

무인기 운용환경을 고려한 보조링크 프레임 구조설계에 따른 성능분석

윤창배* · 김희준** · 홍수운**

Performance Analysis by Secondary link Frame structure in UAV System

Chang-Bae Yoon* · Hoi-Jun Kim** · Su-Woon Hong**

요약

본 논문에서는 다중경로 페이딩의 무인기 채널환경에서 무인기 속도에 따른 도플러 영향을 극복하기 위해 LMMSE(Linear Minimum Mean Square Error) 알고리즘을 적용하였고, 파일럿 배치 및 패턴에 따른 영향성을 분석하였다. 모의 실험결과 파일럿 배치 및 패턴에 따라 성능 차이를 확인할 수 있었고, 본 논문에서 제시한 프레임 구조를 통해 실제 운용 환경에서도 고속의 무인기에 대해 안정적인 보조링크를 제공할 수 있음을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, we apply the LMMSE(Linear Minimum Mean Square Error) algorithm to overcome the Doppler effect according to the UAV(Unmanned Aerial Vehicle) velocity in multipath fading channel environment. Simulation results show that the performance difference depends on the pilot arrangement and pattern, and we confirmed that the frame structure proposed in this paper can provide a stable secondary link for high speed UAV system.

키워드

Secondary Link, UAV, Data-Link, Channel Estimation, Frame Structure, LMMSE, SC-FDE
보조 링크, 무인기, 데이터 링크, 채널 추정, 프레임 구조

1. 서론

최근 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)의 활용분야가 군수 및 민수분야에서 증가 추세이며, 향후 다양한 형태의 무인기가 개발될 예정이다. 무인항공기의 경우 주링크와 보조링크로 통신 채널이 구성되며, 보조링크의 경우 무인기의 생존성을 높이기 위한 채널로써 사용된다[1-3]. 무인기 운용에 있어서

가장 핵심적인 요소는 무인기의 제어 및 상태를 위한 보조링크의 설계 및 구현에 관련된 기술이라 할 수 있다. 현재 무인기의 보조링크에 대한 다양한 연구 결과가 발표되었지만 무인기 속도에 따른 보조링크의 성능에 대한 영향성은 거의 고려되지 않고 있다.

본 논문에서는 다중경로 페이딩의 무인기 통신채널 환경에서 무인기 속도에 따른 도플러 영향을 극복하기 위한 채널추정 및 보상 기능을 적용하고, 파일럿

* 교신저자 : 한화시스템

** 한화시스템

(hoijun.kim@hanwha.com, suwoon.hong@hanwha.com)

• 접수일 : 2017. 11. 10

• 수정완료일 : 2017. 11. 27

• 게재확정일 : 2017. 12. 15

• Received : Nov 10, 2017, Revised : Nov 27, 2017, Accepted : Dec 15, 2017

• Corresponding Author : Chang-Bae Yoon*

Hanwha Systems Co., Ltd.

Email : changbae.yoon@hanwha.com

배치에 따른 영향성을 분석하였다. 이를 위해 II장에서는 LMMSE(: Linear Minimum Mean Square Error) 알고리즘을 이용한 채널추정 및 보상방법에 대해 알아보고, 무인기 통신환경에서 도플러 주파수 변화에 적합한 프레임 구조를 제시한다. III장에서는 II장에서 제시한 프레임 구조를 적용하여 모의실험 진행 및 성능을 도출하며, IV장에서 결론을 맺는다.

II. 무인기 보조링크 통신환경을 고려한 프레임 구조

무인기 무선통신 시 발생하는 다중경로 페이딩 환경에 의한 신호 왜곡은 통신장비의 수신기 설계 시 채널 등화기를 적용시켜 극복할 수 있다. 채널 등화기의 채널추정 알고리즘은 시간영역에서 적용 가능한 LMS(: Least Mean Squares), RLS(: Recursive Least Squares) 방식 혹은 주파수영역에서 적용 가능한 LS(: Least Squares), LMMSE 등이 고려될 수 있다 [4-5]. 본 논문에서는 주파수 영역에서의 채널추정방식인 LMMSE 알고리즘에 대해 알아보고 무인기 속도도에 따른 프레임을 설계하여 그에 따른 성능을 도출한다. 무인기 이동속도에 따른 파일럿 배치와 전송효율간의 trade-off를 고려하여 적절한 프레임 구조를 설계한다.

2.1 LMMSE 알고리즘을 이용한 채널 추정

채널 추정 알고리즘은 파일럿 심볼을 이용하여 추정하며 추정된 채널 계수를 통해 데이터를 보상한다.

LMMSE 알고리즘은 주파수영역에서 연산되며 시간영역의 채널추정 방식보다 연산방식이 간단하다는 장점이 있으며 FFT(: Fast Fourier Transform) 기반의 방식으로 동작한다. 프레임 중 수신된 데이터의 뒷부분에 위치하고 있는 파일럿 슬롯과 이미 알고 있는 송신 파일럿 심볼을 이용해 주파수 영역에서 LS방식과 Zero padding 방식을 적용하여 채널을 추정한다. 추정된 LS에 대해 IFFT를 수행하여 시간영역의 채널추정필터 \hat{h}_n 를 도출한다. 이러한 과정은 수식(1)을 통해 표현할 수 있다.

$$\hat{h}_n = IFFT_Q \left\{ \frac{FFT_Q \{u'_n\}}{C_k} \right\}, 0 \leq n \leq Q \quad (1)$$

$$where \begin{cases} u'_n = u_n + N & , 0 \leq n \leq Q \\ C_k = FFT_Q \{u_n\} & , 0 \leq n \leq Q \end{cases}$$

u_n 은 이미 알고 있는 송신 파일럿, u'_n 은 수신된 파일럿, Q 는 송신 파일럿 심볼길이, C_k 는 송신 파일럿 FFT 연산결과, N 은 AWGN(: Additive White Gaussian Noise)을 포함한 노이즈 성분을 의미한다. \hat{h}_n 는 LS의 시간영역의 채널 추정 값을 의미한다. 다중 채널의 채널 지연 시간을 고려해 필터 탭 수를 결정하고 채널 지연시간 이외의 영역에는 Zero padding 과정을 수행하므로 채널 스무딩을 통한 노이즈 성분 제거효과를 얻을 수 있다.

Zero padding 과정을 수행하여 얻어진 \hat{h}_n' 는 k-point FFT를 거쳐 주파수영역의 채널추정필터 H 를 도출한다. H 는 파일럿 구간과 데이터 구간에 대해 보상이 주파수영역에서 이루어지므로 데이터에 대한 k-point FFT를 수행하며 필터계수 H 와 FFT(: received signal)와의 multiplier 연산을 통해 보상된다. 최종적으로 IFFT를 수행하면 보상된 데이터를 얻을 수 있다. 그림 1은 파일럿을 이용한 LMMSE 방식의 채널추정 알고리즘의 블록도를 나타낸다. 수신신호는 파일럿을 이용해 보상하고자하는 심볼 구간으로 CP(: Cyclic Prefix)와 데이터가 포함된 구간을 의미한다.



그림 1. LMMSE 기능 블록도
Fig. 1 LMMSE function block diagram

추정된 필터 계수는 파일럿 슬롯 이전에 전송된 데이터 슬롯에 동일하게 보상된다. 보상 시 MMSE 방식을 적용하여 다음 수식에 따라 채널보상을 수행한다.

$$\hat{H} = FFT(\hat{h}_n(zero)) \quad (2)$$

Zero padding 후 FFT 수행결과 얻어진 \hat{H} 에 대해 noise variance를 반영하면 최종 채널보상 계수를 구

할 수 있다.

$$H' = \left[\frac{(\hat{H})^*}{|\hat{H}|^2 + \sigma^2} \right] \quad (3)$$

where $\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (rx_i - tx_i)^2$

위 식에서 rx 는 수신한 파일럿 심볼, tx 는 송신한 파일럿 심볼을 의미한다.

2.2 무인기 통신 환경

무인기 통신 채널 모델에서 전송신호는 다중경로에 의해 영향을 받는다. 무인기통신 채널모델은 SUI(Stanford University Interim) 모델의 Rician 페이딩 채널모델을 가정한다[6]. Rician 페이딩 채널은 한 경로의 신호가 다른 채널의 신호파워보다 강한 경우 발생하며 송수신 장비 간 가시거리가 확보된 상황에서 통신이 이루어지는 경우 적용되는 페이딩 모델이다.

무인기 통신 채널환경은 LOS(Line Of Sight)가 확보된 환경에서 주위의 지형에 의해 발생하는 반사파를 포함하는 다중경로 페이딩 환경을 가정해 볼 수 있다. 따라서 채널모델은 LOS신호와 2개의 반사파 신호를 포함하도록 SUI-3 모델을 참조한다. 단 무인기의 최대 이동 속도를 고려하여 도플러 주파수를 반영한다. 표 1은 SUI-3 채널환경 파라미터를 나타낸다 [7-9].

표 1. 채널 파라미터
Table 1. Channel parameter

Channel model	Rician Fading
Maximum delay [us]	[0 0.4 0.9]
Number of echo paths N	3
Rice Factor K [dB]	7
Power loss	[0 -5 -10]
Speed of vehicle[km/h]	250

2.3 프레임 설계

무인기 통신의 다중경로 페이딩 환경을 위한 프레임 구조는 SC-FDE(Single Carrier-Frequency Domain Equalization) 방식을 적용하여 설계한다. SC-FDE 방식의 프레임 구조는 OFDM과 유사한 구

조로 CP를 포함하며 SC-FDE는 특히 저속 데이터 전송에서 OFDM과 비슷한 성능, 효율성, 복잡도를 유지하면서 비선형성 전력 증폭기에 덜 민감하다는 장점을 가진다[10-11]. SC-FDE 시스템에서는 N 길이만큼 변조된 신호에 CP를 붙여서 전송한 후 수신기에서 CP를 제거하여 다시 N 길이의 블록을 복조에 사용하며 이때의 데이터 전송은 다음과 같다[12].

$$r = h \times x + w \quad (4)$$

위 식에서 r, x, h, w 는 각각 길이 N의 수신벡터, 송신벡터, 채널벡터, 잡음벡터이다. N은 FFT 블록 사이즈로 슬롯의 기본 단위가 된다. 프레임은 프리앰블, 데이터, 그리고 파일럿 슬롯으로 이루어지며 각 슬롯은 CP 구간을 포함한다.

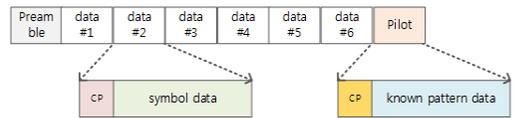


그림 2. 기본 프레임 구조
Fig. 2 Basic frame structure

2.4 도플러 주파수 극복을 위한 프레임 설계

본 절에서는 무인기의 이동속도를 반영하여 주파수 다중경로 페이딩환경에서의 도플러 주파수를 고려하여 파일럿의 위치를 조정하여 성능을 향상시키고자 한다. 기본 프레임 구조의 경우 무인기의 이동속도가 저속의 경우 적합한 프레임 구조이며, 무인기의 속도 증가에 따른 채널극복에 어려움이 발생한다[13].

따라서 무인기의 속도를 최대 250km/h로 가정하여 페이딩 환경을 설계하고 그에 맞는 프레임 구조를 변경시켜 성능을 도출하도록 한다. 기본 프레임 구조의 경우 파일럿의 크기가 데이터 크기와 동일하게 구성되고 일정한 데이터 블록 단위로 파일럿을 삽입하여 채널환경을 극복하였다. 도플러 주파수가 증가하게 되면 파일럿 간의 간격이 짧게 배치되어야 한다.

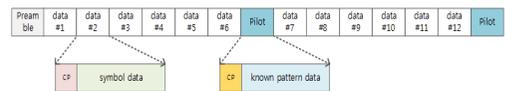


그림 3. 파일럿 배치에 따른 프레임 구조(1)
Fig. 3 Frame structure by pilot arrangement(1)

그림 3은 6개의 데이터 블록 단위로 파일럿을 삽입하여 채널추정을 수행하도록 설계한 프레임 구조를 나타낸다.

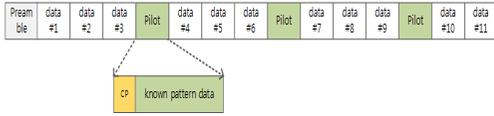


그림 4. 파일럿 배치에 따른 프레임 구조(2)
Fig. 4 Frame structure by pilot arrangement(2)

그림 4는 3개의 데이터 블록 단위로 파일럿을 삽입하여 채널추정을 수행하도록 설계한 프레임 구조를 나타낸다.

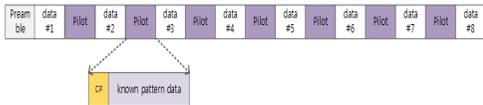


그림 5. 파일럿 배치에 따른 프레임 구조(3)
Fig. 5 Frame structure by pilot arrangement(3)

그림 5는 1개의 데이터 블록 단위로 파일럿을 삽입하여 채널추정을 수행하도록 설계한 프레임 구조를 나타낸다.

III. 모의실험

본 절에서는 무인기 통신채널환경에서 채널추정 알고리즘을 적용하여 파일럿 배치에 따른 프레임 구조를 적용하여 모의실험을 진행하고 성능을 도출한다. 도플러 주파수 극복을 위해 파일럿 배치에 따라 극복 가능 여부를 판단하기 위하여 II장에서 제시한 다양한 파일럿 배치 방식을 적용한다.

파일럿 시퀀스는 m 시퀀스를 이용하며 파일럿 배치에 따라 심볼 수를 결정한다. 심볼 매핑은 채널추정 알고리즘을 고려하여 QPSK 심볼로 적용한다.

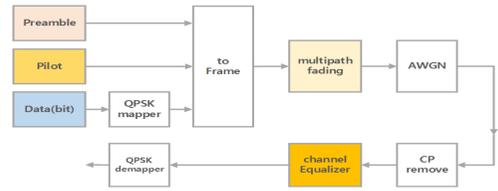


그림 6. 다중경로 페이딩 채널환경에서 송수신 기능 블록도

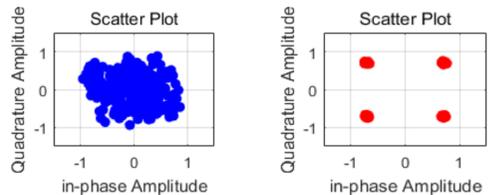
Fig. 6 Transceiver function block diagram in multi-path fading channel

그림 6은 다중경로 페이딩 채널환경에서 채널 등화기를 포함한 송수신 기능 블록도를 나타낸다. 모의실험을 위한 송수신 기능 블록은 채널등화를 목적으로 구성되었으며 수신기의 동기 블록은 고려하지 않는다. 표 2에 모의실험에서 설계된 시스템 변수를 나타내며 파일럿과 프리앰블은 QPSK 심볼로 각 블록단위로 구성된다.

표 2. 시스템 파라미터
Table 2. System parameter

Parameter	Value
Modulation	QPSK
Bandwidth	400kHz
Cyclic Prefix	12
k-point FFT	64

채널 통과 후 채널 등화기의 반영 여부에 따른 성상점의 산포도를 그림 7을 통해 확인할 수 있다. (a)는 채널 출력 신호, (b)는 LMMSE를 적용한 채널등화기 출력의 성상점의 산포도를 나타낸다.



(a) Noisy signal at the receiver (b) Equalized signal (LMMSE)

그림 7. 채널등화기 반영 여부에 따른 성상점의 산포도

Fig. 7 Performance Analysis using equalizer

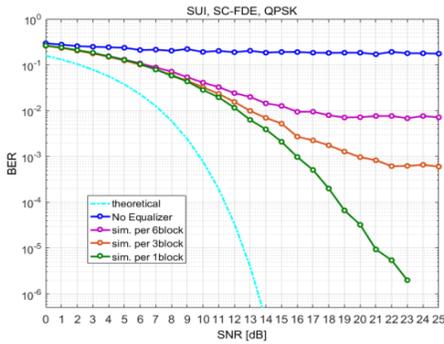


그림 8. 파일럿 배치에 따른 BER 성능
Fig. 8 BER Performance by pilot arrangement

그림 8은 SUI-3 채널환경에서의 파일럿 배치에 따른 BER(Bit Error Rate) 성능을 나타낸다. 우선 채널 등화기를 사용하지 않은 과관색선의 에러율은 높은 SNR(Signal Noise Rate)에서 error flow가 발생하고 파일럿을 배치하여 채널등화기를 적용한 그래프에서는 파일럿 배치에 따라서 채널극복의 효과를 확인할 수 있다.

1개의 데이터 블록 단위로 파일럿을 삽입하는 프레임 구조의 경우 채널극복 성능에서는 6개의 데이터 블록 단위로 파일럿을 삽입하는 프레임에 비해 우위를 보이지만 데이터 전송효율이 저하되는 결과가 발생한다. 따라서 파일럿 삽입 횟수를 증가시키는 대신 길이를 조절하여 전송효율은 유지하면서 도플러 주파수를 극복 가능한 방식을 고려해 볼 수 있다.

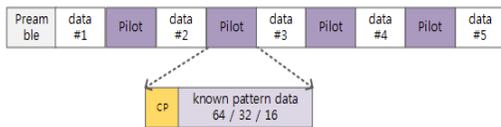


그림 9. 파일럿 길이에 따른 프레임 구조
Fig. 9 Frame structure by pilot sequence length

그림 9는 파일럿 블록 크기를 변경한 프레임 구조를 나타낸다. 각 모드에 따라 성능을 도출한다.

그림 10은 파일럿 길이에 따른 BER 성능을 나타낸다. 파일럿 블록 크기를 64, 32 그리고 16으로 조정하여 성능을 비교하였다.

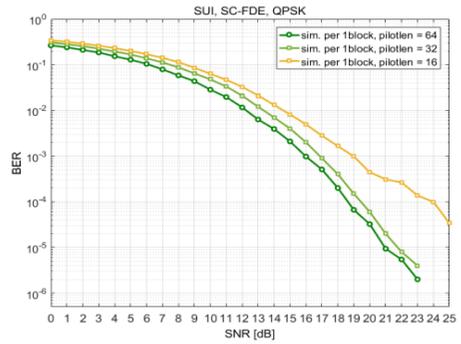


그림 10. 파일럿 길이에 따른 BER 성능
Fig. 10 BER Performance by pilot sequence length

파일럿 블록 크기가 64와 32에서는 유사한 BER 성능을 확인할 수 있으며 16인 경우 성능열화를 보인다. 따라서 데이터 전송효율과 도플러 주파수 극복을 위한 프레임 구조는 파일럿 길이 조절을 통하여 설계 가능할 것으로 판단된다.

IV. 결론

군수 및 민수 분야에서의 무인기의 활용은 향후에도 엄청난 증가가 예상되며 이에 따라 다양한 형태의 무인기가 개발될 예정이다. 무인기 운용에 있어서 가장 핵심적인 요소는 무인기의 제어 및 상태를 위한 보조링크의 설계 및 구현에 관련된 기술이라 할 수 있다. 무인기 기체 설계기술이 발전함에 따라 운용되는 무인기의 운용 속도에 대한 필요성이 제기되고 있다. 현재까지 무인기의 보조링크에 대한 다양한 연구 결과가 발표되었지만 무인기 속도에 따른 보조링크의 성능에 대한 영향성은 거의 고려되지 않고 있다.

본 논문에서는 다중경로 페이딩의 무인기 통신채널 환경에서 무인기 속도에 따른 도플러 영향을 극복하기 위하여 채널추정 및 보상 기능을 적용하였고, 파일럿 배치에 따른 영향성을 분석하였다. 모의실험 결과는 파일럿 배치에 따른 성능 차이를 확인할 수 있었고, 본 논문에서 제시한 채널 추정 및 보상 알고리즘과 적절한 파일럿 배치를 통해 실제 운용 환경에서도 고속의 무인기에 대해 안정적인 보조링크를 제공할 수 있음을 확인하였다.

References

[1] C. Hwang, J. Kim, and Y. Ryu, "Performance of Channel Estimation and Frequency-Domain Equalization for UAV Command and Control Links," *The J. of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 42, no. 7, 2017, pp. 1316-1324.

[2] Y. Jo, I. Yoon, S. Kim, and H. Park, "A Study on the MAC(Media Access Control) protocol for Unmanned Aerial Vehicle(UAV)," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 11, no. 1, 2016, pp. 119-124.

[3] J. Park, Y. Song, B. Lee, and C. Yoon, "A Study on Position Estimation for UAV using Line-of-Sight Data-link System," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 11, no. 11, 2016, pp. 1031-1038.

[4] M. Choi and S. Lee, "Comparison Study of Channel Estimation Algorithm for 4S Maritime Communications," *The J. of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 38C, no. 3, 2013, pp. 288-295.

[5] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 3rd Ed., published by Prentice Hall PTR, 1996.

[6] R. Jain, Channel Models A Tutorial., WiMAX Forum AATG, Feb. 2007.

[7] E. Haas, "Aeronautical Channel Modeling," *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, vol. 51, no. 2, 2002, pp. 254-264.

[8] P. Hoeher and E. Haas, "Aeronautical Channel Modeling at VHF band," *IEEE Veh. Tech. Conf.*, Amsterdam, Netherlands, Sept. 1999, pp. 1961-1966.

[9] J. D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel* 2nd Ed., New York: John Wiley & Sons, 2000.

[10] D. Falconer, "Frequency Domain Equalization for Single Carrier Broadband Wireless Systems," *IEEE Communications Mag.*, vol. 40, Issue: 4, Apr. 2002, pp. 58-66.

[11] T. La, Y. Jun, W. Lee, and T. Park, "Channel Estimation Techniques for OFDM Systems," *Electronics and Telecommunications Trends*, vol. 21, no. 6, 2006, pp. 124-132.

[12] N. Souto, R. Dinis, and J. Silva, "Impact of channel Estimation errors on SC-FDE

Systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 5, 2014, pp. 1530-1540.

[13] D. Matolak and R. Sun, "Unmanned aircraft systems: Air-ground channel characterization for future applications," *IEEE Veh.. Technol. Mag.*, vol. 10, no. 2, 2015, pp. 79-85.

저자 소개



윤창배(Chang-Bae Yoon)

1997년 한국해양대학교 전자통신공학과 졸업(공학사)

2002년 성균관대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

2008년 ~ 현재 한화시스템 수석연구원

※ 관심분야 : 데이터링크 시스템



김희준(Hoi-Jun Kim)

2001년 전북대학교 정보통신공학과 졸업(공학사)

2003년 전북대학교 대학원 정보통신공학과 졸업(공학석사)

2004년 ~ 현재 한화시스템 전문연구원

※ 관심분야 : 데이터링크 시스템



홍수운(Su-Woon Hong)

2001년 한국외국어대학교 컴퓨터공학과 졸업(공학사)

2000년 ~ 현재 한화시스템 전문연구원

※ 관심분야 : 데이터링크 시스템