

차기 군 위성통신체계 환경에서 이동형 위성단말의 채널 blockage 극복을 위한 확산기반 협업통신 기법의 성능 분석

박형원*, 이호섭*, 윤원식^o

Performance Analysis of Cooperative Communication with Spread Spectrum to Overcome Channel Blockage for On-The-Move Terminal in Next Generation Satellite Communication Systems

Hyung-won Park*, Ho-sub Lee*, Won-sik Yoon^o

요 약

본 논문에서는 차기 군 위성통신체계 환경에서 OTM(On-The-Move) 위성단말의 채널 blockage 신호 손실 보상을 위한 협업통신 기법을 제안하였다. 제안하는 협업기법은 인접 OTM 위성단말과 지상 무전기 체계를 통해 데이터를 공유하고 직교확산코드를 이용하여 대역확산 후 동시에 전송한다. 중첩되어 전송된 확산열은 EGC(Equal Gain Combining) 방식으로 결합한다. 성능 분석을 위해 OTM 위성단말의 blockage 채널을 2-state Markov chain으로 모델링하였으며, 이를 기반으로 협업단말들의 blockage 채널 상태에 따른 비트오류율을 도출하였다. 성능분석 결과 채널 조건이 더 나은 인접 OTM 위성단말의 협업으로 비트오류율 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다. 특히 blockage 확률이 높을수록 협업을 통해 더욱 우수한 성능을 확인할 수 있었다. 그러나 서로 다른 지연을 갖는 확산열 간 중첩으로 인해 협업단말 수 증가 시 다중접속간섭으로 인한 성능상의 제약이 있음을 확인하였다.

Key Words : Satellite Communications, OTM Blockage channel, Cooperative Communication, Spread Spectrum

ABSTRACT

To compensate signal loss due to the channel blockage in satellite communication link, we propose a cooperative communication scheme for OTM(On-The-Move) terminal in next generation satellite communication systems. The proposed scheme configures cooperation subnet with adjacent OTM terminal with the help of ground communication equipment. Shared data is spread by orthogonal spreading code, then the spread sequences are transmitted simultaneously. The receiver combines the power of received signals by EGC(Equal gain combining). The OTM terminal blockage channel is modeled by 2-state Markov chain. We evaluate the bit error rate according to the blockage channel of the channel state for the performance analysis of the proposed scheme. As a result, the proposed scheme shows better BER performance than traditional scheme with the help of subset members. In particular, the proposed scheme shows superior performance as the channel block probability is higher. However, as the number of subset members is increasing, there is a constraint because of the higher multiple access interference.

* First Author : LIG Nex1 Communication R&D Lab, hyungwon.park@lignex1.com, 정회원

^o Corresponding Author : Ajou University Department of electrical and computer Eng., wsyoon@ajou.ac.kr, 정회원

* LIG Nex1 Communication R&D Lab, hosublee@lignex1.com

논문번호 : KICS2014-03-100, Received March 24, 2014; Revised April 23, 2014; Accepted June 16, 2014

I. 서 론

미래전은 전투기, 탱크, 군함 등과 같은 개별 플랫폼 중심에서 네트워크 중심의 시스템으로 변화될 것이며, 기존의 기동·화력 뿐만 아니라 지식·정보의 비중이 커질 것으로 예상된다. 따라서 승패의 주요 결정 요소는 플랫폼의 민첩성 또는 보유 무기의 사거리가 아닌 적보다 더 나은 상황인식능력이다. 이에 따라 선진국에서는 전시에든 지속적인 상황인식을 보장할 수 있는 안정적인 네트워크를 구축하기 위한 통신망에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

위성통신체계는 지형적 제약을 크게 받는 지상통신체계의 한계를 극복할 수 있기 때문에, 안정적인 대용량 데이터 전송을 요구하는 군 통신망 구축을 위해 사용되어 왔다. 특히 한국군은 36,000km 상공에 위치한 정지 궤도를 이용하여 한반도와 그 연안지역을 중심으로 육상, 해상, 공중에서의 지휘통신을 지원하는 군 위성통신체계를 구축하였다^[1]. 기존의 군 위성통신체계를 운용하는 지상단말은 지상의 고정용 단말, ATH(At-The-Halt) 개념의 차량용 단말, 수상함용 단말, 수중함용 단말 및 휴대대반용 단말로 구성되어 사용자에게 중계통신서비스 및 위성전화망 서비스를 직접 제공하였다^[2]. 또한 최근에는 신속한 작전템포에 따라 전장영역이 동적으로 변화되는 형태를 효과적으로 지원하기 위한 'On-The-Move(OTM)' 지원 능력의 요구에 따라 이를 지원할 수 있는 새로운 형태의 위성단말이 개발되고 있으며, 한국군의 차기 군 위성통신체계에도 적용될 것으로 예상된다.

이러한 위성통신망 체계는 위성체에서의 인접 채널 간 간섭에 의해 용량이 제한되는 단점을 갖는다. 때문에 지상 단말에서 송신하는 신호의 스펙트럼 밀도가 위성체에서 일정하게 유지될 수 있도록 송신 단말의 위성채널 상태를 반영한 전력제어가 연구되었다^[3-5]. 이러한 기존의 전력제어 방식은 대부분 위성단말과 위성체 간 LOS(Line Of Sight)가 안정적으로 확보되는 환경에서 강우감쇠로 인한 신호 손실을 보상하는 방식이다. 그러나 LOS가 유지되는 기존의 위성단말과는 달리 지상에서 이동 중 운용하는 개념의 OTM 위성단말은 위성단말과 위성체 간 장애물에 의한 채널 blockage에 의한 심각한 신호 손실이 발생할 수 있다. 채널 blockage 분석을 위해 [6]에서는 도심환경에서 실제 OTM 위성단말 운용 시 측정된 데이터를 기준으로 Markov 모델을 이용한 blockage 모델을 제시하였다. [7], [8]에서는 이러한 채널 blockage 등에 의한 위성추적 오차 발생 시 OTM 위성단말의

EIRP(Effective Isotropic Radiated Power) 방사 속성 및 이에 따른 규제 방안에 대한 연구결과가 제시되었다. 이와 같이 OTM 위성단말 운용 시 발생하는 채널 blockage에 대한 연구가 진행되고 있으나 현재까지 이를 보상하기 위한 알고리즘에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 차기 군 위성통신체계의 OTM 위성단말의 통신링크 상 blockage에 의한 신호손실을 보상하기 위한 협업통신 기법을 제안한다. 통상 채널 blockage에 의한 손실은 수십dB 이상^[6]이다. 따라서 장착 크기에 큰 제한을 받는 OTM단말의 자체 능력으로는 보상할 수 있는 범위를 벗어나기 때문에 제안하는 방식은 작전을 수행하는 OTM 위성단말 간 협업을 통해 가상의 다중 송신 안테나를 구성하여 발생 가능한 blockage 확률을 낮춘다. OTM 위성단말 간 협업을 위해 지상전술통신체계인 TICN(Tactical Information Communication Network)체계의 TMMR(Tactical Multi-band Multi- role Radio) 무전기^[9]를 이용하는 방식을 제안하였다. TMMR 단말로 공유된 인접 위성단말 간 송신 정보는 decode and forward 방식으로 위성체로 전달된다. 이 때 위성단말에서 다수 인접 위성단말의 정보를 동시에 전송하기 위해 협업통신에 참여하는 위성단말의 확산코드를 활용하는 방식을 제안하였다. 협업단말에서 동시에 전송된 확산열은 수신단말에서 EGC(Equal gain combine) 방식으로 보상된다. 제안하는 방식의 성능을 검증하기 위해 본 논문에서는 blockage 채널 조건에서 제안하는 방식의 BER을 분석하였다.

본 논문의 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 차기 군 위성통신체계에서 OTM 위성단말의 채널모델을 포함한 운용환경을 분석한다. 3장에서는 제안하는 협업통신 기법과 주어진 blockage 채널 환경에서 BER 모델을 제시한다. 4장에서는 제안하는 기법의 BER 성능 분석 결과를 논의한다. 마지막으로 5장에서는 결론을 제시한다.

II. OTM 위성단말 운용 환경

2장에서는 OTM 위성단말의 운용 환경을 분석한다. 먼저 차기 군 위성통신체계에서 OTM 위성단말 운용개념을 살펴본다. 다음으로는 실제 OTM 위성단말의 송·수신 경로 상에서 발생 가능한 blockage 채널 모델을 분석한다.

2.1 시스템 구성

차기 군 위성통신체계는 현재 군에서 운용되고 있는 아나시스 위성체계의 수명만료를 대비하여 이를 대체할 목적으로 위성체 및 지상운용단말 및 제어시스템 등을 포함하여 개발 중인 위성통신체계이다^[1]. 그림 1은 차기 군 위성통신체계의 OTM 위성단말이 운용되는 환경을 도시한 그림이다. OTM 위성단말은 이동 중에도 지속적으로 위성을 지향함으로써 이동 중 통신을 지원하는 단말이다. 그림에서와 같이 OTM 위성단말 운용환경은 지상의 운용국, 위성단말 및 위성체로 구성되며, OTM 위성단말 간은 TICN 체계를 통해 연동 가능하다. 차기 군 위성통신체계의 OTM 위성단말과 TICN 체계는 각각 미군 WIN-T 체계의 SOTM 위성단말^[12]과 JTRS 체계^[10]를 바탕으로 운용 개념과 단말 성능을 가정하였다. 지상의 운용국은 비콘신호를 위성체로 송출하며, 위성체는 수신한 비콘신호를 지상 위성단말로 중계한다. 지상의 위성단말은 중계된 비콘 신호 세기를 지속적으로 측정하여 위성 채널 상에서 발생하는 신호감쇠 수준을 예측한다. ATH 개념의 지상 운용국은 고정 설치되어 운용되므로 위성체와 단말 간 LOS를 확보할 수 있으나 OTM 위성단말은 위성채널 상에서 가우감쇠 뿐만 아니라 빌딩 등에 의한 채널 blockage의 영향을 받을 수 있다. 특히 OTM 위성단말은 이동 중 위성추적 오차로 인해 발생하는 인접위성 간섭을 줄이기 위해 대역확산 방식을 적용하고 있다.

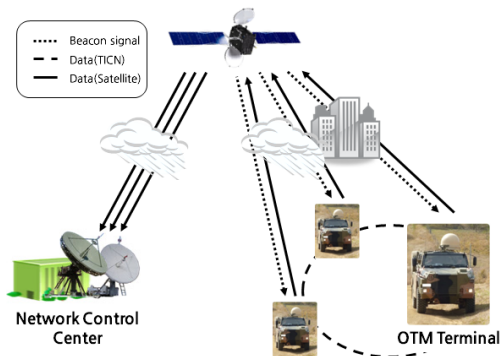


그림 1. 차기 군 위성통신체계 OTM 위성단말 운용개념
Fig. 1. Operational Concept of OTM Satellite Terminal in Next Generation Military Communication Systems.

2.2 Blockage 채널 모델

OTM 위성단말의 blockage 채널 환경을 모델링하기 위해 2-state Markov 모델을 적용하였다^[8]. 그림 2는 block 상태(B)와 unblock 상태(U)를 갖는 2-state

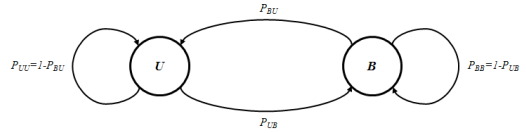


그림 2. 2-state Markov 모델
Fig. 2. 2-state Markov Model

Markov 모델을 도시한다. 위성단말이 이동 중 건물이나 나무 등에 의해 위성체와의 가시선 확보 실패로 인해 통신이 두절되는 경우가 상태 B이며, 반대로 성공적으로 통신이 제공되는 환경을 상태 U로 가정하였다.

이 때, T_U 가 전체 통신 시간 중 링크가 성공적으로 연결된 평균 시간을 T_B 가 링크 연결이 실패한 평균 시간을 나타낸다고 가정하면, 각 상태가 지속되는 시간을 geometric 확률 변수로 나타낼 수 있으므로 T_U 와 T_B 는 각각 다음과 같이 수식적으로 표현 가능하다^[9].

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

$$T_B = \sum_{n=1}^{\infty} n P_{BU} P_{BB}^{n-1} = \frac{1}{P_{BU}}. \quad (2)$$

따라서 단말의 blockage 확률, P_B 와 non-blockage 확률, P_U 는 다음과 같다.

$$P_B = \frac{T_B}{T_U + T_B} = \frac{P_{UB}}{P_{BU} + P_{UB}} = 1 - P_U, \quad (3)$$

$$P_U = \frac{T_U}{T_U + T_B} = \frac{P_{BU}}{P_{BU} + P_{UB}} = 1 - P_B. \quad (4)$$

III. 제안하는 협업통신 기법

제안하는 협업통신 기법은 TICN 체계를 통해 지상 전술링크 연결이 가능한 OTM 위성단말 간 정보 교환을 통해 OTM 위성단말과 지상 운용국 간 위성링크 상 다이버시티 이득을 확보할 수 있는 가상의 다중 송신 안테나 통신환경을 구축한다. 이를 위해 본 장에서는 OTM 위성단말의 채널 blockage 환경 식별, 서브넷 구성과 데이터 공유방안 및 OTM 위성단말의 협업통신 방안을 제안한다.

3.1 채널 Blockage 환경 식별

앞 장에서 살펴본 시스템 모델과 같이 OTM 위성

단말은 지속적으로 비콘신호 세기를 측정하여 위성 채널 상태를 예측한다. Blockage 채널이 통신링크 상 미치는 영향을 식별하기 위해 urban 환경의 실측 데이터를 기준으로 T_U 와 T_B 값을 적용하였을 때 신호 감쇠 정도를 확인하였다⁸⁾. Urban 환경에서 적용된 T_U , T_B 값을 기준으로 식(1)-(4)를 통해 2-state Markov 모델의 transition 확률을 다음과 같이 도출하였다.

표 1의 2-state Markov 모델 파라미터를 기준으로 발생하는 채널 blockage 감쇠 수준 예시는 그림 3과 같다.

그림 3에서 확인할 수 있듯이 도심환경의 blockage에 의한 신호감쇠는 변화가 매우 빠르며, 감쇠 수준도 일반적인 강우감쇠보다 훨씬 심각한 30dB 이상으로 모델링된다. 따라서 OTM 위성단말은 프레임 시간(T) 동안 설정한 threshold 값(α) 이상으로 수신 비콘수신 값(r_b)이 낮게 수신되는 시간(T_b)을 측정하여 blockage 확률(P_b)을 바탕으로 OTM 위성단말이 채널 blockage 상태를 판별한다. 이 때 blockage 채널 상태를 판별하는 threshold 값은 30dB로 가정하였으며, 비콘신호세기에 대한 측정 주기는 균일하다고 가정하였다.

표. 1. 2-state Markov 모델 파라미터
Table. 1. 2-state Markov Model Parameters

Parameters	Value
P_{UU}	0.875
P_{UB}	0.125
P_{BU}	0.230
P_{BB}	0.770

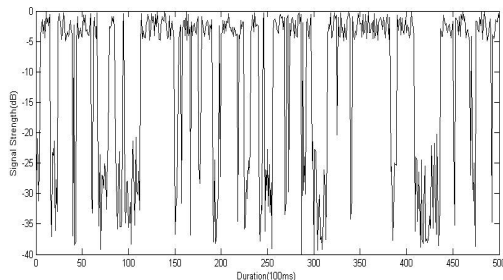


그림 3. 도심 환경에서 OTM 위성단말 blockage 채널 상태.
Fig. 3. OTM Satellite Terminal Blockage Channel state in Urban Environments.

3.2 서브넷 구성 및 데이터 공유방안

서브넷(SN) 구성은 채널 blockage를 겪고 있다고 판단한 특정 OTM 위성단말(N_b)에 의해 시작된다. 매 프레임마다 측정되는 P_b 를 기준으로 연속된 프레임

동안 P_b 가 설정된 목표 값 이하인 경우 blockage 채널 환경 상태인 것으로 추정하며, 이 때 해당 단말인 N_b 는 인접한 OTM 위성단말로 broadcast 메시지를 전파하여 협업을 요청한다. N_b 로부터 협업요청 메시지를 수신한 1 hop 이내의 OTM 위성단말은 자신이 협업을 가능한 상태인 경우 N_b 로 자신의 blockage 확률을 회신한다. N_b 는 수집된 blockage 확률을 기반으로 최상위 $J-1$ 개의 위성단말을 협업노드로 선택하고, 선택된 협업노드 목록을 다시 broadcast하여 인접 OTM 위성단말에게 알린다. 마지막으로 협업노드 목록을 수신한 인접 OTM 위성단말은 자신이 협업노드 목록에 포함되어 있는지 확인하고, 포함되어 있을 경우 확인 메시지를 N_b 에게 송신한다. 확인 메시지를 수신하면 SN 구성($SN = \{N_j, j = 1, 2, \dots, J \text{ and } N_1 = N_b\}$)은 완료된다.

이 때 N_b 는 인접한 타 OTM 위성단말과 메시지를 교환하기 위해 지상전송통체체계인 TICN 체계를 이용한다. 이를 위해 OTM 위성단말 내에는 TMMR 단말이 탑재된다고 가정하였다. 제안하는 기법에서 N_b 는 TICN 체계의 TMMR 단말 WNW(Wideband Network Waveform)모드⁹⁾를 이용하여 SN을 구성한다. WNW 모드를 사용하는 TMMR 단말은 미군 JTRS WNW의 MDL(Mobile Data Link) 방식으로 무선자원을 사용한다고 가정하였다. MDL에서는 자원 예약 및 할당을 위해 USAP 기반 스케줄링¹⁰⁾을 사용한다. 다음 그림 4는 MDL의 프레임 구조를 도시한 그림이다. 기본적으로 N_b 와 인접 OTM 위성단말은 MDL의 RBS/FRS(Rotating Broadcast Slot/Fixed Reservation Slot)를 통해 메시지를 교환하여 SN을 구성한다. 그림 4와 같이 데이터를 전송하는 RBS/FRS는 시간과 주파수 자원으로 분할된 구조이다. 따라서 서브넷 단말 간 데이터 공유를 위해 N_b 는 자신에게 주

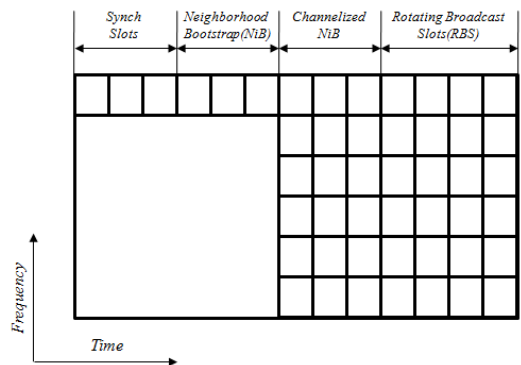


그림 4. MDL 프레임 구조
Fig. 4. MDL Frame Structure

기적으로 할당되는 $N_b B$ 슬롯을 통해 SN 구성 단말과 통신 시 사용할 RBS/FRS 자원을 예약하고 할당된 RBS/FRS를 사용하여 위성링크로 전송될 데이터를 전송한다. 이 때 주파수 선택적 페이딩 채널등의 영향에 의해 수신 데이터에 오류가 발생될 수 있다. 그러나 16~256kbps 수준으로 예상되는 OTM 위성링크^[12] 대비 WNW 모드는 2Mbps 이상의 고속 데이터 전송이 가능하며^[9-11], 400msec 이상^[13]으로 운용되는 MF-TDMA 프레임 주기 보다 MDL의 프레임은 100ms 수준^[10]으로 훨씬 짧다. 따라서 위성링크를 통한 협업통신 전까지 SN_j 간 재전송 등의 오류 복구 절차를 통해 수신된 데이터에는 오류가 없다고 가정하였다.

3.3 확산 기반 협업통신방안

SN 구성을 완료한 N_b 는 위성링크의 제어채널을 통해 지상운용국으로 협업통신을 요청한다. 협업통신 요청을 수신한 지상운용국은 요청 승인 정보를 위성링크의 broadcast 채널을 통해 N_b 로 전송하고 SN 에게 서브넷 내 공용 그룹 ID를 할당하여 N_b 에게 할당된 자원을 협업 단말들이 공유하여 사용할 수 있도록 한다.

제안하는 협업통신 방식은 N_b 가 소속된 공용 그룹 ID로 할당된 burst를 이용하여 N_b 의 데이터(b_b)를 각 협업단말들이 위성링크를 통해 지상운용국으로 동시에 전송한다. 이 때 사용자 간 구분을 위해 협업단말들 간 서로 다른 직교확산코드를 할당받는 DS-SS 구조를 고려하였다. 임의의 시간 t 에 사용자 k 의 송신 bit가 $b_k(t)$ 이고, 확산코드가 a_k 라고 하면, BPSK 적용 시 협업통신을 통한 하향링크의 수신 신호($r(t)$)는 간단하게 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r(t) = \sqrt{\frac{E_1}{NJ}} \sum_{j=1}^J a_j(t_j) b_1(t_j) \beta_j \cos(\omega t + \phi_j) + n(t), \quad (5)$$

E_1 은 SN 의 bit Energy이며, b_1 는 N_b 의 송신 데이터를 나타낸다. 위성링크는 중계기 성능 극대화를 위해 중계기 수신단에서 신호평탄도가 일정하게 유지되어야 하므로^[14], SN 의 구성단말 간 송신 전력을 균등하게 나눠서 전송한다고 가정하였다. N 은 1개 송신 비트를 나타내는 확산코드의 길이인 칩 수를 나타내며, $t_j = t - \tau_j$ 이고 $\omega = 2\pi f_c$ 이다. f_c 는 반송파 주파수, β_k 는 사용자 k 의 채널상태를 나타내는 변수로 2장에서 모델링한 채널 blockage 상태를 나타내며, τ_k 와 ϕ_k 는 각각 k 번째 사용자의 시간과 위상지연으로 각각 $[0, T]$, $[0, 2\pi]$ 사이의 값을 갖는 i.i.d 랜덤변수이다.

Coherent correlation 수신기를 가정하였으며, 협업에 참여한 사용자의 수와 사용된 직교확산코드 종류는 수신위성단말에서 알고 있다고 가정하였다. 다음 그림 5는 제안하는 협업통신 방식의 수신기 구조를 도시한다. 그림에 나타나듯 수신된 데이터는 각 사용자의 수신 확산열에 확산코드를 곱하여 복구한다. 가정한 GEO 위성 기반 위성통신 환경은 다중경로 페이딩이 발생하지 않기 때문에 심볼 간 간섭이 없으므로 MRC(Maximal Ratio Combining) 방식이 수신 SNR을 최대화 할 수 있다. 그러나 빠르게 변화하는 협업 단말들의 채널 blockage 상황을 수신 위성단말에서 지속적으로 추적하기는 어렵기 때문에 제안하는 협업통신 기법은 수신위성단말에서 협업단말들의 채널 상태정보가 필요 없는 EGC (Equal Gain Combining) 방식을 적용하였다.

송신 데이터 $b_k(t)$ 가 아래와 같을 때,

$$b_k(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} b_{k,l} p_T(t - lT), \quad (6)$$

수신 데이터를 검출하기 전에 EGC 수신 방식을 통한 결정변수 $Z[0]$ 는 다음과 같이 표현된다^[15,16].

$$Z[0] = \sqrt{\frac{E_1 N}{J}} b_{1,0} \sum_{j=1}^J \beta_j + \sqrt{\frac{E_1}{NJ}} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1, k \neq j}^K V_{j,k} + \sum_{j=1}^J \eta_j, \quad (7)$$

식(6)에서 $b_{k,l} \in \{+1, -1\}$ 이고 $0 \leq \tau t$ 일 때 $p_\tau(t) = 1$, 나머지 경우에는 $p_\tau(t) = 0$ 이다. 식(7)은 3가지 성분으로 구성되어 있다. 첫 번째 성분은 요구신호이며, 두 번째 성분인 $V_{j,k}$ 는 사용자 j, k 간 다중접속간섭(MAI: Multiple Access Interference)이다. $V_{j,k}$ 는 다음과 같이 정의된다^[17].

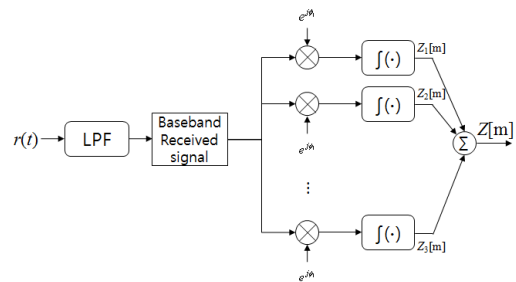


그림 5. 제안하는 코히런트 BPSK 수신기 구조
Fig. 5. Proposed Coherent BPSK Receiver Structure

$$V_{j,k}(\tau_j) = \beta_j [b_{j,-1} R_{j,k}(\tau_j) + b_{j,0} \widehat{R}_{j,k}(\tau_j)] \cos \phi_j, \quad (8)$$

식(8)에서 $R_{i,j}(\tau)$ 와 $\widehat{R}_{i,j}(\tau)$ 는 각각 $R_{i,j}(\tau) = \int_0^T a_i(t-\tau) a_j(t) dt$, $\widehat{R}_{i,j}(\tau) = \int_{\tau}^T a_i(t-\tau) a_j(t) dt$ 이며, 직교코드 간 부분 상호상관도를 나타내는 함수이다. 앞서 언급한 바와 같이 통신 경로 상 다중경로 페이딩 현상이 발생하지 않기 때문에 자기 신호의 다중경로 수신 시 확산칩 직교성 파괴에 의한 자가 간섭은 없다. n_i 은 AWGN 성분이다.

Coherent BPSK 수신기의 BER(Bit Error Ratio)은 다음과 같이 표현된다^[16].

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{SNR}). \quad (9)$$

SNR을 계산하기 위해 식(7)을 구성하는 성분 중 다중접속간섭의 조건부 분산 $\sigma_{V_{j,k}}^2$ 와 AWGN 성분에 대한 조건부 분산 σ_n^2 을 각각 계산하면,

$$\sigma_n^2 = \frac{NN_0}{2}, \quad (10)$$

$$\sigma_{V_{j,k}}^2 = \frac{E_1}{4J} \sum_{j=1}^J \beta_j^2 \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^K \frac{1}{T_c} \times \int_0^{T_c} (R_{j,k}^2(\tau) + \widehat{R}_{j,k}^2(\tau)) d\tau, \quad (11)$$

이다. 이 때 [17]에 의해 사용자 별 확산열 간 상호독립이고 각 확산열의 칩 간 연관이 없다고 가정하면, 식(11)의 적분은 $\frac{2T^2}{3N} + \frac{T^2}{6N} \sum_{i=0}^{N-2} a_i a_{i+1}$ 로 근사화 할 수 있다^{[17][18]}. 근사화 된 값의 두 번째 성분은 확산코드의 자기상관도를 나타내는 값으로 스크램블링 시 자기상관도가 낮은 PN코드를 적용한다고 가정하면 무시할 수 있다. 따라서 식(11)은 다음과 같다.

$$\sigma_{V_{j,k}}^2 = \frac{E_1 T}{6NJ} (J-1) \sum_{j=1}^J \beta_j^2. \quad (12)$$

주어진 환경에서 자가간섭 성분은 없으므로 주어진 채널 조건에서 조건부 BER은 식(9)에 (10)(11)을 대입하여 다음과 같다.

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\left(\frac{3E_1 N^2 \sum_{j=1}^J \beta_j^2}{E_1 T (J-1) \sum_{j=1}^J \beta_j^2 + 3N^2 j N_0} \right)^{1/2} \right), \quad (13)$$

앞서 언급한 바와 같이 식(13)에서 β_j 는 {0, 1}의 상태를 갖는 2-state Markov 함수이다. β_j 의 확률밀도함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_j^i(X) = P_U^j \alpha_U^i + P_B^j \alpha_B^i = \alpha_B^i + P_U^j (\alpha_U^i - \alpha_B^i), \quad (14)$$

식(14)에서 P_U^j 는 사용자 j 가 non-blockage 상태에 있을 확률, P_B^j 는 blockage 상태에 있을 확률이고, α_U^i , α_B^i 는 각각 non-blockage와 blockage일 때 채널의 진폭을 나타내는 랜덤함수 값이다. 만약 시간 t 에서의 사용자 j 의 채널 blockage 상태가 stationary하다고 가정하면,

$$P_U^j = \frac{1 - P_{UU}^j}{2 - P_{UU}^j - P_{BB}^j} \text{이고, 이 때 } \sum_{j=1}^J \beta_j \text{는}$$

사용자 간 서로 다른 blockage 확률을 갖는 베르누이 시도의 합이다. Non-blockage 환경에서는 LOS가 보장되므로 채널의 진폭이 일정(a_u)하며, blockage 환경에서도 그림 3과 같이 -30dB 이하의 일정한 손실(a_b)을 발생시킨다고 가정할 수 있다. 따라서 각 사용자 j 가 서로 다른 베르누이 확률은 갖는 poisson binomial 분포^[19,20] 되며, 따라서 $\sum_{j=1}^J \beta_j$ 의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$P(X=J) = \sum_{j=1}^J (\alpha_B + P_U^j (\alpha_U - \alpha_B)) = J\alpha_B + (\alpha_U - \alpha_B)^J \sum_{A \in F_m, j \in A} P_U^j \prod_{j \in A^c} (1 - P_U^j), \quad (15)$$

식(15)에서 F_m 는 {1, 2, 3, ..., J} 집합에서 m 개의 원소를 갖는 부분집합을 나타내며, A_c 는 A 의 여집합을 나타낸다. P_U^j 를 오름차순으로 정렬한다고 하면, $P_U^1 \leq P_U^2 \leq \dots \leq P_U^J$ 일 때, 제안하는 협업통신방식은 SN 구성방안에 따라 P_U^1 이 N_b 의 P_U 이다. 따라서 식(15)의 하한계(lower bound)는 $P_U^1 = P_U^2 = \dots = P_U^J$ 인 경우이며, 이는 P_U^1 을 확률로 갖는 베르누이 시도를 J 번 수행하는 binomial 분포가 되므로 확률밀도함수는 아래와 같다.

$$P_{Lower}(X) = J\alpha_B + J(\alpha_U - \alpha_B)P_U^1. \quad (16)$$

식(15)의 상한계(lower bound)는 SN 구성을 요청한 N_b 단말을 제외한 나머지 단말이 non-blockage 환경인 경우 이므로,

$$P_{Upper}(X) = (J-1)\alpha_U + \alpha_B + (\alpha_U - \alpha_B)P_U^1, \quad (17)$$

이다. 만약 blockage 채널 환경에 있는 OTM 위성단말의 blockage 확률이 동일하고, non-blockage 채널 환경에 있는 OTM 위성단말은 LOS가 보장된다고 가정하면, 주어진 식(15)는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} P(X) &= J\alpha_B + (\alpha_U - \alpha_B) \sum_{j=1}^J P_U^j \\ &= J\alpha_B + (\alpha_U - \alpha_B)(J_U + J_B P_U^1), \quad (18) \\ &= (\alpha_U - \alpha_B)J_B P_U^1 + \alpha_U J_U + \alpha_B J_B \end{aligned}$$

이 때 J_U 는 non-blockage 상태인 사용자 수를, J_B 는 blockage 상태인 사용자 수를 나타낸다.

IV. 분석 결과

4장에서는 앞 장에서 살펴본 OTM 위성단말 간 협업통신 시 수신 성능인 BER에 대한 분석결과를 도시한다. 제안하는 협업통신 기법의 성능을 비교하기 위해 제안하는 방식과 기존의 단일 경로로 데이터를 송신하는 위성통신 방식을 비교하였다. 그림 6, 7, 8, 9는 OTM 위성단말의 non-blockage 확률, P_U 가 0.1, 0.5, 0.7로 변할 때 BER을 도시한다. 그림 6은 SN을 구성하는 단말의 수, J 가 2인 경우이며, 그림 7, 8, 9는 J 가 4인 경우이다. J 가 2인 경우는 blockage 채널

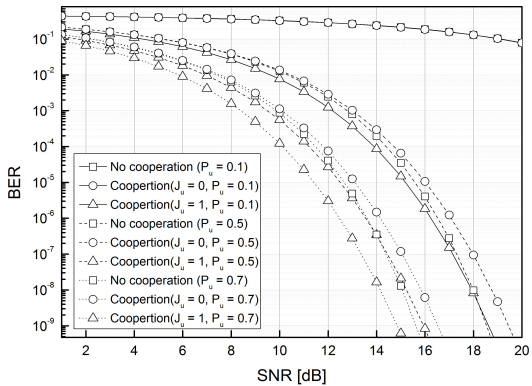


그림 6. 제안하는 기법의 BER 성능 ($J=2$)
Fig. 6. BER performance of the proposed scheme ($J=2$)

상태인 OTM 위성단말과 해당 단말의 데이터를 전달하는 1개의 협업단말이 있는 조건이다. 이 때 협업단말이 LOS가 보장되는 상태인 경우 비협업통신 방식에 비해 향상된 성능을 보여준다. 특히 제안하는 방식은 blockage 채널 조건의 단말의 P_U 가 낮을수록 더욱 우수한 성능을 보여준다. 반면, 협업단말이 동일한 blockage 채널 상태인 경우에는 코드 간 간섭으로 인해 발생하는 MAI에 의해 채널 blockage 확률에 따라 기존 비협업 통신 방안과 유사하거나 낮은 성능을 보인다.

그림 7, 8, 9는 각각 $J = 4$ 일 때, non-blockage 확률에 따른 성능을 비교한 결과이다. 먼저 그림 7은 SN의 단말 중 LOS가 보장되는 단말의 수, J_U 를 1에서 3까지 증가시키면서 BER을 비교하였다. 그림 6과 마찬가지로 P_U 가 낮은 경우($P_U = 0.1$) 제안하는 기법이 단일 경로 송신 방식보다 훨씬 우수한 성능을 보인다.

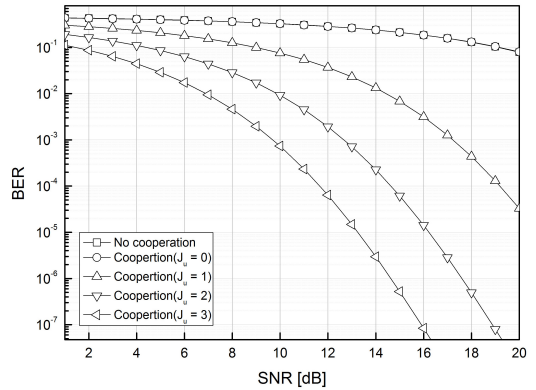


그림 7. 제안하는 기법의 BER 성능 ($J=4, P_u=0.1$)
Fig. 7. BER performance of the proposed scheme ($J=4, P_u = 0.1$)

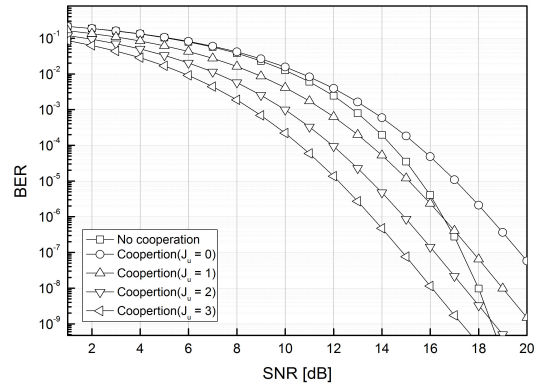


그림 8. 제안하는 기법의 BER 성능 ($J=4, P_u=0.5$)
Fig. 8. BER performance of the proposed scheme ($J=4, P_u = 0.5$)

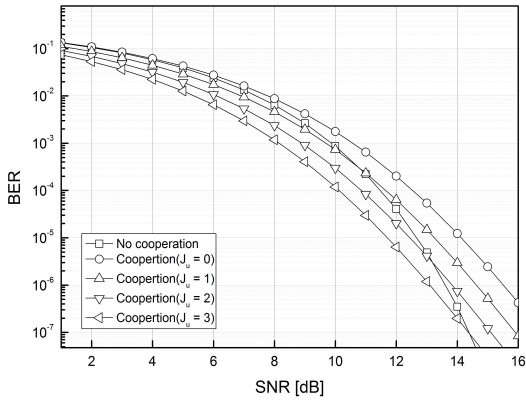


그림 9. 제안하는 기법의 BER 성능 ($J=4, P_u=0.7$)
 Fig. 9. BER performance of the proposed scheme ($J=4, P_u = 0.7$)

그림 8과 9는 각각 P_u 가 0.5와 0.7일 때 J_u 에 따른 BER 성능을 도시한다. OTM 위성단말이 non-blockage 채널 확률이 높아질수록 LOS 링크 보장 확률이 높아지므로, 협업통신에 의한 성능향상이 줄어든다. 또한 J 증가 시 오히려 MAI 증가로 인해 성능이 감소하는 경향을 보인다.

V. 결 론

본 논문에서는 기동 중 운용개념이 적용되는 OTM 위성단말의 통신링크 상 발생하는 채널 blockage 신호손실 보상을 위한 대역확산 기반 협업통신 기법을 제안하였다. 실측 결과 30dB 이상 발생하는 채널 blockage 손실은 단일 단말 자체로 보상하는데 한계가 있다. 이를 극복하기 위해 작전을 수행하는 OTM 위성단말 간 탐제가 예상되는 타 통신체계인 TICN 체계의 무전기인 TMMR 단말을 이용하여 인접 위성 단말 간 송신 데이터를 공유하고 공유된 데이터를 협업하여 전달하는 기법을 제시하였다. 제안하는 기법은 협업 단말 간 서로 다른 직교코드로 대역확산하여 동시에 확산열을 전송하고 이를 복구하기 위해 수신단에 EGC 기법을 적용하였다. 2-state Markov 모델로 blockage 채널을 모델링 하였으며, 해당 채널 모델을 적용하여 BER을 분석하기 위해 송신 신호, MAI 성분 및 AWGN 성분의 분산을 계산하였다. 특히 채널 특성을 반영하기 위해 서로 다른 n 개 blockage 채널의 합을 poisson binomial distribution으로 분석하였다. BER 분석 결과 채널 조건이 더 나은 인접 OTM 위성단말의 협업으로 BER 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다. 특히 blockage 확률이 높을수록 협업을 통

해 더욱 우수한 성능을 얻을 수 있으며, 채널 환경이 더 나은 협업 단말의 수 증가 시 BER 성능도 개선됨을 확인할 수 있었다. 이를 기반으로 통신 신뢰성 확보가 중요한 위성링크 상에서 특정 통신 성공률 보장을 위한 협업 단말의 수 분석도 가능할 것으로 판단된다. 그러나 협업 단말 수 증가 시 서로 다른 지연을 갖는 확산열 간 중첩으로 인해 발생하는 MAI로 인해 성능에 대한 제약도 있음을 확인하였다. MAI를 줄이기 위해 확산 이득을 높일 수 있으나, 주파수 대역폭 한계로 인한 제한이 예상되며, 이를 해결하기 위한 fractional symbol differential detection 방식의 적용도 향후 고려해 볼 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] S. W. Han and J. W. Seo, "Future extension of the next generation military satellite," *Inf. Commun. Mag.*, vol. 26, no. 3, pp. 24-31, Feb. 2009.
- [2] B. K. Jeong, "Future trend in military satellite communication systems," *Aerospace Weapon System Development Seminar*, Nov. 2005.
- [3] S. Egami, "Individual closed-loop satellite access power control system using overall satellite link quality level," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-30, no. 7, pp. 1806-1808, Jul. 1982.
- [4] A. W. Dissanayake, "Application of open-loop uplink power control in Ka-band satellite links," in *Proc. IEEE*, vol. 85, no. 6, pp. 959-969, Jun. 1997.
- [5] S. Woo, H.-W. Park, H.-S. Lee, Y.-S. Yoo, and B.-G. Jung, "A power control based MF-TDMA resource allocation scheme for next generation military satellite communication systems," *J. KICS*, vol. 37, no. 11, pp. 1138-1149, Dec. 2012.
- [6] V. Weerackody and E. Cuevas, "A statistical approach to specifying the off-axis EIRP spectral density in on-the-move satellite communications," *IEEE Military Commun. Conf., MILCOM*, pp. 1-7, San Diego, CA, Nov. 2008.
- [7] L. Gonzalez and R. E. Greel, "A regulatory study and recommendation for EIRP spectral

- density requirement/allowance for SOTM terminal Ka-band on WGS system,” *IEEE Military Commun. Conf., MILCOM*, pp. 1992-1997, San Jose, CA, Oct.-Nov. 2010.
- [8] W. M. Smith, *Channel characterization for EHF satellite communications on the move*, MIT-LL, Tech. Rep. TR-1109, Jul. 2006.
- [9] H. J. Son and T. W. Kwon, “Evaluation of MANET protocol scheme for TICN system,” *J. KIMST*, vol. 12, no. 4, pp. 469-475, Aug. 2009.
- [10] S. Perumal, V. Tabatabaee, J. S. Baras, C. J. Graff, and D. G. Yee, “Modeling TDMA-based USAP in JTRS MDL for multicast and unicast traffic,” *IEEE Military Commun. Conf., MILCOM*, pp. 1924-1929, San Jose, CA, Oct.-Nov. 2010.
- [11] G. Comparetto, P. Hallenbeck, M. Mirhakkak, N. Schult, R. Wade, and M. DiGennaro, “Verification and validation of the QualNet JTRS WNW and SRW waveform models,” *IEEE Military Commun. Conf., MILCOM*, pp. 1818-1826, Baltimore, MD, Nov. 2011.
- [12] E. Olechna and R. S. Wexler, “Modem performance characterization for satellite communications on the move,” *IEEE Military Commun. Conf., MILCOM*, pp. 1-6, Oct. 2002.
- [13] J. Wiss and R. Gupta, “The WIN-T MF-TDMA mesh network centric waveform,” *IEEE Military Commun. Conf., MILCOM*, pp. 1-6, Orlando, FL, USA, Oct. 2007.
- [14] V. Weerackody, E. Cuevas, and L. Gonzalez, “On a method to establish satellite links for dynamic bandwidth allocation,” *IEEE Aerospace Conf.*, pp. 1-8, Big Sky, MT, Mar. 2006.
- [15] M. A. Rahman, S. Sasaki, and H. Kikuchi, “An exact error rate analysis for equal gain combining of DS-CDMA signals in frequency selective nakagami fading,” *IEEE VTC Spring*, pp. 1866-1870, May 2008.
- [16] M. B. Pursley, “Performance evaluation for phase-coded spread spectrum multiple access communication-Part I: System analysis,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 25 pp. 795-799, Aug. 1977.
- [17] P. Patel and J. Holtzman, “Analysis of a simple successive interference cancellation scheme in a DS/CDMA system,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 12, no. 5, pp. 796-807, Jun. 1994.
- [18] G. P. Efthymoglou, T. Piboongunon, and V. A. Aalo, “Performance of DS-CDMA receivers with MRC in Nakagami-m fading channels with arbitrary fading parameters,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 55, pp. 104-114, Jan. 2006.
- [19] M. K. Agrawal and S. E. Elmaghraby, “On computing the distribution function of the sum of independent random variables,” *ELSEVIER Computers & Operational Research*, vol. 28, no. 5, pp. 473-483, Apr. 2001.
- [20] A. Xia and M. Zhang, “On approximation of markov binomial distributions,” *J. Bernoulli*, vol. 15, no. 4, pp. 1335-1350, Jan. 2009.

박 형 원 (Hyung-won Park)



2003년 2월 : 아주대학교 정보 및 컴퓨터공학과 졸업
 2005년 2월 : 아주대학교 정보통신공학과 석사
 2009년 8월 : 아주대학교 정보통신공학과 박사
 2009년~현재 : LIG넥스원

<관심분야> 전술데이터링크, 군 위성통신, 이동통신

이 호 섭 (Ho-sub Lee)



1998년 2월 : 인하대학교 전자공학과 졸업
 2013년~현재 : 아주대학교 IT융합대학원 석사과정
 1998년~현재 : LIG넥스원
 <관심분야> 군위성통신, RF/MW 시스템, 메타물질 구조

윤 원 식 (Won-sik Yoon)



1984년 2월 : 서울대학교 제어계
측공학과 졸업

1986년 2월 : 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 석사

1991년 2월 : 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 박사

1994년~현재 : 아주대학교

<관심분야> 무선통신 및 무선네트워크