DBpia

논문 01-26-9A-19 한국통신학회논문지 '01-9 Vol.26 No.9A

Epoch 동기에 대한 Tone Jamming의 영향 분석

정회원 문 장 욱*, 은 유 창*, 송 홍 엽*, 이 광 억**, 최 영 균**

Tone Jamming Effect on the Epoch Synchronization

Jang-Wook Moon*, Yu-Chang Eun*, Hong-Yeop Song*, Kwang-Eog Lee**
and Young-Kyun Choi** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 실시간 자기 상관 관계를 이용하여 주파수 도약 시점을 찾아내는 epoch 추정기를 소개하고 이것의 성능을 tone jamming 환경 하에서 분석해 보았다. 주파수 도약 방법을 이용하는 시스템은 주로 군 관련 시스템이므로 jamming 환경 하에서의 성능이 매우 중요하다. Jamming이 있을 경우 epoch 추정기는 실제값보다 작은 값을 나타내는 것을 알 수 있었다. 분석 과정을 수학적으로 유도하였고, 컴퓨터 실험으로 결과를 확인하였다.

ABSTRACT

In this thesis, the epoch estimator, i.e. finding the timing of change of frequency, incorporating real-time autocorrelation is reviewed and analyzed under tone jamming. Because FH methods are generally used in military application, performance under jamming is very important. The estimator indicates a little smaller value than real epoch-mismatched value. The performance degradation is analyzed with mathematical derivation and simulated with computer.

Ⅰ. 서 론

동기 과정은 디지털 통신 시스템에서 빠질 수 없는 필수적인 과정이다. 그 중에서 실시간 자기 상관 관계를 이용해서 주파수 도약 시점을 찾아내는 epoch 동기 방법이 기존에 소개되어졌고, 많은 분석이 이루어졌다[1][2].

실제로 주파수 도약 방법은 군 통신 관련 시스템에 주로 쓰이고 있기 때문에 적의 방해 전파가 있을 경우 성능이 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 jamming 환경 하에서 epoch 동기화 방법의 성능을 분석해 본다. 본 논문에서는 tone jamming 환경을 가정하였고 도약 비율 R_H 는 알려져 있다고 가정하고, 잡음은 AWGN으로 가정하였다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 실시간 자기 상관 관계를 이용하는 epoch 추정기를 소개하고[2] tone jamming 환경에서 분석한다. 3장에서 jamming의 영향으로 생기는 항을 분석하고 4장에서 실험결과를 보이고, 5장에서 결론을 내린다.

Ⅱ. 시스템 모델

수신되는 신호에 임의의 주파수를 가지는 jamming이 있는 상황을 그림 1과 같이 묘사한다. 대역 통과된 수신되는 신호는 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$r(t) = s(t) + j(t) + n(t) \tag{1}$$

일반성의 결여 없이 n번째 도약 구간만을 관찰한다. 사용자의 신호 $s(t)$는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

* 연세대학교 전기·전자공학과 부호및정보이론 연구실(hysong@yonsei.ac.kr)
** 국방과학연구소 위성체계연구팀
논문번호 : 000014-1229, 접수일자 : 2000년 12월 29일
※ 본 논문은 국방과학연구소의 연구 과제지원에 의하여 수행되었습니다.

www.dbpia.co.kr

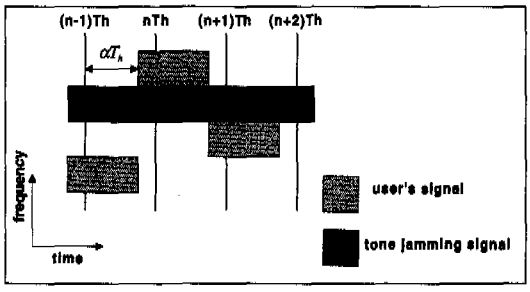


그림 1. Tone Jamming 환경

$$s(t)=\begin{cases}\sqrt{2S}\cos(2\pi f_0 t+\phi_0), \\ \quad (n-1)T_h \le t < (n-1)T_h+\alpha T_h \\ \sqrt{2S}\cos(2\pi f_1 t+\phi_1), \\ \quad (n-1)T_h+\alpha T_h \le t < nT_h\end{cases} \tag{2}$$

S는 신호의 파워, f_0, f_1, ϕ_0, ϕ_1 는 각각 αT_h 이전, 이후의 주파수와 위상을 나타낸다. 그리고 tone jamming 신호는 다음과 같이 나타내어진다.

$$j(t)=\sqrt{2J}\cos(2\pi f_j t+\phi_j) \tag{3}$$

여기서 J 는 jamming 신호의 파워, f_j, ϕ_j 는 각각 jamming신호의 주파수와 위상을 나타낸다. 그리고 대역 통과된 잡음은 다음과 같이 나타내어진다[3].

$$n(t)=\sqrt{2}\,[n_I(t)\cos(2\pi f_c t)-n_Q(t)\sin(2\pi f_c t)] \tag{4}$$

여기서 f_c는 전체 밴드폭의 중간 주파수이고, $n_I(t)$, $n_Q(t)$ 는 각각 평균이 0이고, PSD가 다음과 같은 i.i.d. Gaussian 랜덤 과정이다.

$$S_{n_I}(f)=S_{n_Q}(f)=\frac{N_0}{2},\quad f\in\left[\frac{-B}{2},\frac{B}{2}\right] \tag{5}$$

수신된 신호의 실시간 자기 상관 관계[1][2]는 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\begin{aligned} y(\tau) &= \int_\tau^{T_h} r(t)r(t-\tau)dt \\ &\cong \int_\tau^{T_h}\{s(t)+j(t)\}\cdot\{s(t-\tau)+j(t-\tau)\}dt \\ &= A_J+B_J+C_J+D_J+N_I^{eq}(\tau)+N_Q^{eq}(\tau)\end{aligned} \tag{6}$$

여기서

$$\begin{aligned} A_J &= \int_\tau^{T_h} s(t)s(t-\tau)dt \\ &= S\ \max\{\alpha T_h-\tau,0\}\cos 2\pi f_0\tau \\ &\quad +S\ \max\{(1-\alpha)T_h-\tau,0\}\cos 2\pi f_1\tau\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} B_J &= \int_\tau^{T_h} j(t)j(t-\tau)dt \\ &= J\cos(2\pi f_j\tau)(T_h-\tau)\end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} C_J &= \int_\tau^{T_h} s(t)j(t-\tau)dt \\ &= \sqrt{SJ}\cos(2\pi f_j\tau+\Delta\phi_{0j}) \\ &\quad \cdot\{\max(\alpha T_h,\tau)-\tau\}\cdot 1_{f_0=f_j} \\ &\quad +\sqrt{SJ}\cos(2\pi f_j\tau+\Delta\phi_{1j}) \\ &\quad \cdot\{T_h-\max(\alpha T_h,\tau)\}\cdot 1_{f_1=f_j}\end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} D_J &= \int_\tau^{T_h} j(t)s(t-\tau)dt \\ &= \sqrt{JS}\cos(2\pi f_0\tau+\Delta\phi_{j0}) \\ &\quad \cdot\{\min(\tau+\alpha T_h,T_h)-\tau\}\cdot 1_{f_j=f_0} \\ &\quad +\sqrt{JS}\cos(2\pi f_1\tau+\Delta\phi_{j1}) \\ &\quad \cdot\{T_h-\min(\tau+\alpha T_h,T_h)\}\cdot 1_{f_j=f_1}\end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned} N_I^{eq}(\tau) &= \int_\tau^{T_h} n_I(t)n_I(t-\tau)dt \\ &\quad +\int_\tau^{T_h} n_Q(t)n_Q(t-\tau)dt \\ N_Q^{eq}(\tau) &= \int_\tau^{T_h} n_I(t)n_Q(t-\tau)dt \\ &\quad -\int_\tau^{T_h} n_Q(t)n_I(t-\tau)dt\end{aligned} \tag{11}$$

여기서 $\Delta\phi_{ab}$ 는 각각 $\phi_a-\phi_b$ 와 같다.

여기서 실시간 자기 상관 관계를 나타낸 신호 $y(\tau)$ 를 $\frac{1}{B}$ 간격으로 파워 샘플 하게 되면 각 샘플들은 식 12와 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} W_k(\alpha) &= y^2(\frac{k}{B})|_{LP} \\ &= S^2(\max\{\alpha T_h-\tau,0\})^2 \\ &\quad +S^2(\max\{(1-\alpha)T_h-\tau,0\})^2 \\ &\quad +J^2(T_h-\tau)^2 \\ &\quad +\left(N_I^{eq}(\frac{k}{B})\right)^2+\left(N_Q^{eq}(\frac{k}{B})\right)^2 \\ &\quad +\{a_0(\tau)\cos\Delta\phi_{J0}+b_0(\tau)\}\cdot 1_{f_j=f_0} \\ &\quad +\{a_1(\tau)\cos\Delta\phi_{J1}+b_1(\tau)\}\cdot 1_{f_j=f_1}\end{aligned} \tag{12}$$

여기서

$$\begin{aligned} a_0(\tau) &= 2S\sqrt{SJ}\max\{\alpha T_h-\tau,0\} \\ &\quad \cdot\{\min(\tau+\alpha T_h,T_h)-\tau\} \\ &\quad +2N\sqrt{SJ}(T_h-\tau)\{\max(\alpha T_h,\tau)-\tau\} \\ b_0(\tau) &= SJ\{\max(\alpha T_h,\tau)-\tau\}^2 \\ &\quad +SJ\{\min(\tau+\alpha T_h,T_h)-\tau\}^2 \\ a_1(\tau) &= 2S\sqrt{SJ}\max\{(1-\alpha)T_h-\tau,0\} \\ &\quad \cdot\{T_h-\min(\tau+\alpha T_h,T_h)\} \\ &\quad +2N\sqrt{SJ}(T_h-\tau)\{T_h-\max(\alpha T_h,\tau)\} \\ b_1(\tau) &= SJ\{T_h-\max(\alpha T_h,\tau)\}^2 \\ &\quad +SJ\{T_h-\min(\tau+\alpha T_h,T_h)\}^2\end{aligned} \tag{13}$$

www.dbpia.co.kr

다시 새로운 랜덤변수 Y와 Z를 다음과 같이 정의함으로써 maximum likelihood epoch 추정기를 얻게 된다[2].

$$Y = \sum_{k=1}^{\lambda G_h} \frac{W_k(\alpha)}{(T_k - \frac{k}{B})^2} \tag{14}$$

$$Z = 0.25 + \frac{1}{a(\lambda, G_h, S)}\{Y - p(\lambda, G_h, N_0, W_{BP}) - q(\lambda, G_h, S)\} \tag{15}$$

여기서

$$\begin{aligned} p(\lambda, G_h, S) &= S^2 G_h\{2\lambda + 2\ln(1-\lambda) + \frac{\lambda}{1-\lambda}\} \\ q(\lambda, G_h, N_0, W_{BP}) &= \sum_{k=1}^{\lambda G_h} 2N_0^2 (G_h - k)^2 F_1(k) \\ a(\lambda, G_h, S) &= 2G_h S^2 \frac{\lambda}{1-\lambda} \end{aligned} \tag{16}$$

그리고 maximum likelihood 추정기는 식 17과 같이 얻어진다[2].

$$\widehat{a_{ML}} = \begin{cases} \frac{1}{2} & , \text{if } Z<0 \\ \frac{1}{2} - \sqrt{Z} & , \text{if } 0 \le Z \le \frac{1}{4} \\ 0 & , \text{if } Z > \frac{1}{4} \end{cases} \tag{17}$$

식 17에서 얻어진 추정기의 평균과 분산은 다음과 같다[2].

$$\begin{aligned} E\{\widehat{a_{ML}}|a\} &= \frac{1}{2} Q\left(\frac{\mu_{Z|a}}{\sigma_Z}\right) + U(\mu_{Z|a}, \sigma_Z) \\ Var\{\widehat{a_{ML}}|a\} &= \frac{1}{2} Q\left(\frac{\mu_{Z|a}}{\sigma_Z}\right) \\ &\quad + V(\mu_{Z|a}, \sigma_Z) - E^2\{\widehat{a_{ML}}|a\} \end{aligned} \tag{18}$$

여기서

$$\begin{aligned} Q(x) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \\ U(t, s) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi s^2}} \int_0^{\frac{1}{2}} x(1-2x) \\ &\quad \cdot \exp\left[\frac{-1}{2s^2}\left\{(\frac{1}{2} - x)^2 - t\right\}^2\right] dx \\ V(t, s) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi s^2}} \int_0^{\frac{1}{2}} x^2(1-2x) \\ &\quad \cdot \exp\left[\frac{-1}{2s^2}\left\{(\frac{1}{2} - x)^2 - t\right\}^2\right] dx \end{aligned} \tag{19}$$

이다.

Ⅲ. 분 석

이번 장에서는 tone jamming의 영향으로 생겨난 항, 즉 식 12에 대해 분석한다. 식 12에서 $\cos\Delta\phi_{j0}, \cos\Delta\phi_{j1}$ 는 각각 $\phi_j - \phi_0$, $\phi_j - \phi_1$의 변환으로 볼 수 있으며, 식 20과 같은 결과를 얻을 수 있다[4].

$$\begin{aligned} E\{\cos\Delta\phi_{j0}\} &= E\{\cos\Delta\phi_{j1}\} = 0 \\ Var\{\cos\Delta\phi_{j0}\} &= Var\{\cos\Delta\phi_{j1}\} = 0.5 \end{aligned} \tag{20}$$

만약 $f_j = f_0$ 이면 $R_0(\tau)$로 인하여 Y에 생기게 되는 항은 식 21과 같고

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{\lambda G_h} \frac{R_0(k/B)}{(T_k - k/B)^2} &= \sum_{k=1}^{\lambda G_h} \frac{a_0(k/B)}{(T_k - k/B)^2} \cos\Delta\phi_{j0} \\ &\quad + \sum_{k=1}^{\lambda G_h} \frac{b_0(k/B)}{(T_k - k/B)^2} \\ &\doteq C_0 \end{aligned} \tag{21}$$

만약 $f_j = f_1$ 이면 $R_1(\tau)$로 인해 식 22가 Y 에 생기게 된다.

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{\lambda G_h} \frac{R_1(k/B)}{(T_k - k/B)^2} &= \sum_{k=1}^{\lambda G_h} \frac{a_1(k/B)}{(T_k - k/B)^2} \cos\Delta\phi_{j1} \\ &\quad + \sum_{k=1}^{\lambda G_h} \frac{b_1(k/B)}{(T_k - k/B)^2} \\ &\doteq C_1 \end{aligned} \tag{22}$$

식 20을 이용하여 다음과 같은 성질을 쉽게 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} E(C_i) &= \sum_{k=1}^{\lambda G_h} \frac{b_i(k/B)}{(T_k - k/B)^2}, \quad i = 0, 1 \\ Var(C_i) &= \frac{1}{2}\left\{\sum_{k=1}^{\lambda G_h} \frac{a_i(k/B)}{(T_k - k/B)^2}\right\}^2, \quad i = 0, 1 \end{aligned} \tag{23}$$

도약 주파수 f_0, f_1이 다르다고 가정하면 두 주파수 중 하나만 jamming 주파수와 같거나 둘 다 같지 않다. 이 상황을 식 24와 같은 새로운 랜덤 변수 C 로 나타낸다.

$$C = \delta_1\{\delta_0 C_0 + (1 - \delta_0) C_1\} \tag{24}$$

여기서 δ_0은 관찰하는 도약 구간 내에서 aT_h 전후를 나타내는 랜덤 변수이고, δ_1은 hit의 유무를 나타내는 랜덤 변수이다.

www.dbpia.co.kr

$$\delta_0 = \begin{cases} 0 & , \text{ 확률 } 1/2 \\ 1 & , \text{ 확률 } 1/2 \end{cases} \tag{25}$$

$$\delta_1 = \begin{cases} 0 & , \text{확률 } 1-2P_x \\ 1 & , \text{확률 } 2P_x \doteq 2P_h(1-P_h) \end{cases} \tag{26}$$

따라서 다음의 결과가 얻어진다.

$$\begin{aligned} E(C) &= P_x\{E(C_0)+E(C_1)\} \\ Var(C) &= P_x[\,var(C_0)+E^2(C_0)+var(C_1) \\ &\quad +E^2(C_1)+E(C_0)E(C_1)] \\ &\quad -P_x^2\{E(C_0)+E(C_1)\}^2 \end{aligned} \tag{27}$$

얻어진 결과 식 27을 이용하여 Y 의 평균과 분산은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mu_{Y|a} &= p(\lambda, G_h, S)+q(\lambda, G_h, N_0, W_{BP}) \\ &\quad +a(\lambda, G_h, S)a(a-1)+E(C) \\ \sigma_Y^2 &= (N_0B)^4\frac{\lambda}{G_h(1-\lambda)}+Var(C) \end{aligned} \tag{28}$$

Z 의 평균과 분산도 역시 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\begin{aligned} \mu_{Z|a} &= \left(a-\frac{1}{2}\right)^2+\frac{E(C)}{a(\lambda, G_h, S)} \\ \sigma_Z^2 &= \frac{1}{4}\left(\frac{ST_h}{N_0}\right)^{-4}G_h\left(\frac{1-\lambda}{\lambda}\right)+\frac{Var(C)}{a^2(\lambda, G_h, S)} \end{aligned} \tag{29}$$

유도된 식 29를 이용하여 추정값 $\hat{a}$ 의 평균과 분산을 구할 수 있다.

Ⅳ. 실험 결과

이번 장에는 분석 결과와 컴퓨터 실험결과를 비교한다. 그림은 $\psi=\left(\frac{ST_h}{N_0}\right)^2G_h^{-1/2}$ =22 dB 인 경우에 대해 SJR=5, 10dB로 변화시켜가며 실험한 결과이다. 그림 2는 jamming 상황에서 epoch 추정기의 추정값의 평균을 나타낸다. 실제 epoch 값이 가로축의 a일 경우 추정기는 세로축의 값을 나타낸다. 이 경우 분석 결과와 실험 결과가 거의 같게 일치함을 볼 수 있다. 그림에서 쉽게 볼 수 있듯이 Jamming이 없는 경우에 비해 추정기는 실제 값보다 작은 값을 나타냄을 알 수 있다. SJR이 5dB에서 10dB로 커짐에 따라서 성능은 jamming이 없는 경우에 근접함을 볼 수 있다. 그림 3 은 추정기의 분산을 나타낸다. 분산의 경우 a가 0.5에 근접할수록 많은 차이는 보이지 않았다.

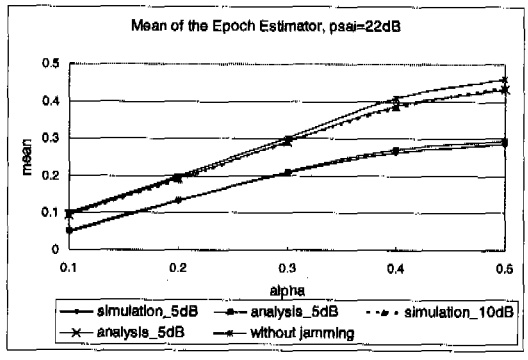


그림 2. Epoch 추정기의 평균

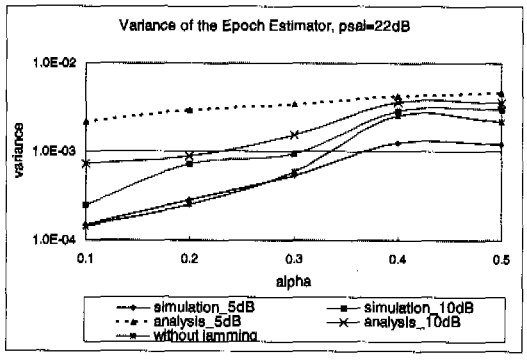


그림 3. Epoch 추정기의 분산

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 실시간 자기 상관 관계를 이용하는 epoch 추정기의 성능을 tone jamming 환경에서 분석해 보았다. 초래되는 성능 열화는 랜덤 변수를 이용하여 나타내었고, 수식과 실험으로서 분석을 하였다. Tone jamming은 부가적인 항을 생성시킴으로써 epoch 추정기는 실제 값보다 작은 값을 나타내는 결과를 초래하였다.

참 고 문 헌

[1] A. Polydoros, K. T. Woo, "LPI Detection of Frequency-Hopping Signals Using Autocorrelation Techniques," IEEE Journal on Selected Area in Comm., vol. SAC-3, No. 5, pp. 714-726, Sep. 1985

[2] C. D. Chung, A. Polydoros, "Epoch Synchronization of Random FH Signals in Broadband Noise," IEEE MILCOM '90, vol 2,

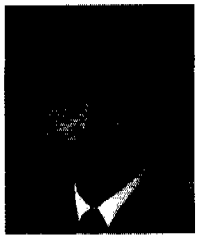
www.dbpia.co.kr

pp. 801-805, 1990
[3] John G. Proakis, Digital Communications, McGraw-Hill
[4] A. L. Garcia, Probability and Random Processes for Electrical Engineering, Addison Wesley Prentice Hall, Inc, New York, 1994

문 장 욱(Jang-Wook Moon) 정회원

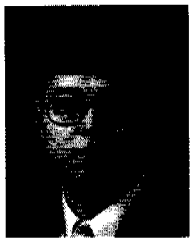
1998년 2월 : 광운대학교 컴퓨터공학과 학사
2001년 2월 : 연세대학교 전기·전자공학과 석사
<주관심 분야> Spread Spectrum Communication, Error Correcting Codes

은 유 창(Yu-Chang Eun) 정회원



1998년 2월 : 연세대학교 전자공학과 학사
2000년 2월 : 연세대학교 전기·전자공학과 석사
2000년 3월~현재 : 연세대학교 전기·전자공학과 박사과정
<주관심 분야> PN Sequences, Error Correcting Codes, CDMA Systems.

송 홍 엽(Hong-Yeop Song) 정회원



1984년 2월 : 연세대학교 전자공학과 학사
1986년 5월 : USC 전자공학과 석사
1991년 12월 : USC 전자공학과 박사
1992년~1993년 : Post Doc, USC 전자공학과
1994년~1995년 : Qualcomm Inc., 선임연구원
1995년 9월~현재 : 연세대학교 전기·컴퓨터공학과 교수
<주관심 분야> Error Correcting Codes, PN Sequences, CDMA, Spread Spectrum Communication

이 광 억(Kwang-Eog Lee) 정회원
1988년 2월 : 경북대학교 전자공학과 학사
1990년 2월 : 경북대학교 전자공학과 석사
1990년 3월~현재 : 국방과학연구소 4체계개발본부 1부 능동중계기 기술개발
<주관심 분야> 위성통신, 능동신호처리

최 영 균(Young-Kyun Choi) 정회원
한국통신학회논문지 제25권 제8B호 참조
현재 : 국방과학연구소 책임연구원

www.dbpia.co.kr