

IT COOKBOOK

한빛교재 시리즈 319



통신공학 전공자와 엔지니어를 위한 입문서



디지털 통신 시스템

정호영, 임승각 공저

Digital Communication Systems

 한빛미디어
Hanbit Media, Inc.


연동관계 해답은
제공하지 않습니다

디지털 통신 시스템

Digital Communication System

디지털 통신 시스템의 기본 구성 요소 _01

통신 채널 모델링 _02

핵심요약

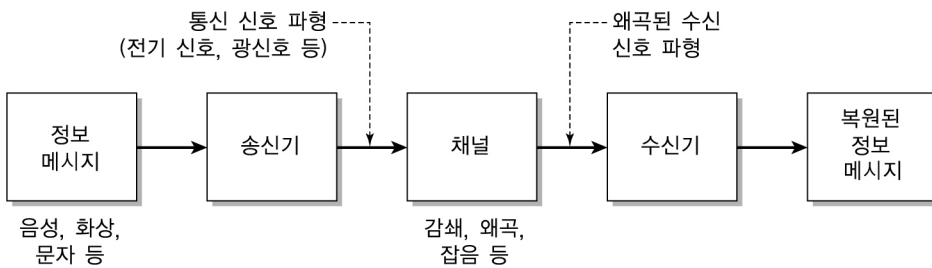
참고문헌

학습목표

- 디지털 통신 시스템의 기본 구성 요소를 살펴보고 각 구성 요소의 기본 기능을 알아본다.
- 디지털 통신 시스템을 디지털 영역과 아날로그 영역으로 구분하여 전체적인 시스템의 동작 형태를 살펴본다.
- 통신 채널을 수학적으로 모델링하여 통신 시스템 설계에 이용할 수 있도록 하고 대표적인 채널 모델의 예를 알아본다.

통신 시스템(communication system)은 정보 메시지를 송신기에서 수신기로 안전하고 빠르게 전달하는 데 궁극적인 목적이 있다. 대체로 송신기에서 발생하는 메시지는 전기 신호가 아닌 음성, 화상, 문자 등의 정보다. 하지만 이 메시지는 시간상으로 변하는 전기 신호 혹은 광신호 등으로 변환되어 전송되며, 수신기에서는 채널을 통과하면서 감쇄, 왜곡, 잡음 등으로 변질된 수신 신호를 원래의 전송 메시지 형태로 복원한다.

송신기와 수신기는 서로 멀리 떨어져 있는 것이 일반적이며, [그림 1-1]과 같이 유·무선 통신 선로인 채널로 연결된다. 채널에는 여러 가지 형태가 있으며, 대표적인 형태로 자유 공간상의 무선 전파 채널, 동축 케이블, 전화선, 광케이블 등과 같은 유선 채널이 있다. 채널에서는 전송 신호가 왜곡되거나 잡음 등으로 인해 통신 품질이 떨어지게 마련이므로, 신호 왜곡을 피하고 잡음의 영향을 최소화해야 한다. 그러기 위해서는 송신기에서 전송한 정보 메시지가 수신기에서 원 상태로 복원될 수 있게 통신 시스템의 송신기와 수신기를 잘 설계해야 한다.



[그림 1-1] 통신 시스템의 기본 구성

음성, 화상, 문자 등의 정보 메시지는 채널로 직접 전송할 수 없는 경우가 대부분이다. 송신기에서는 이러한 정보 메시지를 채널로 전송할 수 있게 통신 신호 파형으로 변환한다. 이를 위해 송신기에서는 디지털 신호처리, 여파(filtering) 및 변조 등의 신호처리 과정을 수행한다. 특별히 전송 채널의 특성에 적합한 형태로 송신 신호 특성을 바꾸어 효율적으로 메시지가 전송될 수 있게 하는 과정을 변조(modulation)라고 하며, 이 과정은 통신 시스템의 핵심 역할을 한다.

디지털 통신 방식의 송신기에는 전송 메시지가 정확히(reliably) 수신기에 전달될 수 있게 하는 채널 부호 기능이 있다. 이는 전송 채널에서 발생한 오류(error)를 검출하여 정정할 수 있게 한다. 이 밖에도 프라이버시를 보장하기 위해 정보 메시지를 암호화하거나 압축하는 등의 중요한 디지털 신호처리 기능도 함께 수행한다.

송신기에서 전송된 통신 신호가 채널을 거치는 동안 잡음이 더해지고, 신호 자체가 왜곡되거나 외부에서 가한 방해 신호 등으로 송신 신호와는 다르게 변질된 형태로 수신기에 입력된다. 수신기는 기본적으로 송신기의 역작용을 하지만 채널에서 변질된 수신 신호를 원 신호로 복원하기 위한 여러 가지 기능을 수행한다. 그 중 가장 중요한 과정이 **복조(demodulation)**다. 물론 디지털 통신 방식의 수신기에서도 암호화된 정보 메시지를 해제하고 압축을 풀며 채널 복호를 수행하는 등 디지털 신호처리를 하여 전송할 정보 메시지가 정확하고 빠르게 사용자에게 전달될 수 있게 한다.

정보 메시지는 음성과 같은 아날로그 형태일 수도 있고 문자와 같은 디지털 형태일 수도 있다. 디지털 통신 시스템은 아날로그 형태의 정보 메시지를 A/D 변환(analog to digital conversion)하여 디지털 형태의 부호(code)로 만든 후 여러 가지 디지털 신호처리 과정을 거쳐 펄스 형태의 신호 파형으로 전송한다. 또한 정보 메시지가 디지털 형태의 문자라고 해도 부호화(encoding) 등의 신호처리를 하며 채널로 전송되는 펄스 형태의 신호 파형은 고주파의 대역 통과 신호(bandpass signal)로 변환되어 전송되는 것이 일반적이다.

아날로그 통신 방식과 비교하면 디지털 통신 방식은 다음과 같은 장점이 있다.

첫째, 디지털 신호는 아날로그 신호보다 왜곡(distortion)이나 간섭(interference)의 영향을 적게 받는다. 기본적으로 디지털 신호는 두 가지 상태(0 혹은 1) 중 하나의 상태에서 동작하며 한 상태에서 다른 상태로 변질되려면 왜곡이나 간섭의 정도가 커야 하기 때문이다. 더욱이 전송 도중 왜곡이 시작된 디지털 펄스 신호는 쉽게 원 신호로 재생할 수 있기 때문에 통신 장애 요인에 대해 아날로그 통신 방식보다 디지털 통신 방식이 더 강한 특성을 보인다.

둘째, 디지털 통신 방식에서는 정보 메시지를 디지털 형태의 부호로 변환하기 때문에 다양한 디지털 신호처리 기법을 사용할 수 있다. 아날로그 신호에 왜곡이 발생하면 원 신호로 복원하는 것은 거의 불가능하지만, 디지털 신호에 채널 부호(channel coding)와 같은 신호처리를 하면 오류를 제거하고 원 정보 메시지를 복원할 수 있다. 이 밖에도 프라이버시 보호를 위한 암호화(encryption)나 전송 데이터를 압축(data compression)하는 등의 동작은 디지털 통신 시스템에서 중요하게 사용하는 디지털 신호처리 기법이다.

셋째, 디지털 회로는 아날로그 회로보다 동작이 정확하고 그 해석이 명확할 뿐만 아니라 마이크로 프로세서를 이용해 디지털 회로를 구현하기 때문에 간단하면서도 값이 저렴한 시스템을 만들 수 있다. 반대로 같은 기능을 하는 아날로그 회로는 구현할 수 없거나 어마어마하게 복잡한

하드웨어가 수반되어야 한다.

마지막으로 정보 메시지를 발생시키는 최근의 정보 기기 자체가 컴퓨터 대부분에 상응하는 디지털 단말기라는 것이다. 디지털 단말기에서 발생하는 정보 메시지를 디지털 통신 방식으로 전송하는 것은 가장 자연스러운 전송 방법이 될 것이다.

물론 디지털 통신 방식이 갖는 단점도 여러 가지 존재한다. 우선 디지털 통신 방식은 아날로그 통신 방식보다 주파수 대역을 더 많이 차지한다. 예를 들어 일반적인 AM 변조 통신 방식이 10 kHz, 단측파대 AM 통신 방식이 5 kHz의 대역폭으로 통신하고 있으나 디지털 통신 방식을 이용하면 이보다 4배 많은 20 kHz 이상의 대역폭이 필요하다. 또한 디지털 통신 시스템의 송신기와 수신기는 서로 동기(synchronization)를 맞춰야 하는 문제가 있다. 일반적으로 동기 기술은 복잡하기 때문에 동기 회로 또한 복잡하고 비용이 많이 드는 단점이 있다.

이처럼 디지털 통신 시스템이 갖는 몇 가지 단점에도 불구하고 통신 산업 전 분야에 걸쳐 디지털 통신 방식이 사용되고 있는 이유는 아날로그 통신 방식보다 장점이 많기 때문이다. 이를 증명하기 위해 이 책에서는 디지털 통신 방식의 기본 동작 원리는 물론 다양한 해석 방법을 통해 디지털 통신 시스템의 기본 구성 요소를 심도 있게 설명한다.

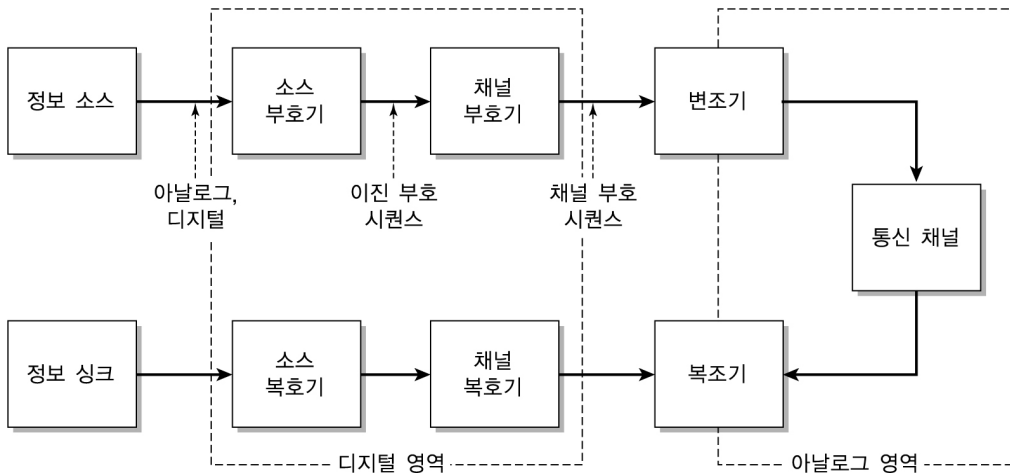
1.1 디지털 통신 시스템의 기본 구성 요소

[그림 1-2]는 디지털 통신 시스템을 구성하는 기본 구성 요소를 블록도로 나타낸 것이다. 정보 소스에서 발생하는 정보 메시지는 음성 신호와 같이 아날로그 형태가 될 수도 있고 컴퓨터에서 출력되는 문자 메시지와 같이 디지털 형태가 될 수도 있다. 아날로그 형태의 정보 메시지는 A/D 변환과 부호화를 통해서 이진 부호 시퀀스로 변환되며 디지털 형태의 정보 메시지는 부호화 과정만을 거친다. 이처럼 아날로그 혹은 디지털 정보 메시지를 디지털 부호 시퀀스로 변환하는 과정을 **소스 부호화(source coding)**라고 한다. 소스 부호화는 부호화된 데이터를 압축하거나 암호화를 하는 등의 디지털 신호처리 과정을 통칭한다.

소스 부호기에서 출력된 이진 부호 시퀀스를 정보 시퀀스(information sequence)라고 하며 채널 부호기에 입력된다. 채널 부호(channel code)에는 채널에서 발생한 오류(error)를 검출(detection)하고 정정(correction)하는 기능이 있기 때문에 오류 정정 부호(error correction code)라고도 한다.

채널 부호기(channel encoder)는 특별하게 정해진 규칙(채널 부호 알고리즘이라고 한다)에 따라 전송할 정보 시퀀스에 리던던시(redundancy)를 추가하고, 수신기의 채널 복호기(channel decoder)는 리던던시를 이용해 채널 오류를 검출하고 정정한다. 따라서 채널 부호를 사용하여 채널 오류를 제거함으로써 통신 시스템의 신뢰도(reliability)를 높일 수 있다. 채널 부호기에서 추가하는 리던던시를 패리티 비트라고도 한다.

채널 부호기에서 출력된 채널 부호 시퀀스는 디지털 변조기(modulator)를 통해 통신 신호 파형(signal waveform)으로 변환되어 채널을 통해 전송된다. 따라서 변조기는 송신기와 채널 사이의 인터페이스 역할을 한다고 볼 수 있다. 수신기 역시 채널을 통해 수신된 수신 신호 파형을 수신 비트 시퀀스로 복원하는 복조기(demodulator)가 채널과 수신기의 인터페이스 역할을 한다고 볼 수 있다. 일반적으로 통신은 양방향으로 이루어지므로 변조기와 복조기를 하나의 모듈로 구성한다. 이를 **모뎀(modem, modulator/demodulator)**이라고 한다. 디지털 펄스 파형을 통신 신호로 사용하는 일부 통신 시스템을 제외한 거의 모든 디지털 통신 시스템에서 변조기로 출력된 통신 신호는 고주파의 아날로그 파형이므로 모뎀 이후의 통신 블록은 [그림 1-2]에 나타난 것처럼 아날로그 영역임을 주의해야 한다.



[그림 1-2] 디지털 통신 시스템의 기본 구성 요소

통신 채널(communication channel)은 송신기에서 수신기로 통신 신호를 전달할 때 사용하는 물리적 매체를 통칭하는 것으로 크게 무선 채널(wireless channel)과 유선 채널(wired channel)로 나눌 수 있다. 무선 공간을 통해 통신 신호를 전파(propagation)하는 무선 채널에는 이동통신 채널, 위성 통신 채널 등이 있으며, 유선 전화 채널이나 광케이블 혹은 동축 케이블을 이용하는 CATV 채널 등이 유선 채널의 대표적인 예이다. 하지만 유선 채널이든 무선 채널이든 관계없이 모든 통신 채널의 기본적인 특징은 전송되는 통신 신호에 반드시 랜덤 잡음이나 간섭(interference)과 같은 통신 방해 요소가 부가된다는 점이다.

수신기는 기본적으로 채널에서 변형된 수신 신호를 다루기 때문에 송신기보다 더 복잡하고 다루기 어렵다. 채널을 통해 수신된 수신 신호는 복조기에서 디지털 시퀀스로 바뀌며 변조기의 입력이 이진 부호라고 해도 복조기의 출력이 반드시 이진 부호일 필요는 없다. 복조기가 이진 부호 시퀀스를 출력하면 **경판정(hard decision)** 복조라고 하고 비이진(non-binary) 부호 시퀀스를 출력하면 **연판정(soft decision)** 복조라고 한다. 복조기를 통과한 디지털 시퀀스는 채널 복호기를 거쳐 채널 오류를 정정한 후 정보 시퀀스로 바뀌게 되며 이는 다시 소스 복호기에서 원래의 소스 메시지로 복원된다. 물론 원래의 소스 메시지가 아날로그 형태일 경우에는 D/A 변환기(digital to analog converter)를 통해 아날로그 소스 신호로 복원된다.

1.2 통신 채널 모델링

디지털 통신 시스템을 설계할 때 통신 채널의 전송 특성 중 중요한 것을 이용해 수학적으로 채널을 모델링하는 것은 여러 가지 면에서 유용하고 편리하다. 통신 채널의 수학적 모델은 디지털 통신 시스템의 구성 요소를 어떻게 볼 것인가에 따라 여러 가지 형태로 정의할 수 있다. [그림 1-3]은 통신 채널을 보는 관점에 따라 세 가지 형태로 나누어 정의하고 그 범위를 나타낸 것이다.

(1) 데이터 통신 채널

데이터 통신망과 관련된 전송 데이터 흐름을 다루는 이론에서는 송·수신기 내부의 자세한 기능이나 신호의 변환, 처리 등에 관심을 두지 않으므로 [그림 1-3]과 같이 송·수신기와 채널을 모두 포함하여 **데이터 통신 채널**로 모델링할 수 있다.

(2) 이산 채널

이산 채널(discrete channel)은 채널과 모뎀까지 포함하여 정의하고 있는데 이 경우 채널의 입출력 신호 형태는 디지털 형태의 이산 시퀀스임을 알 수 있다. 이때 이산 채널에서 발생하는 잡음이나 기타 여러 가지 형태의 간섭에 의해 통신 신호가 변질되는 것은 채널 오류(channel error)로 나타난다. 이산 채널을 마주하고 있는 채널 부호기와 채널 복호기에서는 이러한 채널 오류를 제어하는 역할을 하게 되어 이산 채널을 종종 코딩 채널(coding channel) 혹은 부호 채널이라고 하기도 한다.

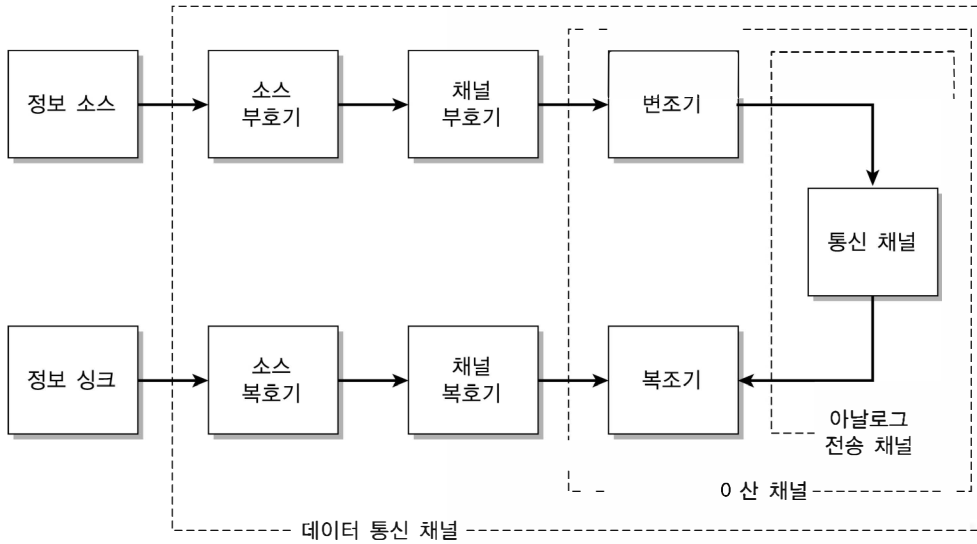
(3) 아날로그 전송 채널

아날로그 전송 채널은 변조기 이후부터 복조기 이전까지를 의미하는데 실제 물리적 유무선 선로를 따라 정보 메시지가 실린 연속적인 아날로그 신호 파형이 전달되며 잡음이 부가되는 채널로 정의된다. 아날로그 전송채널로는 트위스트 와이어¹, 동축 케이블(coaxial cable), 광섬유 케이블(optical fiber), 무선 전파(radio wave) 채널 등을 들 수 있다.

트위스트 와이어는 두 가닥의 구리선을 꼬아 만든 전선으로, 가정 전화기에 연결된 선을 의미한다. 이는 용량성 및 유도성 잡음의 영향을 줄이기 위해 만든 것으로 주로 낮은 주파수의 통신 및 저속의 데이터 통신에 사용된다. 허용 대역폭이 거리에 따라 많이 감소하므로 짧은 거리는 MHz 대 주파수가 가능하나 장거리는 KHz 대 주파수로 한정된다. 이를 보완하여 대역폭을 크게 늘린 것이 동축 케이블이며 광섬유 케이블은 이보다 훨씬 더 넓은 채널 대역폭을 가지며 잡음에 강하다.

무선 채널의 경우 1 MHz 영역의 라디오 주파수(Radio Frequency, RF) 대역의 통신에서는 수평선 너머까지 수신할 수 있다. 그러나 500 MHz 영역의 UHF 주파수대는 직진성 때문에 송수신기가 서로 보이는 상태 (Line-Of-Sight, LOS)가 되어야 통신이 가능하다. 따라서 안테나는 안테나 사이의 장애물(산이나 건물)을 피할 수 있게 세워야 한다.

1 트위스트 와이어: 꼬아 만든 전선으로 가정 전화기에 연결된 선 등을 의미함.

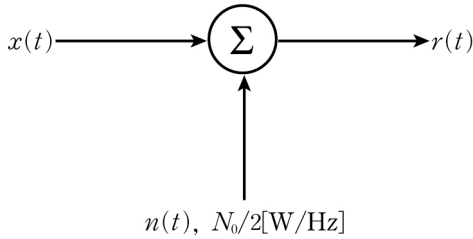


[그림 1-3] 통신 채널의 범위

본 절에서는 통신 채널의 수학적 모델 중에서 아날로그 전송 채널의 대표적인 모델인 부가 백색 가우시안 잡음 채널과 이산 채널의 대표적인 모델인 이진 대칭 채널을 살펴본다.

1.2.1 부가 백색 가우시안 잡음 채널

아날로그 전송 채널의 모델 중 가장 간단하고 대표적인 형태는 AWGN(Additive White Gaussian Noise, 부가 백색 가우시안 잡음) 채널이다. [그림 1-4]는 부가 백색 가우시안 채널을 수학적으로 모델링하여 나타낸 것으로 $x(t)$ 는 송신 신호이고 $r(t)$ 는 수신 신호이며 $n(t)$ 는 가우시안 잡음 랜덤 과정(Gaussian noise random process)을 의미한다. 수신기의 전자 부품이나 증폭기 등에서 발생하는 열잡음은 모두 가우시안 랜덤 잡음 과정으로 모델링할 수 있는데, 잡음의 스펙트럼 성분이 전 주파수 영역에 걸쳐 일정하게 분포(백색 특성이라고 한다)하고 송신 신호에 더해져서 수신 신호를 형성하기 때문에 부가 백색 가우시안 잡음 채널이라고 부른다. 백색 가우시안 잡음은 통계적으로 다루기 쉬운 특성이 있으며 가장 기본적인 잡음이기 때문에 AWGN 채널은 디지털 통신 시스템을 설계할 때 가장 널리 사용된다.



[그림 1-4] 부가 백색 가우시안 채널 모델

1.2.2 이진 대칭 채널

[그림 1-5]는 이산 채널의 대표적 모델로, 이진 대칭 채널(binary symmetric channel, BSC)을 나타낸 것이다. 이진 대칭 채널에는 이진 송신 심벌($X=0, X=1$)과 이진 수신 심벌($Y=0, Y=1$)이 있는데, 이진 송신 심벌의 발생확률은 식 (1.1)과 같다. 이진 송신 심벌이 랜덤하면 $\alpha=0.5$ 가 되므로, 두 이진 송신 심벌의 발생확률은 같아진다.

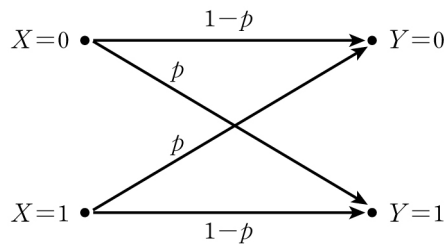
$$P(X=0) = \alpha, P(X=1) = 1 - \alpha \quad (1.1)$$

여기에서 심벌 천이확률은 식 (1.2), 식 (1.3)과 같이 정의된다.

$$P(Y=1/X=0) = P(Y=0/X=1) = p \quad (1.2)$$

$$P(Y=0/X=0) = P(Y=1/X=1) = 1 - p \quad (1.3)$$

심벌 천이확률은 채널 오류가 발생할 확률을 의미한다. 위 식에서 채널 오류확률은 p 가 되며, 오류 없이 수신될 확률은 $1-p$ 가 된다. 한편, 채널 내부의 복조기는 복조 결과를 0과 1의 이진 값으로 판정하여 출력하므로 이진 대칭 채널에서는 경판정(hard decision) 복조가 전제되어 있음을 알 수 있다.



[그림 1-5] 이진 대칭 채널

01. 통신 시스템의 목적

송신기에서 수신기로 정보 메시지를 안전하고 빠르게 전달하는 데 있다. 채널에서 발생하는 신호 왜곡을 피하고 잡음의 영향을 최소화하여 송신기에서 전송한 정보 메시지가 수신기에서 원 상태로 복원되려면 통신 시스템의 송신기와 수신기가 잘 설계되어야 한다.

02. 디지털 통신 시스템의 기본 구성 요소

디지털 통신 시스템은 크게 정보 소스, 소스 부·복호기, 채널 부·복호기, 변·복조기, 통신 채널 및 정보 싱크로 구성된다. 정보 소스의 메시지는 아날로그 혹은 디지털 형태가 될 수 있으며, 소스 부호기에서는 A/D 변환, 데이터 압축 및 암호화 등을 수행하고 채널 부·복호기에서는 채널 오류를 검출하고 정정한다. 또한 변·복조 과정을 수행하는 모뎀을 통해 신호를 통신 채널에 전파시키고 수신한다.

03. 경판정 복조와 연판정 복조

채널을 통해 수신된 수신 신호는 복조기에서 디지털 시퀀스로 바뀌는데 복조기가 이진 부호 시퀀스를 출력하면 경판정(hard decision) 복조라고 하고 비이진(non-binary) 부호 시퀀스를 출력하면 연판정(soft decision) 복조라고 한다.

04. 이산 채널(discrete channel) 모델

물리적인 채널과 모뎀까지 포함하여 하나의 채널로 모델링한 것으로 이 경우 채널의 입출력 신호 형태가 이산 시퀀스가 된다. 채널에서 발생하는 잡음이나 기타 여러 가지 형태의 간섭들에 의해 통신 신호가 변질되는 것이 이산 채널에서는 채널 오류(channel error)로 나타나며 이산 채널을 코딩 채널(coding channel)로 부르기도 한다.

05. AWGN 채널(부가 백색 가우시안 잡음 채널)

아날로그 전송 채널의 모델 중 가장 간단한 형태의 채널 모델로 이 채널에서 부가되는 잡음은 가우시안 잡음 과정으로 스펙트럼 성분이 전 주파수 영역에 걸쳐 일정하게 분포(백색 특성이라고 한다)하고 송신 신호에 더해져서 수신 신호를 형성하기 때문에 부가 백색 가우시안 잡음 채널이라고 부른다.

06. 이진 대칭 채널(BSC)

이산 채널의 대표적인 모델로 이진 송신 심벌 ($X=0, X=1$)과 이진 수신 심벌 ($Y=0, Y=1$)이 존재하며, 채널 내부의 복조기는 복조 결과를 0과 1의 이진 값으로 판정하여 출력하므로 경관정 복조가 전제되어 있다고 볼 수 있다.

- [01] J. G. Proakis, *Digital Communications*, fifth edition, McGraw-Hill, 2000.
- [02] M. S. Roden, *Analog and Digital Communication Systems*, third edition, Prentice-Hall, 1991.
- [03] 김종일, 정호영, 김남용, 김한중, *디지털 통신이론*, 경문사, 1999.
- [04] K. Sam Shanmugam, *Digital and Analog Communication Systems*, John Wiley & Sons, Inc., 1979.
- [05] Upamanyu Madhow, *Fundamentals of Digital Communication*, Cambridge, 2008.
- [06] Fuqin Xiong, *Digital Modulation Techniques*, Artech House, 2000.