

Rayleigh 페이딩하에서 pragmatic 부호와 TCM의 성능에 관한 연구

(A Study on Performance of Pramatic Coding and TCM in Rayleigh Fading Environment)

강민정*, 방성일**, 진년강**

요 약

본 논문에서는 디지털 무선통신을 위한 전송방식으로 집합분할에 의한 TCM/M-PSK와 pragmatic 부호에 의한 M 진 PSK 시스템을 실현하였다. 전송채널에 AWGN과 Rayleigh 페이딩이 존재하는 경우 시스템의 성능을 오울 관점에서 해석하였으며, 이를 위한 오울식을 유도하여 제시하였다.

그 결과 Rayleigh 페이딩이 많은 영향을 미치는 이동무선통신에서 pragmatic 부호에 의한 방식은 부호화하지 않고 곧바로 전송되는 정보데이터에 의해 발생하는 병렬쌍때문에 시스템 전체의 성능을 저하시키게 됨을 알 수 있었다. 하지만 AWGN만 고려하는 무선통신에서 pragmatic 방식은 단일 부호기/복호기를 사용하므로 시스템이 간단해지는 장점이 있다.

-ABSTRACT-

In this paper, a model of TCM/M-PSK with set partitioning and a model of the combined M-ary PSK system with pragmatic coding for digital radio communication are realized. The equations of error probability for TCM/M-PSK system and the combined M-ary PSK system with pragmatic coding are derived on the conditions of the Rayleigh fading with the AWGN.

It is found that the combined M-ary PSK system with pragmatic coding in the AWGN channel can not be applied to the fading channel since uncoded bits cause parallel : parallel paths in the trellis diagram to degrade the performance of the system. However, the use of pragmatic coding in the AWGN channel could simplify the given system since single convolutional encoder / decoder is required.

I. 서 론

오늘날의 통신시스템은 제한된 대역폭내에서 보다 많은 가입자를 수용해야 하므로 높은 데이터 전송율을 전송할 수 있는 변조방식이 필요하다. 그러나 변조방식의 레벨을 증가시키면 시스템의 성능을 유지하기 위해 더 많은 신호전력이 필요하다.

이에 대한 개선책으로 무선통신 시스템의 신뢰도를 개선할 수 있는 다치진폭 / 위상 변조방식과 convolutional 부호기가 결합한 TCM(trellis coded modulation) 방식이 제안되었다.⁽¹⁾ 이와같은 TCM 방식을 사용하면 디지털 전송 시스템의 전송 전력이나 데이터의 전송 대역폭을 증가시키지 않고도 무선 통신 채널에서 발생하는 잡음과 간섭 등에 대한 내성 (immunity)을 향상시킬 수 있다. 또한 TCM 방식은 복호 방법으로 Viterbi 알고리즘에 의한 연판정(soft

*한국통신

**단국대학교 공과대학 전자공학과

decision) 복호를 사용해야 한다. 연관성 복호는 경관정(hard decision) 복호법에 비해 약 3dB 정도의 우수한 성능을 가지지만 훨씬 많은 계산이 요구되므로 DSP의 구현이 필수적이다.⁽²⁾

본 논문에서는 대역폭의 증가없이 시스템의 신뢰도를 향상시킬 수 있는 디지털 무선통신을 위한 전송 방식으로 집합분할에 의한 TCM과 pragmatic 부호에 의한 M 진 PSK 시스템을 실현하였다. 그리고 AWGN과 Rayleigh 페이딩이 존재하는 이동무선통신에서 위 두 시스템의 성능을 오울관점에서 해석하였으며, 이를위한 오울식을 유도하여 제시하였다. 또한 전송채널 특성이 AWGN만 고려할 수 있는 고정무선통신인 경우에 대해서도 각 시스템의 성능을 조사하여 그 결과를 제시하였다.

II. 집합분할에 의한 TCM

Trellis 부호변조와 같은 새로운 개념의 필수적인 내용은 부호화된 신호집합, $\{a_n\}$ 을 이루는 신호 인접사이의 거리, $d_j(j=0, 1, 2, \dots)$ 를 최소화하여 부호이득의 향상을 도모하는 것이다. 왜냐하면, d_j 가 커지면 커질수록 수신단에서 신호를 복호할때 발생하는 오류가 작아지기 때문이다. 디지털 전송시스템의 오류성능을 개선하기 위해 $R=k/(k+1)$ 인 trellis 부호기를 사용하면 채널의 신호집합은 $(k+1)$ 비트로 확장하게 된다.

이와 같이 확장된 부호어는 이에 대응하는 변조방식과 채널특성에 적합하도록 매핑하여야 한다. Ungerboeck⁽¹⁾이 제안한 집합분할에 의한 매핑방법은 가능한한 신호간의 자유거리가 최대가 되도록 하기 위하여 채널신호들의 부집합간의 거리를 증가시키는 방법으로 신호를 매핑하는 것을 말하며 대역이 제한된 채널에서 효과적인 부호화 방법으로 이용되고 있다. 즉, M 진 신호집합들이 $M/2, M/4, M/8$ 의 크기를 갖도록 부집합으로 연속적으로 분할하여 부집합 사이의 거리가 $d_{min}^{(1)}, d_{min}^{(2)}, d_{min}^{(3)}$ 과 같이 점차적으로 큰 거리를 갖도록 매핑하는 것이다.

부호화된 임의의 데이터열의 시점을 L이라고 가정할 때 그림1(a)는 병렬천이 ($L=1$) 상태를 나타내는 trellis 상태도이며, 그림1(b)는 부호화된 데이터 sequence 간의 최소 유클리디안 거리의 합을 나타낸 것이다. 이와같이 최소 유클리디안 거리는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$d^2_{tree} = d^2(A, B) + \dots + d^2(C, D) \quad (1)$$

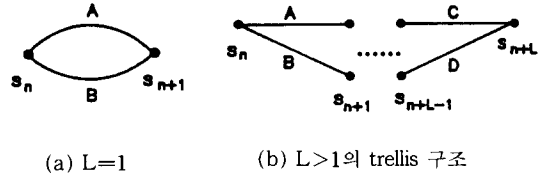


그림 1. TCM 시스템의 trellis 구조
Fig. 1. Trellis structure of TCM system.

다치진폭/위상 시스템의 한 예로 2 [bits/T]의 정보 데이터를 trellis 부호화 한 8-PSK의 집합분할방법은 그림2에서 보는 바와 같으며, 매핑된 채널신호를 분할하는 규칙을 설명하면 다음과 같다. 여기서 TCM/8-PSK 시스템을 선택한 이유는 집합분할방법으로 설계한 TCM 방식중에서 가장 최적의 시스템으로 제시되었기 때문이다.^(1,2)

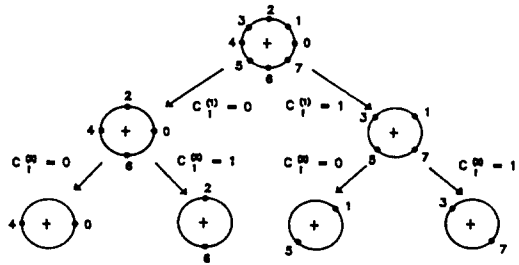


그림 2. TCM/8-PSK의 집합분할 방법
Fig. 2. Set partitioning for the TCM/8-PSK.

- (1) Trellis 부호화한 8-PSK 신호의 격자점은 동일한 발생확률을 갖는다고 가정하고 모든 격자점은 서로 대칭이 되도록 한다.
- (2) 채널로 매핑된 신호집합으로 부터 시작되는 첫번째 분할은 주어진 신호집합으로 부터 새로운 부집합 $C_1^{(1)}$ 을 만드는데 이때 각 집합의 신호격자사이의 거리는 최대가 되도록 한다.
- (3) (2)의 방법에 의해 이루어진 부집합, $C_1^{(1)}$ 을 각각 재분할하여 새로운 부집합 $C_2^{(2)}$ 들을 만든다.
- (4) 신호집합의 구성요소인 신호점이 1개가 될때 까지 (3)의 과정을 반복한다.

수신측에서의 trellis 부호복조에 대한 연관성 Viterbi 알고리즘은 다음과 같다. 수신측의 trellis 상태도에서 각 가지는 trellis 부호화된 신호점에 대응하므로 수신된 신호와 부집합 내의 신호점을 비교하

여 최소거리를 갖는 자승 유클리디안 거리를 평가한다. 여기서 최소거리를 갖는 경로 평가량은 trellis 상태도 상의 각 상태에 합류하는 2^k 개의 가지를 수신 계열의 대응요소와 비교해서 구한 총 Hamming 거리이다.

이와 같이 trellis 부호화한 M 진 PSK 시스템의 성능을 평가하기 위한 파라미터는 d_{free} 와 이 값을 갖는 경로의 수이다. TCM / 8-PSK의 출력은 다치레벨을 갖는 파형이므로 trellis 상태도에서 d_{free} 를 갖는 경로의 수를 구하기 위해서는 각 상태에 대한 모든 경로를 조사하여야 한다. 만약 TCM / 8-PSK 시스템을 위한 부호기의 부호율이 $R=2/3$ 이고, 기억소자의 수가 $m=4$ 인 Ungerboeck⁽⁹⁾의 convolutional 부호기를 고찰해 보자. 이와같은 trellis 부호기의 자유 유클리디안 거리를 구하면 $d_{free}=2.274$ 를 가지며, 이 값을 갖는 모든 경로쌍을 표시하면 그림3에서 보는 바와 같다.

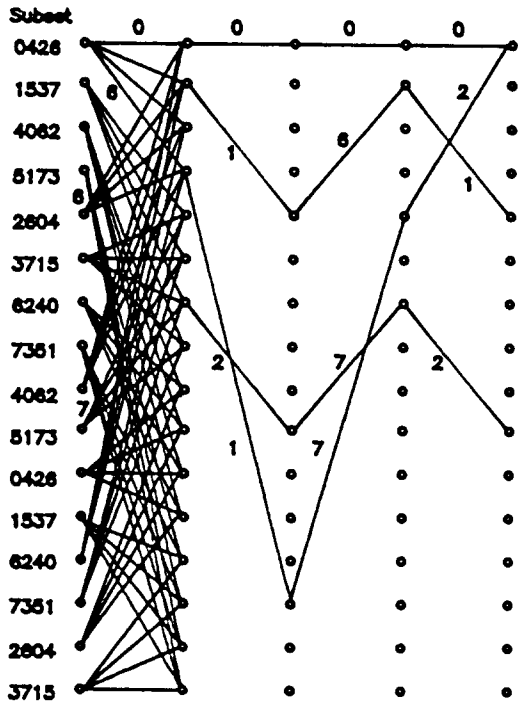


그림 3. $d_{free}=2.274$ 를 갖는 경로쌍($R=2/3, m=4$)
Fig. 3. Pair of paths with $d_{free}=2.274$ ($R=2/3, m=4$).

III. Pragmatic 부호에 의한 TCM

집합분할에 의한 TCM은 convolutional 부호에 여러가지 변조방식을 결합한 최적의 부호변조시스템을 실현하여 정보 데이터의 전송효율을 향상시키는 방법이다. 여기서 최적의 부호변조시스템이란 부호기 출력의 신호집합 사이에 최대자유거리를 갖도록 함으로써 최소의 전송비트요율을 갖도록 설계한 부호를 말한다. 이와같은 최적부호를 찾기 위한 집합분할방법은 다음과 같은 단점이 있다.

첫째, 한정된 주파수 대역내에서 임의의 부호이득(coding gain)을 얻기 위해서는 각각의 부호율에 대응하는 부호기/복호기가 필요하다.

둘째, 집합분할방법으로 구한 부호들의 상태수가 높으면 높을수록 TCM 시스템의 신뢰도는 향상되나, 수신측에서 연판정 복호를 하기 위해서는 보다 많은 계산이 요구되므로 복호기의 실현이 매우 어려워진다.

셋째, trellis 부호기의 성능을 평가하는 데는 ACG를 이용하는데, 이는 자유 유클리디안 거리, d_{free} 만의 함수로 되어 있다. 그러나 실질적인 경우 부호기에는 d_{free} 보다 큰 거리를 갖는 잠재적인 경로가 존재할 수 있기 때문에 종종 잘못된 결과를 초래한다.

이와 같은 문제점들을 해결하기 위하여 단일 2진 부호기에 변조방식을 임의로 선택하여 얻고자 하는 전송효율을 얻을 수 있는 것이 Pragmatic 부호에 의한 TCM 방식이다. Pragmatic 부호에 의한 TCM의 시스템 계통도는 그림4에 보인바와 같다.

이 시스템은 $k-1$ 개의 비트가 입력되어 가장 낮은 차수의 비트만이 $R=1/2$ 인 convolutional 부호기로 입력되고 나머지 $k-2$ 개의 비트는 부호화 되지 않은 상태로 입력된다. 1개의 입력 비트가 $R=1/2$ 인 convolutional 부호기로 입력되어 2개의 부호비트로 출력되며, 그레이(Gray) 부호의 매핑방법에 따라 다음 4개의 위상중 1개의 위상을 갖도록 한다.

0 0 →	0	[rad]
0 1 →	$\pi / 2^{k-2}$	[rad]
1 1 →	$2 \pi / 2^{k-2}$	[rad]
1 0 →	$3 \pi / 2^{k-2}$	[rad]

그리고 나머지 부호화 하지 않은 $k-2$ 개의 비트들은 $j+1$ 개의 섹터를 선택한 후 반복하여 매핑을 한다 (여기서 $0 \leq j \leq 2^{k-2}-1$).

집합분할방식에 의한 시스템과 비교하기 위하여

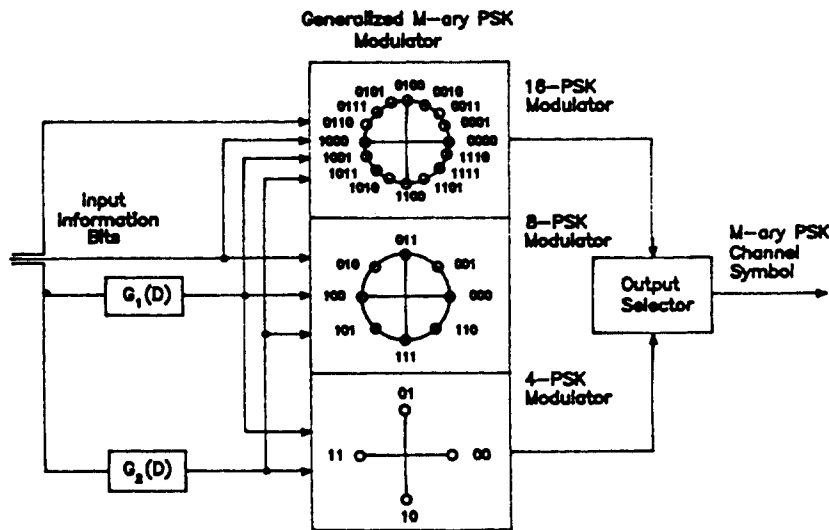


그림 4. M 진 PSK를 위한 Pragmatic 부호기 / 변조기
Fig. 4. Pragmatic encoder / decoder for M-ary PSK.

pragmatic 방식($R=1/2, m=3$)에 의한 TCM / 8-PSK의 부호기를 설계하면 그림5에서 보는바와 같다.

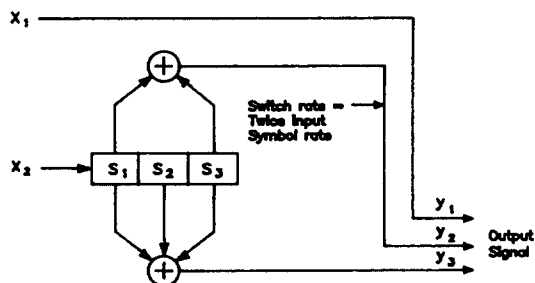


그림 5. Pragmatic 부호에 의한 TCM / 8-PSK 부호기($R=1/2, m=3$)

Fig. 5. TCM / 8-PSK encoder with pragmatic coding($R=1/2, m=3$).

이와 같은 부호기의 출력을 전송채널의 특성에 적합하도록 매핑하면 그림6과 같다. 그림6의 신호매핑상태를 보면 밑줄친 2비트는 convolutional 부호기를 통하여 부호화된 비트이며 맨앞의 비트는 부호화하지 않은 정보비트이다. 여기서 유의할 것은 부호화하지 않은 k -2개의 비트로 인하여 trellis 구조에서 병렬쌍이 발생하는 것이다. 이 병렬쌍들의 신호매핑상태는 d_3 라는 최대의 거리를 갖도록 매핑을 해야

한다.

집합분할에 의한 TCM / 8-PSK와 비교하기 위하여 pragmatic 방식($R=1/2, m=2$)에 의한 TCM / 8-PSK의 한 예를 들어 설계하면 그림6에서 보는바와 같다. 그림6과 같은 TCM 시스템은 부호화되지 않은 1개의 정보비트로 인하여 trellis 상태도상에 병렬쌍이 생기게 된다. 이와같은 trellis 경로의 병렬쌍은 Rayleigh 페이딩 등이 존재하는 전송채널에서는 많은 영향을 미치게 되어 시스템 전체의 성능을 저하시키는 원인이 된다. 그림7에서는 부호화하지 않은 1개의 비트로 인하여 trellis 구조에서 병렬쌍이 생기는 것을 확인할 수 있다.

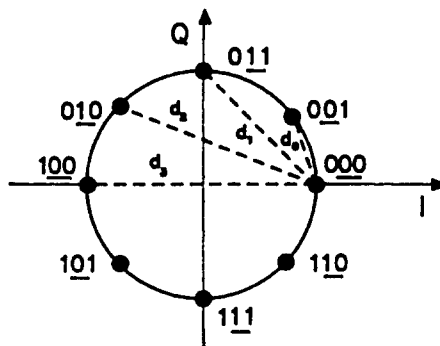


그림 6. Pragmatic 부호에 의한 TCM / 8-PSK의 신호매핑
Fig. 6. Signal mapping of TCM / 8-PSK with pragmatic coding.

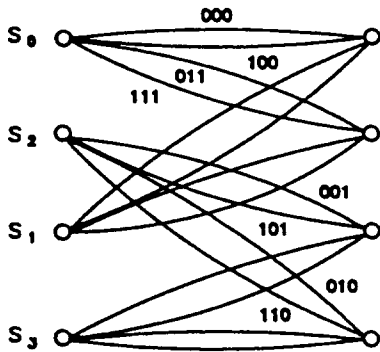


그림 7. Pragmatic 부호에 의한 TCM/8-PSK의 trellis 상태도(R=1/2, m=3)

Fig. 7. Trellis diagram of TCM/8-PSK with pragmatic coding(R=1/2, m=3).

IV. 오율해석 및 고찰

디지털 통신 시스템을 설계하는데 있어서 가장 중요한 목표는 최대의 데이터율을 유지하면서 최소의 오류확률과 대역폭, 이를 유지하기 위한 최소의 SNR을 갖도록 하는 것이다. 하지만 오류확률의 효율과 대역폭 사이에는 이율배반적인 관계가 있으므로 어느것을 고려할 것인가에 따라 SNR을 조정해야 한다. 본 논문에서는 임의의 오율의 가질때 부호화하지 않은 기준 시스템과 집합분할과 pragmatic 부호에 의한 TCM으로 부호화한 경우에 필요한 SNR의 이득으로써 시스템의 성능을 평가하고자 한다.

실질적으로 이동무선통신 채널에서는 여러형태의 산란체의 영향과 다중경로 현상을 고려해야 한다. 특히 이동체와 산란체들의 관계(둘다 이동할 경우, 둘다 고정되어 있는 경우, 하나는 고정되어 있고 하나는 움직일 경우)에서 나타나는 다중경로 페이딩 현상은 이동무선통신 시스템을 설계하는 데 있어서 우선적으로 고려해야 할 현상이다. 이와같은 다중경로 페이딩 현상이 육상이동채널에서 발생하는 경우에는 Rayleigh 확률분포를 갖는다.

우선 Rayleigh 페이딩이 존재하는 환경하에서 부호화하지 않은 기준 시스템의 오류확률은 다음과 같다.

수신신호의 크기를 a라고 가정하면 부호화하지 않은 다차위상변조 시스템의 비트오류확률은 다음과 같다.⁽⁹⁾

$$E_b = \frac{a^2 T_b}{2} \quad (2)$$

$$P_b(a) = Q\left[\sqrt{\frac{a^2 T_b}{N}}\right] \leq \frac{1}{2} \exp\left[\frac{-a^2 T_b}{(2N)}\right] \quad (3)$$

전송 채널에 Rayleigh 페이딩이 존재하는 경우에 비트오율을 구하면 다음과 같다.

$$P_b = \int P_b(a) P_A(a) da \leq \frac{1}{2} \int \exp\left[\frac{-a^2 T_b}{2N}\right] P_A(a) da \quad (4)$$

$$P_A(a) = \frac{a}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{a^2}{(2\sigma^2)}\right], a \geq 0 \quad (5)$$

$$P_b = \int_0^\infty Q\left[\sqrt{\frac{a^2 T_b}{N}}\right] \frac{a}{\sigma^2} \exp\left[\frac{-a^2}{2\sigma^2}\right] da \\ = \frac{1}{2} \left\{1 - \sqrt{\frac{\bar{E}_b/N}{1 + \bar{E}_b/N}}\right\} \quad (6)$$

여기서

$$\frac{T_b}{2} \int_0^\infty a^2 P_A(a) da = \sigma^2 T_a \quad (7)$$

한편 집합분할과 Pragmatic 부호에 의한 TCM의 성능을 고찰하기 위하여 각각의 오율식을 유도해 보자.

우선 Pragmatic 부호(R=1/n, n=2, 3)에 의한 TCM/M-PSK 시스템의 정규화된 자승 유클리디안 거리는 다음식으로 부터 구할 수 있다.⁽²⁾

$$\text{Free NSED} \geq \text{Min} \left\{ \sin^2\left(\frac{4\pi}{M}\right) 2\sin^2\left(\frac{2\pi}{M}\right) + 6\sin^2\left(\frac{\pi}{M}\right) \right\} \quad (8)$$

$$P_{bc} > Q\left[\left(\frac{2E_s}{N_0}\right) d_{\min}^2\right]^{1/2} \quad (9)$$

윗식을 이용하여 Pragmatic에 의한 TCM/M-PSK 시스템이 이동무선채널에 AWGN과 Rayleigh 페이딩이 존재하는 경우에 대한 비트오율을 구하면 다음과 같다.

$$P_b = \int_0^\infty \frac{1}{r_0} \exp\left(\frac{-r}{r_0}\right) Q\left[\left(r d_{\min}^2\right)^{1/2}\right] dr$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) [1 - \exp\left(\frac{-t^2}{a r_0}\right)] dt \\
 &= \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{\frac{r_0 d_{\min}^3}{r_0 d_{\min}^2 + 2}} \right] \quad (10)
 \end{aligned}$$

여기서 $(a r)^{1/2} = x$, $a = d_{\min}^2$ (수신신호의 세기), r_0 는 평균신호대잡음비, r 는 신호대잡음비이다.

위의 결과식을 구한 경우와 동일한 조건하에서 집합분할에 의한 TCM/M-PSK의 오류율을 구하면 다음과 같다.⁽¹³⁾

$$P_b = \frac{N(\text{dfree})}{2} \left[1 - \sqrt{\frac{r_0 \text{dfree}^2}{r_0 \text{dfree}^2 + 4}} \right] \quad (11)$$

지금까지 유도한 식들을 이용하여 AWGN 환경하에서 집합분할의 각 상태에 따른 TCM/8-PSK의 오류확률은 그림8에 보인 바와 같다. 그림에서 보는

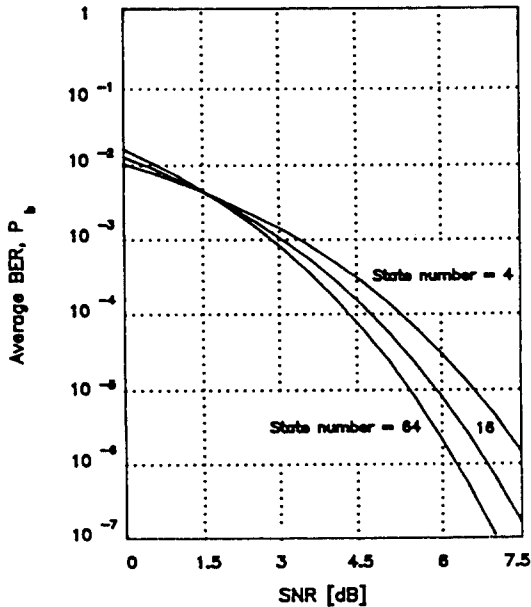


그림 8. 집합분할의 상태 수에 따른 TCM/8-PSK의 BER/SNR 특성
 Fig. 8. BER/SNR performance of TCM/8-PSK with state number of set partitioning.

바와 같이 집합 분할의 상태수가 증가하면 증가할수록 임의의 오류를 얻기 위해 필요한 E_b/N_0 의 값이 작아짐을 알 수 있다. 그러나 상태의 수가 커지면 커질수록 부호기의 구조가 복잡해질뿐만 아니라 수신측에서의 계산 수가 증가하게 되므로 64-상태 이상인 경우에는 별 의미가 없다. 따라서 집합분할에 의한 TCM/8-PSK 시스템을 평가하기 위한 최대 상태수는 64-상태로 하였다.

AWGN이 많은 영향을 미치는 무선통신 시스템을 위한 집합분할방식(상태수=64)과 pragmatic 부호에 의한 TCM/8-PSK의 오류확률은 그림9에서 보는 바와 같다.

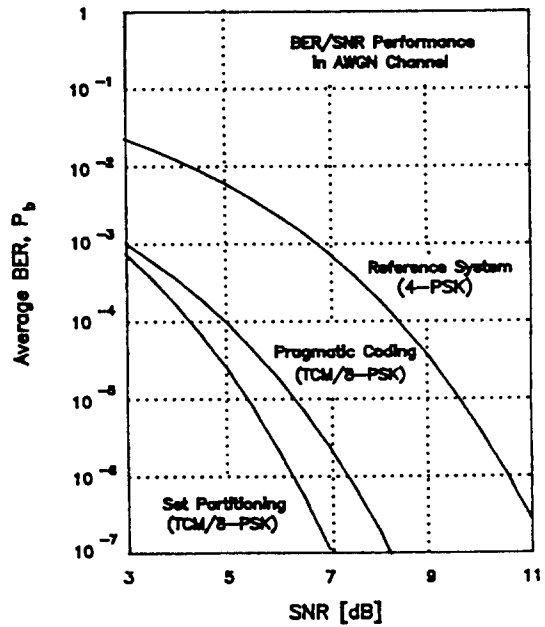


그림 9. AWGN 하에서 최적의 집합분할과 Pragmatic 방식에 의한 TCM/8-PSK의 BER/SNR 특성
 Fig. 9. BER/SNR performance of TCM/8-PSK for optimal set partitioning and pragmatic method in AWGN environment.

그림에서 보는 바와 같이 임의의 오류, 10^{-5} 를 얻기 위해서는 pragmatic 방식이 집합분할방식에 비해 약 1 dB 정도의 신호대잡음비가 더 요구됨을 알 수 있다. 그러나 집합분할의 상태수가 낮아지면 pragmatic 부호에 의한 방식이 오류특성이 더 우수할뿐만 아니라 단일 부호기/복호기를 사용하므로 시스템 전체의 구조가 간단해지는 장점이 있다.

한편 이동무선통신에 많은 영향을 미치는 Rayleigh 페이딩 환경하에서 오율을 고찰한 결과는 그림10에서 보는 바와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 pragmatic 부호에 의한 TCM시스템은 부호화 되지 않고 그대로 전송되는 정보 데이터 비트로 인하여 trellis 상태도 상에 병렬쌍이 생기므로 집합분할에 의한 TCM 시스템보다 약 3.5dB 정도의 평균 신호대잡음비가 더 요구됨을 알 수 있다. 따라서 Rayleigh 페이딩이 존재하는 이동무선통신 시스템인 경우에는 pragmatic 부호에 의한 TCM 시스템이 적합하지 않음을 알 수 있다.

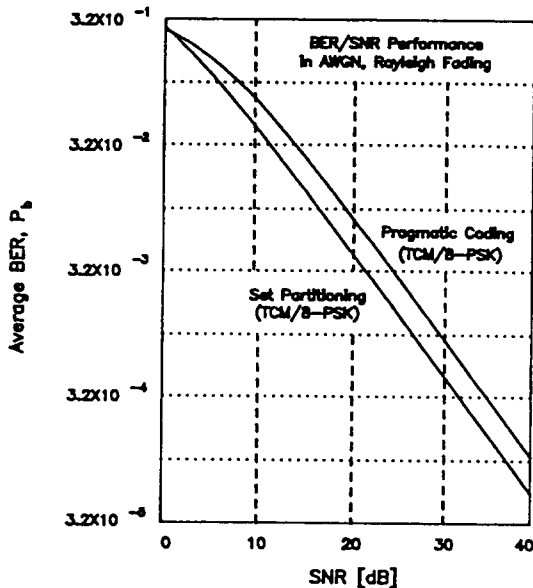


그림 10. AWGN Rayleigh 페이딩하에서 최적의 집합분할과 Pragmatic 방식에 의한 TCM/8-PSK의 BER/SNR 특성

Fig. 10. BER/SNR performance of TCM/8-PSK for optimal set partitioning and pragmatic method in AWGN, Rayleigh fading environment.

V. 결론

본 논문에서는 한정된 주파수 대역 내에서 데이터를 효율적으로 전송하기 위하여 디지털 전송 시스템의 전송 전력이나 데이터의 전송 대역폭을 증가시키지 않고도 무선 통신 채널에서 발생하는 잡음과 간섭에 대한 내성을 향상시킬 수 있는 TCM 방식중 Ungerboeck의 집합분할방식과 pragmatic 방식에

대한 오율을 AWGN과 Rayleigh 페이딩 환경하에서 비교 검토하였다. 또한, 집합분할에 의한 최적의 TCM/8-PSK의 부호를 얻기 위해 상태수의 변화에 따른 오율에 대해서도 고찰하였다.

그 결과 고정무선통신에서 데이터의 전송효율을 높이기 위해 시스템을 설계하는 경우에는 pragmatic에 의한 TCM 방식이 유리함을 알 수 있었다. 왜냐하면 AWGN과 같은 잡음이 존재하는 채널에서는 pragmatic 부호에 의한 방식이 집합분할에 비해 시스템의 성능면에서 별차이(64-상태인 경우 약 1 dB 정도)가 없을 뿐만 아니라 단일 부호기/복호기를 사용할 수 있어서 시스템 전체의 구성이 매우 간단하기 때문이다. 그러나 이동무선통신과 같이 전송채널에 Rayleigh 확률분포를 갖는 다중경로 페이딩이 존재하는 경우에는 집합분할에 의한 TCM 방식이 시스템의 신뢰도 향상에 유리함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Gottfried Ungerboeck, "Channel Coding with Multilevel / Phase Signals," IEEE Trans. on Inform. Theory., Vol. IT-28, No. 1, Jan., 1982.
2. Andrew J. Viterbi, "A Pragmatic Approach to Trellis Coded Modulation," IEEE Communications Magazine, July, 1989.
3. John G. Proakis, Digital Communications : McGraw-Hill, 1989.
4. William C. Y. Lee, Mobile Communications Engineering : McGraw-Hill, 1982.
5. Georag C. Clark, Jr. J. Bibb Caia, Error-Correction Coding for Digital Communications, Plenum Press, 1981.
6. I. Korn, Digital Communications, Van Nostrand Reinhold Company, 1985.
7. Marvin k. Simon, Spread Spectrum Communications, Computer Science Press, 1985.
8. Bernard Sklar, Digital Communications Fundamentals and Application, Prentice-Hill international Editions, 1988.
9. 진년강, 아날로그와 디지털 통신, 청문각, 1990.
10. G. Ungerboeck, "Trellis-Coded Modulation with Redundant Signal Sets," Pts I and II, IEEE Communication Mag. Vol. 25, pp. 5-21, Feb, 1987.
11. Ezio Biglieri, "Introduction to Trellis-Coded

- Modulation with Applications,” Macmillan Publishing Company, 1991.
12. AWM 1637 Convolutional Encoder / Viterbi Decoder Evaluation Board, Manual.
 13. 김종수, “디지털 이동 무선 통신에서의 채널부호화에 관한 연구” 단국대학교 전자공학과 석사학위 논문. 1990.