

복수적분 시구간 직렬탐색 시스템에서 부분 상관기를 이용한 Kronecker 부호의 특성 분석

정회원 임연주*, 박상규*

Analysis of Kronecker Sequence with Partial-Period Correlation in a Multiple-dwell Serial Search System

Yeon Ju Lim*, Sang Kyu Park* *Regular Members*

요약

본 논문에서는 고속의 초기동기가 가능한 Kronecker 부호를 DS/CDMA 시스템의 확산부호로 하여 패킷 무선 데이터 통신에서의 사용을 위한 타당성을 보인다. 먼저, Kronecker 부호의 생성방법, 상관특성을 보여 대체적인 부호의 특성을 밝히고, 부분 상관기를 이용할 수 있음을 보인다. 더 나아가 PN 부호와 같은 평균 초기동기획득 시간을 가질 때의 Kronecker 부호의 오경보 확률과 실패 확률을 구하여 Kronecker 부호가 PN 부호보다 더 높은 동기 확률을 가짐을 보임으로써 패킷 통신에서 Kronecker 부호를 사용할 수 있는 가능성을 확인한다.

ABSTRACT

This paper shows that the Kronecker sequence, the rapid acquisition spreading code, can be used in packet wireless data communication systems. The general properties of the Kronecker sequence such as construction and correlation characteristics are described, and it is shown that the Kronecker sequence can use a partial-period correlation for a faster acquisition. Based on above properties, it can be expected that the Kronecker sequence can be used in packet communication systems because the probability of false alarm for the Kronecker sequence is lower and flatter(that is, less sensitive to E_b/N_0 variations) than that for the PN sequence under the assumption that both sequences have the same acquisition time.

I. 서론

빠르고 정확한 부호의 초기동기는 직접 시퀀스 확산대역 시스템의 성공적인 전송에 필수적이다. 초기동기의 목적은 수신된 부호를 수신기에서 국부적으로 발생된 부호와 한 칩 이내의 차이로 동기를 맞추는 것이다. 이는 모든 샘플된 칩 타이밍 오프셋에 대해 수신된 부호와 국부 발생된 부호간에 상관을 시켜 그 결과값을 임계값과 비교함으로써 실행되는데, 임계값을 넘을 때 초기동기가 선언된다. 확

산 부호의 동기는 시스템의 성능에 매우 중요한 영향을 미치며, 특히 초기동기는 긴 시간을 요구하며 이후의 동기 추적에도 큰 영향을 미치므로 신중히 이루어져야 한다^{[1][2]}.

DS/CDMA 시스템의 동기는 여러 이용자가 동시에 통화함으로써 형성되는 열악한 신호대 간섭비에서도 고속의 정확한 동기가 이루어져야 한다. 특히 빠른 동기가 요구되는 패킷 무선이나 군용 통신 시스템과 같은 burst format 확산대역 통신에는 빠른 초기동기 시스템이 필수적인 요소가 된다. 그런 경

* 한양대학교 전자통신전파공학과
논문번호: 00007-0110, 접수일자: 2000년 1월 10일

우, 정합필터를 사용한 상관 기법이 필요한데, 정합 필터에서 필요로 할 수 있는 큰 시간대역폭적(time bandwidth product)과 같은 문제를 해결하는 방법은 Kronecker 부호와 같은 빠른 동기계열의 확산 부호를 사용하는 것이다. 또한, 서로 다른 부호를 사용하여 기지국을 구분하는 비동기(asynchronous) DS/CDMA 시스템에서 기지국 구분 확산 부호로 Kronecker 부호를 사용하면 일반적으로 사용되는 랜덤계열의 PN 부호를 사용하는 경우보다 인접기지국에 대한 부호할당의 복잡성을 줄일 수 있다. 따라서, IMT-2000과 같이 서비스 환경이 작고 많은 기지국을 필요로 하는 차세대 통신 시스템에 Kronecker 부호의 적용이 가능하다^[2].

초기동기 수신기의 기본적인 단위는 샘플의 값(1 또는 -1)을 결정하는 검출기이다. 검출기는 탐색 방식에 의해서 나눌 수 있는데, 그 중에서 직렬 탐색 방식은 수신 신호와의 일치 여부를 한 시점에서 하나의 위상을 관측하여 일치하면 동기추적 회로의 동작을 개시하고, 그렇지 않으면 수신기의 부호 위상을 한 칩씩 증가시켜 앞의 과정을 반복하는 방식을 말한다. 특히, 첫 번째 검출 시험 단계에서의 초기동기 지시를 확신하고 실제로 일어날 수 있는 오경보(false alarm)를 방지하기 위해 여분의 패널티(penalty) 시간을 요구하는 확인 모드(verification mode)가 뒤따라오는 경우를 복수적분 시구간 방식이라고 한다^[4]. 한편, 검출기는 반송파의 주파수와 위상을 이용하느냐의 여부에 따라 위상동기와 위상비동기 검출기로 나눌 수 있다. 대부분의 경우에는 초기동기가 반송파 복구와 동기추적전에 수행되므로 위상비동기 검출기가 많이 쓰이는데, 이러한 기존의 위상비동기 검출기는 큰 배경 잡음과 다양한 간섭원이 존재할 때 급격히 성능이 나빠진다^[5]. 따라서, 위상비동기 검출기처럼 반송파의 주파수와 위상에 대한 정보를 필요로 하지 않으면서도 큰 잡음과 간섭이 존재하는 환경속에서 훨씬 나은 성능을 갖는 검출기가 요구된다. 본 논문에서 사용된 차동 위상 동기(differentially-coherent) 검출기는 그러한 요구 사항을 만족시키는 검출기로서, 전역상관 또는 부분상관 방식에 따라 부호의 자기 상관으로 인해 존재하게 되는 부호의 자기발생 잡음(self-noise) 성분이 서로 다른 통계적 특성을 지니고, 열잡음 성분이 통계적으로 독립이기 때문에 위상비동기 방식보다 월등히 나은 성능을 가진다. 또한, 부분 상관(partial-period correlation) 방식이 초기동기 시간에서뿐만 아니라 오경보(false alarm) 확률에 있어서 전역 상

관(full-period correlation)보다 훨씬 낮은 값을 갖는다. 본 논문에서는 두 개의 적분 시구간을 이용하는 복수적분 시구간 직렬 탐색 시스템에서 차동 위상 동기 부분상관을 적용하였을 때, PN 부호를 기준으로 하여 Kronecker 부호와 PN 부호가 각 E_c/N_0 에 대해 동일한 평균 초기동기 획득 시간을 가지도록 하는 오경보 확률과 실패(miss) 확률을 구한 후, 비교하여 Kronecker 부호가 더 높은 동기 확률을 가짐을 보인다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 Kronecker 부호의 전반적인 특성에 대해 설명하고, 3장에서는 부분 상관기 모델을 제시하고, 복수적분 시구간 직렬 탐색 방식을 설명한다. 4장에서는 수치해석을 통해 오경보 및 실패 확률을 구하여 Kronecker 부호의 특성을 분석한다. 마지막으로 5장에서는 결론을 맺고 향후 발전방향에 대해 논의한다.

II. Kronecker 부호

2.1 Kronecker 부호의 생성 및 특성

기존의 랜덤 계열의 부호와 비교해 볼 때, Kronecker 부호는 AWGN 환경하에서는 BER 측면에서의 성능차이가 거의 없고, 페이딩 환경하에서는 약간의 성능저하만으로 고속의 초기동기를 달성할 수 있는 부호이다^[2]. 본 장에서는 빠른 초기동기를 위해 제안된 Kronecker 부호의 생성 방법과 상관 특성에 대해 설명하고, Kronecker 부호에도 부분상관을 적용할 수 있음을 보인다.

두 개의 성분 부호로 이루어진 Kronecker 부호는 안쪽 성분 부호와 바깥쪽 성분 부호를 Kronecker적(積)을 이용하여 합성한 부호이다. 여기서, Kronecker적이란 안쪽 성분 부호를 한 단위로 하여 바깥쪽 성분 부호의 음, 양에 따라 부호를 변화시키는 것을 말한다. 예를 들면, 바깥쪽 성분 부호를 $+ - + (1, -1, 1)$ 이라 하고 안쪽 성분 부호를 $+ + - + (1, 1, -1, 1)$ 이라 하면 이 두 성분 부호를 Kronecker적하여 만든 Kronecker 부호는 $+ + - +, - - + -, + + - + (1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1)$ 이 된다. Kronecker 부호는 바깥 성분 부호가 Barker 부호로 결정되어 있으므로 안쪽 성분 부호로 무엇을 선택하느냐에 따라 그 특성이 결정된다. 만약 부호 설계의 목적이 좋은 자기상관 특성을 얻는데 있다면 안쪽 성분 부호로 PN 부호를 쓰고, 좋은 상호상관 특성을 얻는데 목적이 있다면 안쪽 상분부호로 홀수단에서는 Gold 부호, 짝수단에서는 Kasami 부호를 쓴다. 그림 1은 안쪽

성분 부호를 길이 31의 Gold로, 바깥쪽 성분 부호를 길이 7의 Barker 부호로 만든 길이 217의 Kronecker 부호를 만들어내는 생성 블록도를 나타낸다.

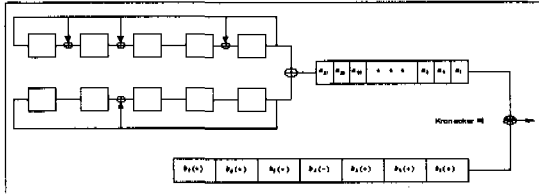


그림 1. 217 Kronecker 부호 생성 블록도

본 논문에서는 동기적인 측면에서 좋은 자기상관 특성을 얻는데 목적이 있으므로 안쪽 성분 부호로 PN 부호를 사용한다. 자기상관 특성은 쉬프트가 있을 때의 자기상관값이 낮을수록 좋은 것이므로 그림 2와 3에서 볼 수 있듯이 안쪽 성분 부호로 PN 부호를 쓰는 것이 Gold 부호를 쓸 때보다 더 나은 상관 특성을 가짐을 알 수 있다.

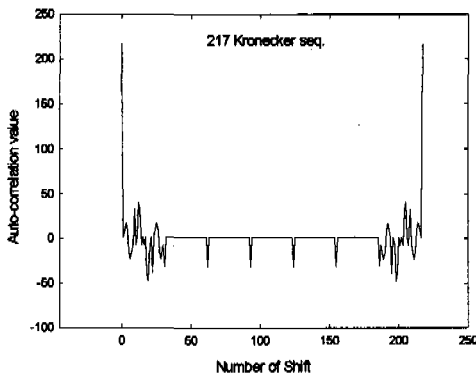


그림 2. 2^5-1 PN 부호를 안쪽성분 부호로 한 217 Kronecker 부호의 자기 상관함수

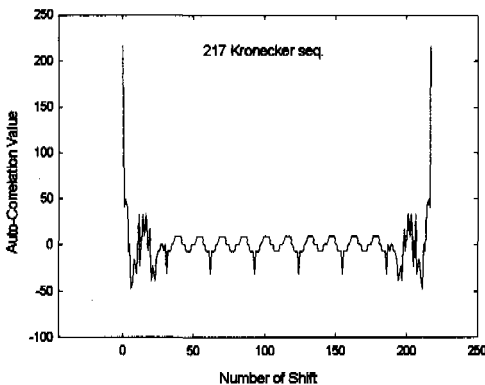


그림 3. 2^5-1 Gold 부호를 안쪽성분 부호로 한 217 Kronecker 부호의 자기상관 함수

2.2 Kronecker 부호의 부분 상관 성능

초기동기의 정확성은 초기동기에 소요되는 시간과 더불어 시스템의 성능을 결정하는 중요한 요소이다^[6]. 동기장치의 정확성을 나타내는 지표로 분별지수(ID: Index of Discrimination)를 소개하고, 분별지수를 성능 기준으로 하여 Kronecker 부호와 PN 부호의 부분 상관 성능을 알아봄으로써 Kronecker 부호에도 부분 상관을 쓸 수 있음을 보이도록 한다.

상관기의 구성에 필요한 하드웨어의 복잡과 초기동기에 필요한 시간을 동시에 줄이기 위해서 제안된 부분 상관기에서 가장 중요한 것은 동기에 적합한 분별지수값을 가질 수 있는 적절한 상관기의 길이 $L_p, n \leq L_p \leq N$,를 구하는 것이다. 이때, 쉬프트 레지스트의 단수를 n 이라 하면, 반복주기가 $N=2^n-1$ 인 PN 부호의 부분 자기상관 함수 $R_p(d)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$R_p(d) = \sum_{i=1}^{L_p} x_i \cdot x_{i+1} \quad (1)$$

$$= \begin{cases} L_p, & \text{for } d = 0, N, 2N, \dots \\ \alpha, & \text{otherwise} \end{cases}$$

비트오류가 발생하지 않는 조건에서 식 (1)과 같이 부분 상관기를 사용할 때 부분 상관기의 출력, 즉 부분 상관 함수값은 동기가 맞았을 때 L_p 가 되고, 그 외의 경우에는 임의의 값, α 를 가진다. 따라서 동기가 맞을 때의 상관기 출력과 동기가 맞지 않을 때의 상관기 출력중 최대치간의 백분율을 의미하는 분별지수 기준값, ID_{ref} 는 다음과 같이 정의 내릴 수 있다.

$$ID_{ref} = \frac{L_p - \alpha_{max}}{L_p} \times 100 (\%) \quad (2)$$

분별지수 기준값을 높은 값으로 놓으면 동기가 이루어졌음을 알리는 출력레벨의 임계값이 높게 됨을 의미한다. 또 높은 ID_{ref} 값은 동기 오판 확률을 낮출 수 있으므로 분별지수 기준값이 확산 부호의 부분 상관 성능을 나타낼 수 있는 파라미터라 할 수 있다.

그림 4는 $2^{11}-1$ 길이의 PN 부호에 "0"을 첨가하여 만든 2^{11} 길이의 PN like 부호와 바깥쪽 성분 부호로 길이 $N=4$ 의 Barker 부호를 쓰고, 안쪽 성분 부호로는 2^9 PN like 부호와 Gold like 부호를 이

용한 2¹¹ Kronecker 부호의 부분 상관 성능을 보여 준다. 인쪽 성분 부호로 사용된 Gold 부호는 선호 쌍을 이루는 생성 다항식 $f(x) = x^9 + x^4 + 1$ 과 $f(x) = x^9 + x^6 + x^4 + x^3 + 1$ 로 만들었다. 인쪽 성분 부호로 PN 부호를 사용할 때 더 우수한 부분 상관 특성을 가진다는 것을 확인할 수 있다. 또한 인쪽 성분 부호로 PN 부호를 사용한 Kronecker 부호의 분별지수값이 PN 부호의 것보다 더 높음을 알 수 있다. 그림 5는 인쪽 성분 부호로 2⁹ PN like 부호를 사용하고, 부분 상관의 크기를 512로 했을 때의 Kronecker 부호의 부분 자기상관 함수를 나타낸다. 인쪽 성분 길이만큼의 부분 동기만 맞으면 빠른 초기동기가 가능하다는 Kronecker 부호의 동기 특성을 잘 나타내준다.

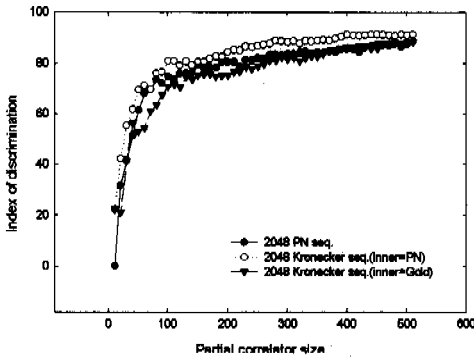


그림 4. PN 부호와 Kronecker 부호의 부분 상관 성능

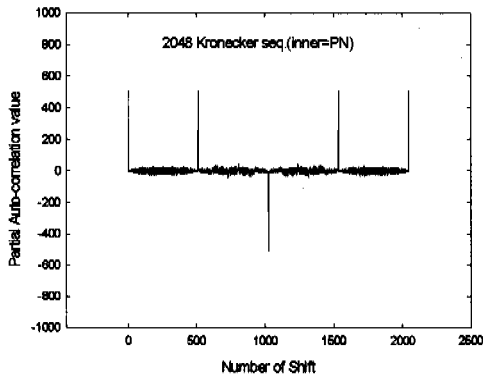


그림 5. 2⁹ PN 부호를 인쪽성분 부호로 한 2048 Kronecker 부호의 자기상관 함수 ($L_p=512, N=4$)

III. 시스템 모델

3.1 복수적분 시구간 직렬 탐색 시스템

본 논문은 불일치에 관한 빠른 결정을 내릴 수

있는 복수적분 시구간 방식중에서도 2개의 적분시구간을 이용하는 방식에 초점을 맞춘다. 또한, 전체 부호 길이를 불확실성 영역으로 하는 직렬 방식의 검출기를 사용한다. 그림 6은 2개의 적분시구간을 갖는 직렬 방식의 동작 흐름도를 보여준다^[7].

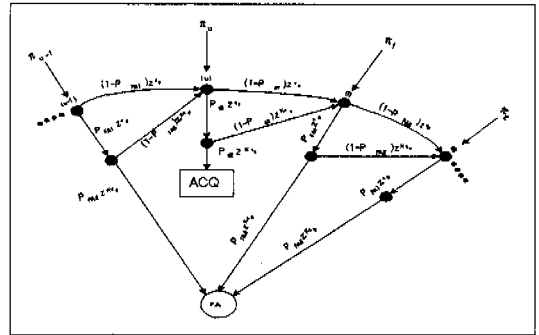


그림 6. 복수적분 시구간 방식에 대한 동작 흐름도

그림 6으로부터 획득 과정을 모델링하는데 최소한 $\nu+2$ 개의 상태수가 필요하다는 것을 알 수 있다. 이 중 $\nu-1$ 개의 상태는 가설 H_0 에, 1개의 상태는 가설 H_1 에 속한다. 나머지 두 개의 상태는 초기동기(ACQ)와 오경보(F.A.)이다. 탐색의 시작은 사전 분포(priori distribution) $\pi_j (j=1, 2, \dots, \nu)$ 에 따라 ν 개의 상태중 어느 하나에서 시작된다. 사전 분포는 수신되는 부호와 수신기에서 발생시킨 부호간의 최대 위상차로 정의되는 불확실성 영역(uncertainty region)에서 정확한 셀의 위치에 대한 사전 정보의 분포를 나타낸다^[8]. 본 논문에서는 불확실성 영역이 부호의 전체 길이가 되므로 균일한(uniform) 분포를 쓴다. 즉, 어떠한 사전 정보도 이용하지 않는다^[9]. 그림 6으로부터 각 가지(branch)에 대한 이득 $H(z)$ 를 구해보면 다음과 같다.

$$H_P(z) = 0 \tag{3a}$$

$$H_0(z) = [(1 - P_{FA1}) + P_{FA2}(1 - P_{FA2}) \cdot z^{K\tau D}]z^{\tau D} \tag{3b}$$

$$H_D(z) = P_{d,c}z^{(K+1)\tau D} \tag{3c}$$

$$H_M(z) = [(1 - P_{d1}) + P_{d1}(1 - P_{d2})z^{K\tau D}]z^{\tau D} \tag{3d}$$

여기서, z 는 단일-지연(unit-delay) 연산자이다. 그림에서 패널터를 나타내는 가지 이득은 없다. 즉, 오경보 상태에서 나가는 가지는 고려하지 않는다.

첫 번째 시구간에서의 지연을 τ_D , 두 번째 시구간에서의 지연을 $K\tau_D$ 라 하자. 이 때, $\tau_D = \Delta T_c$, $K = \Delta^{-1}AM$ 이며, ν 는 $\Delta^{-1}\Theta$ 이다. Θ 는 불확실성 영역에 있는 총 칩수로 T_u 초이다. q 와 Δ 는 각각 셀의 수와 한 칩을 몇 번 샘플링하느냐를 뜻하는 스텝 크기를 나타낸다($q = \Theta/\Delta$). 상관시간은 MT_c 이다.

가설 H_0 와 H_1 에서 행해지는 테스트들은 통계적으로 독립이다. 수신기는 확인 모드로 부합 검출(coincidence detection)을 사용하는데, H_1 을 결정하게 되면 수신기는 들어오는 부호와 같은 속도로 국부 발생된 부호를 내보낸다. 수신기에 의해 수행되는 독립적인 테스트의 수를 A 라 하면, 부합 검출은 과반수의 논리(majority logic)를 사용하므로 A 개의 테스트 중에서 최소 B 개 이상의 테스트가 동기를 가리켜야 부합 검출은 동기를 선언한다.

불확실성 영역이 전구간이므로 사전 정보에 대한 분포가 균일하다. 따라서, 전구간(overall)에 걸친 검출 확률은 다음과 같다^[7].

$$P_D^{ov} = \left(\frac{P_{d,c}}{\nu P_{FA,c}} \right) \frac{1 - (1 - P_{FA,c})^\nu}{1 - (1 - P_{d,c})(1 - P_{FA,c})^{\nu-1}} \quad (4)$$

여기서,

$$P_{d,c} = P_{d1} \cdot P_{d2} = P_{d1} \cdot \sum_{n=B}^A \binom{A}{n} P_{d1}^n (1 - P_{d1})^{A-n} \quad (5)$$

$$P_{FA,c} = P_{FA1} \cdot P_{FA2} = P_{FA1} \cdot \sum_{n=B}^A \binom{A}{n} P_{FA1}^n (1 - P_{FA1})^{A-n} \quad (6)$$

이다. 식 (5)와 (6)에서의 $P_{d,c}$ 와 $P_{FA,c}$ 는 첫 번째 시구간에서의 검출 및 오경보 확률과 두 번째 시구간에서의 검출 및 오경보 확률과의 곱으로 나타난다.

잘 알려진 Markov 프로세스를 이용해 그림 6의 ACQ상태에 도달하는 생성 함수, $P_{ACQ}(z)$ 을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P_{ACQ}(z) = H_D(z) \sum_{i=1}^M \pi_i P_{iv}(z) \quad (7)$$

여기서,

$$P_{iv}(z) = \sum_{n=0}^{\infty} p_{iv}(n) z^n \quad (8)$$

이고, 식 (8)에서 $p_{iv}(n)$ 는 Markov 프로세스가 i 번째 상태에서 ν 번째 상태로 n 스텝만에 도달할 확률을 나타낸다. 이때, 초기동기 시간은 평균이 식 (9)이고, 분산이 식 (10)과 같다.

$$E[T_{acq}] = \frac{P_{ACQ}(z)}{dz} \Big|_{z=1} \quad (9)$$

$$var[T_{acq}] = \left[\frac{d^2 P_{ACQ}(z)}{dz^2} + \frac{P_{ACQ}(z)}{dz} - \left(\frac{dP_{ACQ}(z)}{dz} \right)^2 \right]_{z=1} \quad (10)$$

\bar{T}_0 는 τ_D 로 정규화된 H_0 셀에서의 평균 시간이고, \bar{T}_M 은 τ_D 로 정규화된 H_1 셀에서의 실패시의 평균 시간이라고 하면 각각 식 (11)과 식 (12)와 같다. 또한, 식 (4)에서 식 (10)까지의 식들을 이용하여 사전 확률이 균일 분포를 가질 때의 평균 초기 동기 획득 시간을 구하면 식 (13)과 같이 쓸 수 있다^[7].

$$\bar{T}_0 = \tau_D^{-1} H_0'(1) = (1 - P_{FA1}) + (K+1)P_{FA1} \cdot (1 - P_{FA2}) \quad (11)$$

$$\bar{T}_M = \tau_D^{-1} H_M'(1) = (1 - P_{d1}) + (K+1)P_{d1} \cdot (1 - P_{d2}) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} E[T_{acq}]_{unif.} = & \left(\frac{P_D^{ov}}{P_{d,c}} \right) \tau_D \cdot [(K+1)P_{d,c} \\ & + \bar{T}_0 \frac{\nu(1 - P_{FA,c})^{\nu-2}}{1 - (1 - P_{FA,c})^\nu} \cdot [-P_{d,c}(1 - P_{FA,c}) \\ & + P_D^{ov} \frac{1}{(1 - P_{FA,c})^{\nu-2}} + \nu(1 - P_{d,c}) \\ & + P_{FA,c}(1 - P_{FA,c}) \cdot \left(\frac{\bar{T}_M}{\bar{T}_0} \right) \\ & - (1 - P_{d,c}) \cdot (1 + \nu(1 - P_{FA,c}))]] \end{aligned} \quad (13)$$

3.2 차동 위상동기 부분상관 검출기

초기동기 과정에서 정합필터는 가산성 백색 가우시안 잡음뿐만 아니라 부호의 자기발생 잡음 성분을 포함하게 되는데, 이는 부호의 자기상관으로 인해 발생된다. 자기발생 잡음은 가우시안 랜덤 변수로 모델링하여 본 논문에 적용한다^[10].

부분 상관을 취하는 차동 위상동기 DS/BPSK 수신기 구조는 그림 7과 같다. MF1과 MF2는 M길이

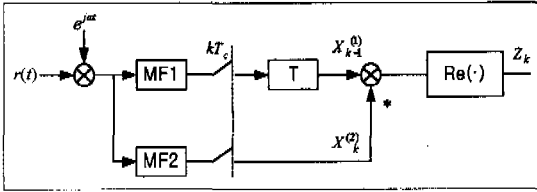


그림 7. 차동 부분 상관 검출기, MF : Matched Filter

적분구간을 갖는다. 수신된 파형에 대한 정확한 위상 위치는 MF1에 의해 나타나고, T초후에 MF2에 의해 보여진다. 수신기의 앞단에 들어오는 신호에 대한 복소 표현은 식 (14)와 같다.

$$r(t) = \sqrt{\frac{E_c}{T_c}} c(t + \beta T_c) e^{j(\omega t + \theta)} + N(t) \quad (14)$$

여기서, β 는 수신된 부호의 위상 오프셋으로 정수이며, $c(t)$ 는 PN 파형, θ 는 반송파 위상, E_c 는 수신된 칩 에너지, $N(t)$ 는 양측 전력밀도가 $N_0/2$ 인 복소 백색 가우시안 잡음이다. 정합필터의 출력 샘플은 다음과 같다.

$$X_k^{(i)} = Y_k^{(i)} e^{j\theta} + N_k^{(i)} \quad (15)$$

여기서, 열잡음 $N_k^{(i)}$ 는 분산 $\sigma_n^2 = \frac{N_0 M T_c}{2}$ 를 갖는 복소 가우시안 잡음 샘플이고, $Y_k^{(i)}$ 는 부호의 자기발생 잡음 성분으로 각각 다음과 같이 표현된다.

$$Y_k^{(i)} = \sqrt{\frac{E_c}{T_c}} \int_0^{M T_c} c_i(t) c(t + \beta T_c + k T_c) dt, i = 1, 2 \quad (16)$$

$$N_k^{(i)} = \int_0^{M T_c} c_i(t) N(t + k T_c) e^{-j\omega t} dt \quad (17)$$

식 (16)에서 $c_1(t)$ 와 $c_2(t)$ 는 두 개의 연속적인 부시퀀스로서 $c_2(t)$ 는 $c_1(t)$ 에 대해 오프셋 T 를 갖는다.

가설 H_0 와 H_1 은 각각 부호의 동기가 맞지 않을 경우와 맞을 경우를 나타낸다. 가설 H_1 일 경우, $Y_k^{(i)}$ 는 일정하고, $M\sqrt{E_c T_c}$ 로 주어지며, 유일한 랜덤 성분은 열잡음이다. 따라서, 수신된 신호의 k th 샘플에 대한 결정 변수, Z_k , 는 식 (18)과 같이 평균이 0이 아닌 가우시안 랜덤 변수들의 곱과 평균

이 0인 가우시안 랜덤 변수와의 합으로 이루어진다.

$$Z_k = (M\sqrt{E_c T_c} + N_k^{(R,2)})(M\sqrt{E_c T_c} + N_k^{(R,1)}) + N_k^{(I,2)} N_k^{(I,1)} \quad (18)$$

이때, 검출 확률은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_D = \int_{V_T} f_{H_1}(z) dz = \int_{V_T} f_2(z) * f_3(z) dz \quad (19)$$

여기서, $f_3(z)$ 는 식 (18)의 첫 번째 항에 대한 확률밀도 함수(p.d.f.)이고, $f_2(z)$ 는 두 번째 항에 대한 p.d.f.로 자기발생 잡음항이 사라졌을 때를 말하며, 다음과 같이 정의한다.

$$f_2(z) = \frac{1}{\pi \sigma_n^2} K_0\left(\frac{|z|}{\sigma_n}\right) \quad (20)$$

여기서, $K_0(\cdot)$ 는 수정된 0차 베셀 함수이다. 식 (19)를 열잡음 분산으로 정규화시키면 식 (21)과 같이 된다.

$$P_D = \int_{-\infty}^{\infty} f_{2n}(V_{T_n} - z) \Psi(z) dz = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_0(V_{T_n} - z) \Psi(z) dz \quad (21)$$

여기서,

$$\Psi(z) = \int_z^{\infty} f_{3n}(\beta) d\beta = \frac{1 + \text{erf}\left(\frac{m}{\sqrt{2}}\right)}{4} - \frac{1}{\sqrt{8\pi}} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{(v-m)^2}{2}\right) \text{erf}\left(\frac{-m + \frac{z}{v}}{\sqrt{2}}\right) dv \quad (22)$$

이다. 식 (22)에서 $m = \sqrt{2M\frac{E_c}{N_0}}$ 이고, $U = Y_k^{(2)}$, $N_k^{(R,2)}$, $V = Y_k^{(1)} + N_k^{(R,1)}$ 이다. 식 (21)과 (22)에서의 f_{2n} 와 f_{3n} 은 정규화된 랜덤 변수들에 대한 밀도 함수이며, $V_{T_n} = V_T/\sigma_n^2$ 은 정규화된 임계값이다.

신호의 자기발생 잡음이 열잡음보다 크다고 할 때, 식 (22)에 대한 근사화를 구하기 위해서 식 (18)의 두 번째 항을 무시하면, 랜덤변수 $Z = UV$ 에 대한 p.d.f.로부터 결정 변수에 대한 다음의 식 (23)을 가져올 수 있다.

$$f_{H_1}(z) \approx \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{1}{t} \exp\left(-\frac{1}{2}\left[\left(m - \frac{z}{t}\right)^2 + (m-t)^2\right]\right) dt \quad (23)$$

따라서, 식 (23)을 이용한 검출 확률에 대한 최종 근사식은 다음과 같다^[5].

$$P_D = \int_{V_T} f_{H_1}(z) dz = \frac{1 + \operatorname{erf}\left(\frac{m}{\sqrt{2}}\right)}{4} - \frac{1}{\sqrt{8\pi}} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{(v-m)^2}{2}\right) \operatorname{erf}\left(\frac{-m + \frac{V_T}{v}}{\sqrt{2}}\right) dv \quad (24)$$

가설 H_0 일 경우, 결정 변수는 다음과 같다.

$$Z_k = (Y_k^{(2)} + N_k^{(R,2)}) (Y_{k-M}^{(1)} + N_{k-M}^{(R,1)}) + N_k^{(I,2)} N_{k-M}^{(I,1)} \quad (25)$$

여기서 $Y_{k-M}^{(1)}, Y_k^{(2)}$ 는 자기발생 잡음 성분이고, $N_k^{(R,2)}, N_{k-M}^{(I,1)}$ 는 두 개의 정합 필터에서의 열잡음에 대한 실수와 허수부이다. 두 개의 정합 필터로부터 나오는 출력인 자기발생 잡음과 열잡음 성분은 완전히 무상관(uncorrelated)이다. 따라서, 충분히 큰 M 에 대해 자기발생 잡음 성분인 $Y_k^{(2)}$ 와 $Y_{k-M}^{(1)}$ 는 독립적인 가우시안 랜덤 변수이다. 그 결과, 식 (25)의 첫 항을 형성하는 두 개의 독립적인 가우시안 랜덤 변수들의 분산은 식 (26)과 같다.

$$\sigma_Y^2 + \sigma_n^2 = \sigma_n^2(1 + \rho^2) \quad (26)$$

여기서, $\rho = \frac{\sigma_Y}{\sigma_n} = \sqrt{\frac{2E_c}{N_0}}$ 이고, 식 (25)의 첫 항에 대한 p.d.f., $f_4(z)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$f_4(z) = \frac{1}{\pi \sigma_n^2(1 + \rho^2)} K_0\left(\frac{|z|}{\sigma_n^2(1 + \rho^2)}\right) \quad (27)$$

결정 변수의 두 번째 성분에 대한 밀도 함수는 식 (20)으로 주어지므로 최종적인 오경보 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{FA} = \int_{V_T} f_4(z) * f_2(z) dz = \frac{1}{\pi \sqrt{1 + \rho^2}} \int_{-\infty}^\infty K_0\left(\frac{|z|}{1 + \rho^2}\right) \Lambda(V_T - z) dz \quad (28)$$

여기서, $\Lambda(a) = \frac{1}{\pi} \int_a^\infty K_0(|t|) dt$ 이다.

IV. 수치해석

본 장에서는 2개의 적분 시구간을 사용하는 복수

적분 시구간 직렬 탐색 시스템에서 차동 위상동기 부분 상관을 적용했을 때의 Kronecker 부호의 특성을 기존의 확산 부호로 쓰이는 PN 부호의 것과 비교, 분석하였다. 이때, PN 부호를 기준으로 하여 두 부호가 각 E_c/N_0 에 대해 동일한 평균 초기동기 획득 시간, $E[T_{acq}]_{unif.}$ 을 가질 때를 가정하였으므로 이를 만족시키는 차동 위상동기 부분상관 방식의 P_D, P_{FA} 값을 식 (13)에 적용하였다.

그림 8은 E_c/N_0 값의 변화에 따라 PN 부호의 최소 초기동기 획득 시간을 기준으로 하였을 때, 적분 구간 M 에 따른 PN 부호와 Kronecker 부호의 오경보 확률을 분석한 결과이다. PN 부호는 E_c/N_0 의 값에 따라 1.4×10^{-4} 에서 2.5×10^{-3} 의 오경보 확률값을 가지는 반면, Kronecker 부호의 오경보 확률값은 1.1×10^{-4} 에서 3.5×10^{-4} 으로 거의 일정한 값을 가지며, E_c/N_0 가 -14dB일 때는 PN 부호에 비해 최대 8dB의 성능이득을 갖는다. 즉, Kronecker 부호는 PN 부호에 비해 E_c/N_0 의 변화에 민감하지 않으면서도 오경보 확률이 크게 낮음을 알 수 있다.

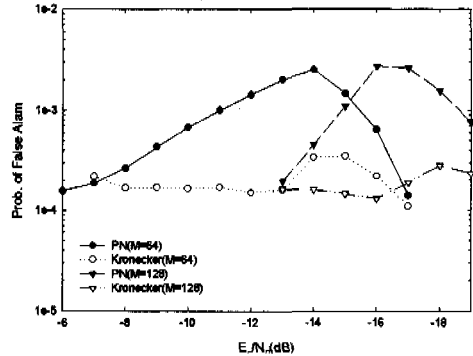


그림 8. 동일한 평균 초기동기 획득 시간을 갖는 PN 부호와 Kronecker 부호의 오경보 확률

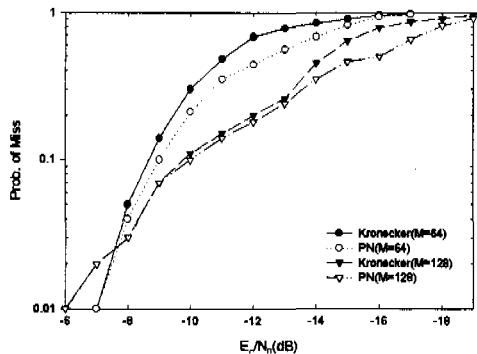


그림 9. 동일한 평균 초기동기 획득 시간을 갖는 PN 부호와 Kronecker 부호의 실패 확률

그림 9는 Kronecker 부호와 PN 부호의 실패 확률을 나타낸다. Kronecker 부호의 실패 확률이 PN 부호보다 약간 높지만 오경보 확률에 비해 차이가 매우 작게 난다. 따라서, 전체적으로 Kronecker 부호의 동기확률이 PN 부호보다 높다고 할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 기존의 위상비동기 상관기를 사용하는 대신에 자기상관으로 인한 자기발생 잡음과 열잡음의 독립성으로 인해 월등히 나은 성능을 갖는 차동 위상동기 상관기를 이용하는 DS/CDMA 시스템에서 기존의 PN 부호 대신 빠른 동기 계열의 확산 부호인 Kronecker 부호를 사용하여 그 특성을 분석하였다. 그 결과, 실패 확률에 있어서는 Kronecker 부호와 PN 부호가 거의 같은 성능을 가지는데 반해, 오경보 확률에서는 Kronecker 부호가 PN 부호에 비해 그 값이 월등히 낮아 동기 확률이 크다. 특히, Kronecker 부호의 경우에는 각 E_c/N_0 에 대한 오경보 확률값의 변동이 거의 없으면서도 낮다. 따라서, 채널 처리 용량이 성능 기준이 되는 패킷 무선 통신에서 PN 부호보다 나은 동기 확률을 갖는 Kronecker 부호를 사용함으로써 더 높은 채널 처리용량을 기대해볼 수 있다.

참고 문헌

[1] Char-Dir Chung, "Differentially Coherent Detection Technique for Direct-Sequence Code Acquisition in a Rayleigh Fading Mobile Channel", *IEEE Trans. on Comm.* vol. 43, no. 3, pp. 1116-1126, Mar, 1995.

[2] 조현욱, 박상규, "빠른 초기동기 확산부호를 이용한 이동통신 시스템의 성능과 셀구성", 한국통신학회 논문지, 제24권, 제5호, pp.648-656, 1999. 5.

[3] A. R. Raghavan, C. W. Baum and D. L. Noneaker, "Analysis of a Serial Acquisition Scheme for Unslotted Distribution Direct-Sequence Packet Radio Networks", *Proc. of the IEEE International Conf. on Comm.* vol. 3, pp. 1248-1252, June, 1998.

[4] A. Polydoros, C. L. Weber, "A Unified Approach to Serial Search Spread-Spectrum Code Acquisition-Part I : General Theory",

IEEE Trans. Comm. vol. com-32, no. 5, May, 1984.

[5] M. H. Zarrabizadeh, E. S. Sousa, "Analysis of a Differentially Coherent Spread Spectrum Acquisition Receiver", *Proc. of the International Conf. on Comm.* vol. 3. pp. 1732-1736, June, 1995.

[6] 김대호, 박영욱, 김도욱, "확산대역통신의 부분상관 동기방식", 전자통신 제 14권 4호 pp. 1-8, 1993.

[7] A. Polydoros, C. L. Weber, "A Unified Approach to Serial Search Spread Spectrum Code Acquisition-Part II : A Matched Filter Receiver", *IEEE Trans. Comm.* vol. com-32, no. 5, pp. 550-560, May, 1984.

[8] Stephen S. Rappaport, Donald M. Grieco, "Spread-Spectrum Signal Acquisition : Methods and Technology", *IEEE Comm. Magazine.* vol. 22, no. 6, pp. 6-21, June, 1984.

[9] V. M. Jovanovic, "Analysis of Strategies for Serial-Search Spread-Spectrum Code Acquisition-Direct Approach", *IEEE Trans. on Comm.* vol. 36, no. 11, pp. 1208-1220, Nov, 1988.

[10] Vladan M. Jovanovic, Elvino S. Sousa, "Analysis of Noncoherent Correlation in DS/BPSK Spread Spectrum Acquisition", *IEEE Trans. on Comm.* vol. 43, no. 2, pp. 565-573, Feb. 1995.0

임 연 주(Yeon Ju Lim)

1998년 2월 : 대구대학교 정보통신공학(공학사)

2000년 2월 : 한양대학교 전파공학(공학석사)

2000년 2월~현재 : 한양대학교 전자통신전파공학 (박사과정)

<주관심 분야> Spread Spectrum Communication, Acquisition, Error Correction Codes, IMT-2000

박 상 규(Sang Kyu Park)

한국통신학회논문지 제 25권 제 3A호, pp. 390을 참고하시기 바랍니다.