

지상 무인체계용 다중입출력 통신 시스템 설계 및 성능시험 분석

유지상^{*,1)} · 최준성¹⁾ · 강홍구¹⁾ · 백인철¹⁾ · 김도종¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제5기술연구본부

Design and Experiments Analysis of MIMO Communication System for Ground Unmanned Systems

Jisang You^{*,1)} · Joonsung Choi¹⁾ · Hongku Kang¹⁾ · Incheol Baek¹⁾ · Dojong Kim¹⁾

¹⁾ The 5th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 14 February 2014 / Revised 24 July 2014 / Accepted 15 August 2014)

ABSTRACT

High-capacity video, control and situation awareness data should be transmitted efficiently to control robots properly in the ground unmanned system, which requires the technology maximizing the communication range and the data transmission throughput. This technology is connected to the OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access)-MIMO(Multiple Input Multiple Output) transmission technology under the limited bandwidth and transmission power. In this paper, we design MIMO communication system for ground unmanned systems, and investigate the data reception performance experimentally, comparing with SISO(Single Input Single Output) system. Experiment results show that the data reception performance of MIMO is significantly improved compared to that of SISO, e.g. 4dB gain of sensitivity and 5dB of SNR at the value MPR = 1, for the mobile stations with 2×2 STBC diversity.

Key Words : OFDMA-TDD(직교주파수 분할다중접속-시분할 듀플렉싱), Multiple Input Multiple Output(다중입출력), Reception Sensitivity(수신감도), Signal to Noise Ratio(신호 대 잡음비)

1. 서론

미래 지상무인전장 환경에서 지상무인로봇을 효율적으로 원격통제하기 위해서는 대용량의 동영상 데이터 및 로봇 상태 데이터를 기반으로 지상무인로봇을

원격으로 무선 제어하는 운용방안이 필수적이다. 이를 위해서는 엄격히 지정된 주파수 대역폭을 가지고 대용량의 동영상 데이터를 지원해야 하고, 제한된 RF 송신 출력 조건에서 데이터 통달거리 확장이 반드시 요구된다. 이러한 고속 대용량 데이터 송수신 및 데이터 통달거리 확장 등의 두 가지 주요한 사항들을 만족시키기 위해서는 직교주파수 분할다중화(OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기반의 다

* Corresponding author, E-mail: jsyou@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

중입출력(MIMO : Multiple Input Multiple Output) 전송 기술이 필수적이라 할 수 있다^[1,2].

MIMO 송수신 기술은 크게 데이터 통달거리 증대 및 데이터 전송률 증가 효과를 목적으로 두 가지로 구분될 수 있다. 첫째 시공간블록코드(STBC : Space Time Block Code)기반의 시공간 다이버시티 방식은 동일한 데이터를 시공간적으로 반복 전송하여 채널 변화에 강인하게 대응하고, 깊은 페이딩을 겪는 확률을 감소시켜 링크품질 향상을 통한 데이터 통달거리 증대 및 안정적인 데이터 송수신을 가능하게 한다. 또한, 수신단에서 최대우도(ML : Maximum Likelihood) 신호검출이 선형과정을 통해 간단히 이루어진다. 하지만, 데이터 전송률 측면에서는 단일 안테나를 사용하는 경우와 동일하여 고속 데이터 전송에는 적합하지 않다. 둘째, 공간 다중화(SM : Spatial Multiplexing) 방식은 각각 상이한 데이터들을 각기 다른 안테나 경로를 통해 전송시켜 데이터 전송률 및 주파수 사용 효율을 증가시킨다. 하지만, SM 방식의 MIMO 시스템에서 수신단의 다중화된 데이터 신호 분리는 어려운 작업이며, 송신 안테나 개수 및 변조차수 증가에 따른 디코딩 연산 복잡도 증가는 제한된 하드웨어 용량 문제와 직결된다. 따라서, 수신단에서 선정된 FPGA 디바이스 용량을 고려하여 최적의 디코딩 알고리즘 선택이 그 무엇보다 중요하다^[3,4].

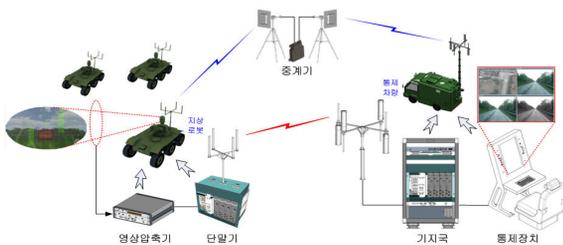


Fig. 1. Remote control operation for ground unmanned robots

Fig. 1은 지상무인전장 환경에서 지상무인로봇을 원격 통제하는 운용도를 나타낸다. 상향링크에서는 로봇 단말 상태 정보, 대용량 동영상 데이터 및 토폴로지 정보를 포함한 링크 품질 정보 등이 단말기에서 기지국으로 혹은 하위 단말기에서 상위 단말기로 송수신되며, 필요 시 중계기가 투입되어 데이터 중계를 수행한다. 하향링크에서는 각 영역 별 통신 파라미터 설정 정보, 전체 프레임 할당 계획 정보 및 로봇단말 제어

정보 등이 기지국에서 단말기로 혹은 상위 단말기에서 하위 단말기로 송수신된다. Ad-Hoc 링크에서는 망 가입 관련 제어정보, 링크 품질 측정을 위한 제어정보 및 송수신 시간 동기화를 위한 참조 신호 정보 등이 기지국과 단말기들 간 또는 특정 단말기 및 다른 단말기들 간에 정해진 프레임 주기를 가지고 양방향으로 송수신된다. 단말기가 탑재되는 지상무인로봇에서는 플랫폼의 크기/중량 최소화 및 시스템 공간 배치 설계 제약 등의 이유로 안테나 개수를 2개로 고려하고, 기지국이 탑재된 지휘통제차량에서는 안테나 개수를 4개로 고려한다.

본 논문에서는 지상무인로봇 원격통제를 위해 개발된 MIMO 시스템 설계 내용 및 성능분석 결과를 다루는데, 각각 4개 및 2개의 안테나를 갖는 기지국과 단말기로 운용되는 MIMO 시스템에서 STBC 및 SM 방식의 데이터 수신 성능을 통달거리와 밀접한 관련을 갖는 수신감도 및 신호 대 잡음비(SNR : Signal to Noise Ratio) 측면에서 무선 채널 Emulator를 이용하여 시험 분석하고, 단일입출력(SISO : Single Input Single Output) 시스템 성능과 비교 분석을 통해 MIMO 시스템의 효율성을 입증하고자 한다.

2. 시스템 설계 및 제작

2.1 RF 모듈 설계 및 제작

RF 모듈은 기지국 및 단말기에 장착되는 안테나 개수를 고려하여 기지국에는 4개, 단말기에는 2개가 탑재된다. RF 모듈의 주요기능은 광대역/분산 RF 신호 송수신 처리이다. 4개로 분산된 광대역 내에서 자유로운 송수신 주파수 변환이 가능하고, 광대역 RF 처리를 위한 최적의 중단 필터가 설계 및 제작되었다. 또한, 인접대역 간 간섭신호 억제를 위하여 채널 간 보호대역을 설계하였고, 전력 증폭기 백오프 과정 및 첨두전력 대 평균전력 비(PAPR : Peak to Average Power Ratio) 등을 고려하여 요구조건을 충족하는 기지국 및 단말기의 최적 평균출력을 설계하였다.

Fig. 2는 기지국과 단말기의 RF 모듈 구성도를 보여준다. RF 모듈은 송신 경로와 수신 경로로 구분되는데, 송신 경로는 중간주파수(IF : Intermediate Frequency) 신호를 고주파 반송파 신호로 변환시키는 상향 변환부와 전력 증폭부로 구분된다. 수신 경로는 고주파 반송파 신호를 중간주파수 신호로 변환시키는 하향

변환부로 이루어져 있다. 증폭기 및 주파수 합성기 등의 비선형 소자에서 발생하는 혼변조 왜곡(IMD : Intermodulation Distortion)을 최소화시켜 선형성을 보장하였으며, 선택도 높은 중간주파수 채널 선택 필터 및 이미지 주파수 제거용 대역통과필터를 적용하여 불요파 및 간섭신호를 최소화하였다. 또한, 수신회로 최적화를 위해 저잡음 증폭기를 적용하여 수신감도 성능과 연결되는 잡음지수를 최소화하였다.

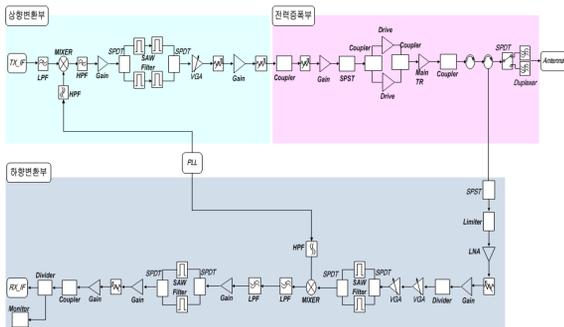


Fig. 2. RF module block diagram

Table 1. RF module characteristic

구분	사양 및 특징
주파수 변환 범위	RF : 1.X×1.X[GHz], IF : 70MHz
입출력 평탄도	1.5 : 1 이하@50Ω
입력 레벨	• 상향 : -20[dBm] • 하향 : -95~0[dBm]
출력 레벨	• 상향 : -10~36[dBm]@AVG • 하향 : -20[dBm]
고조파 불요파	-60[dBc] 이하
실효 채널 대역폭/1FA	3.75MHz
AGC 범위	-20~60[dB]
잡음지수	• 기지국 : 4.2~4.35[dB] • 단말기 : 4.28~4.5[dB]
크기	• 기지국 : 57×228.5×293[mm][W×H×D] • 단말기 : 100×180×340[mm][W×H×D]
무게	• 기지국 : 5.36kg • 단말기 : 7.51kg

Table 1에서는 기지국 및 단말기의 RF 모듈 주요 사양 및 특징을 정리하였다. 1개의 주파수 대역(FA : Frequency Area)당 실효 채널 대역폭은 4MHz에서 보호 대역을 고려하여 3.75MHz이며, 4개의 FA에서 대역 변환이 가능하며 IF를 70MHz로 사용한다. RF 모듈의 상향 변환부 입력 신호는 모뎀 모듈로부터의 -20dBm의 IF 신호이며, 하향 변환부 입력 신호는 약 -95dBm로부터 0dBm까지의 RF 신호이다. 이러한 하향 변환부 입력 신호 범위는 자동이득제어(AGC : Automatic Gain Control) 운용 범위 및 모뎀 모듈에서 수신처리 가능한 수신신호세기(RSS : Received Signal Strength)의 다이내믹 범위에 따라 증가될 수 있다. 그리고 RF 모듈의 전력 증폭부 출력 신호는 단말기의 송신전력제어(TPC : Transmit Power Control)를 고려하여 평균 -10dBm로부터 36dBm까지의 RF 신호이며, 하향 변환부 출력 신호는 모뎀 모듈의 수신처리 가능한 최적 RSS인 -20dBm IF 신호이다. 고조파 성분은 -60dBc 이하이며, AGC의 운용 범위는 -20dB에서 60dB까지이다. 잡음지수는 데이터 수신 감도 성능의 극대화를 위해 약 4.5dB 이하로 설계 및 구현하였다.

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 제작된 기지국과 단말기의 RF 모듈의 내부 구조를 보여주고 있다.



Fig. 3. Inner structure of base station RF module



Fig. 4. Inner structure of mobile station RF module

2.2 모뎀 모듈 설계 및 제작

모뎀 모듈의 주요 기능에는 물리 및 매체접속제어 계층 기능, 디지털 상하향 변환 기능, 아날로그 및 디지털 변환(ADC : Analog to Digital Converter, DAC : Digital to Analog Converter) 기능, Clock 생성 및 분배 기능, RF 모듈과의 아날로그 IF 인터페이스 기능 및 제어 모듈과의 Ethernet 인터페이스 기능 등이 있다.

Table 2. Modem module characteristic

구분	사양 및 특징
다중접속 및 Duplexing 방식	OFDMA-TDD
다중안테나 시스템	2×4, 2×2 다중안테나
MIMO 방식	STBC, SM
MIMO 디코딩 방식	• Alamouti 디코딩 • Modified ML(MML) 디코딩
무선링크 적응방식	AGC/TPC/AMC/AMS
FPGA	• 기지국 : Startix-4(Altera, EP4SGX530) • 단말기 : Kintex-7(Xilinx, XC7K410T)
동작온도	• 기지국 : -20℃ ~ 75℃ • 단말기 : -32℃ ~ 50℃
크기	• 기지국(Compact PCI 6U) 20.32×233.35×160[mm][W×H×D] • 단말기(VPX 3U) 20.32×100×160[mm][W×H×D]
무게	• 기지국 : 588g • 단말기 : 375g

Table 2에서는 기지국 및 단말기의 모뎀 모듈 주요 사양 및 특징을 정리하였다. 다중접속 및 듀플렉싱 방식으로 직교주파수 분할다중접속/시분할 듀플렉싱(OFDMA-TDD : Orthogonal Frequency Division Multiple Access-Time Division Duplexing)을 사용하고, 다중안테나 시스템은 기지국 및 단말기의 안테나 개수를 고려하여 2×4 및 2×2 시스템을 사용한다. 또한, MIMO 방식은 상향링크에서는 STBC 및 SM 방식을 적용하고, 하향링크에서는 신뢰성 보장을 위해 STBC만을 적용한다. 그리고, STBC에 대해서는 Alamouti 디코딩을, SM

에 대해서는 Modified ML 디코딩 방식을 사용하였다. 무선링크 적응방식으로 기지국 및 단말기의 수신신호 세기 제어를 위한 AGC, 단말기 송신출력 제어를 위한 TPC, 적응적 변조 부호화(AMC : Adaptive Modulation Coding) 및 적응적 다중입출력 스위칭(AMS : Adaptive MIMO Switching) 등이 적용된다.

Table 3은 모뎀 모듈 시스템 파라미터를 정리한 것이다. 샘플링 주파수는 시스템 대역폭을 고려하여 4 MHz로 설정하고, 부반송파 전체 개수를 의미하는 FFT 크기는 512로 한다. 부반송파 간 간격은 시스템 대역폭과 FFT 크기를 고려하면 7.8125kHz가 되며, 유용한 심벌 시간 길이는 샘플링 주파수와 FFT 크기를 고려하면 128μs가 된다. 심벌 간 간섭을 방지하기 위한 보호구간인 주기적 전치부호(CP : Cyclic Prefix) 시간은 유효 심벌시간 길이의 1/8로 하여 16μs가 되고, 전체 OFDMA 심벌시간 길이는 144μs(576개 샘플)이 된다. 전체 부반송파 개수인 512개에서 인접채널 간섭 방지를 위해 주파수 대역에서 좌우로 보호 부반송파 개수를 각각 16개 및 15개로 할당하고, DC 부반송파 1개를 제외하면 실제 사용 부반송파 개수는 480개가 된다. 이 중 수신신호 측정 및 채널추정을 위한 Pilot용 부반송파 60개를 할당하면, 순수 데이터용 부반송파 개수는 420개가 된다. 또한, 실제 사용되는 부반송파 480개를 고려하면 유효 대역폭은 3.75MHz가 된다.

Table 3. Modem module system parameters

파라미터	심벌	설정값
샘플링 주파수	F_S	4MHz
FFT 크기	N_{FFT}	512
부반송파 간격	Δf	7.8125kHz
유효 심벌 기간	T_b	128μs
Cyclic prefix 기간	T_g	16μs
OFDMA 심벌 기간	T_s	144μs
사용된 부반송파 개수	N_{used}	480
데이터 부반송파 개수	N_{data}	420
Pilot 부반송파 개수	N_{pilot}	60
좌 보호 부반송파 개수	N_{LG}	16
우 보호 부반송파 개수	N_{RG}	15
유효 대역폭	BW	3.75MHz/FA

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 제작된 기지국과 단말기의 모뎀 모듈의 내부 구조를 보여주고 있다.

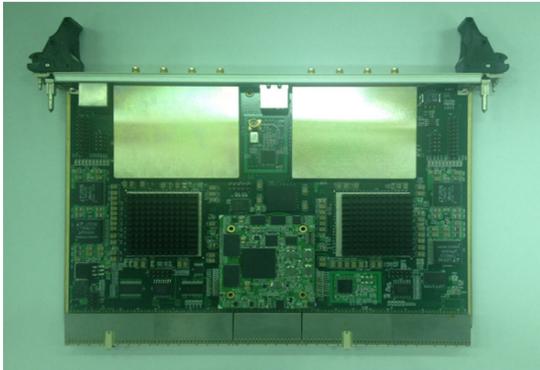


Fig. 5. Inner structure of base station modem module

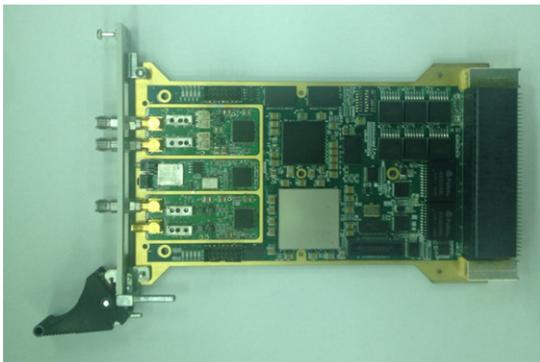


Fig. 6. Inner structure of mobile station modem module

2.3 통신 프레임 구조 설계

통신 프레임은 기본적으로 OFDMA/TDD 구조를 가지고 있다. 시간 영역은 크게 Preamble 및 Midamble과 함께 하향링크 제어 채널(DLCCCH : Down-Link Control Channel), 상향링크 데이터 채널(ULDCH : Up-Link Data Channel) 및 애드 혹 제어 채널(AHCCH : Ad-Hoc Control Channel)의 3가지 종류의 다중접속 영역으로 구성되어 있다. Fig. 7은 한 프레임의 전체 구조를 보여준다.

한 프레임 당 심벌 개수는 Preamble 1개, DLCCH 6개, ULDCH 28개, Midamble 1개 및 AHCCH 4개로 하여 총 40개가 된다. DLCCH와 ULDCH 사이에는 송/수신 천이 간격(TRTG : Transmit/Receiving Transition Gap)이 존재하고, 시간은 183.0 μ s(732 samples)이다. ULDCH와 Midamble 사이에는 수신/애드혹 천이 간격

(RATG : Receiving/Ad-hoc Transition Gap)이 존재하고, 시간은 163.5 μ s(654 samples)이다. 또한, AHCCH와 다음 프레임의 Preamble 사이에는 애드혹/송신 천이 간격(ATTG : Ad-hoc/Transmitting Transition Gap)이 존재하고, 시간은 143.5 μ s(574 samples)이다. 한 프레임의 전체 시간은 6.25ms가 되며, 그 시간 동안 샘플링 주파수가 4MHz이므로 샘플 개수는 25,000개가 된다.

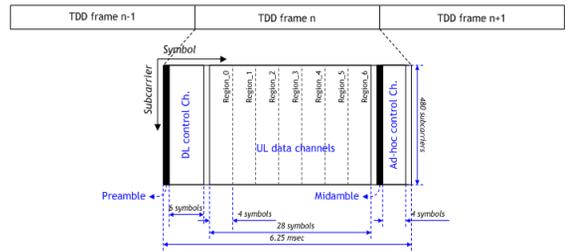


Fig. 7. Whole structure of a frame

2.4 MIMO 시스템 설계

지상 무인체계용 통신 시스템에 적용되는 STBC 방식에는 Alamouti를, SM 방식에는 디코딩 성능 및 연산량을 고려하여 MML을 디코딩 방식으로 사용한다.

2.4.1 MIMO 시스템 모델

지상 무인체계용 MIMO 통신 시스템 모델은 Fig. 8과 같이 단말기 안테나 개수(N_{MS})가 2개이고, 기지국 안테나 개수(N_{BS})가 4개로 구성되는 시스템이다.

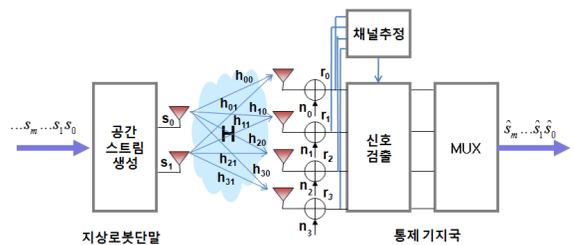


Fig. 8. 2x4 MIMO system model(ULDCH)

Fig. 8의 ULDCH 기준 시스템 모델 송수신 신호 관계식을 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} r_0 \\ r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} \\ h_{10} & h_{11} \\ h_{20} & h_{21} \\ h_{30} & h_{31} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} \text{ or } \begin{bmatrix} s_0 & -s_1^* \\ s_1 & s_0^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0 \\ n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서 전송행렬 $\begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix}$ 은 SM의 경우에 사용되고, 전송행렬 $\begin{bmatrix} s_0 & -s_1^* \\ s_1 & s_0^* \end{bmatrix}$ 은 STBC의 경우에 사용된다. 식 (1)에서 $s_i, i = 0, 1$ 는 단말기의 i 번째 송신 안테나로부터 송신된 신호를 의미하고, M-직교진폭변조(QAM : Quadrature Amplitude Modulation) 심벌이라고 가정한다. $r_i, i = 0, 1, 2, 3$ 는 i 번째 기지국 수신 안테나에서 수신된 신호를 의미하며, $h_{i,j}, i = 0, 1, 2, 3, j = 0, 1$ 는 j 번째 송신 안테나와 i 번째 수신 안테나 사이의 채널 이득을 의미한다. 잡음 $n_i, i = 0, 1, 2, 3$ 은 수신단에서 발생하는 환경 대칭 백색 가우시안 잡음이라고 가정한다.

2.4.2 송신단 부반송파 할당 설계⁽⁵⁾

ULDCH 기준 단말기 송신단 설계는 다음과 같다. 1개의 slot을 2개의 심벌과 16개 부반송파로 구성된 블록으로 정의하고, 1개 slot당 Pilot용 부반송파는 4개가 할당되며, 송신 안테나 1개 당 2개의 Pilot용 부반송파가 할당된다. 데이터 부분의 부반송파 할당은 STBC 방식과 SM 방식 두 가지 경우를 고려한다. 우선, STBC 엔코딩 전송행렬 A는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$A = \begin{bmatrix} S_0 & -S_1^* \\ S_1 & S_0^* \end{bmatrix} \quad (2)$$

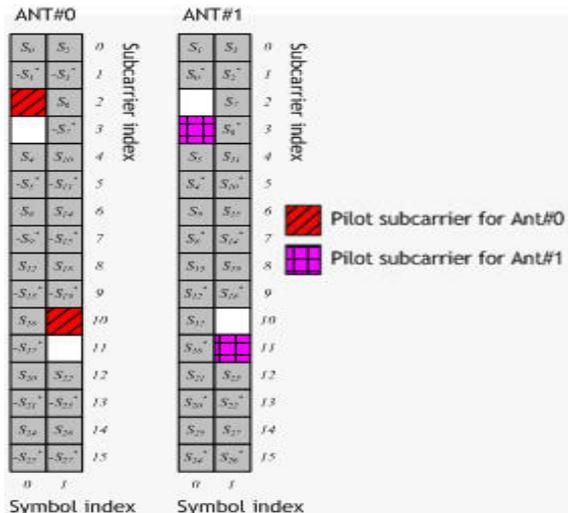


Fig. 9. Subcarrier allocation per a slot by antennas for transmission matrix A

전송행렬 A는 시공간 다이버시티를 목적으로 한 행렬로서 Code Rate는 1이다. 행렬 A의 행은 안테나 공간(안테나 1,2), 열은 심벌시간을 의미한다. 이러한 행렬 구성요소를 1개 slot을 기준으로 2개 안테나에 할당하면 Fig. 9와 같다.

SM의 전송행렬 C는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$C = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

전송행렬 C는 SM을 목적으로 한 행렬로서 Code Rate는 2이다. 이러한 행렬 구성요소를 1개 slot을 기준으로 2개 안테나에 할당하면 Fig. 10과 같다.

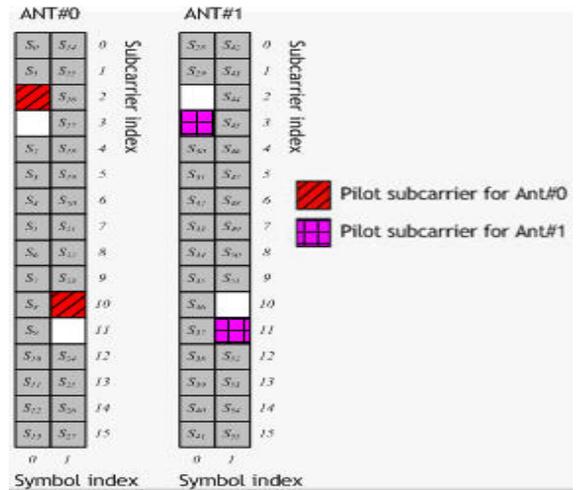


Fig. 10. Subcarrier allocation per a slot by antennas for transmission matrix C

2.4.3 디코딩 알고리즘 설계

ULDCH 기준 단말기 송신 안테나 2개와 기지국 수신 안테나 4개를 고려하면, Fig. 11과 같은 기지국의 MIMO 디코딩 블록을 구성할 수 있다. STBC의 경우 Alamouti 디코더를 적용하고, SM인 경우 MML 디코더를 사용한다. 4개의 기지국 수신 안테나 각각에 대한 선형위상 보상 신호와 채널 추정 결과가 Alamouti 디코더와 MML 디코더로 각각 입력되고, Alamouti 디코더는 기지국 수신 안테나 개수에 대응하여 4개가 존재한다. MML은 최적 성능을 갖는 ML과 성능이 동일하면서, 디코딩 연산량은 ML에 비해 매우 적은 SM 디코딩 알고리즘이다.

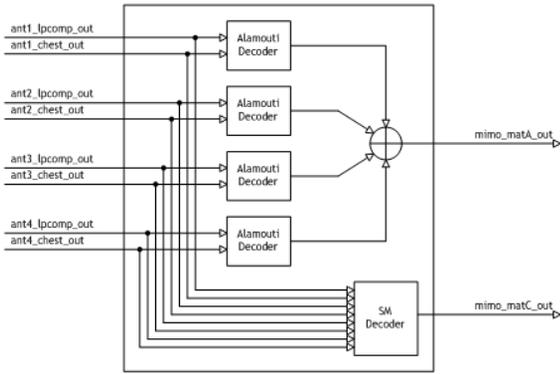


Fig. 11. Base station MIMO decoding block

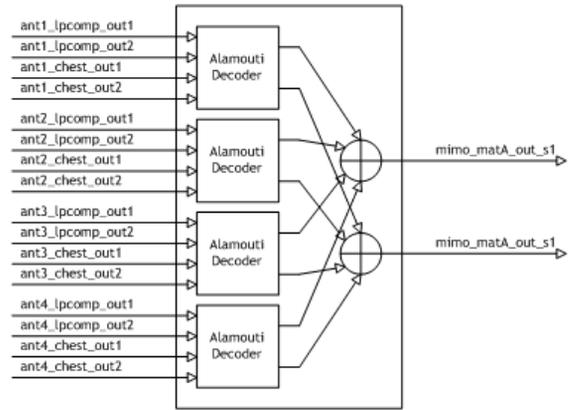


Fig. 13. 4-rx combining of Alamouti decoders

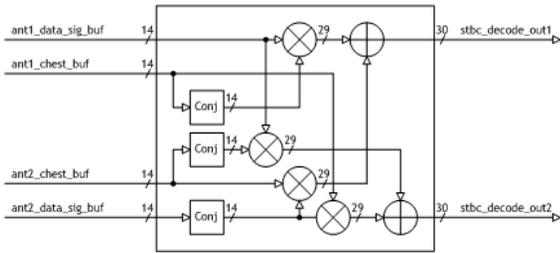


Fig. 12. Alamouti decoder for 1-rx path

ULDCH 기준 STBC의 경우, 식 (4)와 같은 송수신 관계식이 성립된다.

$$\begin{bmatrix} r_0(k) & r_0(k+1) \\ r_1(k) & r_1(k+1) \\ r_2(k) & r_2(k+1) \\ r_3(k) & r_3(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} \\ h_{10} & h_{11} \\ h_{20} & h_{21} \\ h_{30} & h_{31} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 & -s_1^* \\ s_1 & s_0^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0 & n_0 \\ n_1 & n_1 \\ n_2 & n_2 \\ n_3 & n_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Fig. 12는 1개의 기지국 수신 안테나 경로에 대한 Alamouti 디코더를 나타낸다. i 번째 디코더의 입력은 선형위상 보상 신호인 $r_i(k)$ 와 $r_i(k+1)$, $i = 0, 1, 2, 3$ 와 채널 추정 결과인 h_{i0} 와 h_{i1} , $i = 0, 1, 2, 3$ 이다. 또한, i 번째 디코더의 출력은 2개로서 식 (5)와 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} y_{i0} &= r_i(k)h_{i0}^* + r_i^*(k+1)h_{i1} \\ &= (|h_{i0}|^2 + |h_{i1}|^2)s_0 + n_i h_{i0}^* + n_i^* h_{i1}, i = 0, 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} y_{i1} &= r_i(k)h_{i1}^* - r_i^*(k+1)h_{i0} \\ &= (|h_{i0}|^2 + |h_{i1}|^2)s_1 + n_i h_{i1}^* - n_i^* h_{i0}, i = 0, 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (6)$$

Fig. 13은 4개의 수신 안테나를 갖는 기지국의 Alamouti 디코더들의 결합 형태를 보여준다. 최종 출력값 Y_0 와 Y_1 은 식 (7)과 식 (8)과 같다.

$$Y_0 = \sum_{i=0}^3 y_{i0} = \left[\sum_{i=0}^3 (|h_{i0}|^2 + |h_{i1}|^2) \right] s_0 + \sum_{i=0}^3 (n_i h_{i0}^* + n_i^* h_{i1}) \quad (7)$$

$$Y_1 = \sum_{i=0}^3 y_{i1} = \left[\sum_{i=0}^3 (|h_{i0}|^2 + |h_{i1}|^2) \right] s_1 + \sum_{i=0}^3 (n_i h_{i1}^* - n_i^* h_{i0}) \quad (8)$$

식 (7)과 식 (8)로부터 채널 보상된 데이터 신호를 추출하고, 순방향 에러 정정(FEC : Forward Error Correction) 디코더 성능을 극대화하기 위해 각 비트에 대해 연관성 방식을 사용하는 로그 가능성 비율(LLR : Log Likelihood Ratio) 계산을 수행한 후, 그 결과가 FEC 디코더로 입력된다. SM의 디코딩 방식으로 적용되는 MML은 ML 방식과 동일 성능을 가지면서 디코딩 연산량 감소 효과를 갖는다. 보통 송신 안테나 개수가 2개인 경우 매우 효과적이어서 2x4 SM 방식에 적합하다. MML 신호검출 방식의 주요 개념은 송신 안테나 개수가 m 이고, 수신 안테나 개수가 n 일 때 $|C|^{m-1}$ 개의 가능한 송신신호 벡터 조합 각각에 대해 ML metric 계산을 수행한 결과로부터 획득된 최소 metric을 갖는 $(m-1)$ 개 송신 심벌 ML 해를 구한 다음, ML 해의 필요충분조건을 이용하여 나머지 하나의 송신 심벌을 추출하는 것이다^[6]. ULDCH 기준 SM의 경우, 식 (9)와 같은 송수신 관계식이 성립될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} r_0 \\ r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} \\ h_{10} & h_{11} \\ h_{20} & h_{21} \\ h_{30} & h_{31} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0 \\ n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

SM의 MML 디코딩 방식에서 적용되는 ML 해의 필요충분조건^[6]을 식 (9)와 같은 2×4 SM 시스템에 적용하면, 식 (10)과 식 (11)로부터 각 송신 안테나의 송신 심벌 s_0 와 s_1 을 구할 수 있다.

$$\bar{s}_{1,ML} = s_{0,ML} = \arg \min_{s_0 \in C} \left\| r - h_0 s_0 - h_1 Q \left(\frac{h_1^H}{\|h_1\|^2} (r - h_0 s_0) \right) \right\| \quad (10)$$

$$s_{1,ML} = Q \left(\frac{h_1^H}{\|h_1\|^2} (r - h_0 s_{0,ML}) \right) = Q \left(\frac{1}{\|h_1\|^2} (h_1^H r - h_1^H h_0 s_{0,ML}) \right) \quad (11)$$

여기서 $h_i = [h_{0i} \ h_{1i} \ h_{2i} \ h_{3i}]^T$, $i \in \{0,1\}$ 는 채널이득 행렬 H 의 i 번째 열을 나타내고, i 번째 송신 안테나로부터 [0~3]번째 수신 안테나로의 채널이득을 나타낸다. $Q(\cdot)$ 은 Slicing 함수로서 식 (12)로 정의된다. 여기서 C 는 성상도의 복소수 점들로 이루어진 집합이다.

$$Q(\hat{s}) = \arg \min_{s \in C} |s - \hat{s}| \quad (12)$$

3. 데이터 가용 전송률 분석

본 절에서는 앞에서 기술된 시스템 특성, 파라미터, 프레임 구조 및 데이터 전송을 위한 STBC/SM 설계 내용을 기반으로 변조방식, 코딩율 및 MIMO 전송방식에 따른 프레임 내 각 영역의 데이터 가용 전송률을 분석한다. 적용되는 FEC 데이터 블록 크기는 Table 4와 같다. DLCCH와 AHCCH 영역에서는 안정성 및 데이터 통달거리를 고려하여 STBC 방식의 QPSK, 1/2만을 적용하고, ULDCCH 영역에서는 다양한 코딩율 및 변조방식을 갖는 STBC와 SM을 적용한다. 영역의 가용 전송률을 R , 한 심벌 당 FEC 데이터 블록 크기를 K , 영역의 심벌 개수를 N_{symbol} , 초 당 프레임들의 개수를 N_{frames} (=160 frames/sec), 다중화 이득을 G (STBC의 경

우 1, SM의 경우 2)라고 하면, 프레임 내 각 영역의 데이터 가용 전송률을 식 (13)과 같이 정리할 수 있다.

$$R = K \times N_{symbol} \times N_{frames} \times G \quad (13)$$

Table 4. FEC data block size

영역	코딩율	변조 방식	FEC 데이터 블록 크기(K)	
DLCCH	1/2	QPSK	416bits/symbol	
AHCCH	1/2	QPSK	416bits/symbol	
ULDCCH	1/2	QPSK	416bits/symbol	
	2/3		560bits/symbol	
	5/6		688bits/symbol	
	1/2	16QAM	832bits/symbol	
	2/3		1,120bits/symbol	
	5/6		1,376bits/symbol	
	1/2		64QAM	1,248bits/symbol
	2/3			1,680bits/symbol
5/6	2,064bits/symbol			

각 영역 별 변조방식, 코딩율 및 MIMO 모드에 따른 데이터 가용 전송률을 분석하여 Table 5로 정리하였다.

Table 5의 가용 전송률을 식 (14)의 Shannon의 시스템 용량 이론과 연계하면 다음과 같다. 식 (14)를 보면, 부가 백색 가우시안 잡음(AWGN : Additive White Gaussian Noise)에 의해 영향 받는 채널의 시스템 용량 C 는 평균 수신신호 전력 S , 평균 잡음전력 N 및 대역폭 W 의 함수로 표현된다.

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (14)$$

지상 무인체계용 다중입출력 통신 시스템의 대역폭 W 가 4MHz이고, SNR이 30dB로서 양호하다고 가정하면, 정보 이론적인 최적 용량은 약 40Mbps로 계산된다. 이는 Table 5에서 보는 바와 같이 최대 약 18.5 Mbps인 경우와 비교 시 정보 이론적 최적 용량 대비 약 50% 정도의 가용 전송률을 달성함을 알 수 있다.

Table 5. Supporting transmission rates

방식 \ 영역	DLCCH [kbps]	ULDCH [kbps]	AHCCH [kbps]
STBC/SISO QPSK,1/2	399.36	1,863.68	266.24
STBC/SISO QPSK,2/3	537.60	2,508.80	358.40
STBC/SISO QPSK,5/6	660.48	3,082.24	440.32
STBC/SISO 16QAM,1/2	798.72	3,727.36	532.48
STBC/SISO 16QAM,2/3	1,075.20	5,017.60	716.80
STBC/SISO 16QAM,5/6	1,320.96	6,164.48	880.64
STBC/SISO 64QAM,1/2	1,198.08	5,591.04	798.72
STBC/SISO 64QAM,2/3	1,612.80	7,526.40	1,075.20
STBC/SISO 64QAM,5/6	1,981.44	9,246.72	1,320.96
SM QPSK,1/2	-	3,727.36	-
SM QPSK,2/3	-	5,017.6	-
SM QPSK,5/6	-	6,164.48	-
SM 16QAM,1/2	-	7,454.72	-
SM 16QAM,2/3	-	10,035.2	-
SM 16QAM,5/6	-	12,328.96	-
SM 64QAM,1/2	-	11,182.08	-
SM 64QAM,2/3	-	15,052.8	-
SM 64QAM,5/6	-	18,493.44	-

Table 6. Experiment condition and environment

기지국	단말기	비고
• ULDCH - 2×4 STBC, SM - SISO	• DLCCH - 4×2 STBC - 2×2 STBC - SISO • ULDCH - 2×2 STBC - SISO	<ul style="list-style-type: none"> • 기준 PER : 3% • 적용 MPR <ul style="list-style-type: none"> - QPSK,1/2(m=1) - 16QAM,1/2(m=2) - 64QAM,1/2(m=3) - 64QAM,2/3(m=4) - 64QAM,5/6(m=5) • 적용 무선채널 - ITU Vehicular-A 30km/h



Fig. 14. Experiment scene

4. 데이터 수신 성능 분석

본 절에서는 구현 및 제작된 지상무인체계용 통신장치의 데이터 수신 성능을 시험 분석한다.

4.1 시험조건 및 환경

기지국과 단말기의 데이터 수신 성능을 MIMO 및 SISO 모드에서 수신감도와 SNR 기반으로 비교 분석하였다. 무선 채널 Emulator로 AZIMUTH사의 ACE-MX/LF를 사용하였고, 무선채널 모델은 지상로봇 운용과 가장 유사한 ITU Vehicular-A 30km/h 페이딩 채널을 적용하였다. 기준 패킷 에러율(PER : Packet Error Ratio)을 3% 이하로 하고, 변조 곱 코딩율(MPR : Modulation Product code Rate)을 1, 2, 3, 4, 5로 선택하였다. Table 6은 시험조건 및 환경을 정리한 것이며, Fig. 14는 실제 시험 구성 모습을 보여준다.

4.2 기지국 수신 성능 분석

기지국의 수신 성능을 시험 분석하기 위해 단말기와 1홉 통신환경을 구성하여 ULDCH 영역에서 2×4 STBC/SM과 SISO 시험을 수행하였다. Fig. 15(a)는 기지국의 ULDCH 영역 수신감도 성능 측정 결과이고, Fig. 15(b)는 기지국의 ULDCH 영역 수신감도 성능에 따른 SNR 측정 결과이다. STBC는 SISO에 비해 평균 14dB 향상된 수신감도 성능과 평균 13dB 향상된 SNR 성능을 보여준다. 또한, SM은 SISO에 비해 평균 6.3dB 향상된 수신감도 성능과 평균 5.4dB 향상된 SNR 성능을 보여준다. 위와 같은 결과로부터 ITU Vehicular-A 30km/h 페이딩 채널 환경에서 SM은 SISO에 비해 데이터 통달거리 및 전송률 측면에서 유리하며, STBC는 SISO에 비해 데이터 통달거리 측면에서 상당한 이득을 얻을 수 있다는 사실을 확인할 수 있다.

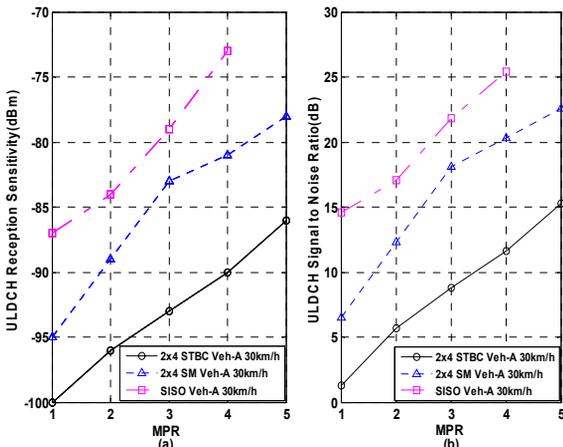


Fig. 15. (a) Reception sensitivity measurement results (b) SNR measurement results for BS ULDCH

4.3 단말기 수신 성능 분석

단말기의 수신 성능을 시험 분석하기 위해 기지국과 1홉 통신환경을 구성하여 DLCCH 영역에서 4×2 STBC와 SISO 시험을 수행하고, 기지국과 단말기 2대로 2홉 통신환경을 구성하여 단말기들 간 DLCCH 및 ULDCH 영역에서 2×2 STBC와 SISO 시험을 수행하였다.

Table 7. Reception sensitivity and SNR measurement results for MS DLCCH

모드	4×2 STBC	2×2 STBC	SISO	비고
수신감도(dBm)	-98	-97	-93	MPR = 1
SNR(dB)	2.23	3.12	8.62	

Table 7은 단말기의 DLCCH 영역에서 MPR이 1인 경우에 수신감도 성능 및 SNR 측정 결과를 나타낸다. 기지국과 단말기 간 4×2 STBC와 단말기들 간 2×2 STBC는 SISO에 비해 4~5dB 향상된 수신감도 성능과 5~6dB 향상된 SNR 성능을 보여준다. 이렇게 DLCCH 영역에서 STBC는 SISO에 비해 반드시 수신되어야 하는 파라미터 설정, 통신 자원 할당 및 제어 정보들을 로봇 단말들에게 보다 안정적이고 신뢰성 있게 전달할 수 있게 한다.

Fig. 16(a)는 단말기의 ULDCH 영역 수신감도 성능 측정 결과이고, Fig. 16(b)는 단말기의 ULDCH 영역 수신감도 성능에 따른 SNR 측정 결과이다. STBC는

SISO에 비해 평균 약 8dB 향상된 수신감도 성능과 평균 8dB 향상된 SNR 성능을 보여준다. 위와 같은 결과로부터 STBC는 SISO에 비해 중단 단말기와 중계 단말기 간 데이터 통달거리 증대에 유리하다는 사실을 확인할 수 있다.

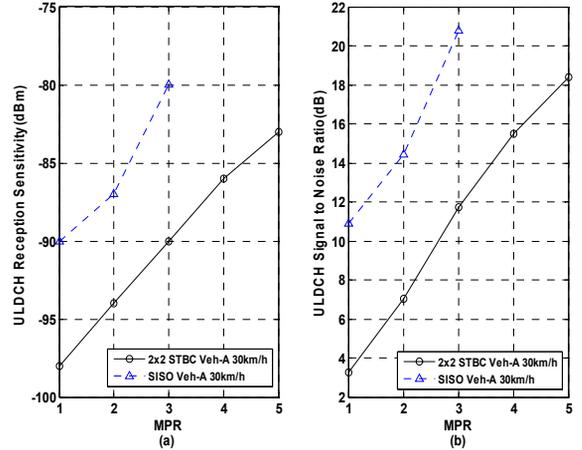


Fig. 16. (a) Reception sensitivity measurement results (b) SNR measurement results for MS ULDCH

5. 결론

본 논문에서는 실시간 지상로봇 원격통제를 위해 제작 및 구현된 지상 무인체계용 다중입출력 통신 시스템의 RF 모듈, 모뎀 모듈, 프레임 구조 및 다중입출력 시스템 설계 사항들을 기술하고, 데이터 가용 전송률을 분석하였다. 프레임 각 영역 별로 기지국과 단말기의 데이터 수신 성능을 수신감도 및 SNR 측면에서 STBC와 SM 모드로 시험하고, SISO 모드와 성능 비교 분석하였다. 분석 결과, 다중경로 페이딩 채널 환경에서 SM은 SISO에 비해 향상된 수신감도 및 SNR 성능을 보여줌으로써 데이터 통달거리와 데이터 가용 전송률에서 유리하며, STBC는 SISO에 비해 월등한 수신감도 및 SNR 성능을 보여줌으로써 안정적인 신뢰성 있는 데이터 송수신을 통한 통달거리 증대가 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 향후, 이러한 지상 무인체계용 다중입출력 통신 시스템이 대용량 데이터 및 넓은 작전 운용 범위 등을 요구하는 미래 지상 무인전장 환경에서 크게 기여할 것으로 판단된다.

References

- [1] A. J. Paulraj, "An Overview of MIMO Communications - A Key to Gigabit Wireless," Proceeding of IEEE, Vol. 92, No. 2, pp. 198-218, 2004.
- [2] B. M. Hochwald, "Achieving Near-Capacity on a Multiple-Antennas Channel," IEEE Trans. Commun., Vol. 51, No. 3, pp. 389-399, 2003.
- [3] J. You, J. Choi, H. Kang, I. Baek, "Decoding Complexity Comparison Research of Spatially Multiplexed MIMO System," KIMST Annual Conference Proceedings, Vol. 1, No. 1, pp. 543-546, June, 2011.
- [4] J. You, J. Choi, H. Kang, "Analysis on Implementation Complexity of Spatially Multiplexed Asymmetric MIMO System," The 2012 Fall Conference of Korea Multimedia Society, Vol. 15, No. 2, pp. 464-467, Nov, 2012.
- [5] J. You, J. Choi, H. Kang, W. Jang, "High-Capacity Data Transmission Technology Research based on 4×4 MIMO System," KIMST Annual Conference Proceedings, Vol. 1, No. 1, pp. 379-382, June, 2012.
- [6] J. Kim, Y. Kim, K. Kim, "Computationally Efficient Signal Detection Method for Next Generation Mobile Communication Using Multiple Antennas," SK Telecommunication Review, Vol. 17, No. 1, pp. 183-191, 2007.