

# 차세대 수중통신용 고속 고품질 데이터 전송 기법

\*정진희 · \*최덕군 · \*정지원

## High-Speed and High-Reliability Data Transmission Technology for Next Generation Under-Water Communications

\* Jin-hee Jeong · \* Duk-gun Choi · \* Ji-won Jung

\* 한국해양대학교 전파공학과 위성통신연구실

**Abstract** : For under-water communication system, due to limit of bandwidth and reflect of under-water wave, it is difficult to implement high-reliability high-speed digital communication system. To apply high-reliability and high-speed communication system for under-water system, the efficient combine the channel design with the use of multiple transmit and/or receive antennas. Therefore this paper analyze the space time coded system for under-water communication environment.

**Key words** : Under-water communication(수중 통신), Space-time code(시공간 부호)

### 1. 서론

수중 음향 통신은 대역이 제한되어 있고, 음파가 해저 및 수면에서 반사되어 신호가 수신된다는 특징 때문에 신뢰성이 높고 전송 속도가 빠른 디지털 통신의 구현이 어렵다. 이러한 수중 채널 환경에서 고속 데이터 통신을 하기 위한 효율적인 접근법은 송수신단에 여러 개의 안테나를 두어 시간적, 주파수적, 공간적으로 부가정보를 보내는 다이버시티 기법을 적용하는 방안이 있으며, 또한 고품질, 즉, 데이터의 신뢰성 향상을 위해서는 전송 채널 상에서 발생하는 오류를 정정하는 오류정정 방식의 적용이 필수적이다. 다이버시티 기법을 이용하기 위해서는 최적의 배열 안테나 수와 안테나 간격에 대한 분석, 그리고 수신 SNR을 높이기 위한 광대역 빔형성 기법 및 채널 부호화 알고리즘과의 연동기법에 대한 연구가 필수적이다. 기존의 다중 안테나를 두어 전송하면서 컨벌루션 부호, 트렐리스 부호, 터보 부호등의 오류 정정 방식을 적용시키는 것과는 다중 전송 안테나에 적절한 코딩 기술을 사용한 것으로 즉, 시공간 부호를 적용하여 수신기에서 다이버시티 효과를 제공하고 대역폭의 손실 없이 비부호화 시스템에서의 코딩 이득을 제공하기 위해서 시공간 부호를 기반으로 하는 다이버시티 기법을 고품질 고속 전송을 목표로 하는 수중 통신에 적용하는 것이 급선무이다. 시공간 부호는 다중 전송 안테나를 사용하여 설계된 코딩 기술이다. 수신기에서 다이버시티 효과를 제공하고 대역폭의 손실 없이 비부호화 시스템에서의 코딩 이득을 제공하기 위해서 시공간 부호는 서로 다른 안테나에 전송된 신호에서 시간과 공간의 상관관계를 도입하며, 시공간 블록 부호(STBC, space-time block code)와 시공간 트렐리스 부호(STTC, space-time trellis code)로 대별된다. 따라서 본 논문에서는 수중 채널 환경에 적합한 시공간 부호 다이버시티 기법에 대해 분석한다.

### 2. 시공간 부호화 방식의 기본 개념

시공간 부호화 방식의 기본적인 개념은 그림 1과 같다. 송신단은  $n$  개의 안테나를 가지고, 수신단  $m$  개의 안테나를 가지는 수중 통신 시스템을 고려한다. 데이터는 채널 인코더에 의해서 부호화 되고 부호화된 데이터는 직병렬 변환기를 통과한 후  $n$  스트림 데이터로 분할한다. 각 데이터 스트림은 pulse shaper의 입력으로 사용된다.

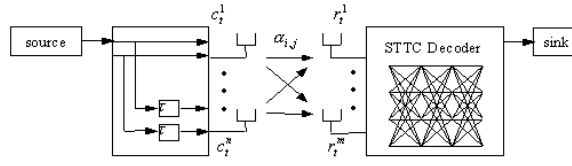


그림 2. STTC decoder diagram

각 shaper의 출력은 바로 변조된다. 각 시간 슬롯  $t$ 에서 변조기의  $i$ 번째 출력은  $1 \leq i \leq n$ 에 대한  $i$ 번째 전송 안테나를 사용하여 전송되는 것은  $c_i^t$  신호이다.  $n$ 개의 신호는 각각의 다른 전송 안테나에서 동시에 전송되고 이 모든 신호는 같은 전송시간  $T$ 을 가진다. 각 수신 안테나에서 신호는 수중 페이딩에 의해서 영향을 받은  $n$ 개의 전송된 신호는 노이즈 중첩이다. 시간  $t$ 에서  $j$ 번째 안테나에 수신되는 신호  $r_j^t$ 은 식 (1)과 같이 주어진다.

$$r_j^t = \sum_{i=1}^n a_{i,j} c_i^t \sqrt{E_s} + n_j^t \quad (1)$$

여기서 시간  $t$ 에서 잡음  $n_j^t$ 은 차원당 분산  $E_0/2$ 을 가진 제로 평균 복소 가우시안 랜덤 변수의 독립적인 샘플로써 모델링 되었다. 계수  $a_{i,j}$ 은 전송 안테나  $i$ 에서 수신 안테나  $j$ 까지의 경로 이득이다. 이 경로 이득은 한 프레임 동안은 일정한 slow fading이라 가정한다. 각각의 안테나에서 획득한  $r_j^t$ 는 송신 부호화에 대응되는 시공간 부호의 복호기로 입력되어 저서 원신호를 복호한다.

이 논문에서 연구하고자 하는 수중 통신에서 고전송 고품질을 제공하기 위한 시공간 부호를 이용한 다이버시티의 적용 블록도는 아래 그림 2와 같다.

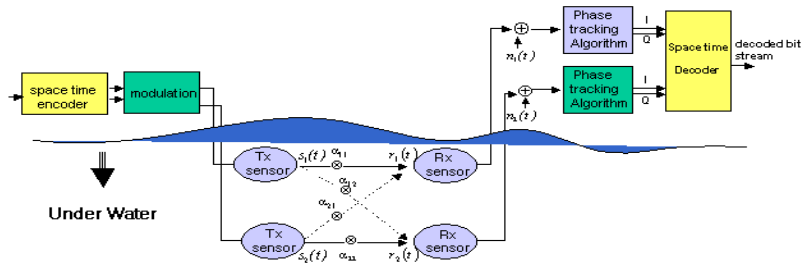


그림 2. STTC decoder block diagram for under-water communication

수중 통신에 적용될 수 있는 기존의 시공간 부호화 알고리즘은 크게 시공간 블록 부호(Space-Time Block code, STBC)와 시공간 트렐리스 부호(Space-Time Trellis code, STTC)로 나뉜다. 시공간 블록 부호는 전송 행렬  $g$ 에 의해서 정의된다. 아래 식 (2)는 두개의 안테나를 사용하였을 때 전송 행렬식이다.

$$g = \begin{bmatrix} s_0 & s_1 \\ -s_1^* & s_0^* \end{bmatrix} \quad (2)$$

첫 번째 안테나에서 전송된 신호는  $s_0$ 이고 두 번째 안테나에서 전송된 신호는  $s_1$ 이다. 다음 심벌 시점에서( $T$  후에) 신호( $-s_1^*$ )는 첫 번째 안테나에 전송되고 신호  $s_0^*$ 는 두 번째 안테나에서 전송된다. 여기서 \*는 복소 공액 연산자이다.  $h_0(t)$ 와  $h_1(t)$ 는 수중 채널 factor이며 수신 신호를 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_0 = r(t) = h_0 s_0 + h_1 s_1 + n_0 \quad (3)$$

$$r_1 = r(t+T) = -h_0 s_1^* + h_1 s_0^* + n_1 \quad (4)$$

여기서  $r_0$ 와  $r_1$ 는 시간  $t$ 와  $t+T$ 에서 수신된 신호이고,  $n_0$ 와  $n_1$ 는 수신기의 잡음과 간섭을 대표하는 복소 랜덤 변수이다. 수신된 신호는 복호를 위해는 maximum likelihood detector에서 보내지고, 아래 식과 같이 두개로 결합된 신호를 만든다.

$$\tilde{s}_0 = h_0 r_0 + h_1 r_1^* \quad (5)$$

$$\tilde{s}_1 = h_1 r_0 - h_0 r_1^* \quad (6)$$

따라서 수신 신호와 위의 식  $\tilde{s}_0, \tilde{s}_1$ 와의 거리를 구하여 짧은 거리를 가지는 신호를 선택한다. 시공간 블록 부호는 복호기가 단순한 반면, 원신호를 복원하기 위해서는 안테나 수에 따른 시간만큼 기다려야만 복호 가능하므로 전송 효율이 떨어지고 복호를 위해 각 신호간의 직교성을 유지하는 전송행렬을 생성하는 것이 어렵다. 따라서 1993년 Tarokh에 의해서 시공간 트렐리스 부호화 방식이 제안 되었는데 이는 기존의 트렐리스 부호화기를 이용하여 시공간 부복호기를 구성하였다.[1]

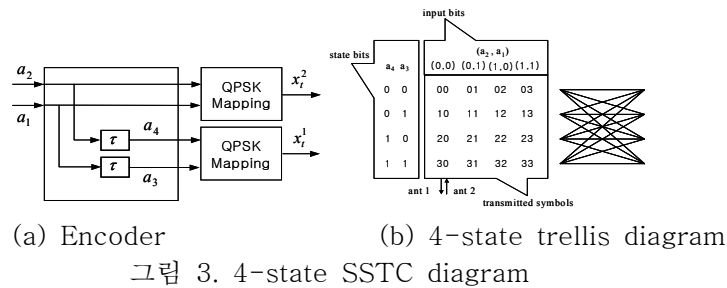


그림 3. 4-state SSTC diagram

그림 3(a)는 delay code를 이용한 부호화기를 나타내었으며, 변조방식은 QPSK 변조 방식을 사용하였으며, 두개의 송신 안테나를 사용하며 4상태에 대한 부호기와 트렐리스도는 그림 3(b)에 나타내었다. 부호 방정식에서  $a_1, a_2$ 는 입력 비트이고  $a_3, a_4$ 는 각각의 레지스터에 저장되는 비트이다. 신호를 QPSK로 변조하기 때문에 부호 방정식에서의 덧셈은 modulo 4로 실행되고, 구해진 심벌  $x_1^1$ 와  $x_1^2$ 는 첫 번째 안테나와 두 번째 안테나에 의해서 전송된 변조된 심벌이다.

$$x_1^1 = 2a_2(t) + a_1(t) \quad (7)$$

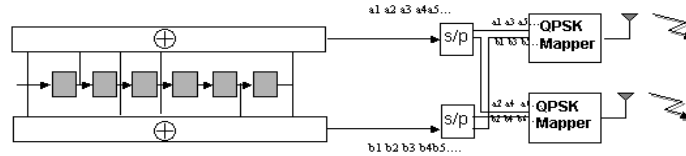
$$x_1^2 = 2a_4(t) + a_3(t) \quad (8)$$

그림 3에서 알 수 있듯이 복호방식은 maximum likelihood 방식에 기반을 둔 Viterbi 복호 알고리즘을 이용하여 복호를 한다. 시공간 블록 부호화 방식에 비해 복호기 구조는 복잡하나, 성능이 우수하고, 고속 전송에 적합하다. 트렐리스 부호화 방식의 성능은 복호시 트렐리스 구조에서의 유클리디언 거리에 기반을 두고 있으며, 유클리디언 거리를 넓히는 연구가 주로 행하여 졌는데 Tarokh 이후에 Blum, Baro 등에 의해 새로운 부호화 모델이 제안되었다. [3]

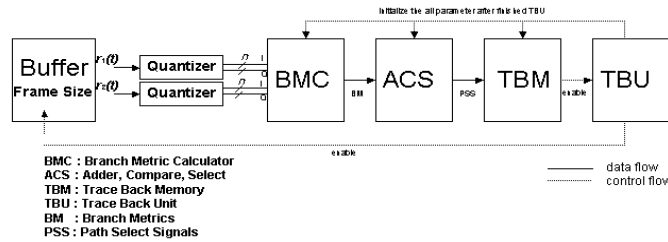
### 3. 컨벌루션 부호를 이용한 시공간 다이버시티 기법 제안

본 논문에서는 앞서 설명한 바와 같이 시공간 다이버시티 기법에 적용할 부호화 방법 중 시공간 트렐리스 부호화 방법이 시공간 블록 부호보다 성능 면이나 전송 속도 면에서 우수하므로 시공간 트렐리스 부호화 방법을 이용하여 시공간 다이버시티 기법을 수중 통신에 적용할 예정이다. 시공간 트렐리스 부호화 구성은 여러 연구자에 의해 제안되어져 왔으나, 본 논문에서는 컨벌루션 부호를 이용하여 시공간 트렐리스 부호기를 구성할 예정이다. 이유는 첫째로 기존의 수중 통신에 적용할 수 있는 컨벌루션 부호와 호환이 가능하며 둘째로 송수신 안테나의 수에 부호기 모델을 능동적으로 대처할 수 있다. 기존의 Tarokh 모델, Blum 모델, Baro 모델은 송신 안테나의 수에 따라 부호화기 구성이 제한이 되어 있으며, 또한 상태 수에 따라 부호화기 구성이 제한되어 있다. 그러나 컨벌루션 부호화기는 (N, K, M)에서 송신 안테나 수는 N과 관련이 있고, 상태 수는 M과 관련이 있어 이의 부호화기 모델은 송신 안테나의 수 및 상태수가 변하더라도

부호화기 구성이 간단하며 성능 또한 타 모델과 거의 같은 성능을 나타낸다. 그러나 컨벌루션 부호의 적용 시 복호 ambiguity가 발생할 수 있다. 복호 ambiguity란 복호시 같은 상태에서 2개 이상의 같은 값을 가지는 node 가 발생할 수 있는데, 이는 복호시 어느 노드에 있는 정보가 정확한 정보인지를 모르는 경우이다. 본 논문에서는 이러한 복호 ambiguity를 제거하기 위해 부호화기 구성을 변형시켜 해결할 것이다. 본 논문에서 구상하는 컨벌루션 부호화기를 이용한 시공간 다이버시티 송수신 구조는 아래 그림과 같다.



(a) Encoder model



(b) Decoder model

그림 4. Construction of SSTC using convolutional encoder

위의 그림 4(a)는 송수신 안테나를 각각 2개로 가정할 때, (2, 1, 7) 컨벌루션 부호기를 이용하여 시공간 다이버시티 부호기를 구성하였으며, 그림 4(b)는 이의 복호기의 내부 블록도이다. 송수신은 각 프레임 단위로 행해 질 것이며, 각 수신 안테나에서 수신된 신호는 그림 4(b)의 내부 블록도대로 복호를 할 것이다. 특히 부호기에서 decoding ambiguity를 제거하기 위해 각 부호기에서 나온 부호화된 비트를 변조 시킬 때 교대로 결합하게 하면 이를 제거 할 수 있다. Random하게 생성된 비트를 space time encoder를 사용하여 부호화 하는데, 본 논문에서는 통신에서 가장 많이 사용되는 convolution encoder를 사용하였다. 정보 신호는 space time encoder를 거치면서 부호화되고, 변조기를 통해서 QPSK로 변조된다.

변조된 신호인  $c_1(t)$ 와  $c_2(t)$ 는 각각의 송신 안테나를 통해서 동시에 전송된다. 변조 신호는 channel을 통과하면서 각각의 경로에 대한 fading 계수  $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ 가 각 경로에 따라 곱해지고 Gaussian noise  $n_1(t)$ 와  $n_2(t)$ 가 첨가된다.  $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ 와  $n_1(t)$ 와  $n_2(t)$ 는 독립적이라고 간주된다. 이렇게 채널을 통과한 신호를 수식적으로 표현한 것이 식(9)과 식(10)이다.

$$r_1(t) = a_{11}c_1(t) + a_{12}c_2(t) + n_1(t) \quad (9)$$

$$r_2(t) = a_{21}c_1(t) + a_{22}c_2(t) + n_2(t) \quad (10)$$

이 수신 신호가 각각의 수신 안테나에 수신되게 된다. 송신단은 크게 BMC, ACS, TBM 3부분으로 구성된다. BMC(Branch Metric Calculator)는 트렐리스에서 수신된 신호  $r_1(t), r_2(t)$ 와 branch code 사이의 branch metric을 계산하고, ACS (Add Compare Select)는 주어진 state에서 path metric과 branch metric을 가지고 누적 경로를 저장하여 다음 state의 path metric을 계산하고, 그 정보를 통해 TBM (Trace Back Memory)에서 trace back 과정으로 신호를 복호한다.

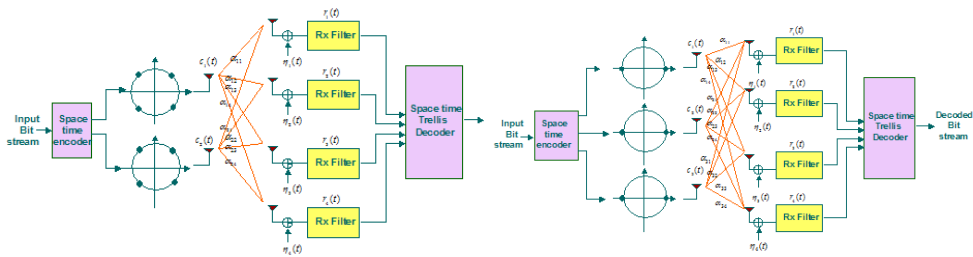
#### 4. 성능분석

본 논문에서는 두 가지 경우에 대해서 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다. 먼저 송신 안테나를 2개로 고정하고 수신 안테나는 1개에서 4개로 변화시키면서 시뮬레이션을 하였다. 이 경우 encoder는 (2,1,7) convolutional encoder를 사용하였고 QPSK 변조를 하였다.

두 번째로는 송신 안테나를 3개로 고정하고 수신 안테나는 위에서와 같이 1개에서 4개로 변화시키면서 그에 따른 성능 변화를 알아보았다. 이 경우 encoder는 (3,1,7) convolutional encoder를 사용하였고 BPSK 변조를 하였다.

송신안테나가 2개인 경우와 3개인 경우의 변조방식을 다르게 하였는데 QPSK 변조 방식이 BPSK 변조 방식에 비해 이론적으로는 성능이 좋지만 실제로는 성상 점에서 신호간의 거리가 2로써 같으므로 성능이 같게 나온다. 그러므로 시뮬레이션의 편리를 위해 변조 방식을 다르게 하였다.

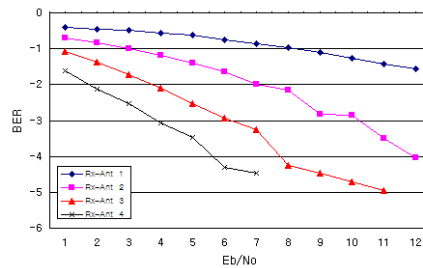
입력 신호는 frame size 130으로 전송되었고, noise은 gaussian noise을 사용하였는데, gaussian noise은 분산이  $\sigma^2$ 이고 평균이 0인 random 변수로 구성되었다. Fading은 rayleigh fading 중에서 frame size 동안 fading 계수  $\alpha$ 가 변하지 않는 slow fading 과 flat fading을 사용하였다.



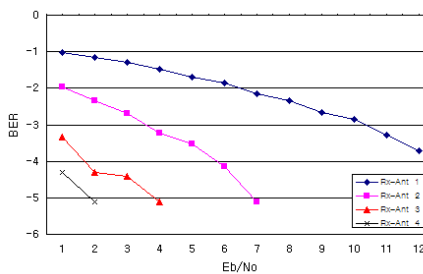
(a)(2,1,7)Convolution Encoder

(b)(3,1,7)Convolution Encoder

그림 5. 부호화기를 이용한 시공간 부호화 방식



(a) BER performance curve according to increase of Rx-Ant when Tx-Ant=2



(b) BER performance curve according to increase of Rx-Ant when Tx-Ant=3

그림 6. Performance comparison according to increase of Tx-Ant and Rx-Ant in the fading channel

컴퓨터 시뮬레이션은 그림 5에 있는 두 가지의 컨벌루션 부호화 방식 모델을 이용하였으며, 수중 통신의 채널 환경은 Rayleigh fading 환경이라 가정하였다.

그림 6(a)은 (2,1,7) 컨벌루션 부호에 송신 안테나 수를 2개로 고정 시키고 수신 안테나 수를 한개에서 네 개로 변화시킬 때의 성능 곡선을 나타낸다. 그림 6(b)은 (3,1,7) 컨벌루션 부호기에 송신 안테나 수는 3개로 고정하고 수신 안테나 수는 한개에서 네 개로 변화시킬 때의 성능 곡선을 나타낸다. 수신 안테나의 증가에 따라 약 1~3dB 정도의 성능 향상을 알 수 있다. 수신 안테나 수가 한개에서 두개로 증가할 때 성능 차이가 가장 큼을 알 수 있다.

## 5. 결론

수중 음향 통신은 대역이 제한되어 있고, 음파가 해저 및 수면에서 반사되어 신호가 수신된다는 특징 때문에 신뢰성이 높고 전송 속도가 빠른 디지털 통신의 구현이 어렵다. 이러한 수중 채널 환경에서 고속 데이터 통신을 하기 위한 효율적인 접근법은 송수신단에 여러 개의 안테나를 두어 시간적, 주파수적, 공간적으로 부가정보를 보내는 다이버시티 기법을 적용하는 방안이 있으며, 또한 고품질, 즉, 데이터의 신뢰성 향상을 위해서는 전송 채널 상에서 발생하는 오류를 정정하는 오류정정 방식의 적용이 필수적이다.

기존의 다중 안테나를 두어 전송하면서 컨벌루션 부호, 트렐리스 부호, 터보 부호등의 오류 정정 방식을 적용 시키는 것과는 다중 전송 안테나에 적절한 코딩 기술을 사용한 것으로 즉, 시공간 부호를 적용하여 수신기에서 다이버시티 효과를 제공하고 대역폭의 손실 없이 비부호화 시스템에서의 코딩 이득을 제공하기 위해서 시공간 부호를 기반으로 하는 다이버시티 기법을 고품질 고속 전송을 목표로 하는 수중 통신에 적용하는 것이 급선무이다.

따라서 본 논문에서는 space time diversity system을 convolution 부호를 이용하고 수중 통신 채널의 Rayleigh fading 채널이라 가정하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 성능을 평가하였다.

첫 번째 시뮬레이션은 (2,1,7) 컨벌루션 부호기를 이용하여 송신 안테나는 2개로 고정하고 수신 안테나는 1개에서 4개로 증가시키면서 성능을 분석하였고, 두 번째 시뮬레이션은 (3,1,7) 컨벌루션 부호기를 이용하여 송신 안테나는 3개로 고정하고 수신 안테나의 개수를 1개에서 4개로 증가시키면서 성능을 분석하였다.

그 결과 송신 안테나가 2개에서 3개로 증가하면 약 4 dB정도의 성능이 향상됨을 알 수 있고 수신 안테나가 증가할수록 성능이 증가함을 알 수 있었다. 수신 안테나 수를 한개에서 두개로 증가시킬 때 성능의 차이가 가장 크게 나타나는데, 그 이유는 두개 이상일 때 수신 다이버시티 효과가 나타나기 때문이다.

## 참고문헌

- [1] A.F.Naguib, V.Tarokh, N.Seshadri, and A.R. Calderbank, "Space-time coding modem for high-data-rate wireless communications", *IEEE J. Select. Commun.*, vol. 16, No. 8, Oct. 1988, pp.1457-1478.
- [2] V.Tarokh, N.Seshadri, and A.R. Calderbank, "Space-time coded for high data rate wireless communication: Performance criteria and code construction ", *IEEE Trans. on Inform Theory*, Mar. , 1998, pp.744-764.
- [3] S.Baro, G.Bauch, and A.Hans, "Improved code for space-time trellis coded modulation ", *IEEE Communication Letter*, vol. 4, No. 1, 2000.
- [4] A.R.Hammons, H.E.Gammal, "On the theory of space-time codes for PSK modulation", *IEEE Trans. on Inform. Theory*, vol. 46, No. 2, Mar. 2000, pp.524-542.
- [5] A.Papoulis, *Probability, Random variables, and Stochastic Process*, McGraw-Hill, 1991.
- [6] J.G.Proakis, *Digital Communications*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill,1989.