

[4-1] 이동 위성 통신용 변조방식의 식별에 관한 연구

°조 동 호*, 김 병 진*

*경희대학교 전자계산공학과

A Study on the Identification of the Modulation Type for the Mobile Satellite Channel

°Dong-ho Cho*, Byung-jin Kim*

*Dept. of Computer Eng., Kyung Hee University

ABSTRACT

In this paper, the characteristics of the modulation type for the mobile satellite channel have been studied and the features of the mobile satellite channel have been investigated. Then, three kinds of classification algorithms for the modulated signals have been applied and their performances have been researched through the computer simulation.

In case that the channel is ideal, the FSK and PSK could be identified easily by using the characteristics of the modulated signals like the envelope/differential phase, correlation and signal constellation. Especially, using the correlation or envelope/differential phase property, the FSK and MSK could be classified exactly. However, when the modulated signals are received through the fading channel, it could be seen that the performances of the three classification algorithm decrease rapidly as the fading effect and Gaussian noise increase.

Also, whether the satellite channel is ideal or not, it can be seen that the performance of the correlation algorithm among the three classification algorithm is superior to that of other algorithms because of the correlation being robust to the characteristics of fading channel and Gaussian noise.

1. 서론

정보화 사회가 도래함에 따라 다양한 부가가치 서비스가 무선 통신망을 통해 제공될 것이 예상되므로, 통신선을 효율적으로 활용하고 신속한 정보 서비스를 제공하기 위해서 입력신호의 형식에 관한 연구가 본격적으로 이루어질 것이다. 최근에 선진 외국에서는 유선통신망을 이용한 정보 서비스 뿐만 아니라 무선 통신망 및 위성 통신망을 통한 고정 및 이동 데이터 서비스가 제공되고 있다. 이와같은 상황에서 송수신측이 데이터를 제대로 주고 받기 위해서는 변조방식, 반송파 주파수, 전송속도 등의 기본정보를 미리 알고 있어야 한다. 즉 종합정보통신망이 구축되어 유선 및 무선의 다양한 서비스가 제공되면 통신 회선을 효율적으로 활용하기 위해서는 변조방식, 전송속도,

반송파 주파수 등이 송수신단에 이미 고정되지 않고 회선의 상태 및 품질, 트래픽 양에 따라 적절하게 변해야 하며, 이 경우에는 수신단에서 신호를 분석하여 해당 정보를 추출할 수 있어야 한다.

특히 정보 제공업자는 각양각색의 가입자 단말기를 지원하기 위해서 변조 방식, 전송속도, 반송파 주파수 등을 수시로 파악해야 한다. 송수신 양측에서 변복조 방식, 전송속도, 반송파 주파수 등이 고정되지 않고 가입자 및 통신망 사정에 따라 가변되므로 정확한 수신을 위해서 입력 신호 형식이 제대로 추정되어야 한다. 그런데 수신신호로부터 변조방식에 대한 정보를 추출하는 것은 어려운 문제이다.

지금까지는 진폭, 순간 주파수, 위상등의 특성변수를 이용하여 ASK, FSK, PSK, AM 변조신호의 형태를 추정했거

나, 위상성분을 이용하여 CW, BPSK, QPSK 등의 변조형태를 식별하였다. 또한 변조 신호에 대한 각각의 직교성분의 제곱값을 합한 특성변수의 도수분포를 이용하여 PSK 신호와 MSK 신호를 판별하였으며, 포락선 특성, 반송 주파수, 보드폭 등을 조사하여 FSK, PSK, QAM 등의 변조 특성을 식별하였다. 이 밖에 변조된 신호의 spectral 상관성에 대한 연구와 디지털 변조방식인 QAM 에 대한 검출 연구가 진행되고 있다.

서론에 이어 제 2 장에서는 위성통신에서 사용하고 있는 변조방식의 특성을 기술하고, 제 3 장에서는 이동위성 채널의 특성을 설명한다. 또한 제 4 장에서 변조 형태의 판별 알고리즘에 대해 기술하며, 제 5 장에서 변조 형태의 판별 알고리즘에 관한 시뮬레이션 결과를 분석한다. 마지막으로 제 6 장에서 결론을 맺는다.

2. 위성 통신용 디지털 변조방식

2.1 FSK 방식

기저대역 디지털 신호의 부호에 대응하여 반송파의 순시 주파수를 바꾸는 방법으로서 FSK는 다음과 같이 표시된다.

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(\omega_1 T + \theta), & 1 \text{ 일때} \\ A \cos(\omega_2 T + \theta), & 0 \text{ 일때} \end{cases}$$

단, $0 \leq t \leq T$

여기서, A는 진폭을 나타내고 ω_1 및 ω_2 는 1 또는 0 일때의 각 주파수를 표시하며, θ 는 초기 위상이다. FSK 방식의 블록도가 그림 1 에 나타나 있다.

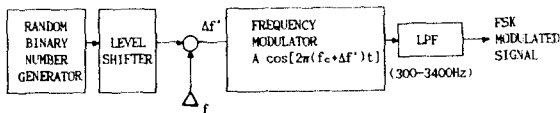


그림 1. FSK Signal Generation

2.2 MSK 방식

MSK 변조방식은 CPFSK 방식의 특수한 경우로서, frequency deviation인 Δf 가 두개의 FSK 신호를 coherent orthogonal 하도록 정해주는 값중에서 최소값이라는 관점에서 minimum shift keying (MSK) 또는 fast frequency shift keying (FFSK)이라고 한다. 변조신호 $s(t)$ 는 $A \cos [2\pi (f_c \pm \Delta f) t + \theta]$ 로 표시되는데, MSK 에서 $\Delta f = 1/4T$ 이므로 $s(t)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} s(t) &= A \cos [2\pi (f_c + \Delta f) t + \theta] \\ &= A \cos (2\pi \Delta f t) \cos (2\pi f_c t + \theta) \\ &\quad - A \sin (2\pi \Delta f t) \sin (2\pi f_c t + \theta) \\ &= A \cos \left(\frac{\pi t}{2T} \right) \cos (2\pi f_c t + \theta) \\ &\quad - A \sin \left(\frac{\pi t}{2T} \right) \sin (2\pi f_c t + \theta) \end{aligned}$$

위 식에서 MSK 신호는 심볼 주기가 $2T$ 이고, 사인파의 포락선을 갖는 서로 직교하는 2 개의 2상 PSK 신호가 T 만큼 시간적으로 어긋나게 합성한 것임을 알 수 있다. MSK 변조신호를 발생시키는 블록도가 그림 2 에 그려져 있다.

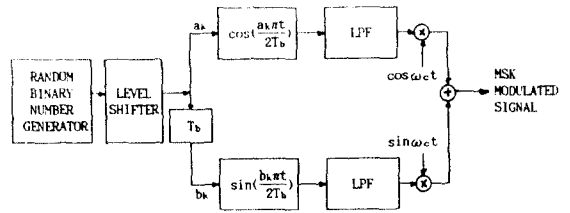


그림 2. MSK Signal Generation

2.3 PSK 방식

PSK 방식은 기저대역 디지털 신호의 부호에 대응하여 반송파의 위상을 변화시키는데, 변조 신호 $s(t)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$s(t) = A \cos [\omega_c T + \theta(t)]$$

PSK 변조 방식으로는 binary PSK(BPSK), quadriphase PSK(QPSK) 및 M-ary PSK 등이 있다. BPSK 변조 신호에서는 $\theta(t)$ 의 값이 0 또는 π 값을 가지며, QPSK 변조 신호에서는 $\theta(t)$ 의 값이 $\pi/4, -\pi/4, 3\pi/4, -3\pi/4$ 중 어느 하나의 값을 갖게 된다. Offset-keyed QPSK 변조방식은 QPSK 방식에서 quadrature 성분을 one bit period 만큼 지연시킴으로써 amplitude envelope variation 을 줄이는 방식이다. 한편 8-PSK 방식은 f_c 를 serial bit rate라 할때 이것을 $f_c/3$ 로 나눈 3개의 parallel 데이터 sequence인 A_k, B_k, C_k 중에서 $A_k C_k$ 와 $B_k C_k$ 두개의 데이터 sequence 를 각각 2 level to 4 level converter 로 통과 시킨 후에 그것을 double sideband suppressed carrier (DSB-SC)로 변조시킨다. 전형적인 QPSK 및 OKQPSK 변조신호의 발생기법이 그림 3 에 표시되어 있다.

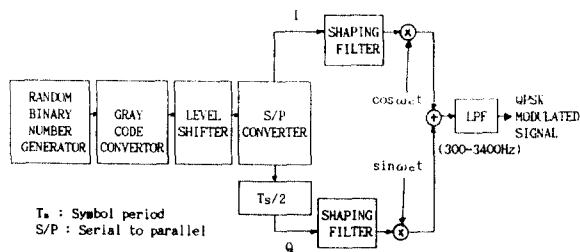


그림 3. QPSK Signal Generation

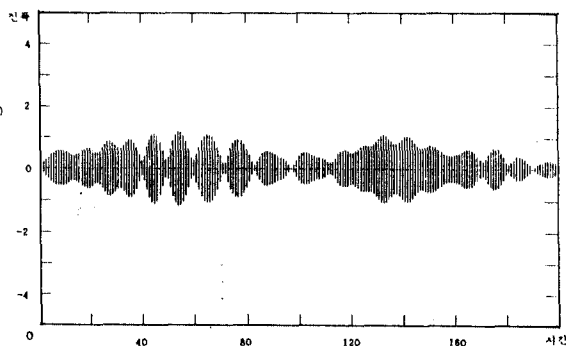


그림 5. 페이딩 채널을 통해서 수신된 신호의 진폭특성

3. 이동 위성채널의 특성

위성을 이용하여 육상 이동 단말기를 서비스할 경우에는 빌딩이나 다리과 같은 방해물 때문에 위성신호의 반사에 의해 다중경로 페이딩 현상이 발생한다. 협대역통신에서는 페이딩 현상이 frequency selective 하지 않고 페이딩 과정의 전력스펙트럼 밀도의 차단주파수는 $f_c = v/\lambda$ 이다. 따라서 페이딩 현상은 전송속도에 비해 천천히 변화하게 된다. 가려진 곳이 없는 지역에서는 반사와 성분의 신호가 더해져서 수신전력의 확률밀도함수는 Rician 분포를 갖게 된다. 또한 가려진 곳이 있는 지역에서는 육상 이동 채널과 비슷하게 수신전력의 확률밀도함수가 Rayleigh log normal 분포 특성을 갖는다.

Shadowing 과정은 Gilbert - Elliott 모델로 모델링 될 수 있는데 양호한 상태는 Rician 페이딩을 갖고 있는 unshadowed 영역에 대응되고, 불량한 상태는 Rayleigh log normal 분포 특성을 갖는 shadowed 영역에 해당된다. 이와 같은 페이딩 현상은 주로 위상이 시간적으로 변화기 때문에 발생하는데, 어떤 경우에는 수신신호의 진폭이 커지고 어떤 경우에는 진폭이 작아지기도 한다. 페이딩 채널의 주파수 특성과 페이딩 채널을 통해서 수신된 신호의 진폭 특성이 각각 그림 4 와 그림 5 에 표시되어 있다.

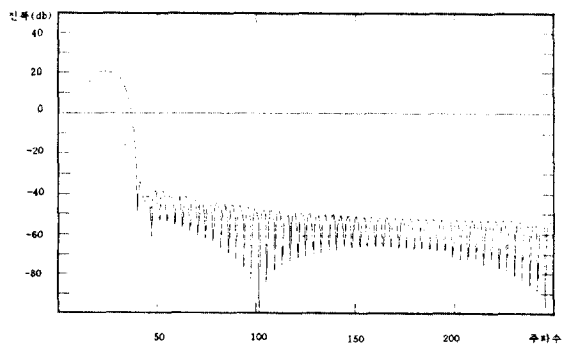


그림 4. 페이딩 채널의 주파수 특성

4. 변조신호의 판별 알고리즘

4.1 포락선과 위상차의 특성을 이용한 변조 식별 알고리즘

(1) 위상차의 추출

선형위상변조 신호는 일반적으로 다음과 같이 표시된다.

$$X(k) = A \cos(\omega_c k + \phi(k))$$

여기서 A 는 전송신호의 진폭이고, ω_c 는 반송주파수이며, $\phi(k)$ 는 위상변조 함수이다. 이러한 X(k)에 대한 analytic 신호 $\tau(k)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau(k) &= A \exp[j(\omega_c k + \phi(k))] \\ &= A [\cos(\omega_c k + \phi(k)) + j \sin(\omega_c k + \phi(k))] \end{aligned}$$

$\tau(k)$ 의 위상함수는 arctan 방법에 의해서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P(k) &= \arctan [I_m[\tau(k)] / R_o[\tau(k)]] \\ &= \omega_c k + \phi(k) \end{aligned}$$

위상함수를 미분하면 순시 주파수를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} P'(k) &= \frac{\Delta P(k \Delta t)}{\Delta t} = \frac{P(k \Delta t) - P((k-1) \Delta t)}{\Delta t} \\ &= \omega_c + \phi'(k) \end{aligned}$$

따라서 반송 주파수는 $P'(k)$ 의 평균값으로 추정할 수 있는데, 위상변조 함수성분인 $\phi'(k)$ 가 위상변화가 있을 때마다 펄스를 발생시키므로 신뢰성 있게 반송주파수를 추정하기 위해서는 clipping을 사용해야 한다. 일반적으로 f_c 는 전송신호의 대역폭안에 존재하므로 전송신호의 대역폭으로 clipping을 행한다. 한편 위 식에서 $\phi'(k)$ 는 위상차에 해당되는데, $P'(k)$ 에서 반송파 주파수를 뺌으로써 얻을 수 있다.

(2) 보드웁의 추정

위상차 신호성분 중에서 주기적인 펄스사이의 interval 이 심볼주기의 정수배이므로 앞뒤로 서로 다른 심볼을 갖는 하나의 분리된 심볼이 주어지면 데이터 전송율을 쉽게 구할 수 있다. 일반적으로 경계값을 초과하는 펄스 사이의 최소 샘플수 N_{min} 을 알면 데이터 전송율 f_d 는 다음 같이 표시된다.

$$f_d = f_s / N_{min}$$

여기서 f_s 는 샘플링 주파수이다.

(3) 변조 신호의 식별 알고리즘

포락선과 위상차의 본산을 구하여 변조신호의 형태를 식별한다. DPVAR를 위상차의 본산이라 할때, 변조 형태의 식별과정은 그림 6과 같다.

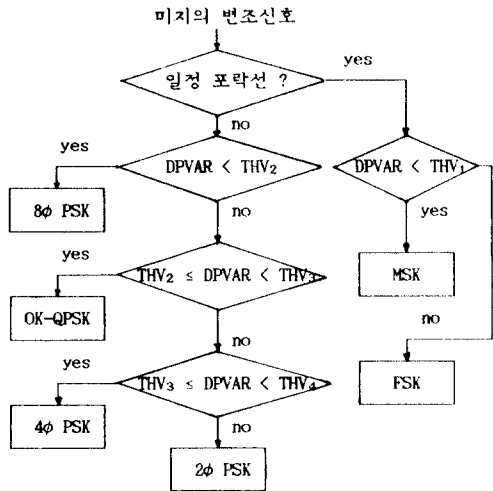


그림 6. 포락선과 위상차를 이용한 변조형태의 식별 흐름도

일정한 포락선을 갖고 있으면 MSK 또는 FSK 로 분류하고 그렇지 않으면 PSK 신호로 판별한다. 이때 MSK 신호의 위상차의 본산이 매우 작다는 성질을 이용하여 MSK 신호와 FSK 신호를 분류한다. 한편 2φ PSK, 4φ PSK, 8φ PSK 신호는 위상차의 본산값을 이용하여 쉽게 분류할 수 있다.

4.2 상관함수를 이용한 변조형태의 판별 알고리즘

변조신호의 상관함수를 구한 후에 여러 종류의 변조 형태의 상관함수와의 유사성을 검증하여 변조형태를 식별하는데 기본과정은 그림 7과 같다.

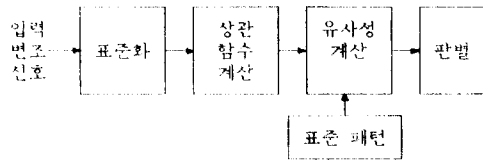


그림 7. 상관함수를 이용한 변조형태의 판별 블록도

위 과정을 간단하게 알고리즘으로 표시하면 다음과 같다.

단계 1)

먼저 여러 변조신호 $x(n)$ 을 표준화한 후에 각각의 자기 상관함수를 다음식에 의해 계산 한다.

$$R_{xx}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{n-1} x(n)x(n+m),$$

$$-(N-1) \leq m \leq (N-1)$$

이렇게 계산된 각각의 자기 상관함수값

$\{r_j(i) : i=0,1, \dots, p\}, j=1,2, \dots, k$ 를 표준 패턴으로 저장한다.

단계 2)

입력 계열 $\{S(n)\}$ 의 자기상관함수 $r_s(i), i=1, 2, \dots, p$ 를 계산한다.

단계 3)

입력 $\{S(n)\}$ 이 각 표준 패턴에 속한다고 가정 했을 때의 유사도를 계산한다.

$$E_j = \sum_{i=1}^p r_j(i)r_s(i), j=1,2, \dots, k.$$

단계 4)

입력 $\{S(n)\}$ 의 변조형태를 $E_j, j=1,2, \dots, k$ 의 최대값으로 결정한다.

4.3 Signal constellation 을 이용한 변조 형태의 판별 알고리즘

수신 신호에 대해서 캐리어 주파수를 구한 후에 그림 8에 나타난 방법을 이용하여 성과점 X, Y를 구한다. 그리고 나서 각도 및 거리를 계산하여 표준 패턴의 성과점과의 유사성을 구한 후에 변조형태를 판별한다.

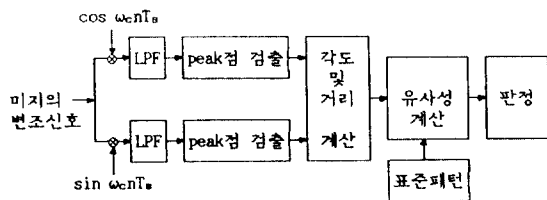


그림 8. Signal constellation을 이용한 변조형태 판별 블록도

구체적인 알고리즘은 다음과 같다.

단계 1)

모든 변조신호의 성과점의 거리와 각도를 구하여 1 사본면의 값만을 표준패턴으로 저장한다.

단계 2)

평균 위상성분의 차이를 표준 주기로 나눔으로써 수신 변조신호의 반송 주파수를 구한다.

단계 3)

수신 신호의 성과점을 구하여 각도와 거리를 계산한다.

단계 4)

수신신호의 성과점과 표준패턴의 성과점의 유사도를 계산하여 어느정도의 오류범위 안에서 일치하는 점이 존재하면 해당되는 성과점의 counter 값을 증가시키고, 일치하는 점이 없으면 어려값을 증가시킨다.

단계 5)

counter 값이 어느 값 이상인 성과점만을 뽑아내어서 변조의 형태를 판정한다.

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

변조된 신호를 수신하였을 때 변조형태를 식별하는 4장에 기술된 알고리즘의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다. 본 논문에서는 이동 위성 통신채널을 이상적인 채널인 경우와 페이딩 채널 등의 크게 두가지로 대별하여 변조형태를 식별하는 알고리즘의 성능을 고찰하였다.

5.1 통신 채널이 이상적인 채널일 때

포락선과 위상차를 이용한 변조 형태의 식별 알고리즘은 표 1 에 나타난 바와 같이 비교적 정확하게 동작함을 알 수 있다. 먼저 포락선의 성질에 의해서 FSK 또는 MSK 방식과 PSK 방식이 구분되며, 위상차의 분산값에 의해 FSK 와 MSK 가 정확히 대별됨을 알 수 있다. 한편 위상차의 분산값에 의해서 BPSK, QPSK, OKQPSK, 8φ PSK 방식이 쉽게 식별됨을 볼 수 있다.

표 1. 이상적인 채널일 때 포락선과 위상차를 이용한 변조 형태의 식별

입력 변조신호의 형태	판별 결과
2φ PSK	2φ PSK
4φ PSK	4φ PSK
OK-QPSK	OK-QPSK
8φ PSK	8φ PSK
FSK	FSK
MSK	MSK

이동위성통신용 변조 방식의 식별에 관한 연구(90964)

상관함수를 이용한 변조 형태의 판별 알고리즘의 성능이 표 2 에 잘 나타나 있는데 상당히 정확함을 알 수 있다. 수신 신호의 자기 상관함수와 표준 패턴과의 유사성을 계산하면 수신신호의 자기 상관함수와 표준 패턴의 자기 상관함수가 일치할때 유사성이 제일 크게되어 변조의 형태 식별이 용이함을 알 수 있다. 이 방식에서는 모든 종류의 변조형태가 쉽게 판별된다.

표 2. 이상적인 채널일 때 상관함수를 이용한 변조 형태의 식별

입력 변조신호의 형태	판별 결과
2φ PSK	2φ PSK
4φ PSK	4φ PSK
OK-QPSK	OK-QPSK
8φ PSK	8φ PSK
FSK	FSK
MSK	MSK

수신된 변조 신호의 캐리어 주파수를 구하고 성과점을 계산한 후 표준 성과점과 비교하여 변조형태를 추정한 결과에 의하면, 표 3 에서 알 수 있듯이 signal constellation 을 이용한 판별 알고리즘이 비교적 정확하게 동작함을 알 수 있다. 다만 원래 signal constellation 을 이용하기에 부적합한 FSK, MSK 방식은 그 식별이 용이하지 않음을 알 수 있다.

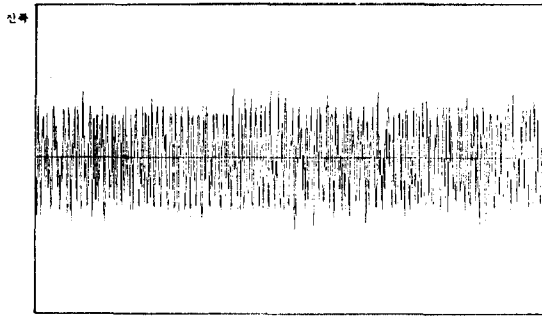
표 3. 이상적인 채널일 때 Signal constellation을 이용한 변조 형태의 식별

입력 변조신호의 형태	판별 결과
2φ PSK	2φ PSK
4φ PSK	4φ PSK
OK-QPSK	4φ PSK
8φ PSK	8φ PSK
FSK	FSK
MSK	FSK

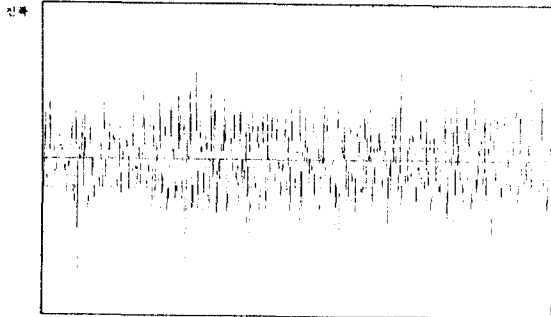
5.2 통신채널이 페이딩 채널일 때

페이딩 이동 위성 채널을 통하여 전송된 변조 신호에 대해서 수신신호의 형태를 살펴보고, 수신측에서 세가지 판별 알고리즘의 성능을 연구하였다. 4φ PSK 로 변조된 신호를 페이딩 채널을 통과 시켰을때의 파형과 스펙트럼이 그림 9 에 표시되어 있다. 페이딩 현상이 존재하면 신

호의 진폭이 변동함을 알 수 있다. 이 경우에도 표 4, 5, 6에서 알 수 있듯이, 페이딩 현상이 적을 때는 세가지 판별 알고리즘이 비교적 잘 동작하지만 페이딩 현상이 심할수록 포락선과 위상차의 분산을 이용한 판별 알고리즘과 signal constellation 을 이용한 판별 알고리즘이 성능이 급격히 저하됨을 알 수 있다. 또한 역시 세가지 판별 알고리즘 중에서 상관함수를 이용한 변조 형태의 판별 알고리즘이 다른 방식보다 페이딩 현상에 상당히 덜 민감함을 알 수 있다.



(a) 송신 변조파형



(b) 수신된 변조파형

그림 9. 페이딩 채널을 통해서 4 ϕ PSK 변조신호를 수신했을 때의 송수신 변조파형

표 4. 페이딩 채널일 때 포락선과 위상차를 이용한 변조 형태의 식별

입력 변조 신호의 형태	0dB일 때의 판별 결과	10dB일 때의 판별 결과	20dB일 때의 판별 결과
2 ϕ PSK	x	x	2 ϕ PSK
4 ϕ PSK	x	x	4 ϕ PSK
OK-QPSK	x	x	OK-QPSK
8 ϕ PSK	x	x	8 ϕ PSK
FSK	x	x	FSK
MSK	x	x	MSK

표 5. 페이딩 채널일 때 Correlation 을 이용한 변조 형태의 식별

입력 변조 신호의 형태	0dB일 때의 판별 결과	10dB일 때의 판별 결과	20dB일 때의 판별 결과
2 ϕ PSK	2 ϕ PSK	2 ϕ PSK	2 ϕ PSK
4 ϕ PSK	4 ϕ PSK	4 ϕ PSK	4 ϕ PSK
OK-QPSK	OK-QPSK	OK-QPSK	OK-QPSK
8 ϕ PSK	8 ϕ PSK	8 ϕ PSK	8 ϕ PSK
FSK	FSK	FSK	FSK
MSK	MSK	MSK	MSK

표 6. 페이딩 채널일 때 signal constellation 을 이용한 변조 형태의 식별

입력 변조 신호의 형태	0dB일 때의 판별 결과	10dB일 때의 판별 결과	20dB일 때의 판별 결과
2 ϕ PSK	x	2 ϕ PSK	2 ϕ PSK
4 ϕ PSK	x	4 ϕ PSK	4 ϕ PSK
OK-QPSK	x	4 ϕ PSK	4 ϕ PSK
8 ϕ PSK	x	x	8 ϕ PSK
FSK	x	x	FSK
MSK	x	x	FSK

6. 결론

본 논문에서는 위성통신에서 사용되고 있는 변조 방식의 동작원리를 연구하고 이동 위성 채널의 특성을 파악한 후에 변조 형태에 대한 식별 알고리즘을 제안하였으며 아울러, 그 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 파악하였다. 이상적인 채널을 통하여 변조 신호가 수신될 때는 포락선과 위상차, correlation, signal constellation 등을 활용하여 상당히 정확하게 FSK, PSK 방식 등을 식별할 수 있었다. 특히 포락선과 위상차, 상관함수를 이용하면 FSK와 MSK 방식도 정확하게 식별할 수 있었다. 그러나 페이딩 채널을 통하여 변조 신호가 수신될 때는 페이딩 왜곡이 크면 클수록, 가우시안 잡음이 많이 섞이면 섞일수록 판별 알고리즘의 성능이 급격히 저하됨을 알 수 있었다. 또한 세가지 알고리즘 중에서 상관함수를 이용한 변조 형태의 판별 알고리즘이 다른 방식보다 페이딩 현상과 가우시안 잡음 등에 덜 민감하여 통신 채널이 이상적이든지 아니든지간에 그 성능이 상대적으로 우월함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 은종관 外, "무제한 한국어 음성 합성 시스템 개발 - 종합정보통신망의 신호 형식 추정에 관한 연구", KAIST, 연구보고서, 1990. 6.
- [2] 조성준 譯, "위성 통신 기술", 대한교과서 주식회사, pp. 215-227, 1986.
- [3] 前田隆正 著, "이동체 통신의 기초", 日刊工業新聞社, 1988.
- [4] 박진규, "단파대역에서의 데이터 통신을 위한 HF 채널 시뮬레이션 및 estimation에 관한 연구", KAIST, 전자과 석사논문, 1988. 2.
- [5] F. Jondral 外, "Automatic Classification of High Frequency Signal", Signal Processing, Vol. 9, No. 3, pp. 177-190, 1985. 10.
- [6] R. J. Mammone 外, "Estimation of Carrier Frequency, Modulation Type and Bit Rate of an Unknown Modulated Signal", IEEE ICC 87, pp. 28.4.1-28.4.7, 1987.
- [7] M. Hagiwara 外, "Basic Study for the Estimation of an Input Signal Type", 전자정보통신학회 논문지, A, Vol. J71-A, No. 2, pp. 411-417, 1988. 2.
- [8] 최각진 外, "복합변복조 기술 개발에 관한 연구", ETRI, 최종보고서, 1988. 5.
- [9] 조동호 外, "국제 표준 변복조 방식의 특성 추출에 관한 연구", 경희대학교, 연구보고서, 1990. 5.
- [10] F. F. Liedtke, "Computer Simulation of an Automatic Classification Procedure for Digitally Modulated Communication Signal with Unknown Parameters", Signal Processing, Vol. 8, No. 6, pp. 311-323, 1984.
- [11] J. Hagenauer 外, "Forward Error Correction Coding for Fading Compensation in Mobile Satellite Channel", IEEE JSAC, Vol. 5, No. 2, pp. 215-225, 1987. 2.