

AVHS를 위한 무선통신 방식의 신뢰도 비교

정회원 남 옥 우*, 김 재 형*, 김 응 배**, 한 기 철**

A Comparison of Reliability of Wireless Communication Systems for AVHS

Ock-Woo Nam*, Jae-Hyung Kim*, Eung-Bae Kim**, Ki-Chul Han** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 지능형 도로 시스템(ITS)의 서비스 중 첨단 차량 및 도로 시스템에 적합한 근거리 전용 통신망의 특성과 선택된 통신방식에 대한 성능과 신뢰도 및 대역폭 이용효율을 분석하였다. 통신방식으로는 TDMA와 CDMA를 고려하였으며, 변조방식으로는 블록부호와 길쌈부호에 대해 BPSK 와 QPSK를 사용하였다. 특히 특성함수를 이용하여 각 부호에 대한 심볼오류확률과 패킷오류확률을 구하고 이들을 이용하여 각 통신방식에 대한 신뢰도를 평가하였으며 주파수 이용효율을 살펴보았다.

ABSTRACT

In this paper, we analyze the reliability and the bandwidth efficiency of various communication schemes, and investigate the characteristic of short range exclusive communication architecture, which is compatible for AVHS of ITS. Block and convolutional coded BPSK, QPSK with perfect CSI in TDMA and CDMA were considered. Especially, we can find the probability of symbol error and packet error by use of the characteristic equation. And we also to access of the reliability and frequency efficiency of communication schemes by use of those.

I. 서론

85년 우리 나라 자동차 보유 대수가 1백만 대를 돌파한 후 12년만에 10배가 증가, 97년 드디어 자동차 천만대 시대가 도래했다. 이러한 사실은 세계에서 가장 빠른 증가 추세이며 4년 만인 오는 2001년에 1천5백만대로 늘어나고 다시 10년 만인 오는 2011년에는 2천1백만 대에 달할 것으로 예상된다. 건설교통부 통계에 따르면 국민들의 경제 사회활동 증가로 그 동안 1인당 1일 통행횟수(서울)는 약 1.7배 늘었고, 1일 자동차 통행량은 약 17배 급증했다. 그리고 승용차 1대 당 연평균 주행거리는 2만5천5백50km로 심한 교통체증을 유발, 물류 비용을 증대시키고 있는 실정이다. 이에 따른 교통혼잡과 사고, 공해 등 경제적·사회적 비용도 엄청나게 증가했다.

94년 현재 우리 나라의 전체물류비 48조원 가운데 도로수송비가 가장 많은 22조원으로 국내총생산액(GDP)의 7.2%를 차지했고, 96년 교통혼잡비용으로 GNP의 3.6%인 14조 7백억 원으로 추산하고, 매년 2조원씩 늘 것으로 전망했다.

이러한 교통문제를 해결하는 대책으로 <자동차 운행자에게 교통을 주는 각종 교통수요의 억제책>이 마련되고 있으나 근본적인 해결책은 되지 못하고 오히려 국민들의 불편만 가중시킬 수 있고, 교통문화 수준의 향상과 자동차 문화의 선진화동 사회·문화적인 의식개혁론이 대두하고 있으나 실제적인 실효성에 있어서 그 결과가 의심스럽다. 이에 따라 이러한 문제의 근본적인 해결책으로 전자·전기·제어 및 정보통신·무선통신 기술을 이용한 최첨단 도로 교통 관리 시스템인 ITS(Intelligent Transportation System)가 제안되었고^[1-3], 현재 미국, 유럽 그리고

* 창원대학교 제어계측공학과 신호및시스템 연구실(phdnow@hanjung.co.kr)

** 한국전자통신 연구원

논문번호:97375-1016, 접수일자: 1997년 10년 16일

일본 등의 선진국에서 매우 활발하게 연구가 진행되고 있다^[4]. 먼저 ITS를 이용한 서비스를 살펴보면 크게 다음의 다섯 가지로 분류될 수 있다^[5].

- (1)첨단 교통관리 시스템(ATMS : Advanced Traffic Management System)
- (2)첨단 교통정보 시스템(ATIS : Advanced Travel Information System)
- (3)첨단 대중교통 시스템(APTS : Advanced Public Transportation System)
- (4)첨단 물류관리 시스템(CVO : Commercial Vehicle Operation).
- (5)첨단 차량및도로 시스템(AVHS : Advanced Vehicle & Highway System)

이러한 모든 서비스들은 반드시 무선통신 시스템의 뒷받침 하에 가능하며 각 기능마다 독특한 통신 요구 조건들이 필요하고 이를 지원하기 위한 무선통신 시스템에 대한 연구가 매우 활발하게 진행되고 있다. 여기에 고려되는 통신 시스템은 기존의 상용 시스템이 될 수도 있으며 새로운 전용 시스템이 될 수도 있다. 그러나 첨단 차량/도로 시스템(AVHS)용 근거리 통신 시스템에 적합한 기존의 상용 시스템은 흔치 않다. 따라서 본 논문에서는 AVHS에서 요구되는 근거리 전용 통신망의 특성 및 선택된 통신 방식에 대한 성능과 신뢰도 및 주파수 대역의 이용 효율을 분석하여 차량간 전용 통신망 설계에 응용할 수 있도록 하고자 한다. 본 논문의 구성은 II장에서 차량간 통신시스템에 대한 모델을 설정하고, III장에서 설정된 모델에 대한 통계적 특성을 조사하여 수신신호에 대한 해석을 한다. 이 해석을 바탕으로 IV장에서 블록오류률과 길쌈부호에 대해 심볼오류률과 패킷오류률을 계산하고 V장에서는 통신 프로토콜을 정의하여 TDMA와 CDMA에 대해 신뢰도를 계산한다. 마지막으로 VII장에서 결론을 맺는다.

II. 통신 시스템 모델

차량간 통신채널은 다경로 페이딩, 도플러 효과, 그리고 다른 차량으로부터 간섭 등의 특성을 갖고 있다. 따라서 채널의 통계적 모델을 이용하여 각종 네트워크 방식에 대한 성능 평가가 필요하다^[6]. 일반적으로 고려하는 방식은 다음과 같다.

- TDMA
- TDMA with slow Frequency Hopping
- DS-SS-SSMA

• MC-CDMA

AVHS시스템에서 도로를 주행하고 있는 차량 무리군을 플레톤이라고 하는데 플레톤 주행시 차량간 거리는 10m 내외 정도로 매우 짧지만 통신 링크는 매우 높은 신뢰성을 확보해야 한다^[7]. 예상되는 특성 중의 하나는 통신 거리가 짧기 때문에 delay spread가 작다는 것이고 이를 극복하기 위하여 DS-SS-SSMA를 사용한다면 확산 계수는 매우 커야 할 것이다. 따라서 확산 방식은 주로 간섭 신호를 약화시키는 목적으로만 사용될 수 있다. 차량이 1/6 meter 이내인 거리를 이동하는 동안 채널의 변화는 무시할 수 있으므로 차량간 통신은 수 ms 이하의 짧은 메시지를 전송하는 것이 유리하다. 이 경우 TDMA가 유리할 것이다. 반면에 CDMA는 TDMA에서 요구되는 슬롯 동기가 필요 없으므로 비교적 간단한 동기 방식이 요구된다. TDMA의 경우 슬롯 동기는 도로변에 위치한 기지국에서 제공하거나 다른 차량으로부터 제공받을 수 있다.

그림1은 본 논문에서 고려한 AVHS의 모델을 보여준 것이다. 플레톤 내의 차량들이 새로운 정보를 한번씩 교환하는 주기를 통신 사이클이라 하는데 안정된 플레톤을 유지하기 위해서는 10ms이내에 최소한 1회 이상의 통신 사이클이 완료되어야 한다^[7]. 여기서 d_p 는 플레톤간의 거리, d_l 은 차선의 길이, d_s 는 플레톤 내의 차량간 거리, d_v 는 차량의 길이, d 는 차량간 통신 채널의 거리이다. 이동통신에서는 주파수의 재사용을 위하여 셀룰라 방식을 이용하는데, AVHS 모델에서도 하나의 플레톤을 하나의 셀로 간주할 수 있다. 따라서 차선간의 주파수 재사용 거리는 $R_{uz} = C_l d_l$ 이며 동일차선 내의 플레톤 사이의 거리 d_p 는 충분히 커서 상호 간섭은 무시할 수 있다고 본다. 이 경우 하나의 클러스터에 할당된 주파수 채널은 C_l 이 된다.

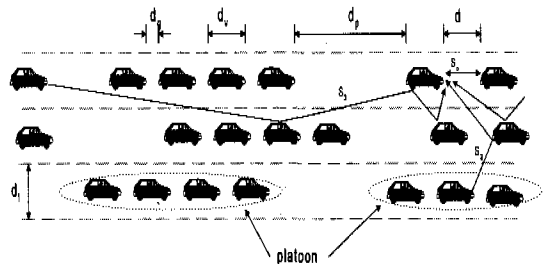


그림 1. AVHS 플레톤 모델

이동통신 채널에서는 흔히 직접파 성분이 존재하지 않는 마이크로 셀룰라 채널^[8]의 특성을 보이고 있으나, 이와는 달리 사용자가 밀집된 지역이나 개인 휴대 통신(PCN) 등에서 고려되는 매크로 셀룰라 채널의 특성은 직접파가 존재하는 채널 특성을 보이고 있다. 이는 안테나가 가로등과 같이 낮은 위치에 설치되는 경우가 많아 송수신기 사이에 가시 경로가 형성되기 때문이라 할 수 있다. 이러한 실외 마이크로 셀 채널 특성은 라이스(Rician) 확률분포(PDF)를 가진다^[8]. 이는 기존의 매크로 셀의 채널이 레일리(Rayleigh) 확률분포를 가지는 것과는 다르다. 그림 2는 플래툰 내에서 차량간에 이뤄지는 통신 채널을 나타낸 것이다.

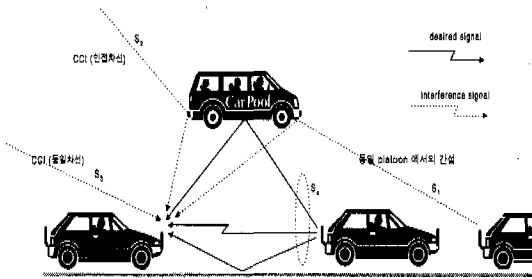


그림 2. 차량간 통신 채널에서의 수신 신호 및 간섭 신호

차량대-차량 무선링크는 통계적으로 라이시안 페이딩 채널로 모델링 될 수 있다. 라이시안 페이딩 채널의 직접파는 반사파들에 비해 상대적으로 강하고(Large Rician-K factor), 지연확산성분(delay spread)은 상대적으로 작다. 따라서 전파채널(propagation channel)은 직접파, 지면반사파 그리고 지연반사파의 직접파와 이들에 비해 상당히 많이 지연되어 들어오는 심볼간 간섭(Intersymbol interference)들로 모델링 될 수 있다. 그림에서 보면 신호 성분 중 직접파는 S_0 가 되고 심볼간 간섭 성분들은 S_1, S_2, S_3 이다. 여기서 S_1 은 플래툰 내의 간섭 신호(Multiple Access Interference : MAI)이고, S_2 는 다른 차선의 플래툰으로 부터의 간섭 신호(Co-Channel Interference : CCI), 그리고 S_3 는 동일 차선의 다른 플래툰으로 부터의 간섭 신호이다. 이들 중 수신 신호 S_0 의 진폭은 매우 큰 계수 K 를 가지는 라이스 확률분포를 나타내지만 강한 지면 반사파에 의한 간섭을 받게 되므로 진정한

라이스 분포가 아닌 2-RAY 라이스 분포를 가지게 된다^[9].

2-RAY 라이스 모델의 경우 차도의 표면은 완전한 도체도 유전체도 아니므로 반사 계수(Γ)는 노면의 유전 상수 ϵ 과 도전율 σ 의 함수로 표현이 될 수 있다. 이 경우 경로손실은 전송거리가 길어질 경우 다음과 같이 d^{-4} 에 비례하게 된다^[6].

$$\frac{P_t}{P_r} = G_t G_r \left[\frac{4\pi h_t h_r}{d^2} \right]^2 \quad (1)$$

여기서 P_t 는 송신전력, P_r 은 수신전력, G_t, G_r 은 각각 송신 및 수신 안테나의 이득이며, d 는 송수신기 사이의 거리, h_t 및 h_r 은 각각 송신기 및 수신기 안테나의 높이이다.

마이크로 셀룰라 통신용으로 제안된 전파모델에서 만약 $d\lambda \ll 4h_t h_r$ 라면 경로손실은 자유공간전파(d^{-2})로부터 지면파 전파모델(d^{-4})까지의 전이를 가진 것으로 모델링 될 수 있다. 따라서 경로손실이 d^{-2} 에서 d^{-4} 으로 전이되는 거리는

$$d_B = \frac{4h_t h_r}{\lambda} \quad (2)$$

에 의하여 주어진다^[10]. 여기서 λ 는 파장을 나타낸다. 본 논문에서는 $h_t = h_r = 0.7m$ 및 $\lambda = 0.12m$ 로 가정할 경우, d_B 는 20m 정도가 되며 가시 경로 전송의 경우 주요 관심 거리는 20m 이내이므로 d^{-2} 에 비례하는 것으로 단순화시킨다.

앞에서 채널내에서 거리에 따른 신호의 전송에 대한 감쇠를 살펴보았는데, 이동통신 시스템에서 고려하는 또 하나의 사항은 전력제어에 관한 것이다. 플래툰 내의 모든 차량은 동일한 전력으로 송신한다. 이는 일반적인 셀룰라 시스템에서 전력 제어를 하는 것과는 매우 다르며 거리가 멀어질수록 간섭신호는 d^{-4} 에 비례하여 감소한다. 즉, 15m 후방의 차량에서 수신된 신호의 신호 대 잡음비가 10dB가 되도록 조정하였다면 송신 거리가 d 일 경우의 신호 대 잡음비는

$$\frac{C}{N(d)} = \frac{10}{(15)^{-2}} (d)^{-2} \quad (3)$$

로 계산될 수 있다. 간섭신호는 비가시 경로를 통해 전달되므로 레일리 페이딩으로 모델링 될 수 있

며 링크 거리가 d_i 인 간섭원으로 부터 받게 되는 신호 대 간섭 비율은

$$\frac{C}{I} = \frac{d^{-2}}{d_i^{-4}} \quad (4)$$

로 주어질 수 있다.

III. 수신기 모델

이 절에서는 수신신호에 대한 통계적 특성에 대해서 살펴보고자 한다. 전송된 신호는 복소 등가 지역 신호 표현에 의하여 식(5)와 같이 주어진다.

$$S(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a(n)P(t-nT) \quad (5)$$

단, $a(n) \in \{+1, -1\}$ 은 n 번째 심볼 시퀀스이고, $P(t)$ 는 단위 에너지를 가지는 root raised cosine 파형이다. 앞에서 언급한 대로 차량대-차량간의 통신 채널은 직접파 성분이 매우 강한 라이스 확률분포를 갖지만, 주파수 재사용 거리만큼 떨어진 다른 차선의 플래툰으로부터 수신되는 동일채널 간섭(CCI), S_2 및 S_3 는 LOS 경로가 보장되지 않으므로 레일리 확률 분포를 보이게 될 것이다. 따라서 페이딩이 심볼에 비해 느리다고 가정하면, 주파수 도약(Frequency Hopping) TDMA 및 CDMA수신 신호의 역 확산 신호는 식(6)으로 표현된다.

$$r(t) = u(t)s(t) + \frac{1}{G} \sum_{l=1}^J u_l(t) s_l(t) + n(t) \quad (6)$$

여기서 $u(t)$ 는 원하는 신호 $s(t)$ 에 대한 다경로 복소 페이딩 프로세스이고, $s_l(t)$ 와 $u_l(t)$ 는 l 번째 간섭 신호와 그 경로에서의 다경로 복소 페이딩 프로세스이며, G 는 CDMA의 프로세스 이득, 또는 주파수 도약 TDMA의 경우 도약 주파수 개수이다.

l 번째 간섭신호 $s_l(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$s_l(t) = u_l(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_l(n)P(t-nT-\tau_l) \quad (7)$$

여기서 랜덤 변수 τ_l 은 $[0, T]$ 에서 균일하게 분포되며 $\{\tau_l\} = \{\tau_1, \dots, \tau_J\}$ 및 $\{u_l(t)\} = \{u_1(t), \dots, u_J(t)\}$ 는 각각 독립적인 랜덤 변수

이다. 따라서 랜덤 변수 $u(t)$ 와 $u_l(t)$ 는 각각 라이스 페이딩 프로세스 및 레일리 페이딩 프로세스이며, 평균과 분산은 다음과 같이 표현된다.

$$E[u(t)] = A \quad (8)$$

$$\begin{aligned} R_u(\tau) &= \frac{1}{2} E[(u(t) - A)(u(t+\tau) - A)^*] \\ &= \sigma_u^2 J_0(2\pi f_d \tau) \end{aligned} \quad (9)$$

$$E[u_l(t)] = 0; \quad l=1 \dots J \quad (10)$$

$$\begin{aligned} R_{u_l}(\tau) &= \frac{1}{2} E[u_l(t)u_l^*(t+\tau)] \\ &= \sigma_{u_l}^2 J_0(2\pi f_d \tau); \quad l=1 \dots J \end{aligned} \quad (11)$$

단, $E[\cdot]$ 는 기대값, f_d 는 최대 도플러 주파수, 그리고 $J_0(\cdot)$ 는 베셀 함수이다.

수신 신호 $r(t)$ 는 정합 필터에 의해 여과된 후 심볼 간격으로 샘플링 된다. 페이딩 이득이 신호에 근사적으로 한 주기 동안 일정하다고 가정하면, 정합 필터의 샘플 출력 시퀀스는

$$R = (\dots r(-1), r(0), r(1) \dots)^T \text{로 표현되며}$$

$$r(k) = u(k)a(k) + \frac{1}{G} \sum_{l=1}^J u_l(k) a_l(k) + n_0(k) \quad (12)$$

로 주어진다. 여기서 $u_l(k)$ 와 $n_0(k)$ 는 평균이 0, 분산이 각각 $\sigma_{u_l}^2$ 및 1인 가우시안 랜덤변수이고 $u(k)$ 는 평균이 A , 분산이 σ_u^2 인 가우시안 랜덤 변수이다. 따라서 $r(k)$ 는 다시

$$r(k) = g(k)a(k) + e(k) \quad (13)$$

로 표현이 되며, $e(k)$ 는 평균이 0, 분산이 $1 + \sum_{l=1}^J \frac{\sigma_{u_l}^2}{G}$ 인 가우시안 랜덤 변수로 근사화 할 수 있다.

IV. 패킷 오류확률의 계산

수신된 시퀀스 $R = (\dots r(k), r(k+1), \dots)$ 과 채널 추정치 $\hat{U} = (\dots \hat{u}(k), \hat{u}(k+1), \dots)$ 이 주어졌을 때,

k 번째 심볼 $a(k)$ 를 복조하기 위해서는 다음의 메트릭을 사용한다^[12].

$$M(r(k), \hat{u}(k), a(k)) = \frac{|r(k) - \hat{u}(k)a(k)|^2}{2} \quad (14)$$

여기서 $a(k)$ 를 전송된 심볼, $\hat{a}(k)$ 를 오류 심볼이라 할 때 $\hat{a}(k)$ 의 메트릭이 $a(k)$ 의 메트릭 보다 작을 경우 즉,

$$d_k = d(r(k), \hat{u}(k), a(k), \hat{a}(k)) = M(r(k), \hat{u}(k), \hat{a}(k)) - M(r(k), \hat{u}(k), a(k)) < 0 \quad (15)$$

일 때 심볼 오류가 발생한다. 식(14)를 대입하고 정리하면 식(15)는

$$d_k = A |r(k)|^2 + B |\hat{u}(k)|^2 + 2 \operatorname{Re}[C \cdot r(k) \hat{u}(k)^*] \\ A = 0, \quad B = \frac{1}{2} (|\hat{a}(k)|^2 - |a(k)|^2) \\ C = \frac{1}{2} (a(k) - \hat{a}(k))^* \quad (16)$$

가 된다. 결과적으로 식(16)은 복소 가우시안 랜덤 변수의 quadratic 표현이다.

본 논문에서는 채널특성에 대한 정보를 추정하는 방법으로 채널의 특성에 대한 완전한 정보를 가지는 이상적인 동기검파(perfect channel state information)의 경우를 가정한다. 이상적인 동기검파의 경우, 즉 $u(k) = \hat{u}(k)$ 일 때, 랜덤변수 d_k 의 특성함수는 다음과 같이 주어진다^[11].

$$\phi_d(s, a, \hat{a}) = \frac{P_L(a, \hat{a}) P_R(a, \hat{a})}{(s - P_L(a, \hat{a}))(s - P_R(a, \hat{a}))} \cdot \exp \left[\left\{ \frac{P_L(a, \hat{a}) P_R(a, \hat{a})}{(s - P_L(a, \hat{a}))(s - P_R(a, \hat{a}))} \right\} \cdot \{s \alpha_1(a, \hat{a}) - \alpha_2(a, \hat{a})\} \right] \quad (17)$$

단, 여기서

$$P_L(a, \hat{a}) P_R(a, \hat{a}) = - \frac{P_s}{|x - \hat{x}|^2} \\ \omega(a, \hat{a}) = \frac{1}{2} \\ a_1(a, \hat{a}) = a_2(a, \hat{a}) = \frac{|x - \hat{x}|^2 K}{P_s} \\ P_s = \frac{1+K}{\Gamma_s}, \quad K = \frac{|m|^2}{2\sigma_u^2}, \quad \Gamma_s = \frac{\operatorname{SNR}}{\text{symbol}} \quad (18)$$

이다. 식 (17)을 아래 식 (19)에 대입하고 역 라플라스 변환을 하면 심볼 오류확률을 구할 수 있다^[11].

1. 블럭 부호화된 패킷의 오류 확률

$a(k)$ 가 전송되었을 경우 $\hat{a}(k)$ 로 복조될 확률, 즉 심볼 오류 확률은 랜덤변수 d_k 가 영보다 작을 확률이고 이는

$$P_s(a(k), \hat{a}(k)) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma - j\infty}^{\sigma + j\infty} \phi_d(s, a, \hat{a}) ds \quad (19)$$

에 의하여 계산될 수 있다. 여기서 σ 는 실수축 상의 수렴 영역 중의 한 점이며 수렴 영역은 $0 < s < \operatorname{Re}[P_R]$ 이다. 단, $\operatorname{Re}[P_R]$ 은 식(17)의 우반부 극점의 실수부를 의미한다^[11]. 블럭 부호화 된 패킷의 오류 확률을 구하기 위하여, 식(20)을 사용할 수 있으며, 여기서 L 은 패킷의 길이, M 은 블럭 부호의 오류 정정 능력을 나타낸다.

$$P_{pe} = 1 - \sum_{m=0}^M \binom{L}{m} (1 - P_s)^{L-m} P_s^m \quad (20)$$

2. 길쌈 부호화된 패킷의 오류 확률

본 논문에서는 FEC (Forward Error Correction) 를 위하여 블럭 부호 외에 길쌈 부호도 고려하였다. 길쌈 부호화 된 패킷의 오류 확률을 구하면 다음과 같다. 먼저 Viterbi 디코더를 이용하여 복조를 하는 것으로 가정하자. 이 경우 패킷에서 PEP(Pair Wise Error)가 발생할 확률은 오류 사건들을 모두 나열함으로써 합집합 한계(union bound)가 될 수 있다. 오류사건의 합집합 한계를 구하기 위해서는 모든 오류 사건들을 나열해야 하는데, 이는 길쌈 부호의 전달 함수를 유도함으로써 가능하다. 이와 같이 구해진 오류 사건의 합집합 한계와 TUB(True Union Bound)기법을 이용하여 정확한 PEP의 유니온 바운드를 구할 수 있다^[11,12]. 이 방법의 기본적 개념은 $k(s)$, 즉 오류 변환(error transform)이 PEP에 대한 TUB의 특성 함수의 역할을 하며, 이는 수렴 영역에서 다음과 같은 선적분에 의하여 역변환 되어 PEP의 합집합 한계가 계산된다는 것이다.

$$P_e = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma - j\infty}^{\sigma + j\infty} \frac{1}{s} k(s) ds \quad (21)$$

만일 패킷의 길이가 L 이라면, k 번째 심볼에서 오류 사건이 시작되지 않을 확률은 $(1 - P_e)$ 이고, 패킷 내의 모든 심볼에서 오류사건이 시작되지 않을 확률은 $(1 - P_e)^L$ 가 된다. 결국 길쌈 부호화

된 패킷의 오류 확률은

$$P_{pe} = 1 - (1 - P_e)^L \quad (22)$$

로 주어진다.

V. 통신 프로토콜과 신뢰도

AVHS(Advanced Vehicle Highway System) 플랫폼의 차량간 거리 제어에 대한 분석 및 시뮬레이션에 대한 연구 결과에 의하면 다음의 4가지 정보를 10ms 이내에 확인할 수 있어야 안정된 간격을 유지할 수 있다¹³⁾.

- (1) 주행 차량의 속도 및 가속도
- (2) 앞 차량과의 거리
- (3) 선두 차량의 속도 및 가속도
- (4) 앞 차량의 속도 및 가속도

선두 차량은 자신의 속도와 가속도를 2번째 차량에 전송한다. 2번째 차량은 선두 차량으로부터 정보를 받은 후 자신의 속도와 가속도를 덧붙여 3번째 차량에 전송한다. 이러한 과정은 플랫폼 내의 마지막 차량에 도달할 때까지 계속되며 이러한 일련의 전송 과정을 통신 사이클 (communication cycle) 이라 정의한다.

본 논문에서는 단방향 전송만이 가능한 무선 시스템을 가정하였다. 즉, 차량의 앞쪽범퍼에는 수신기 안테나, 뒤쪽 범퍼에는 송신기 안테나가 각각 장착되어 무선 데이터의 흐름은 항상 전방 차량에서 후방 차량으로 중계되는 형태를 취하게 된다. 이러한 방법은 수신된 패킷에 대한 응답신호를 전방으로 보낼 수 없으며 따라서 패킷 오류 발생시 재전송을 요구할 수 없다는 단점이 있으나 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

- (1) 무선 시스템이 매우 단순해진다 : 전이중방식(Full duplex)을 쓸 경우 하드웨어가 크게 증가하며, 반이중 방식(Half duplex)을 쓸 경우 송/수신 절환 시간에 의한 지연이 발생된다. 이에 비해 단 방향으로 전송하는 경우 무선 시스템이 간단해지는 장점이 있다.
- (2) 통신 프로토콜이 매우 간단하다 : TDMA의 경우 한 통신 사이클 중 자신의 전송 차례에 1회씩 전송을 하게 되며, CDMA의 경우 모든 차량이 앞 차량으로 전송 받은 최신 정보를 연속적으로 후방 차량에 중계하기만 하면 된다.

차량간 통신 무선 네트워크의 성능은 비트 오류 확률이나 패킷 오류 확률 자체보다 "신뢰도(Reliability)"에 의하여 평가가 된다. 신뢰도에 대한 정의는 다음과 같다.

신뢰도 $R(T, d)$ 는 차량간 거리가 d 인 플랫폼에서 시간 T 이내에 최소한 1회 이상의 정보 전달에 실패할 확률이다. 즉, T sec 이내에 시도한 모든 통신 사이클이 실패할 확률이다.

본 논문에서는 플랫폼 내에 차량의 수 $N_v=31$, 전송해야 될 정보는 60 bit 정도로 가정하고 이는 부호화에 따라 패킷 당 약 90 심볼까지 증가하게 될 것이다.

1. TDMA시스템의 신뢰도 계산

앞에서 언급했듯이 단 방향 전송을 가정하였기 때문에 모든 차량은 통신 사이클 당 1회의 패킷 전송 기회가 주어진다. 따라서 패킷 오류가 발생할 경우 해당 통신 사이클은 실패한 것으로 간주된다. 만일 10msec 이내에 시도할 수 있는 통신 사이클의 수가 n_{cyc} 이라면 TDMA시스템의 신뢰도는

$$R_{TDMA} = [1 - (1 - P_{pe})^{N_v - 1}]^{n_{cyc}} \quad (23)$$

로 주어진다. 단 P_{pe} 는 식 (20) 또는 식 (22)에서 구한 패킷 오류 확률이다. 즉, N_v 의 차량을 가정할 경우 $N_v - 1$ 의 연속적인 패킷 전송이 성공해야 통신 사이클이 성공적으로 완료되는 것이며 이러한 통신 사이클의 n_{cyc} 회가 모두 실패할 확률이다.

2. CDMA시스템의 신뢰도 계산

CDMA의 경우 모든 차량이 동시에 정보를 후방 차량으로 전송하게 되므로 최신 정보가 전방 차량으로부터 수시로 도달한다고 볼 수 있다. 따라서 패킷 오류는 패킷 주기만큼의 시간 지연을 의미하는 것이며, TDMA의 경우와 같이 통신 사이클 전체의 지연은 아니다. 선두차량에서 최후방 차량까지 패킷이 성공적으로 전송되기 위해서는 최소 ($N_v - 1$)회의 패킷전송이 요구된다. 그러나 본 논문에서는 신뢰도를 향상시키기 위하여 통신사이클 당 ($N_v - 1$) + N_{err} 만큼의 패킷전송이 가능하도록 하였고 본 논문에서는 N_{err} 를 2 로 선택하여 분석하였다. 만일 $N_p = (N_v - 1) + N_{err}$ 의 패킷이 10msec 내에 전송이 될 수 있다면, 거리 d 에서의

신뢰도 $R(T=10ms, d)$ 은 $(N_v - 1) + N_{ext}$ 의 패킷 전송 중에서 $N_{ext} + 1$ 이상의 패킷 오류가 발생할 확률로 볼 수 있다. 즉,

$$R_{CDMA} = [1 - (1 - P_{pe})^{N_v - 1}]^{N_{ext} + 1} \quad (24)$$

이다.

VI. 계산결과

이 절에서는 본 논문에서 고려한 통신 방식들을 클러스터 당 동일한 주파수를 할당하는 조건하에서 신뢰도를 비교한 결과를 제시하고자 한다. 통신 사이클의 성공률을 높이기 위해서는 각 패킷의 손실률을 최소화하는 동시에 시간당 통신 사이클의 시도 횟수를 최대로 하는 것이 필요하다.

그림 3은 동일한 패킷 전송율을 가진 주파수 도약 TDMA 시스템의 신뢰도 계산 결과이다. 부호율이 변함에 따라, 심볼율, 주파수 재사용 계수, 그리고 변조 형태 등이 주어진 스펙트럼 할당 내에서 연계되어 변한다. 통신 사이클 (n_{cyc}) 은 항상 3회 임에 주목하기 바란다.

그림에서 알 수 있듯이 비록 주파수 재사용 거리가 작더라도, 코드율이 낮을수록 성능이 우수하고 블록 부호 보다 길쌈 부호의 성능이 우수하였다. 그리고 TCM 변조(rate 1/2 TCM 4PSK)가 위에서 비교한 방식 중 가장 양호한 특성을 보여 주었다.

그림 4에 동일한 채널 대역폭(혹은 동일한 심볼율)을 가진 TDMA 시스템의 성능을 나타내었다.

SNR이 아주 높은 상태나 혹은 짧은 전송 거리에서는 간섭신호가 상대적으로 작아지므로 주파수 재사용 거리를 증가시키는 것보다 n_{cyc} 을 증가시키는 것이 효과적이며, 먼 전송거리에서는 신호 대 간섭비가 크게 감소함으로 주파수 재사용 거리를 증가시켜 간섭신호를 줄이는 것이 효과적임을 볼 수 있다.

그림 5는 CDMA 통신 시스템에 대한 신뢰도를 비교한 것이다. 이 경우도 마찬가지로 낮은 부호율과 길쌈부호가 더 나은 성능을 보임을 볼 수 있다. 즉 TDMA 경우와 유사한 경향을 보이고 있다.

마지막으로 TDMA 시스템 및 CDMA 시스템에 대한 주파수 효율(frequency efficiency)을 비교하고자 한다.

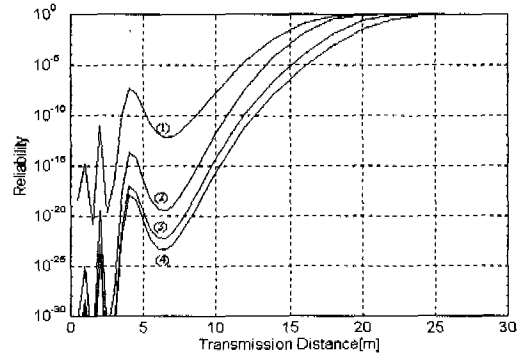


그림 3. 주파수 도약 ($N_H=10$) TDMA 시스템에 대한 신뢰도 비교: 패킷 전송율 고정

- (1) (63,57)block coded BPSK $C_L=3, n_{cyc}=3$
- (2) (93,63)block coded BPSK $C_L=2, n_{cyc}=3$
- (3) Rate 2/3, 4-state Convolutional coded BPSK $C_L=2, n_{cyc}=3$
- (4) Rate 1/2, 4-state Trellis coded 4PSK $C_L=2, n_{cyc}=3$

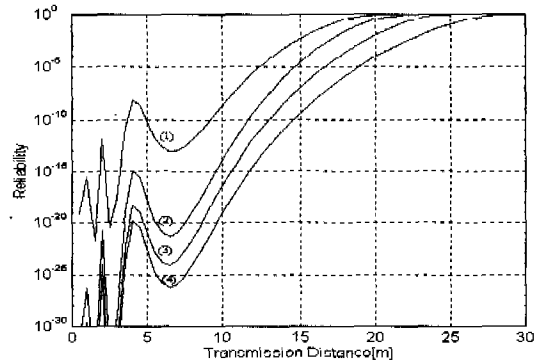


그림 4. 주파수 도약 TDMA 시스템에 대한 신뢰도 비교: n_{cyc} 이 2로 줄어든 경우

- (A) (93,63)block coded BPSK $C_L=3, n_{cyc}=2$
- (B) Rate 2/3, 4-state Convolutional coded BPSK $C_L=3, n_{cyc}=2$

참신: 그림 3과 동일한 plot

플래툰당 차량의 수 (N_v) 는 31대, 차선간 주파수 재사용 계수 (C_L) 는 3, TDMA의 경우 도약 주파수는 10개, CDMA의 경우 확산계수는 32라고 가정한다. 한 패킷에서 보내야 할 정보는 약 60비트 정도라 할 때 주파수 도약 TDMA는 최소 5.7 MHz (10 msec 당 1회의 통신 사이클이 가능할 경우)의 대역이 한 클러스터에 할당이 되어야 한다. 반면 CDMA는 최소 18MHz의 대역폭이 요구된다. 또한 통신 링크의 신뢰도를 개선하기 위해서는 대역

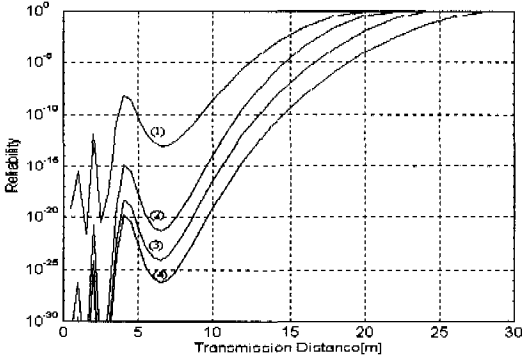


그림 5. CDMA시스템에 대한 신뢰도 비교
($G_p=32, N_{opt}=2$)

- (1) (63,57)block coded BPSK $C_L=3, n_{cyc}=2$
- (2) (93,63)block coded BPSK $C_L=2, n_{cyc}=2$
- (3) Rate 2/3, 4-state Convolutional coded BPSK $C_L=2, n_{cyc}=2$
- (4) Rate 2/3, 4-state Convolutional coded BPSK $C_L=2, n_{cyc}=2$

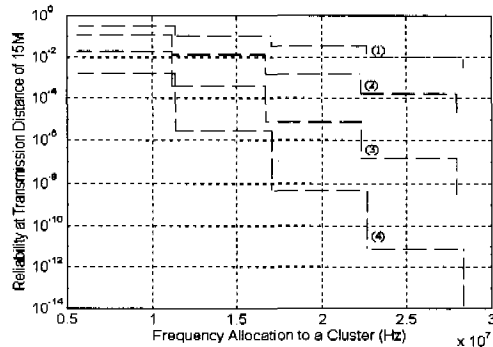


그림 6. 할당 주파수 대역에 따른 주파수 도약 ($N_H=10$) TDMA 시스템의 신뢰도(전송 거리 = 15M)

- (1): (63,57) Block coded BPSK $C_f=3$
- (2): (93,63) Block coded BPSK $C_f=2$
- (3): Rate 2/3, 4-state Convolutional coded BPSK, $C_f=3$
- (4): Rate 1/2, 4-state Convolutional coded 4PSK TCM, $C_f=3$

폭을 증가시켜야 하는데, 비록 여기서 고려하고 있는 CDMA시스템의 최소 대역폭 요구 조건이 TDMA시스템의 최소 대역폭 요구 조건 보다 훨씬 더 크지만, 신뢰도 개선을 위하여 TDMA의 경우는 단위 시간당 통신 사이클 횟수를 증가시킬 만큼의 큰 대역폭 증가가 요구되고, CDMA의 경우는 단위 시간당 패킷 전송 횟수를 증가시킬 만큼의 대역폭만 요구된다. 이는 단 방향 전송 방식을 가정하였기

때문이다.

그림 6과 7은 크러스터에 할당된 주파수 대역폭에 따른 TDMA 와 CDMA의 신뢰도의 변화를 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 향상된 신뢰도를 요구할 경우 CDMA의 주파수 사용 효율이 월등하다고 볼 수 있으며, 또한 부호화된 경우가 역시 높은 주파수 효율을 보이고 있다.

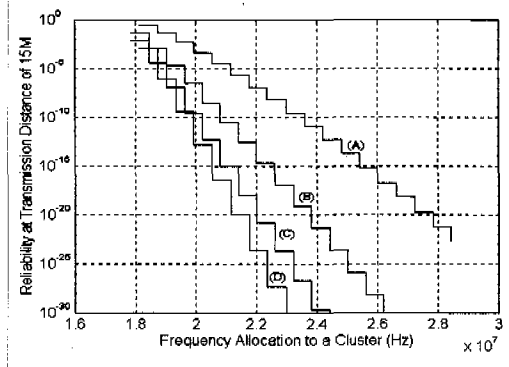


그림 7. 할당 주파수 대역에 따른 CDMA ($G_p=32$) 시스템의 신뢰도(전송 거리 = 15M)

- (A): (63,57) Block coded BPSK $C_f=3$
- (B): (93,63) Block coded BPSK $C_f=2$
- (C): Rate 2/3, 4-state Convolutional coded BPSK, $C_f=3$
- (D): Rate 1/2, 4-state Convolutional coded 4PSK TCM, $C_f=3$

VII. 결론

본 논문에서는 AVHS 차량대-차량 무선 통신링크에 적용 가능한 TDMA 및 CDMA 통신방식의 신뢰도에 대한 해석적 비교 결과를 제시하였다. 크러스터 당 동일한 주파수를 할당하는 조건하에서 부호화를 할 경우 성능이 크게 향상됨을 볼 수 있었다. 그리고 무선 시스템의 단순화를 위하여 단 방향 무선 통신을 가정한 경우 CDMA가 TDMA에 비하여 신뢰도를 향상시키는데 유리함을 알 수 있었고 극도로 높은 신뢰도를 요구하는 AVHS 차량간 통신 시스템을 구현하기에 적합함을 알 수 있었다. 특히 본 논문에서는 송·수신기의 거리가 매우 가까운 경우 주로 적용하는 2-Ray 라이스 페이딩 모델을 사용하였는데 향후 차량간 통신에서의 채널 특성에 대한 지속적인 연구가 요구된다. 또한 본 논문에서는 채널의 특성에 대한 완전한 정보를 가지는 이상적인 경우(perfect c.s.i)에 대해서 고려를 하였으나, 실제의 시스템은 채널 추정기로 차동 검파

기, 파이럿 심볼 또는 파이럿 톤 등을 사용할 수 있으며 차량간의 속도, 가속도의 차이로 도플러 주파수의 영향을 받을 것임에 틀림이 없다. 따라서 향후의 연구로는 이러한 실제적인 환경에서의 신뢰도 유지를 위한 채널 추정 방법 등에 대한 연구가 진행되어야 한다고 본다. 마지막으로 본 논문에서 제시한 해석 방법은 차량간 통신 외에 차량과 도로변 통신에도 쉽게 응용이 가능한 일반적인 방법이므로 향후의 유사한 연구에 적용이 될 수 있을 것으로 본다.

참 고 문 헌

[1] Y. J. Stenpannedes, C. Douligeris, and Sadao, Takaba, Communication for the Intelligent Transportation System, *IEEE Comm. Magazine*, vol. 34, Oct., 1996.

[2] M. Aoki, and H. Fujii, Inter-Vehicle Communication : Technical Issues on Vehicle Control Application, *IEEE Comm, Magazine*, Oct., 1996.

[3] Roberto Verdone, Performance Evaluation of R-ALOHA for Inter-Vehicle Communication at Millimeter Waves, *IEEE conf. On PIMRC96*, Taipei, Taiwan, Oct. 1996

[4] S. D. Elliott, and D. J. Dailey, Wireless Communications For Intelligent Transportation Systems, *Norwood, MA : Artech House*, 1995.

[5] Y. N. Doganata, and A. N. Tantawi, Anaalysis of Communications Requirements for Intelligent Transportation System : Methodology and Examples, *IEEE*, 1995.

[6] J. D. Parsons, The Mobile Radio Propagation Channel, New York : *a Division of John Wiley & Sons, Inc.*, 1992.

[7] Tnshar Tank, Nathan Yee, and J.P.Linnartz, Vehicle-to-vehicle Communication for AVCS Platooning, *IEEE Veh Technol. Conf.* 1994

[8] R.J. Bultitude and G.K. Bedal, Propagation characteristics on micro cellular urban mobile radio channels at 910MHZ, *IEEE J. Select. Area Comm.*, vol. 7, pp 31-39, Jan. 1980.

[9] G.W. Euler, Intelligent Vehicle/Highway Systems : *Definitions and Applications*, *ITE*

J., vol. 60, no. 11, pp.17-22, Nov 1990.

[10] W. Schafer, Channel Modeling of Short Range Radio Links at 60GHz for Mobile Intervehicle Communication, *IEEE Veh. Technol. Conf. VTC91*, S. Louis, May 1991

[11] Jae Hyung. Kim, Paul Ho and James K. Cavers, A New Analysis Tool for Evaluating the Bit Error Rate of Trellis Coded Modulation in Rician Fading Channels, *IEEE Veh Technol. Conf.*, pp.2012- 2016, May. 1997

[12] J. Cavers , Jae Hyung. Kim, and Paul Ho, Exact Calculation of the Union Bound on performance of Trellis Coded Modulation in Fading Channels., *Reprinted from IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS*, Vol. 46, No. 5, May 1998.

[13] S. E. Shladover, et al., Automatic vehicle control developments in the PATH Program, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.40,no.1, pp.114-130, Feb. 1991

[14] T. Tank, N. Yee and J. Linnartz , Vehicle-to-vehicle communication for AVCS Platooning , *Proc. 44th IEEE VTS conf.* , pp.448-451, Mar. 1994.

남 옥 우(Ock-woo Nam)

정회원



1993년 2월 : 창원대학교 제어
제측공학과(공학사)
1998년 2월 : 창원대학교 전기
전자제어공학과
(공학석사)
1998년 3월~현재 : 창원대학교
전기전자제어공학과
박사과정

<주관심 분야> 이동통신, CDMA 시스템, IMT-2000

김 재 형(Jae-hyung Kim)

정회원

한국통신학회 논문지 제23권 2호 335페이지 참조

김 응 배(Eung-bae Kim)

정회원

한국통신학회 논문지 제24권 1B호 1페이지 참조

한 기 철(Ki-chul Han)

정회원

한국통신학회 논문지 제14권 11호 참조