 최적의 수렴 상수를 상관 행렬의 최대 및 최소 고유값으로 나타낼 수 있음을 증명하였고 반복 과정에서 계산된 결과들을 이용하여 수렴값과의 최대 오차 범위를 유도하였다. 이 최대 오차 범위를 이용하면 반복 연산의 정지 여부를 결정할 수 있다. 또한 이론적 결과에 대하여 모의 실험을 통하여 검증하였다. 본 논문의 결과를 이용하면 반복 연산에 대한 오차와 채널 잡음의 영향을 고려하여 반복적 역상관기의 비트 오율 특성에 대한 이론적 분석이 가능하리라 예상된다.

참고 문헌

- [1] S. Verdu, "Minimum Probability of Error for Asynchronous Gaussian Multiple-Access Channels," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 32, no. 1, pp. 85-96, 1986.
- [2] J. G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, 1995.
- [3] S. Moshavi, "Multi-User Detection for DS-SS-CDMA Communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 34, no. 10, pp.124-136, October 1996.
- [4] S. Das, J. Cavallaro, and B. Aazhang, "Computationally Efficient Multiuser Detectors," *Proc. of PIMRC'97*, pp. 62-67,

Helsinki, Finland, September 1997.

- [5] S. Im, E. Kim, and Y. Shin, "A Computationally Efficient Decorrelator for Multibeam Antennas Using an Iterative Method with Fast Correlation in DS-CDMA Systems," *Proc. of IEEE VTC'99*, pp. 1237-1241, Houston, Texas, USA, May 1999.
- [6] D. P. Bertsekas and J. N. Tsitsiklis, *Parallel and Distributed Computation*, Prentice-Hall, 1989.
- [7] G. H. Golub and C. F. Van Loan, *Matrix Computations*, 2nd Edition, Johns Hopkins University Press, 1989.

백 시 윤(Siyeon Baik)

준회원



1999년 2월 : 안동대학교
정보통신공학과 졸업
2000년 3월~현재 : 송실대학교
정보통신공학과
석사과정

<주관심 분야> Multi-User Detection, CDMA 시스템

임 성 빈(Sungbin Im)

정회원

현재 : 송실대학교 정보통신전자공학부 조교수

<주관심 분야> 통신신호처리, SDR, WPAN, 고출력
증폭기 선형화,

한국 통신학회 논문지 제23권 제9B호 참조