단일 반송파 MIMO 시스템 기반의 PN 시퀀스를 이용한 반송파 주파수 오차 추정 기법

*오종규 **김준태
건국대학교
*riza@konkuk.ac.kr

Carrier Frequency Offset Estimation Method for Single-Carrier MIMO Systems

*Oh, Jong-Gyu **Kim, Joon-Tae
Konkuk University

요약

본 논문에서는 단일 반송파 MIMO 시스템 기반의 PN 시퀀스를 이용한 반송파 주파수 오차 추정 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 송신되는 각각의 PN 시퀀스들의 위상을 회전시켜 전송하여, 일부 PN 시퀀스들이 서로 상쇄되어 버리는 것을 방지한다. 수신한 PN 시퀀스와 수신기에서 자체 생성한 PN 시퀀스의 공액곱셈 연산을 통해 변조를 제거한 뒤, 다수의 자기 상관기를 이용한 ML 알고리듬 계열의 L&R [3]을 이용하여 반송파 주파수 오차를 추정한다. 컴퓨터 모의실험을 통해, 송신 및 수신 안테나가 두 개인 2x2 MIMO 시스템에 제안하는 기법을 적용하고 L&R 알고리듬을 이용하여 AWGN (Additive White Gaussian Noise) 채널에서의 분산 성능을 측정하였다. 그 결과 MIMO 시스템에서의 분산 성능이 SISO 시스템에서의 성능과 거의 동일함을 보였다.

1. 서론

최근 단일 반송파 기반의 주파수 축 등화 (Single Carrier Frequency Domain Equalization,SC-FDE) 기법을 채용한 SISO (Single-Input Single Output) 시스템에 대해 많은 연구들이 진행되었다 [1]-[2]. 이러한 시스템의 경우, 프레임 단위로 데이터를 전송하며, 다중경로 채널에 대한 보호구간으로 CP (Cyclic Prefix), ZP (Zero Padding), 또는 PN (Pseudo Noise) 시퀀스 등을 채용한다. 이 중 PN 시퀀스를 보호구간으로 이용할 경우, 보호 구간으로 이용할 수 있을 뿐만 아니라 채널 추정에도 이용할 수 있어 주파수 효율을 높일 수 있는 장점이 있다.

BPSK로 변조되어 전송되는 PN 시퀀스는 약속된 심벌이기 때문에 수신기를 위한 반송파 동기에 이용될 수 있다. 단일 반송파 SISO 시스템 기반의 약속된 심벌을 이용한 ML (Maximum Likelihood) 방식의 주파수 오차 추정 알고리듬들 [3]-[4]이 잘 알려져 있으며, 연속한 PN 시퀀스의 위상 차이를 다수의 자기상관기를 이용하여 정확하게 반송파 주파수 오차를 추정한다.

논문 [5]에서는 단일 반송파 MIMO (Multi-Input Multi-Output) 시스템을 위해서 보호구간으로 PN 시퀀스를 채용하고, 이를 이용한 MIMO 채널 추정 기법을 제안하였다. 이러한 단일 반송파 MIMO 시스템을 위한 채널 추정 기법은, 필수적으로 견고하고 정확한 심벌 및 반송파 동기를 전제로 하고 수행된다. 이 때문에 심벌 및 반송파 동기부에서의 성능 열화는 채널 추정부의 성능 열화를 야기하고, 나아가서는 전체적인 수신 성능의 열화를 가져온다. 심벌 타이밍 복구의 경우, 기존의 단일 반송파 SISO 시스템에서 널리 사용되는 Spectral Line Extraction 기법 [6]을 단일 반송파 MIMO 시스템에 적용하여도 큰 무리가 없는 반면, 반송파 주파수 동기 복구 기법에 대해서는 많은 연구가 수행 되지 않은 실정이다.

논문 [5]의 단일 반송파 MIMO 시스템에서는 각각의 채널 추정을 위해 서로 상관성이 없는 PN 시퀀스를 각각의 송신 안테나를 통해 전송하며, 각각의 수신 안테나를 통해 합쳐져서 수신된다. 하지만 송신되는 서로 다른 두 개의 PN 시퀀스의 위상 차이가 π일 경우, 서로 다른 두 개의 PN 시퀀스가 상쇄되어 수신 PN 시퀀스는 아주 작은 벡터 값을 가지게 되므로 반송파 주파수 오차 추정에 이용하기가 어렵다.

이에 본 논문에서는 단일 반송파 MIMO 시스템 기반의 PN 시퀀스를 이용한 반송파 주파수 오차 추정 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 송신되는 각각의 PN 시퀀스들의 위상을 회전시켜 전송하여, 일부 PN 시퀀스들이 서로 상쇄되어 버리는 것을 방지한다. 수신한 PN 시퀀스와 수신기에서 자체 생성한 PN 시퀀스의 공액곱셈 연산을 통해 변조를 제거한 뒤, 다수의 자기 상관기를 이용한 ML 알고리듬 계열의 L&R [3]을 이용하여 반송파 주파수 오차를 추정한다. 컴퓨터 모의실험을 통해, 송신 및 수신 안테나가 두 개인 2x2 MIMO 시스템에 제안하는 기법을 적용하고 L&R 알고리듬을 이용하여 AWGN (Additive White Gaussian Noise) 채널에서의 분산 성능을 측정하였다. 그 결과 MIMO 시스템에서의 분산 성능이 SISO 시스템에서의 성능과 거의 동일함을 보였다.

2. 단일 반송파 MIMO 시스템 기반의 PN 시퀀스를 이용한 주파수 오차 추정 기법

가. 시스템 모델

송신 안테나가 2개, 그리고 수신 안테나가 2개인 MIMO 시스템을 고려하였으며, 보호구간으로 PN 시퀀스를 이용하였다. 서로 다른 종류의 PN 시퀀스들을 각각의 송신 안테나를 통해 전송할 때, 이상적인 심벌 타이밍 및 프레임 동기를 가정하고 AWGN 채널에서 첫 번째 수신 안테나를 통해 수신한 i 번째 PN 시퀀스 $y_{PN,1}(i)$는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} y_{PN,1}(i) &= \sum_{i=0}^{N_p-1}[PN_1(i)+PN_2(i)]e^{j[2\pi f_c i T_s+\theta]}+n_1(i) \\ &= \sum_{i=0}^{N_p-1} PN_{Tx}(i)e^{j[2\pi f_c i T_s+\theta]}+n_1(i) \end{aligned} \quad (1)$$

이 때, $PN_1(i)$은 첫 번째 송신 안테나를 통해 수신된 PN 시퀀스를, $PN_2(i)$는 두 번째 송신 안테나를 통해 수신된 PN 시퀀스를, f_c는 반송파 주파수 오차를, T_s는 샘플링 시간을, θ는 알 수 없는 불규칙적인 위상을, $n_1(i)$는 첫 번째 수신 안테나에서의 백색잡음, N_p는 PN 시퀀스의 길이, $PN_{Tx}(i)$는 송신된 각각의 PN 시퀀스들이 합쳐져 이루는 복소 벡터 값을 나타낸다.

송신되는 각각의 PN 시퀀스는 동 위상에서 최대의 교차 상관(Cross-Correlation) 값을, 그리고 다른 위상에서는 -1의 교차 상관 값을 가지는 M-Sequence [7]이며, BPSK로 변조되어 전송된다. 또한 MIMO 채널 추정을 위하여 송신 안테나 별로 각기 다른 종류 (서로간의 교차 상관 값이 -1을 가지는) PN 시퀀스를 이용하여 전송한다.

나. 동위상을 가지는 전송 PN 시퀀스들간의 상쇄로 인한 문제점

각각의 PN 시퀀스들을 동일한 위상으로 전송할 때, 이상적인 채널 환경에서 수신되는 $PN_{Tx}(i)$는 식(2)와 같다.

$$PN_{Tx}(i)=\begin{cases} 2+0j, & PN_1=PN_2= \quad 1+0j, \\ -2+0j, & PN_1=PN_2=-1+0j \\ 0+0j, & PN_1=\pm 1+0j,\ PN_2=\mp 1+0j \\ & |\angle PN_1-\angle PN_2|=\pi \end{cases} \quad (2)$$

이 때, $\angle PN$은 PN 시퀀스의 위상을 나타낸다.

이 중 $PN_1(i)$과 $PN_2(i)$의 위상 차이가 π인 경우, $PN_{Tx}(i)$는 '0'에 해당하는 값을 가지게 되거나, 식(1)과 같이 주파수 오차로 인한 위상의 변화를 고려하더라도 파워가 작은 벡터 값을 가지게 된다. 이 때문에, $PN_{Tx}(i)$를 이용하여 정확한 반송파 주파수 오차를 추정하기가 어렵다. 이 때문에 $PN_{Tx}(i)$가 $\pm 2+0j$의 값을 가지고 연속적일 때에만 인접한 $PN_{Tx}(i)$의 위상차를 통해 주파수 오차를 추정할 수 있다. 먼저 수신한 $y_{PN,1}(i)$와 수신기에서 자체 생성한 $PN_{Tx}(i)$의 공액곱셈 연산을 통해 변조를 제거해야 하며, 다음과 같이 쓸 수 있다

.

$$\begin{aligned} z(i) &= y_{PN,1}(i) \bullet PN_{Tx}^*(i) \\ &= \sum_{i=0}^{N_p-1}\left(PN_{Tx}(i)e^{j[2\pi f_c i T_s+\theta]}+n_1(i)\right)PN_{Tx}^*(i) \\ &= \sum_{i=0}^{N_p-1} PN_{Tx}(i)PN_{Tx}^*(i)e^{j[2\pi f_c i T_s+\theta]}+n_1(i)PN_{Tx}^*(i) \\ &= \sum_{i=0}^{N_p-1} \alpha e^{j[2\pi f_c i T_s+\theta]}+N_1(i) \end{aligned} \quad (3)$$

이 때, PN^*은 PN 시퀀스의 공액 복소수를 뜻하며, α는 일정한 상수를 뜻한다.

이 후, $PN_{Tx}(i)$가 $\pm 2+0j$의 값을 가지고 연속적일 때에만 연속한 $z_{PN,1}(k)$와 $z_{PN,1}(k-1)$간의 위상차를 통해 반송파 주파수 오차를 추정하며 잡음항인 $N_1(i)$을 무시할 경우, 반송파 주파수 오차 추정 식을 식(4)-식(5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\beta(k)=\begin{cases} \arg[z(k)z^*(k-1)]=2\pi f_c T_s+\theta(k)-\theta(k-1) \\ \qquad ,PN_{Tx}(k)=PN_{Tx}(k-1)=\pm 2+0j \\ 0 \qquad ,PN_{Tx}(k)=PN_{Tx}(k-1)\neq \pm 2+0j \end{cases} \quad (4)$$

$$\hat{f}_c=\frac{1}{2\pi T_s}\frac{1}{L_p}\sum_{k=1}^{N_p-1}\beta(k) \quad (5)$$

이 때, $\arg[x]$는 x의 위상을 뜻하며, L_p는 식(4)-식(5)에서 함수 $\beta(k)$가 계산된 횟수를 뜻하는 계수 인자(Scaling Factor)이며, 그리고 $\hat{f}_c$는 추정된 정규화 반송파 주파수 오차를 뜻한다.

다. 위상차를 이용한 PN 시퀀스 전송 기법 및 L&R 알고리듬을 이용한 반송파 주파수 오차 추정 방법

앞서 얘기한 것처럼, 동일한 위상으로 PN 시퀀스들을 전송할 때의 문제점을 해결하기 위해서, 본 절에서는 각각의 PN 시퀀스들의 위상을 회전시켜 전송하는 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 다음과 같다. 송신 & 수신 안테나가 각각 2개인 2x2 MIMO 시스템의 경우, $PN_1(i)$와 $PN_2(i)$가 서로 직각 위상($\pi/2$)을 가지도록 $PN_2(i)$의 위상을 돌려서 전송한다. 이 때, 이상적인 채널 환경에서 수신되는 $PN_{Tx}(i)$는 식(6)과 같다.

$$PN_{Tx}(i)=\begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}+\frac{1}{\sqrt{2}}j \\ \qquad ,PN_1= \quad 1+0j, PN_2= 0+1j \\ -\frac{1}{\sqrt{2}}+\frac{1}{\sqrt{2}}j \\ \qquad ,PN_1=-1+0j, PN_2= 0+1j \\ \frac{1}{\sqrt{2}}-\frac{1}{\sqrt{2}}j \\ \qquad ,PN_1= \quad 1+0j, PN_2= 0-1j \\ -\frac{1}{\sqrt{2}}-\frac{1}{\sqrt{2}}j \\ \qquad ,PN_1=-1+0j, PN_2= 0-1j \end{cases} \quad (6)$$

식(6)에서 보듯이 제안한 기법과 같이 PN 시컨스를 회전시켜 전송할 경우, 모든 경우에 대해 $PN_{Tx}(i)$를 이용하여 주파수 오차를 추정할 수 있다. 연속된 모든 $PN_{Tx}(i)$를 이용할 수 있으므로, 기존에 알려진 ML 방식의 주파수 추정 알고리듬을 이용하여 반송파 주파수 오차를 추정할 수 있다. 이 중 L&R 알고리듬 [3]을 이용하여 주파수 추정을 하기 위해선, 식(3)과 같이 수신한 $y_{PN,1}(i)$와 수신기에서 자체 생성한 $PN_{Tx}(i)$의 공액곱셈 연산을 통해 변조를 제거해야 한다. 이후 $z(i)$의 자기상관함수 $R(m)$을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R(m) = \frac{1}{N_p - k} \sum_{k=1}^{N_p - 1} z(k) z^*(k-m) \tag{7}$$

이 때, m은 자기상관에 이용되는 PN 시퀀스의 지연 값을 뜻한다.

L&R 알고리듬은 다수의 자기상관기 $R(k)$를 이용하여 식(3)에서의 잡음항인 $N_1(i)$의 영향을 줄여 정확하게 반송파 주파수 오차를 추정하며, 주파수 오차는 식(8)과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{f}_c = \frac{1}{\pi (V+1) T_s} arg\left\{ \sum_{k=1}^{V} R(k) \right\} \tag{8}$$

이 때, V는 자기상관기의 개수를 뜻한다.

그림 1은 제안된 전송 기법을 2x2 MIMO 시스템에 적용하였을 때의 추정 주파수 오차의 분산 성능을 나타낸 그림이다. L&R 알고리듬을 이용하였으며, PN 시퀀스는 200개, 그리고 자기상관기 V는 최대 8개까지 이용하여 심벌 속도 대비 1%의 주파수 오차를 추정하였다 [3]. 그림 1을 통해 SISO 시스템과 MIMO 시스템에의 AWGN 채널에서의 분산 성능이 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

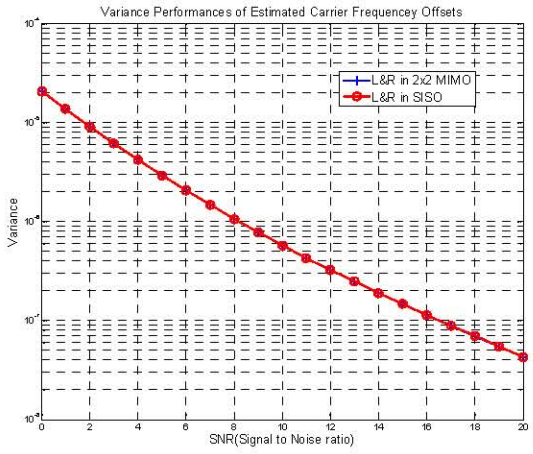

그림 1. 제안된 기법을 적용한 2x2 MIMO 시스템과 기존 SISO 시스템에서의 추정 주파수 오차 분산 성능

3. 결론

본 논문에서는 단일 반송파 MIMO 시스템 기반의 PN 시퀀스를 이용한 반송파 주파수 오차 추정 알고리듬을 제안하였다. 제안된 직각 위상을 가지는 PN 전송 기법 및 수신 PN 위상 보정 기법을 적용하였을 때, AWGN 채널상에서 SISO 시스템과 거의 동일한 수준의 분산 성능을 보임을 확인하였다. 이후로 PN 시퀀스 뿐만 아니라 MIMO 시스템에서 많이 연구가 되고 있는 Chu 시퀀스를 이용한 반송파 주파수 오차 추정 방법에 대한 연구 또한 진행되어야 할 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 방송통신위원회의 방송통신미디어원천기술개발사업의 연구결과로 수행되었음"(KCA-2012-10912-02002))

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 "대학IT연구센터 육성지원사업"의 연구결과로 수행되었음 [NIPA-2012-H0301-12-1008]

참조 문헌

[1] N. Benvenuto, and S. Tomasin, "Iterative Design and Detection of a DFE in the Frequency Domain," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 11, pp. 1867-1875, Nov. 2005.

[2] D. Falconer, S. L. Ariyavisitakul, A. Benyamin-Seeyar, and B. Eidson, "Frequency domain equalization for single-carrier broadband wireless systems," *IEEE Commun. Mag.*, no. 4, pp. 58 - 66, Apr. 2002.

[3] M. Luise and R. Reggiannini, "Carrier frequency recovery in all-digital modems for burst-mode transmissions, " *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, no. 2/3/4, pp. 1169-1178, Feb./Mar./Apr. 1995.

[4] M. P. Fitz, "Planar filtered techniques for burst mode carrier synchronization," in Proc. *IEEE Globecom'* 91, Phoenix, AZ, Dec. 1991.

[5] S. Ren, J. Guo, and H. Xiang, "A PN-based channel estimation algorithm in MIMO-single carrier frequency-domain equalization system," in Proc. *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing'* 2007, Beijing , China, Sept. 2007.

[6] F.M. Gardner, "A BPSK/QPSK timing error detector for sampled receiver," *IEEE Trans. On Comm.*, COM-34, pp. 423-429, May, 1986.

[7] Dilip V. Sarwate and Michael B. Pursley, "Corsscorrelation properties of pseudorandom and related sequences", Proceedings of the IEEE, Vol. 68, No. 5, pp. 593~619, May 1980.