

DS/CDMA 배열 안테나 시스템에서 PN 동기 획득 방법

PN code Acquisition Method Using Array Antenna Systems for DS/CDMA

조희남*, 최승원*
Huinam Cho*, Seungwon Choi*

Abstract - This paper presents a structure of the searcher using the space diversity in array antenna system operating in the DS/CDMA signal environments. The new technique exploits the fact that the In-phase and Quadrature components of interferers can respectively be viewed as independent Gaussian noise at each antenna element in most practical CDMA (Code Division Multiple Access) signal environments. The proposed PN acquisition scheme is a single dwell serial PN acquisition system consisting of two stage, that is, the searching stage and the verification stage. The searching stage correlates the received signals with the local PN oscillator for obtaining the synchronous energy at the entire uncertainty region. The verification stage compares the searching energy with the optimal threshold, which is pre-designed in the Lock-Detector, and decides whether the acquisition is successful or fail. In this paper, we analyzed the relationship of both diversity order and the mean acquisition time. In general, It is known that the mean acquisition time decreases significantly as the number of antenna elements increases. But, the enhancement of the performance is saturated in terms of PN acquisition scheme. Therefore, to decrease the mean acquisition time, we must design the optimal array antenna system by considering the operating SNR range of the receiver, the detection probability, and the false alarm probability. The performance of the proposed acquisition scheme is analyzed in frequency-selective Rayleigh fading channels. In this paper, the effect of the number of antenna elements on acquisition scheme is considered in terms of the detection probability, false alarm probability, and the mean acquisition time.

Key Words : Antenna Arrays, DS/CDMA, PN code Acquisition, Space Diversity, Non-coherent Detector

1장. 서론

최근, 이동 통신 분야에서 점차 증가하는 다양한 사용자의 고속 전송률 서비스를 낮은 가격으로 많은 사용자에게 제공하기 위해서는 무엇보다도 제한된 통신 자원을 이용하여 보다 많은 데이터를 신뢰성있게 전송할 수 있는 물리 계층 기술 개발이 중요시 되고 있다. 이런 다양한 전송 효율 향상 기술 중 수신단에 배열 안테나를 사용하는 기술은 추가적인 주파수 할당이나 전력 증가 없이도 통신 용량 및 수신 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 방법으로 큰 주목을 받고 있다. 배열 안테나 기술은 신호를 공간 필터링하여 원하는 신호 성분은 증대시키고, 간섭 성분은 억제하여 보다 많은 정보를 신뢰성있게 전송할 수 있는 시공간 신호 처리 기술의 하나이다 [1]. 이런 배열 안테나 기술은 크게 빔포밍 기술과 다이버시티 기술로 분류할 수 있다. 그러나, DS/CDMA 시스템에서 동작하는 배열 안테나의 특성을 얻기 위해서는, 정확한 PN 동기 획득이 선행되어야만 한다. 따라서, 배열 안테나 시스템에서 정확하고 빠른 PN 동기 시간을 획득하는 방법(일명, Searching)은 DS/CDMA 신호 환경에서 효율적인 배열 안테나 사용에 매우 중요한 신호 처리 과정이다.

본 논문은, DS/CDMA 신호 환경에서 동작하는 배열 안테나의 효율적인 사용 방안에 대해 PN 동기 획득 관점에서 논하고자 한다. 성능 분석은 각 안테나 소자에 수신된 신호는

각각 independent and identically distributed (IID) Rayleigh fading 채널 환경을 겪었다는 가정 하에서 수행하였다. 배열 안테나 소자의 수, 수신기의 동작 SNR 범위와 같은 다양한 요소가 PN 검출 확률 P_D 및 오-경보 확률 P_{FA} , 평균 PN 동기 획득 시간 T_{ACQ} 에 주는 영향에 대해서 살펴본다.

2장. 시-공간 벡터 채널

이 장에서는, DS/CDMA 신호 환경에서 동작하는 수신 배열 안테나의 각 안테나 소자에 유기되는 페이딩 채널 계수의 공간 상관도를 알아본다. 그림 1은 시-공간 벡터 채널을 나타내고 있다.

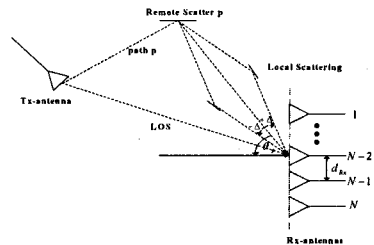


그림 1. 시-공간 벡터 채널

그림 1에서 θ_p 는 p 번째 다중 경로 성분의 입사각을, Δ 는 배열 안테나에 근접한 local scatters에 의해서 p 번째 다중

* 한양대학교 전자통신전공공학부

경로 성분이 공간 상에서 산란된 정도를 나타내는 각도 퍼짐을 의미한다. 따라서, p 번째 다중 경로 성분의 입사각은 $[\theta_p - \Delta, \theta_p + \Delta]$ 내에서 uniform하게 분포되어 있다. n 번째 안테나 소자와 k 번째 안테나 소자 사이에서 p 번째 다중 경로 성분의 페이딩 채널 계수의 상관도는 식 (1)과 같다.

$$R_p = E[\alpha_n(t, \phi_p) \alpha_k^H(s, \phi_p)] = \Phi(p) J_0(2\pi f_d(t-s)) C_p(n, k) \quad (1)$$

여기서, $\alpha_n(t, \phi_p)$ 는 n 번째 안테나 소자에 유기되는 페이딩 채널 계수를, $\phi_p = \theta_p \pm \Delta$ 를, H 는 Hemisian을, $\Phi(p)$ 는 multipath intensity profile을, f_d 는 doppler spread를, $J_0(\cdot)$ 는 0차 일종 Bessel 함수를, $C_p(n, k)$ 는 안테나 간 공간 상관도를 나타내며, 식 (2)와 같다.

$$C_p(n, k) = \frac{1}{2\Delta} \int_{\theta_p - \Delta}^{\theta_p + \Delta} e^{-j \frac{2\pi d_{nk}(n-k) \sin(\theta)}{\lambda}} d\theta \quad (2)$$

식 (2)에서 보는 바와 같이, 공간 상관도는 이웃한 안테나 소자 간의 이격 거리 d_{nk} 와 입사각 분포 θ 의 함수이다. 그림 2는 간섭자가 없을 경우, 원하는 신호의 공간 상관도를 다른 입사각($DOA = 0^\circ, 60^\circ$)과 다른 각도 퍼짐에서 d_{nk}/λ 의 함수로 나타낸 것이다.

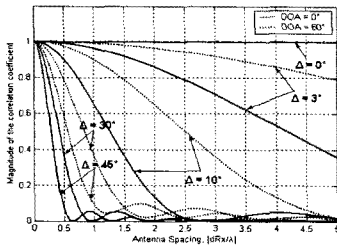


그림 2. 각도 퍼짐에 따른 공간 상관도

한, 그림 3은 각도 퍼짐이 증가할수록 시-공간 페이딩 벡터 채널의 변화를 나타낸 것이다. Doppler spread $f_d = 80\text{Hz}$ 로 설정하였다.

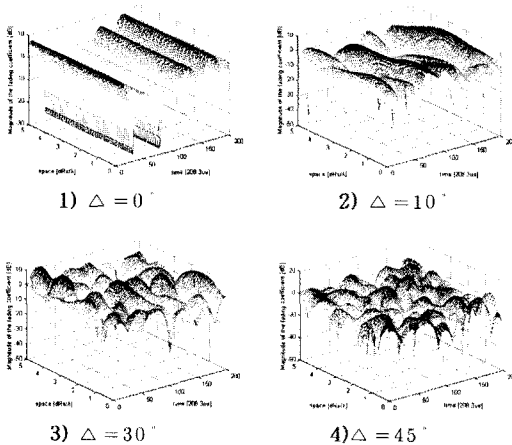


그림 3. 각도 퍼짐에 따른 시-공간 벡터 채널

3장. 제안한 PN 동기 획득 방법

본 논문에서 제안한 PN 동기 획득 방법은 Searching 단계와 Verification 단계로 이루어진 Non-coherently Combining Single-Dwell 방식이다. 각 안테나 소자에 수신되는 신호의 통계적 독립성을 이용하여 공간 다이버시티 이득을 얻는 구조로 되어 있다. DS/CDMA 환경에서는 한 셀 내의 수많은 사용자의 신호 성분들이 동시에 각 안테나 소자에 랜덤하게 수신되어 벡터 합으로 수신되기 때문에, 안테나 간 공간 상관도는 감소한다. 또한, 각도 퍼짐이 증가할수록 배열 안테나의 자기 상관 함수의 공간 상관도를 더욱 감소시킨다.

본 논문에서 제안한 탐색기에서 PN 동기 시간을 추정하기 위해서, Searching 단계에서는 결정 변수 Z 를 식 (3)과 같이, 각 안테나 소자의 Square-Law Envelope Detectors의 출력값을 Non-coherently Linear Combining하여 형성한다.

$$Z = \sum_{n=1}^N Z_n = \sum_{n=1}^N [I_n^2 + Q_n^2] \quad (3)$$

따라서, 결정 변수 Z 는 자유도가 $2N$ 인 chi-square 분포를 갖는 Random Variable이 된다. 성능 분석 시, 다른 셀과의 간섭을 고려하지 않았기 때문에, Searching 단계에서는 PN 코드의 길이 U 에 해당하는 모든 PN 코드 위상 정보를 수집한다고 가정하였다. 따라서, Searching 단계에서 불확실한 PN 코드 위상 정보의 개수는 PN 코드 전체 길이 U 와 같다. 이를 Searching Window Size라고 하며, 셀 풀랜에 따라 변경 설정이 가능하다. 수집된 결정 변수 Z 는 PN Acquisition 성공 여부를 판단하기 위해서, Lock-Detector의 Verification 단계로 넘어간다.

Lock-Detector의 Verification 단계에서 결정 변수 Z 는 특정한 Threshold η 과 비교된다. 만약 결정 변수 Z 가 Threshold η 값 보다 크면, PN 동기가 획득된 것이라고 결정한다. 만약 그렇지 않다면, PN Acquisition 시스템은 Searching 단계로 되돌아가 다시 결정 변수 Z 를 수집한다.

4장. 제안한 PN 동기 획득 방법의 이론적인 분석

4.1 검출 / 오-경보 확률

검출 확률 P_D 와 오-경보 확률 P_{FA} 를 구하기 위해서, 탐색기의 결정 변수 Z 의 확률 밀도 함수(pdf)와 누적 분포 함수(cdf)를 이용하여 Hypothesis Test 과정을 거쳐야 한다. 최종 결정 변수 Z 의 확률 밀도 함수(pdf)와 누적 분포 함수(cdf)는 각각의 결정 변수 Z_n 의 특성 함수를 이용하여 구할 수 있다.

< H_1 인 경우 >

$$P_Z(r|H_1) = \frac{1}{2\sigma^2} \left(\frac{r}{\sigma^2}\right)^{(N-1)/2} e^{-(r+\sigma^2)/2\sigma^2} I_{N-1}(\sqrt{r}\frac{\sigma}{\sigma^2}), r \geq 0$$

$$F_Z(r|H_1) = \int_0^r P_Z(u|H_1) du$$

$$\text{비-중심도} : s^2 = \sum_{n=1}^N 2m_n^2 \quad (4)$$

여기서, $\sigma^2 \approx N_0$ 는 간섭자 수 $M-1$ 명의 간섭+잡음

power를, s^2 는 비-중심도를, $I_{N-1}(\cdot)$ 는 차수가 $N-1$ 인 수정된 일종 Bessel 함수를 나타낸다.

< H_0 인 경우 >

$$P_Z(r|H_0) = \frac{1}{(\sigma^2)^N 2^N \Gamma(N)} r^{N-1} e^{-r/2\sigma^2}, \quad r \geq 0$$

$$F_Z(r|H_0) = \int_0^r P_Z(u|H_0) du \quad (5)$$

여기서, $\sigma^2 = N_0 > N_0$ 는 원하는 사용자와 $M-1$ 명의 간섭자가 PN 동기가 맞지 않았을 때의 간섭+잡음 power를, $\Gamma(N)$ 는 차수가 N 인 Gamma 함수를 나타낸다.

H_1 와 H_0 의 pdf를 이용하여, Single-Dwell PN Acquisition 방식의 검출 확률 P_D 및 오-경보 확률 P_{FA} 를 구하면 식 (6)과 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} P_D &= Pr(Z > \beta_T | H_1) \\ &= \int_{\beta_T}^{\infty} \frac{1}{2\sigma^2} \left(\frac{r}{\sigma^2}\right)^{(N-1)/2} e^{-(s^2+r)/2\sigma^2} I_{N-1}\left(\sqrt{r} \frac{s}{\sigma^2}\right) dr \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} P_{FA} &= Pr(Z > \beta_T | H_0) \\ &= \int_{\beta_T}^{\infty} \frac{1}{(\sigma^2)^N 2^N \Gamma(N)} r^{N-1} e^{-r/2\sigma^2} dr \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, β_T 는 탐색기의 목표 검출 확률 P_D 과 오-경보 확률 P_{FA} , 평균 PN 동기 획득 시간을 최소화하기 위해서, Lock Detector에서 설정된 Optimal Threshold 값을 의미한다. 따라서, 검출 확률 P_D 과 오-경보 확률 P_{FA} 는 β_T 에 의해서 결정되는 함수이고, 서로 tradeoff관계에 있다.

4.2 평균 PN 동기 획득 시간

평균 PN 동기 획득 시간(Mean Acquisition Time)은 Markov Chain Signal Flow Graph Technique로 구할 수 있다[2]. 만약 Detector는 검출 확률 P_D 가 일정하고, 오-경보 확률 P_{FA} 가 Zero인 시-불변 채널을 겪고, 최초로 PN 동기 획득이 L 번 만에 이루어졌다면, L 번 동안의 확률 밀도 함수(pdf)는 식 (8)과 같다.

$$p(L) = P_D(1 - P_D)^{L-1}; \quad L=1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

오-경보 확률 P_{FA} 를 Zero라고 가정하였기 때문에, $L-1$ 는 전체 Uncertainty Region U 에서 PN 동기 획득이 실패하는 횟수를 나타내므로, 최초로 L 번 만에 정확한 셀 검출을 하는 동안 동기 획득 실패에 소요된 셀 수는 식 (9)과 같다.

$$N_{fail} = U(L-1) \quad (9)$$

그리고, 한 셀동안 Single-Dwell Time $\tau_d = KT$, 만큼 소요되므로, 전체 소요된 시간은 식 (10)과 같다.

$$T_{fail} = N_{fail} \tau_d = U \tau_d (L-1) \quad (10)$$

T_{fail} 의 평균을 구하면 식 (11)과 같다.

$$\bar{T}_{fail} = E[T_{fail}] = U \tau_d \left(\frac{1}{P_D} - 1\right) \quad (11)$$

L 번째 Searching에서 정확한 셀 위치를 m 이라 하면, 소요

된 시간은 식 (12)와 같다.

$$T_{success} = m \tau_d \quad (12)$$

전체 Uncertainty Region U 이내에서 정확한 셀 위치에 대한 사전 정보가 없기 때문에, m 은 Uniform 분포를 갖는 Random Variable이 된다.

$$P(m) = \frac{1}{U}; \quad m=1, 2, 3, \dots, U \quad (13)$$

m 의 평균은 식 (14)와 같다.

$$\bar{m} = \sum_{m=1}^U m p(m) = \frac{U+1}{2} \quad (14)$$

따라서, $T_{success}$ 의 평균은 식 (15)와 같다.

$$\bar{T}_{success} = \left(\frac{U+1}{2}\right) \tau_d \quad (15)$$

따라서, Time-Invariant한 채널에서 오-경보 확률 P_{FA} 가 Zero인 경우, 동기 획득 시간 T_{ACQ} 의 평균은 식 (16)과 같다.

$$\bar{T}_{ACQ} = \bar{T}_{fail} + \bar{T}_{success} = \left[\frac{(2 - P_D)U + P_D}{2P_D}\right] \tau_d \quad (16)$$

오-경보 확률 P_{FA} 가 Non-zero인 경우에, 전체 Searching된 셀 수 중에서 실제로 L 는 정확하게 검색되었기 때문에 남아있는 셀들이 오-경보 수는 N_{FA} 는 식 (17)와 같다.

$$N_{FA} = N_{fail} + m - L = U(L-1) + m - L \quad (17)$$

만약, 실제로 오-경보가 n 번 발생했다고 가정하고, 1번의 오-경보 발생에 대해서 Penalty Time이 $J\tau_d$ 이면, n 번의 오-경보 발생에 대한 전체 Penalty Time은 식 (18)과 같다.

$$T_p = nJ\tau_d \quad (18)$$

따라서, 전체 동기 획득 시간 T_{ACQ} 는 식 (19)과 같다.

$$T_{ACQ} = T_{ACQ} + T_p = [N_{fail} + m + nJ] \tau_d \quad (19)$$

평균 PN 동기 획득 시간은 식 (19)의 평균을 취하면 얻을 수 있다.

$$\bar{T}_{ACQ} = \left[\frac{2 + (2 - P_D)(U-1)(1 + JP_{FA})}{2P_D}\right] \tau_d \quad (20)$$

5장. 성능 분석

이 장에서는, 3장에서 제안한 PN 동기 획득 방법의 성능을 평가한다. 그림 4와 그림 5는 평균 m_n 이 0과3, 분산 μ 이 1인복소 Gaussian Noise 채널 환경에서 N 이 증가할 때, 결정 변수 Z 가 각각 H_1 와 H_0 인 경우에 대한 확률 밀도 함수를 나타낸 것이다.

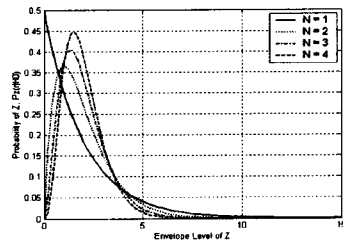


그림 4. $G(m_n, \mu) = G(0, 1)$ 일 때, 결정 변수 Z 의 확률 밀도 함수

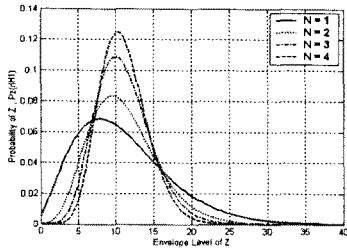


그림 5. $G(m_{10}, \mu) = G(3, 1)$ 일 때, 결정 변수 Z 의 확률 밀도 함수

그림 4와 5는 증가되는 평균을 정규화 함으로써, 다이버시티 이득에 의한 효과를 확실히 보여준다.

	N = 1	N = 2	N = 3	N = 4
P_{FA}	0.71	0.50	0.39	0.31

표 1. 검출 확률 $P_D=90\%$ 일 때, 안테나 수 N 에 따른 오-경보 확률 P_{FA} 의 변화

표 1은 간섭자 수가 50명이고 검출 확률 $P_D=90\%$ 성능을 유지할 때, 안테나 수 N 에 따른 오-경보 확률 P_{FA} 의 변화를 나타낸 것이다. 같은 검출 확률 P_D 에 대해서, 안테나 수 N 이 증가할수록 오-경보 확률 P_{FA} 가 감소한다. 그러나, 오-경보 확률 P_{FA} 의 감소 변화폭은 줄어들는다. 이는 다이버시티 이득이 포화됨을 의미한다.

	N = 1	N = 2	N = 4	N = 6
T_{ACQ} [chip]	9.0×10^8	5.5×10^7	1.9×10^6	4.5×10^4

표 2. 검출 확률 $P_D=90\%$ 일 때, 안테나 수 N 에 따른 평균 PN 동기 획득 시간 T_{ACQ} 의 변화

표 2는 SNR이 5 [dB]인 환경에서 검출 확률 $P_D=90\%$ 성능을 유지할 때, 안테나 수 N 에 따른 평균 PN 동기 획득 시간을 나타낸다. 안테나 수 N 이 증가할수록 평균 PN 동기 획득 시간이 급격하게 감소한다.

6장. 결론

본 논문은 DS/CDMA 신호 환경에서 동작하는 배열 안테나의 올바른 사용 방법에 대하여 PN 동기 획득 관점에서 분석하였다. 제한한 PN 동기 획득 방법은 배열 안테나에 independent and identically distributed(IID) Rayleigh fading 환경을 겪고 수신된 다수의 독립된 신호를 이용하여 공간 다이버시티 이득을 얻어 검출 확률 P_D 및 오-경보 확률 P_{FA} , 그리고 평균 PN 동기 획득 시간의 성능을 향상시키는 Non-coherently Linear Combining Single-Dwell 방식이다. 성능 분석은 안테나 간 공간 상관도가 전혀 없는 주파수-선택적 레일레이 페이딩 채널 하에서 수행하였다. 공간 다이버시티 이득을 이용한 Non-coherently Linear Combining PN

동기 획득 시스템은 적절한 동작 SNR 범위 내에서 평균 PN 동기 획득 시간을 줄이기 위한 효율적이고 획기적인 방법이 된다. 반면, 동작 SNR 범위를 벗어날 경우, Non-coherently Combining에 의해 증가된 Noise Power 때문에 비-효율적인 방법이 될 수도 있다. 따라서, PN 동기 획득 시스템이 동작하는 SNR 범위를 정확하게 분석해서 공간 다이버시티 이득을 효과적으로 얻을 수 있도록 PN 동기 획득 시스템을 설계해야 한다.

안테나 수 N 의 증가는 공간 다이버시티 이득을 이용하여 평균 PN 동기 획득 시간을 급격하게 감소시킨다. 그러나, 성능 개선 정도는 안테나 수 N 이 증가할수록 감소하여, 전체 시스템의 성능은 결국 포화된다. 그러므로, 목표 검출 확률 P_D 와 오-경보 확률 P_{FA} 를 고려한 다음, 평균 PN 동기 획득 시간을 최소화하기 위해서 적절한 안테나 수 N 을 결정해야만 한다.

참고 문헌

- [1] A.F. Naguib, "Adaptive Antennas for CDMA Wireless Network," Ph.D. Dissertation, Department of Electrical Engineering, Stanford University, August, 1996.
- [2] M.K. Simon, J.K. Omura, R.A. Scholtz, and B.K. Levitt, "Spread Spectrum Communications Handbook.", New York : McGraw-Hill, 1994
- [3] A.J. Viterbi, "CDMA : Principles of Spread Spectrum Communication", New York : Addison-Wesley 1995
- [4] J.G. Proakis, "Digital Communications", New York : McGraw-Hill.
- [5] R.R. Rick and L.B. Milstein, "Parallel acquisition of spread spectrum signals with antenna diversity", IEEE Trans. Commun., vol. 45, pp. 903~905, Aug.1997.
- [6] J.Choi and S.Choi, "Diversity gain in antenna arrays and its use in CDMA systems equipped with antenna arrays.", IEEE Trans. Veh.. Commun.. vol. 52, May 2003