

MIL-STD-188-220기반 무선네트워크의 CSMA 성능분석

서 난 솔[◦], 주 재 우^{*}, 장 동 운^{*}

A Performance Analysis of CSMA in Wireless Networks Based on MIL-STD-188-220

NanSol Seo[◦], JaeWoo Joo^{*}, DohngWoon Jang^{*}

요 약

전술데이터링크체계의 무선네트워크(이후 무선링크로 언급)는 전술자료를 실시간으로 공유할 수 있도록 디지털화된 전술통신 네트워크를 제공하는데 그 목적이 있다. 무선링크의 다중접속방식은 신뢰성 높은 실시간 전술자료의 교환을 위하여 설치 대상 노드의 운용환경에 따라 시분할다중접속방식(TDMA, Time Division Multiple Access)과 반송파 감지 다중접속방식(CSMA, Carrier Sense, Multiple Access)으로 운용된다. 본 논문에서는 기본적으로 TDMA로 설계된 시스템에서 MIL-STD-188-220 기반 CSMA를 운용하고자 할 때 그 운용 가능성을 검증하였으며, 이를 위한 확률적 분석기법을 제안한다. 그리고 실제장비에 기술 구현 후 그 성능을 이론치와 비교 분석하였다.

Key Words : CSMA, MIL-STD-188-220, Tactical Data Link, Mathematical Analysis

ABSTRACT

The wireless link of tactical datalink system provides a communication network to share digitalized tactical data in real-time. Also MAC(Multiple Access Control) of this system is subject to TDMA or CSMA according to a operated circumstance of target nodes to exchange the data reliably. In this paper, we verify the operability when we use CSMA scheme based on MIL-STD-188-220 in tactical datalink system which is basically designed with TDMA, and provide a mathematical analysis scheme to verify the operability and performance. Finally, by implementing CSMA scheme to a tactical datalink equipment we obtain practical results which can be compared with theoretical results.

I. 서 론

현재까지 무선통신 기술의 발전은 한정된 주파수 자원, 주파수 대역별로 상이한 전파특성, 정보보안, 사용자 환경(사용자 분포, 이동성 및 트래픽 생성 특징) 등 다양한 제약조건 하에서 데이터 전송용량을 증대시키고 중단간 시간지연을 최소화하는 것을 목적으로 이루어져 왔다. 구체적으로 각 계층(통상 ISO/OSI 기준 모델에서 구분하는 계층)에서는 해당

계층이 담당하는 기능의 목적을 극대화하기 위해 이에 해당하는 세부 기술의 연구가 이루어졌으며, 시스템 관점에서는 전체 목적(사용자 요구사항)을 달성하는 동시에 경제성과 효율성까지 고려한 계층 기술들의 선택, 그리고 기술 간의 최적 조합을 찾는 연구가 수행되었다. 이는 군용 및 상용이라는 사용자 구분을 넘어 통신네트워크 기술의 공통된 발전 과정이다. 그러나 상용/군용 통신은 사용자 환경 및 요구사항이 서로 상이하므로 공통된 시스템 표준을

◦ 주저자 : 국방과학연구소 2기술연구본부, solbba@add.re.kr, 정회원

* 국방과학연구소 2기술연구본부, jwjoo@add.re.kr, 정회원, dwjang@add.re.kr, 정회원

논문번호 : KICS2012-08-389, 접수일자 : 2012년 8월 30일, 최종논문접수일자 : 2012년 10월 25일

정립하기 어려웠고, 그에 따라 IEEE802.x, MIL-STD-x 등과 같이 상호 간 독자적인 표준을 정립하며 발전해 왔다. 본 논문에서 다루는 미군 통신 규격 중 하나인 MIL-STD-188-220의 MAC 기술 역시 잘 알려진 반송파 감지 다중접속방식(CSMA)을 기반으로 하고 있으나 IEEE802.11에서의 CSMA/CA와 비교했을 때 반송파를 감지하는 방법이나 충돌을 회피하기 위한 방법 등 구체적인 구현에 있어서는 다소 차이를 보인다. 그러나 각 시스템 내 기술들이 해당 시스템의 성능을 향상시키기 위해 변경되고 개량되었을 때 이에 대한 성능 검증은 위해 그 방법론을 제시하고 수학적 모델링을 세워 분석하고 증명하는 과정은 상용/군용 통신의 경계가 없으며 상호간의 교류가 필요하다.

무선링크의 다중접속방식은 기본적으로 TDMA 망으로 운용되며, 일부 환경에서 MIL-STD-188-220 기반의 CSMA로 운용 가능하도록 설계되었다. 다중접속방식이란 통신네트워크의 일반적 설계방식인 OSI-7계층 모델의 데이터링크 계층(제 2계층)중 MAC(Multiple Access Control)의 하위개념으로 주파수, 시간, 코드, 공간과 같은 한정된 자원을 여러 사용자가 함께 사용하고자 할 때 이들 간의 충돌 없는 원활한 송수신을 가능케 하는 채널 접속 제어 기능이다. 망설계지는 사용자 어플리케이션의 데이터 크기, 발생 빈도, 사용자 수 또는 수의 변동 등을 고려하여 다중접속방식을 선택하게 되는데 무선링크의 TDMA, CSMA 적용 역시 이와 맥락을 같이한다.

무선링크의 사용자 정보의 흐름은 일대다(point-to-multipoint) 방식이고, 정보의 생성은 주기성을 가지며 망생성 후 망 구성요소(중심노드, 일반노드)의 변화가 거의 없는 특징을 가진다. 따라서 무선링크의 MAC은 TDMA 또는 CDMA와 같은 정적방식(스케줄링에 의한 비경쟁 방식)이 적합하다. 그러나 무선링크의 송수신기로 기존 아날로그 무전기(전송 대역폭 : 약25KHz)를 사용하므로 대역확산 기술을 기반으로 하는 CDMA는 부적합하며, 따라서 TDMA가 무선링크에서 적용 가능한 최선의 MAC기술이라 할 수 있다. 또한 무선링크의 MAC으로 TDMA와 함께 경쟁 기반의 CSMA가 고려된 이유는 망설계의 용이함 때문으로, TDMA의 경우 망 시작/종료 시점, 망 가입노드의 개수 및 종류, 슬롯할당 등의 파라미터를 운용 전에 확정지어야하며, 운용 중에 변경이 불가능하지는 않지만 그 절차가 경쟁 기반의 MAC에 비하여 다소 복잡하다. 특

히 어떤 노드가 망에 참여하게 될지 사전에 정해지지 않은 경우, 짧은 시간동안 TDMA 망설계를 하고 설계된 망구성정보를 각 노드에 배포하는 과정이 여의치 않으므로 별도의 망설계가 필요 없는 경쟁 기반의 MAC을 적용하게 되었다. 물론 MIL-STD-188-220의 표준에는 각 노드별로 고유한 주소가 있고, 망 가입 시 자신의 주소를 망가입요청 메시지에 포함하여 망 내 모든 노드에게 배포하고 각 노드는 토폴로지 업데이트를 수행하는 등 망관리 시스템이 정의되어 있으나 무선링크의 CSMA는 앞에서의 이유로 이를 간소화하였다.

본 논문에서는 사용자 요구사항을 충족시키기 위해 기본적으로 TDMA로 설계된 시스템에서 CSMA를 운용하고자 할 때 그 운용 가능성에 대한 검증 및 적정 운용파라미터값을 도출하였으며, 이를 위한 확률적 분석기법을 제안한다. 그리고 실제장비에 기술 구현 후 그 성능을 이론치와 비교 분석하였다.

이어지는 2장에서는 문제에 대한 정의를 구체화하여 분석모델을 수립하였으며, 3장에서는 분석의 결과를 바탕으로 시스템 성능을 최적화하기 위한 파라미터 도출 및 실장비와의 성능 비교를 수행하였다. 마지막으로 4장에서 본 논문의 결론을 도출하였다.

II. 문제 수립(Problem Formulation)

2.1. TDMA 운용 환경

무선링크의 RF송수신단은 기존 군에서 사용하는 무전기를 이용하며 기저대역에서의 전송 심볼레이트는 약8Ksps이다. TDMA 프레임 구조는 한 프레임이 12초 주기로 운용되며 프레임 내 약2000개 미니슬롯이 존재한다. 이 중 일부는 중심노드로 할당되고, 나머지는 개별 가입자 노드로 할당된다. 가입자 노드의 전송채널 구성은 데이터 전송이 불가능한 무전기 PTT(Push-To-Talk)가드+수신무전기 AGC(Auto Gain Control) 구간(약70미니슬롯)과 심볼동기획득 및 모델 헤더 구간(약5미니슬롯), 그리고 일반적으로 16워드(1워드는 72bits) 크기를 갖는 사용자 데이터 구간(약15미니슬롯)으로 되어 있다. 따라서 가입자당 90미니슬롯이 할당되고 한 프레임동안 망에 가입 가능한 최대 사용자 수는 2000/90인 22개가 된다. 노드 수에 따른 channel utilization과 연관 지어 생각해보면 이는 채널의 가용 용량을 최대로 사용한 경우이며, MAC 기법으로 스케줄링 방식의 TDMA를 사용하는 주된 이유가 된다. 그러나 이와 같은 조건으로 CSMA를 운용

할 경우, 결론적으로 망의 운용이 불가능하다. 일반적으로 TDMA의 channel utilization이 이상적인 값에 가까워지는 환경에서 CSMA의 channel utilization은 현저히 낮아진다. 이에 따라 TDMA기반의 운용환경에 CSMA를 바로 적용하기는 어려우며, CSMA 특성에 맞는 운용 조건에 대한 정의가 필요하다.

2.2. CSMA 운용 환경을 바탕으로 한 문제 수립

무선링크의 MAC은 사용자 데이터 트래픽 특성 및 망구성 노드의 변화 정도를 고려하였을 때 기본적으로 TDMA로 설계할 필요가 있었으며, 이에 따라 TDMA에 적합한 모뎀 프레임 구조를 도출하였다. 또한 무선링크의 CSMA MAC은 TDMA 모뎀 프레임 구조를 크게 변경하지 않고 기존 구조에 MIL-STD-188-220 프로토콜¹¹⁾을 수행하기 위한 헤더만을 추가하여 구현되었으며, 따라서 다음과 같은 특징이 분석모델 수립에 있어 고려되어야 한다.

- 트래픽 생성 특징 : 12초 주기로 1패킷(16워드), 그리고 12초 내 임의 시점에 1패킷 생성. 평균적으로 6초당 1패킷 생성. (분석모델 식(3)의 λ 에 반영)
- 데이터 생존 시간 : 데이터는 생성시점부터 12초 후 전송 큐에서 자동 폐기됨. 이는 TDMA에서 현재 프레임 동안에 송신되지 못한 패킷이 다음 프레임에서 나가지 못하도록 규정. (분석모델의 식(2)에 반영)
또한 큐에 저장된 데이터는 해당 노드가 전송 기회를 잡은 경우 한꺼번에 전송됨.
- NBDT(Network Busy Detecting Time) : 망내 다른 노드의 송신을 감지하기 위해 기다리는 시간으로 TDMA프레임 구조 중 무전기 PTT(Push-To-Talk)가드+수신무전기 AGC(Auto Gain Control) 구간(약70미니슬롯)과 심볼동기획득 및 모뎀헤더 구간(약5미니슬롯)+여분시간으로 구성됨. (분석 모델에서 식(3)의 Δt_1 으로 반영)
- 충돌로 인한 패킷 손실 발생 시 MAC단에서의 재전송 매커니즘은 없음.

본 논문에서 해결하고자 하는 문제는 위와 같은 환경에서 MIL-STD-188-220의 R-NAD기법 적용시 노드 간 패킷 충돌률 및 누락률을 분석함으로써 이 두 가지 요소가 시스템 요구사항 내에서 만족되는 수준의 NS(Number of Station)값을 도출하는 것

이다. 실제 MIL-STD-188-220 R-NAD에서 NS는 망에 가입된 노드 개수를 의미하며 F의 선택범위를 결정하는 인자로 사용된다. F는 각 노드가 NAD(Network Access Delay) 시작시점 시 0부터 $3/4 * NS$ 이하의 정수 중 랜덤하게 선택한 값으로 NBDT(Network Busy Detect Time)를 구성하는 기본 슬롯단위가 되며, 각 노드는 전송할 데이터를 보유하고 있을 경우 NAD 시작시점부터 $NBDT * F + MAX(0, F-1) * DTETURN$ 후에 전송을 시작한다. 단, 이 시간 이내에 다른 노드의 채널 사용이 감지된 경우 전송하지 않는다. DTETURN은 DTE(Data Terminal Equipment, 전송자료처리기) 수신대기상태에서 송신상태로 전환되는데 걸리는 시간을 의미한다. NBDT는 채널의 사용여부를 감지하는 시간으로 MIL-STD-188-220에서는 DTE에서 DCE(Data Circuit-terminating Equipment, 데이터송수신기)로 데이터의 첫 번째 비트를 전달하는데 걸리는 시간(EPRE, Equipment Preamble Time)과 데이터의 마지막 비트가 송신 DTE를 수신 DTE로 전달되는 시간(ELAG, Equipment Lag Time)의 합으로 정의하나, 무선링크의 CSMA에서는 송신단에서 무전기 PTT를 잡고 수신단에서 송신 데이터의 프리앰블을 복조할 때까지의 시간으로 정의한다.

또한 무선링크 CSMA에서의 NS는 망가입 노드 수가 아닌 F의 선택범위를 결정짓는 인자로 쓰인다. 예를 들어 노드 수는 3개이지만 문제 해결을 통해 도출된 NS는 3이 아닌 다른 수가 될 수 있다.

패킷 충돌이 발생하는 경우는 2개 이상 노드가 NAD 시작 시점에 동일한 F를 선택하고, 0부터 F-1 슬롯에 채널 사용이 감지되지 않았을 때 해당 노드들이 동시에 전송하여 충돌이 발생한다. 패킷 누락은 전송할 패킷을 보유한 노드가 네트워크 접속 경쟁에서 밀려 패킷의 생존시간(12초)이 지나도 전송을 하지 못한 경우에 발생한다. 패킷 충돌과 패킷 누락은 서로 상충(trade-off) 관계에 있으며 이유는 다음과 같다. IEEE802.11 DCF에서의 RTS/CTS와 같은 확실한 충돌회피 매커니즘이 없는 R-NAD에서 충돌 발생 확률을 줄이기 위한 방법은 F값의 선택범위를 확대하여 노드들이 서로 다른 F를 선택하도록 유도하는 것이다. 하지만 늘어난 F값 범위에서 어떤 노드가 큰 F값을 선택한 경우 패킷 전송을 위해 기다리는 시간이 증가하고 이 시간이 패킷의 생존시간보다 큰 경우 해당 패킷은 누락된다. 따라서 충돌률 감소와 누락률 증가는 서로 상충 관계에 있다.

2.3. 충돌 확률 모델 수립

상용의 IEEE802.11 DCF(혹은 PCF)의 CSMA/CA 분석은 다양한 방법으로 진행되어 왔다. 전송경쟁시점마다 모든 노드가 전송패킷을 보유한 상태를 가정하는지(Saturated 조건^[4], 아닌 경우 Non-saturated 조건^[5]), 패킷 충돌률 및 트래픽 도착 특성이 고정 혹은 변동인지 등 문제를 다양한 방식으로 접근하며 보다 간단하고 쉽게 만들기 위해 노력해왔다. 중요한 점은 분석 대상에 대한 queuing behavior나 정교한 트래픽 도착 특성을 반영할수록 수학적 모델을 수립하기 어려우며, 따라서 많은 논문이 saturated조건, 고정된 충돌률/패킷도착률 등을 가정하여 문제를 정의하고 분석해왔다. 본 논문에서는 MIL-STD-188-220의 MAC 운용이라는 현실을 보다 충실히 반영하기 위해 Non-saturated 조건을 가정하며, II-2에서 기술된 조건을 최대한 반영하는 분석 모델을 수립하였다.

2.3.1. 확률모델

본 절에서는 II-2에서 제시한 문제를 확률적 분석 방법에 근거하여 다음과 같이 구체화한다. 네트워크 내 n 개 노드가 존재하고 이 중 m 개 노드 ($1 \leq m \leq n$)가 임의의 NAD 시작 시점 T_a 에서 전송에 참여하는 사건을 E 라 정의한다. 그리고 어느 한 노드가 전송 경쟁에서 승리하여 성공적으로 전송하는 사건을 S 라 할 때, 본 논문에서 구하고자 하는 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(S \cap E) = P(E) \cdot P(S|E) \tag{1}$$

먼저 $P(E)$ 를 계산하기 위해 T_a 에서의 개별 노드의 전송 참여 확률($P_e(T_a)$)을 계산한다. 개별 노드가 전송에 참여하기 위해서는 a 번째 NAD 시작(T_a) 전까지 모델 Queue에 전송할 데이터가 존재해야 하며 데이터 생존 시간이 12초임을 고려했을 때 데이터 생성(X)은 $T_a - 12 < X \leq T_a$ 범위 내에 있어야 한다. 만약 해당 범위 내에 다른 전송 기회가 존재하는 경우 데이터 생성 구간은 다음과 같이 세분화될 수 있다.

$$\begin{aligned} T_{a-b-1} < X \leq T_{a-b} \quad b=0,1,\dots,k-1 \\ T_a - 12 < X \leq T_{a-k} \end{aligned} \tag{2}$$

이 때 k 는 1이상의 정수가 되며, k 가 0 일 때, 데이터 도착 구간은 $T_a - 12 < X \leq T_a$ 가 유일하다.

데이터 생성 구간에 대한 파악을 세분화하는 이유는 생성 시점에 따라 T_a 시점에서의 전송 참여 확률이 달라지기 때문이다. 또한 12초 동안의 존재할 수 있는 k 의 개수는 최대 22가 되는데, 이는 모든 노드가 끊임없이 전송할 패킷이 있고 충돌 없이 최소 딜레이(선택한 F가 0일 때 전송시간은 540ms임)로 전송할 때 $12s/540ms=22.22$ 에 의해 계산된 값으로 현실적으로 거의 존재할 수 없는 값이며, 실제로 노드별 평균 패킷발생률이 1/6초이고 노드 간 F의 중복 선택에 따른 충돌을 고려할 때 k 를 추정하기란 쉽지 않다. k 값의 추정은 「II-3-2」에서 계속 다루기로 한다.

개별노드에서의 데이터 생성이 $T_{a-1} < X \leq T_a$ 구간에 발생할 때, 개별 노드는 순수하게 T_a 시점에서 전송에 참여하게 된다. 이 때 데이터 생성 확률 즉, 참여 확률은 데이터 생성이 exponential distribution임을 가정할 때,

$$\begin{aligned} P[X \leq T_a | X > T_{a-1}] &= P[X \leq T_{a-1} + \Delta t_1 | X > T_{a-1}] \\ &= P[X \leq \Delta t_1] \quad \text{by memoryless property} \\ &= 1 - e^{-\lambda \Delta t_1} \end{aligned} \tag{3}$$

이 된다. 여기서 Δt_1 는 바로 이전 NAD시점부터 현재 NAD 시점 간 차이로 충돌이 없는 경우 최소 ($F=0$ 을 선택한 노드가 전송에 성공한 경우) 540ms 부터 최대 ($\max F-1$)*500ms+540ms을 가지며, 충돌이 있는 경우 최대 무한대까지 가질 수 있다. λ 는 단위시간 당 발생률이므로 여기서는 1/6이다. 이는 12초 동안 두 번의 데이터 생성이 존재하는 「II-2」 조건을 준용하였다.

모든 NAD 시작시점 간 Δt_1 은 동일 특성을 가지므로 모든 구간에서의 전송참여확률은 식(3)과 같은 값을 가진다.

$$\begin{aligned} P[X \leq T_{a-b} | X > T_{a-b-1}] \\ &= P[X \leq T_{a-b-1} + \Delta t_1 | X > T_{a-b-1}] \\ &= P[X \leq \Delta t_1] = 1 - e^{-\lambda \Delta t_1} \end{aligned} \tag{4}$$

또한 $T_{a-2} < X \leq T_{a-1}$ 구간에서 데이터 생성이 이루어지고 데이터의 전송은 T_a 시점에서 발생하기 위해서는 T_{a-1} 시점에서 전송경쟁에서 패하고 T_a 시점에 전송경쟁에 다시 참여하게 되는 경우로, 이 때

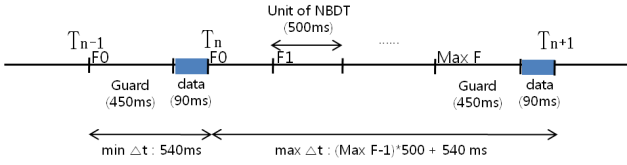


그림 1. 이전 NAD시점부터 현재 NAD시점 간 차이(Δt_1)의 존재 범위
 Fig. 1. Existence range of difference(Δt_1) between previous NAD and current NAD

참여 확률은 $T_{a-2} < X \leq T_{a-1}$ 시점에 생성될 확률과 T_{a-1} 시점에서 전송경쟁에서 패할 확률의 곱으로 계산할 수 있다.

$$P[X \leq T_{a-1} | X > T_{a-2}] \cdot P_f(T_{a-1}) \quad (5)$$

$$= (1 - e^{-\lambda \Delta t_1}) \cdot P_f(T_{a-1})$$

$P_f(T_{a-1})$ 은 T_{a-1} 시점에서 전송경쟁에서 패할 확률로 이는 해당 노드를 제외한 나머지 노드 중 어느 한 노드가 전송에 성공할 확률과 같다. 이 때 확률은 다음과 같다.

$$P_f(T_{a-1}) = \sum_{j=1}^{n-1} C_j^{n-1} \cdot P_e(T_{a-1})^j \cdot (1 - P_e(T_{a-1}))^{n-1-j} \cdot j \cdot \frac{\sum_{i=1}^{j-1} i^j}{j^{j+1}} \quad (6)$$

여기서, j 는 해당노드를 제외한 전송에 참여하는 나머지 노드의 개수가 되며, 전체 전송 참여 노드는 $j+1$ 이 된다. 또한 f 는 선택 가능한 F의 개수이다. (Appendix)

따라서 $P_e(T_a)$ 는 다음과 같이 정리될 수 있다.

$k \geq 2$ 일 때,

$$P_e(T_a) = 1 - e^{-\lambda \Delta t_1} + P_f(T_{a-1}) \cdot (1 - e^{-\lambda \Delta t_1}) + P_f(T_{a-1}) \cdot P_f(T_{a-2}) \cdot (1 - e^{-\lambda \Delta t_1}) + \dots + P_f(T_{a-k+1}) \cdot P_f(T_{a-k+2}) \dots P_f(T_{a-2}) \cdot (1 - e^{-\lambda \Delta t_1}) + P_f(T_{a-k}) \cdot P_f(T_{a-k+1}) \dots P_f(T_{a-2}) \cdot (1 - e^{-\lambda \Delta t_2}) = (1 + \sum_{i=2}^k \prod_{b=1}^{i-1} P_f(T_{a-b})) \cdot (1 - e^{-\lambda \Delta t_1}) + \prod_{b=1}^k P_f(T_{a-b}) \cdot (1 - e^{-\lambda \Delta t_2}) \quad (7)$$

$k = 1$ 일 때,

$$P_e(T_a) = 1 - e^{-\lambda \Delta t_1} + P_f(T_{a-1}) \cdot (1 - e^{-\lambda \Delta t_2}) \quad (8)$$

여기서 Δt_2 는 $T_a - 12$ 와 T_{a-k} 간의 차이를 의미한다.

망에 n 개 노드가 존재하고 이 중 m 개 노드가 T_a 시점에서 전송에 참여할 확률은

$$P(E) = {}_n C_m \cdot P_e(T_a)^m \cdot (1 - P_e(T_a))^{n-m} \quad (9)$$

이 된다.

다음으로 전송에 참여하는 m 개 노드 중 어느 한 노드가 성공적으로 전송할 확률 $P(S|E)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P(S|E) = m \cdot \frac{\sum_{i=1}^{f-1} i^{m-1}}{f^m}, \quad m > 1 \quad (10)$$

$$1, \quad m = 1$$

이로써 $P(S \cap E) = P(E) \cdot P(S|E)$ 의 각 요소에 대한 분석을 수행하였으며, 최종적으로 구하고자 하는 총돌률은

$$\therefore 1 - \sum_{m=1}^n P(S \cap E) \quad (11)$$

이 된다.

2.3.2. 수립한 확률 모델의 실제적 활용

본 논문에서는 수립한 확률 모델을 통해 망참여 노드의 개수, 각 노드의 데이터 패킷 생성 특성, MIL-STD-188-220의 R-NAD 적용이라는 구체화된 환경에서 임의의 노드가 데이터를 전송할 때, 충돌률 및 누락률을 관찰함으로써 실제 네트워크 설계 시 적정 파라미터 값(구체적으로 NS값을 의미함)을 도출할 수 있다. 그러나 이를 위해서 몇 가지 가정이 필요하다. 먼저 충돌률(식(11)) 계산에 있어 주요 식인 $P_e(T_a)$ 를 살펴보면 T_a 부터 $T_a - 12$ 사이에 존재하는 전송기회인 k 의 횟수가 정의되어야 한다. k 는 전송 노드가 패킷을 생성 후 12초가 지나기 전에 해당 패킷에 대한 전송을 시도한 횟수로 다른 노드와의 전송경쟁에서 패한 횟수라고 볼 수 있다. 일반적으로 k 는 전송에 참여하는 경쟁노드의 수가

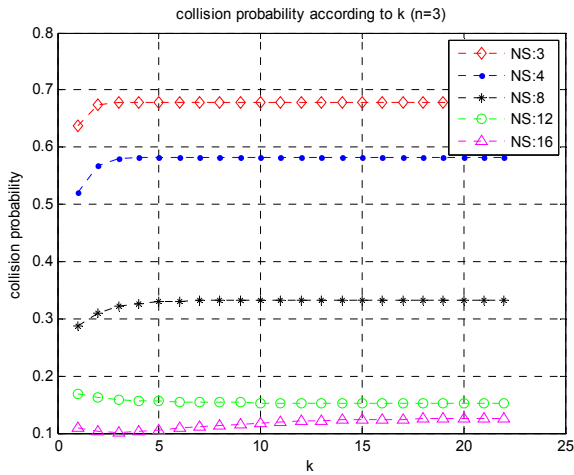


그림 2. k 의 변화에 따른 충돌률 (3개 노드)
Fig. 2. Collision probability according to k ($n=3$)

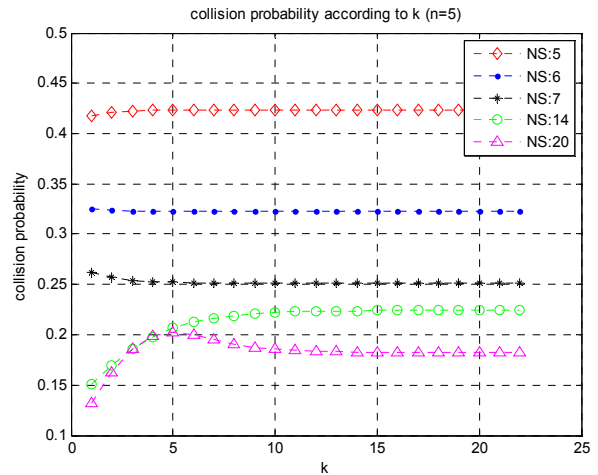


그림 4. k 의 변화에 따른 충돌률 (5개 노드)
Fig. 4. Collision probability according to k ($n=5$)

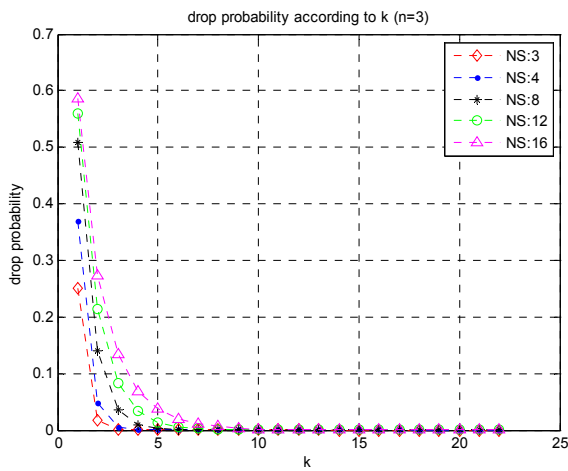


그림 3. k 의 변화에 따른 누락률 (3개 노드)
Fig. 3. Drop probability according to k ($n=3$)

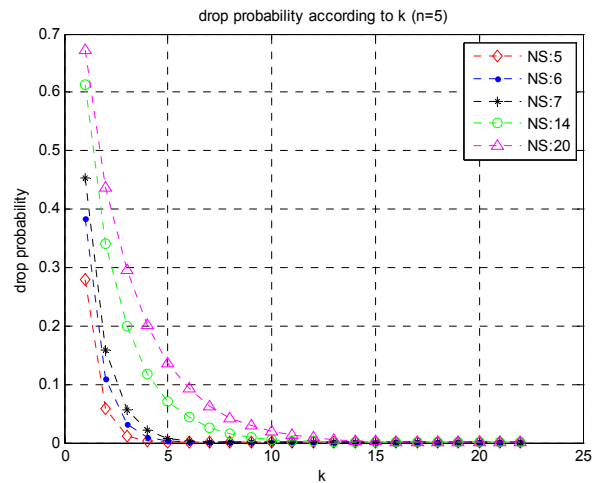


그림 5. k 의 변화에 따른 누락률 (5개 노드)
Fig. 5. Drop probability according to k ($n=5$)

많을수록 증가하게 되므로 $P_e(T_a)$ 는 k 에 영향을 받고 k 또한 $P_e(T_a)$ 에 영향을 받게 되는, 즉 상호 순환의 관계에 있다고 할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 순환관계에서 문제를 풀기 위해 k 를 0에서 22(k 가 가질 수 있는 최대값) 사이의 고정값으로 놓았을 때 $P_e(T_a)$ 를 계산하여 충돌률 및 누락률을 도출하고자 한다. 또한 식(3)의 Δt_1 은 이전 NAD 시점부터 현재 NAD 시점 간 차이로 전송에 성공한 노드가 선택한 F값에 따라 결정된다. 만약 충돌이 발생했다면 사실상 추정이 불가능하며, 본 논문에서는 NS값에 따라 선택의 범위가 정해지는 F값들 중 중간값을 가정한다. 식(8)의 Δt_2 는 패킷이 최초 생성된 시작 시점부터 가장 가까운 NAD시점

간 차이로 이 역시 F값의 중간값으로 가정한다. 마지막으로 확률모델의 초기조건으로써 임의 노드가 최초 전송에 참여할 확률은 1이라 한다. 즉, $P_e(T_{a-k}) = 1$ 로 정의한다.

III. 성능 분석

3.1. 확률모델 분석

「II-3-1」에서 수립한 확률모델을 이용하여 무선링크 CSMA 운용환경에 따른 성능 분석을 수행하였다. 네트워크 가입 노드가 3개/5개일 때, 각각의 NS값의 변화에 따른 충돌률과 누락률의 변화를 관찰하였으며, 이 때 NS는 MIL-STD-188-220

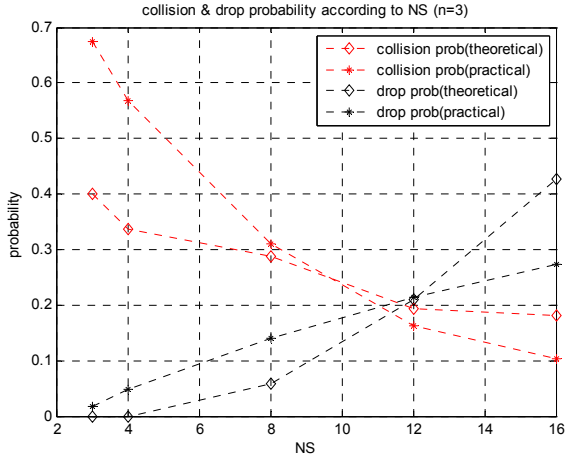


그림 6. NS값 변화에 따른 충돌률 및 누락률(n=3)
Fig. 6. Collision and drop probability according to NS (n=3)

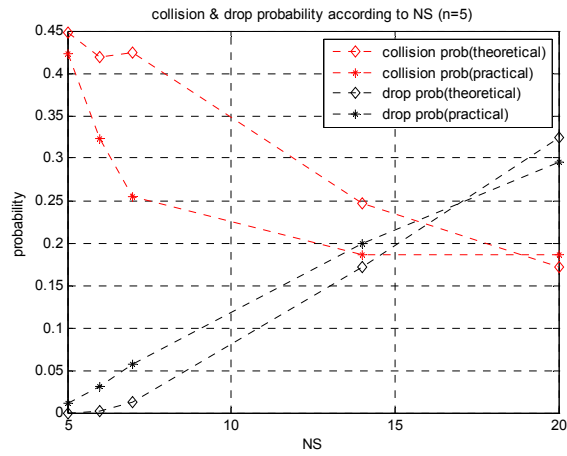


그림 7. NS값 변화에 따른 충돌률 및 누락률(n=5)
Fig. 7. Collision and drop probability according to NS (n=5)

R-NAD의 기본 규격인 망가입 노드 개수(기본값)를 시작으로 1개씩 증가시키다가 선택할 수 있는 F의 개수가 2배가 되는 시점부터 3, 4배가 되는 값을 관찰하였다.(3개 가입노드 시 관찰 NS값 : 3, 4, 8, 12, 16 / 5개 가입노드 시 관찰 NS값 : 5, 6, 7, 14, 20)

먼저 Fig. 2, Fig. 4의 그래프에서 k값의 변화에 따른 충돌률의 추이를 살펴보면, k값이 2(n=3), 3(n=5)이상에서 큰 변화가 없음을 확인할 수 있다. 이는 분석 대상과 같은 트래픽 발생 조건(12초 주기로 2번의 트래픽 발생)에서 실제로 12초 내에 2 또는 3회의 전송기회가 존재한다고 볼 수 있는 주요 근거로 그 이유는 다음과 같다. 일반적으로 충돌률은 노드의 전송시점에서 동시에 전송하는 경쟁노드 수와 비례관계에 있다. 즉 $P_e(T_a)$ 의 증가는 충돌률의 증가를 가져오는데 다른 인자(트래픽 특성, 전체 노드 수)의 변화가 없는 상태에서 충돌률의 변화가 멈췄다는 것은 $P_e(T_a)$ 의 변화가 멈춘 것으로 해석할 수 있으며, 그 이상의 k값은 주어진 환경에서 실제로 존재하기 어려운 값으로 추정할 수 있다. 이를 바탕으로 본 논문에서 최종적으로 얻고자 하는 NS값의 변화에 따른 충돌률 및 누락률을 도출하였다.

Fig. 6, Fig. 7의 이론치를 보면 NS값이 증가함에 따라 충돌률은 감소하며, 반대로 누락률은 증가하는 것을 알 수 있다. 충돌률이 감소하는 이유는 NS값이 증가함에 따라 F의 선택범위가 넓어지고 노드 간 동일 F를 선택할 가능성이 적어지기 때문이다. 반면, F의 선택범위 증가로 인해 상대적으로

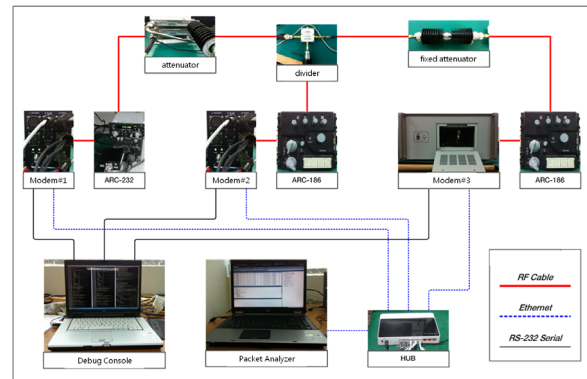


그림 8. 실장비 테스트 구성 환경
Fig. 8. Testbed composition

큰 F를 연속해서 선택하는 경우 해당 노드의 패킷은 12초 이내에 송신되지 못하고 폐기되어 누락될 확률이 높아진다. 종합하면 충돌률과 누락률은 trade-off관계 속에 있으며, 본 논문에서 최종적으로 제시하고자하는 최적 NS값은 충돌률과 누락률의 교차점으로 정의한다. 이 기준에 따라 가입 노드가 3개인 경우(Fig. 6의 이론치) 충돌률과 누락률의 교차점에서 가장 가까운 NS는 12가 되며, 마찬가지로 가입 노드가 5개인 경우(Fig. 7의 이론치) NS의 최적값은 14 수준이 됨을 알 수 있다.

3.2. 실장비 테스트 결과 비교 분석

마지막으로 제안하는 분석기법의 결과물을 실장비 테스트 결과와 비교함으로써 제안 기법의 타당성을 입증한다. MIL-STD-188-220프로토콜의 실장비 구현에 대한 검증은 위해 다음과 같은 구성을 하여 시험하였다.

표 1. n=3일 때 충돌률/누락률의 편차
Table 1. Difference between theoretical and practical value (n=3)

NS	Collision Prob.			Drop Prob.		
	theor.	prac.	diff.	theor.	prac.	diff.
3	0.6736	0.4011	0.2725	0.0178	0	0.0178
4	0.5674	0.3366	0.2308	0.0486	0	0.0486
8	0.3097	0.2874	0.0223	0.1402	0.0578	0.0824
12	0.1627	0.1941	0.0314	0.2144	0.2098	0.0046
16	0.1027	0.1813	0.0786	0.2725	0.4272	0.1547

- 운용 시간 : 약 20분
- 네트워크 가입 노드 수 : 3개 / 5개
- 모뎀 전송률 : 12Kbps
- RF채널상에서의 데이터 손실을 배제하기 위해 유선연결

Fig. 6은 가입 노드가 3개일 때 충돌률과 누락률에 대한 이론치와 실측정치이며, 최적의 NS값 도출(NS:12)에 있어서 같은 결과를 가짐을 알 수 있다. 다만 표 1을 보면 일부 NS에서 이론치와 실측정치 간의 차이가 발견되며(NS 3, 4의 충돌률과 NS 16의 누락률), 이는 짧은 실장비 운용시간(20분)에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 실장비가 NAD시점에서 F값을 선택할 때 OS가 제공하는 random 생성 함수를 이용하게 되는데 랜덤 숫자의 발생빈도가 장시간 관찰시에는 uniform하게 분포하지만 20분과 같이 짧은 시간동안에는 그렇지 못한 경우가 발생한다. 이를 보완하기 위해 시험시간의 확장 또는 20분 시험을 다수 회 실시하여 평균치 획득이 필요하다.

가입 노드가 5개인 경우(Fig. 7) 이론치와 시험치의 최적 NS값은 각각 14, 16으로 다소 차이가 있긴 하나 해당 NS값에서의 이론치와 시험치의 충돌률과 누락률의 절대수치를 비교해보면 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 즉, 해당 시스템에서 n=5인 경우 NS를 14~16수준으로 설정하는 것이 MIL-STD-188-220의 R-NAD를 그대로 적용하여 NS를 5로 설정하는 것보다 성능이 향상됨을 이론치와 시험치를 통해 확인할 수 있다. 결론적으로 본 논문에서는 무선링크에서 MIL-STD-188-220의 R-NAD를 그대로 적용하여 NS를 노드의 개수와 같게 설정하여 운용하는 경우(NS=3, NS=5) 최선의 성능이 나오지 않음을 이론/시험적으로 확인한 것이며, 더불어 보다 나은 성능을 갖기 위한 NS값의 수준을 제시한 것이다.

표 2. n=5일 때 충돌률/누락률의 편차
Table 2. Difference between theoretical and practical value (n=5)

NS	Collision Prob.			Drop Prob.		
	theor.	prac.	diff.	theor.	prac.	diff.
5	0.4225	0.4486	0.0261	0.0117	0	0.0117
6	0.3232	0.4185	0.0953	0.0310	0.0013	0.0297
7	0.2543	0.4247	0.1704	0.0569	0.0123	0.0446
14	0.1857	0.2468	0.0611	0.1987	0.1718	0.0269
20	0.1859	0.1711	0.0148	0.2952	0.3243	0.0291

IV. 결 론

본 논문에서는 TDMA기반으로 설계된 무선통신 시스템에 MIL-STD-188-220의 CSMA MAC을 적용하였을 때 그 운용가능성을 판단하기 위한 확률적 분석 기법을 제시하였으며, 제시한 기법의 결과물인 패킷 충돌률 및 누락률을 관찰함으로써 주어진 환경에서 최적의 네트워크 운용 파라미터(NS값)를 도출하였다. 또한 실장비 운용 시 획득한 데이터와의 비교를 통해 제시한 분석 기법의 타당성을 확인하였다. 이는 추후 유사 네트워크 시스템 개발 시 유용하게 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

Appendix

◎ T_{a-1} 시점에서 특정 노드(A)가 전송경쟁에서 패할 확률 계산 $P_f(T_{a-1})$

해당 확률 계산은 망가입 노드 수 및 NS값에 의존하여 계산된다. 간단한 예로 망가입 노드 수가 3개, NS값이 3인 경우(선택 가능한 F가 0, 1)를 생각해보면 다음과 같다.

- 3개 노드(A, B, C)가 전송에 참여하는 경우

T_{a-1} 시점에서 특정 노드(A)가 전송을 하지 못하는 경우는 A의 선택 F가 1이고 나머지 노드(B, C)의 F가 각각 "(0, 1) : B가 전송성공", "(1, 0) : C가 전송성공"인 두 가지로 이에 대한 확률은

$${}_2C_2 \cdot P_e(T_{a-1})^2 \cdot \frac{2}{2^3}$$

이다. 여기서 ${}_2C_2 \cdot P_e(T_{a-1})^2$ 는 A가 반드시 전송에 참여하는 상황에서 나머지 2개 노드가 모두 전송에 참여할 확률이며, $2/2^3$ 의 분모는 세 개 노드가 선택할 수 있는 F의 전체 가지 수, 분자는 현재 찾고자하는 사건의 경우의 수이다.

▪ 2개 노드(A, X; X는 B 또는 C)가 전송에 참여하는 경우

T_{a-1} 시점에서 A노드가 전송을 하지 못하는 경우는 A, X 각각 선택하는 F가 “(1, 0) : X가 전송 성공”인 경우 한 가지로 이에 대한 확률은

$${}_2C_1 \cdot P_e(T_{a-1})^1 \cdot (1 - P_e(T_{a-1}))^1 \cdot \frac{1}{2^2}$$

이다. 따라서 전체 확률은 앞서 두 가지 경우의 합으로

$$P_f(T_{a-1}) = {}_2C_2 \cdot P_e(T_{a-1})^2 \cdot \frac{2}{2^3} + {}_2C_1 \cdot P_e(T_{a-1})^1 \cdot (1 - P_e(T_{a-1}))^1 \cdot \frac{1}{2^2}$$

이며, 이를 식(6)과 같이 일반화할 수 있다.

또한 m 개 노드 중 어느 한 노드가 성공적으로 전송할 확률(식(10)) 역시 이와 비슷한 원리로 도출되었다.

References

[1] “Interoperability Standard for Digital Message Transfer Device Subsystem (MIL-STD-188-220C)”, Mar. 2002.

[2] R. Rom, M. Sidi, Multiple Access Protocols - Performance and analysis, *Springer-Verlag*, June. 1989.

[3] A. Leon-Garcia, Probability and Random Processes for Electrical Engineering, *Addison-Wesley*, 1994.

[4] D. Malone, “Modeling the 802.11 Distributed Coordination Function in Nonsaturated Heterogeneous Conditions”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 15, no. 1, Feb. 2007.

[5] G. Bianchi, “Performance analysis of IEEE802.11 distributed coordination function”, *IEEE J.Sel. Areas Comm.*, vol. 18, no. 3, Mar. 2000.

서 난 솔 (NanSol Seo)



2006년 2월 연세대학교 전기전자공학과 졸업
 2008년 2월 연세대학교 전기전자공학과 석사
 2008년 2월~현재 국방과학연구소 2기술연구본부 3부 연구원

<관심분야> 전송데이터링크, 무선자원최적화

주 재 우 (JaeWoo Joo)



1986년 2월 부산대학교 전기전자공학과 졸업
 1988년 2월 부산대학교 전기전자공학과 석사
 1988년 2월~현재 국방과학연구소 2기술연구본부 3부 책임연구원

<관심분야> 전송데이터링크, MAC, MANET

장 동 운 (DohngWoon Jang)



1986년 2월 경북대학교 전기전자공학과 졸업
 1988년 2월 KAIST 전기전자공학과 석사
 1998년 6월 KAIST 전기전자공학과 박사
 1988년 2월~현재 국방과학연구소 2기술연구본부 3부 책임연구원

<관심분야> 전송통신네트워크, 모뎀, ECCM