

# 위성 랜덤 액세스 채널에서 Bursty 트래픽의 신속한 전송을 위한 빠른 혼잡 제어 기법

노 홍 준\*, 이 윤 성\*, 임 재 성°, 박 형 원\*\*, 이 호 섭\*\*

## Fast Congestion Control to Transmit Bursty Traffic Rapidly in Satellite Random Access Channel

Hong-jun Noh\*, Yoon-seong Lee\*, Jae-sung Lim°, Hyung-won Park\*\*, Ho-sub Lee\*\*

### 요 약

본 논문은 복제 패킷을 사용하는 위성 랜덤 액세스 채널에서 bursty 트래픽을 안정적으로 전송하기 위한 트래픽 부하 제어 기법으로 FCC (Fast Congestion Control)을 제안한다. 위성 랜덤 액세스 채널에서 순간적으로 발생하는 bursty 트래픽은 그 양이 많을 경우 충돌 확률로 인하여 backlogged 트래픽이 다수 발생할 수 있다. FCC는 access probability를 통해 트래픽 부하를 제어하며, backlogged 트래픽의 양을 추정한다. 또한 backlogged 트래픽이 최대 처리량에 해당하는 트래픽 부하를 넘어설 경우 빠르게 congestion 상태로 전환한다. Congestion 상태에서는 backlogged 트래픽이 우선적으로 처리되며, 새로 유입되는 트래픽은 congestion 상태가 지속되는 동안 채널에 접속하지 않고 대기하다가 congestion 상태가 종료되는 시점에 채널에 유입된다. Congestion 상태에서 backlogged 트래픽은 신속한 전송을 보장받기 때문에 지연 시간이 단축된다. 따라서 FCC는 긴급성이 요구되는 군 트래픽에 매우 적합한 기술이다. 본 논문은 모의실험을 통해 기존 기법 대비 제안 기법의 우수성을 확인하였다.

**Key Words** : Random Access, Congestion control, Framed slotted ALOHA, CRDSA, IRSA

### ABSTRACT

In this paper, we propose a traffic load control scheme, called fast congestion control (FCC), for a satellite channel using enhanced random access schemes. The packet repetition used by enhanced random access schemes increases not only the maximum throughput but also the sensitivity to traffic load. FCC controls traffic load by using an access probability, and estimates backlogged traffic load. If the backlogged traffic load exceeds the traffic load corresponding to the maximum throughput, FCC recognizes congestion state, and processes the backlogged traffic first. The new traffic created during the congestion state accesses the channel after the end of congestion state. During the congestion state, FCC guarantees fast transmission of the backlogged traffic. Therefore, FCC is very suitable for the military traffic which has to be transmit urgently. We simulate FCC and other traffic load control schemes, and validate the superiority of FCC in latency.

\* 본 연구는 LIG 벅스원의 지원으로 수행되었습니다.

\*\* 이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2013R1A2A1A01016423).

• First Author : Ajou University Department of Computer Engineering, nonoboy@ajou.ac.kr, 정회원

◦ Corresponding Author : Ajou University Department of Computer Engineering, jaslim@ajou.ac.kr, 중신회원

\* 이주대학교 일반대학원 컴퓨터공학과, majjang89@ajou.ac.kr, 학생회원

\*\* LIG 벅스원 C4I연구소 통신연구센터, {hyungwon.park, hosublee}@lignex1.com

논문번호 : KICS2014-08-334, Received August 31, 2014; Revised September 24, 2014; Accepted October 8, 2014

## I. 서론

군 위성통신 네트워크에서 교환되는 트래픽의 종류는 위성통신 기술의 발달로 인해 종래의 음성 통신에서 전송 정보, 이미지, 센서 정보를 포함하는 데이터 통신으로 확대되었다<sup>1,2</sup>. 광범위한 트래픽이 유통됨에 따라 트래픽의 특성 또한 다양하게 나타난다<sup>3</sup>. 특히, 시시각각 변화하는 전장 상황으로 인해 이벤트 발생 시 긴급성을 요하는 전송 정보 및 센서 정보가 순간적으로 발생하는 트래픽 유형이 예상된다. 이렇게 이벤트에 따라 집중적으로 발생하는 bursty 트래픽은 트래픽의 양을 예측하는 것이 어렵기 때문에 위성통신에서 주로 사용되는 요구 할당 (Demand Assignment) 방식을 사용할 경우 전송 지연이 매우 길게 발생하는 것으로 알려져 있다<sup>4</sup>.

랜덤 액세스 채널은 최대 처리량 내에서 트래픽의 유입을 자유롭게 허용하므로 bursty 트래픽 전송에 주로 활용된다<sup>5</sup>. 그러나 위성 랜덤 액세스 채널에 사용되는 SA (Slotted ALOHA)는 최대 처리량이 0.36 packets/slot으로 매우 낮아 로그온 메시지 또는 소량의 제어 메시지 전송에 주로 사용되었다. 2007년 제안된 CRDSA (Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA)<sup>6</sup>는 복제 패킷 전송과 간섭 제거 (Interference Cancellation) 기술을 통해 최대 처리량을 0.55 packets/slot으로 증가시켰으므로써 랜덤 액세스 채널을 통한 데이터 트래픽의 전송을 가능케 하였다. 이후, CRDSA를 기반으로 복제 패킷의 개수를 가변함으로써 최대 처리량을 0.75 packets/slot으로 증가시킨 IRSA (Irregular Repetition Slotted ALOHA)<sup>7</sup>가 제안되었다. 이에 따라 2012년에 제정된 위성통신 표준인 DVB-RCS2 (Second Generation Digital Video Broadcasting Interactive Satellite System)<sup>8</sup>에는 CRDSA와 IRSA가 발 빠르게 적용되어 배포되었다.

향상된 랜덤 액세스 기법 (이하, IRSA)의 성능 향상은 복제 패킷을 통한 diversity의 확보와 간섭 제거를 통한 contention resolution에서 기인한다. 그러나 최대 처리량을 넘어서는 트래픽 부하가 유입되면 과도한 복제 패킷으로 인해 diversity를 넘어서는 충돌이 발생하며, 처리량은 급격하게 감소한다. 이 때, 트래픽 부하를 적절하게 제어하지 못할 경우 SA보다 처리량이 낮아질 수 있으며, 재전송으로 인해 채널 혼잡이 가중되고 전송 지연이 길어지는 상황이 발생한다. Bursty 트래픽 패턴을 보이는 군 트래픽의 경우 전송 상황에 따라 발생량이 순간적으로 증가하여 이러한 혼잡 상황이 자주 발생할 수 있다. 따라서 군 위성통신

에서 IRSA의 트래픽 부하 제어는 매우 중요한 이슈이다.

랜덤 액세스 채널에서 다수의 접속으로 인한 충돌을 해결하는 알고리즘은 SA를 중심으로 매우 많은 연구가 진행되었다. 대표적으로 backoff를 사용하는 기법<sup>9</sup>과 tree/splitting 알고리즘을 사용하는 기법<sup>10</sup>이 있다. 이들 기법은 슬롯 단위로 충돌을 해결하는 기법으로 프레임 단위로 동작하는 IRSA에는 적용하기가 어렵다. 프레임을 기반으로 트래픽 부하를 제어하는 기법은 DAP (Dynamic Access Probability)<sup>11</sup>와 LAMA/CA (Load Adaptive Multiple Access with Congestion Avoidance)<sup>12,13</sup>가 제안되었다. 두 기법은 모두 access probability를 통해 트래픽 부하를 제어한다. DAP는 연속된 프레임의 상관관계를 바탕으로 최적의 access probability를 결정하는 기법으로, 트래픽의 양이 가변적인 상황에서는 성능이 떨어진다. LAMA/CA는 현재 프레임의 트래픽 부하를 기반으로 매우 단순한 알고리즘으로 트래픽 부하를 제어한다. 따라서 LAMA/CA는 IRSA의 최대 처리량을 활용하지 못해 채널의 혼잡 상황을 느리게 해소한다.

본 논문에서는 트래픽 부하량에 따른 IRSA의 처리량 패턴을 고려하여, 트래픽 부하가 bursty하게 발생할 경우 즉, 트래픽의 양이 큰 폭으로 변화하는 환경에서, 안정적으로 그리고 빠르게 채널의 혼잡 상황을 해결하는 FCC (Fast Congestion Control) 기법을 제안한다. 기존 트래픽 부하 제어 기법 대비 FCC의 가장 큰 차이점은 backlogged 트래픽을 계산하고 이를 트래픽 부하 제어에 적극적으로 활용하는 것이다. Backlogged 트래픽은 전송을 실패하여 재전송을 요하는 트래픽을 나타낸다. FCC는 이전 프레임의 제어 정보와 현재 프레임의 트래픽 부하 추정값 그리고 성공한 트래픽의 양을 바탕으로 backlogged 트래픽의 양을 파악한다. FCC는 이를 통해 다음 프레임에서 최대 처리량을 확보함과 동시에 backlogged 트래픽이 우선적으로 전송되게 함으로써, 처리량의 증대 및 전송 지연 단축을 달성하였다.

## II. 시스템 모델 및 랜덤 액세스 기법

### 2.1 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 위성통신 시스템은 MF-TDMA (Multi-frequency Time Division Multiple Access)를 사용하는 것을 가정하였다. MF-TDMA는 위성 데이터 통신 시스템에 가장 널리 적용된 기법으로 상용 표준인 DVB-RCS<sup>8</sup>와 미군 표

준인 WIN-T(Warfighter Information Network-Tactical)<sup>[14]</sup>에서 사용되고 있다. MF-TDMA는 프레임 단위로 자원을 관리하며 프레임은 연속된 주파수 대역과 시간으로 구성된다. MF-TDMA에선 위성통신 네트워크는 하나의 운용국 (Network Control Center) 이 다수의 위성단말의 가입, 탈퇴, 자원 할당 등을 제어하는 형태로 구성된다. MF-TDMA 프레임 내에는 운용국에서 위성단말로 향하는 제어 채널과 위성단말로 부터 운용국으로 향하는 제어 채널 그리고 요구 할당에 사용되는 트래픽 채널과 랜덤 액세스에 사용되는 트래픽 채널로 구분된다. 위성단말은 제어 채널을 통해 로그온, 동기 획득 및 전력 제어를 수행하며, 운용국은 제어 채널을 통해 가입/탈퇴, 자원 할당, 트래픽 부하 제어 등을 수행한다. 위성단말은 전송 트래픽에 대한 성공 여부를 **overhearing** 또는 제어 채널을 통해 획득한다.

본 논문에서는 제어 채널 및 요구 할당 트래픽 채널은 잘 동작하는 상황을 가정하고, 랜덤 액세스 채널의 성능에만 초점을 맞추고 있다. 랜덤 액세스 채널에 전송할 트래픽 즉, 단발성 (burstiness)이 크고 데이터 크기가 작은 트래픽이 발생할 경우 위성단말은 운용국의 트래픽 부하 제어에 따라 채널 접속 여부를 결정한다. 채널에 접속할 경우 다음 프레임의 랜덤 액세스 채널에서 임의의 슬롯을 선택하여 패킷을 전송한다. 충돌로 인하여 전송에 실패한 패킷은 재전송을 실시하며, 특정 시간 (DELAY-THRESHOLD)을 넘어서는 패킷은 긴급성에 의해 폐기되는 것으로 가정하였다. 또한 본 논문에서 전송 패킷의 손실은 패킷 충돌을 제외하고는 없는 것으로 가정하였다. 이는 채널 효과를 배제하여 제안된 부하 제어 기법이 채널에 미치는 영향만을 확인하기 위한 것이다.

### 2.2 Irregular Repetition Slotted ALOHA

CRDSA는 복제 패킷 전송과 간섭 제거 기술을 통해 위성 랜덤 액세스 채널의 처리량을 SA 대비 획기적으로 증가시킨 기술이다. CRDSA는 복제 패킷의 개수가 고정되어 처리량의 증가가 제한적이다. IRSA는 복제 패킷의 개수를 특정 분포에 의해 가변적으로 발생시킴으로써 처리량을 더욱 향상시킨 기법이다. 그림 1은 슬롯 5개로 구성된 프레임에서 트래픽이 4개 일 경우 IRSA의 동작 예시를 나타낸다. 각 트래픽은 복제 패킷 개수의 분포에 따라 복제 패킷을 생성한 후 전송한다. 전송 시 각 복제 패킷은 서로의 위치를 헤더에 저장한다. 예시에서 수신 직후 트래픽 3의 패킷만 충돌 없이 전송된다. 운용국 및 각 단말은 간섭 제

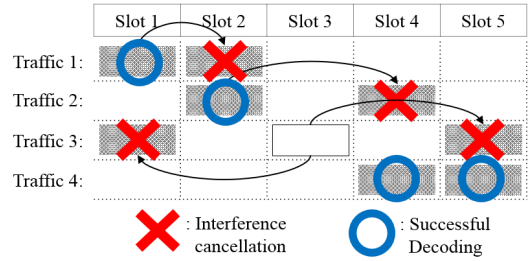


그림 1. IRSA 동작 예시  
Fig. 1. Example of IRSA

거를 통해 트래픽 3의 복제 패킷을 슬롯 1과 슬롯 5에서 제거하며, 간섭 제거를 통해 트래픽 1과 트래픽 4의 패킷이 성공적으로 수신된다. 동일한 과정으로 트래픽 1의 복제 패킷을 슬롯 2에서 제거하여 트래픽 2의 패킷을 성공적으로 수신하며, 결과적으로 모든 트래픽의 패킷이 성공적으로 수신되는 것을 확인할 수 있다. 예제와 같이 IRSA는 이러한 간섭 제거 및 복호화 과정을 반복하여 수행함으로써 패킷 손실을 최소화 한다.

IRSA 복제 패킷의 확률 분포는 PGF (Probability Generating Function)  $A(x)$ 를 통해 표현된다. PGF에서  $x$ 의 계수는 확률을 지수는 복제 패킷의 개수를 나타내며,  $A'(1)$ 은 평균 복제 패킷의 개수를 나타낸다. 따라서 FSA (Framed Slotted ALOHA)와 CRDSA의 PGF는 각각  $A_{FSA}(x) = x$ 와  $A_{CRDSA}(x) = x^2$ 이다. 본 논문에서 IRSA의 PGF는 [7]에 사용된  $A_{IRSA}(x) = 0.5x^2 + 0.28x^3 + 0.22x^8$ 을 사용한다. 그림 2는 FSA, CRDSA, IRSA의 성능을 비교한 것으로 성능 분석은 [7]을 참조하였다. 그래프를 통해 IRSA, CRDSA, SA 순으로 최대 처리량이 높은 것을 확인할 수 있으며, 각각 0.75, 0.6, 1에 해당하는 트래픽 부하에서 최대 처리량을 나타낸다. 여기서 트래픽 부하는 복제 패킷으로 인해 증가된 물리적인 트래픽 부하가 아닌, 트래픽의 개수를 통해 산정된 논리적인 트래픽 부하를 나타낸다. 최대 처리량에 해당하는 트래픽 부하를 목표 (target) 트래픽 부하  $G^*$ 라고 할 때, IRSA에서는 트래픽 부하가  $G^*$ 를 넘어서는 순간 더욱 급격하게 처리량이 감소한다. 다시 말하면 IRSA를 사용하면 FSA나 CRDSA에 비하여 최대 처리량은 증가하지만, 트래픽 부하에 매우 민감한 시스템이 된다.

### III. 트래픽 부하 제어 기법 연구

본 장에서는 제안 기법 소개에 앞서, SA 환경에서

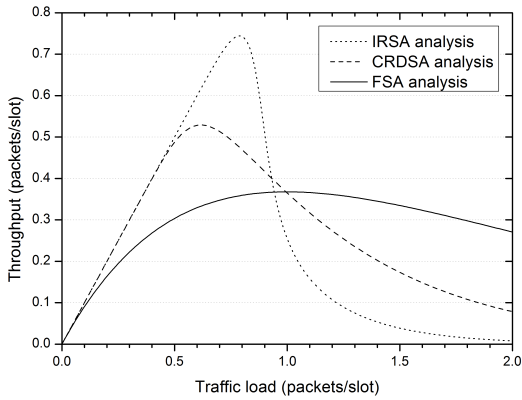


그림 2. 랜덤 액세스 처리량 비교  
Fig. 2. Throughput comparison of random access protocol

기 제시된 트래픽 부하 제어 기법에 대해 간략하게 소개한다.

### 3.1 Dynamic Access Probability<sup>[11]</sup>

DAP는 트래픽이 발생한 경우 access probability ( $p_{access}$ )에 의해 전송 여부를 결정한다. 채널에 트래픽 부하가 작을 경우  $p_{access}$ 는 1이 되며, 트래픽 부하가 많을 때는 채널 상태에 따라  $p_{access}$ 는 1보다 작은 값이 선택된다.  $p_{access}$ 는 네트워크를 관장하는 운용국(또는 기지국)에서 일정 프레임(또는 주기)마다 broadcast 채널을 통해 전체 단말에게 전파한다. 운용국은 프레임 기간 동안 트래픽 로드를 수집하여  $p_{access}$ 를 결정하며, DAP에서  $p_{access}$ 를 결정하는 수식은 다음과 같다.

$$p_{access}(t+1) = \min\left\{\frac{p_{access}(t)}{G_E(t)}, 1\right\} \quad (1)$$

수식 (1)에서 t는 프레임의 번호를 나타내며  $G_E$ 는 프레임에 실제 접속한 트래픽의 추정값 (estimated value)을 나타낸다. 따라서 트래픽 부하가 클 경우  $p_{access}$ 는 줄어들며, 트래픽 부하가 작을 경우  $p_{access}$ 는 증가한다. DAP는 연속하는 두 프레임의 트래픽 부하가 유사하다는 가정을 통해 수식이 도출되었다. 따라서 트래픽 변화량이 클 경우 트래픽 부하 제어 능력이 낮아지는 단점이 있다.

### 3.2 Load Adaptive Multiple Access with Congestion Avoidance<sup>[12,13]</sup>

LAMA/CA는 DAP와 동일하게 프레임마다 전파되

는  $p_{access}$ 를 통해 채널 접속을 제어하며, 추가적으로 congestion bit를 함께 보낸다. LAMA/CA의  $p_{access}$  계산 방법은 매우 간단하다. 현재 프레임의 트래픽 부하가 HI-THRESHOLD를 넘어설 경우  $p_{access}$ 를 절반으로 줄이며, 트래픽 부하가 LOW-THRESHOLD 밑으로 내려갈 경우  $p_{access}$ 를 두 배로 증가시킨다. 또한  $p_{access}$ 가 CONGESTION-THRESHOLD보다 낮을 경우 즉, 채널이 매우 혼잡하다고 판단되는 경우 congestion bit를 1로 세팅하며, congestion bit가 1일 동안 새로운 트래픽의 채널 유입을 제한한다. 그리고  $p_{access}$ 가 NORMAL-THRESHOLD보다 커질 경우 다시 congestion bit를 0으로 세팅하며, 새로운 트래픽이 채널에 접근하는 것을 허용한다.

LAMA/CA에서 congestion bit가 1일 경우 채널에는 backlogged 트래픽만 유입된다. Backlogged 트래픽은 이전 프레임에서 전송을 실패한 트래픽을 의미하며, t번째 프레임에서 backlogged 트래픽의 부하를  $G_B(t)$ 라고 할 때 수식 (2)과 같이 계산된다.

$$G_B(t) = G(t) - G_S(t) \quad (2)$$

수식 (2)에서  $G_S$ 는 전송에 성공 (success)한 트래픽 부하를 나타낸다. LAMA/CA는 최대 전송률을 유도하기 위해 congestion bit가 1일 경우  $p_{access}$ 를  $1/G_B$ 로 계산한다.

Congestion bit가 1일 경우 LAMA/CA는 이론적으로 최대의 전송률을 보장한다. 그러나 채널의 혼잡 정도를 판단하기 까지 즉,  $p_{access}$ 가 CONGESTION-THRESHOLD보다 낮아질 때까지 여러 프레임이 소요되기 때문에, 전송 지연이 발생하며 특히, 위성통신 처럼 프레임의 주기를 길게 가져가는 시스템에서는 그 정도가 더욱 심하다. 또한 congestion bit가 0일 경우에는 단순하게  $p_{access}$ 를 절반으로 또는 두 배로 변화시키기 때문에, IRSA와 같이 트래픽 부하에 민감한 시스템에서는 제어의 정확도가 낮아진다.

## IV. 혼잡제어를 위한 FCC 기법 제안

### 4.1 Fast Congestion Control

본 논문에서는 IRSA를 사용하는 위성 랜덤 액세스 채널에서 bursty 트래픽을 안정적으로 빠른 시간 내에 전송하는 것을 목표로 트래픽 부하 제어 기법인 FCC를 제안한다. FCC는 트래픽 부하 추정값과

backlogged 트래픽을 바탕으로 채널의 트래픽 부하를 제어한다. 트래픽 부하 추정값은  $G_E$ 로 표현하며, IRSA에 관한 트래픽 부하 추정 기법은 4.2절에서 설명하였다. FCC는 기존 기법들과 동일하게  $p_{access}$ 를 통해 채널 접속을 제어한다. 따라서  $t$  번째 프레임에 실제 접속하는 트래픽 부하  $G(t)$ 는  $t-1$  번째 프레임의 backlogged 트래픽  $G_B(t-1)$ 과  $t$  번째 프레임의 신규 (fresh) 트래픽  $G_F(t)$ 의 합에  $p_{access}$ 를 곱한 값이 된다. 트래픽 부하 추정기는 실제 접속한 트래픽 부하를 추정하므로 트래픽 부하 추정값  $G_E(t)$ 는 아래와 같은 관계식을 만족한다.

$$G(t)p_{access}(t) = \{G_B(t-1) + G_F(t)\}p_{access}(t) \approx G_E(t) \quad (3)$$

수식 (2)를 수식 (3)에 대입하면 backlogged 트래픽 부하를 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$G_B(t) \approx G_E(t)/p_{access}(t) - G_S(t) \quad (4)$$

기존 트래픽 부하 제어 기법 대비 FCC의 가장 큰 차이점은 제어를 위해 backlogged 트래픽 로드를 적극적으로 활용하는 것이다. IRSA에서는 목표 트래픽 부하  $G^*$ 를 넘어서는 트래픽 부하가 유입되면, 충돌로 인하여 처리량이 급격하게 떨어진다. 따라서  $G_B$ 가  $G^*$ 보다 크다는 것은 다음 프레임에서 신규 트래픽을 제외한 backlogged 트래픽 만으로도 이미 목표 트래픽 부하를 넘어서는 상황이라는 것을 의미한다. 이를 바탕으로 FCC는  $G_B$ 가  $G^*$ 보다 큰 상황을 congestion 상태로 정의하고 신규 트래픽의 유입을 제한한다. Congestion 상태에서 발생한 신규 트래픽은 채널에 접속하지 않고 대기하다가 congestion 상태가 종료되는 순간 채널에 접속한다. 따라서 신규 트래픽은 backlogged 트래픽이 많을수록 즉, congestion 상태가 길수록 채널 접속에 대한 starvation을 길게 경험하게 된다. FCC는 congestion 상태로 빠르게 전환하는 만큼 congestion 상태에서 빠르게 벗어나며, 신규 트래픽이 starvation을 겪는 시간 또한 경쟁 기법에 비해 짧다. 따라서 결과적으로 FCC에서는 신규 트래픽을 포함한 전체 트래픽 중, 주어진 DELAY-THRESHOLD를 넘기지 않고 처리되는 정도가 다른 기법에 비해 높다. 이와 관련된 결과 및 논의는 V장에 제시하였다.

FCC는 LAMA/CA보다 매우 빠르게 congestion 상태에 진입하게 한다. 발생 양이 많은 bursty 트래픽의

경우 트래픽 발생과 동시에 congestion 상태가 될 수 있으며, 전송 상황에 따라 변화하는 군 트래픽의 경우 이러한 상황이 주로 발생할 수 있다. 이러한 상황에서 FCC는 backlogged 트래픽을 계산해서 congestion control을 수행한다. 반면, LAMA/CA는 트래픽 부하의 증가량에 상관없이 동일한 방식으로 access probability를 조정하므로 초기 대응에 상대적으로 긴 시간이 소요된다. 이러한 소요 시간은 긴급성을 요구하는 전송 메시지에 매우 불리한 조건이다.

Congestion 상태에서 FCC는 IRSA의 최대 처리량을 확보하기 위해  $p_{access}$ 를  $G^*/G_B$ 로 계산한다. 그리고  $G_B$ 의 값이  $G^*$ 의 절반으로 떨어질 경우 congestion 상태에서 벗어난다. FCC는 congestion 상태를 전파하기 위해서 congestion bit 대신 congestion count ( $c_{cnt}$ )를 사용한다.  $c_{cnt}$ 는 congestion 상태에 진입하면서 1로 세팅되며, congestion 상태가 지속되는 동안 매 프레임마다 1씩 증가한다. 따라서  $c_{cnt}$ 는 congestion 상태의 지속 시간 즉, 몇 개의 프레임 동안

```

INITIALIZATION:
SET: delay_threshold
    p_access = 1, c_cnt = 0
REPEAT:
    compute G_B and G_S
    G_B = max(0, G_E/p_access - G_S)
    IF(c_cnt = 0)
        IF(G_B > G^*)
            p_access = min(1, G^*/G_B)
            c_cnt = 1
        ELSE IF(G_B < G^*/2)
            p_access = 1
        END IF
    ELSE
        IF(G_B > G^*/2)
            p_access = min(1, G^*/G_B)
            c_cnt = c_cnt + 1
        ELSE
            p_access = 1/(c_cnt + 1)
            c_cnt = 0
        END IF
    END IF
END REPEAT.
    
```

그림 3. 운용국을 위한 FCC 의사코드  
Fig. 3. FCC pseudo code for network control center

congestion 상태가 지속되었는지를 나타낸다.  $c_{cnt}$ 는 congestion 상태를 벗어날 때 0으로 세팅된다.

FCC는 빠르게 congestion 상태에 들어오는 만큼 빠르게 congestion 상태에서 벗어난다. 따라서 congestion 상태가 지속되는 동안 발생한 신규 트래픽은 drop되지 않고 대기하다가 congestion 상태가 끝나면 동시에 접속하게 된다. Bursty 트래픽에서 새롭게 유입되는 트래픽 부하를 정확하게 예측하는 것은 불가능하지만, congestion 상태가 지속되는 시간이 길수록 쌓인 트래픽의 양이 많을 것으로 예상할 수 있다. 따라서 FCC는 congestion 상태에서 벗어날 때,  $p_{access}$ 를  $1/(c_{cnt} + 1)$ 로 계산한다. 이 값의 의미는 congestion 상태 접속 후 매 프레임마다 최대  $G^*$  만큼의 트래픽이 발생한 것으로 어림짐작하는 것을 뜻한다. Congestion 상태에서 벗어난 이후 backlogged 트래픽이  $G^*/2$  보다 작을 경우 FCC는 곧바로  $p_{access}$ 를 1로 세팅하여 전송률 증가 및 지연 시간 단축을 꾀한다. 그림 3은 지금까지 설명한 FCC의 제어 알고리즘을 [12]에 사용된 의사코드 (pseudo code)로 표현한 것이다.

위성단말은 트래픽의 발생 시점부터 현재까지의 프레임 개수를 delay count ( $d_{cnt}$ )에 저장한다. 따라서  $c_{cnt}$ 보다  $d_{cnt}$ 가 작은 트래픽은 congestion 상태 동안

```

INITIALIZATION:
     $d_{cnt} = 0$ 
REPEAT:
     $d_{cnt} = d_{cnt} + 1$ 
    generate random number  $r$ 
    IF( $c_{cnt} > 0$ )
        IF( $d_{cnt} > c_{cnt}$ )
            IF( $r < p_{access}$ )
                transmit packet
            END IF
        END IF
    ELSE
        IF( $r < p_{access}$ )
            transmit packet
        END IF
    END IF
    IF( $d_{cnt} > DELAY-THRESHOLD$ )
        drop packet
    END IF
END REPEAT.
    
```

그림 4. 위성단말을 위한 FCC 의사코드  
Fig. 4. FCC pseudo code for satellite terminal

채널에 접근하지 못한다. congestion 상태에서 벗어나는 순간  $c_{cnt}$ 는 0이 되며 따라서 모든 트래픽이 채널에 접속하게 된다. 모든 트래픽이 앞서 설명한 것처럼 DELAY-THRESHOLD 동안 전송되지 못할 경우 폐기된다. 그림 4는 위성단말 관점에서 FCC의 제어 알고리즘을 의사코드로 표현한 것이다.

#### 4.2 IRSA를 위한 부하 추정 기법

모든 트래픽 부하 제어 기법은 현재 채널의 트래픽 부하를 정확하게 추정했다는 가정을 기반으로 설계되었다. FSA에서 트래픽 부하 추정 기법은 RFID 연구와 관련하여 많은 연구가 진행되었다. 본 연구에서는 이를 바탕으로 IRSA에서의 트래픽 부하 추정 기법으로 확장하였다. 트래픽 부하를 추정하기 위해서는 먼저 해당 프레임의 상태 즉, idle 슬롯의 개수 ( $N_i$ ), collision 슬롯의 개수 ( $N_c$ ), success ( $N_s$ ) 슬롯의 개수를 알아야 한다. 이를 벡터  $\nu$ 로 표현하면  $\nu = \langle N_i, N_s, N_c \rangle$ 이다. FSA에서 프레임 내 각 슬롯의 상태는 상호 연관되어 있으며, 전송 패킷의 수가  $n$ 일 때 프레임 내 슬롯의 상태가 특정 벡터  $\nu$ 가 될 확률은 수식 (5)과 같이 표현된다[15].

$$P_n(\nu) = \binom{N}{N_s} \binom{N-N_s}{N_c} \sum_{j=0}^{N_c} \sum_{l=0}^{N_c-j} \binom{N_c}{j} \binom{N_c-j}{l} \frac{(-1)^{N_c-j} n! j^{n-l} n^{N_s}}{N^n (n-l-N_s)!} \tag{5}$$

MLE (Maximum likelyhood estimation) 기법은 주어진 벡터  $\nu$ 와 수식 (5)를 통해 역으로  $n$ 을 구하는 기법이다. MLE 추정기는 높은 추정 정확도를 나타내지만 계산복잡도가  $O(N^2)$ 로 매우 높다. Zanella는 MLE 추정기의 계산 복잡도를 낮추기 위해 수식 (5)의 근사 수식인 수식 (6)을 사용하였다[13].

$$P_G(\nu) = G^{N_c} e^{-GN} (e^G - 1 - G)^{N_c} \tag{6}$$

따라서 Zanella에 의해 제안된 추정기  $H_{Zan}$ 은 수식 (7)과 같이 정의 된다.

$$H_{Zan}(\nu) = \underset{G}{\operatorname{argmax}} P_G(\nu) \tag{7}$$

또한, Zanella는 수식 (6)의 미분을 통해 추정값의 범위를 줄임으로써 계산 복잡도를 더욱 낮추었다. 이에

따라 계산 복잡도는  $O(\log_2 N)$ 으로 감소하였다.

IRSA를 위한 트래픽 부하 추정기를 설계하기 위해서는 FSA에서의 수식 (5)와 같은 수식을 도출하는 것이 필요하다. 그러나 이는 매우 높은 수학적 수준을 요구한다. Liva는 IRSA 채널에서 프레임 내 슬롯의 개수가 매우 클 경우 프레임 내 패킷의 분포는  $GA'(1)$ 의 arrival rate를 가지는 Poisson 분포를 따르는 것을 증명하였다<sup>[7]</sup>. 다시 말하면, 프레임이 매우 클 경우  $GA'(1)$ 의 트래픽 분포를 가지는 FSA와 동일하다는 것이다. 본 논문에서는 이를 바탕으로 수식 (7)을 통해 물리적 트래픽 부하를 추정하고  $A'(1)$ 로 나눔으로써 IRSA의 논리적 트래픽 부하를 추정하였다. 즉 본 논문에서 사용한 추정기  $H_{IRSA}$ 는 수식 (8)과 같다.

$$H_{IRSA}(\nu) = H_{Zan}(\nu) / A'(1) \quad (8)$$

## V. 모의실험

### 5.1 모의실험 파라미터 및 트래픽 모델

본 논문에서 모의실험은 컴퓨터 응용 프로그램인 MATLAB을 활용해 수행되었으며, 모의실험 코드는 II장의 시스템 모델과 III장 IV장의 알고리즘을 기반으로 작성되었다. 모의실험에 사용된 파라미터는 표 1과 같다. 프레임 내 슬롯의 개수는 100개이며, DELAY-THRESHOLD가 20 프레임과 100 프레임일 경우의 성능을 확인하였다.  $I_{max}$ 는 IRSA에서 간섭 제어를 수행하는 횟수를 나타낸다. LAMA/CA에 사용된 파라미터는 모의실험을 통해 IRSA에서 높은 성능이 나오는 값을 활용하였다.

본 논문에서는 모의실험에서 bursty 트래픽을 발생시키기 위하여 IPP (Interrupted Poisson Process)<sup>[16]</sup>를 활용하였다. IPP는 overflow 트래픽의 모델링에 주로 사용되며, 랜덤 스위치에 의해 발생하는 Poisson 프로세스 모델이다. IPP는 트래픽의 발생 가능성을 Bernoulli process로 결정하며, 트래픽 발생 가능 상태 (ON)에서는 트래픽이 Poisson process로 발생하고, 트래픽 발생 불가능 상태 (OFF)에서는 트래픽이 전혀 발생하지 않는다. 따라서 IPP는 Bernoulli process의 확률  $\theta$ 와 Poisson process의 arrival rate  $\lambda$ 에 의해 제어된다. 긴 시간 구간 (long-term)에 대한 arrival rate는  $\theta$ 와  $\lambda$ 의 곱으로 나타나며,  $\bar{\lambda}$ 로 정의한다. IPP에서  $\theta$ 가 낮을수록 bursty 트래픽 즉, 단발성 (burstiness)이 큰 트래픽이 발생하며,  $\theta$ 가 1인 경우에는 일반적인 Poisson process가 된다.

표 1. 모의실험 파라미터  
Table 1. Simulation parameters

Parameters		Values
No. of slots in a frame		100 slots
No. of frames per simulation		10,000 frames
DELAY-THRESHOLD		20 frames
$G^*$		1 (SA), 0.75 (IRSA)
$I_{max}$ (for IRSA)		10
LAMA /CA	HIGH-THRESHOLD	$1.6G^*$
	LOW-THRESHOLD	$0.6G^*$
	NORMAL-THRESHOLD	$2^{-2}$
	CONGESTION-THRESHOLD	$2^{-4}$

모의실험을 통해 비교된 기법은 FCC, DAP, LAMA/CA이며, 추가적으로 이상적인 (ideal) 트래픽 제어 상황을 비교하였다. 모의실험은 트래픽 모델을 변화시키면서 FSA와 IRSA에서의 처리량, drop ratio, 지연 시간을 측정하였다. 본 논문의 랜덤 액세스 채널은 IPP에 의해 트래픽이 발생하는 infinite population 모델을 따르며, 전송 실패 시 재전송을 허용하고 있다. 이러한 랜덤 액세스 채널에서는 stability에 관한 문제가 발생한다. 즉, 랜덤 액세스 채널에 처리량을 넘어서는 트래픽이 유입될 경우, backlogged 트래픽이 무한대가 되는 unstable한 상태가 될 수 있다. Unstable한 채널에서 지연 시간은 무한대가 되기 때문에, 지연 시간의 측정은 무의미하다. 이에 따라, 본 논문에서는 채널을 stable하게 유지하기 위하여 DELAY-THRESHOLD를 설정하고, DELAY-THRESHOLD를 넘어서는 트래픽은 모두 폐기 (drop)하였다. 즉, 본 논문에서 drop ratio가 낮다는 것의 의미는 DELAY-THRESHOLD를 넘지 않고 처리되는 패킷, 즉, 전송 지연이 짧은 패킷이 많다는 것을 의미한다. 반대로 높은 drop ratio는 전송 지연이 긴 패킷이 많다는 것을 의미한다. 본 논문에서는 긴급한 패킷을 얼마나 많이 수용하는 지를 확인하기 위해 비교적 높은 트래픽 폐기 기준인 DELAY-THRESHOLD가 20 프레임인 상황에서 처리량과 drop ratio를 확인하였다. 또한 지연 시간을 측정하기 위해서는 비교적 높은 트래픽 폐기를 하지 않는 DELAY-THRESHOLD가 100 프레임인 상황에서 결과를 확인하였다.

### 5.2 모의실험 결과

먼저, 제안 기법을 통한 처리량의 확보와 긴급한 패킷의 수용 정도를 확인하기 위하여 DELAY-THRESHOLD

가 20인 상황에서의 모의실험 결과를 기술한다. 그림 5와 6은  $\theta$ 가 1인 경우 즉, 일반적인 Poisson process에서 각 기법의 처리량과 drop ratio를 나타낸다. 그림 5에서 IRSA를 사용할 경우 FSA보다 좀 더 높은  $\bar{\lambda}$  즉, 많은 트래픽을 수용하는 것을 확인할 수 있다. 또한 제어 기법을 사용할 경우 트래픽이 높은 상황에서도 일정 수준의 처리량을 유지하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 그림 6을 통해 트래픽 부하가 높을 경우 대부분의 패킷이 DELAY-THRESHOLD를 넘겨 폐기되는 것을 확인할 수 있다. 그림 5와 6에서 FCC의 성능이 DAP보다 미세하게 낮은 것을 확인할 수 있다. 그 이유는  $\theta=1$ 이기 때문에 트래픽의 가변량이 적어 DAP에 좀 더 유리하기 때문이다. 그림 6을 통해 모든 기법이  $10^{-3}$ 의 drop ratio를 보장하기 위해서는 FSA를 사용할 경우  $\bar{\lambda}$ 가 0.3 이하여야 하며, IRSA를 사용

할 경우  $\bar{\lambda}$ 가 0.5 이하여야 한다. 따라서 뒤따르는 모의실험 결과에서는  $\bar{\lambda}$ 가 0.5인 높은 트래픽 부하 상황과  $\bar{\lambda}$ 가 0.3인 낮은 트래픽 부하 상황에서  $\theta$ 에 따른 각 기법의 성능을 확인하였다.

그림 7은  $\bar{\lambda}=0.5$ 일 때 즉, 높은 트래픽 부하 상황에서  $\theta$ 에 따른 drop ratio를 나타낸다. 이 때, FSA는 처리량이 낮고 drop ratio가 높아 해당 트래픽 부하를 감당하지 못하므로 IRSA에 대해서만 결과를 도시하였다. 그림 3을 통해  $\theta$ 가 작을수록 즉, 트래픽의 단발성이 커질수록 더 많은 패킷이 폐기되는 것을 확인할 수 있다. 이 때, FCC는 이상적인 트래픽 제어 기법과 가장 근접한 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

그림 8은  $\bar{\lambda}=0.3$ 일 때 즉, 낮은 트래픽 부하 상황에서  $\theta$ 에 따른 drop ratio를 나타낸다. 우선, 낮은 트

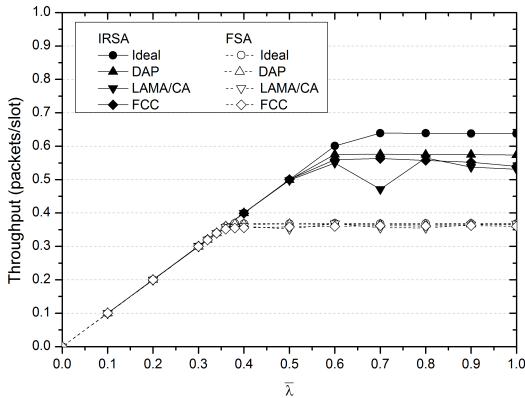


그림 5. 처리량 비교 (DELAY-THRESHOLD=20,  $\theta=1$ )  
Fig. 5. Comparison of throughput (DELAY-THRESHOLD=20,  $\theta=1$ )

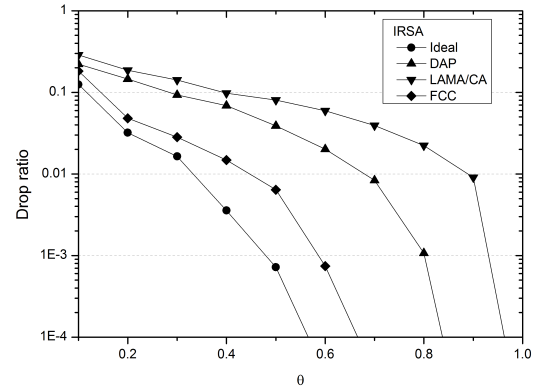


그림 7. Drop ratio 비교 (DELAY-THRESHOLD=20,  $\bar{\lambda}=0.5$ )  
Fig. 7. Comparison of drop ratio (DELAY-THRESHOLD=20,  $\bar{\lambda}=0.5$ )

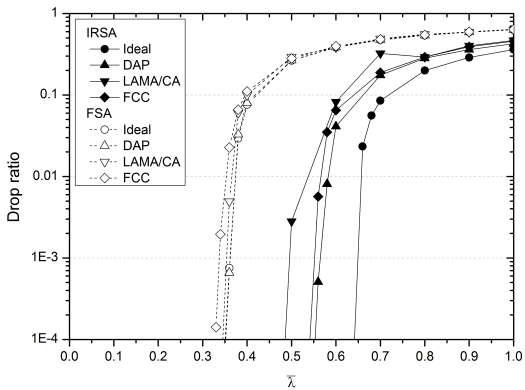


그림 6. Drop ratio 비교 (DELAY-THRESHOLD=20,  $\theta=1$ )  
Fig. 6. Comparison of drop ratio (DELAY-THRESHOLD=20,  $\theta=1$ )

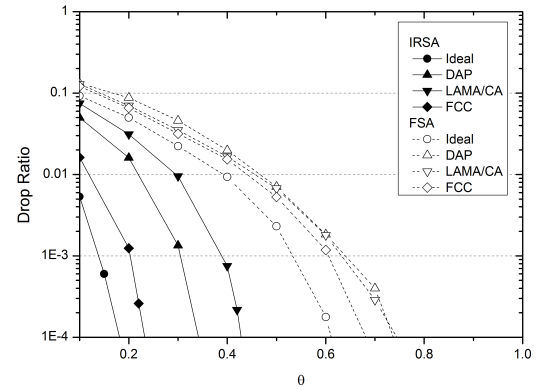


그림 8. Drop ratio 비교 (DELAY-THRESHOLD=20,  $\bar{\lambda}=0.3$ )  
Fig. 8. Comparison of drop ratio (DELAY-THRESHOLD=20,  $\bar{\lambda}=0.3$ )



래픽 부하 상황에서도 IRSA가 FSA의 성능을 상회하는 것을 확인할 수 있다. 또한, IRSA와 FSA에서 모두 FCC가 DAP와 LAMA/CA보다 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있다.

앞선 결과에 추가적으로 지연 시간 측정을 위해 DELAY-THRESHOLD를 100 프레임으로 세팅한 상황에서의 모의실험 결과를 기술한다. 그림 9는 IRSA를 사용 시,  $\lambda$ 가 0.5와 0.3일 때 측정된 전송 지연을 나타낸다. 그래프를 통해 대부분의 영역에서 FCC가 경쟁 기법에 비해 낮은 전송 지연을 나타내는 것을 확인할 수 있다. Burstiness가 매우 큰 상황( $\lambda$ 가 0.5이고  $\theta$ 가 0.3보다 작은 경우)에서 DAP가 FCC보다 낮은 지연시간을 나타낸다. 이는 DAP에서 drop 되는 트래픽의 양이 FCC보다 많아 지연 시간을 측정하는 표본의 양이 적어져서 발생하는 현상이다. 동일한 영역에서 그림 7의 결과 값을 통해, 실제로는 FCC가 전송 지연이 짧은 (DELAY-THRESHOLD보다 작은) 트래픽이 DAP보다 많이 존재하는 것을 확인할 수 있다.

모의실험 결과, 트래픽이 높은 상황에서도 낮은 상황에서도 IRSA가 FSA에 비해 높은 처리량 및 낮은 drop ratio를 보장하는 것을 확인하였다. 또한 제안 기법인 FCC를 사용할 경우, 트래픽 발생의 burstiness가 큰 환경에서 경쟁 기법 대비 낮은 drop ratio를 보장하는 것, 즉, 긴급한 트래픽을 많이 처리하는 것을 확인하였다. 트래픽 발생의 burstiness가 낮아지는 경우에는 DAP의 성능이 FCC에 우세하였으나 그 차이가 매우 미미하였다. 군 트래픽의 경우 전장 상황에 따라 순간적으로 트래픽이 증가할 수 있으며, 이러한 전송 트래픽 들은 긴급성을 요구한다. 따라서 트래픽 변화에 유동적으로 대처하면서 신속한 데이터 전송을 보

장하는 FCC는 군 위성통신 시스템에 적합한 기술임을 확인할 수 있다.

## VI. 결 론

본 논문은 군 위성통신 네트워크에서 발생하는 bursty 트래픽의 안정적이고 빠른 전송을 지원하기 위하여 향상된 랜덤 액세스 기법인 IRSA를 위한 트래픽 부하 제어 기법인 FCC를 제안하였다. 복제 패킷을 사용하는 IRSA는 SA에 비해 최대 처리량이 비약적으로 증가하였으나 트래픽 부하에 대한 민감성 또한 함께 증가하였다. FCC는 이러한 특징을 반영하여 최대 처리량을 넘어서는 backlogged 트래픽이 존재할 경우, congestion 상태로 빠르게 전환하고 신속한 전송을 보장한다. 또한, FCC는 이전 프레임의 access probability와 현재 프레임의 추정 정보를 활용하여 backlogged 트래픽의 양을 정확하게 추정하여 제어의 정확도를 향상시켰다. 본 논문에서는 모의실험을 통하여 FCC가 기 제안된 트래픽 부하 제어 기법인 DAP와 LAMA/CA에 비해 긴급한 패킷을 더욱 많이 처리하는 것을 확인하였다. 주목할 점은 FCC가 단발성이 높은 bursty 트래픽에서 경쟁 기법 대비 안정적인 성능을 보장한다는 것이다. 이러한 특성은 시시각각 변화하는 군 트래픽을 안정적으로 그리고 신속하게 지원하기위해 필수적인 요소이다.

## References

- [1] H. Noh, K. Go, K. Lee, J. Kim, J. Lim, and Y. Song, "Resource allocation and IP networking for next generation military satellite communications system," *Inf. Commun. Mag.*, vol. 38C, no. 11, pp. 939-954, Nov. 2013.
- [2] W. Soon, 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," *The J. Korea Inform. Commun. Society*, vol. 37c, no. 11, pp.1138-1149, Dec. 2012.
- [3] H. W. Park, H. S. Lee, and W. S. Yoon, "Performance analysis of cooperative communication with spread spectrum to overcome channel blockage for on-the-move

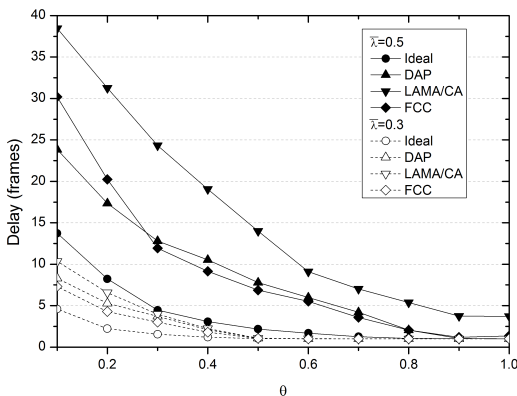


그림 9. Delay 비교 (IRSA, DELAY-THRESHOLD=100)  
Fig. 9. Comparison of delay (IRSA, DELAY-THRESHOLD=100)

- terminal in next generation satellite communication systems,” *The J. Korea Inform. Commun. Society*, vol. 39c, no. 09, pp.757-766, Sep. 2014.
- [4] R. D. Gaudenzi and O. D. R. Herrero, “Advances in random access protocols for satellite networks,” *Int. Workshop on Satellite and Space Commun. (IWSSC)*, pp. 331-336. 2009.
- [5] N. Kuhn, H-C. Bui, J. Lacan, J. Radzik, and E. Lochin, “On the trade-off between spectrum efficiency with dedicated access and short end-to-end transmission delays with random access in DVB-RCS2,” in *Proc. ACM MobiCom Workshop on Lowest Cost Denominator Networking for Universal Access (LCDNet 2013)*, 2013.
- [6] E. Casini, R. De Gaudenzi, and O. del R. Herrero, “Contention resolution diversity slotted ALOHA (CRDSA): an enhanced random access scheme for satellite access packet networks,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 6, no. 4, Apr. 2007.
- [7] G. Liva, “Graph-based analysis and optimization of contention resolution diversity slotted ALOHA,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, no. 2, Feb. 2011.
- [8] *Digital Video Broadcasting (DVB); Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 2: Lower Layers Satellite Specification*, ETSI EN 301 545-2, Jan. 2012.
- [9] D. G. Jeong and W. S. Jeon, “Performance of an exponential backoff scheme for slotted-ALOHA protocol in local wireless environment,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 44, no. 3, 1995.
- [10] J. Myung, W. Lee, and J. Srivastava, “Adaptive binary splitting for efficient RFID tag anti-collision,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 10, no. 3, 2006.
- [11] Z. Naor and H. Levy, “A centralized dynamic access probability protocol for next generation wireless network,” *IEEE Int. Conf. Comput. Commun. (INFOCOM)*, vol. 2, pp. 767-775, Anchorage, AK, Apr. 2001.
- [12] Z. Naor, “An efficient short messages transmission in cellular networks,” *IEEE Int. Conf. Comput. Commun. (INFOCOM)*, vol. 1, Mar. 2004.
- [13] Z. Naor, “LAMA/CA: A load-adaptive MAC protocol for short packets,” *ACM Mobile Netw. Appl.*, vol. 15, no. 5, 2010.
- [14] J. Wiss and R. Gupta, “The WIN-T MF-TDMA network centric waveform,” in *Proc. IEEE Military Commun. Conf.*, pp. 1-7, Orlando, FL, Oct. 2007.
- [15] A. Zanella, “Estimating collision set size in framed slotted ALOHA wireless networks and RFID systems,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, no. 3, pp. 300-303, 2012.
- [16] H. Wu, C. Zhu, R. J. La, X. Liu, and Y. Zhang, “FASA: Accelerated S-ALOHA using access history for event-driven M2M communications,” *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 21, no. 6, Dec. 2013.

노 홍 준 (Hong-jun Noh)



2008년 2월: 아주대학교 정보 및 컴퓨터공학과 졸업  
 2008년~현재: 아주대학교 컴퓨터공학과 석박사통합과정  
 <관심분야> 위성 통신망, MF-TDMA, 랜덤 액세스, 전송 데이터링크

이 윤 성 (Yun-seong Lee)



2014년 2월: 아주대학교 정보 및 컴퓨터공학과 졸업  
 2014년~현재: 아주대학교 컴퓨터공학과 석사과정  
 <관심분야> 위성 통신망, Dynamic-TDMA, 라우팅

**임 재 성 (Jae-sung Lim)**

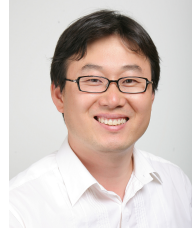


1983년 2월 : 아주대학교 전자  
공학과 학사  
1985년 2월 : KAIST 영상통신  
석사  
1994년 8월 : KAIST 디지털통  
신 박사  
1998년 3월~현재 : 아주대학교  
소프트웨어융합학과 정교수

2006년 8월~현재 : 아주대학교 국방전술네트워크 연  
구센터장

<관심분야> 이동통신, 무선네트워크, 국방전술통신

**이 호 섭 (Ho-sub Lee)**



1998년 2월 : 인하대학교 전자  
공학과 졸업  
2013년~현재 : 아주대학교 IT융  
합대학원 석사과정  
1998년~현재 : LIG빅스원  
<관심분야> 군위성통신, RF/  
MW 시스템, 메타재질 구조

**박 형 원 (Hyung-won Park)**



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

<관심분야> 전술데이터링크, 군 위성통신, 이동통신