

# 60GHz WPAN 시스템의 전송 효율 향상을 위한 협력 통신 기법

준희원 이원진\*, 이재영\*, 서영길\*, 종신회원 허준\*\*

## Efficient Cooperative Transmission Scheme for High Speed WPAN System in 60GHz

Won-Jin Lee\*, Jae Young Lee\*, Young Kil Suh\* Associate Members,  
Jun Heo\*\* Lifelong Member

### 요약

본 논문에서는 60GHz WPAN (Wireless Personal Area Network) 시스템에서 릴레이를 이용한 협력 통신 기법을 제안하였다. 60GHz 대역은 LOS (Line-Of-Sight)가 보장되어 있지 않은 경우 통신이 불가능하고 거리에 따른 신호 감쇄가 심하기 때문에 릴레이를 이용한 협력 통신 기법이 효과적이다. LOS가 존재하는 환경에서도 수신단이 송신단으로부터 받은 데이터뿐만 아니라 릴레이를 통해 데이터를 수신한다면 수신된 정보의 신뢰성을 높일 수 있다. 하지만 이 경우에 송신단이 데이터를 전송하는 시간뿐만 아니라 릴레이가 데이터를 전송하는 시간이 필요하기 때문에 정보의 전송률이 저하된다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 협력 통신 시스템에 적합한 Reed-Solomon(RS) code와 convolutional code(CC)의 직렬 연결 부호 구조를 이용하여 이러한 단점을 최소화한다. 제안하는 협력 통신 기법은 릴레이에서 systematic RS code의 parity만을 convolutional code로 인코딩하여 전송하므로, 릴레이가 전송해야 하는 데이터의 양이 매우 적어 시스템의 전송 효율을 향상시킨다.

**Key Words :** Relay, Cooperative Transmission, Transmission Throughput, Rs-cc Serial Concatenated Code

### ABSTRACT

In this paper, we present an efficient cooperative transmission scheme for high speed 60GHz WPAN system. In 60GHz, the cooperative transmission with relay is effective scheme because signals are exceedingly attenuated according to the distance and the transmission is impossible when there is no LOS between transmitter and receiver. Moreover, the reliability of signal in destination can be improved by receiving data from a relay as well as a transmitter. However, the overall data rate is reduced because transmission time is more required for relay. To solve this problem, we propose a cooperative transmission scheme with RS-CC serial concatenated codes. In the proposed cooperative transmission scheme, the relay can reduce the transmission data size because the only parity bits of systematic RS code are transmitted after encoding by CC. But the computational complexity is increased at the relay and the destination.

※ 본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 IT산업원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [2008-F006-02, 테라헤르츠 대역 근거리 무선 통신시스템 연구]

\* 고려대학교 전자전기공학부(wjlee@korea.ac.kr, jy4213@korea.ac.kr, dongzizuk@korea.ac.kr)

\*\* 고려대학교 전기전자전파공학과 (junheo@korea.ac.kr)

논문번호 : KICS2009-12-001, 접수일자 : 2009년 12월 10일, 최종논문접수일자 : 2010년 2월 24일

I. 서 론

최근 이동통신 시스템에서는 기기들의 소형화로 인해 소비전력을 최소화하는 것이 중요한 문제로 대두되고 있다. 또한 대용량 멀티미디어 데이터의 사용이 늘어나면서 초고속 통신의 중요성이 부각되었다. 소형화로 인한 소비 전력의 감소로 인해 신호 대 잡음비가 낮아지고, 수신된 신호의 신뢰성을 확보하는 것이 중요한 문제가 되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안 중 하나로 릴레이를 이용한 협력 통신 방식에 대한 연구가 활발하게 진행 중이다.

최근 활발하게 연구되는 60GHz 대역을 이용한 초고속 WPAN 시스템에서도 릴레이를 이용한 협력 통신 기법에 대한 관심이 증가하고 있다. 60GHz 대역에서의 통신은 신호의 특성상 LOS가 보장 되지 않는 경우, 통신이 불가능하기 때문에 릴레이를 이용한 협력 통신 기법에 대한 연구가 진행되고 있다. 또한 릴레이를 이용한 협력 통신 기법은 경로 다이버시티(path diversity)을 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 경로 손실(path loss)을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 LOS가 존재하는 환경에서도 이득을 얻을 수 있다<sup>[1,2]</sup>.

릴레이의 사용은 크게 두 가지로 구분된다. 송신단으로부터 수신된 신호를 증폭하여 수신단으로 전송하는 방식 (Amplify-and-Forward, AF)과 릴레이에서 수신된 신호에 에러가 없을 경우 수신된 신호를 다시 인코딩하여 전송하는 방식 (Decode-and-Forward, DF)이 있다<sup>[2]</sup>. 본 논문에서는 사용되는 릴레이는 DF 방식을 사용한다고 가정한다. DF방식에도 오류 정정 부호를 시스템에 적용하는 방식과 적용하지 않는 방식으로 나눌 수 있다. 60GHz 대역의 경우 거리에 따른 신호의 감쇄가 크기 때문에 충분한 신호 대 잡음비를 보장하기가 어렵다. 따라서 이를 보완하기 위해 오류 정정 부호를 적용하는 DF기법이 오류 정정 부호를 적용하지 않는 DF기법 보다 효과적이다. 오류 정정 부호를 적용한 DF기법에도 rate-compatible punctured convolutional (RCPC) code를 사용하는 기법<sup>[4]</sup>, RS code를 사용하는 기법<sup>[5]</sup>, Turbo code를 사용하는 기법<sup>[12]</sup> 등이 존재한다.

본 논문에서는 RS code와 convolutional code의 직렬 연결 부호를 협력 통신 기법에 적용함으로써 LOS가 보장 되어있지 않는 환경에서 안정적으로 통신이 가능하도록 하였다. 또한 LOS가 존재하는 환경의 경우, 릴레이가 다른 협력 통신 기법들보다 적은 양의 데이터를 전송할 경우에도 QoS(Quality of Service)를 얻을 수 있도록 하였다.

II. 본 론

2.1 시스템 모델

본 논문에서 사용되는 송신단과 릴레이, 수신단 간의 경로 감쇄를 통해 수신된 신호의 세기를 표현하였다<sup>[3]</sup>. 안테나는 unity gain을 가진다고 가정한다. Reference distance가  $d_0$ 인 경우 진공 상태의 경로 감쇄 모델은 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{PL}(d_0)[dB] = 20\log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) \quad (1)$$

이때,  $\lambda$ 는 신호 파장의 길이를 나타낸다. Path loss exponent 모델을 통한  $d$ 만큼 떨어진 거리에서 수신된 신호의 감쇄정도는 (2)와 같다.

$$\overline{PL}(d)[dB] = \overline{PL}(d_0)[dB] + 10n\log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2)$$

이때,  $n$ 은 path loss exponent를 의미한다. 송신하는 신호의 세기를  $P_t[dB]$ 라 한다면 수신된 신호의 세기  $P_r[dB]$ 는 (3)과 같다.

$$P_r[dB] = P_t[dB] - \overline{PL}(d)[dB] \quad (3)$$

송신단과 릴레이가 송신하는 신호의 세기가  $P_t[dB]$ 로 동일하고 잡음의 세기가  $N_0[dB]$ 인 경우, 송신단과 수신단 사이의 신호 대 잡음비의 평균값  $\Gamma_{SD}$ 는 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \Gamma_{SD}[dB] &= P_{r,SD}[dB] - N_0[dB] \\ &= P_t[dB] - \overline{PL}(d_0)[dB] - 10n\log\left(\frac{d_{SD}}{d_0}\right) - N_0[dB] \end{aligned} \quad (4)$$

송신 신호의 세기는 (5)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_t[dB] &= \Gamma_{SD}[dB] + \overline{PL}(d_0)[dB] \\ &\quad + 10n\log\left(\frac{d_{SD}}{d_0}\right) + N_0[dB] \end{aligned} \quad (5)$$

따라서 (5)를 이용할 경우, 송신단과 릴레이 사이의 신호 대 잡음비의 평균값  $\Gamma_{SR}$ 는 (6)으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Gamma_{SR}[dB] &= P_{r,SR}[dB] - N_0[dB] \\ &= P_t[dB] - \overline{PL}(d_0)[dB] - 10\log\left(\frac{d_{SR}}{d_0}\right) - N_0[dB] \quad (6) \\ &= \Gamma_{SD}[dB] + 10\log\left(\frac{d_{SD}}{d_{SR}}\right) \end{aligned}$$

유사한 방법으로, 릴레이와 수신단 사이의 신호 대 잡음비의 평균값  $\Gamma_{RD}$ 는 (7)과 같이 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} \Gamma_{RD}[dB] &= P_{r,RD}[dB] - N_0[dB] \\ &= \Gamma_{SD}[dB] + 10\log\left(\frac{d_{SD}}{d_{RD}}\right) \quad (7) \end{aligned}$$

## 2.2 기존의 협력 통신 기법

### 2.2.1 Incremental relay를 이용한 협력 통신 기법

Incremental relay<sup>[2]</sup>를 이용한 협력 통신 기법은 송신단에서 수신단으로 전송한 데이터에 오류가 발생한 경우에만 릴레이가 수신단으로 데이터를 전송하기 때문에 릴레이의 불필요한 사용을 최소화 할 수 있다.

### 2.2.2 RCPC code를 이용한 협력 통신 기법

Rate-compatible punctured convolutional(RCPC) code를 이용한 협력 통신 기법[4]은 시스템에서 사용되는 RCPC code의 codeword 일부를 송신단과 릴레이가 전송하는 기법이다. 수신단에서는 수신된 codeword들을 이용하여 보다 효과적인 오류 정정이 가능하게 된다.

### 2.2.3 RS code를 이용한 협력 통신 기법

RS code를 이용한 협력 통신 기법[5]은 RS code의 systematic한 성질을 이용하여 협력 통신 시스템을 설계 한 것이다. 시스템에서  $GF(2^q)$ 을 이용한  $(m, k)$  RS code를 사용한다면, 송신단은 bit의 길이가  $K(=k \times q)$ 인 message를 릴레이와 수신단으로 전송한다. 릴레이에서 CRC 검사를 통해 수신된 message에 오류가 없을 경우, 수신된 message를 이용하여 systematic RS code를 이용하여 bit의 길이가  $M(=m \times q)$ 인 codeword를 생성한다. 생성된 codeword에서 보내고자 하는 message를 제외한  $(M - K)$  bit의 parity만을 수신단으로 전송한다. 수신단에서는 송신단에서 릴레이로 전송한 message에 오류가 발생하지 않은 경우, RS code의 codeword를 수신한 것과 동일한 효과를 얻게 된다.

## 2.3 제안한 협력 통신 기법

### 2.3.1 제안한 협력 통신 기법의 동작 원리

제안한 협력 통신 기법은 송신기와 릴레이에서 사용되는 채널 부호를 결합하여 RS code와 convolutional code의 직렬 연결 부호를 구성하는 협력 통신 시스템이다. 릴레이에서  $GF(2^q)$ 을 이용한  $(m, k)$  RS code를 사용하는 경우, 송신단에서는 bit의 길이가  $M(=m \times q)$ 인 message를 interleaving 한 후 부호율이  $R_3$ 인 convolutional code를 이용하여 bit의 길이가  $N_3(=K/R_3)$ 인 codeword를 생성한다. 송신단은 생성된 codeword를 릴레이와 수신단으로 전송한다.

릴레이에서는 수신된 codeword의 디코딩 과정을 통하여 얻은 message가 CRC 검사를 통해 오류가 발생하지 않은 것이 확인된 경우, systematic RS code를 이용하여 bit의 길이가  $M(=m \times q)$ 인 codeword를 생성한다. 본 논문에서는 릴레이가 별도의 채널을 통해 송신단과 수신단 사이 채널의 LOS 존재 여부를 알고 있다고 가정한다. LOS가 존재하는 경우에는 생성된 RS code의 codeword에서 message를 제외한  $(M - K)$  bit의 parity를 interleaving 한 후 부호율이  $R_4$ 인 convolutional code를 이용하여 bit의 길이가  $N_4(=(M - K)/R_4)$ 인 codeword를 생성한다. 릴레이는 생성된 codeword를 수신단으로 전송한다.

수신단에서는 송신단으로부터 전송된 codeword에서 convolutional code의 디코딩을 통해 message를 얻게 되고, 릴레이로부터 전송된 codeword에서 convolutional code의 디코딩을 통해 RS code의 parity를 얻게 된다. 최종적으로 RS code의 parity를 이용하여 message의 남은 오류를 정정해 준다. 그림 1에서는 LOS가 존재하는 경우 송신단, 릴레이, 수신단에서의 동작들을 나타낸 것이다.

송신단과 수신단 사이의 채널에 LOS가 존재하지 않는 경우, 릴레이에서  $M$  bit의 codeword를 interleaving 한 후 부호율이  $R_4$ 인 convolutional code를 이용하여 bit의 길이가  $N_5(=M/R_4)$ 인 codeword를 생성한다. 릴레이는 생성된 codeword를 수신단으로 전송한다. 수신단은 수신된 codeword를 먼저 convolutional code의 디코딩을 수행하고 RS code의 디코딩을 통해 한번 더 오류를 정정한다. 그림 2에서는 LOS가 존재하지 않는 경우 송신단, 릴레이, 수신단에서의 동작들을 나타낸 것이다.

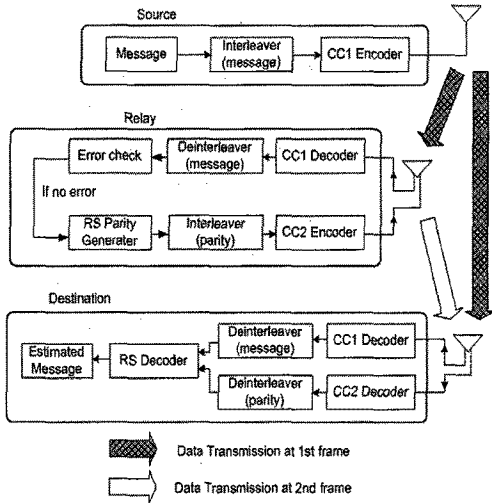


그림 1. 제안한 협력 통신 기법의 구성도 (LOS가 존재하는 환경)

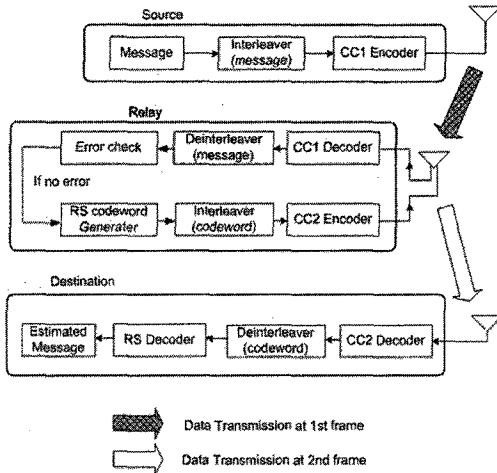


그림 2. 제안한 협력 통신 기법의 구성도 (LOS가 존재하지 않는 환경)

2.3.2 협력 통신 기법에 따른 전송 데이터 길이 비교  
 본 절에서는 제안하는 협력 통신 기법과 다른 통신 기법들의 전송하는 데이터의 량을 비교한다. 만일 convolutional code의 부호율이 1/2, RS code의 부호율이 53/63, RCPC의 부분 부호율이 모두 1/2 일 경우 bit 길이가  $K$ 인 message를 전송하는데 필요한 데이터 전송량은 표 1.과 같다.

그림 3은 LOS 환경에서 전송된 데이터들을 그림으로 표현한 것이다.

이때, 1st frame은 송신단이 데이터를 전송하는 시간 구간을 2nd frame은 릴레이가 데이터를 전송하는 시간 구간을 의미한다.

그림 4는 NLOS 환경에서 전송된 데이터들을 도식화 하여 나타낸 것이다.

표 1. 통신 기법에 따른 데이터 전송량 비교

	LOS 환경	NLOS 환경
Without Relay	S $\xrightarrow{2K}$ D	데이터의 전송이 불가능하다.
Incremental Relay	S $\xrightarrow{2K}$ D	S $\xrightarrow{2K}$ R $\xrightarrow{2K}$ D
Cooperation with RCPC	S $\xrightarrow{2K}$ R $\xrightarrow{2K}$ D	S $\xrightarrow{2K}$ R $\xrightarrow{2K}$ D
Cooperation with RS	S $\xrightarrow{K}$ R $\xrightarrow{0.19K}$ D	S $\xrightarrow{K}$ R $\xrightarrow{0.19K}$ D
Proposed Cooperation	S $\xrightarrow{2K}$ R $\xrightarrow{0.38K}$ D	S $\xrightarrow{2K}$ R $\xrightarrow{2.38K}$ D

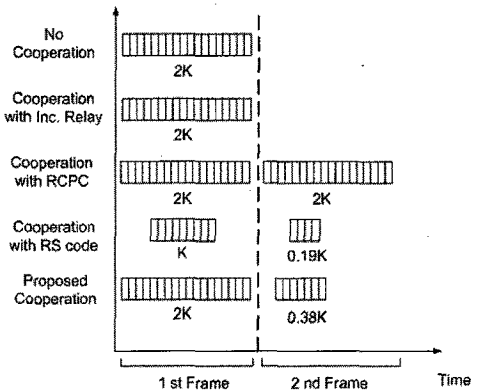


그림 3. 협력 통신 기법들의 데이터 전송 (LOS가 존재하는 환경)

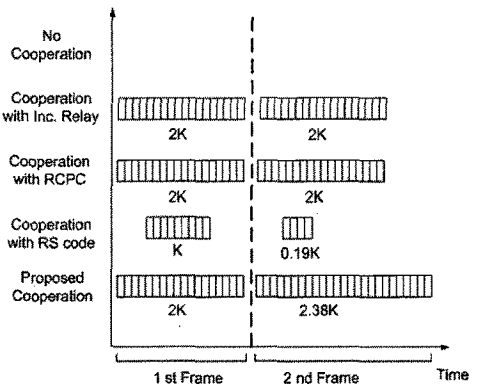


그림 4. 협력 통신 기법들의 데이터 전송 (LOS가 존재하지 않는 환경)

2.3.3 협력 통신 기법에 따른 transmission throughput

본 절에서는 제안하는 협력 통신 기법과 기존의 협력 통신 기법들의 전송 속도를 비교하고자 한다. 오류율을 낮추기 위해 낮은 부호율을 가지는 오류 정정 부호를 협력 통신 기법에 적용하면, 시스템에서 많은 데이터를 전송해야 하기 때문에 전송 속도 측면에서 손실이 발생한다. 따라서 최소한의 데이터를 이용하여 원하는 성능을 얻는 것이 보다 중요하다. 단위 시간당 전송 할 수 있는 message의 양을 transmission throughput이라 정의 할 때, bit의 길이가  $K$ 인 message를 전송하는데 소요되는 시간을  $T$ , 수신단에서 수신한 정보에 오류가 있을 경우  $p$ 번 재전송 하고, 송신단이 부호율이  $R_1$ 인 오류 정정 부호를 사용하고 릴레이가 부호율이  $R_2$ 인 오류 정정 부호를 사용하는 경우, message block을  $b$ 번 전송한다면 transmission throughput  $\Psi$ 은 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \Psi &= \frac{bK(1 - P_{block}) + \dots + bK(1 - P_{block})(P_{block})^p}{b(T/R_1 + T/R_2) + \dots + b(T/R_1 + T/R_2)(P_{block})^p} \\ &= \frac{\sum_{i=0}^p bK(1 - P_{block})(P_{block})^i}{\sum_{i=0}^p b(T/R_1 + T/R_2)(P_{block})^i} \\ &= \frac{K(1 - P_{block})}{(T/R_1 + T/R_2)} \end{aligned} \quad (8)$$

따라서 transmission throughput  $\Psi$ 는 재전송 회수  $p$ 와 무관함을 알 수 있다.

2.3.4 제안한 협력 통신 기법의 성능 분석

본 절에서는 제안하는 협력 통신 기법의 LOS가 존재하는 경우의 성능 (BER, BLER)을 분석하였다.

채널을 통과한 신호의 순간적인 신호 대 잡음비가  $\gamma(n)$ 이고 이 값이 Rayleigh 분포를 가진다고 가정하면  $\gamma(n)$ 의 평균값  $\Gamma$ 은 exponential 분포를 가진다. BPSK로 변조된 convolutional code의 codeword가 채널을 통과한 경우 pairwise error probability (PEP)는 (9)로 나타낼 수 있다[6].

$$P(c \rightarrow e|\gamma) = Q\left(\sqrt{2 \sum_{n \in \eta} \gamma(n)}\right) \quad (9)$$

이때,  $Q(x)$ 는 Gaussian Q-function을 의미하고 벡터  $\gamma$ 는 수신된 신호들의 순간적인 신호 대 잡음비를 의미한다.  $c$ 는 송신단에서 전송한 codeword,  $e$ 는 디코딩 후에도 오류가 존재하는 codeword를 의미한다.

$\eta$ 은  $c(n) \neq e(n)$ 이 성립하는  $n$ 의 집합이다. 따라서  $|\eta|$ 은  $c(n)$ 와  $e(n)$ 의 Hamming distance인  $d$ 로 나타낼 수 있다. 만일 linear code라고 가정하여 error probability가 codeword 구조에 독립이라면 PEP는  $P_2(d|\gamma)$ 로 간략화 할 수 있다. 또한 slow fading 채널을 가정한다면  $\gamma(n)$ 는  $\gamma$ 라는 상수로 표현이 가능하다.

$$P_2(d|\gamma) = Q(\sqrt{2d\gamma}) \quad (10)$$

Convolutional code의  $\gamma$ 이 조건으로 주어질 때 bit error rate(BER)의 upper bound는 (11)과 같다[7].

$$P_b(\gamma) \leq \frac{1}{K_c} \sum_{d=d_f}^{\infty} c(d) P_2(d|\gamma) \quad (11)$$

이때,  $d_f$ 는 code의 free distance를,  $c(d)$ 는 Hamming weight  $d$ 인 모든 codeword에서 오류가 발생한 message 수를,  $K_c$ 는 branch에서 입력 bit의 크기를 의미한다. Convolutional code의  $\gamma$ 이 조건으로 주어질 때 block error rate(BLER)의 upper bound는 수식 (12)과 같다[8,9].

$$P_{block}(\gamma) \leq 1 - (1 - P_E(\gamma))^B \quad (12)$$

이때,  $B$ 는 trellis branch들의 수를  $P_E(\gamma)$ 은  $\gamma$ 이 조건으로 주어질 때 codeword에 오류가 발생할 확률을 의미한다.  $P_E(\gamma)$ 의 upper bound는 다음과 같다[7].

$$P_E(\gamma) \leq \sum_{d=d_f}^{\infty} a(d) P_2(d|\gamma) \quad (13)$$

이때,  $a(d)$ 는 오류가 발생한 codeword에 Hamming weight가  $d$ 가 될 수 있는 모든 경우의 수를 의미한다.

Slow fading 환경에서 BER과 BLER의 실제 값에 근접한 upper bound를 도출하기 위해 limit-before-average 기법[8]을 사용하였다.

$$P_b \leq \int_0^{\infty} \min\left[\frac{1}{2}, \frac{1}{K_c} \sum_{d=d_f}^{\infty} c(d) P_2(d|\gamma)\right] f(\gamma) d\gamma \quad (14)$$

$$P_{block} \leq 1 - \int_0^{\infty} \left(1 - \min\left[1, \sum_{d=d_f}^{\infty} a(d) P_2(d|\gamma)\right]\right)^B f(\gamma) d\gamma \quad (15)$$

다음은 (14), (15)를 이용하여 협력 통신 시스템의 BER과 BLER을 도출 한 것이다.

송신단에서 릴레이로 전송한 정보에 오류가 발생하지 않을 확률  $P(\theta=1)$ 은 (16)과 같다.

$$P(\theta=1) = 1 - P_{block}^{S,R} \geq \int_0^\infty \left( 1 - \min \left[ 1, \sum_{d=d_t}^{\infty} a(d) P_2(d|\gamma_{S,R}) \right] \right)^{R_n} f(\gamma_{S,R}) d\gamma_{S,R} \quad (16)$$

이때,  $P_{block}^{S,R}$ 은 송신단에서 릴레이로 전송한 정보의 BLER을,  $B_m$ 은 송신단으로부터 전송된 codeword의 trellis branch들의 수를,  $\gamma_{S,R}$ 는 송신단과 릴레이 간의 채널 사이의 순간적인 신호 대 잡음비를,  $f(\cdot)$ 는 확률 분포함수를 의미한다.

수신단에서 송신단과 릴레이를 통해서 받은 message와 RS code parity의 BER upper bound는 (17), (18)과 같다.

$$P_b^{S,D} \leq \int_0^\infty \min \left[ \frac{1}{2}, \frac{1}{K_c^2} \sum_{d=d_t}^{\infty} c(d) P_2(d|\gamma_{S,D}) \right] f(\gamma_{S,D}) d\gamma_{S,D} \quad (17)$$

$$P_b^{R,D} \leq \int_0^\infty \min \left[ \frac{1}{2}, \frac{1}{K_c^2} \sum_{d=d_t}^{\infty} c(d) P_2(d|\gamma_{R,D}) \right] f(\gamma_{R,D}) d\gamma_{R,D} \quad (18)$$

이때,  $\gamma_{S,D}$ 은 송신단과 수신단 사이의 순간적인 신호 대 잡음비,  $\gamma_{R,D}$ 은 릴레이와 수신단 사이의 신호 대 잡음비,  $K_c^1$ 는 송신단 branch에서 입력 bit의 크기,  $K_c^2$ 는 릴레이 branch에서 입력 bit의 크기를 의미한다.

수신단에서 릴레이를 통해 신호를 수신한 경우 RS code의 codeword의 average BER은 (19)로 표현 가능하다.

$$P_b^d = \frac{B_m K_c^1 P_b^{S,D} + B_p K_c^2 P_b^{R,D}}{B_m K_c^1 + B_p K_c^2} \quad (19)$$

이때,  $B_p$ 는 수신단으로부터 전송된 codeword의 trellis branch들의 수를 의미한다.

(m,k) RS code는  $2^q$ 개의 symbol을 이용하여 연산 하기 때문에 symbol error rate를 구할 필요가 있다. Convolutional code를 통해 디코딩 후 발생한 오류는 burst error pattern을 가진다. 동일한 error rate를 가지는 경우, burst error pattern이 random error pattern 보다 낮은 symbol error rate를 가진다. 따라서 convolutional code를 디코딩하여 얻은 정보의

symbol error rate  $P_{SE}$ 의 bound는 다음과 같이 random error pattern을 가질 때 발생한 symbol error rate로 표현이 가능하다<sup>10)</sup>.

$$P_{SE} \leq 1 - (1 - P_b^d)^q \quad (20)$$

RS code의 디코딩을 수행하였을 때 오류가 정정되지 않고 남아있을 확률은 (21)과 같다<sup>10)</sup>.

$$P_{UE} = 1 - \sum_{i=0}^t \binom{m}{i} (P_{SE})^i (1 - P_{SE})^{m-i} \quad (21)$$

이때,  $t = \lfloor \frac{m-k}{2} \rfloor$ 는 (n,k) RS code가 정정할 수 있는 오류의 수를 의미한다. RS code의 디코딩을 수행 후 message에 오류가 발생할 확률은 (22)과 같다<sup>10)</sup>.

$$P_{EB} = \frac{2^q - 1}{2^q - 1} \frac{1}{m} \sum_{i=t+1}^m i \binom{m}{i} (P_{SE})^i (1 - P_{SE})^{m-i} \quad (22)$$

수신단에서 릴레이로부터 신호를 수신한 경우와 수신 하지 않은 경우의 BER과 BLER은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Case 1) 릴레이에서 신호를 수신하지 않은 경우

$$P_b(\theta=0) = P_b^{S,D} \quad (23)$$

$$P_{block}(\theta=0) = 1 - (1 - P_{SE})^k \quad (24)$$

Case 2) 릴레이에서 신호를 수신한 경우

$$P_b(\theta=1) = P_{EB} \quad (25)$$

$$P_{block}(\theta=1) = P_{UE} \quad (26)$$

따라서 송신단에서 수신된 정보의 BER과 BLER은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_b = P_b(\theta=0)P(\theta=0) + P_b(\theta=1)P(\theta=1) = P_b^{S,D} \cdot P_{block}^{S,R} + P_{EB} \cdot (1 - P_{block}^{S,R}) \quad (27)$$

$$P_{block} = P_{block}(\Theta=0)F(\Theta=0) + P_{block}(\Theta=1)F(\Theta=1) \\ = (1 - (1 - P_{SE})^k) \cdot P_{block}^{S,R} + P_{UE} \cdot (1 - P_{block}^{S,R}) \quad (28)$$

수식 (27), (28)에 수식 (16)~(20)을 적용한다면 제안된 협력 통신 시스템을 사용할 경우, 수신된 message의 BER과 BLER의 upper bound를 구할 수 있다.

### III. 수치적 결과

본 장에서는 앞 절에서 분석한 협력 통신 기법의 BER과 BLER의 성능을 비교, 분석 한다. 본 논문에서 사용되는 convolutional code는 부호율이 1/2이고  $M=4$ 인 code를 사용하고, RS code는  $GF(2^6)$ 을 이용하는 (63,53) RS code를 사용하고, RCPC code는 Hagenauer<sup>[11]</sup>가 제안한 부호율이 1/4이고  $M=4$ 인 code를 사용한다. 반송파의 주파수  $f_c=60GHz$ , path loss exponent  $n=2.1$ , reference distance  $d_0=1m$  인 환경을 고려하였다<sup>[13]</sup>. 송신단과 수신단 사이의 거리를 5m, 송신단과 릴레이 사이의 거리를 1m, 릴레이와 수신단 사이의 거리를 4m로 가정하였다.

LOS가 항상 존재하는 경우 협력 통신 기법들을 사용하였을 때 수신단에서 받은 정보의 BER은 그림 3과 같고 정보의 BLER은 그림 4와 같다.

LOS가 항상 존재하는 경우, BER은 신호 대 잡음비의 평균값이 낮은 영역에서 RCPC code를 이용한 협력 통신 기법이 가장 낮은 값을 가지지만 신호 대 잡음비의 평균값이 높은 영역은 제안한 협력 통신 기법이 낮은 것을 알 수 있다. BLER은 RCPC code를 이용한 협력 통신 기법이 항상 가장 낮은 값을 가지지

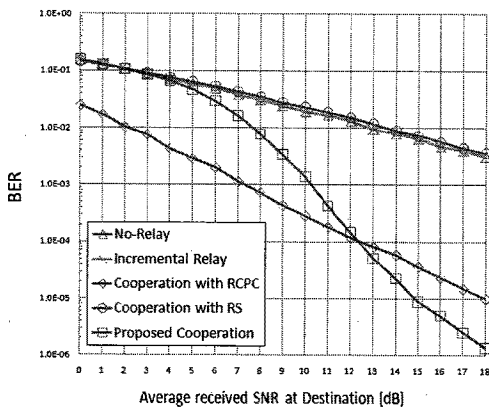


그림 3. 협력 통신 기법에 따른 BER 비교 (LOS가 항상 존재하는 경우)

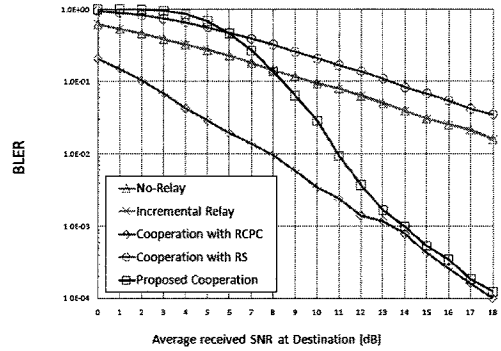


그림 4. 협력 통신 기법에 따른 BLER 비교 (LOS가 항상 존재하는 경우)

만 신호 대 잡음비의 평균값이 높은 영역에서 제안한 협력 통신 기법과 RCPC code를 이용한 협력 통신 기법이 유사한 BLER을 가지는 것을 알 수 있다.

만일 0.2의 확률로 송신단과 수신단 사이의 채널에 LOS가 존재하지 않는 경우, 수신단에서 받은 정보의 BER은 그림 5와 같고 정보의 BLER은 그림 6과 같다.

LOS와 NLOS가 함께 있는 경우, 릴레이를 사용하지 않는 경우와 RS code를 이용한 협력 통신은 신호 대 잡음비의 평균값이 높아져도 BER과 BLER이 특정 값 이하로 낮아지지 않는 것을 확인 할 수 있다. BER과 BLER이 신호 대 잡음비의 평균값이 낮은 영역에서는 RCPC code를 이용한 협력 통신 기법 가장 낮은 값을 가지지만 신호 대 잡음비의 평균값이 높은 영역에서는 제안한 협력 통신 기법이 가장 낮은 것을 확인 할 수 있다. BER과 BLER의 측면에서는 제안한 협력 통신 기법과 RCPC를 이용한 협력 통신 기법이 다른 통신 시스템 보다 효과적인 것을 확인할 수 있다.

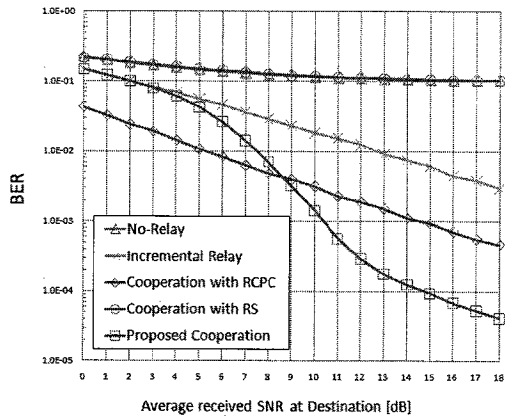


그림 5. 협력 통신 기법에 따른 BER 비교 (LOS와 NLOS가 함께 있는 경우)

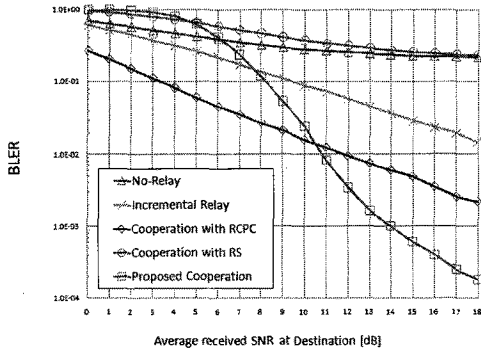


그림 6. 협력 통신 기법에 따른 BLER 비교 (LOS와 NLOS가 함께 있는 경우)

그림 7.은 LOS와 NLOS가 함께 있는 경우 제안한 협력 통신 기법과 RCPC code를 이용한 협력 통신 기법의 transmission throughput을 나타낸 것이다. 이때, 데이터의 전송률은 1Gbps라고 설정하였다 (i.e.,  $K/T=1\text{Gbit/sec}$ ).

신호 대 잡음비의 평균값이 6dB 보다 높은 경우 제안한 협력 통신 기법이 RCPC code를 이용한 협력 통신 기법 보다 transmission throughput이 높은 것을 확인할 수 있다.

따라서 너무 낮은 값의 신호 대 잡음비의 평균값이 형성되지 않는 환경에서는 제안한 협력 통신 기법이 낮은 BER과 BLER을 가지면서 RCPC code를 이용한 협력 통신 기법 보다 높은 transmission throughput을 가지는 것을 확인할 수 있다.

그림 8.은 제안한 협력 통신 기법의 수학적 분석을 통해 도출된 upper bound와 simulation을 통한 결과를 비교한 것이다.

그림 8.은 upper bound는 simulation을 통해 도출

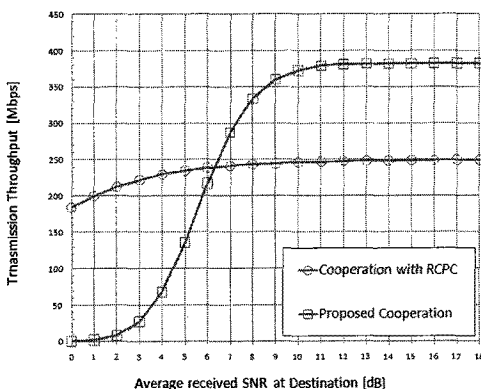


그림 7. 협력 통신 기법에 따른 transmission throughput (LOS와 NLOS가 함께 있는 경우)

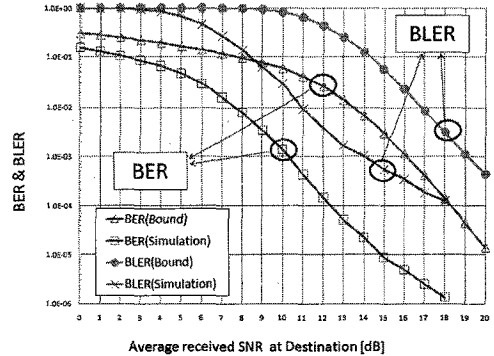


그림 8. 제안한 협력 통신 기법 BER 및 BLER의 bound (LOS가 항상 존재하는 경우)

된 그래프보다 약 6dB 정도의 차이가 발생한다. Convolutional code의 BER과 BLER을 계산하는 과정에서 비교적 단순한 union bound를 이용하였기 때문에 제안한 협력 통신 기법의 BER과 BLER의 upper bound와 시뮬레이션 결과 사이에서 비교적 큰 오차가 발생하였다. 향후 연구 주제로서 union bound 이외의 기법을 사용하여 tight bound를 구하고자 한다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 60GHz 대역에서 릴레이를 이용한 협력 통신 기법을 제안하였다. 60GHz 대역은 LOS가 존재하지 않는 경우 통신이 불가능하기 때문에 릴레이가 송신단으로부터 수신한 정보를 다시 인코딩하여 수신단으로 전송함으로써 수신단은 안정적인 정보의 수신이 가능하다. 또한 협력 통신 기법에 적합한 RS code와 convolutional code간의 직렬 연결 부호를 적용함으로써 LOS가 존재하는 경우, 기존의 협력 통신 기법보다 적은 양의 데이터를 전송함에도 불구하고 낮은 오류율을 가질 수 있었다. 하지만 다른 협력 통신과 달리 두 가지 오류 정정 부호를 사용하여, 릴레이에서는 RS code의 인코딩을 수신단에서는 RS code의 디코딩을 추가로 해주어야 하기 때문에 시스템의 연산량이 증가하는 단점이 있다.

#### 참 고 문 헌

[1] Ernesto Zimmermann, Patrick Herhold, Gerhard Fettweis, "On the Performance of Cooperative Diversity Protocols in Practical Wireless Networks," in European Transactions on Telecom-



munications (ETT), January 2005

[2] J. Nicholas Laneman, David N.C.Tse, Gregory W. Wornell, "Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient protocols and Outage Behavior," IEEE Transactions on Information Theory, Vol.50, No.12, December 2004.

[3] T. S. Rappaport, Wireless Communications: Principles and Practice, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1996.

[4] Todd E. Hunter, Aria Nosratinia, "Diversity through Coded Cooperation," IEEE Trans. on Wireless Commun., Vol.5, No.2, February 2006.

[5] V. Bashun and K. Dubkob, "Cooperative transmission through incremental redundancy," NEW2AN 2006, LNCS Vol.4003, pp.452-460, 2006

[6] Marvin K. Simon, Mohamed-Slim Alouini, Digital Communication over Fading Channels, Wiley-Interscience.

[7] A. Viterbi and J. K. Omura, Principles of Digital Communication and Coding. New York: McGraw-Hill, 1979.

[8] E. Malkamäki and H. Leib, "Evaluating the performance of convolutional codes over block fading channels," IEEE Trans. Inform. Theory, Vol.45, No.5, pp.1643-1646, July 1999

[9] S. Kallel and C. Leung, "Efficient ARQ schemes with multiple copy decoding," IEEE Trans. Commun., Vol.40, pp.642-650, March 1992.

[10] John. G. Proakis, Digital Communications, 4th ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 2001.

[11] J. Hagenauer, "Rate-compatible punctured convolutional codes (RCPC codes) and their applications," IEEE Trans. Commun., Vol.36, No.4, pp.389-40, April 1988.

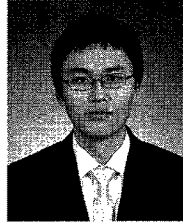
[12] B. Zhao and M. Valenti, "Distributed turbo coded diversity for the relay channel," IEE Electronic Letters, Vol.39, pp.786-787, May 2003.

[13] C.R. Anderson, T.S. Rappaport, K. Bae, A. Verstak, N. Ramakrishnan, W.H. Tranter, C.A. Shaffer, L.T. Watson, "In-building wideband multipath characteristics at 2.5 and 60 GHz" Vehicular Technology Conference, 2002.

Proceedings. VTC 2002-Fall. 2002 IEEE 56th, Vol.1, pp.97-101

이 원 진 (Won Jin Lee)

준회원



2008년 2월 건국대학교 전자공학과  
2008년 3월~현재 고려대학교 전자전기공학과 석사 과정  
<관심분야> 릴레이 네트워크, 협력통신, 무선 자원 할당

이 재 영 (Jae Young Lee)

준회원



2008년 2월 고려대학교 전파통신공학과  
2008년 3월~현재 고려대학교 전자전기공학과 석·박사 통합과정  
<관심분야> 릴레이 네트워크, 협력통신, 네트워크 코딩

서 영 길 (Young Kil Suh)

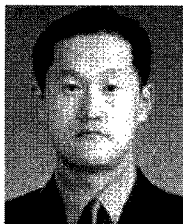
준회원



2009년 2월 고려대학교 전기전자전파공학과  
2009년 3월~현재 고려대학교 전자전기공학과 석사 과정  
<관심분야> 릴레이 네트워크, 협력통신, 양자 정보학

허 준 (Jun Heo)

종신회원



1989년 2월 서울대학교 전자공학과  
1991년 2월 서울대학교 전자공학과 석사  
2002년 2월 미국 USC 전자공학과 박사  
2003년 1월~2007년 2월 건국대학교 전자공학부 조교수  
2007년 3월~현재 고려대학교 전기전자전파공학부 부교수  
<관심분야> 통신시스템, 채널코딩, MIMO