

# 임펄스 잡음환경에서 자동주파수 제어 칼만 필터에 관한 연구

강희조\*

A Study on the Kalman Filter Automatic Frequency Control  
in Impulsive Noise Environments

Heau-Jo Kang\*

요 약

본 논문에서는 임펄스 잡음이 존재할 때 주파수 지연을 추정하기 위해서 칼만 필터 자동 주파수 제어에 관해서 나타내고, 몇 가지 잘 알려진 자동 주파수 제어와 비교하였다. 칼만 필터 자동 주파수 제어는 백색 가우스 잡음에 대하여 안정된 주파수 획득 성능을 유지하면서, 임펄스 잡음에 잠재적으로 강한 특성을 보인다. 또한 제안된 기법은 고려한 모든 자동 주파수 제어 중에서 가장 빠른 초기 주파수 획득 성능을 달성할 수 있다. 그 결과 자동 주파수 제어를 학습하기 위한 프리앰블 길이를 줄일 수 있으므로 높은 송신 전력효율을 얻을 수 있다.

ABSTRACT

In this paper in order to estimate a frequency offset in the presence of the impulse noise, the kalman filter automatic frequency control has been presented and compare with some well-known automatic frequency control. The kalman filter automatic frequency control has shown its potential robustness against the impulsive noise, keeping a stable frequency acquisition performance among all the automatic frequency control considered, resulting in the reduction of the preamble length for training the automatic frequency control and the higher efficiency in transmission power.

키워드

임펄스 잡음, 칼만필터, 자동주파수제어

## 1. 서론

기본 칼만 필터 자동 주파수 제어는 가우스잡음 환경에서 주파수지연에 대하여 많이 설명되었다. 하지

만 많은 실제 시스템에서 잘못된 잡음의 확률 밀도함수는 임펄스잡음과 비슷한 가우스 잡음과는 다르다. 임펄스 잡음은 시스템에서 수신시 동기 성능뿐만 아니라 시스템 성능도 저하시킨다. 종래의 칼만 필터 알고

\* 동신대학교 전기전자공학부

접수일자: 2001. 12. 10

리듬은 예를 들어 LQG[1]는 선형 2차 가우스로 설명되는, LQG 기준을 기반으로 설명되기 때문에 낮은 잡음이 가우스 분포가 아닐 경우 칼만 필터는 최적이지 않다. 이 경우 임펄스 잡음에 보다 강한 자동 주파수 제어를 생성하는 기술이 필요하다.

여러 연구자들이 Masreliz 필터와 같은 강력한 추정 알고리즘으로 표현하려고 했다. 이 Masreliz 필터는 [2]에서의 비 선형함수, [3]에서의 최우도 필터와 [4]에서의 LMS 알고리즘에 의해 칼만 필터 알고리즘을 수정한 것이다. 첫 번째 두 개의 필터는 많은 계산량 때문에 실용적이지 못하고, 마지막 것은 비록 단순할 지라도 [5]에서 얻은 기존의 칼만 필터보다도 10배 수렴을 한다.

본 논문에서는 임펄스 잡음 환경에 강력한 자동 주파수 제어 칼만 필터를 설명한다. 자동 주파수 제어 칼만 필터는 Masreliz 보다 단순한 소프트리미터 함수에 의해 기존 칼만 필터를 수정한 것이다[6]. 자동 주파수 제어 칼만 필터의 성능은 잘 알려진 임펄스 잡음의 Middleton의 A급 모델을 적용하여 구하였다[7].

## II. 임펄스 잡음 채널

임펄스 잡음의 통계적 모델 중에서 Middleton의 A급 임펄스 잡음은 무선 통신 시스템의 성능 평가에 있어서 취급하기 쉽고, 거의 모든 종류의 실제 임펄스 잡음을 표현하는데 사용되는 정량화된 방법이다.

일반적으로 협대역 잡음  $n(t)$ 를 동상 성분과 직교 성분으로 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$n(t) = x(t) \cos w_c t - y(t) \sin w_c t \quad (1)$$

여기서  $w_c$ 는 협대역 잡음의 중심 각 주파수이다. 잡음  $n(t)$ 를 A급 임펄스 잡음으로 가정할 때 이에 대한 결합확률밀도함수(p.d.f.)는 다음과 같다[7].

$$p(x, y) = e^{-A} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{A^m}{m! 2\pi W \sigma_m^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2W \sigma_m^2}\right) \quad (2)$$

이때, Jacobian 정리를 사용하여 각각 직교성분과 동상 성분으로 나타내면 다음과 같다.

$$p(x) = e^{-A} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{A^m}{m! \sqrt{2\pi W \sigma_m^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2W \sigma_m^2}\right),$$

$$p(y) = e^{-A} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{A^m}{m! \sqrt{2\pi W \sigma_m^2}} \exp\left(-\frac{y^2}{2W \sigma_m^2}\right) \quad (3)$$

여기서,  $\sigma_m^2 = \frac{m/A + \Gamma'}{1 + \Gamma'}$ ,  $\Gamma' = \sigma_G^2 / \sigma_I^2$ 는 가우스 잡음 전력 대 임펄스 잡음 전력비,  $A$ 는 임펄스 지수(단위 시간당 임펄스 성분이 차지하는 비율),  $W = \sigma_G^2 + \sigma_I^2$ 는 전체 잡음 전력을 나타낸다.

식 (3)에서 정의한 임펄스성 잡음에 대하여 정규화된 확률밀도함수와 시간 축에서의 파형을 그림 1, 그림 2에서 각각 나타내었다. 임펄스성이 약한 환경은 진폭이 큰 성분에 대한 확률 값이 서서히 감소하지만, 임펄스성이 강한 환경에서는 0에 근접한 진폭 성분이 주를 이루며 진폭이 큰 성분에 대한 확률 값은 일정하게 나타난다. 그림 1과 그림 2에서  $A$ 가 0.01,  $\Gamma'$ 가 0.001인 환경은 임펄스성이 강한 환경을 나타내고,  $A$ 가 1이고,  $\Gamma'$ 가 10인 환경은 가우스 잡음 환경에 근접하는 환경이다[7].

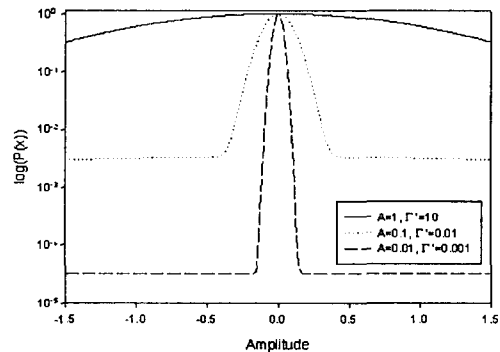


그림 1. 정규화된 임펄스성 잡음의 확률밀도함수  
Figure 1. The probability density function of normalized impulsive electromagnetic noise

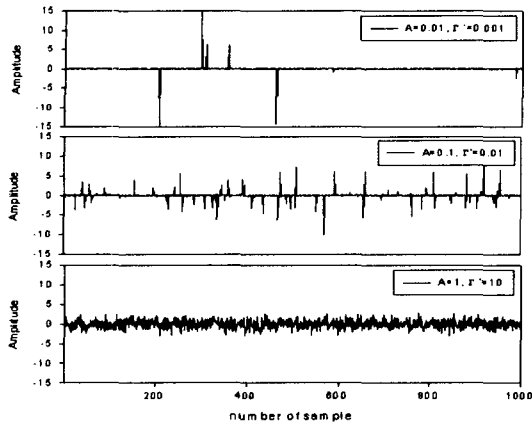


그림 2. 임펄스성 잡음의 시간 파형  
Figure 2. Waveform of impulsive electromagnetic noise

### III. 자동 주파수 제어 칼만 필터

이 절에서 자동 주파수 제어 칼만 필터는 임펄스잡음환경에서 주파수지연을 추정하기 위해 도입되었다. 자동 주파수 제어 칼만 필터의 알고리즘은 다음에 나타낸다.

관측 추가 데이터 알고리즘

$$K_t = P_{t|t-1} C^T [C P_{t|t-1} C^T + R]^{-1}, \quad (4)$$

$$P_{t|t-1} = E(P_{t|t-1} - K_t C P_{t|t-1}), \quad (5)$$

$$x_{t|t-1} = x_{t|t-1} + K_t \xi(y_t - C x_{t|t-1}). \quad (6)$$

시간 추가 데이터 알고리즘

$$x_{t|t-1} = A x_{t|t-1}, \quad (7)$$

$$P_{t|t-1} = A P_{t|t-1} A^T + B Q B^T. \quad (8)$$

초기조건

$$x_{0|1} = \text{zero column vector}, P_{0|1} = 10^2 \times I$$

여기에서

$$\xi \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi(a_1) \\ \xi(a_2) \\ \dots \\ \xi(a_n) \end{pmatrix}. \quad (9)$$

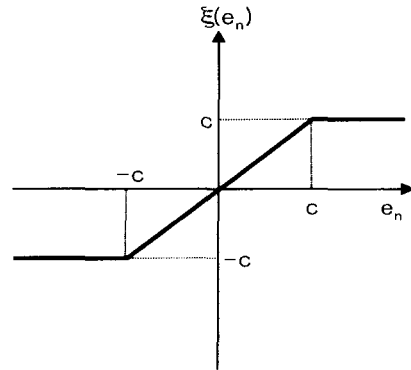


그림 3. 자동 주파수 제어 칼만 필터에 의한 비선형 함수의 개선

Figure 3. Nonlinear function of Innovation in automatic frequency control kalman filter

앞장에서 기존의 칼만 필터의 알고리즘과 비교함으로써, 강력한 칼만 필터는 [8]과 같이 아래의 함수를 사용하여 관측 변수  $y_t - C x_{t|t-1}$ 의 추정 오류를 비 선형화 함으로써 본래의 칼만 필터를 수정한다.

$$\xi(e_n) = \begin{cases} e_n & |e_n| < c \\ c \times e_n / |e_n| & |e_n| \geq c \end{cases}, \quad (10)$$

여기에서  $c$ 는 기준 레벨이고  $e_n$ 은 고유 벡터  $y_t - C x_{t|t-1}$ 의  $n$ 번째 열 성분이다. 위 함수에 의해 칼만 필터를 수정은 잡음 분포가 아래의 공식을 만족할 때 추정되는 최대의 오차를 최소로 하는 기준에 의해 원하는 파라미터를 추정할 수 있다.

$$P_n = (1 - \xi) P_G + \xi \times P_{IMP}. \quad (11)$$

여기에서  $P_G$ ,  $P_{IMP}$ 와  $\xi$ 는 가우스잡음의 확률밀도 함수, 랜덤한 임펄스잡음의 확률밀도 함수와 임펄스잡음의 발생확률을 의미한다. 식(11)는 단지 대부분의 응용에서 나타나는 가우스 분포의 배경 잡음만으로 제한하기 때문에 이 함수는 통신 시스템에서의 넓게 적용될 수 있다. 그리고 임펄스잡음은 임의의 형태로 분포될 수 있다. 하나의 실제적인 예로써 비대칭 디지털 가입자망에서의 임펄스잡음은 다음의 식으로 나타낸다.

$$P_{IMP}(u) = \frac{1}{240 u_0} \exp\left(-\left|\frac{u}{u_0}\right|^{0.2}\right); u_0 > 0. \quad (12)$$

또한 강력한 칼만 필터는 식(5)에서  $P_{t|t-1}$ 의 관측 추가데이터로 조절한다.

$$P_t | t = E(P_{t|t-1} - K_t C P_{t|t-1}) \\ = \{P_{t|t-1} - K_t C P_{t|t-1}\} | e_n | < c \quad (13)$$

#### IV. 시스템 구성

그림 4는 자동 주파수 제어 칼만 필터의 수신기 블록도이다. 수신신호는 대역폭이  $W$ 인 대역통과필터를 거쳐 명목상 중심 주파수  $f_c$ 에 의해 낮은 주파수 레벨로 변환된다(하향 컨버터). 다음으로 이 신호는 두 방향으로 나누어지고, 하나는 표본화 주파수  $f_s$ 에 의해 A/D로 변환되고, 차동 검파 되고, 자동 주파수 제어 칼만 필터로 들어간다. 자동 주파수 제어 칼만 필터에 의해 추정된 주파수지연은 다른 방향으로 들어온 수신 신호로부터의 반송파 천이를 보상하기 위해 NCO의 주파수를 조정하는 데 사용된다.

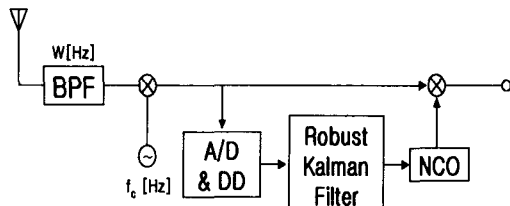


그림 4 자동 주파수 제어 칼만 필터의 수신기 블록도  
Figure 4 Block diagram of the receiver for automatic frequency control Kalman filter

#### V. 계산결과 및 검토

그림 5와 그림 6은 각각 신호 전력 대 잡음 전력 비 (SNR) 5dB와 10dB의 신호 대 잡음의 가우스 성분 전력에 있어 정규화 된 시간평균 실효 주파수 에러 대 자동 주파수 제어 칼만 필터 임계값의 기준을 보여준다. A와 G의 변화에 대한 성능을 나타낸다. 정규화 된

시간평균 실효 주파수 에러를 계산하여 표본간격에 대해 실효 에러를 평균하고 그것을 표본화 주파수에 의해 정규화 시키므로 얻어진다. 임계값 레벨은 전체 잡음 전력, 즉 가우스 성분의 전력과 그 외의 잡음성분의 전력을 더한 값으로 정규화 된다. 이 그림은 고려한 모든 상황에 대해 양호한 추정(즉, 작은 주파수 에러)을 달성하기 위한 임계레벨 값을 보여준다.

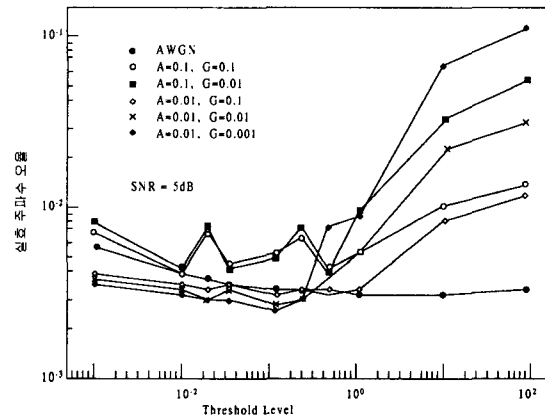


그림 5 Threshold 레벨 결정  
Figure 5 Threshold level decision

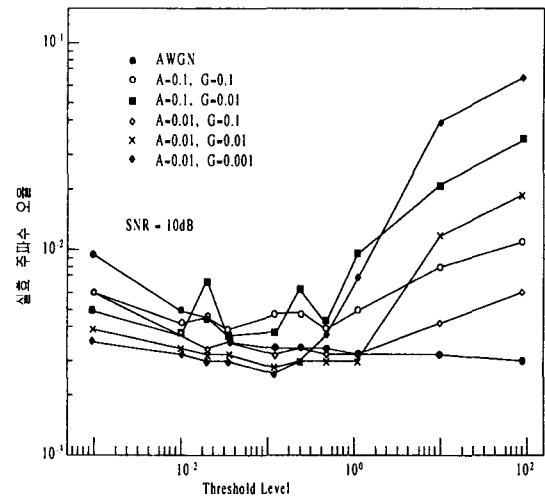


그림 6 Threshold 레벨 결정  
Figure 6 Threshold level decision

결정된 임계값 기준을 사용하여 SNR은 5dB, 10dB에 대한 주파수 획득능력이 그림 7과 그림 8에 각각에 나타낸다. 정규화 된 실효 주파수 에러는 표본치에 의

해 정규화 된 실패 주파수 에러를 의미한다. 임펄스 잡음 존재에서 자동 주파수 제어 칼만 필터를 사용한 경우  $G$ 와  $A$ 에 상관없이 AWGN에 대한 획득성과 동일한 성능을 달성함을 보여준다. 반면에, 기존의 칼만 필터는  $G$ 가 크거나  $A$ 가 작을 때 보다 심각한 감퇴를 보인다. 또한,  $A$ 가 0.01의 작은 값에 대한 자동 주파수 제어 칼만 필터의 성능은 임펄스 잡음이 많기 때문에 많은 과도현상을 나타냄을 확인하였다.

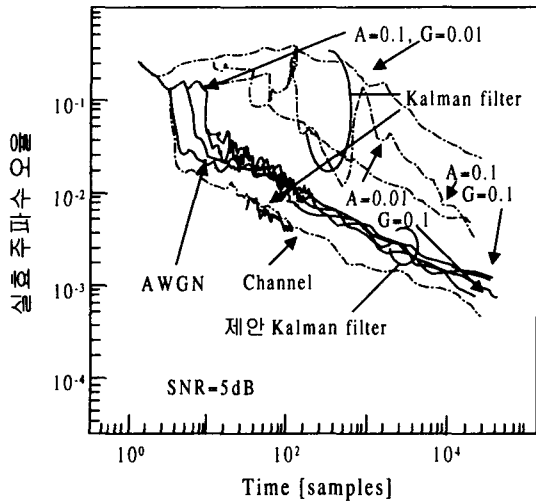


그림 7 주파수 획득 성능 비교  
Figure 7 Comparative frequency acquisition performance

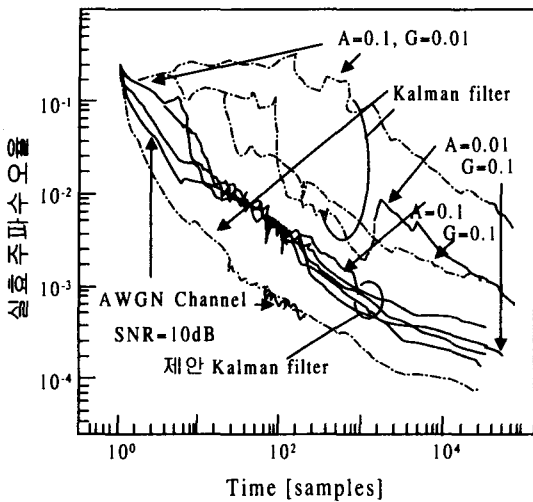


그림 8 주파수 획득 성능 비교  
Figure 8 Comparative frequency acquisition performance

그림 9와 그림 10은 임펄스 잡음환경에서 자동 주파수 제어 칼만 필터가 SNR=5dB에서는 적어도 200, SNR=10dB일 때는 적어도 1000개 샘플까지의 시간 간격에서 가장 빠른 초기 주파수 획득을 달성할 수 있음을 알 수 있었다. 자동 주파수 제어 칼만 필터는 학습시켜 미리 길이를 줄일 수 있고 전송전력 효율을 높일 수 있기 때문에 통신시스템에 적용시키기에 매우 적합하다.

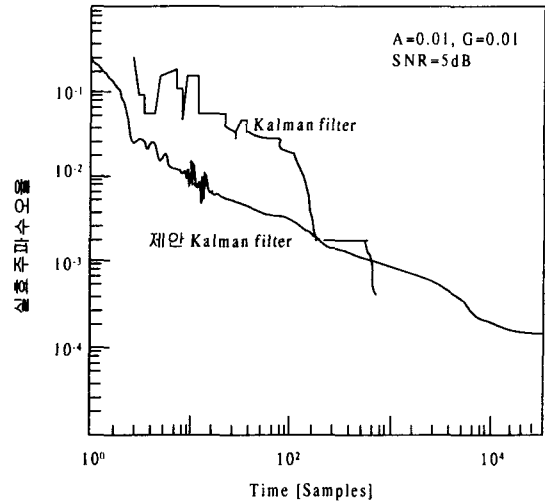


그림 9 주파수 획득 성능비교  
Figure 9 Comparative frequency acquisition performance

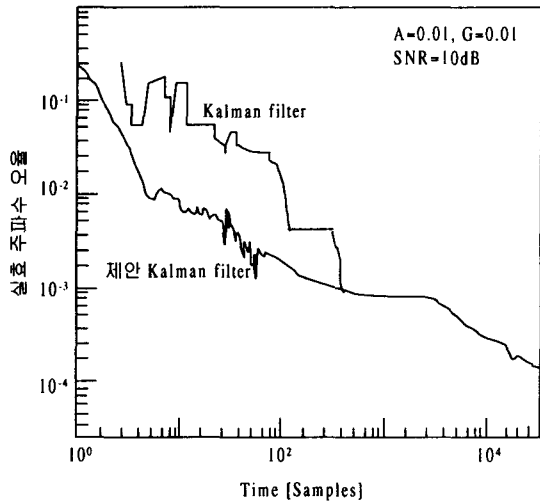


그림 10 다른 AFCs의 주파수 획득 성능비교  
Figure 10 Comparative frequency acquisition performance to other

## V. 결론

이 논문에서는 자동 주파수 제어 칼만 필터가 통신 시스템에서 주파수 지연과 임펄스 잡음의 문제를 중화시키는 데 사용될 수 있음을 보였다. 기준 레벨은 일반적으로 신호 전력 대 잡음 전력 값으로서 사용하였고, A 와 G를 결정하기 위해 연구하였다. 자동 주파수 제어 칼만 필터는 안정된 주파수 성능을 유지할 수 있고 임펄스 잡음 환경에서 높은 정밀도를 가진 매우 빠른 초기 주파수 수렴함을 확인하였다.

## 참고 문헌

- [1] T. Katayama, "Applied Kalman Filter," Asakura Book Store Co.Ltd., 9th edition, Jan. 1992.
- [2] C. J. Masreliez, "Approximate non-Gaussian filtering with linear state and observation relation," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-20, pp.107-110, Feb. 1975.
- [3] L. M. Garth and H. V. Poor, "Narrowband Interference Suppression in Impulsive Channels," IEEE Trans. on Aerospace and electronic Systems, Vol.28, No1, pp.15-34, Jan. 1992.
- [4] S. Haykin, "Adaptive Filter Theory," Prentice-Hall Int., Inc., Second Edition, 1991.
- [5] S. Denno and Y. Saito, "Adaptive Phase Control Using Recursive Least Squares (RLS) Phase Estimation," IEICE Trans. on Commun., Vol. J76-B -II, No.12, pp.927-935, Dec. 1993.
- [6] T. Nakamizo, "Introduction to Robust Statistics," ISCIE, System Control Information Tutorial, Guide Line to the Control Engineering - the Advent to University and the Real Application of Robust Control, pp.77-91.
- [7] D. Middleton, "Statistical-Physical Models of Electromagnetic Interference," IEEE Trans. on Electromagn. Compat., Vol. EMC-19, pp.106-126, Aug. 1977.
- [10] S. Miyamoto, M. Katayama and N. Morinaga,

"Performance Analysis of QAM System Under Class A Impulsive Noise Environment," IEEE Trans. on Electromagn. Compat., Vol. 37, No. 2, pp. 260-267, May. 1995.

- [11] T. Katayama, "Robust Estimation and Identification of Statistical Systems," ISCIE, System Control Information Tutorial, Guide Line to the Control Engineering - the Advent to University and Real Application of Robust Control, pp. 92-110. 1996.

## 저자 소개



강희조 (Heau-Jo Kang)

1994년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학박사)

1994년 7월 ~ 1995년 12월 : 전자통신연구원 위성망연구소 초빙연구원

1996년 8월 ~ 1997년 8월 : 일본 오사카대학교 공학부 통신공학과 객원교수

1998년 3월 ~ 1998년 8월 : 전자통신연구원 무선이동위성통신시스템 연구소 초빙연구원

1990년 3월 ~ 현재 : 동신대학교 전기전자공학부 교수

2000년 6월 ~ 현재 : 한국전자파학회 호남지부 지부장

2000년 7월 ~ 현재 : 지역산업정보화센터 센터장

2000년 9월 ~ 현재 : 디지털영상매체기술혁신센터(TIC) 부소장

※주관심분야 : 무선통신, 이동통신 및 위성통신, 멀티미디어통신 환경전자공학, 무선광통신, 밀리미터파, 전자발광(Electro Luminescence) 디스플레이