

광대역 페이딩 환경에서 SC-FDE 시스템의 랜덤 위상 회전 기법에 대한 USRP 기반 실험적 검증

이득한, 전소연, 최근원, 정의림*

국립한밭대학교

30251289@edu.hanbat.ac.kr, jeonssol1109@gmail.com,

chlrmmsdnjs33@naver.com, *erjeong@hanbat.ac.kr

USRP-Based Experimental Evaluation of Random Phase Rotation for SC-FDE Systems in Wideband Fading Environments

Lee Deuk Han, Jeon So Yeon,

Choi Geun Won, Jeong Eui Rim*(Corresponding author)

Hanbat National University

요약

본 논문은 SC-FDE(Single Carrier-Frequency Domain Equalizer) 기반 2홉 중계 시스템에 랜덤 위상 회전 기법을 적용하고 USRP(Universal Software Radio Peripheral)를 이용한 필드 실험을 통해 그 효과를 검증하였다. 다수의 중계 신호가 공기 중에서 합성되는 환경을 구성하고 랜덤 위상 회전 적용 유무에 따른 수신 신호의 전력 및 EVM(Error Vector Magnitude) 성능을 분석하였다. 실험 결과 상쇄 간섭 환경에서 랜덤 위상 회전 적용시 평균 EVM이 약 5.71 dB 개선되는 성능 향상이 관측되었다. 이를 통해 제안 기법이 지상 전술 통신 환경에서 통신 안정성 향상을 실험적으로 검증하였다.

I. 서 론

지상 전술 통신 환경은 단말 간 직접 통신이 요구되지만, 지형 및 장애물로 인해 소스와 목적지 간 LOS(Line-of-Sight) 확보가 어려운 환경이다. 이러한 환경에서는 직접 통신이 불안정하여 중계기를 활용한 통신 방식이 요구된다. 그러나 다수의 중계기를 통해 전달된 동일 신호가 공기 중에서 합성될 경우, 신호 간 위상 관계에 따라 보강 또는 상쇄 간섭이 발생할 수 있으며, 특히 상쇄 간섭은 수신 성능을 심각하게 저하한다.

이러한 문제를 해결하기 위한 기법으로 랜덤 위상 회전(Random Phase Rotation) 기법이 제안되었다. 본 기법은 중계기에서 수신 신호에 임의의 위상 변화를 적용한 후 재전송하여, 시간에 따라 간섭 조건이 변화하도록 하는 시간 다이버시티를 얻을 수 있다.[1, 2] 이를 통해 모든 신호가 지속적으로 상쇄 간섭에 빠지는 최악의 상황을 효과적으로 회피할 수 있다. 본 논문에서는 소스와 목적지 사이에 단일 안테나를 가진 릴레이가 포함된 2홉 중계 시스템을 다루며, SC-FDE(Single Carrier-Frequency Domain Equalizer) 기반 시스템에 랜덤 위상 회전 기법을 적용하였을 때의 효과를 실험적으로 분석한다. 이를 위해 USRP(Universal Software Radio Peripheral)를 기반으로 한 실제 무선 실험 환경을 구축하고, 랜덤 위상 회전 기법의 적용 유무에 따른 수신 신호의 성능 변화를 분석한다.

II. 실험 방안

본 논문에서는 그림 1과 같은 하드웨어 실험 구성을 통해 제안한 시스템을 검증한다. USRP X410은 수신된 신호를 목적지로 재전송하는 중계기로 동작한다. X410에 연결된 3개의 안테나는 각각 독립적인 중계 노드를

나타내며, 이를 통해 다수의 중계 노드가 동시에 신호를 재전송하여 목적지에서 수신하는 최종 흡을 구현한다. USRP X310은 각 중계 노드로부터 재전송된 신호들을 수신하는 목적지 노드로 동작한다.

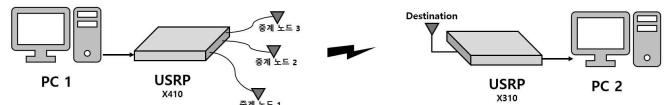


그림 1. 하드웨어 실험 구성도

그림 2는 본 실험에서 사용된 SC-FDE 심볼 구조를 나타낸다. 심볼은 프리앰블을 시작으로 CP(Cyclic Prefix), 파일럿, 데이터로 구성된다. 송신 신호는 하나의 패킷을 16개의 타임 슬롯으로 분할한 후, 각 중계 노드 별로 타임 슬롯마다 랜덤 위상 회전을 적용한다. 그 후, 모든 안테나(중계 노드)를 통해 신호를 동시에 재전송하여, 다중 중계 신호가 공기 중에서 합성되는 환경을 구성하였다.

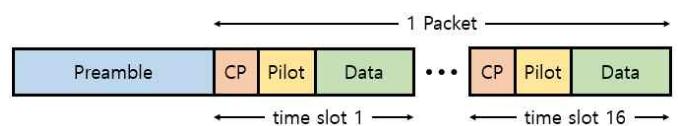


그림 2. SC-FDE 심볼 구조

III. 실험 환경

표 1. 필드실험 파라미터

Parameters	Values
Transmission scheme	SC-FDE
Relay node	3
Center frequency	433 MHz
Bandwidth	1.92 MHz
Baud rate	1.536 Msps
Sampling rate	3.072 Msps, 24.576 Msps
modulation	QPSK, R=1/2
Time slots / packet	16
Preamble length	272 Symbol
CP length	16 Symbol
Pilot length	48 Symbol
Data length	208 Symbol
FFT size	256

표 1은 필드실험에 사용된 주요 파라미터를 정리한 것이다. 전송방식은 SC-FDE이며, 중계 노드의 수는 3개로 설정하였다. 중심 주파수는 433 MHz, 대역폭은 1.92 MHz를 사용하였고, 심볼 속도는 1.536 Msps로 설정하였다. 송신 샘플링 클럭은 3.072 Msps, 수신 샘플링 클럭은 24.576 Msps, MCS는 QPSK와 R=1/2을 사용한다. 프리앰블 길이는 272 심볼, CP 길이는 16 심볼, 파일럿 길이는 48 심볼, 데이터 길이는 208 심볼이며, FFT 크기는 256으로 설정하여 실험을 진행하였다.

IV. 실험 절차 및 성능 평가 방법

본 실험에서는 중계 노드를 고정한 상태에서 목적지 노드를 이동시키며 실험을 수행하였다. 먼저 랜덤 위상 회전을 적용하지 않은 신호를 기준으로 각 중계 노드가 재전송한 신호가 목적지에서 관측되는 수신 전력을 바탕으로 서로 다른 페이딩 특성이 나타나는 위치를 탐색하였다. 이 과정에서 수신 전력에 따라 위치를 강한 보강 간섭, 약한 보강 간섭, 상쇄 간섭의 세 가지 경우로 측정 위치를 분류하였다.

성능 검증을 위해 각 간섭 특성별로 랜덤 위상 회전 적용 유무에 따른 수신 신호의 전력 및 EVM(Error Vector Magnitude)을 측정하였다. 모든 측정은 동일한 실험 조건에서 각 위치에서 5회 반복 측정을 수행되었으며, 반복 측정 결과의 평균 EVM 값을 성능 지표로 사용하였다.

V. 필드실험 결과

랜덤 위상 회전을 적용하지 않은 경우, 상쇄 간섭 환경에서 수신 신호의 포락선은 전체 타임 슬롯 구간에 걸쳐 낮은 진폭을 유지하며 비교적 일정하게 유지된다. 이는 수신 신호가 시간에 따라 지속적인 상쇄 간섭 상태에 놓여있음을 의미한다.

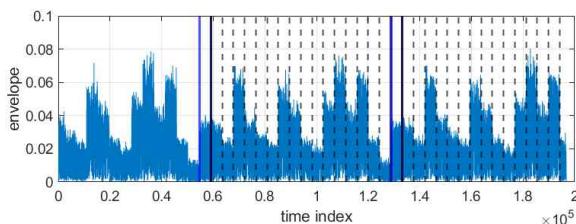


그림 3. 랜덤 위상 회전 적용 시 상쇄 간섭 수신 신호 포락선

그림 3은 랜덤 위상 회전을 적용한 경우 상쇄 간섭 환경에서의 수신 신호

의 포락선을 나타낸다. 타임 슬롯별 간섭 조건이 랜덤하게 변화하면서 수신 신호의 진폭이 타임 슬롯마다 불규칙하게 변동하는 양상을 나타낸다. 이는 일부 슬롯에서는 보강 효과가 나타나고 다른 슬롯에서는 상쇄 간섭이 발생하여 전력 분포가 불규칙하게 나타난 것으로 확인된다. 포락선에서 파란 실선은 프리앰블의 시작 위치를, 검은 실선은 프리앰블의 끝을 나타내며, 검은 점선은 각 타임 슬롯 구간을 의미한다.

표 2. 랜덤 위상 회전 적용 여부에 따른 페이딩 환경별 EVM 측정 결과

실험 환경		Average EVM [dB]
강한 보강	랜덤 위상 회전 미적용	-19.05
	랜덤 위상 회전 적용	-17.89
약한 보강	랜덤 위상 회전 미적용	-12.78
	랜덤 위상 회전 적용	-12.82
상쇄 간섭	랜덤 위상 회전 미적용	-5.28
	랜덤 위상 회전 적용	-10.99

표 2는 중심 주파수가 433 MHz 일 때, 랜덤 위상 회전 적용 여부에 따른 페이딩 환경별 EVM을 5회 반복 측정의 평균값을 나타낸다. 강한 보강 및 약한 보강 간섭 환경에서는 랜덤 위상 적용 여부에 따른 평균 EVM 차이가 크지 않았으나, 상쇄 간섭 환경에서는 랜덤 위상 회전 적용 시 평균 EVM이 약 5.71 dB 개선되며 성능 향상이 나타났다.

VI. 결론

본 논문에서는 지상 전술 통신 환경을 가정한 2홉 중계 SC-FDE 시스템에서 랜덤 위상 회전 기법의 효과를 USRP 기반 실험을 통해 검증하였다. 필드실험 결과, 강한 보강 및 약한 보강 간섭 환경에서는 랜덤 위상 적용 여부에 따른 성능 차이가 크지 않았지만, 상쇄 간섭 환경에서는 랜덤 위상 회전 적용 시 평균 EVM이 약 5.71 dB 성능 향상이 관측되었다. 이는 랜덤 위상 회전 기법이 상쇄 간섭 환경에 효과적임을 의미한다. 따라서 제안 기법은 지상 전술 통신 환경에서 통신 안정성 향상을 실험적으로 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] Halford T. R. and Chugg K. M. "Barrage Relay Networks," 2010 Information Theory and Applications Workshop (ITA), pp. 1-8, Apr. 2010.
- [2] M. A. Lee, Y. R. Heo, and E. R. Jeong, "Wideband relay network with phase dithering in SC-FDE systems," Proceedings of Symposium of the Korean Institute of Communications and Information Sciences, Gangwon, Feb. 8, 2023.