

Rayleigh와 Ricean 채널 환경에서 동작하는 시역전 통신 채널 용량

정회원 고 일 석*

Time-reversal Channel Capacity in Rayleigh and Ricean Environment

Il-Suek Koh* *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 협대역 시 역전 통신 시스템의 이론적 ergodic 채널 용량의 수식을 closed-form으로 구한다. 시 역전 통신 방식은 송신단에서 보낸 신호를 시 역전 어레이들이 받아 이를 시간 축에서 역전시켜 데이터와 함께 보내는 통신 방식이다. 본 논문에서는 송신단은 하나의 안테나로 구성되어 있고 시 역전 어레이는 여러 안테나로 구성되어 있고 안테나사이의 간격이 넓어 수신 신호는 독립적이라 가정한다. 또 채널의 변동이 충분히 느려 시 역전과정 동안 채널의 변화는 없다고 가정한다. 그리고 채널 페이딩 특성을 Rayleigh와 Ricean이라 가정한다. 수치 해석을 통해 시 역전 통신 방식과 기존의 통신 방식을 비교해서 시 역전 통신의 장, 단점을 논한다.

Key Words : Time-reversal communication, Ergodic channel capacity, Rayleigh & Ricean Channels

ABSTRACT

In this paper, a closed-form expression of the ergodic channel capacity for a narrow-band time-reversal communication scheme is analytically formulated. In the time-reversal communication scenario, a transmitter sends a signal and a so-called time-reversal array receives the signal. Then, the received signal is reversed in the time domain and resent to the original transmitter. Here, one transmitter and an antenna array for the time-reversal array are assumed. Since the spacing between the array elements is large, the signals received by each antenna element can be considered independent. For simplicity, the communication channel is assumed stationary, whose properties are not changed for the time-reversal process. Based on the obtained formulation, the channel capacities for the time-reversal and the conventional channels are compared.

I. 서 론

시 역전 방식은 오랫동안 Acoustic분야에서 연구되어 왔다^{[1][2]}. 기본 이론은 Maxwell's equation 또는 wave equation은 시 역전에 불변이라는 생각에 기초한다. 즉 Maxwell's equation 또는 wave equation의 해에다 $-t$ (시 역전)을 넣어도 결과는 Maxwell's

equation 또는 wave equation의 해가 된다. 이를 물리적으로 설명하면 임의의 채널 내 송신기가 펄스를 방출하고 이를 채널을 둘러싸고 있는 무한히 많은 수신기가 신호를 받고 다시 받은 신호를 시간 축에서 역전 시켜 다시 방출하면 일정한 시간이 지난 후에 원 송신기 지점에 방출된 신호가 다시 모이게 된다. 현실에서는 무한한 숫자의 안테나를 사

* 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다. (계약번호 UD070054AD)

* 인하대학교 정보통신대학원(ikoh@inha.ac.kr)

논문번호 : KICS-2008-10-447, 접수일자 : 2008년 10월 31일, 최종논문접수일자 : 2009년 2월 25일

용할 수 없어 일정 지역에 유한한 개수의 안테나만 사용할 수 있다. 그러므로 이런 시 역전기술을 실 환경에서 사용할 수 있는지에 대한 많은 연구가 진행 되어 왔다. 만약 채널이 충분히 random하면 유한한 개수의 안테나로도 시 역전 방식의 신호 전송이 가능하다는 것이 알려져 있고 특히 공간상으로 시 역전 집중이 아주 협소하다는 것이 이론적으로 또는 실험적으로 증명되었다^[4]. 이와 같은 현상은 super-resolution이라 알려져 있다. 즉 채널의 무작위성(randomness)을 이용하여 신호가 공간상으로 집중이 되고 집중된 펄스의 폭은 Diffraction limit으로 알려진 한계보다 작어진다. 이러한 성질을 이용하여 medical imaging, synthetic aperture radar(SAR), 수중 통신 같은 분야에서 시 역전 기술은 널리 사용되고 또는 연구되고 있다^[2].

수중 통신환경은 육상 통신환경과 비슷하게 모델링이 가능하다. 수중환경도 통신 신호의 산란 (dispersion) 과, 회절 (diffraction), 그리고 반사 (reflection)에 의한 다중 경로(multi path)에 의해 신호가 왜곡되어 통신시스템의 성능을 저하시킨다. 그리고 바닷물의 감쇠 효과로 장거리 통신의 경우 신호의 세기가 약해져 전송 용량이 크게 떨어진다. 이를 극복하기 위해 시 역전 통신기술이 제안되었다. 앞서 설명한대로 시 역전 기술을 사용하면 각 다중경로를 통해 신호를 보내 이 신호들이 coherent하게 한 지점에 집중되어 신호의 크기를 기존의 방식에 비해 크게 증가 시킬 수 있다. 이를 time-reversal mirror(TRM)을 사용하여 실제 수중환경에서 실증 하였다^[5]. 육상 환경에서는 많은 연구가 시 역전 기술을 이용해서 채널 equalizer의 효율을 높이거나 Inter-Symbol-Interference(ISI)를 제거하는 것 같은 통신 시스템 알고리즘에 초점을 맞추었다^[6].

채널 용량은 여러 통신환경 예를 들면 Rayleigh 또는 Ricean환경 등에 정확히 알려져 있다^{[7][8]}. 그리고 채널용량은 수치적으로 매우 정확하게 계산 가능하다. 그러나 채널 파라미터의 용량에 대한 영향을 정확하게 이해하기 위해서는 수치결과보다는 정확한 수식이 필요하다. 그러므로 본 논문에서는 기존 통신에 대해 알려진 채널 용량 식을 시 역전 환경에 맞게 확장한다. 구한 식들은 기존의 알려진 결과에 비해 간단한 함수를 사용하여 표시된다. 우선 II절에서는 협대역 신호의 시 역전 신호의 페이딩 통계를 구하고 III절에서 시 역전 채널 용량을 구한다. 마지막으로 IV절에서 수치적으로 채널 용량을 구한 후 이를 기존의 통신방법과 비교하여 시 역전 통신방법의 장, 단점을 논한다.

II. 협대역 시역전 채널 모델

본 논문에서는 그림 1 보듯이 하나의 송신단에서 전송되는 신호를 다수의 수신단이 수신한 후 수신된 신호를 시간 축에서 역전을 시켜 이를 데이터와 함께 보내는 통신방식을 고려한다. 본 논문에서는 이러한 방식을 Multi-Input Single Output (MISO) 시스템이라 부른다.

기본적으로 통신 시스템의 패널용량을 계산하기 위해서는 통신 채널의 페이딩 통계를 알아야 한다. 일반적으로 협대역 통신시스템의 페이딩 통계로는 Rayleigh또는 Ricean 통계가 사용된다. 이러한 통계는 기존의 통신환경, 즉 송신단에서 다수의 수신단으로 신호가 전송하는 경우 사용된다. Rayleigh 통계는 Line-of-Sight(LOS)성분이 없는 경우 사용되고 Ricean 통계는 LOS성분이 있는 경우 사용된다. 시 역전 통신인 경우 이러한 통계를 직접 사용할 수 없고 이를 변형하여 적용해야 한다. 단일 주파수인 경우 시 역전 방식은 주파수축에서는 frequency conjugate 방식과 동일하다. 즉 주파수영역에서 받은 신호를 conjugate를 취한 후 이를 재전송한다. 만약 안테나 1에서 받은 신호를 z_1 이라 하면 원 송신단에서 받은 신호는 $|z_1|^2$ 가 되고 $|z_1|^2$ 의 통계를 구하기 위해 다음과 같이 채널 환경을 가정한다.

1. 단일 주파수 전송.
2. Stationary channel: 채널 특성변화가 시간에 따라 아주 느리다.
3. 안테나 사이 간격이 커 각 안테나로 들어오는 신호는 독립적이다.

이러한 가정을 바탕으로 N개의 시 역전 array의 안테나에서 재전송되는 신호는 간단히 다음과 같이 표시된다.



그림 1. MISO 시스템
Figure 1. MISO system

$$z = |z_1|^2 + |z_2|^2 + \dots + |z_M|^2$$

여기서 z 는 원 송신단에서 받는 신호이다. 각 시역전 array의 안테나에서 받는 신호의 통계는 Gaussian로 모델링이 될 수 있다. 그러므로 PDF(Probability Density Function)는 평균값(μ)과 표준 편차(σ)로 정의된다.

페이딩 특성을 Rayleigh distribution이라 가정하면 $|z_i|^2$ 는 exponential distribution이 된다⁹⁾. 그리고 각 시역전 안테나들이 받는 신호는 독립적이라 가정 했으므로 z 의 통계는 Rayleigh channel인 경우에는 다음과 같은 Erlang distribution이 된다⁹⁾¹⁰⁾.

$$f_z(z) = \frac{\lambda^n z^{N-1} e^{-\lambda z}}{(N-1)!} u(z) \quad (1)$$

여기서 $u(z)$ 는 단위 계단 함수이고 $\lambda = 1/2\sigma^2$ 이다. σ 는 앞서 정의된 데로 시역전 array가 받는 신호의 변동을 나타낸다.

Rician channel인 경우는 Rayleigh 경우보다 복잡하다. 이때는 시역전 신호의 통계는 non-central chi-square distribution로 알려진 다음과 같은 수식이 된다¹⁰⁾.

$$f_z(z) = \frac{e^{-\frac{z+N\mu^2}{2\sigma^2}}}{2\sigma^2} \left[\frac{\sqrt{z}}{\sqrt{N}\mu} \right]^{N-1} \cdot I_{N-1} \left(\frac{\sqrt{Nz}\mu}{\sigma^2} \right) u(z) \quad (2)$$

여기서 $I_n(\cdot)$ 는 modified Bessel function이다. 채널용량을 계산하기 위해서는 전력의 PDF가 중요하다. 전력은 $y = z^2$ 이므로 y 의 PDF는 다음과 같이 구할 수 있다⁹⁾.

$$f_y(y) = \frac{1}{2\sqrt{y}} [f_z(\sqrt{y}) + f_z(-\sqrt{y})] u(y)$$

III. 시역전 ergodic 채널 용량

channel capacity는 다음과 같이 수학적으로 표현이 된다⁸⁾¹¹⁾.

$$C = \log_2(1 + \gamma) \text{ [bits/s/Hz]} \quad (3)$$

여기서 γ 는 수신 신호 대 잡음 비(SNR)이다. 페이딩 채널에서는 수신 SNR이 random variable(RV)이 되어 채널 용량 자체가 RV이 되어 다음과 같은 평균 채널 용량 즉 ergodic capacity가 중요한 파라미터가 된다.

$$\begin{aligned} \langle C \rangle &= \int_0^\infty \log_2(1 + \gamma) P_\gamma(\gamma) d\gamma \text{ 기준 통신} \quad (4) \\ &= \int_0^\infty \log_2(1 + \gamma^2) P_\gamma(\gamma) d\gamma \text{ 시역전 통신} \end{aligned}$$

여기서 $P_\gamma(\gamma)$ 는 기준 통신채널의 수신 SNR의 pdf이다. 일반적으로 사용되는 페이딩 채널 즉 Rayleigh나 Rician channel에 대해서는 ergodic capacity의 closed-form 식과 성질이 알려져 있다⁷⁾¹⁸⁾.

3.1 Rayleigh Channel

첫 번째로 Rayleigh channel에서 MISO시스템인 경우이다. 수신 신호의 SNR pdf는 식(1)을 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_\gamma(\gamma) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2\bar{\gamma}\sigma^2} \right)^N \gamma^{\frac{1}{2}N-1} \frac{e^{-\sqrt{\gamma}/2\bar{\gamma}\sigma^2}}{\Gamma(N)} u(\gamma) \quad (5)$$

여기서 $\bar{\gamma}$ 는 기준 통신 방식의 mean SNA이고 σ 는 수식 (1), (2)에 정의된 신호의 변동이다. 식 (4)를 이용하면 ergodic capacity는 다음과 같이 적분식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \langle C \rangle &= \frac{1}{2\Gamma(N)} \left(\frac{1}{2\bar{\gamma}\sigma^2} \right)^N \cdot \int_0^\infty \gamma^{\frac{1}{2}N-1} \log_2(1 + \gamma) e^{-\sqrt{\gamma}/2\bar{\gamma}\sigma^2} d\gamma \quad (6) \\ &= \frac{1}{\ln 2 \Gamma(N)} \left(\frac{1}{2\bar{\gamma}\sigma^2} \right)^N \cdot \int_0^\infty \gamma^{N-1} \ln(1 + \gamma^2) e^{-\gamma/2\bar{\gamma}\sigma^2} d\gamma \end{aligned}$$

식(6)내 적분은 다음과 같은 과정을 통해 정확하게 계산된다. 우선 다음 적분을 고려한다.

$$I_n = \int_0^\infty z^n \ln(1 + z^2) e^{-az} dz \quad (7)$$

$n = 0$ 인 경우 위 적분은 다음과 같이 정확하게 계산가능하다¹¹⁾.

$$I_0 = \int_0^\infty \ln(1+z^2)e^{-az} dz \quad (8)$$

$$= \frac{1}{a} [e^{ia} E_1(ia) + e^{-ia} E_1(-ia)]$$

여기서 $E_1(\cdot)$ 는 exponential integral이다^{[11][12]}. I_n 은 다음과 같이 I_0 의 n 차 미분으로 다음과 같이 표시된다.

$$I_n = i \left[(-i)^n \frac{d^n}{d(ia)^n} \left\{ \frac{e^{ia}}{ia} E_1(ia) \right\} - \left[i^n \frac{d^n}{d(-ia)^n} \left\{ \frac{e^{-ia}}{-ia} E_1(-ia) \right\} \right] \right] \quad (9)$$

Leibniz's rule^[12]을 사용하면 식 (9)의 첫 번째 미분항은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I_n^1 = (-1)^n \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} D^k f(b) D^{n-k} \frac{1}{b} \quad (10)$$

여기서 $b=ia$, 이고 $D^{n-k} \frac{1}{b} = (-1)^{n-k} \frac{(n-k)!}{b^{n-k+1}}$ 이다. exponential integral의 recurrence relation을 사용하면 $D^k f(a)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D^k f(b) = D^{k-1} f(b) + \frac{(-1)^k (k-1)!}{b^k} \quad (11)$$

$$= D^{k-1} f(b) - D^{k-1} \frac{1}{b}$$

$$= f(b) - D^{k-1} \frac{1}{b} - D^{k-2} \frac{1}{b} - \dots - \frac{1}{b}$$

$$= f(b) - S$$

식 (11)에서 유한급수는 기하급수(geometric series) 형태이고 기하급수를 계산하데 일반적으로 사용되는 방법을 사용하면 다음과 같은 상미분방정식(ordinary differential equation)을 얻는다.

$$(1-D)S = \frac{1}{a} - D^k \frac{1}{a} \quad (12)$$

이 방정식의 해는 다음과 같이 간단하게 구해진다.

$$S = e^a \left[-(-1)^k k! \frac{E_{k+1}(b)}{b^k} + E_1(b) \right] \quad (13)$$

그러므로 식 (13)를 식 (11)에 대입하면 $D^k f(b)$ 는 간단히 다음과 같이 표현된다.

$$D^k f(b) = (-1)^k k! \frac{e^b E_{k+1}(b)}{b^k} \quad (14)$$

식(14)을 식(10)에 넣고 정리하면 I_n 는 다음과 같이 exponential integral의 유한 합으로 표현 가능하다.

$$I_n = n! \frac{e^b}{b^{n+1}} \sum_{k=0}^n E_{k+1}(b) \quad (15)$$

$E_n(b^*) = [E_n(b)]^*$ 를 사용하면 I_n 은 다음과 같이 정확하게 표현된다.

$$I_n = \frac{2n!}{b^{n+1}} \sum_{k=0}^n Re [e^{ib} E_{k+1}(ib)] \quad (16)$$

여기서 $Re[\cdot]$ 는 복소수의 실수부이다. 그러므로 Rayleigh channel내 MISO시스템의 시역전 통신 ergodic channel capacity는 다음과 같이 수학적으로 정확하게 표시된다.

$$\langle C \rangle = \frac{2}{\ln 2} \sum_{k=0}^{N-1} Re \left[e^{\frac{i}{2\gamma\sigma^2}} E_{k+1} \left(\frac{i}{2\gamma\sigma^2} \right) \right] \quad (17)$$

만약 Single-Input Single-Output(SISO)인 경우 ($N=1$)에는 식(17)는 다음과 같이 간략하게 표현된다.

$$\langle C \rangle = -\frac{2}{\ln 2} \left[ci \left(\frac{1}{2\gamma\sigma^2} \right) \cos \left(\frac{1}{2\gamma\sigma^2} \right) + si \left(\frac{1}{2\gamma\sigma^2} \right) \sin \left(\frac{1}{2\gamma\sigma^2} \right) \right] \quad (18)$$

여기서 $ci(\cdot)$ 와 $si(\cdot)$ 는 각각 cosine integral과 sine integral이다^[12].

안테나수가 무한대로 커지는 경우를 고려하면 페이딩의 변동은 안테나수가 커질수록 비례해서 커지므로 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\frac{1}{2\gamma\sigma^2} = \frac{N}{\gamma} \quad (19)$$

N 이 커지면 exponential integral의 asymptotic series를 사용하여 다음과 같이 exponential integral을 표현 가능하다^[12].

$$E_{k+1}\left(i\frac{N}{\gamma}\right) \sim \frac{\bar{\gamma}}{iN} e^{-i\frac{N}{\gamma}} \left[1 - \frac{\bar{\gamma}}{iN}(k+1) + \dots\right] \quad (20)$$

이를 이용하면 ergodic channel capacity (17)은 다음과 같이 asymptotic하게 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \langle C \rangle &\sim \frac{2}{\ln 2} \sum_{k=0}^{N-1} \left[\frac{\bar{\gamma}^2}{N^2} k - \frac{\bar{\gamma}^4}{N^4} k(k+1)(k+2) + \dots \right] \quad (21) \\ &= \frac{1}{\ln 2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1} \bar{\gamma}^k}{k} = \log_2(1 + \bar{\gamma}^2) \end{aligned}$$

식(21)에서 보듯이 안테나수가 무한대로 커지는 경우 예측한대로 채널 용량은 Additive White Gaussian Noise(AWGN) channel의 채널 용량이 된다.

3.2 Rician Channel

먼저 수신 SNR의 pdf는 식(2)을 이용하여 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$f(\gamma) = \frac{1+K}{\bar{\gamma}} e^{-K-\gamma(1+K)/\bar{\gamma}} \left(\frac{1+K}{K\bar{\gamma}}\right)^{\frac{N-1}{2}} \cdot \gamma^{\frac{N-1}{2}} I_{N-1} \left[\sqrt{\frac{4K(1+K)\bar{\gamma}}{\gamma}} u(\gamma) \right] \quad (22)$$

여기서 K 는 Rician factor이다. ergodic channel capacity는 다음과 같은 적분 식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} \langle C \rangle &= \frac{1+K}{\bar{\gamma}} e^{-K} \left(\frac{1+K}{K\bar{\gamma}}\right)^{\frac{N-1}{2}} \cdot \int_0^{\infty} e^{-\gamma(1+K)/\bar{\gamma}} \gamma^{\frac{N-1}{2}} \log_2(1+\gamma^2) I_{N-1} \left[\sqrt{\frac{4K(1+K)\bar{\gamma}}{\gamma}} d\gamma \right] \quad (23) \end{aligned}$$

Bessel function을 멱급수(power series)^[12]형태로 표현하면 식 (23)은 다음과 같이 바뀐다.

$$\begin{aligned} \langle C \rangle &= \frac{1}{\ln 2} e^{-K} \left(\frac{1+K}{\bar{\gamma}}\right)^N \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k! \Gamma(N+k)} \cdot \left[\frac{K(1+K)}{\bar{\gamma}} \right]^k \int_0^{\infty} \gamma^{N+k-1} \ln(1+\gamma^2) e^{-\gamma(1+K)/\bar{\gamma}} d\gamma \quad (24) \end{aligned}$$

식 (24)내 적분은 식 (7)으로 표시되고 식 (16)을 이용하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \langle C \rangle &= \frac{2}{\ln 2} e^{-K} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{K^k}{k!} \sum_{n=0}^{N+k-1} \text{Re} \left[e^{i\frac{1+K}{\sqrt{\gamma}}} E_{n+1} \left(i\frac{1+K}{\bar{\gamma}} \right) \right] \quad (25) \end{aligned}$$

식 (25)의 double summation의 계산 방향을 대각선으로 바꾸어 다시 정리하면 다음과 같이 single summation으로 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} S &= \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{N+k-1} \frac{K^k}{k!} f_{n+1} \quad (26) \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{K^k}{k!} [f_1 + f_2 + \dots + f_{N-1}] + \sum_{k=0}^{\infty} \frac{K^k}{k!} f_{k+N-1} + \sum_{k=0}^{\infty} \frac{K^k}{k!} f_{k+N-2} + \dots \\ &= \sum_{n=1}^{N-1} f_n e^K + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{K^n}{n!} f_{n+N-1} \cdot \left[1 + \frac{K}{n+1} + \frac{K^2}{(n+1)(n+n)} + \dots \right] \end{aligned}$$

여기서 $f_{n+1} = \text{Re} \left[e^{i\frac{1+K}{\sqrt{\gamma}}} E_{n+1} \left(i\frac{1+K}{\bar{\gamma}} \right) \right]$ 이다 식 (26)

내 무한급수는 confluent hypergeometric series로 표시되고 이는 incomplete gamma function으로 간략하게 표시된다. 그러므로 최종 ergodic capacity는 다음과 같이 표시된다.

$$\langle C \rangle = \frac{2}{\ln 2} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \text{Re} \left[e^{i\frac{1+K}{\sqrt{\gamma}}} E_{n+N} \left(i\frac{1+K}{\bar{\gamma}} \right) \right] \cdot P(n, K) + \sum_{n=0}^{N-1} \text{Re} \left[e^{i\frac{1+K}{\sqrt{\gamma}}} E_{n+1} \left(i\frac{1+K}{\bar{\gamma}} \right) \right] \right\} \quad (27)$$

여기서 $P(\cdot, \cdot)$ 는 regularized incomplete gamma function이고 $P(a, x) = \gamma(a, x) / \Gamma(a)$ 로 정의된다^[12]. 만약 $K=0$ 인 경우(Rayleigh channel), $P(n, 0) = 0$ 이므로 예측한대로 식(27)는 식(17)로 바뀐다.

IV. 수치 결과

이 절에서는 앞서 구한 수식을 바탕으로 시 역전 통신 시스템의 채널용량을 분석한다. 채널이득(channel gain)을 방지하기 위해 신호의 변동을 나타내는 σ 를 $\sigma^2=1/2$ 로 고정한다. 기존 통신방식의 채널용량과 시역전 방식의 채널 용량을 비교하기 위해서는 채널용량을 계산하기 위해서는 똑같은 SNR을 사용해야한다, 시역전인 경우 신호의 크기가 기존 방식 신

호의 제공에 비례하므로 전력 역시 제공에 비례한다. 그러므로 그림 6을 제외한 모든 그림에서 시역전인 경우 $\sqrt{\gamma}$ 를 사용하였고 기존방식인 경우 $\bar{\gamma}$ 를 사용하였다. 먼저 Rayleigh channel내 SISO시스템을 고려한다. 그림 2은 시역전 방식과 기존의 통신방식의 채널용량을 보여준다. 그림에서 보듯이 시역전 시스템은 적은 SNR에서는 신호를 집중시켜주므로 보다 많은 정보를 보낼 수 있으나 SNR이 커지면 신호의 변동 또한 커져 기존의 통신 시스템보다 전송할 수 있는 정보량은 줄어든다. 흥미로운 점은 적은 SNR에서는 페이딩이 없는 AWGN환경보다 많은 정보를 보낼 수 있다는 것이다. SNR이 적으면 신호집중(time-reversal refocus)효과로 정보전송이 용의하다고 사료된다. 이러한 결과는 채널용량을 계산할 때 시역전인 경우 $\sqrt{\gamma}$ 를 사용하여 적은 SNR인 경우 SNR을 키우고 큰 SNR인 경우 SNR을 줄이는 효과에 의해 발생한다. 유도한 공식을 확인하기 위해 Monte Carlo simulation을 사용하여 몇 경우에 대해 채널 용량을 비교하였다. Monte Carlo simulation을 위해 500개의 샘플을 사용하였다. 다음은 MISO시스템인 경우이다. 같은 환경에서 안테나의 수를 늘여가면서 채널용량을 비교하였다. 그림 3이 여러 경우의 채널 용량을 보여준다. 그림 3에서 “conventional channel”은 기존의 SISO 시스템을 의미한다. 그림에서 보듯이 안테나수를 늘리면 보다 많은 정보를 보낼 수 있으나 안테나수를 늘리면서 얻는 이득은 안테나수가 크면 점점 줄어든다. 다음 그림 4은 무한한 안테나수가 있는 경우와 비교했다.

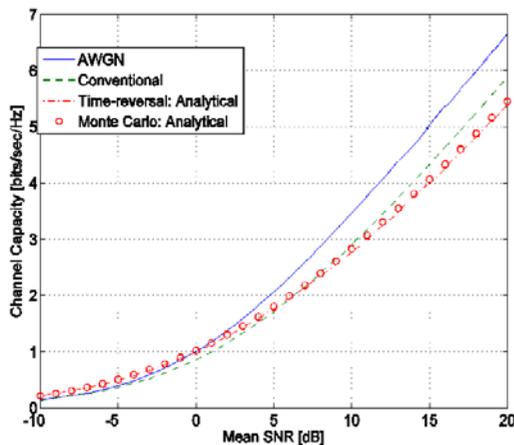


그림 2. Rayleigh channel내 SISO system 채널 용량.
Figure 2. SISO system channel capacity in Rayleigh channel environment.

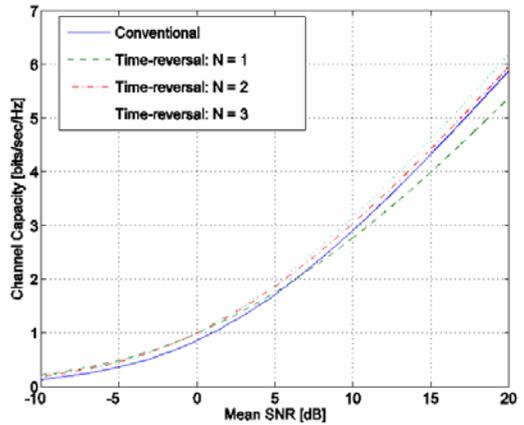


그림 3. Rayleigh channel내 MISO system 채널 용량.
Figure 3. MISO system channel capacity in Rayleigh channel environment.

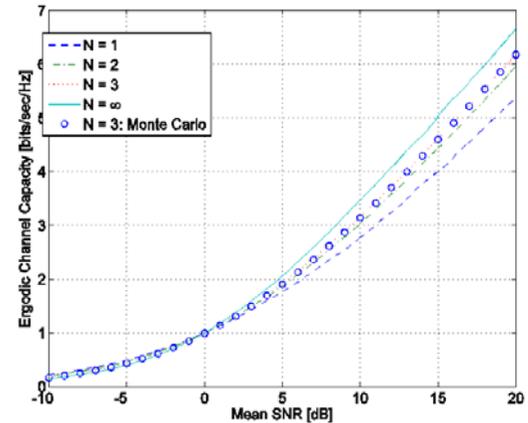


그림 4. Rayleigh channel내 MISO system 채널 용량. $N = \infty$ 인 경우.
Figure 4. SISO system channel capacity in Rayleigh channel environment for $N = \infty$.

다음은 Ricean channel을 고려한다. 우선 SISO 시스템의 채널용량을 기존의 방식과 비교한다. 그림 5와 $K = 0$ dB 경우이다.

그림 5에서 보듯이 시역전 시스템은 Rayleigh channel인 경우와 같이 적은 SNR인 경우 좋은 특성을 보인다. 다음은 MISO시스템인 경우이다. 이때는 $K = 3$ dB인 경우를 고려하였고 그림 6에 비교되어 있다.

그림 6에서 보듯이 안테나수를 늘리면 채널용량은 늘어나나 K 가 높은 경우 평균 신호가 크므로 안테나수에 따른 이득은 적은 K 에 비해 줄어든다.

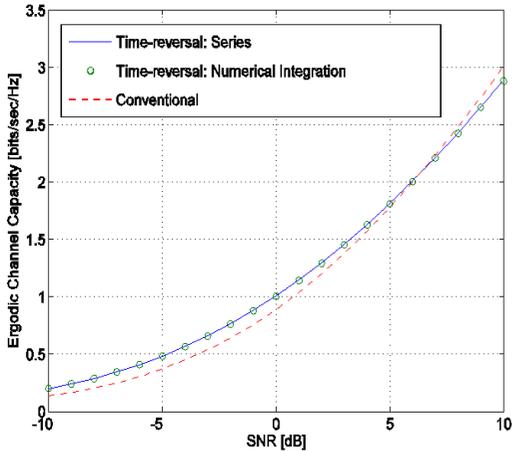


그림 5. Rician channel내 SISO system 채널 용량: $K=0\text{dB}$.
Figure 2. SISO system channel capacity in Rician channel environment: $K = 0\text{dB}$.

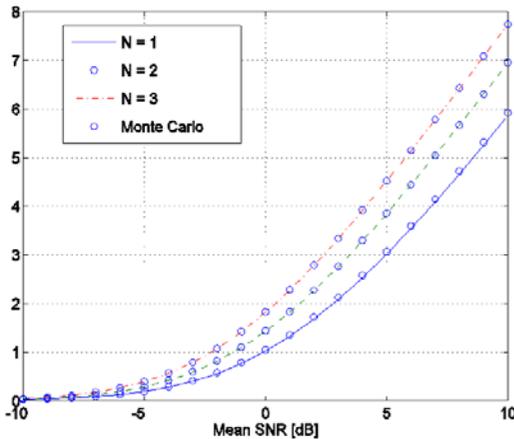


그림 6. Rician channel내 MISO system 채널 용량: $K=3\text{dB}$.
Figure 6. MISO system channel capacity in Rayleigh channel environment: $K = 3\text{dB}$.

V. 결론

본 논문에서는 채널 환경이 Rayleigh 또는 Rician 환경이라 가정하고 시역전 통신의 페이딩 통계와 이를 이용해서 채널 용량의 특성을 계산하였다. 채널의 변동이 느려 시역전과정이 일어나는 동안 채널의 변동이 무시할 수 있고 또 시역전 어레이내 안테나 간격이 커 각 안테나의 신호의 correlation이 무시된다는 가정하해서 ergodic 채널 용량의 closed-form 을 구하였다. 구한 채널 용량은 exponential integral 로 표시되고 수치적으로 매우 효율적으로 계산 가

능하다. 여러 경우에 대한 수치 결과로부터 시역전 방식은 여러 안테나를 사용할 경우 기존의 방식에 비해 이득을 얻을 수 있고 안정된 통신이 가능하다는 것을 보았다. 특히 고려된 Rayleigh 또는 Rician channel 환경에서 SNR이 적은 경우는 시역전 방식이 이득이 있다는 것 또한 수치결과로부터 유추할 수 있다.

참고 문헌

- [1] M. Fink, D. Cassereau, A. Derode, C. Prada, P. Roux, M. Tanter, J. Thomas, and F. Wu, "Time-reversal acoustics," *Rep. Prog. Phys.*, vol.63, pp.1933-1995, 2000.
- [2] M. Fink, "Time Reversal Acoustics," *Phys. Today*, vol. 50, pp.34-40, March 1997.
- [3] P. Blomgren and G. Papanicolaou, "Super-resolution in time-reversal acoustics," *J. Acoust. Soc. Am.*, 111(1), Pt. 1, Jan. 2002.
- [4] G. Bal and L. Ryzhik, "Time Reversal and Refocusing in Random Media", *SIAM Journal of Applied Mathematics*, vol. 63, pp.1475-1498, 2003.
- [5] K.B. Smith, A.A.M. Abrantes, and A. Larraza, "Examination of time-reversal acoustics in shallow water and applications to noncoherent underwater communications," *J. Acoust. Soc. Am.*, 113(6), June, 2003.
- [6] H.T. Nguyen, J.B. Andersen, and G.F. Pedersen, "The Potential Use of Time Reversal Techniques in Multi Element Antenna System," *IEEE Comm. Lett.*, vol. 9, No. 1, Jan. 2005.
- [7] W.C.Y. Lee, "Estimate of Channel Capacity in Rayleigh Fading Environment," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.39, no.3, pp. 187-189 Aug. 1990.
- [8] N.C. Sagias, G.S. Tombras and G.K. Karagiannidis, "New Results for the Shannon Channel Capacity in Generalized Fading Channels," *IEEE Commun. Lett.*, vol.9, no.2, pp. 1-3 Feb. 2005.
- [9] A. Papoulis and S.U. Pillai, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, Mc-Graw Hill, New York, 2002.

- [10] M.K. Simon, *Probability Distributions Involving Gaussian Random Variables A Handbook for Engineers and Scientists*, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [11] I.S. Gradshteyn and I.M. Ryzbik, *Table of Integrals, Series, and Products*, Academic Press, 2000.
- [12] M. Abramowitz and I.A. Stegun, *Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables*, U.S. Department of Commerce, 1964.

고 일 석 (Il-Suek Koh)

정회원



1992년 2월 연세대학교 전자공학
학과 (공학사)

1994년 2월 연세대학교 전자공
학과 (공학석사)

1994년 1월 LG전자 연구원

2002년 8월 The University of
Michigan at Ann Arbor 전

기 및 전산과 (공학박사)

2004년 3월~현재 인하대학교 정보통신대학원 교수

<관심분야> Theoretical Electromagnetic, Numerical
Analysis, Channel Modeling