

차기 군 위성통신망 체계에서 이기종 단말 운용을 고려한 전력제어 기반 MF-TDMA 자원할당 기법

우순*, 박형원°, 이호섭*, 유연상*, 정병기*

A Power Control-Based MF-TDMA Resource Allocation Scheme for Next Generation Military Satellite Communication Systems

Soon Woo*, Hyung-Won Park°, Ho-Sub Lee*, Youn-Sang Yoo*, Byung-Gi Jung*

요약

본 논문에서는 차기 군 위성통신망 체계에서 서로 다른 통신 능력을 갖는 이기종 단말을 동일 중계기 대역폭 내에서 효과적으로 통합하여 운용하기 위해 전력제어를 적용한 MF-TDMA 자원할당기법을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 burst 크기 결정 단계와 burst 구조 결정단계의 2단계로 수행된다. 먼저 burst 크기 결정 단계에서는 각 단말의 채널 상태를 기반으로 링크 버짓을 분석하여 적용 가능한 ACM 레벨과 이에 따른 burst 크기를 결정한다. 다음으로 burst 구조 결정단계에서는 앞서 도출된 각 단말 별 burst 크기를 기반으로 시간-주파수 축 상에서 할당 가능한 burst 구조를 도출하고 각 구조 별 가용 Power spectral density(PSD) 구간을 계산한다. 이기종 단말을 단일 중계기로 통합하기 위해 각 burst의 가용 PSD 구간 내에서 전력제어를 수행하며, 동일 PSD 구간을 갖는 burst를 그룹화하여 MF-TDMA 프레임 내에 할당한다. 추가적으로 할당되지 못하고 남은 슬롯에 대한 자원할당 효율을 향상시키기 위해 설정된 PSD 구간 내에서 ACM 레벨을 조절하여 빈 슬롯을 활용할 수 있는 방안을 적용하였다. 제안하는 알고리즘은 주파수 사용효율, 슬롯할당 거부율 및 burst packing 효율 측면에서 기존 방식과 비교하였으며, 기존 방식에 비해 우수한 성능을 제공함을 확인하였다.

Key Words : Satellite communications, MF-TDMA, Resource allocation, Power control, Heterogeneous network

ABSTRACT

In this paper, an efficient power control based MF-TDMA resource allocation scheme is proposed for next generation military satellite communication systems. The proposed scheme has the flexibility is used to support heterogeneous terminals with differ in transmission capabilities. The method can be divided into two parts : burst size calculation and burst structure determination. At first, we estimate the link budget taken into account a dynamic satellite link state variation. Then, applicable ACM level and burst size is chosen. In burst structure determination phase, we reorganize the burst structure in time-frequency domain by controlling limited power, bandwidth, time resources. In particular, we compensate the power spectral density among different terminals to integrate them in same transponder, Furthermore, we increase the packing efficiency by controlling the ACM level of the burst in applicable power spectral density range. Simulation results show that the method increase the spectral efficiency and burst packing efficiency. In addition, slot allocation rejection ratio is successfully reduced.

I. 서론

위성을 이용한 무선통신은 지형적 제약을 크게 받은 지상통신체계의 한계를 효과적으로 극복할 수 있기 때문에 안정적인 데이터 전송이 필요한 군 통신망 구축을 위해 사용되고 있다¹⁾. 한국군 역시 2007년 GEO(Geostationary Orbit) 위성인 무궁화 5호 위성을

발사하여 육·해·공군을 통합한 ANASIS (Army, Navy, Airforce Satellite Information System) 위성통신체계를 운용하고 있다. 또한 한국군은 ANASIS 체계에서 더 나아가 무궁화 5호 위성의 수명주기 도래에 대비하여 2017년 운용 시작을 목표로 하는 차기 군 위성통신체계 사업을 진행하고 있다.

차기 군 위성통신체계는 기존 ANASIS 체계 대비

* 주저자 : 국방기술품질원 품질경영본부, woos21@nate.com, 정회원

° 교신저자 : LIG백스원 통신연구센터, hyungwon.park@lignex1.com, 정회원

* LIG 백스원(주) C4I 연구소 통신연구센터, hosublee@lignex1.com, younsang.yoo@lignex1.com, byunggi.jung@lignex1.com

논문번호 : KICS2012-08-385, 접수일자 : 2012년 8월 29일, 최종논문접수일자 : 2012년 11월 9일

통신영역을 확장하고 3배 이상의 중계용량을 제공할 뿐만 아니라 강화된 통신 생존성을 제공할 수 있도록 개발될 예정이다²⁾. 특히 3배 이상의 중계용량을 확보하기 위해서는 주파수 사용효율 증대를 통한 효과적인 무선자원 운용이 필수적이다. 이를 위해 차기 군 위성통신체계는 주파수와 시간 자원을 동시에 동적으로 운용하는 MF-TDMA(Multi Frequency-Time Division Multiple Access) 기법을 적용할 것으로 예상된다.

앞서 언급한 대로 MF-TDMA는 무선자원을 시간과 주파수 측면에서 분할하여 동시에 운용하는 기법으로 FDMA와 TDMA의 장점을 동시에 제공할 수 있는 광대역 위성통신망 시스템의 핵심 기술이다³⁻⁸⁾. ETSI(European Tele-communications Standard Institute)의 DVB-RCS(Digital Video Broadcasting - Return Channel Satellite system) 표준에서는 다수의 사용자로부터의 다양한 멀티미디어 서비스 제공 시 자원할당의 유연성을 제공하기 위해 상향링크에 MF-TDMA를 적용하여 운용하고 있다³⁻⁶⁾. 기존 DVB-RCS 체계에서의 MF-TDMA에 대한 연구는 각 사용자의 서비스 요구조건에 따라 자원을 측정하여 시간-주파수 자원을 분할하는 방안^{4,5)}과 분할된 자원을 낭비없이 사용자에게 할당하는 방안^{6,7)}이 주로 연구되었다. 그러나 동일한 단말이 운용되는 상용 DVB-RCS 체계와는 달리 군 통신망에서는 서로 다른 능력을 갖는 이기종 단말이 혼재하여 운용된다. 미군에서도 서로 다른 이기종 단말들이 혼재하는 WIN-T (Warfighter Information Network- Tactical) 체계를 하나의 위성망으로 통합하기 위한 MF-TDMA를 개발⁸⁾하고 있으나 현재까지 공개된 바가 없으며, 국내에서도 아직까지 이기종 단말을 통합하는 MF-TDMA 자원할당 방식에 대한 연구도 진행된 바 없다.

본 논문에서는 차기 군 위성통신망 체계에서 주파수 사용효율을 극대화하기 위해 서로 다른 이기종 단말들을 하나의 중계기로 통합하여 운용할 수 있는 MF-TDMA 기반 자원할당 방안을 제안한다. 기존 군 위성통신체계의 자원할당 방식은 각 단말에 필요한 무선자원을 예측하고 중계기마다 접근 가능한 단말을 구분하여 운용하는 고정할당방식이다. 이러한 방식은 실시간으로 변화하는 전장 환경에 빠르게 대처할 수 없으며, 중계기마다 서비스 가능한 단말이 고정되어 있기 때문에 자원점유 효율이 떨어지는 단점을 갖는다.

이러한 문제를 해결하기 위해 제안하는 MF-TDMA 자원할당 방식은 2단계 절차에 따라 각 사용자에게 자원을 할당한다. 먼저 1단계에서는 각 사용자의 채널 상태 정보와 위성단말의 송신 능력을 기준으로 가능한 ACM(Adaptive Coding and Modulation) 레벨과 이에 따른 요구 시간-주파수 슬롯 수를 계산한다. 위성으로부터 수신되는 비콘 수신레벨을 기준으로 위성 단말의 링크버짓을 분석하여 가능한 ACM 레벨을 결정하고, 이에 따른 시간-주파수 슬롯 별 전송 데이터를 측정하여 필요한 슬롯 수를 예측한다. 다음으로는 요구 시간-주파수 슬롯 수에 따라 할당 가능한 슬

롯 조합을 추출하고 이를 할당한다. 이 때 이기종 단말을 하나의 중계기로 통합하기 위해 스펙트럼 밀도를 기준으로 슬롯 조합을 계산한다. 중계기 내 다중 사용자 간 간섭을 최소화하기 위해서는 중계기 입력 주파수 대역 내에서 일정한 스펙트럼 밀도가 유지되어야 한다. 따라서 2단계에서는 각 단말의 서로 다른 출력 EIRP(Effective Isotropically radiated power) 능력에 따라 주파수 축에서 할당 가능한 슬롯 수를 조절하여 위성 중계기에서 수신 스펙트럼 밀도를 일정하게 유지한다. 할당 과정에서는 위성단말의 우선순위와 서비스 우선순위를 반영한다. 제안하는 방식의 성능을 검증하기 위해 본 논문에서는 기존 고정할당 기반 자원할당 방식, DVB-RCS의 MF-TDMA 방식과 제안하는 전력제어 기반 MF-TDMA 자원할당방식을 주파수 사용효율, 요구 슬롯 대비 할당되지 못한 슬롯의 비율과 burst packing 효율을 기준으로 비교하였다.

본 논문의 구조는 다음과 같다. 먼저 2장에서는 차기 군 위성통신체계를 소개하고 적용되는 MF-TDMA 구조를 살펴본다. 3장에서는 링크 버짓 모델을 포함한 시스템 모델을 제시하며, 4장에서는 제안하는 MF-TDMA 자원할당 방식을 설명한다. 5장에서는 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 알고리즘의 성능을 검증한다. 마지막으로 6장에서는 결론을 제시한다.

II. 차기 군 위성통신체계

2.1. 차기 군 위성통신망 체계 구조

차기 군 위성통신체계는 현재 군에서 운용되고 있는 아나시스 위성체계가 2017년 수명만료 됨에 따라 이를 대체할 목적으로 개발 중인 위성통신체계이다. Fig.1 은 이러한 차기 군 위성통신체계의 구조를 도시한 그림이다. 차기 군 위성통신체계는 그림과 같이 위성체, 망운용국, 망제어기 및 가입자 단말로 구성된다⁹⁾. 망 운용국은 망제어기 제어를 포함한 전체 네트워크 관제를 수행한다. 가입자 단말들은 제대에 따라 소규모 네트워크를 구축하여 독립적으로 운용 가능하며, 가입자 단말 중 망제어기가 선출되어 해당 망에 대한 제어를 수행한다. 이 때 각 가입자 단말들은 위성 중계기로부터 수신되는 비콘 정보를 기반으로 망제어기로 채널 상태 정보를 주기적으로 보고하며, 해당 정보를 기준으로 망제어기는 망 내 자원할당을 포함한 가입자 단말에 대한 제어를 수행한다. 기존 군 위성통신체계에서는 채널 상태에 따라 각 단말에서 상향링크전력제어를 수행하여 위성체에서 인접 채널 간 간섭을 최소화하였다. 그러나 동일 통신 능력을 갖는 단말이 운용되는 DVB-RCS 체계와는 달리 군 위성통신체계에서는 단말의 운용환경과 목적에 따라 각 단말이 서로 다른 통신 능력을 갖는다. 따라서 기존 군 위성통신망에서는 서로 다른 통신 능력을 갖는 단말은 각각 별도의 중계기에 할당되어 운용되었다. 이러한 고정할당 구조는 자원사용효율이 떨어지는 문제점을 갖는다. 따라서 자원사용효율을 극대화하기 위해서는 각 단말의 종류에 따라 서로 다른

통신 능력을 고려하여 통합할 수 있는 자원할당기법이 필요하다.

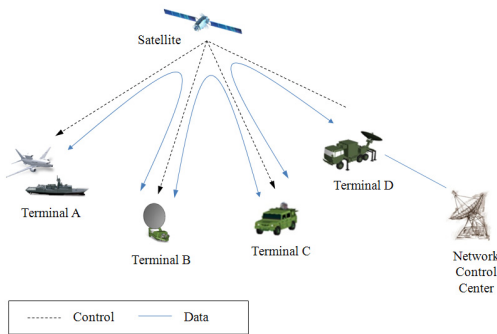


그림 1. 차기 군 위성통신체계 구조
Fig. 1. Next generation korean army satellite communication systems architecture

2.2. MF-TDMA 모델

MF-TDMA는 TDMA와 FDMA의 장점을 혼합한 다중접근방식으로 최근 DVB-RCS, EHF-SATCOM (Extremely high frequency satellite communications), WIN-T 등 다양한 위성통신체계에서 채택되어 운용되고 있다⁸⁾. MF-TDMA 구조는 주파수 뿐만 아니라 시간 축에서도 무선자원을 분할하여 동시에 운용함으로써 요구 전송량에 따라 유동적인 자원할당이 용이한 프레임 구조를 제공한다. 또한 다수의 단말이 자원을 공유하여 사용할 수 있는 구조를 제공한다.

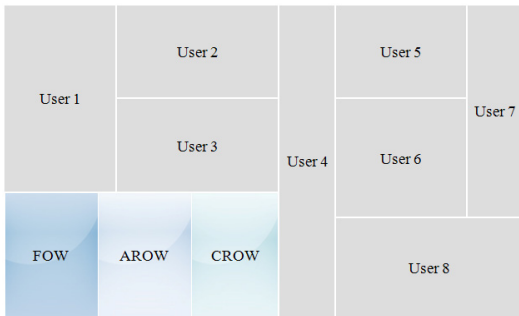


그림 2. MF-TDMA 프레임 구조
Fig. 2. MF-TDMA frame structure

Fig.2는 MF-TDMA 구조를 도시한다. 전체 무선자원은 다수의 주파수와 시간으로 분할된 시간-주파수 슬롯으로 구성된다. 각 슬롯은 제어 및 데이터 전송을 위해 할당된다. MF-TDMA 구조에서는 제어를 위해 FOW(Forward Order Wire), AROW (Assigned Reverse Order Wire), CROW(Contention Reverse Order Wire) 채널이 운용된다. FOW 채널을 통해 망동기 기준시간 정보, 자원할당 정보를 포함한 망제어 정보가 전송되며, 비경쟁기반의 AROW 채널과 경쟁기반 CROW 채널을 통해 가입자 및 신규 가입자의 망 접근을 제공한다. 특히 비경쟁채널인 AROW 채널을 통해 각 사용자는 채널상태정보를 주기적으로 망제어기로 보고한다. 가입자로부터의 자원할당 요구를 바탕

으로 망제어기는 자원을 할당한다. 망제어기로부터의 자원할당 시 MF-TDMA 구조에서는 2가지 제한이 적용된다⁴⁾. 첫 번째로 각 사용자에게 할당되는 자원은 시간 축 상에서 서로 다른 중계기 간 겹치지 않는다. 즉 각 사용자는 하나의 MF-TDMA 프레임 내에서는 동시 전송이 가능하다. 서로 다른 중계기 간에는 동시에 데이터를 전송하지 않는다. 또한 프레임 내에서 사용자의 특정 호에 할당되는 time slot은 연속적으로 할당된다. 따라서 데이터 전송을 위한 time slot은 연속적인 burst 형태로 할당된다.

III. 시스템 모델

3.1. 위성채널 모델

다양한 환경을 고려한 위성채널에서의 신호감쇄 모델(L)은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$L(t) = L_p(t) + L_a(t) + L_c(t) + L_s(t) + L_r(t). \tag{1}$$

이 때,

- $L_p(t)$ = 자유공간손실 (dB).
- $L_a(t)$ = 대기흡수손실 (dB).
- $L_c(t)$ = 구름흡수손실 (dB).
- $L_s(t)$ = 신틸레이션손실 (dB).
- $L_r(t)$ = 강우감쇄손실 (dB).

이다. 식(1)에서 채널 상 감쇄 요인들은 시간에 따른 위성단말의 위치, 운용 주파수대역, 온도 및 강우량에 의해 결정된다. 각 감쇄 요인들은 ITU-T 표준¹⁰⁾을 기준으로 모델링되었으며, 각각 다음과 같다.

$$L_p(t) = 92.44 + 20\log_{10}(f(t)) + 20\log_{10}(d(t)). \tag{2}$$

식(2)는 자유공간손실이다. $f(t)$ 는 운용 주파수대역 (GHz)을 가리키며, $d(t)$ 는 위성과의 거리(위성단말 사이의 거리를 나타낸다).

$$L_a(t) = (h_o\alpha_o + h_w\alpha_w)\sin(\delta(t)). \tag{3}$$

식(3)은 대기흡수손실을 가리킨다. h_o 와 h_w 는 각각 산소층과 수분층의 높이이며, α_o 와 α_w 는 산소층과 수분층 감쇄지수이다. $\delta(t)$ 는 위성과 위성단말 간 양각이다.

$$L_c(t) = \left(L \times \frac{0.819f(t)}{52.53} \right) \sin(\delta(t)), \tag{4}$$

$$L_s(t) = 0.0036 + 37.32 \frac{p_w}{T^2} f(t)^{\frac{7}{12}} \left(\frac{0.5155}{\sin(\delta(t))} \right). \tag{5}$$

식(4)와 식(5)는 구름흡수손실과 신틸레이션손실이다. L 은 Liquid water margin 값이며, p_w 와 T 는 각각 수압과 온도를 나타낸다. 마지막으로 식(6)은 강우감쇄 손실 모델이다.

$$L_r(t) = -l(t) \times k_p(t) \times R(t)^{\alpha(t)}. \quad (6)$$

식(6)에서 l 은 위성과 위성단말 간 강우감쇄 유효경로 길이를 나타내며, R 은 시간당 강우율이다. k_p 와 α 값은 주파수, 강우밀도분포 및 위성단말과 위성 간 양각에 의해 결정되는 변수이다.

3.2. 링크버짓 모델

앞서 살펴본 채널 모델을 반영한 환경에서 위성에서 지속적으로 송신하는 비콘신호에 대해 위성단말의 수신 C/N 은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\left(\frac{C}{N}\right)_b = \gamma_b - L + (G/T)_r - 10\log(kT). \quad (7)$$

γ_b 는 위성에서 송신하는 비콘의 송신전력과 위성의 송신안테나 이득을 더한 값으로 비콘신호에 대한 EIRP 값(dBm)을 나타낸다. $(G/T)_r$ 는 수신단말의 이득초과 온도(dB/K)이며, k 는 Boltzmann 상수, T 는 시스템 잡음온도(K)이다. 비콘 송신전력, 안테나 이득, 이득초과 온도 및 시스템 잡음온도는 모두 시스템 설계 시 고정되는 상수이므로, 식(7)을 통해 위성채널 상태를 예측할 수 있다. 해당 정보를 기반으로 위성단말의 SNR(Signal to Noise Ratio) (γ)을 아래와 같이 예측할 수 있다.

$$\gamma = -10\log\left(10^{-\left(\frac{C}{N}\right)_u} + 10^{-\left(\frac{C}{N}\right)_d} + 10^{-\left(\frac{C}{I}\right)_u} + 10^{-\left(\frac{C}{I}\right)_d}\right) - 10\log(R_b). \quad (8)$$

식(8)에서 R_b 는 채널상에서의 변조 방식 및 채널코딩률에 의해 결정되는 심볼 레이트이다. $(C/N)_u$, $(C/N)_d$, $(C/I)_u$, $(C/I)_d$ 는 각각 상향링크 C/N 과 하향링크 C/N 및 상향링크 C/I 와 하향링크 C/I 값이다. 각각은 다음과 같이 계산된다.

$$\left(\frac{C}{N}\right)_u = P - L + (G/T)_s - 10\log(kT), \quad (9)$$

$$\left(\frac{C}{N}\right)_d = P - 2L + G_{r,s} + G_{sat} + G_{t,s} + (G/T)_r - 10\log(kT), \quad (10)$$

$$\left(\frac{C}{I}\right)_u = 25 + 10\log(B), \quad (11)$$

$$\left(\frac{C}{I}\right)_d = 18 + 10\log(B). \quad (12)$$

P 는 송신위성단말의 송신전력과 송신 안테나 이득을 더한 송신 EIRP 값(dBm)이며, $(G/T)_s$ 는 위성의 이득초과온도(dB/K)이다. $G_{r,s}$ 와 $G_{t,s}$ 는 각각 위성에서의 수신 및 송신 안테나 이득을 가리키며, G_{sat} 는 위성 중

계기 이득이다. B 는 전송 대역폭을 나타낸다. 위성체는 OBS(On Board Switching) 위성이라고 가정하였으며, 이 경우 특정 호에 대한 송신위성단말과 위성체 간 상향링크와 위성체와 수신위성단말 사이의 하향링크의 ACM 레벨은 동일하다고 가정할 수 있다.

3.3. 링크버짓 모델

MF-TDMA 프레임의 제어채널을 이용하여 각 위성단말은 자원할당을 요청하며, 망제어기는 이를 기반으로 위성단말로 자원을 할당한다. 이 때 위성단말은 시간과 주파수로 분할된 다수의 슬롯 그룹인 burst를 할당받는다. 각 위성단말의 호 별로 burst가 할당되며, 해당 정보는 FOW 채널을 통해 BTP(Burst Time Plan) 메시지로 전송된다. 각 위성단말은 BTP를 수신하여 할당 정보를 확인하며, 동시에 여러 호를 연결하는 경우 BTP 정보에 따라 다수의 burst를 할당 받을 수 있다³⁾.

Burst의 크기는 요구 데이터량과 단말의 ACM 레벨에 의해 결정된다. ACM 레벨에 의해 각 슬롯의 전송 데이터량이 결정되고 이를 기준으로 위성단말의 요구 데이터량에 맞추어 다수의 슬롯으로 구성되는 burst의 크기가 결정된다. 다음 그림 3은 이와 같은 MF-TDMA 프레임의 burst 및 슬롯 구조를 도시한 그림이다.

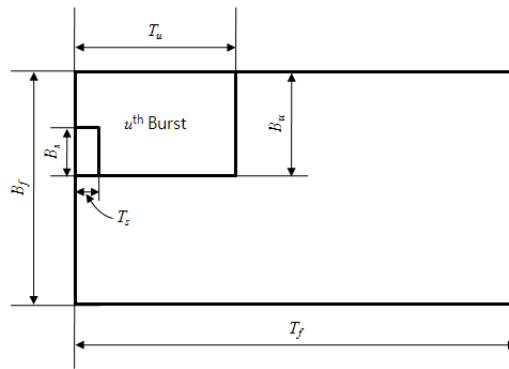


그림 3. MF-TDMA 프레임의 burst 구조
Fig. 3. Burst structure in MF-TDMA Frame

B_f , T_f 는 MF-TDMA 프레임의 대역폭과 시간을 나타내며, B_u , T_u 는 u 번째 burst의 할당 대역폭과 시간을 가리킨다. B_s 와 T_s 는 할당의 최소 단위인 슬롯의 대역폭과 시간을 의미한다. 이 때 전체 프레임 내에서 주파수 축으로 할당 가능한 슬롯의 수인 $N_f = \lceil B_f/B_s \rceil$ 이며, 시간 축에서 할당 가능한 최대 슬롯 수는 $N_t = \lceil T_f/T_s \rceil$ 이다. 따라서 하나의 MF-TDMA 프레임에서 가능한 최대 슬롯 수는 $N = N_f \cdot N_t$ 이다.

IV. 제안하는 MF-TDMA 자원할당 알고리즘

제안하는 MF-TDMA 자원할당 알고리즘은 2단계에 걸쳐 수행된다. 먼저 위성단말 링크버짓 분석을 통해 가능한 ACM 레벨을 결정하고 이에 따른 burst 크기를 계산한다. 다음으로 하나의 위성 중계기 내에 이기종 단말 통합을 위해 중계기 내 서비스 대상 위성단말들의 송신 능력을 기준으로 burst 구조를 결정한다.

4.1. Burst 크기 결정 단계

Burst 크기 결정 단계에서는 각 위성단말의 채널상태와 호 요청 시 망제어기로 전달되는 요구 서비스 정보에 따라 할당해야 할 자원의 양을 결정한다. 앞 장에서 살펴본 바와 같이 할당되는 최소 자원 단위는 시간과 주파수로 분할된 슬롯이며, 일련의 슬롯 그룹이 하나의 버스트를 구성한다. 따라서 자원의 양은 버스트를 구성하는 슬롯의 개수로 표현된다.

각 위성단말로 자원을 할당하기 위해 먼저 망제어기는 변조 방식과 채널 코딩률에 따라 하나의 슬롯을 통해 전송할 수 있는 전송 데이터 양을 측정한다. i 번째 변조 방식과 j 번째 채널 코딩률 선택 시 하나의 슬롯을 통해 전송 가능한 최대 데이터 전송률은 $r_{ij} = M_i \cdot C_j \cdot B_s \cdot T_s$ 이다. M_i 는 변조 레벨에 따른 심볼 당 비트 수를 의미하며, C_j 는 채널 코딩률을 의미한다. 차기 군 위성통신체계에서 지원 가능한 ACM 레벨의 개수를 K 개라고 가정하면 ACM 레벨 집합 $D = \{1, 2, \dots, K\}$ 이다. 이 때 k 번째 ACM 레벨은 특정 변조방식과 채널 코딩률 조합 (i, j) 를 가리킨다. ACM 레벨 집합 내의 모든 k 에 대해서 k 가 (i, j) 를 가리키고 k' 이 (i', j') 를 가리킨다고 하면, $k \neq k'$ 이면 $(i, j) \neq (i', j')$ 이고 $k > k'$ 이면, $r_{i,j} > r_{i',j'}$ 이다. 이를 바탕으로 슬롯 당 전송 가능한 최대 데이터 전송률 집합 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_k\}$ 이다. 따라서 특정 ACM 레벨에 따른 r_k 를 기준으로 u 번째 호 요청의 요구 트래픽 전송량 $(r_{req,u})$ 에 따라 필요한 슬롯 수 $N_{u,k} = \lceil r_{req,u} / r_k \rceil$ 으로 계산 가능하다. 해당 정보는 위성단말의 채널 상태와는 무관하게 변동하지 않는 값이므로 가용한 변조 방식과 채널 코딩률에 따라 초기에 설정한다.

다음으로 망제어기는 각 위성단말로부터 주기적으로 수신되는 비콘 수신 정보를 통해 각 위성단말의 채널 상태를 측정하며, 이를 바탕으로 각 위성단말에서 전송 가능한 변조 방식과 채널 코딩률을 선택한다. 요구 서비스 정보로 전송되는 BER(Bit Error Rate) 요구조건에 따라 u 번째 호의 k 번째 ACM 레벨에 대한 요구 SNR($\gamma_{u,k}$) 값이 결정되며, 식(8)-(12)에 의해 $\gamma_{u,k}$ 를 기준으로 u 번째 호에 대한 필요 EIRP 값인 $P_{u,k}$ 를 측정할 수 있다. 이를 기준으로 위성단말의 송신 능력에 따라 단말에서 지원 가능한 변조 레벨과 채널 코딩률이 결정된다. 특히 운용 환경과 목적에 따라 서로 다른 통신 능력을 갖는 이기종망인 차기 군 위성통신망 체계에서는 동일한 채널 조건이라도 단말의 송신 능력에 따라 상이한 변조 방식과 채널 코딩률이 선택될 수 있다.

제안하는 알고리즘은 추가적으로 각 위성단말에서 지원 가능한 변조 방식 및 채널 코딩률 선택 시 가능한 시간, 주파수 할당 조합을 고려한다. 이는 시간 축 뿐만 아니라 주파수 축에서도 자원을 분할하여 운용하는 MF-TDMA의 특징을 고려하고 송신 EIRP 능력이 서로 다른 각 위성단말의 속성을 반영하기 위해서다. TDMA 통신 방식과는 달리 MF-TDMA에서는 동일한

개수의 슬롯을 할당하더라도 프레임 내 할당 방법에 따라 주파수 축과 시간 축에서 서로 다른 개수의 슬롯으로 구성된 burst로 할당 가능하다. 그림 4는 동일한 슬롯 개수로 구성된 burst가 프레임 내에서 서로 다른 시간, 주파수 조합으로 할당되는 예를 도시한다 ($N_{u,k}=8$).

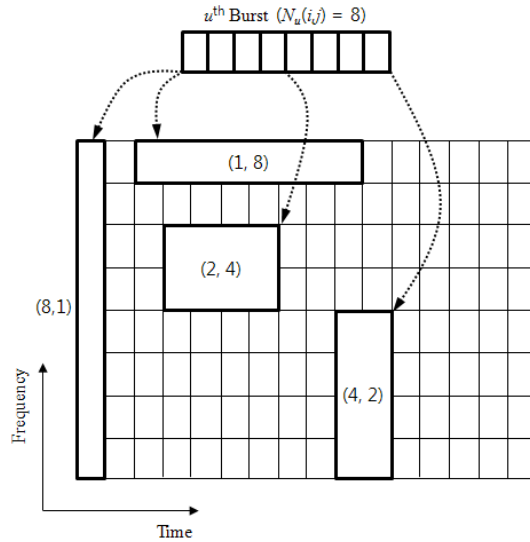


그림 4. 시간-주파수 축에서의 Burst 할당 예
Fig. 4. Example of burst allocation in time-frequency axis

식(8)-(12)에 의해 주파수 축으로 점유되는 대역폭에 따라 γ_u 값이 변할 수 있으므로 동일 개수의 슬롯을 할당하더라도 burst 구성 방법에 따라 γ_u 만족 여부가 바뀔 수 있다. 따라서 위성단말의 채널 상태에 따라 ACM 레벨 선택 시 필요한 요구슬롯 수가 특정 위성단말에서 지원 가능한지 판별하기 위해서는 주파수 축에서 할당 가능한 슬롯 수를 1개에서 $N_{u,k}$ 개까지 변화 시키면서 비교해야 한다. 이 때 주파수 축에서 할당되는 슬롯 수가 증가할 경우 반대로 시간 축에서는 할당되는 슬롯 수가 감소하게 된다. 앞서 언급한 슬롯 할당은 연속적으로 이루어져야 하는 MF-TDMA 자원할당 제약 조건에 따라 burst의 형상은 직사각형 구조여야 한다. 따라서 $N_{u,k}$ 개 슬롯 할당 시 주파수 축으로 할당되는 슬롯 수는 $N_{u,k}$ 의 약수로 구성되는 조합($O_{u,k}$)이다. 만약 $N_{u,k}$ 의 약수가 $L_{u,k}$ 개라고 가정하면,

$$O_{u,k} = \left\{ (N_{u,k}^{f_i}, N_{u,k}^{t_i}) \mid i = 1, \dots, L_{u,k}, N_{u,k}^{f_i} \times N_{u,k}^{t_i} = N_{u,k} \right\} \quad (13)$$

이다. 여기에서 $N_{u,k}^{f_i} \leq N_j$ 이고, $N_{u,k}^{t_i} \leq N_t$ 이다. 예를 들어, (a, b) 를 주파수 축으로 a 개 시간 축으로 b 개 슬롯이 할당되는 조합이라고 표현할 때, 그림 4와 같이 8개의 슬롯 할당이 필요한 경우, 검토 대상이 되는 burst 조합은 $(1, 8), (2, 4), (4, 2), (8, 1)$ 이 된다.

이와 같이 burst 크기 결정 단계에서는 요구된 서비스에 따라 지원 가능한 ACM 레벨과 이에 따른 요구 할당 슬롯 개수가 결정되며, 각 요구 할당 슬롯 개수에

대한 가능한 시간-주파수 조합 셋이 결정된다. 이를 바탕으로 다음 단계인 burst 구조 결정 단계에서 이기종 단말 간 송신 환경을 고려한 할당 방안이 도출된다.

4.2. Burst 구조 결정 단계

Burst 구조 결정 단계에서는 앞선 burst 크기 결정 단계에서 검토된 할당 가능 조합을 기준으로 이기종 단말 간 송신 능력을 반영하여 최적 조합을 산출한다. 제안하는 알고리즘은 가장 먼저 각 호 별로 앞선 burst 크기 결정 단계에서 계산한 burst 크기 중 요구 슬롯 할당이 가장 적은 burst를 선택한다. 이는 각 호 별로 지원 가능한 가장 높은 수준의 ACM 레벨을 적용하여 해당 사용자의 위성채널 상에서 가장 높은 주파수 사용 효율을 확보하기 위해서이다. 이 때 burst를 선택하는 순서는 단말과 각 호에서 요청한 서비스의 우선순위에 따라 순서대로 선택한다. 선택된 burst 크기를 기준으로 MF-TDMA 프레임 상에서 동일 시간 동안 전송되는 호 간 PSD(Power Spectral Density)를 일정하게 유지할 수 있도록 burst 구조를 결정한다. 특히 위성통신 환경에서는 중계기 대역폭 내 사용자 간 인접채널 간섭에 취약⁸⁾하며, 차기 군 위성통신체계에서는 서로 다른 통신 성능을 갖는 이기종 단말을 MF-TDMA 프레임 상에서 운용하기 때문에 차기 군 위성통신망 체계의 성능을 극대화하기 위해서는 전력제어와 연계하여 burst가 할당되어야 한다. 다음은 초기 선택된 burst 크기를 기준으로 burst 구조를 결정하는 단계를 나타낸다.

Step 1 ACM 레벨에 의해 선택된 burst 크기를 기준으로 가능한 시간-주파수 조합에 따른 최소 PSD($s(u,k)$)와 최대 PSD($S(u,k)$) 값을 계산한다.

$$s(u,k) = P_{u,k} / (N_{u,k}^{f_{L_{u,k}}} \times B_s), \quad (14)$$

$$S(u,k) = P_u^{max} / (N_{u,k}^{f_1} \times B_s). \quad (15)$$

Step 2 동일한 우선순위를 갖는 호에 대해 서로 $s(u,k)$ 와 $S(u,k)$ 가 겹치는 호를 추출하고 전송 해당 그룹의 burst를 동시에 전송할 때 필요한 EIRP 값의 범위를 조절한다. Fig.5는 Step 2의 절차를 예로 도시한 그림이다. Fig. 5에 따르면, 1/2/3번 호는 동일한 PSD를 맞춰서 전송할 수 있다. 반면에 4번 호의 경우는 1/2/3번 호 집합의 공통 PSD 범위 내로 burst 전송이 불가능하기 때문에 1/2/3번 호와 동시에 전송될 수 없다. 그림에서 알 수 있듯이 동시에 전송되는 호 그룹의 공통 PSD 범위는 그룹 내 모든 호의 최소 PSD 중 가장 큰 값과 최대 PSD 중 가장 작은 값이 된다.

Step 3 그룹화 된 burst를 MF-TDMA 프레임 상에서 할당한다. 이 때 전송 전력량은 PSD_{max} 를 기준으로 계산한다. burst 할당은 결정된 전송 전력량에 따른 가능한 주파수-시간 조합 중 $N_{u,k}^{f_{L_{u,k}}}$

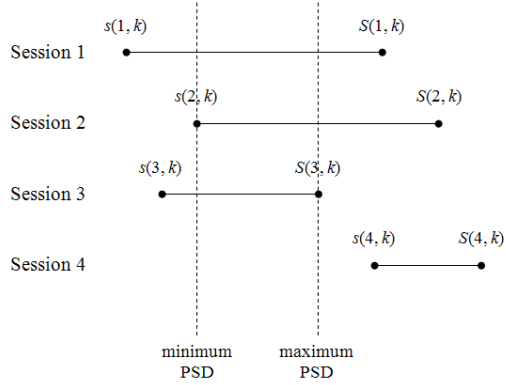


그림 5. 버스트 그룹화 예
Fig. 5. Example of burst grouping

가장 작은 burst부터 주파수 축으로 할당한다. Burst 할당 복잡도를 줄이기 위해 제안하는 알고리즘은 MF-TDMA 프레임을 가상의 시간-주파수로 분할된 부프레임으로 분할한다. Fig. 6은 MF-TDMA 프레임 상에서 burst 할당을 도시한 예이다. 그림과 같이 가상으로 분할된 부프레임 내에서 공통 PSD 범위를 갖는 burst 그룹(G_b) 내의 burst를 할당한다. Burst를 할당하는 방식은 best fit방식^{4,11)}을 적용하였다.

Step 4 부프레임 내에서 할당되지 못하고 남은 슬롯은 그룹화 되지 못한 burst 중 요구 슬롯 수가 남은 슬롯보다 작은 burst의 ACM 레벨을 조절하여 해당 호의 PSD 레벨을 맞춘다. 공통 PSD 레벨 내로 전력이 조정 가능하고 슬롯 내에 할당 가능할 경우 해당 burst를 할당한다.

Step 5 각 부프레임마다 Step 2~4의 과정을 반복하여 각 burst의 주파수-시간 축 상에서의 구조를 결정하고 MF-TDMA 프레임 내에 해당 burst를 할당한다.

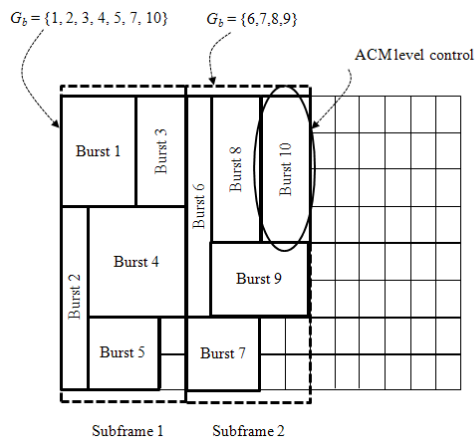


그림 6. 부프레임내 버스트 할당 예
Fig. 6. Example of burst allocation in sub-frame

이와 같이 제안하는 알고리즘은 동일 중계기 대역폭 내에서 MF-TDMA 프레임 상에서 burst 할당 시 전력제어와 연계하여 위성체 중계기 수신단에서 동시에 전송되는 burst 간 PSD 레벨을 일정하게 유지한다.

V. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 앞서 제안한 전력제어 기반 MF-TDMA 자원할당 기법의 성능을 컴퓨터 모의실험을 통해 비교한다. 다음 표. 1은 주요 모의실험 환경을 나타낸다. 운용 주파수 대역은 유사체계를 근거로 X, Ka 대역을 운용한다고 가정하였다^[13]. 중계기 대역폭의 크기는 20MHz로 가정하였으며, MF-TDMA 프레임 길이는 400ms로 설정하였다. 운용단말은 40~60dBm 내에서 서로 다른 송신전력을 갖고 1~10m 내에서 서로 다른 안테나 크기를 갖는 단말 5종이 배치된다고 가정하였다. 망 내에서 제공되는 서비스는 음성, 영상, 이미지 및 데이터로 가정하였으며, 데이터 서비스의 경우 주기적으로 전송되는 데이터와 이벤트성으로 발생하는 데이터를 고려하였다. 프레임 내의 부프레임 개수는 4개로 가정하였다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Table 1. Simulation Parameters.

Parameter	Value	
Frequency	X/Ka band	
Bandwidth	20MHz	
Frame length	400msec	
Multiple access protocol	MF-TDMA	
Modulation	BPSK, QPSK, 8PSK, 16APSK	
Roll-off Factor	0.35	
FEC rate	Viterbi	1/2, 3/4, 5/6, 8/9
	RS	239/255
No. terminal type	5	
Antenna diameter	1~10m	
TX power	40~60dBm	
Services	Voice, Video, Image, Data	

제안하는 알고리즘의 성능검증을 위해 기존의 FDMA 방식과 제안하는 전력제어 기반 burst 재구성을 적용하지 않는 MF-TDMA 방식을 비교하였다.

Fig. 7은 주파수사용효율을 사용자 수를 증가시키며 비교한 결과이다. 결과를 통해 알 수 있듯이 기존의 고정 자원할당 방식에 비해 MF-TDMA를 적용할 경우 주파수 사용효율이 큰 폭으로 증가함을 알 수 있다. 특히 제안하는 자원할당 방식은 전력제어를 적용하지 않는 MF-TDMA 방식에 비해 사용자 수가 적을 때도 최적의 주파수 사용효율을 확보할 수 있는 장점을 갖는다. 통신성능이 상이한 단말 간 독립된 채널을 구성하는 MF-TDMA 방식의 경우 각 중계기 마다 할당되는 사용자 수가 일정 수준 이상이 되어야만 높은 주파수 사용효율을 확보할 수 있는 것에 반해 제안하는 방식은 하나의 중계기 내에 이기종 단말을 통합할 수 있기 때문에 사용자 수가 적은 환경에서도 최적의 주파수 사용효율을 확보할 수 있다. 기존의 MF-TDMA 방식의 경우 3종의 운용단말을 2개의 중계기로 구분하여 할당하는 환경을 가정하였다. 또한 제안하는 방식은 전력제

어와 연계된 burst 구조 변경을 적용하여 프레임 내 burst packing 효율을 향상시킴으로써 기존 MF-TDMA 방식보다 더 높은 주파수 사용효율을 확보하였다.

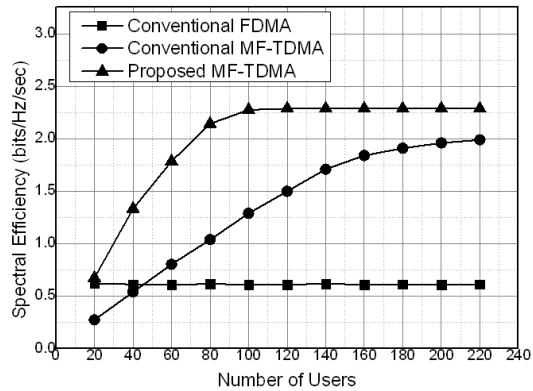


그림 7. X대역에서 주파수 사용효율 비교
Fig. 7. Comparison of spectral efficiency in X bandwidth

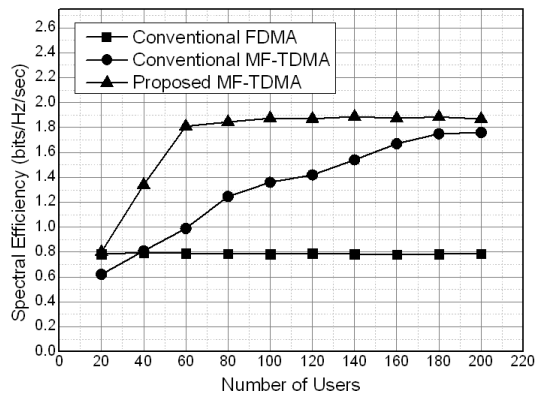


그림 8. Ka대역에서 주파수 사용효율 비교
Fig. 8. Comparison of spectral efficiency in Ka bandwidth

다음으로 Fig. 8은 Fig. 7과 동일한 조건에서 운용 주파수 대역을 Ka대역으로 바꾸었을 때 주파수 사용효율을 비교한 결과이다. X대역과 마찬가지로 Ka대역의 경우에도 기존 FDMA 방식에 비해 MF-TDMA를 적용할 경우 약 3배 이상의 주파수 사용효율 향상을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. Ka대역에서는 5종의 위성 단말이 3개의 중계기에 할당되는 환경을 가정하였다. X대역과는 달리 Ka대역에서는 대기 중에서의 신호 감쇄 효과가 심각하기 때문에 X대역에 비해 주파수 사용효율이 감소한다. 하지만 Fig. 7과 마찬가지로 제안하는 방식은 기존 MF-TDMA 방식보다 사용자 수가 더 적은 환경에서도 주파수 사용효율을 효과적으로 확보할 수 있다.

Fig 9와 Fig 10은 각각 MF-TDMA 환경에서 제안하는 방식과 기존 방식 간 X대역과 Ka대역에서 요구된 슬롯대비 할당되지 못한 슬롯의 비인 슬롯할당 거부율 (Rejection ratio)을 도시한 결과이다. 동일한 조건에서 시험하기 위해 할당된 중계기 수와 대역폭은 동일하다고 가정하였다. 결과를 통해 알 수 있듯이 제안하는 방식이 기존 할당 방식 대비 슬롯할당 거부율이 더 낮음을 알 수 있다. Ka대역의 경우 X대역보다 심한 신호

감쇄로 인해 가능한 버스트 구조가 제한되며, 채널 상에서 높은 신호 감쇄로 인해 고효율 ACM 레벨 미적용으로 인한 slot 낭비가 발생된다. 따라서 X대역에 비해 Ka대역에서 슬롯할당 거부율이 더 높게 나타난다. 그러나 X대역과 마찬가지로 Ka대역에서도 제안하는 방식이 버스트 재구성을 통해 더 낮은 슬롯할당 거부율을 나타냄을 알 수 있다.

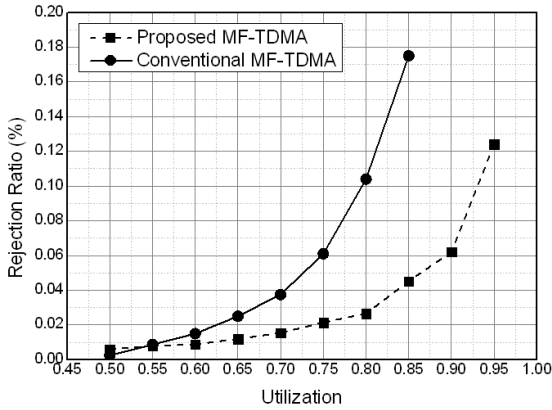


그림 9. X대역에서 슬롯할당 거부율 비교
Fig. 9. Comparison of rejection ratio in X bandwidth

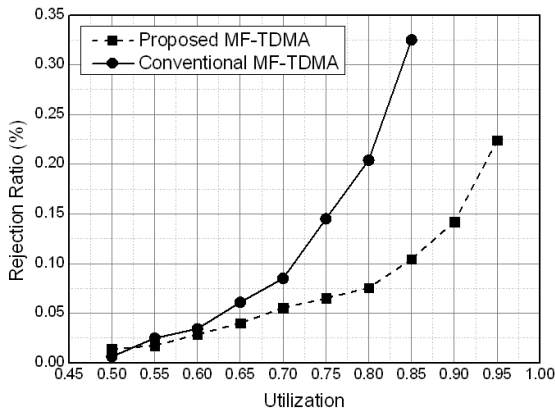


그림 10. Ka대역에서 슬롯할당 거부율 비교
Fig. 10. Comparison of rejection ratio in Ka bandwidth

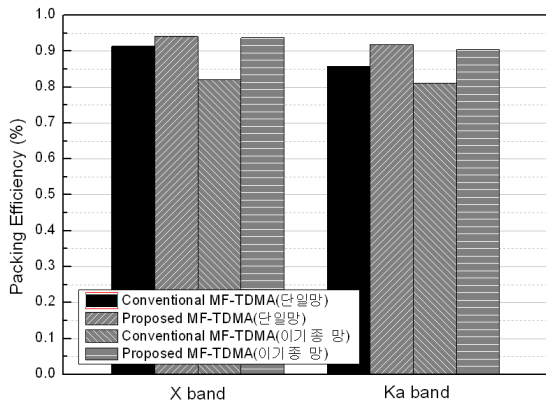


그림 11. Burst packing 효율 비교
Fig. 11. Comparison of burst packing efficiency

Fig. 11은 MF-TDMA 프레임 상에서 burst packing 효율을 표시한 결과이다. Burst packing 효율은 전체 slot

수 대비 점유 slot 수의 비율로 표현하였다. 최대 Burst packing 효율 비교를 위해 제공 가능한 timeslot 이상의 트래픽을 발생시키는 환경을 가정하였다. 제안하는 방식은 할당 시 burst 구조 변경을 통해 추가적인 할당이 가능하기 때문에 기존 MF-TDMA 방식 대비 더 높은 packing 효율을 갖는다. 특히 단일단말이 운용되는 환경 대비 이기종 단말이 운용되는 환경에서 제안하는 알고리즘은 packing 효율을 높게 유지할 수 있는 장점을 보인다. 이는 제안하는 알고리즘이 추가 EIRP 확보가 필요한 단말에게 burst 구조 결정 단계를 통해 최적의 burst 구조를 할당해 주기 때문에 확보할 수 있는 이득이다. 반면에 기존 방식에서는 PSD 제한으로 인해 특정 시간에 비어 있는 slot이 있는 경우에도 자원을 할당할 수 없는 문제점이 발생된다. 특히 이기종 단말 환경에서 이러한 현상이 보다 많이 발생되며, 따라서 기존 MF-TDMA 방식은 이기종 단말 환경에서 더 나쁜 성능을 보임을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 MF-TDMA를 기반으로 운용되는 차기 군 위성통신체계를 위한 자원할당방안을 제안하였다. 차기 군 위성통신체계는 서로 다른 통신 능력을 갖는 이기종 단말이 혼재하는 네트워크이며, MF-TDMA 적용으로 인해 자원 할당이 주파수 및 시간 축 상에서 자유롭게 이루어진다. 이러한 위성통신망은 위성체 중계기에서의 인접 채널 간섭으로 인한 성능 저하가 심각하기 때문에 위성통신망 성능을 극대화하기 위해서는 동일 중계기 대역폭 내에서 수신되는 신호의 PSD 레벨이 일정하게 유지되어야 한다.

그러나 기존의 고정할당 기반의 자원할당 방식은 차기 군 위성통신망 체계에 적합하지 않다. 기존 방식은 중계기 별로 동일한 성능을 갖는 단말을 할당하고 추가로 단말 별로 독립적인 개방루프 전력제어를 수행하여 PSD 레벨을 일정하게 유지한다. 이러한 방안은 고정된 자원할당으로 인해 주파수 사용효율이 떨어진다. 특히 MF-TDMA 적용으로 인해 각 단말은 적용되는 ACM 레벨에 따라 다양한 구조의 burst를 할당 받게 되며, 이 경우 단순한 개방루프 전력제어만으로는 PSD 문제를 해결할 수 없다.

이를 해결하기 위해 본 논문에서는 burst 크기 결정 단계와 burst 구조 결정단계로 이루어지는 2단계 자원할당 방안을 제안하였다. 먼저 각 단말의 채널 상태를 기반으로 가능한 ACM 레벨에 따라 할당 가능한 burst 구조를 도출하였다. 이를 기반으로 burst의 주파수-시간 구조에 따른 PSD 레벨을 계산하고, 동일 PSD 구간을 갖는 burst를 그룹화하여 MF-TDMA 프레임 상에 할당하였다. 더 나아가 자원할당 복잡도를 줄이기 위해 전체 MF-TDMA 프레임을 가상의 부프레임으로 분할하였으며, 할당되지 못하고 남은 슬롯은 추가적으로 할당되지 못한 burst의 ACM 레벨을 조절하여 활용할 수 있도록 하였다. 제안하는 알고리즘의 성능 분석을 위해 주파수 사용효율, 슬롯할당 거부율과

burst packing 효율을 비교하였으며, 비교 결과 제안하는 알고리즘이 MF-TDMA 기반 위성통신망 성능을 향상시킴을 확인할 수 있었다.

References

[1] ITU, Eds., Handbook on Satellite Communications, 3rd ed., Wiley-Interscience, 2002.

[2] S. W. Han and J. W. Seo, "Future extension of the next generation military satellite", *Information and Communications Magazine*, vol. 26, no. 3, pp. 24-31, Feb. 2009.

[3] ETSI EN 301 790, "Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for satellite distribution systems", European Telecommunications Standards Institute, Geneva, Switzerland, 2005.

[4] J. M. Park, et al, "Allocation of QoS Connections in MF-TDMA Satellite Systems: A Two-Phase Approach", *IEEE Trans. Veh. Tech.* vol. 54, no.1, Jan. 2005.

[5] D. K. Petraki, et al, "Dynamic Resource Calculation Algorithm in MF-TDMA Satellite Networks", *Mobile and Wireless Commun. Summit 2007*, pp. 1-5, July, 2007.

[6] Q. Dong, J. Zhang and T. Zhang, "Optimal Timeslot Allocation Algorithm in MF-TDMA", *Wireless Commun., Netw. and Mobile Comput. Conf. (WiCOM'08)*, pp. 1-4, Oct. 2008.

[7] N. Yazdani, "Multi-Frequency Time-Division multiple-access(MF-TDMA) resource packing:", *IEEE Military Communications Conf. (MILCOM'08)*, pp. 1-8, Nov. 2008.

[8] J. Wiss and R. Gupta, "The WIN-T MF-TDMA Mesh Network Centric Waveform," *IEEE Military Communications Conf. (MILCOM'07)*, pp. 1-6, Oct. 2007.

[9] K.H. Baek and B.N. Lee, "The role of NCW, Information and electronic warfare," *Science and Technologies Magazine*, vol. 495, pp. 55-61, Aug. 2010.

[10] ITU-R, Recommendation P.618-9, "Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems", International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, 2007.

[11] C. Kissling, "Efficient Resource Management for a GEO MF-TDMA Return Link with Channel Adaptation", *AIAA Int. Commun.*

Satellite Syst. Conf.(ICSSC'06), June. 2006.

[12] M. Liu and Q. Yang, "The Introduction of DVB-RCS Satellite Communications System", *Broadband Netw. and Multimedia Tech. Conf. (IC-BNMT'11)*, pp. 222-226, Oct. 2011.

[13] W. Vijitha and G. Lino, "Mobile Small Aperture Satellite Terminals for Military Communications", *IEEE Commun. Magazine*, pp.70-75, Oct. 2007.

[14] J. S. Seybold, Introduction to RF propagation. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005, pp. 218-282.

[15] H. W. Park and B. K, Jung, "A Uplink Power Control Method Based on MF-TDMA Satellite Communication Systems", *2011 KICS Fall Conference*, pp.70-75, Nov. 2011.

우 순 (Soon Woo)



1980년 경북대학교 전자공학과 공학사
 1991년 한양대학교 산업대학원 전자통신전공 공학석사
 2010~현재 아주대학교 NCW 학과 박사 과정
 1982~현재 국방기술품질원 품

질경영 본부장
 <관심분야> MANET, 시험평가모델개발

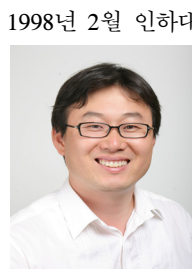
박 형 원 (Hyung-Won Park)



2003년 2월 아주대학교 정보 및 컴퓨터 공학과 졸업
 2005년 2월 아주대학교 정보통신공학 석사
 2009년 8월 아주대학교 정보통신공학 박사
 2009년 9월~현재 LIG넥스원

C4I 연구소 통신연구센터
 <관심분야> 전송데이터링크, 군 위성통신, 이동통신

이 호 섭 (Ho-Sub Lee)



1998년 2월 인하대학교 전자공학과 졸업
 1998년 7월~현재 LIG넥스원 C4I 연구소 통신연구센터, 아주대학교 IT융합대학원 석사과정
 <관심분야> 군 위성통신, 위성통신용 단말, RF/MW 시스템, 메타물질 구조

유 연 상 (Youn-Sang Yoo)



1992년 2월 단국대학교 전자
공학과 졸업
1997년 8월 단국대학교 전자
공학과 석사
1997년 7월~현재 LIG넥스원
C4I 연구소 통신연구센터
<관심분야> 군 위성통신, 위성
통신용 단말, 위성통신용 모델

정 병 기 (Byung-Gi Jung)



1985년 2월 광운대학교 전자공
학과 학사
1987년 2월 광운대학교 전자공
학 석사
2004년 2월 충북대학교 전자공
학 박사
1997년~2007년 국방과학연구

소

2007년~2010년 (주)더블웨이브

2011년~현재 LIG넥스원 C4I연구소 통신연구센터

2010년 9월~현재 LIG넥스원 C4I 연구소 통신연구
센터

<관심분야> 군 위성통신, 대전자전 기술, 전술통신