논문 03-28-9A-3 한국통신학회논문지 '03-9 Vol.28 No.9A

시드 누적 순차적 추정 기법을 이용한 낮은 신호대잡음비 환경에서의 의사 잡음 부호 획득

정회원 윤 석 호*, 김 선 용**

PN Code Acquisition at Low Signal-to-Noise Ratio Based on Seed Accumulating Sequential Estimation

Seokho Yoon*, Sun Yong Kim** *Regular Members*

요 약

Ward에 의해 제안된 순차적 추정에 기반을 둔 의사 잡음 부호 획득 방법은 비교적높은 신호대잡음비 환경에서는 우수한 성능을 보이지만, 낮은 신호대잡음비 환경에서는 그 성능이 크게 저하된다. 본 논문에서는 부호 획득에서 실제적으로 관심을 두고 있는 낮은 신호대잡음비 환경에서도 우수한 성능을 지니는 시드 누적 순차적 추정 기법과 이에 기반을 둔 부호 획득 시스템을 제안하고, 제안한 시스템의 평균 획득 시간 성능을 분석한다. 제안한 시드 누적 순차적 추정 기법을 이용한 부호 획득 시스템은 기존의 순차적 추정 기법을 이용한 부호 획득 시스템에 비해 낮은 신호대잡음비 환경에서 매우 우수한 성능을 지니며, 그 성능향상의 정도가 의사 잡음 부호의 주기가 증가할수록 더 커짐을 보인다.

ABSTRACT

The pseudo-noise (PN) code acquisition based on the sequential estimation (SE) proposed by Ward performs well only at relatively high chip signal-to-noise ratios (SNRs). In this paper, a seed accumulating sequential estimation (SASE) method and a PN code acquisition system based on it are proposed, which perform well at low chip SNR (of practical interest) also. Then, the mean acquisition time performance of the proposed system is investigated. Numerical results show that the system based on the SASE performs dramatically better than that based on the SE at low chip SNR, and the improvement becomes larger as the period of PN code increases.

I. 서 론

직접수열 대역확산 방식 수신단에서 가장 먼저 이루어져야 할 과정은 송신단에서 보낸 의사 잡음 부호와 수신단 자체에서 만들어진 의사 잡음 부호 사이의 시간 동기화이다. 시간 동기화는 부호획득과 (대략적인 시간동기화) 부호추적 (세밀한 시간동기화) 두 단계로 이루어지진다. 이 때, 첫 단계인 부호획득이 얼마나 빨리 이루어지는가는 전체적인 시스템 동작시간에 절대적인 영향을 미치게 되므로 빨리 부호를 획득하는 것은 직접수열 대역확산 통신에서 대표적인 핵심 기술 가운데 하나이다[1].

지금까지 의사 잡음 부호 획득 기법에 대한 많은 연구 결과들이 발표되어 왔다[2, 3]. 대부분의 연구 결과는 부호획득이 이루어질 때까지, 보낸 의사잡음 부호의 모든 가능한 시간지연을 수신단에서 차례대로 또는 동시에 검색하는 직렬 검색 방법이나[4] 병렬 검색 방법에[5] 기반을 두고 있으나, 긴 의사 잡

* 성균관대학교 정보통신공학부(syoon@ece.skku.ac.kr), ** 건국대학교 전자공학부(kimsy@konkuk.ac.kr)
논문번호 : 030221-0526, 접수일자 : 2003년 5월 27일
※본 연구는 건국대학교 교내 학술진흥 연구비 지원으로 수행되었습니다

음 부호에 대해 직렬 검색은 평균 부호 획득 시간이 크다는 문제점을 가지고 있고, 병렬 검색은 구현하기에는 하드웨어 복잡도가 매우 크다는 문제점을 가지고 있다[6]. 또 다른 접근 방법으로 [7]에서 제안한 순차적 추정 (sequential estimation: SE) 기법을 들 수 있으며, 이 기법은 넓은 불확정성 범위를 가지는 의사 잡음 부호의 시간지연을 검색하는 방식대신 수신단에 도착한 의사 잡음 부호로부터 의사 잡음 부호를 발생시키는 (의사 잡음 부호 주기보다 훨씬 짧은 길이의) 시드를 추정함으로써 (다시말해, 의사 잡음 부호 주기 L이 2^r-1일 때, 수신된 의사 잡음 부호의 처음 r개 칩의 (chip) 값만을 추정함으로써) 이러한 문제를 해결할 수 있다.

그러나, 순차적 추정 기법은 시드를 구성하는 모든 칩의 이진값을 오류없이 추정하여야 하므로, 비교적 높은 신호대잡음비에서는 우수한 성능을 보이지만, 실제로 관심을 두게 되는 낮은 신호대잡음비에서는 성능이 크게 열화된다. 즉, 하나의 칩 추정에서라도 오류가 발생하면 전체의 시드 추정에 오류가 발생하게 되므로, 시드를 구성하는 r개 칩 모두가 정확히 추정될 수 있는 비교적 높은 신호대잡음비 환경으로 그 효용성이 제한된다[8].

본 논문에서는 순차적 추정 기법을 개선하여 낮은 신호대잡음비 환경에서도 우수한 부호 획득 성능을 보이는 시드 누적 순차적 추정 (seed accumulating sequential estimation: SASE) 기법을 제안하고자 한다. 이 시드 누적 순차적 추정 기법은 수신된 시드의 각 칩을 누적함으로써 시드의 칩당 신호대잡음비를 개선하여 시드의 추정 정확성을 높이고, 그에 따라 평균 부호 획득 시간을 크게 감소시킨다.

II. 시스템 모형

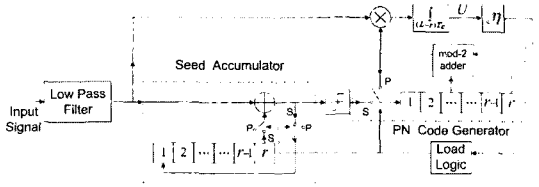


그림 1. 시드 누적 순차적 추정 기법을 이용한 부호 획득 시스템의 구조
Fig. 1. The structure of the PN code acquisition system based on the SASE

그림 1은 시드 누적 순차적 추정 기법을 이용한 부호 획득 시스템의 구조를 보여준다. 그림 1에서 보는 바와 같이 시드 누적 순차적 추정 기법은 기존의 순차적 추정 기법과 비교하여 보면, 시드 누적기라는 (seed accumulator) 추가적인 구성요소를 가지고 있다. 각 입력 신호는 N_0의 단면 전력밀도스펙트럼을 (one-sided power spectral density) 갖는 가산성 백색 정규 잡음이 (additive white Gaussian noise) 섞인 이진 신호이다. 시드 누적 순차적 추정 기법의 동작을 살펴보자. 제일 처음 과정은 입력 신호의 처음 r개 칩을 의사 잡음 부호 발생기로 (PN code generator) 적재하는 (loading) 것이다. 이 때, 스위치는 's' 위치에 있으며, 적재 과정은 다음과 같이 진행된다. 초기에 시드 누적기 내부에 있는 시프트 레지스터의 초기값과 (0) 입력되는 시드가 더해진다. 그리고, 가산기의 출력은 시드 누적기의 시프트 레지스터에 저장됨과 동시에 하드 리미터를 (hard limiter) 거쳐서 의사 잡음 부호 발생기로 적재된다. 만일 적재과정 이후의 과정을 통해 부호 획득이 이루어지지 않으면, 의사 잡음 부호 한 주기가 진행된 후에 다음 시드 입력과 누적이 이루어진다. 다시 말해, 이전에 시프트 레지스터에 저장되어 있는 시드에 새로운 입력 시드가 더해진다. 따라서 가산기 출력값은 시드의 누적값이 된다. 그리고 가산기 출력값은 다시 시드 누적기의 시프트 레지스터에 저장됨과 동시에 하드 리미터를 거치게 된다. 한편, 기존의 순차적 추정 기법에서는 누적된 시드가 아니라 현재 입력되는 시드만이 하드 리미터를 거쳐 부호 획득 판정에 영향을 미친다.

적재과정이 끝난 뒤 의사 잡음 부호를 발생하기 위해서 스위치는 'p'로 전환된다. 그리고 이때, 입력 신호와 의사 잡음 부호 발생기에서 생성된 부호 간의 상관을 (correlation) $(L-r)T_c$ 동안에 수행하게 된다. 여기서, T_c는 의사 잡음 부호의 칩 주기이다 (chip duration). 상관출력 (correlation output) U를 문턱값 (threshold) η와 비교하여 상관출력값이 문턱값보다 크면, 부호 획득이 이루어졌다고 판정을 하고, 의사 잡음 부호 발생기는 현재의 동작을 계속하여 진행한다. 상관출력값이 문턱값보다 작으면, 적재 논리를 (load logic) 수행하여 스위치가 다시 's' 위치로 전환되어 시드 적재과정을 다시 수행하게 된다.

누적 회수가 증가함에 따라, 칩 다이버시티 효과를 기대할 수 있다. 다시 말해, 시드누적기를 통해 하드리미터로 입력되는 칩의 신호대잡음비를 향상시킬수 있다. 따라서 시드의 더 정확한 추정치가 의사 잡음 부호 발생기로 적재될 수 있으며 그 결과 전체적인 부호 획득 성능이 개선되는 것이다.

III. 성능 분석

1. 평균 획득 시간

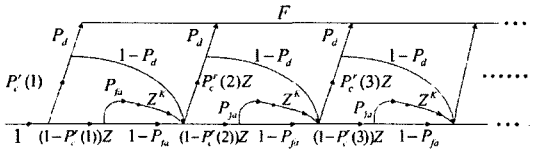


그림 2. 시드 누적 순차적 추정 기법의 발생 함수 흐름도
Fig. 2. The generating function flow graph of the SASE scheme

[4]에서와 같이 부호 획득을 얻는 데 소요되는 평균 시간은 발생 함수 흐름도를 (generating function flow graph) 사용하여 구할 수 있다. 그림 2는 시드 누적 순차적 추정 기법의 발생 함수 흐름도를 보여주고 있다. 그림 2에서 $P_c(i)$는 i번째 주기에서 올바르게 칩을 추정할 확률이다 (correct chip probability). 따라서, $P_c^r(i)$는 i번째 주기에서 연속적인 r개의 칩을 (다시말해, 시드) 올바르게 추정할 확률이다. 적재과정에 있어 r개의 칩 '모두가' 올바르게 추정되어야 '올바른' 적재가 (correct loading) 이루어 질 수 있다. P_d는 검파 확률 (다시말해, r개의 칩 모두가 올바르게 추정되었을 때, $U \geq \eta$인 확률), P_{fa}는 오경보 확률 (다시말해, r개의 칩 가운데 적어도 하나가 올바르게 추정되지 않았을 때, $U \geq \eta$인 확률), K는 오경보에 대한 오경보 손실 비용 (penalty factor) 이다. 이 그림으로부터 발생 함수 $F(Z)$는 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$F(Z) = P_d \sum_{i=1}^{\infty}\Big[P_c^r(i)Z^i \prod_{j=1}^{i-1}\{P_c^r(j)(1-P_d) + (1-P_c^r(j))(1-P_{fa}+P_{fa}Z^K)\}\Big] \quad (1)$$

(1)로부터, 평균 획득 시간 $E\{T_{acq}^{SASE}\}$는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} &E\{T_{acq}^{SASE}\} \\ &= \frac{dF(Z)}{dZ} T_e \Big|_{Z=1} \\ &= P_d \sum_{i=1}^{\infty}\Big[P_c^r(i)\Big\{i\prod_{j=1}^{i-1}(1-P_d P_c^r(j)) \\ &\quad + KP_{fa}\sum_{l=1}^{i-1}(1-P_c^r(l))\prod_{m=1,m\neq l}^{i-1}(1-P_d P_c^r(m))\Big\}\Big]T_e \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, T_e는 검사 시간으로서 (examination time), 이 논문에서는 LT_c와 같으며, 적재와 상관 연산에 소요되는 시간을 의미한다. 기존 순차적 추정 기법에서 $P_c(i)=P_c, i=1,2,3,\ldots$이다. 그러므로, (2)에 $P_c(i)=P_c$를 대입하면, 기존 순차적 추정 기법의 평균 획득 시간을 $ET_{acq}^{SE}=((1+(1-P_c^r)KP_{fa})/P_c^r P_d)T_e$와 같이 얻을 수 있으며, 이것은 [9]의 결과와 같다.

2. 칩 정추정 확률, 검파 확률, 오경보 확률 (Correct chip, detection, and false alarm probabilities)

i번째 주기에서 시드 누적기의 j번째 값은 다음과 같이 주어진다.

$$a_j^{(i)} = i(\sqrt{P}s_j T_c) + n_j, \quad j=1,2,\ldots,r, \quad (3)$$

여기서, P는 의사 잡음 부호의 칩 신호 전력이고, j번째 시드 s_j는 같은 확률로 +1과 -1의 값을 갖으며, $\{n_j\}_{j=1}^r$은 평균 0, 분산 $i\sigma_n^2$인 서로 독립이고 같은 분포를 (independent and identically distributed) 갖는 정규 확률 변수이다. 여기서, $\sigma_n^2 = N_0 T_c/2$는 그림 1의 입력 신호에서 잡음 성분의 분산이다.

i번째 주기에서 칩 정추정 확률 $P_c(i)$는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_c(i) &= 1-\Pr[a_j^{(i)}<0 | s_j=1] \\ &= 1-\int_{-\infty}^{0}\frac{1}{\sqrt{2\pi i}\sigma_n}\exp\left\{-\frac{(x-i\sqrt{P}T_c)^2}{2i\sigma_n^2}\right\}dx \\ &= 1-Q\left(\sqrt{2i\left(\frac{E_c}{N_0}\right)}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $Q(x)=\int_x^{\infty} 1/\sqrt{2\pi}\exp(-y^2/2)dy$이고, $E_c=PT_c$ (4)로부터 올바른 적재 확률 (correct loading probability) $P_c^r(i)$는 누적 회수 i가 증

가함에 따라 더 개선된다는 것을 알 수 있다.

연속된 r개의 칩이 모두 올바르게 추정되었다면, 다시말해, 올바른 적재가 이루어 졌다면, 상관 출력 U의 확률밀도함수는 다음의 식으로 주어진다.

$$f_{U_c}(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_N}}\exp\left\{-\frac{(x-\sqrt{P}MT_c)^2}{2\sigma_N^2}\right\}, \quad (5)$$

여기서, $\sigma_N^2=N_0MT_c/2$는 상관 출력의 분산이고 M은 상관 길이로 이 논문에서는 $(L-r)$이다. (5)로부터, 검파 확률 $P_d=\{U\geq\eta|\text{ correct loading}\}$를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_d=\int_\eta^\infty f_{U_c}(x)dx = Q(C-\sqrt{2M(E_c/N_0)}), \quad (6)$$

여기서, $C=\sqrt{(2/N_0MT_c)}\eta$.

한편, 연속된 r개의 칩 추정가운데 어느 하나의 칩 추정에서라도 오류가 발생한다면 (wrong loading), U의 확률밀도함수는 다음의 식으로 주어진다.

$$f_{U_w}(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_N}}\exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma_N^2}\right\}. \quad (7)$$

(7)으로부터 오경보 확률 $P_{fa}=\{U\geq\eta|\text{ wrong loading}\}$을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{fa}=\int_\eta^\infty f_{U_w}(x)dx = Q(C). \quad (8)$$

IV. 수치 해석 결과 및 결론

이 절에서는, 제안한 시드 누적 순차적 추정 기법과 기존의 순차적 추정 기법의 평균 부호 획득 시간을 비교 분석해보고자 한다. 성능 평가에는 근원 다항식 (primitive polynomial) $1+z+z^{15}$, $1+z^3+z^{10}$, $1+z^4+z^9$, $1+z^2+z^3+z^4+z^8$로 생성된 주기 $L=32767, 1023, 511, 255$인 의사 잡음 부호를 사용하였다. 검사 시간으로 $T_e=LT_c$, 오경보에 의한 오경보 손실 비용으로 $K=L, 10L, 100L$을 가정하였다.

문턱값 η는 각 주어진 칩당 신호대잡음비에서 평균 획득 시간을 최소로 하는 값을 얻어서 사용하였다. 모의 실험에서는 각 주어진 칩당 신호대잡음비에서 1000번의 수행을 통해 그 수행횟수만큼 획득 소요 시간들을 얻은 뒤, 이를 평균하여 평균 획득 시간을 얻었다.

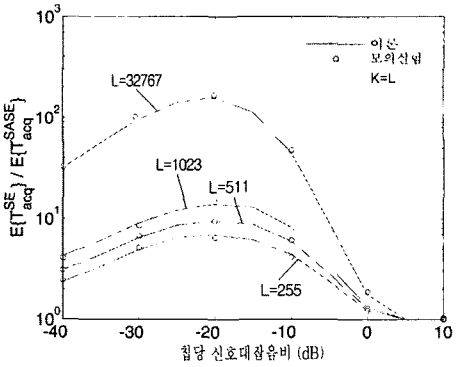


그림 3. 시드 누적 순차적 추정 기법의 평균 획득 시간에 대한 순차적 추정 기법의 평균 획득 시간의 비 (K=L)
Fig. 3. The ratio of the mean acquisition time of the SE scheme to that of the SASE scheme (K=L)

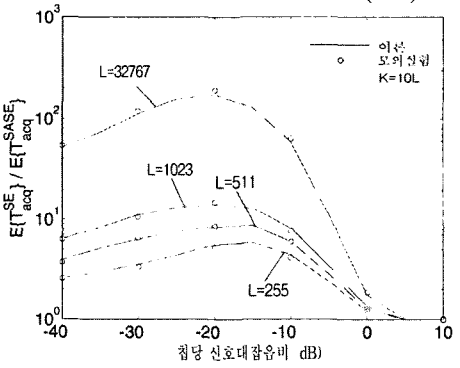


그림 4. 시드 누적 순차적 추정 기법의 평균 획득 시간에 대한 순차적 추정 기법의 평균 획득 시간의 비 (K=10L)
Fig. 4. The ratio of the mean acquisition time of the SE scheme to that of the SASE scheme (K=10L)

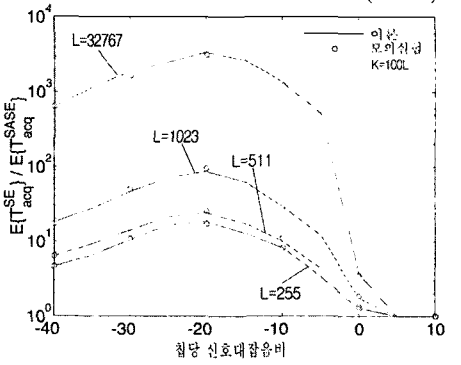


그림 5. 시드 누적 순차적 추정 기법의 평균 획득 시간에 대한 순차적 추정 기법의 평균 획득 시간의 비 (K=100L)
Fig. 5. The ratio of the mean acquisition time of the SE scheme to that of the SASE scheme (K=100L)

그림 3-5는 제안한 시드 누적 순차적 추정 기법의 평균 획득 시간에 대한 기존의 순차적 추정 기법의 평균 획득 시간의 비를 (ratio) 보여주고 있다.

그림에서 -10dB 이하의 낮은 신호대잡음비에서 시드 누적 순차적 추정 기법의 성능이 훨씬 우수함을 알 수 있다. 특히, -20dB에서는 시드 누적 순차적 추정 기법의 성능이 기존의 순차적 추정 기법에 비해 5 - 3000배 정도 개선되었음을 볼 수 있다. 또한, 의사 잡음 부호의 주기와 오경보 손실 비용이 늘어남에 따라 성능 개선의 정도가 더 늘어난다는 것을 알 수 있다. 이러한 점을 통해 시드 누적 순차적 추정 기법은, 비교적 높은 신호대잡음비 범위에서만 원하는 동작을 하는 기존의 순차적 추정 기법과는 달리, 신호대잡음비가 매우 낮고, 의사 잡음 부호의 길이가 매우 긴 차세대 이동통신 시스템에 응용될 수 있음을 볼 수 있다.

본 논문에서 언급한 분석과 결과는 가산성 잡음 환경인 CDMA 기반의 저궤도 위성통신 시스템에서 사용되는 단말기에 직접적으로 적용될 수 있다. 또한 본 논문에서 제안한 시드 누적 순차적 추정 기법을 조금 수정하여 (예를 들어, 시드 그 자체의 값이 아닌 시드 위상차의 값을 누적) 페이딩 환경의 이동통신 시스템에서 적용할 수 있는 기법을 개발할 수 있을 것으로 생각되며, 현재 이에 대한 연구를 진행하고 있다.

참 고 문 헌

[1] R.L. Peterson, R.E. Ziemer, and D.E. Borth, *Introduction to Spread-Spectrum Communications*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995.

[2] 김홍길, 정창용, 송익호, 권형문, 김용석, "부호순위 검파기를 쓰는 의사잡음 부호 획득 기법", *한국통신학회 논문지*, 26권, 5호, pp. 599-607, 2001년 5월.

[3] W.H. Sheen and H.C. Wang, "A new analysis of direct-sequence pseudonoise code acquisition on Rayleigh fading channels", *IEEE Jour. Select. Areas Comm.*, vol. 19, pp. 2225-2232, November 2001.

[4] A. Polydoros and C.L. Weber, "A unified approach to serial search spread-spectrum code acquisition. Part I: General theory," *IEEE Trans. Comm.*, vol. 32, pp. 542-549, May 1984.

[5] L.B. Milstein, J. Gevargiz, and P.K. Das, "Rapid acquisition for direct sequence spread-spectrum communications using parallel SAW convolvers", *IEEE Trans. Comm.*, vol. 33, pp. 593-600, July 1985.

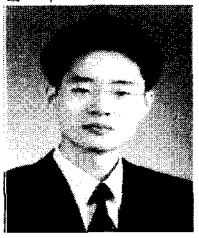
[6] M.K. Simon, J.K. Omura, R.A. Scholtz, and B.K. Levitt, *Spread Spectrum Communications Handbook*, McGraw-Hill, New York, NY, 1994.

[7] R.B. Ward, "Acquisition of pseudonoise signals by sequential estimation," *IEEE Trans. Comm.*, vol. 13, pp. 474-483, December 1965.

[8] S. Glistic and B. Vucetic, *Spread Spectrum CDMA Systems for WIreless Communications*, Artech House, Norwood, MA, 1997.

[9] J.H. Chiu and L.S. Lee, "An improved sequential estimation scheme for PN acquisition", *IEEE Trans. Comm.*, vol. 36, pp. 1182-1184, October 1988.

윤 석 호(Seokho Yoon) 정회원



1976년 1월 7일생
1993년 3월 ~ 1997년 2월: 한국과학기술원 전자전산학과 학사 (최우등)
1997년 3월 ~ 1999년 2월: 한국과학기술원 전자전산학과 석사
1999년 3월 ~ 2002년 2월: 한국과학기술원 전자전산학과 박사
2002년 4월 ~ 2002년 6월: MIT 박사후 연구원
2002년 7월 ~ 2003년 2월: 하버드대학교 박사후 연구원
2003년 3월 ~ 현재: 성균관대학교 정보통신공학부 전임강사
2000. 2: 삼성 휴먼테크 논문대상 동상 받음

<주관심분야> 이동통신, 통계학적 신호처리, 적응 신호처리

김 선 용(Sun Yong Kim) 정회원

1990년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학사 (최우등)
1993년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사
1995년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사
1995년 4월 ~ 1996년 3월: 동경대학교 생산기술연구소 박사연구원
1996년 9월 ~ 1998년 12월: 한국전자통신연구원 초빙연구원
1996년 3월 ~ 2001년 8월: 한림대학교 정보통신공학부 전임강사, 조교수
2001년 9월 ~ 현재: 건국대학교 전자공학부 조교수
1990년: IEEE Korea Section 학생논문대회 우수상 받음
1992/3년: IEEE Communication Society 장학금 받음
대한전자공학회, 한국통신학회 정회원; IEEE 선임회원

<주관심분야> 통계학적 신호처리, 이동통신, 통신이론