

군집 드론 네트워크의 스펙트럼 효율 향상을 위한 분산 파일럿 기반 통신 시스템 설계

장재원, 김선교, 조성진, 박철순
국방과학연구소

Jaewon2834@gmail.com

Design of Distributed Pilot-based Communication Systems for Improving Spectral Efficiency in Swarm Drone Networks

Jaewon Chang, Seon Kyo Kim, Sung-Jin Jo, Cheol Sun
Agency for Defense Development

요약

최근 군집 드론 네트워크와 같이 제한적인 주파수 자원을 효율적으로 활용해야 하는 무인 이동체 통신 환경에서 전송 효율의 중요성이 증대되고 있다. 기존의 OFDM 시스템은 채널 추정을 위해 전체 대역폭의 일부를 파일럿 심볼 전송에 할애하므로 전송 효율이 저하되는 단점이 있다. 본 논문에서는 별도의 파일럿 부반송파 없이 데이터와 파일럿을 중첩 전송하는 분산 파일럿 기반 통신 시스템을 제안한다. 제안 방식은 보조 신호를 이용해 데이터 간섭을 제거하여 정확한 채널 정보를 획득하며, 직교 코드를 적용해 이를 다중 안테나 시스템으로 확장하였다. 시뮬레이션 결과, 제안 방식은 기존 대비 높은 전송 효율을 달성하였으며, 순차적 간섭 제거 기법 적용 시 이상적인 채널 환경에 근접하는 비트 오류 성능을 보임을 확인하였다.

I. 서론

무인 항공기 및 군집 드론 시스템은 감시, 정찰, 통신 중계 등 다양한 민·군수 분야에서 그 활용도가 급격히 높아지고 있다. 이러한 군집 드론 네트워크 환경에서는 다수의 드론이 한정된 주파수 자원을 공유해야 하므로, 스펙트럼 효율을 극대화하는 것이 핵심적인 요구사항이 된다. 현재 널리 사용되는 직교 주파수 분할 다중화(OFDM) 방식은 고속 데이터 전송에 적합하지만[1], 수신단에서의 정확한 채널 추정을 위해 전체 대역폭 중 상당 부분의 부반송파를 파일럿 심볼 전송에 할애하는 단점이 있다. 이는 데이터 전송률 감소 오버헤드로 작용하며, 주파수 자원이 부족한 환경에서 네트워크 성능을 제한하는 원인이 된다. 이러한 오버헤드 감소를 위해 데이터 신호 위에 파일럿을 중첩 전송하는 방식이 연구되었으나[2], 중첩 데이터 신호가 파일럿 간섭원이 되어 성능을 저하시키는 문제가 존재한다.

본 논문에서는 파일럿 오버헤드를 제거하여 스펙트럼 효율을 향상시키고, 중첩 파일럿의 문제점인 채널 추정 성능 열화를 방지하는 보조 신호 기반의 분산 파일럿 전송 기법을 제안한다. 제안 방식은 모든 부반송파를 데이터 전송에 사용하되, 채널 추정 시 데이터 성분을 '0'으로 만드는 보조 신호를 추가하여 데이터 간섭을 제거한다. 또한, 다중 안테나 시스템으로 확장하기 위해 직교 시퀀스를 이용한 코드 분할 기법을 함께 설계한다. 이를 통해 기존 방식 대비 전송 효율을 극대화하고, 수신단의 간섭 제거 기법을 통해 신뢰성 있는 통신 성능을 확보하고자 한다.

II. 분산 파일럿 구조 및 채널 추정

기존 OFDM 시스템이 M 개의 부반송파 중 M_p 개를 파일럿으로 할당하고 M_d 개를 데이터 전송용으로 할당하는 것($M = M_p + M_d$)과 달리, 제안 방식은 M 개의 모든 부반송파 모두를 데이터 전송에 사용한다. 대신, 채널 추정을 위한 파일럿 신호를 데이터에 중첩하여 전송한다. 데이터 벡터를 $\mathbf{d} = [d(1), \dots, d(M)]^T$, 파일럿 벡터를 $\mathbf{p} = \mathbf{p} \cdot \mathbf{I}_M$ (\mathbf{I}_M 은 모든 원소가 1인 $M \times 1$ 벡터)이라 할 때, 송신 신호 벡터 \mathbf{x} 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{d} + \mathbf{p} + a \cdot \mathbf{I}_M \quad (1)$$

여기서 a 는 보조 신호로, 채널 추정 시 데이터 성분을 '0'으로 만들기 위해 $a = -\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M d(m) = -\frac{1}{M} \cdot \mathbf{I}_M^T \cdot \mathbf{d}$ 의 값을 갖는다. 채널 h 에서 수신 신호 벡터 $\mathbf{r} = h\mathbf{x} + \mathbf{n}$ 이 되며, 수신기에서 연산되는 R 은 $\mathbf{I}_M^T \cdot (\mathbf{d} + a \cdot \mathbf{I}_M) = 0$ 에 의해 데이터 간섭이 제거된다.

$$R = \mathbf{I}_M^T \cdot \mathbf{r} = h(\mathbf{I}_M^T \cdot \mathbf{d} + M\mathbf{p} + Ma) + \mathbf{I}_M^T \cdot \mathbf{n} = Mph + N \quad (2)$$

따라서, 채널 추정값은 다음과 같으며, M 이 클수록 잡음 평균화 효과로 채널 추정 성능이 향상된다.

$$\hat{h}_{LS} = \frac{R}{Mp} = h + \frac{N}{Mp} \quad (3)$$

III. 다중 안테나 분산 파일럿 구조 및 채널 추정

제안 방식을 다중 안테나로 확장하기 위해, 인접한 부반송과 쌍에 직교성을 부여하는 코드 분할 기법을 적용한다. 안테나 $k \in \{1, 2\}$ 의 송신 신호 벡터 \mathbf{x}_k 는 데이터 \mathbf{d}_k , 파일럿 \mathbf{p}_k , 보조 신호 \mathbf{a}_k 의 합으로 구성된다.

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{d}_k + \mathbf{p}_k + \mathbf{a}_k \quad (4)$$

안테나 간 간섭 제거를 위해, 길이 M 인 직교 시퀀스 벡터 $\mathbf{c}_1 = \mathbf{I}_M$ 과 $\mathbf{c}_2 = [1, -1, \dots]^T$ 를 정의하고, 각 안테나의 파일럿은 $\mathbf{p}_k = p\mathbf{c}_k$, 보조 신호 벡터는 $\mathbf{a}_k = \alpha_k \mathbf{c}_k$ 로 설정된다. 이때 스칼라 α_k 는 해당 코드로 투영된 데이터 성분을 상쇄하도록 설계한다.

$$\alpha_k = -\frac{1}{M} \mathbf{c}_k^T \cdot \mathbf{d}_k \quad (5)$$

수신 신호 $\mathbf{r} = \mathbf{h}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{h}_2 \mathbf{x}_2 + \mathbf{n}$ 에 대하여, 각 안테나의 코드 벡터 \mathbf{c}_k 와의 내적을 통해 채널을 분리한다. \mathbf{c}_1 과 \mathbf{c}_2 의 직교성($\mathbf{c}_1^T \mathbf{c}_2 = 0$)으로 타 안테나의 신호는 제거되며, 안테나 1 채널 추정을 위한 연산 R_1 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_1 &= \mathbf{c}_1^T \mathbf{r} \\ &= h_1 \mathbf{c}_1^T (\mathbf{d}_1 + p\mathbf{c}_1 + \alpha_1 \mathbf{c}_1) + h_2 \mathbf{c}_1^T \mathbf{x}_2 + \mathbf{c}_1^T \mathbf{n} \\ &= h_1 \left(\underbrace{\mathbf{c}_1^T \mathbf{d}_1 + M\alpha_1 + Mp}_{=0} \right) + \underbrace{h_2 \mathbf{c}_1^T \mathbf{x}_2}_{=0} + N_1 \\ &= Mph_1 + N_1 \end{aligned} \quad (6)$$

동일 원리로 $R_2 = \mathbf{c}_2^T \mathbf{r} = Mph_2 + N_2$ 가 성립하며, 각 채널은 $\hat{h}_k = \frac{R_k}{Mp}$, $k \in \{1, 2\}$ 로 추정된다.

IV. 성능 분석

제안하는 분산 파일럿 기반 통신 시스템의 성능을 flat fading 채널 환경에서 검증하였다. 시뮬레이션을 위한 변조 방식으로는 QPSK 를 사용하였으며, 도플러 주파수(f_d)는 6Hz 로 설정하여 시변 채널 환경을 반영하였다. 성능 분석 척도로는 비트 오류율과 전송 효율을 사용하여 각각 비교 분석하였다.

단일 안테나 송신 성능을 Fig. 1 로 분석하였다. 제안 방식(Proposed)은 기존 방식(Conventional)에 대비 간섭의 영향으로 비트 오류 성능 열화가 발생함을 Fig. 1(a)로 알 수 있다. 그러나 복조 데이터를 이용한 간섭 제거 후 다시 채널을 추정하는 'Proposed [SIC]'의 경우, 성능이 대폭 개선됨을 알 수 있다. 복조 오류가 없는 'Proposed [SIC-optimal]'은 채널 추정 오차가 없는 'Perfect CSI' 및 기존 방식(Conventional) 성능에 근접하고 이론적 성능 (Analysis)과도 유사한 경향성이 확인된다. Fig. 1(b)는 전송 효율의 누적 분포 함수이며, 대역폭 일부를 파일럿 전송에 사용하는 기존 방식은 전송 효율에 손실이 발생하지만, 제안 방식은 모든 자원을 데이터 전송에 사용하여 동일 환경에서 더 높은 전송 효율을 달성한다. Fig. 2 는 다중 안테나 송신 성능 결과이며, Fig. 2(a)의 비트 오류 성능 분석 결과, 직교 시퀀스 \mathbf{c}_1 , \mathbf{c}_2 를 통해 타 안테나 신호가 제거되지만, 실제 채널 추정 과정의 잔여 오차로 인해 'Proposed [SIC]'와 'Conventional' 방식 간의 성능 격차가 보임

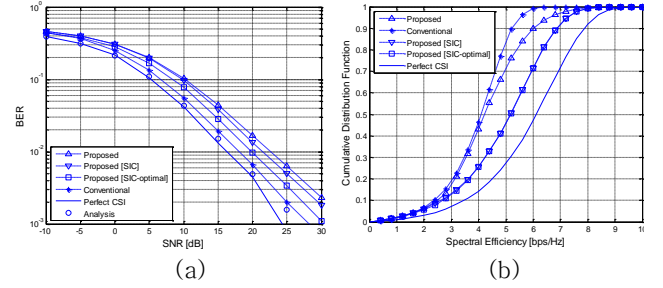


Fig 1. 제안 방식의 단일 안테나 송신 시 성능 분석
(a) 비트 오류 성능 (b) 전송 효율의 누적 분포 함수

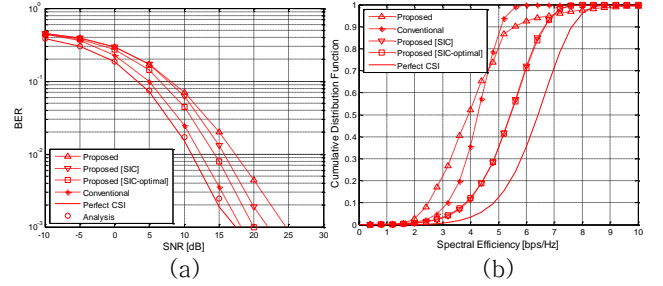


Fig 2. 제안 방식의 다중 안테나 송신 시 성능 분석
(a) 비트 오류 성능 (b) 전송 효율의 누적 분포 함수

확인하였다. 그러나 SNR 이 증가함에 따라 'Proposed [SIC-optimal]'은 'Perfect CSI' 성능에 수렴하였다. Fig. 2(b)의 전송 효율 측면에서도 제안 방식이 스펙트럼 효율을 극대화할 수 있음을 알 수 있다. 결론적으로, 제안하는 분산 파일럿 시스템은 기존 시스템 대비 비트 오류 성능 저하를 최소화하면서도, 군집 드론 네트워크 운용에 필수적인 스펙트럼 효율을 크게 향상시킬 수 있는 효과적인 방식을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 군집 드론 네트워크를 위해 보조 신호와 직교 코드를 활용한 분산 파일럿 기반 통신 시스템을 제안하였다. 제안 방식은 데이터 간섭을 상쇄시키는 보조 신호를 통해 간단한 연산으로 채널을 추정하며, 파일럿 오버헤드를 제거하여 기존 OFDM 대비 높은 전송 효율을 달성하였다. 비록 중첩 전송에 따른 간섭이 존재하나, SIC 기법을 통해 이를 효과적으로 극복하고 우수한 BER 성능을 확보할 수 있음을 확인하였다. 본 기술은 차세대 군집 드론 통신에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 정부(방위사업청)의 재원으로 미래도전국방기술 과제(No. 915087201)를 통해 연구가 수행되었다.

참고 문헌

- [1] S. Haykin, *Communication Systems, 4th ed.*, New York, NY, USA: Wiley, 2001.
- [2] F. Athley, "Blind tuning of superimposed pilot sequences for channel estimation," in *Proc. IEEE VTC*, 2004, pp. 123-127.