

주파수 도약 기술을 이용한 셀룰라 통신에 관한 연구

正會員 晉 奉 哲* 正會員 朴 尚 奎** 正會員 韓 榮 烈**

A Study on Cellular Communication with Frequency Hopping Technique

Bong Cheol JIN*, Sang Kyu PARK**, Young Yearl HAN** *Regular Members*

要 約 본 논문은 셀룰라 이동통신을 위한 FH/MFSK 시스템의 성능분석에 관한 연구이다. FH/MFSK 시스템의 채널용량은 소신확률 P_D , 삽입확률 P_I 의 함수로서 나타낼 수 있다. 시스템의 스펙트럼 효율은 성능분석 척도로 사용된다. 또한 단일 셀인 경우와 셀룰라 시스템인 경우 그리고 셀룰라 시스템의 경우에 있어서 주파수를 재사용한 경우와 안한 경우로 나누어 이동통신의 일반적 해석 모델인 가산 백색 가우시안 잡음과 레일레이 페이딩 채널에서 구한 P_D, P_I 값을 이용하여 시스템의 성능을 비교 분석한다. 셀룰라 구성인 경우가 단일 셀인 경우보다 성능이 저하되었으며, 주파수 재사용인 경우, 재사용 패턴 $N=3$ 일 때가 성능이 우수함을 알 수 있었다.

ABSTRACT This paper shows performance analysis for FH/MFSK systems over the cellular mobile communication channel. The channel capacity over FH/MFSK system is represented as a function of deletion probability (P_D) and insertion probability(P_I). The spectral efficiency of the system serves as a performance measure. We analyze and compare the spectral efficiencies using P_D, P_I which are calculated over the additive white Gaussian noise(AWGN) and Rayleigh fading channel for non-cellular system and cellular system. For the cellular system, the spectralefficiency is obtained in both cases of frequency reuse and non-use. Results show that the performance of cellular system is inferior to that of non-cellular system. In the case of frequency reuse, we get the best performance when the reuse pattern (N) is 3.

I. 서 론

셀룰라 방식은 제한된 주파수 채널의 효과적인 이용을 위하여 소규모의 송신시설로 셀(Cell)이라는 작은 구역을 담당하도록 하고, 일정거리를 둔 다른 여러 셀에서도 동일한 주파수를 사용하도록 하는 고용량(High capacity)의 통신 방식이다^(1,2,3). 그러나 여러 셀에서 동일한 주파수를 사용하므로 이들 셀 사이에서 동일채널간섭(Cochannel Interference)⁽⁴⁾이 발생한다. 이러한

간섭의 영향을 억제하기 위해서는 동일채널을 사용하는 셀 사이의 거리를 충분히 유지하여야 한다^(5,6). 그리고 이동무선통신에서 기지국(Base Station)에서 송신된 전파는 가옥, 빌딩등에 의하여 반사, 회절, 산란되어 이동국(Mobile Station)에 도달되는 전파는 여러 개의 파가 수신점에 모여 다중파를 이루므로 신호의 강도가 변화하는 페이딩(Fading) 현상이 일어난다⁽⁷⁾. 이 페이딩 현상은 간섭과 함께 시스템의 중요한 열화 요인이 되어 많은 연구자들에 의해 연구 검토되어 왔다^(8,9,10). 국내에서는 1984년 미국의 AMPS 시스템을 도입하여 일부지역을 서비스하고 있다. 그러나 이 방식은 아날로그 방식으로서 통화

*國防科學研究所
ADD
**漢陽大學校 電子通信工學科
Dept. of Electronic Comm. Engineering, Hanyang Univ.
論文番號 : 91-50 (接受1991. 2. 20)

내용의 비밀성이 보장되지 못하여 통화내용이 누설된다든지, 채널의 이용율에 있어 많은 가입자를 수용하지 못하는 등의 여러 문제점이 있다.

최근 이러한 문제점들을 해결하기 위해서 비화성이 강한 확산 대역 통신시스템을 셀룰라 이동통신 시스템에 적용하고자 하는 움직임이 있다. 다중 접속통신(Multiple Access Communication)을 가능하게 하는 확산대역방식을 사용하면 각자에게 할당된 고유부호(도약주파수)를 사용하여 상호간섭을 배제할 수 있다. 또한 주파수 분할이나 시간 분할에서 생기는 가입자의 포화현상을 방지할 수 있다. 이중에서도 주파수 도약(Frequency Hopping) 통신방식은 잡음과 간섭을 배제하는 능력이 강하고 동일한 대역폭을 가지고 여러사람이 동시에 통신할 수 있는 방법이다^(1,12,13,17,18).

본 논문은 셀룰라 이동무선통신을 위한 FH/MFSK 시스템의 성능분석에 관한 연구이다. FH/MFSK 시스템은 디지털 변조방식의 하나인 M-ary FSK를 이용하여 하나의 심볼의 신호파형을 주파수를 도약시키면서 전송한다. 또한 부호 분할 다중접근(Code Division Multiple Access)을 위하여 각 사용자에게 번지(Address)를 부여하므로써 동일전송대역을 여러명이 동시에 사용할 수 있도록 했다^(13,14,16). 셀 상에 이용자가 균일하게 분포한다는 가정⁽¹⁵⁾과 백색 가우시안 잡음과 레일레이 페이딩이 공존하는 통신 채널을 고려하여 시스템의 천이확률과 채널용량

을 구하여 셀룰라 이동통신에서의 영향을 분석하고자 한다⁽¹⁹⁾.

II. 시스템 모델과 셀룰라 이동통신 채널

2.1 시스템 모델

본 논문에서 고려한 FH/MFSK 다중 접근 시스템의 송신기 블록도는 그림 1, 그림 2와 같다. 송신기에서는 연속되는 정보 비트열을 K 비트의 워드로 나눈다. 각 입력 워드에 대해서 부호기는 L개의 워드를 출력시키며, 주파수 도약기는 각 입력 워드에 해당하는 L개의 출력 워드를 형성하기 위해 PN 시퀀스와 모듈로 Q 합연산을 행한다. 주파수 발생기는 이러한 심볼을 T/L 서브슬롯 시간 동안에 Q개의 주파수중 하나로 전송한다. 부호기는 매 T/L 초의 서브슬롯 마다 1개의 래터(Letter)를 내놓는데 이 래터를 Q차원 이진 벡터 X 로 표시한다. X_i 는 i번째의 서브슬롯을 나타내며, X 는 다음과 같이 표시되며, 이러한 다른 형태의 벡터수는 Q개이며, 입력 알파벳의 크기를 나타낸다.

$$X = (X_0, X_1, \dots, X_{Q-1})$$

$$(0, 0, \dots, 1, 0), \text{ 여기서 } X_j = \{0, 1\},$$

$$j = 0, 1, \dots, Q-1$$

$X_j^{(i)}$ 는 i번째 래터의 j번째 컴포넌트를 나타낸다.

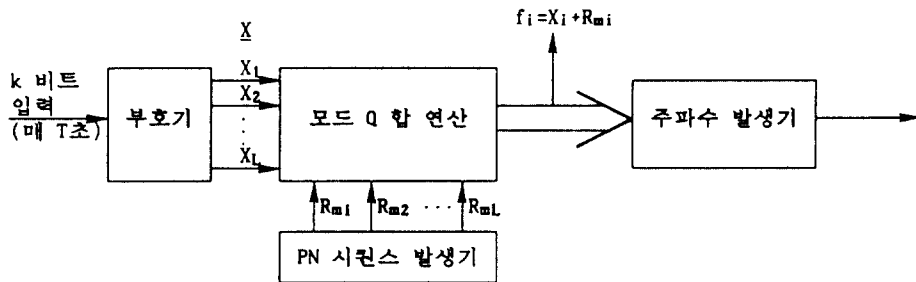


그림 1. FH/MFSK 송신기
Fig 1. FH/MFSK Transmitter

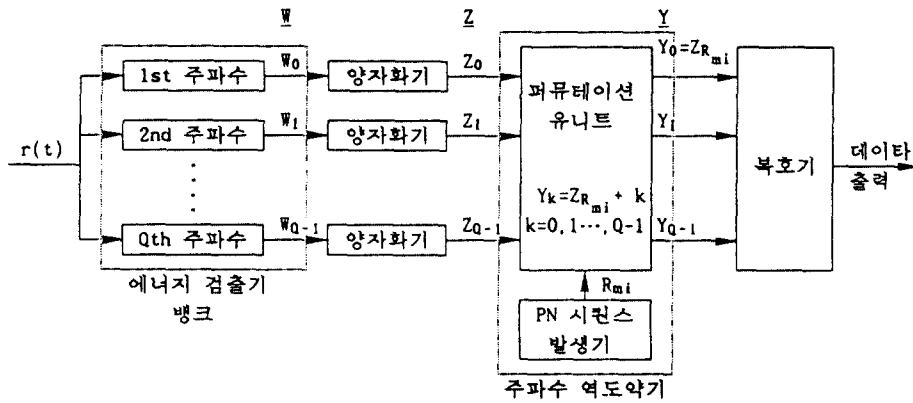


그림 2. FH/MFSK 수신기
Fig 2. FH/MFSK Receiver

$$X_j^{\oplus} = \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

수신기에서, $r(t)$ 는 수신 신호를, $Z_i (Z_0, Z_1, \dots, Z_{Q-1})$ 는 Q 개의 에너지 बैं크에서 매 T/L 시간마다 내놓는 Q 개의 양자화된 에너지 측정치로 이루어진 벡터를, $Y_i (Y_0, Y_1, \dots, Y_{Q-1})$ 는 Z_i 를 퍼퓨테이션한 것으로 주파수 역도약기의 출력을 나타낸다. Z_i 와 Y_i 는 0과 1로 이루어진 Q 차원 이진 벡터이며, Y_i 는 복호기의 입력이 된다.

2.2 셀룰라 이동통신 채널

셀룰라 통신에서 서비스 영역은 셀이라는 몇 개의 지역으로 나누어지고, 각 셀은 중앙에 기지국(Base Station)이 위치하고, 각 이용자는 기지국을 통해서 서로 통신을 한다¹¹⁾. 셀룰라 상태에서 성능을 분석하기 위해서 다음과 같이 가정한

- 서비스 영역은 같은 크기의 겹침이 없는 육각형의 셀로 분할되어 있다.
- 각 이용자는 서비스 영역에 균일 확률밀도함수를 갖고 랜덤하게 분포한다¹²⁾.
- 시스템 전반에 걸쳐서 전파법칙 r^p 가 적용된다. (r : 거리, p : 감쇠상수)
- 주어진 셀 내에서는, 모든 이용자로부터 수신

되는 신호는 기지국에 똑같은 전력으로 도달하는 전력제어(Power Control)가 적용된다¹⁵⁾.

인접 셀에 위치한 이용자를 포함한 모든 이용자가 동일한 신호집합을 사용하고, 다른 이용자와는 주파수 도약 패턴으로 구분된다.

III. FH/MFSK 시스템 해석

3.1 단일 셀인 경우의 FH/MFSK 시스템의 천이 확률

에너지 검출기 출력의 조건부 확률밀도함수를 구하기 위해, AWGN과 레일레이 페이딩에서 MFSK 전송을 생각하면, j 번째 래터 X^{\oplus} 가 전송되었다면, 전송신호 $s(t)$ 는 식(1)과 같다.

$$s(t) = \sqrt{2S} \cdot \sin \left[2\pi \cdot \left(f_0 + f_j \frac{L}{T} \right) t \right] \quad (1)$$

s : 송신전력

수신기에서의 수신신호 $r(t)$ 는 식(2)와 같다.

$$r(t) = A\sqrt{2S} \cdot \sin \left[2\pi \cdot \left[f_0 + f_j \frac{L}{T} \right] t + \theta \right] + n(t)$$

A와 θ 는 랜덤변수로 식(3), 식(4)와 같으며 서로 독립이다.

$$P_A(a) = \frac{2a}{\sigma_A^2} \exp\left[-\frac{a^2}{\sigma_A^2}\right], a > 0$$

$$P_\theta(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} & : 0 \leq \theta < 2\pi \\ \theta & : \text{otherwise} \end{cases}$$

철당 수신 신호중 송신 신호에 대한 에너지를 E_s 라 하면, E_s 는 식(5)와 같다.

$$E_s = E \left[S \cdot \frac{T}{L} \cdot A^2 \right] = \frac{ST}{L} \sigma_A^2$$

$$= E_t \sigma_A^2 = E_t r^{-P}$$

여기서, r은 송신기와 수신기 사이의 거리, P는 감쇠 상수($3 \leq P \leq 4$) E_t 는 채널 신호당 송신 에너지, $E[\cdot]$ 은 평균을 나타낸다.

단일 이용자에 대하여 $W(W_1, W_2, \dots, W_Q)$ 는 Q에너지 검출기의 벡터로서, 식(6)과 같은 확률밀도함수를 갖는다.

$$\left\{ \begin{aligned} P(W_j | \underline{X}(j)) &= \frac{2W_j}{E_s + N_0} \\ &\exp\left[-\frac{W_j^2}{E_s + N_0}\right] \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} P(W_k | \underline{X}(j)) &= \frac{2W_k}{N_0} \exp\left[-\frac{W_k^2}{N_0}\right] \\ &: k \neq j \end{aligned} \right.$$

FH/MFSK 다중접속시에는 검출기 출력단에서 진폭 W는 식(7)과 같은 확률밀도함수를 갖는다.

$$\left\{ \begin{aligned} P(W_j | \underline{X}(j), \sigma_1) &= \frac{2W_j}{\sigma_1^2} \\ &\exp\left[-\frac{W_j^2}{\sigma_1^2}\right] \\ P(W_k | \underline{X}(j), \sigma_0) &= \frac{2W_k}{\sigma_0^2} \\ &\exp\left[-\frac{W_k^2}{\sigma_0^2}\right] : k \neq j \end{aligned} \right.$$

여기서, σ_1 은 레일레이 분포의 랜덤변수로서, n번째 이용자가 전송했을 때를, σ_0 는 Q-1의 나머지 이용자에 의한 것을 나타내는 것으로 식(8)과 같다.

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_0^2 &= N_0 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^M E_t r_i^{-P} \beta_{i,j} \\ \sigma_1^2 &= N_0 + E_t r_n^{-P} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^M E_t r_i^{-P} \beta_{i,j} \end{aligned} \right.$$

여기서, $\beta_{i,j}$ (1 : i번째 주파수 짚에서 j번째 이용자가 보냈을 때
) : otherwise

에너지 검출기의 확률밀도함수를 유도하기 위해서, β 의 모든 가능한 경우에 대해 식(7)의 평균을 취한다. 주어진 셀 내에 위치한 모든 이용자로부터 오는 신호는 셀의 기지국에 똑같은 전력으로 수신되는 전력제어(Power Control)를 생각하면 σ_0, σ_1 은 식(9)와 같다.

$$\begin{cases} \sigma_0^2 = N_0 + i \cdot E_t R^{-p} \\ \sigma_1^2 = N_0 + (i+1)E_t R^{-p} \end{cases}, \quad i=0, 1, \dots, M-1 \quad (9)$$

여기서, i 는 정수의 랜덤변수로, 주파수 짝에서 신호를 전송한 이용자수를 나타내고, R 은 기준거리를 나타낸다. n 번째 이용자가 주어진 서브슬롯 시간에서 임의의 주파수 짝에 충돌(Hit)을 일으킬 확률 P_0 는 식(10)과 같다.

$$P_0 = \frac{1}{Q} = 2^{-K} \quad (10)$$

M 개의 이용자중 i 개의 이용자에 의해서 충돌이 발생할 확률 $P(i)$ 는 식(11)과 같다.

$$P(i) = \binom{M-1}{i} P_0^i (1-P_0)^{M-1-i} \quad 0 \leq i \leq M-1$$

에너지 검출기 출력의 조건확률밀도함수는 식(7)에서 식(9)를 대입하고 i 의 분포함수에 대해서 평균을 취하면 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} P(W_j | \underline{X}^{(j)}) = \frac{2W_j}{E_s} \sum_{i=0}^{M-1} \binom{M-1}{i} P_0^i \\ (1-P_0)^{M-1-i} (G+i)^{-1} \exp\left[-\frac{W_j^2}{E_s(G+i)}\right] \end{cases}$$

$$\begin{cases} P(W_j | \underline{X}^{(j)}) = \frac{2W_j}{E_s} \sum_{i=0}^{M-1} \binom{M-1}{i} P_0^i \\ (1-P_0)^{M-1-i} (G+1+i)^{-1} \exp\left[-\frac{W_j^2}{E_s(G+1+i)}\right] \end{cases} \quad (12)$$

여기서 $E_s = E_t R^p$, $G = \frac{1}{SNR}$, $SNR = \frac{E_s}{N_0}$ 를 나타낸다.

양자화기(Quantizer)에 대한 조건부 확률은 식(13)과 같이 표시되며,

$$\begin{aligned} P(Y_k = \ell | \underline{X}^{(j)}) &= \begin{cases} P(\ell | 1) & : k = j \\ P(\ell | 0) & : k \neq j \end{cases} \\ \ell &= 1, 0 \end{aligned} \quad (13)$$

FH/MFSK의 천이확률은 식(14)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{cases} P_I = P(Y_k = 1 | X_k = 0) \\ = \sum_{i=0}^{M-1} \binom{M-1}{i} P_0^i (1-P_0)^{M-1-i} \\ \exp\left[-\frac{dh}{G+i}\right] \\ 1 - P_D = P(Y_k = 1 | X_k = 0) \\ = \sum_{i=0}^{M-1} \binom{M-1}{i} P_0^i (1-P_0)^{M-1-i} \\ \exp\left[-\frac{dh}{G+1+i}\right] \end{cases} \quad (14)$$

여기서,

$$\left\{ \begin{array}{l} dh = \frac{d^2}{E_s} \quad : \text{규준화 결정임계값} \\ P_o = \frac{1}{Q}, \quad G = \frac{1}{SNR}, \quad SNR = \frac{E_s}{N_o} \end{array} \right.$$

3.2 셀룰라 구성인 경우의 FH/MFSK 시스템의 천이 확률

셀룰라 상에서 천이 확률은 셀 밖의 이용자에 의한 간섭(Interference) 성분을 첨가하면 얻을 수 있다.

$$\left\{ \begin{array}{l} P(W_j | \underline{X}^{(j)}, \sigma_1) = \frac{2W_j}{\sigma_1^2} \exp\left[-\frac{W_j^2}{\sigma_1^2}\right] \\ P(W_k | \underline{X}^{(j)}, \sigma_0) = \frac{2W_k}{\sigma_0^2} \exp\left[-\frac{W_k^2}{\sigma_0^2}\right] \quad : k \neq j \end{array} \right. \quad (15)$$

j 번째 주파수 칩에서 간섭성분을 고려하면 σ_0, σ_1 은 식(16)과 같다.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1^2 = N_o + (i+1)E_t R^{-P} \sum_{n=1}^{\infty} E_{tn} r_n^{-P} \beta_{n,j} \\ \sigma_0^2 = N_o + iE_t R^{-P} + \sum_{n=1}^{\infty} E_{tn} r_n^{-P} \beta_{n,j} \end{array} \right. \quad (16)$$

여기서 R은 육각형의 셀과 같은 면적을 갖는 원의 반경($R_n = 0.9094R$)^[10]을 나타내고, E_{tn} 은 셀 밖의 n번째 이용자의 심볼 에너지, r_n 은 주어진 셀의 기지국에서 n번째 이용자까지의 거리를 나타내고, β 는 식(8)에 나타난 것과 같다. 식(16)을 식(17)과 같이 바꿔쓴다.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1^2 = \sigma_{1i}^2 + \sigma_{out}^2 + N_o \\ \sigma_0^2 = \sigma_{0i}^2 + \sigma_{out}^2 + N_o \end{array} \right. \quad (17)$$

여기서,

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{1i}^2 = (i+1) E_t R^{-P} = (i+1)E_s \\ \sigma_{0i}^2 = iE_s \\ \sigma_{out}^2 = \sum_{n=1}^{\infty} E_{tn} r_n^{-P} \beta_{n,j} \end{array} \right.$$

소신부 확률을 구하기 위해서 β 의 모든 가능한 경우에 대해서 평균을 취한다. 셀 밖의 이용자가 광범위한 전력레벨을 가지고 있고, 전력제어에 의해 송신 심볼 에너지 E_t 가 상수가 아니므로 근사화를 다음과 같이 지킨다.

σ_1, σ_0 에 대해서는 상한값을 취하고, σ_{out}^2 으로 대치한다.

$$\sigma_{out}^2 < \int_R^{\infty} E_t \cdot r^{-P} \cdot \frac{1}{Q} D \cdot 2\pi r \cdot dr \quad (18)$$

여기서, D는 이용자의 밀도, $D \cdot 2\pi r \cdot dr$ 은 $r < r+dr$ 사이에 이용자가 있을 확률, $1/Q$ 는 이용자가 신호를 전송할 확률을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \sigma_{out}^2 &< \frac{E_t \cdot D \cdot 2\pi}{Q} \int_R^{\infty} r^{1-P} dr \\ &= \frac{E_t \cdot D \cdot 2\pi}{Q(P-2)} R^{2-P} = \frac{2E_s \bar{M}}{Q(P-2)} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_s = E_t R^{-P} : \text{수신 신호의 평균값.} \\ D = \frac{\bar{M}}{\pi R^2} : \text{셀당 평균 이용자수.} \end{array} \right.$$

그러므로 σ_1, σ_0 는 식(20)과 같이 쓸 수 있다.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1^2 \approx N_0 + (i+1)E_s + \frac{2E_s\bar{M}}{Q(P-2)} \\ \sigma_0^2 \approx N_0 + iE_s + \frac{2E_s\bar{M}}{Q(P-2)} \end{array} \right. \quad (20)$$

셀룰라상의 FH/MFSK의 천이확률은 식(21)과 같다.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_I = P(Y_k = 1 | X_k = 0) \\ = \sum_{i=0}^{M-1} \binom{M-1}{i} P_o^i \\ (1-P_o)^{M-1-i} \exp\left[-\frac{dh}{G_c+i}\right] \\ 1 - P_D = P(Y_k = 1 | X_k = 0) \\ = \sum_{i=0}^{M-1} \binom{M-1}{i} P_o^i (1-P_o)^{M-1-i} \\ \exp\left[-\frac{dh}{G_c+1+i}\right] \end{array} \right. \quad (21)$$

여기서,

$$\left\{ \begin{array}{l} P_o = \frac{1}{Q}, \quad G_c = \frac{1}{SNR} + B_c, \quad SNR = \frac{E_s}{N_0} \\ B_c = \frac{\sigma_{out}^2}{E_s} < \frac{2\bar{M}}{Q(P-2)} \end{array} \right.$$

3.3 주파수 재사용인 경우의 FH/MFSK 시스템의 천이확률

셀은 동일한 클러스트(Clusters)로 분할되고,

각 클러스트는 N개의 인접한 셀을 갖는다. 클러스트 내의 임의의 한 셀에는, 나머지 다른 셀과는 직교 관계에 있는 신호의 부집합(Subset)이 할당되고, 이것이 시스템 전반에 걸쳐서 반복된다. 반복 패턴은 특정한 정수 N에 대해서만 가능하고, 그 식은 식(22)와 같다¹⁴⁾. 클러스트 내의 셀의 수가 증가할수록, 각 셀에 할당되는 신호의 부집합 크기와 간섭레벨은 작아진다.

$$N = k(k+1) + 1, \quad ; \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (22)$$

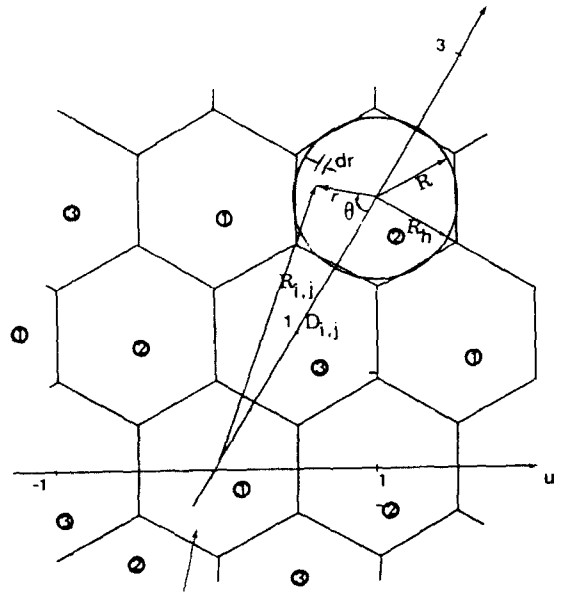


그림 3. 셀룰라 구성
Fig 3. Cellular Configuration

셀 밖의 모든 이용자는 심볼당 E_t 의 같은 에너지를 전송한다고 가정하면, 식(23)과 같이 표시된다.

$$E_t(r) = R^{-P} E_t \quad r^P \quad (23)$$

인접셀의 기지국간 최소거리 D_u 는 식(24)와 같다¹⁵⁾.

$$D_u = \sqrt{3} R_h = \sqrt{\frac{2\pi}{\sqrt{3}}} \cdot R \approx 1.9R \quad (24)$$

여기서, R_h 는 셀 중앙에서 축까지의 최소거리, R 은 셀반경을 나타낸다. 셀(1)에서 셀(2)까지의 거리는 식(25)와 같이 쓸 수 있다.

$$D_{i,j} = D_u \sqrt{i^2 + ij + j^2} \quad (25)$$

여기서, i, j 는 셀루라 구성시 반복패턴과 관계되는 정수이다.

셀2가 셀1에 미치는 간섭은 셀2에서 전송한 에너지를 셀면적에 대해서 적분을 취하면 얻을 수 있으므로 식(26)과 같다.

$$\overline{\sigma_{i,j}^2} = \frac{E_t D}{Q} \int_{\text{셀면적}} R_{i,j}^{-P} dA \quad (26)$$

$$\text{여기서, } R_{ij}(r,\theta) = \sqrt{D_{ij}^2 + r^2 - 2rD_{ij} \cos\theta}$$

셀 밖의 평균 간섭의 총량 σ_{out} 은 모든 셀을 고려해야 하므로, 식(27)과 같다.

$$\sigma_{out}^2 = \frac{E_t R^{-P} D}{Q} \sum_{i,j \neq \text{쌍}} \int_0^R \int_0^{2\pi} r^{1+P} (D_{i,j}^2 + r^2 - D_{i,j} r \cos\theta)^{-P/2} d\theta dr \quad (27)$$

식(27)을 셀반경 R 에 대해 표준화 시키고, 적절히 정리하면 식(28)과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_{out}^2 = \frac{E_s \bar{M}}{Q\pi} \sum_{i,j \neq \text{쌍}} \int_0^1 \int_0^{2\pi} r^{1+P} (d_{i,j}^2 + r^2 - d_{i,j} r \cos\theta)^{-P/2} d\theta dr \quad (28)$$

여기서

$$\left\{ \begin{aligned} d_{i,j} &= \frac{D_{i,j}}{R} = \sqrt{\frac{2\pi}{\sqrt{3}}} (i^2 + ij + j^2) \\ \bar{E}_s &= E_t R^{-P} \quad ; \quad \text{수신 심볼 에너지.} \\ \bar{M} &= D\pi R^2 \quad ; \quad \text{셀당 평균 이용자수.} \end{aligned} \right.$$

셀 밖의 이용자에 의한 평균간섭 σ_{out}^2 은 식(29)와 같다.

$$\overline{\sigma_{out}^2} < \frac{E_s \bar{M}}{Q} K(N,P) \quad (29)$$

$$K(N,P) = \frac{1}{\pi} \sum_{i,j \neq \text{쌍}} I(i,j) + \frac{2}{P-2} r_{app}^{2-P} \quad (30)$$

$r_{app} = (12r)$

$$I(i,j) = \int_{r=0}^1 \int_{\theta=0}^{2\pi} r^{1+P} (d_{i,j}^2 + r^2 - 2d_{i,j} r \cos\theta)^{-P/2} dr d\theta$$

표 1은 주파수 재사용 반복패턴 N 과 감쇠상수 P 에 대한 $K(N,P)$ 값을 나타낸다.

표 1. 할리스트당 셀수에 따른 $K(N,P)$ 의 값

N	K(N,P)	
	P=3	P=4
1	2.01	1.01
3	0.33	0.077
7	0.089	0.013

재사용시 FH/MFSK 시스템의 천이확률을 정리하면 식(31)과 같다.

$$P_I = P(Y_k = 1 | X_k = 0)$$

$$= \sum_{i=0}^{M-1} \binom{M-1}{i} P_o^i (1-P_o)^{M-1-i}$$

$$\exp\left[-\frac{dh}{G_r + i}\right]$$

$$1 - P_D = P(Y_k = 1 | X_k = 0)$$

$$= \sum_{i=0}^{M-1} \binom{M-1}{i} P_o^i (1-P_o)^{M-1-i}$$

$$\exp\left[-\frac{dh}{G_r + 1 + i}\right] \quad (31)$$

여기서,

$$P_o = \frac{1}{Q}, \quad G_r = \frac{1}{\text{SNR}}$$

$$+ \frac{M}{Q} \cdot K(N, P), \quad \text{SNR} = \frac{E_s}{N_o}$$

IV. 성능분석 및 검토

FH/MFSK 시스템의 다중 접속시의 성능을 채널용량 C [부록참조]와 천이확률을 이용해 비교 분석한다. 채널용량 C는 식(32)와 같다.

$$C = (1-P_D) \left\{ \log[Q(1-P_D)(1-P_I)] - \sum_{i=1}^Q \binom{Q-1}{i-1} P_I^{i-1} (1-P_I)^{Q-i} \log A(i) \right\}$$

$$+ P_D \left\{ \log[QP_D P_I] - \sum_{i=0}^{Q-1} \binom{Q-1}{i} P_I^i (1-P_I)^{Q-1-i} \log A(i) \right\} \quad (32)$$

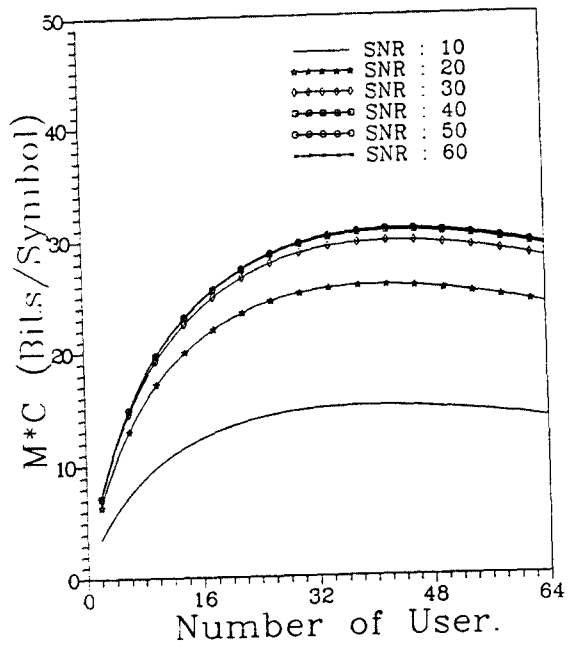
스펙트럼 효율 η 는 식(33)과 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{\text{전송되는 총 정보비트(bits/sec)}}{\text{시스템의 전체 대역폭(Hz)}}$$

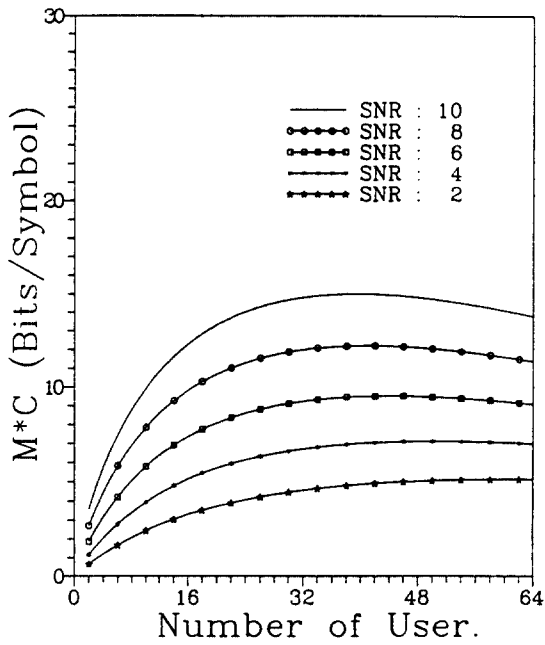
$$= M \cdot C \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{W} = \frac{M \cdot C}{Q} \quad (33)$$

한편, 주파수 재사용인 경우 각 셀에서 사용할 수 있는 시스템 대역폭이 $1/N$ 이 되므로 스펙트럼 효율 η_r 은 식(34)와 같다.

$$\eta_r = \frac{M \cdot C}{N \cdot Q} \quad (34)$$

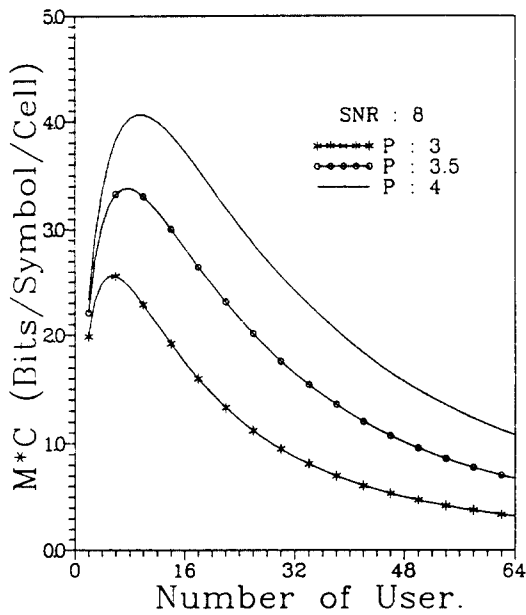


(a) SNR > 10

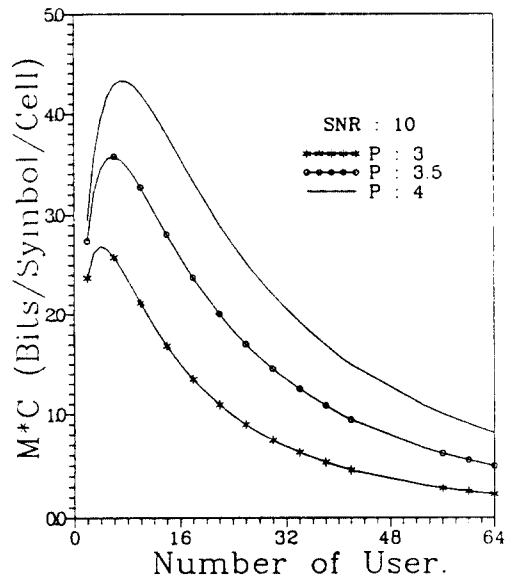


(b) SNR=10

그림 4. 단일 셀인 경우의 스펙트럼 효율(Q=64)
Fig 4. The Spectral Efficiency vs. # of Users for Single Cell(Q=64)



(a) SNR=8dB



(b) SNR=10dB

그림 5. 셀룰라 구성시 스펙트럼 효율(Q=64)
Fig 5. The Spectral Efficiency vs. # of Users for Cellular Configuration(Q=64)

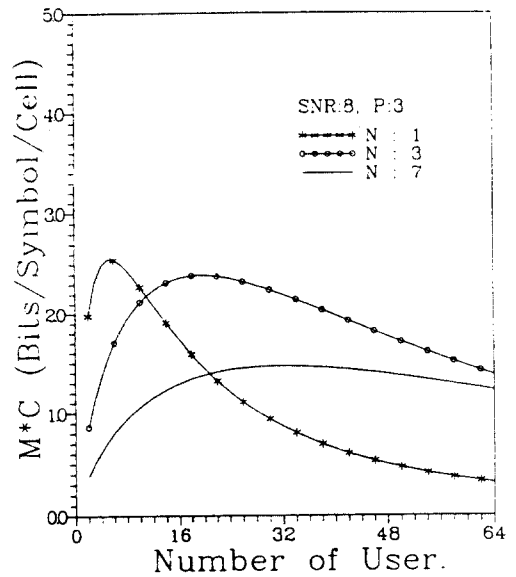


그림 6. 주파수 재사용시 스펙트럼 효율(Q=64, SNR=8dB, p=3)
Fig 6. The Spectral Efficiency vs. # of Users for Frequency Reuse(Q=64, SNR=8dB, p=3)

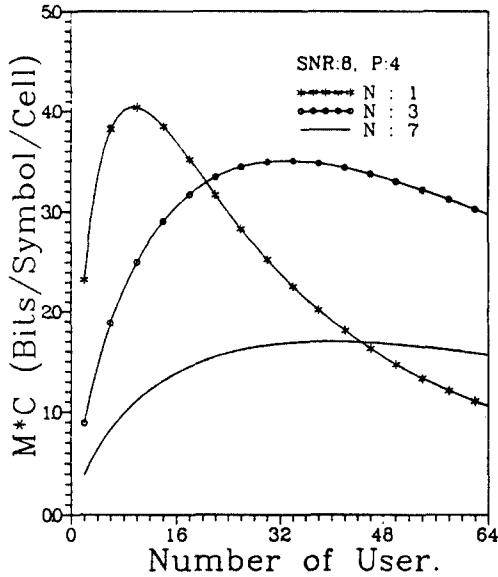


그림 7. 주파수 재사용시 스펙트럼 효율(Q=64, SNR=8dB, p=4)
 Fig 7. The Spectral Efficiency vs. # of Users for Frequency Reuse(Q=64, SNR=8dB, p=4)

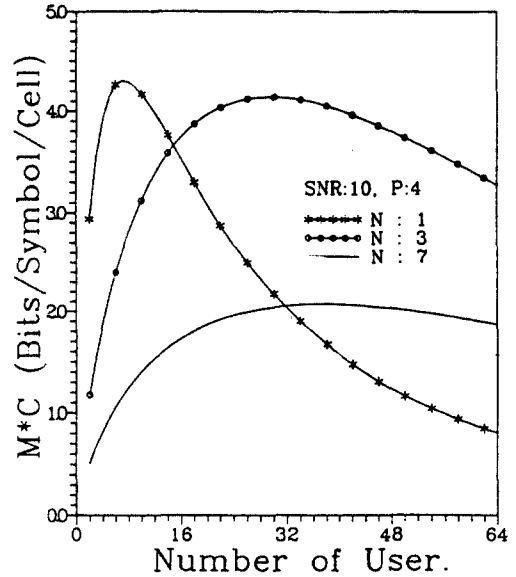


그림 9. 주파수 재사용시 스펙트럼 효율(Q=64, SNR=10dB, p=4)
 Fig 9. The Spectral Efficiency vs. # of Users for Frequency Reuse(Q=64, SNR=10dB, p=4)

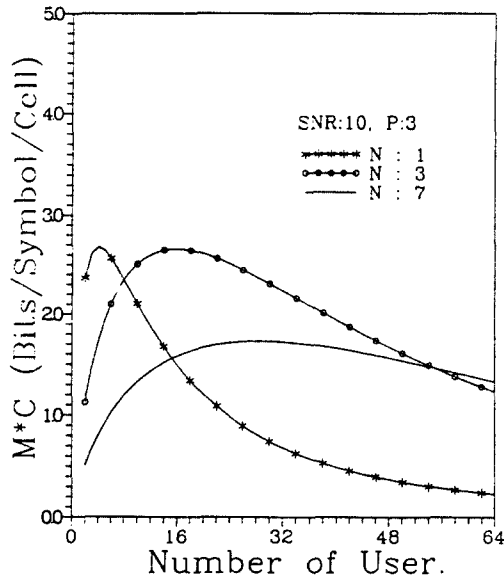


그림 8. 주파수 재사용시 스펙트럼 효율(Q=64, SNR=10dB, p=3)
 Fig 8. The Spectral Efficiency vs. # of Users for Frequency Reuse(Q=64, SNR=10dB, p=3)

V. 결 론

본 논문은 AWGN과 레일레이 페이딩이 공존하는 셀룰라 이동통신에서 FH/MFSK 시스템의 천이확률과 채널용량을 유도하여 단일 셀과 셀룰라 구성, 그리고 주파수를 재사용할 때 나누어 비교하였다.

단일 셀에서는, SNR이 증가함에 따라 스펙트럼 효율이 증가하나 40dB 이상에서는 성능의 개선이 없음을 알 수 있었다. 셀룰라 구성인 경우는 인접셀에서의 간섭의 영향 때문에 단일셀보다도 성능이 떨어짐을 알 수 있었다. 주파수 재사용인 경우는 주파수 재사용 패턴 N=3일 때가 성능이 우수함을 알 수 있었다.

이 논문은 1990년도 한국통신학회의 지원을 받아 수행된 연구임

참 고 문 헌

1. V.H.McDonald, "The Cellular Concept", B.S.T.J., Vol. 58, No.1, pp.14-41, Jan.1979.
2. G.R.Cooper and R.W.Nettleton, "Cellular Mobile Technology : The Great Multiplier", IEEE Spectrum Vol.20, No.6, pp.30-37, June 1983.
3. R.H.Frenkiel, "A High-Capacity Mobile Radio Telephone System Modeled Using a Coordinated Small Zone Approach", IEEE Trans. Veh. Tech., Vol.VT-19, pp.173-177, May 1970.
4. K.Feher, Digital Modulation Techniques in An Interference Environment, Vol.9 of EMC Encyclopedia, Germantown, Maryland : Don White Consultants, 1977.
5. William C.Y.Lee, Mobile Communications Design Fundamentals, Howard W.Sams & Co. 1986.
6. R.Muamar and S.C.Gupta, "Cochannel Interference in High Capacity Mobile Radio Systems", IEEE Trans. Comm., Vol.Com-30, No.8, pp.1973-1978, Aug. 1982.
7. W.C.Jakes, Microwave Mobile Communications, John Wiley & Sons, 1974.
8. John D. Oetting, "A Comparison of Modulation Techniques for Digital Radio", IEEE Trans. Comm., Vol.Com 27, No.12, pp.1752-1762, Dec.1979
9. R.Maciejko, "Digital Modulation in Rayleigh Fading in the Presence of Cochannel Inteferece and noise", IEEE Trans. Comm., Vol.Com 29, No.9, pp.1379-1386, Sep.1982.
10. Richard C. French, "The Effect of Fading and Shadowing on Channel Reuse in Mobile Radio", IEEE Trans. Veh. Technol., Vol.VT 28, No.3, pp. 171-181, Aug.1979.
11. R.L.Pickholtz, D.L.Schilling, and L.B.Milstein, "Theory of Spread Spectrum Communications A Tutorial", IEEE Trans.Comm., pp.855-884, May 1982.
12. A.J.Viterbi, "Spread Spectrum Communications Myths and Realities", IEEE Comm. Magazine, pp. 11-18, May 1979.
13. D.J.Goodman, P.S.Henry and V.K.Prubhu, "Frequency Hopped Multiple FSK for Mobile Radio", B.S.T.J., Vol.59, No.7, pp.1257-1275, Sep 1980.
14. A.J.Viterbi, "A Processing Satellite Transponder for Multiple Access by Low Rate Mobile Users", Proc. Digital Satellite Commun. Conf.Montreal, pp.166-174, Oct.1978.
15. R.Cooper, W.Nettleton, "A Spread Spectrum Technique for High Capacity Mobile Communications", IEEE Trans. Veh. Technol, Vol.VT-27, pp.264-275, Nov.1978.
16. Young Yeul Han and R.E.Ziemer, "A Frequency Hopped MFSK Communication System for Multiple Access", 1989 IEEE MILCOM Proc., Vol.1 pp.139-143, Boston, 1989.
17. 이창훈, 박장규, "캐이닝 채널하에서의 디이머지터 기법을 이용한 주파수 도약 MFSK 다중접속 시스템의 성능 분석", 한국통신학회, 하계학술발표회논문집, pp.91-96, 1990.
18. 지영호, 한영연, "비동기 FH/MFSK 반복 전송시스템의 성능분석", 한국통신학회논문집, 제13권 2호 pp. 120-126 1988.
19. 황용길, 한영연, "잡음과 Partial Band Jamming의 영향을 고려한 FH/MFSK 통신방식의 성능분석", 한국통신학회, 춘계학술발표회논문집, pp.137-141, 1988.

부록

〈FH / MFSK 시스템의 채널용량〉

주어진 서브슬롯 동안에 주파수 칩 사이가 독립이고, 입력 알파벳 크기가 Q, 출력 알파벳의 크기가 2^Q개, 채널의 모델과 결정 전이확률을 표시하면 아래와 같다.

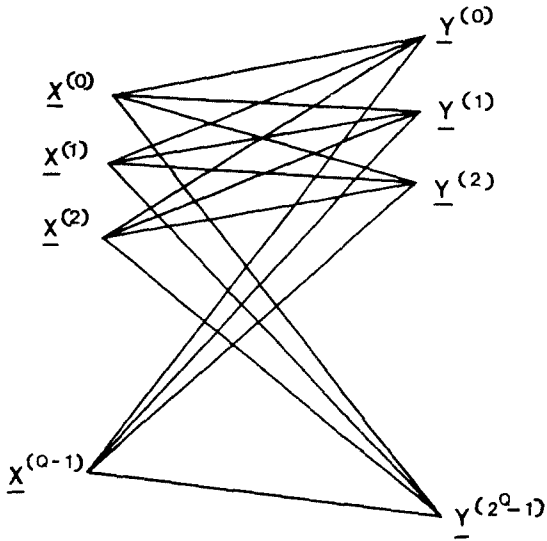


그림 10. 채널 모델
Fig 10. Channel Model of the FH / MFSK System

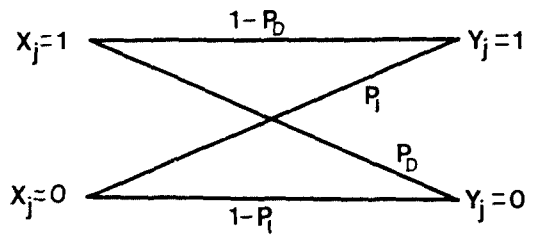


그림 11. 결정 전이 확률
Fig 11. Transition Probability for the Hard Decision Channel

상호 정보량은 식(1)과 같이 주어지며,

$$\begin{aligned}
 I(\underline{X}^{(K)}; \underline{Y}) &= \sum_j P(\underline{Y}^{(j)} | \underline{X}^{(k)}) \log \frac{P(\underline{Y}^{(j)} | \underline{X}^{(k)})}{\sum_n P(\underline{X}^{(n)} | \underline{Y}^{(j)} | \underline{X}^{(k)})} \\
 &= \sum_j P(\underline{Y}^{(j)} | \underline{X}^{(k)}) \log \frac{P(\underline{Y}^{(j)} | \underline{X}^{(k)})}{P(\underline{Y}^{(j)})} \quad (1)
 \end{aligned}$$

다른 모든 입력 알파벳에 대한 분호확률 $q(\underline{X})$ 는 $\frac{1}{Q}$ 이다.
출력 래터 $\underline{Y}^{(j)}$ 의 조건부 확률은 식(2)와 같으며,

$$\begin{aligned}
 P(\underline{Y}^{(j)} \in \mathbf{s}_i | \underline{X}^{(k)}) &= \prod_{l=0}^{Q-1} P(Y_l^{(j)} | X_l^{(k)}) \\
 &= \begin{cases} (1-P_D) P_I^{i-1} (1-P_I)^{Q-1} & : k=l \\ P_D P_I^{i-1} (1-P_I)^{Q-1-i} & : k \neq l \end{cases} \quad (2)
 \end{aligned}$$

이것은 특정한 출력 래터의 함수가 아니라 출력 래터 속의 1의 수의 함수가 된다. 출력 알파벳 2^Q 개의 래터를 g_i 로 표시된 $Q+1$ 개의 부그룹으로 나눈다. g_i 속에 있는 모든 래터는 정확히 i 개의 1을 갖는다. 그룹 g_i 에서 모든 래터에 대해서, 에너지 검출기 출력단에서는 다음과 같은 작업을 행한다.

$$Y^{\phi} = g_i, \text{ 필요충분조건 } W(\underline{Y}^{\phi}) = i$$

여기서 $W(\cdot)$ 는 이진 벡터 속에 있는 1의 수를 나타낸다. 채널용량 C 는 (3)식과 같이 표현되며,

$$C = \sum_{j=0}^Q \sum_{\underline{Y}^{(j)} \in \mathbf{s}_i} P(\underline{Y}^{(j)} | \underline{X}^{(k)}) \log \frac{P(\underline{Y}^{(j)} | \underline{X}^{(k)})}{P(\underline{Y}^{(j)})} \quad (3)$$

확률 $P(\underline{Y}^{\phi})$ 는 (4)식과 같다.

$$\begin{aligned}
 P(\underline{Y}^{(j)} \in \mathbf{s}_i) &= \sum_{l=0}^{Q-1} q(\underline{X}^{(l)}) P(\underline{Y}^{(j)} \in \mathbf{s}_i | \underline{X}^{(l)}) \\
 &= \frac{i}{Q} (1-P_D) P_I^{i-1} (1-P_I)^{Q-i} + \frac{Q-i}{Q} P_D P_I^i (1-P_I)^{Q-1-i} \quad (4)
 \end{aligned}$$

(3)의 안쪽 합연산을 풀기 위해 소실이 있는 그룹과 없는 그룹으로 나눈다. 주어진 입력 래터 $\underline{X}^{(k)}$ 에 대해서, 모든 출력 래터의 k 번째 요소는 1이다. 다른 임의의 $Q-1$ 요소 속에는 $i-1$ 의 삽입이 있을 수 있으므로, 소실이 없을 출력 래터의 수는 $\frac{[Q-1]}{i}$ 이며, i 개의 1을 갖는 나머지 $\frac{[Q-1]}{i}$ 의 출력래터는 소실을 포함한다.

$$\begin{aligned}
 C = & \sum_{i=1}^Q \left\{ \binom{Q-1}{i-1} (1-P_D) P_I^{i-1} (1-P_I)^{Q-i} \right. \\
 & \left. \cdot \log \frac{(1-P_D) P_I^{i-1} (1-P_I)^{Q-i}}{\frac{1}{Q} [i(1-P_D) P_I^{i-1} (1-P_I)^{Q-i} + (Q-i) P_D P_I^i (1-P_I)^{Q-1-i}]} \right\} \\
 & + \sum_{i=0}^Q \left\{ \binom{Q-1}{i} P_D P_I^i (1-P_I)^{Q-1-i} \right. \\
 & \left. \cdot \log \frac{P_D P_I^i (1-P_I)^{Q-1-i}}{\frac{1}{Q} [i(1-P_D) P_I^{i-1} (1-P_I)^{Q-i} + (Q-i) P_D P_I^i (1-P_I)^{Q-1-i}]} \right\} \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C = & \sum_{i=0}^Q \left\{ \binom{Q-1}{i-1} (1-P_D) P_I^{i-1} (1-P_I)^{Q-i} \cdot \log \frac{Q(1-P_D)(1-P_I)}{A(i)} \right. \\
 & \left. + \binom{Q-1}{i} P_D P_I^i (1-P_I)^{Q-1-i} \log \frac{Q P_D P_I}{A(i)} \right\} \\
 & \text{여기서, } A(i) = i(1-P_D-P_I) + Q P_D P_I \\
 = & (1-P_D) \left\{ \log [Q(1-P_D)(1-P_I)] \sum_{i=1}^{Q-1} \binom{Q-1}{i-1} P_I^{i-1} (1-P_I)^{Q-i} \right. \\
 & \left. - \sum_{i=1}^Q \binom{Q-1}{i-1} P_I^{i-1} (1-P_I)^{Q-i} \log A(i) \right\} \\
 & + P_D \left\{ \log [Q P_D P_I] \sum_{i=0}^{Q-1} \binom{Q-1}{i} P_I^i (1-P_I)^{Q-1-i} \right. \\
 & \left. - \sum_{i=0}^{Q-1} \binom{Q-1}{i} P_I^i (1-P_I)^{Q-1-i} \log A(i) \right\} \quad (6)
 \end{aligned}$$

채널용량 C는 식(7)과 같다.

$$C = (1-P_D) \left\{ \log[Q(1-P_D)(1-P_I)] - \sum_{i=1}^Q \binom{Q-1}{i-1} P_I^{i-1} (1-P_I)^{Q-i} \log A(i) \right\} + P_D \left\{ \log[QP_D P_I] - \sum_{i=0}^{Q-1} \binom{Q-1}{i} P_I^i (1-P_I)^{Q-1-i} \log A(i) \right\} \quad (7)$$

여기서, $A(i) = i(1-P_D-P_I) + QP_D P_I$



晉奉哲(Bong Cheol JIN) 正會員
 1989年 2月: 한양대학교 전자통신공학과 졸업
 1991年 2月: 한양대학교 대학원 전자통신공학과 졸업(공학석사)
 1991年 2月~現在: 국방과학연구소 연구원
 주관심분야: 디지털 통신시스템, 확산대역통신, 이동통신



朴尚奎(Sang Kyu PARK) 正會員
 1951年 10月 21日生
 1974年 2月: 서울대학교 電氣工學科 學士
 1980年 5月: 美國 Duke Univ. 電氣工學科 碩士
 1987年 1月: 美國 Univ. of Michigan 電氣工學科 博士
 1976年 7月~1978年 10月: 國防科學研究所 研究員
 1987年 3月~現在: 漢陽大學校 電子通信工學科 助教授 Electronic Communication Engi.



韓榮烈(Young Yearl HAN) 正會員
 1938年 6月 10日生
 1960年: 서울대학교 電子工學科 卒業
 1974年: 美國 미주리 주립大學校(工學碩士)
 1979年: 美國 미주리 주립大學校(工學博士)
 1988年: 美國 코로라도 주립大學校(客員教授)
 1980年~現在: 漢陽大學校 電子通信工學科 教授
 1981年~1990年: 本學會 이시 상임이사
 1991年: 本學會 副會長