

암호화를 적용한 위성 고속링크의 성능 분석

황란미*, 정원호*, 여봉구*, 김승우*,
김기홍**, 박상현**, 양상운**, 임정석**, 김경석***

Performance Analysis of the Satellite High Speed link applying the Encryption

Lan-Mi Hwang*, Won-Ho Jeong*, Bong-Gu Yeo*, Seoung-Woo Kim*,
Ki-Hong Kim**, Sang-Hyun Park**, Sang-Woon Yang**, Jeong-Seok Lim**, Kyung-Seok Kim***

요 약

위성통신은 상공에 있는 인공위성으로 통신하는 방식으로 고속 대용량 전송이 가능하며, 통신 구역이 넓다는 장점이 있는 반면 정보의 보안성이 없다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 AES 암호화를 CTR과 CBC 모드를 적용하였다. 또한, 송신기와 수신기 사이에 나무나 건물 등의 장애물로 인해 발생하는 영향을 알아보기 위해 Markov chain을 이용하여 Blockage channel을 Urban과 Open 환경으로 구성하였다. 위성통신 고속링크 기반의 시뮬레이션을 통해 성능을 분석해 본 결과, 암호화를 적용한 경우 보안성은 보완되거나 BER의 성능이 악화됨을 보였고, 장애물이 적은 Open 환경에서 장애물이 많은 Urban 환경보다 BER 성능이 향상됨을 확인하였다.

Key Words : Satellite communications; AES Encryption; Markov chain; Blockage Channel; Bit error rate.

ABSTRACT

Satellite communication is high-speed large-capacity transmission in such a manner as to communicate with satellites in the chamber, and there is a wide area communication, but is not the security of the information. To compensate for this, AES encryption was applied to the CTR and CBC mode. Also, Blockage channel using a Markov chain to determine the impact caused by obstacles such as trees or buildings between the transmitter and the receiver was composed of Urban and Open Environment. The results of analyzing the performance of satellite communications over a high-speed link-based simulation, If applying encryption, performance of security is complementary but performance of the BER was aggravated and In the Open Environment fewer obstacles confirmed the BER performance is improved than the Urban Environment many obstacles.

I. 서 론

위성통신은 대기권 밖의 상공에 있는 인공위성을 통신의 중계기로 이용한 통신 방법으로 통신가능 구역이 넓고, 마이크로파를 사용하기 때문에 고속 대용량 전송이 가능하여 멀티미디어 데이터 통신이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 왕복시간이 길어 전파 지연이 발생하고, 정보의 보안성이 없다는 단점이 있다. 보안성의 단점을 보완하기 위해서 위성통신에서는 암호화를 사용하여 데이터를 송·수신 할 필요가 있다. 또한, 위성통신은 송신기/수신기와 위성과의 LOS(Line Of Sight) 상태인 전송 데이터가 장애물에 의해 차단되지 않

고 송신기에서 수신기로 직진하여 직접 도달하는 상태가 되어야 통신이 가능하다. 이진 위성통신에서는 LOS 확보를 위하여 사전에 장애물을 제거하거나 없는 상태에서 통신을 하였다. 하지만, 보다 실질적인 환경을 고려하기 위해서는 Blockage 채널을 적용하여 나무, 건물 등 위성 단말과 위성체 간의 장애물로 인한 심각한 신호 손실의 발생 가능성을 두고 환경에 영향을 받아 발생하는 Blockage 채널을 정확히 식별할 필요가 있다[1]. 또한, 차기 군 위성통신체계는 기존 ANASIS 체계 대비 통신영역을 확장하고 중계용량을 3배 이상 제공하기 위하여 주파수 사용 효율을 증대하기 위해 주파수와 시간 자원을 동시에 동적으로 운용하는 MF-TDMA(Multi Frequency-Time Division Multiple

※ 본 연구는 한국전자통신연구원 부설연구소의 지원으로 수행하였음.
*충북대학교 전파통신공학과소속 스마트무선통신연구실, **한국전자통신연구원 부설연구소 연구원
***충북대학교 전파통신공학과소속 스마트무선통신연구실 교신저자 (kseokkim@cbnu.ac.kr)
접수일자 : 2015년 10월 19일, 최종게재확정일자 : 2015년 12월 24일

Access) 기법을 적용 할 것으로 예상된다[2].

본 논문에서는 위성통신 기반의 고속링크에서 위성통신의 단점인 보안성 악화를 보완하는 암호화를 적용하고, 암호화가 미치는 영향을 분석하기 위하여 AES 암호화 알고리즘의 CTR과 CBC모드를 각각 적용하여 분석하였다. 또한 변조 방식은 OQPSK(Offset Quadrature Phase-Shift Keying)와 16APSK(Amplitude Phase-Shift Keying)의 방식을 적용하였고, 채널 코드는 CTC(Convolutional Turbo code)를 사용하고 채널 디코드는 MAP 알고리즘을 사용하여 적용하였다. 자원 할당 방식은 DAMA(Demand Assigned Multiple Access) 방식의 RCP-fit 방식을 사용하여 MF-TDMA 기법을 적용하였다. 마지막으로, 성능을 비교하기 위하여 비트 오류율(BER ; Bit Error Rate)은 신호 대 잡음비(SNR ; Signal to Noise Ratio)로 나타내었다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 위성통신 기반의 고속링크에서 사용하는 위성 시스템의 블록도를 제시하고, 구조에 대해서 기술한다. 3장에서는 위성채널 기법인 2-State Markov 기반의 Blockage 채널을 제시하고, 수식을 통해 2-State Markov 모델의 Transition 확률을 도출한다. 4장에서는 제안하는 기법의 BER 성능을 SNR로 나타내어 결과를 분석하고, 마지막으로 5장에서는 결론을 제시한다.

II. 위성통신 기반 고속링크 시스템

본 논문에서 제시하는 위성통신 기반의 고속링크의 시뮬레이션 흐름도는 [그림 1]과 같다. 입력 데이터는 AES 암호화의 CTR이나 CBC모드를 통해 암호화되고, 암호화 된 데이터는 채널 코드인 CTC(Convolutional Turbo Code)와 변조방식인 OQPSK와 16APSK를 거친 후, 자원 할당 알고리즘인 DAMA(Demand Assigned Multiple Access) 방식 중 주파수 축에 따라 자원을 할당하는 RCP-fit 방식이며, DAMA 방식은 자원 요청 시 유동적으로 회선 할당을 하여 회선 구성이 가변적이며, 주파수 효율이 높고 지원 단말의 수가 많다는 장점이 있다[3]. 이 데이터는 FDMA(Frequency Division Multiple Access)와 TDMA(Time Division Multiple Access)을 결합한 MF-TDMA 방식을 통해 자원을 할당한 후, 위성 채널을 통해 수신기로 전송한다. 수신기는 송신기의 역순으로 진행된다. 이 때 채널 디코드는 MAP(Maximum A Posteriori) 알고리즘을 사용한다. 최종 출력된 데이터와 입력된 데이터를 비교하여 비트 오류율 SNR로 나타낸다.

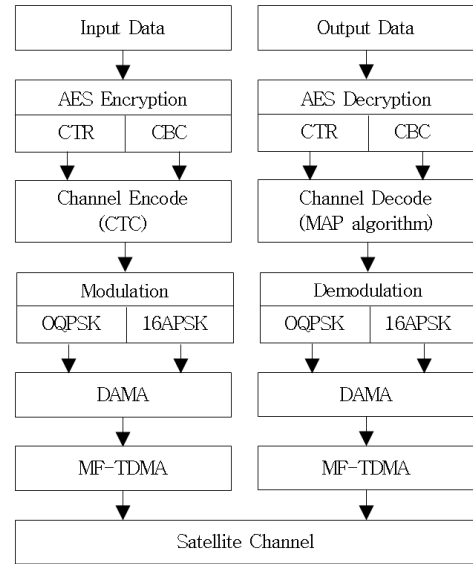


그림 1. 고속링크의 시뮬레이션 흐름도

1. MF-TDMA 구성

본 논문에서는 위성 고속링크 분석을 위해 전송속도를 2Mbps로 적용하여 진행하였다. 주파수의 대역은 X band인 8GHz에서 ±1MHz로 총 대역폭은 2MHz이고, 채널수는 4개로 임의 설정하였다. [그림 2]는 MF-TDMA의 Frame의 구성하였다.

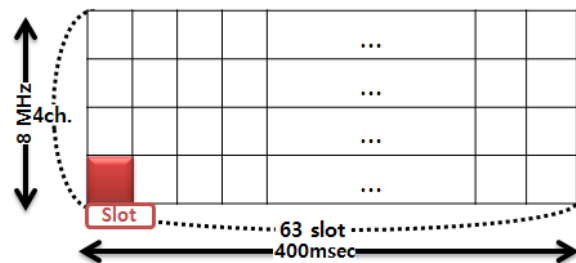


그림 2. MF-TDMA Frame 구조

Packet은 Data 12,000bits와 Key 584bits로 구성되어 있다. 전송속도는 2Mbps로 1sec에 한 채널당 2Mbits를 전송하는데, 본 논문에 제시되어 있는 환경인 400msec에서는 0.8Mbits를 전송한다. 이를 총 패킷 길이인 12,584bits로 나누면, 약 63slot을 유도할 수 있다.

슬롯 당 비트 수는 식(1)과 같이 구할 수 있다[4].

$$r_{i,j} = M_i \times C_j \times B_s \times T_s \quad (1)$$

OQPSK의 경우, 슬롯 당 비트 수는

$$r_{i,j} = 2 \times \frac{1}{2} \times 2MHz \times 6.35msec = 12,698bits \quad (2)$$

16ASPK의 경우, 슬롯 당 비트 수는

$$r_{i,j} = 4 \times \frac{1}{2} \times 2MHz \times 6.35msec = 25,396bits \quad (3)$$

으로 구할 수 있다.

2. AES 암호화 과정

AES 암호화에서 CTR 모드는 암호화와 복호화의 구조가 같다. 이 과정에서 병렬 처리를 하므로 한 블록이 손상된 경우, 손상된 한 블록에만 영향을 미치지만 암호화 키 유출시 전체 보안성이 결여된다는 단점이 있다. 이에 반해 CBC 모드는 암호화와 복호화의 구조가 다르다. 또한, 암호화와 복호화 과정에서 병렬처리가 불가능 하므로 복호화 과정에서 전단의 암호블록이 사용돼 전 블록이 손상된 경우, 그 다음 블록도 손상된다. 하지만 초기벡터(IV) 키 유출시 첫 암호 블록만 영향을 미친다는 장점이 있다[5].

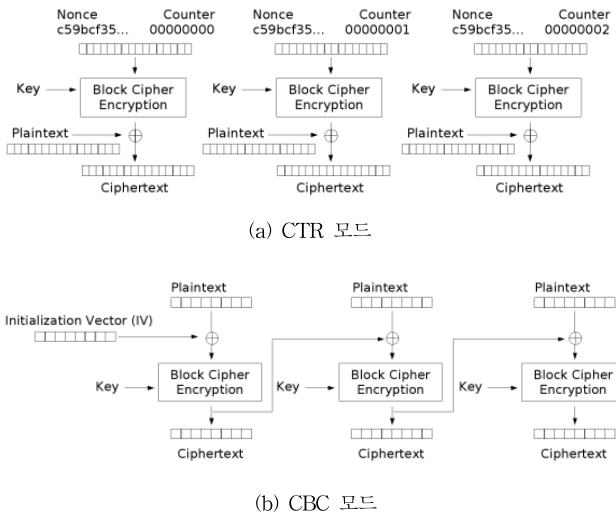


그림 3. 모드 별 암호화 과정

3. 채널 코더

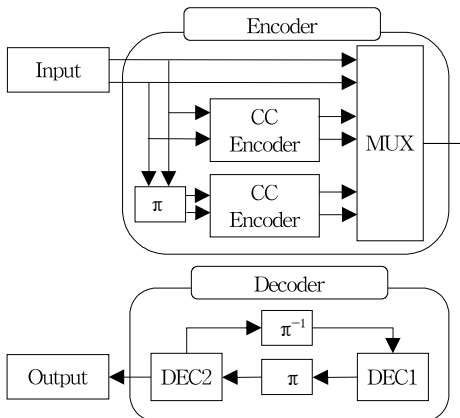


그림 4. 채널 코더 구조

채널 인코더로 사용된 CTC는 1993년 C. Berrou, A. Glavieux, P. Thitimajshima에 의해 제안되었으며 고속의 데이터 전송을 위한 코드이다[6]. 채널 디코더로 사용된 MAP 알고리즘은 연결한 이진 비트로 형성된 2비트 심볼에 대해 복호를 수행하는 것이 기존 터보코드와는 다르나 알고리즘은 유사한 코드이다. [그림 4]과 같이 CC(Convolutional code) 인코더를 병렬 연결한 CTC를 사용하여 채널 인코딩하고, MAP 알고리즘을 사용하여 채널 디코딩을 한다.

4. 변조방식

이 논문에서 사용한 변조방식은 OQPSK과 16APSK이다. OQPSK는 QPSK보다 작은 진폭 변동폭을 가졌으나 심볼 간의 간섭율과 전송속도가 증가한다는 단점이 있다. 16APSK는 전송속도가 모듈레이션 변경 시 비트 당 심볼 수 증가로 인해 향상 가능하지만 장거리 전송 시에는 큰 SNR이 필요한 단점이 있다[7].

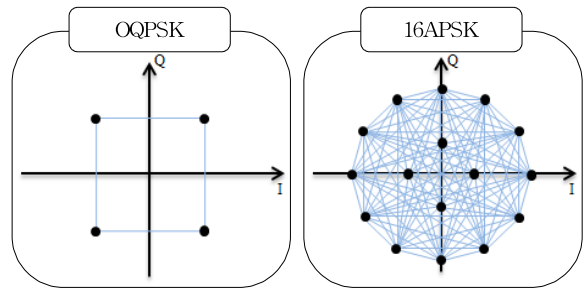


그림 5. 변조방식의 성상도

III. 2-State Markov 기반의 Blockage 채널 기법

본 논문에서는 일반 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 위성채널과 위성과 단말 간의 통신 링크 상 발생할 수 있는 장애물을 2-State Markov로 적용한 Blockage채널을 비교한다.

1. 2-State Markov 기반의 Blockage 채널

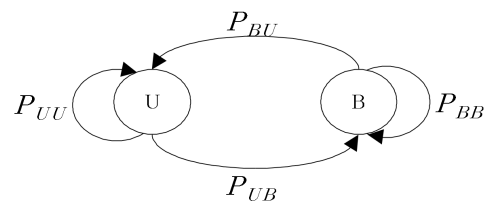


그림 6. 2-State Markov 기반의 Blockage

2-State Markov는 통신에서 일반적으로 적용하는 모델로 본 연구에서는 [그림 6]과 같이 채널 전이 확률이 Block와

Unblock 상태 사이에서 전환된다. 채널이 Unblock 상태(즉, Open 상태)인 경우에 모든 패킷은 성공적으로 통과되며, 채널이 Block 상태에서는 위성단말이 건물이나 나무 등에 의해서 위성체와 통신이 두절 되는 상태로 모든 패킷이 통신이 되지 않는다[8].

P_{UU} 는 Unblock 상태인 LOS 환경을 유지하는 확률이며, P_{BB} 는 Block 상태인 Blockage 환경을 유지할 확률이다. LOS 환경에서 Blockage 환경으로 천이되는 P_{UB} 는 $1 - P_{BB}$ 로 계산되며, Blockage 환경에서 LOS 환경으로 천이되는 P_{BU} 는 $1 - P_{UU}$ 로 계산할 수 있다.

T_U 는 전체 통신 시간 중 성공적으로 연결된 평균 시간이며, T_B 는 연결이 실패한 경우의 평균 시간으로, 다음과 같은 식(4)와 식(5)로 구할 수 있다[9].

$$T_U = \sum_{n=1}^{\infty} n P_{UB} P_{UU}^{n-1} = \frac{1}{P_{UB}} \quad (4)$$

$$T_B = \sum_{n=1}^{\infty} n P_{BU} P_{BB}^{n-1} = \frac{1}{P_{BU}} \quad (5)$$

따라서 Blockage 확률인 P_B 와 Unblockage 확률인 P_U 는 전체 시간 중 성공한 시간과 실패한 시간을 각 나눠 식(6)과 식(7)로 나타낼 수 있다[8].

$$P_B = \frac{T_B}{T_U + T_B} = \frac{P_{UB}}{P_{BU} + P_{UB}} = 1 - P_U \quad (6)$$

$$P_U = \frac{T_U}{T_U + T_B} = \frac{P_{BU}}{P_{BU} + P_{UB}} = 1 - P_B \quad (7)$$

또한, 식 (8)에서 제시된 채널 메모리 지속시간인 T_o 를 통해 P_{UU} 와 P_{BB} 를 유도할 수 있다. 이때, τ 는 상태 천이 확률이다[10].

$$T_o = \frac{T_U T_B}{T_U + T_B} = T_U P_B = T_B P_U \quad (8)$$

$$P_{UU} = P_U + (1 - P_U) e^{-\tau/T_o} \quad (9)$$

$$P_{BB} = 1 - P_U + P_U e^{-\tau/T_o} \quad (10)$$

2. 통신 환경에 따른 Blockage 채널 확률 값

Markov 기반의 Blockage 채널이 위성통신에 미치는 영향을 분석하기 위해 실측한 미국 Boston 지역인 Urban 환경과 Boston과 Hartford 지역의 고속도로인 Open 환경을 참고한다[11]. Urban 환경은 나무가 거의 없고 높은 건물이 밀집되어 있는 도심환경으로 Blockage Fraction는 약 89%로 높은 장애물 환경이다. Open 환경은 고속도로와 같이 건물이나 나무 등의 장애물이 거의 없는 지역으로 Blockage Fraction는 약 5%인 환경이다. 이때 2-State Markov 모델의

Transition 확률은 다음 [표 1]와 같다. Blockage Fraction 값을 나타내는 π_B 는 식 (11)을 통해 구할 수 있다. 이 값은 실제 Blockage Fraction값과 일치함을 볼 수 있다.

표 1. 2-State Markov 모델 파라미터

Location	P_{UU}	P_{UB}	P_{BU}	P_{BB}	π_B
Urban	0.9502	0.0498	0.0059	0.9941	0.89
Open	0.9988	0.0012	0.0221	0.9779	0.05

$$\pi_B = \frac{P_{UB}}{P_{UB} + P_{BU}} \quad (11)$$

IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

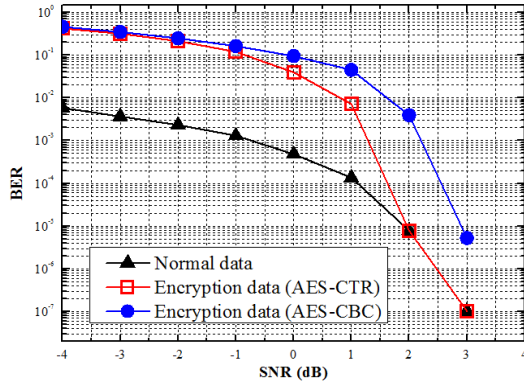
다음은 본 연구에서 적용한 시뮬레이션 환경이다.

표 2. 시뮬레이션 환경

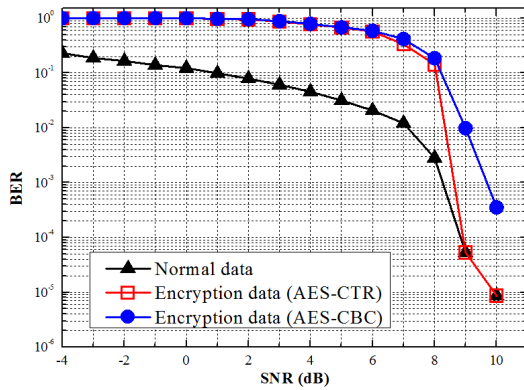
Parameter	Value
Frequency	8GHz(X band)±1MHz
Time slot	400ms
Information sequence length	K= 3.2 Mbits
Encryption Algorithm	AES (CTR/CBC mode)
Channel encoder	CTC(Convolutional Turbo Code)
Channel decoder	MAP Algorithm
Modulation	OQPSK/16APSK
Channel	AWGN/Blockage(Urban/Open)

[표 2]에 주어진 파라미터에 따라 위성통신 기반의 고속링크를 구성하였다. 주파수는 X band의 8GHz에서 대역폭이 2MHz, 타임 슬롯은 400ms인 환경으로 구성하였다. 전송 데이터는 앞의 2장 1의 MF-TDMA 구성에 따라 한 슬롯 당 12,698bits씩 총 63슬롯이 4개의 채널로 구성하여 320만 비트를 랜덤으로 발생시켰고, 암호화는 AES 암호화로 CTR과 CBC모드를 적용하여 고려하였다. 채널코더는 CTC와 MAP 알고리즘을 각 인코더와 디코더로 설정하였고, 변조방식은 OQPSK와 16APSK로 구성하였다. 채널은 AWGN 상태와 Blockage가 89%로 구성되어 있어 높은 장애물을 고려한 Urban 환경, Blockage가 5%로 비교적 낮은 Open 환경을 고려하였다.

4장에서 제시된 [표 2]의 시뮬레이션 환경을 바탕으로, 위성통신 기반의 고속 링크에서 채널에 따른 성능을 변조 방식에 따라 비트 오류율 값을 신호 대 잡음비로 성능분석하였다.



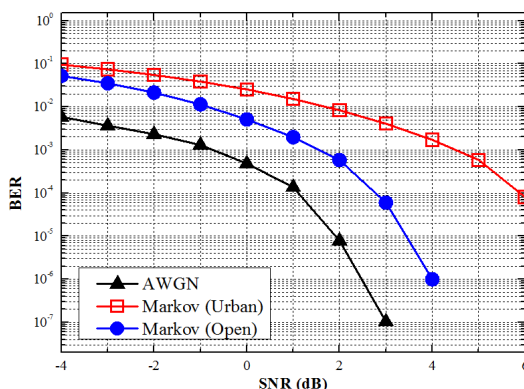
(a) OQPSK



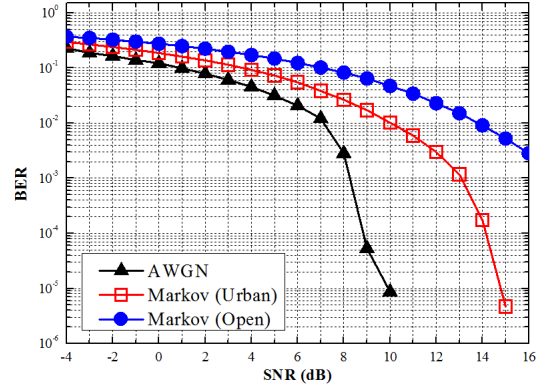
(b) 16APSK

그림 7. 변조방식에 따른 암호화 성능비교

[그림 7]의 (a)는 OQPSK 변조방식과 (b)는 16APSK 변조방식을 사용하여 각각 암호화 방식을 변화시켜 BER의 성능을 비교하였다. 두 변조방식에서 모두 암호화를 사용하지 않은 방식이 가장 좋은 성능을 보였고, 전단의 암호화 블록이 손상되면 그 다음 암호화 블록에도 영향을 미치는 CBC 모드에서 성능이 제일 좋지 않음을 보였다. 또한, 변조 심볼 간의 위상간격이 넓어 오류가 날 확률이 적은 OQPSK가 16APSK보다 성능이 향상하는 것을 확인하였다. OQPSK는 약 SNR이 3dB이상인 경우 모든 정보 비트가 오류 없이 수신되었으며, 16APSK인 경우는 10dB 이상에서 오류 없이 수신되었다. 이때의 채널은 모두 AWGN만 적용한 환경이다.



(a) OQPSK



(b) 16APSK

그림 8. 위성 채널에 따른 성능비교

[그림 8]의 (a)는 OQPSK 변조방식과 (b)는 16APSK 변조방식을 사용하여 암호화 방식을 적용하지 않은 상태에서 채널 환경을 변화시켜 BER의 성능을 비교하였다. 두 변조방식에서 모두 채널을 사용하지 않은 AWGN이 가장 좋은 성능을 보였고, 장애물이 약 0.05%로 거의 없는 환경인 Open 환경에서 장애물이 약 89%로 많은 Urban 환경보다 성능이 좋은 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

이 논문에서는 위성통신 기반에서 2Mbps를 적용한 고속링크에서 암호화와 Blockage에 따른 시스템의 성능을 비교 분석 하였다. 변조방식에서 OQPSK는 16APSK보다 성능이 증가하였다. 암호화를 적용한 경우 CBC 모드에서 성능이 제일 악화되었었다. Blockage 값은 실제 위성통신의 환경과 비슷하게 구성하기 위하여 Blockage를 Urban 환경과 Open 환경으로 나누어서 설정하였다. 비교 분석하기 위하여 이를 위하여 채널 환경을 기본적인 열잡음인 AWGN, 장애물이 많은 Urban 환경, 장애물이 없는 Open 환경을 모두 고려하여 성능을 확인하였다. 이 결과 채널을 고려하지 않은 AWGN이 가장 성능이 좋았으며, 장애물이 없는 Open 환경에서 다소 성능이 감소되었고, Urban 환경에서는 대부분의 데이터가 손실됨을 확인할 수 있었다. 이는 위성통신에서 장애물의 영향을 많이 받는 것으로 확인 할 수 있다.

이 논문의 연구 결과는 고속 위성통신에서 암호화와 Blockage에 따른 수신 성능을 향상시키기 위해 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] Seung-jun Lee, "A Study of Satellite-On-The-move communication For Blockage", KICS, 2013.
- [2] Soon Woo, "A Power Control-Based MF-TDMA Resource Allocation Scheme for Next Generation Military Satellite Communication Systems", KICS, Vol.37C, No.11, 2012.

[3] Jun He, "Design of An Effective Resource Allocation System in the Satellite Network using MF-TDMA DAMA Metho", KSCI, Vol.71, No.3, 2012.

[4] Jung-Min Park, "Allocation of QoS connections in MF-TDMA satellite systems : a two phase approach", IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, Vol. 54, No. 1, 2005.

[5] Yang Xiao, "MAC Security and Security Overhead Analysis in the IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2006.

[6] C. Douillard and C. Berrou, "Turbo codes with rate-m/(m+1) constituent convolutional codes," IEEE Trans. Commun, vol. 53, no. 10, pp.1630-1638, Oct. 2005.

[7] Wipil Kang, "Analysis of Common Data Link Technology Trends for the Next Generation Korean Common Data Link Development", Korea Information and Communications Society, Vol.39C No.03, 2014.

[8] H. Yao, EHF Satellite Communications-on-the-Move Blockage Channel Modeling, Lincoln Lab, 2004.

[9] Hyung-won Park, "Performance Analysis of Cooperative Communication with Spread Spectrum to Overcome Channel Blockage for On-The-Move Terminal in Next Generation Satellite Communication Systems", KSCI, Vol.39C, No.9, 2014.

[10] Huan Yao, "A Retransmission Strategy for Real-Time Streaming over Satellite in Blockage with Long Memory", MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE, 2011.

[11] W. M. Smith, Channel characterization for EHF satellite communications on the move, MIT-LL, Tech. Rep. TR-1109, Jul. 2006.

저자

황 란 미(Lan-Mi Hwang)



· 2014년 2월 : 충북대학교 정보통신공학 학사 졸업
· 2014년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전과 통신공학 석사과정

<관심분야> : MIMO-OFDM, 가시광 통신, 위성통신, 암호화 알고리즘, 채널 모델

정 원 호(Won-Ho Jeong)



· 2011년 2월 : 충북대학교 정보통신공학 학사 졸업
· 2013년 2월 : 충북대학교 전과통신공학 석사 졸업
· 2013년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전과통신공학 박사과정

<관심분야> : MIMO 무선채널, DDC, 디지털라디오, 위성통신

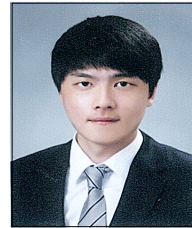
여 봉 구(Bong-Gu Yeo)



· 2015년 2월 : 충북대학교 정보통신공학 학사 졸업
· 2015년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전과 통신공학 석사과정

<관심분야> : 위성통신 분석, 무선통신 암호화 알고리즘

김 승 우(Seoung-Woo Kim)



· 2015년 2월 : 한남대학교 정보통신공학 학사 졸업
· 2015년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전과 통신공학 석사과정

<관심분야> : 전파통신, 위성통신, 전파신호처리

김 기 흥(Ki-Hong Kim)



· 1998년 2월 : 경북대학교 학사 졸업
· 2000년 2월 : 경북대학교 석사 졸업
· 2007년 8월 : 고려대학교 박사 졸업
· 1999년 12월 ~ 2000년 9월 : LG전자 (주)
· 2000년 9월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원

구원 부설연구소 선임연구원
<관심분야> : 유무선 통신, 신호처리, 정보보호 등

박 상 현(Sang-Hyun Park)



· 1993년 2월 : 충남대학교 학사 졸업
· 1996년 2월 : 충남대학교 석사 졸업
· 2008년 2월 : 충남대학교 박사 졸업
· 1996년 1월 ~ 2000년 11월 : 국방과학연구소
· 2000년 11월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원

구원 부설연구소 책임연구원
<관심분야> : 정보보호, VPN, VoIP 등

양 상 운(Sang-Woon Yang)



· 1992년 2월 : 충남대학교 학사 졸업
· 1998년 2월 : 충남대학교 석사 졸업
· 2010년 2월 : 충남대학교 박사 졸업
· 1992년 3월 ~ 2000년 4월 : 국방과학연구소
· 2000년 5월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원

구원 부설연구소 책임연구원
<관심분야> : 위성과제 및 통신, IoT 기기 보안, 고성능 IPsec 암호 프로세서, 스마트 그리드 보안 등

임 정 석(Jeong-Seok Lim)



- 1987년 2월 : 한양대학교 학사 졸업
- 1989년 2월 : 한양대학교 석사 졸업
- 2007년 2월 : 한양대학교 박사 졸업
- 1989년 2월 ~ 2000년 1월 : 국방과학 연구소
- 2000년 2월 ~ 현재 : 한국전자통신연

구원 부설연구소 책임연구원

<관심분야> : 채널코딩, 유무선 통신, 정보보호 등

김 경 석(Kyung-Seok Kim)



- 1989년 1월 ~ 1998년 12월 : 한국전자통신연구원 무선통신연구단 선임연구원
- 1999년 1월 ~ 2002년 3월 : University of Surrey(영국) 전기전자공학과 대학원 졸업(공학박사)
- 2002년 2월 ~ 2004년 8월 : 한국전자

통신연구원 이동통신연구단 책임연구원

· 2004년 9월 ~ 2005년 2월 : 전북대학교 생체정보공학부 전임강사

· 2005년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 정보통신공학과 부교수

<관심분야> : SDR, Cognitive Radio, MIMO-OFDM, 전력선 통신, 가시광 통신, 디지털라디오, 전파채널분석, 전파감시/관리시스템, 위성망분석