

신 동 일\*                      조 성 준\*\*                      이 원 갑\*\*\*  
\*,\*\* 한국항공대학 통신공학과                      \*\*\* 한국무선총사자협회

The Efficiency of Radio Frequency Spectrum

Dong-Il Shin\*                      Sung-Joon Cho\*\*                      Won-Kap Lee\*\*\*  
\*,\*\* Dept. of Telecommunication, Hankuk Aviation College  
\*\*\* Korea Radio Association

ABSTRACT

This paper presents the concepts of radio frequency spectrum, the efficiency of spectrum, the parameters for evaluating system performance.

The various techniques for improving spectrum utilization are discussed from the standpoint of communication theory.

1. 무선 주파수 스펙트럼

무선 주파수 스펙트럼 (radio frequency spectrum)이란 한 곳에서 다른 곳으로 정보를 무선 전송 하기 위해 사용되는 주파수의 범위를 말한다. 최근, 통신에 대한 수요의 급증으로 무선회선이 매우 부족하게 되었고 이에 따라 스펙트럼의 수요가 증가 일로에 있다.

무선 주파수 스펙트럼은 한정된 자원이기 때문에 이의 효율적인 이용 방안과 적절한 분배 방안 즉, 주파수 할당 방안들이 문제로 대두된다. 여러 분야에서 많은 연구가 진행되고 있으나 현재의 무선 주파수 스펙트럼의 혼잡은 스펙트럼의 효율성이란 문제를 부각 시키고 있다.

스펙트럼 사용상의 효율성은 여러가지 기준 파라미터 들에 의해 구해진다. 이것에는 주파수 대역폭, 복사전력, 서비스 영역 ( service area ), 그리고 전송

경로, 안테나의 형태, 신호파형, 잡음 및 간섭에 대한 배제성 ( immunity ) 관계가든가 시스템의 성능과 가격등이 포함된다. 효율성을 높이기 위해서는

스펙트럼 운용에 관한 새로운 이론이나 기술 또는 방법등이 필요한데 이를 위해서는 여러가지의 변조

기술이나 부호화, 다중화 기술등이 필요하다.

최근들어 좀 더 효율적인 스펙트럼의 이용을 위해서 혼합 변조 기술 ( hybrid or combined modulation technique )등의 사용이 고려되고 있고, 그 외에도 정보원의 용장도 ( redundancy )를 제거 한다든가, 현존하는 채널의 최적 이용을 위한 효율적인 전송 기술을 채용하고 있다.

2. 스펙트럼의 효율성

일반적으로 효율성은 출력과 입력의 비로서 정의된다. 이 개념은 그대로 스펙트럼의 효율성에도 적용되는데 전기통신에서의 출력은 "전달된 정보", 입력은 "사용된 스펙트럼의 스페이스 ( spectrum space used )"로서 표현되며 일반적으로 스펙트럼의 효율성은 다음과 같이 나타낸다.

$$\text{스펙트럼의 효율성} = \frac{\text{(전달된 정보)}}{\text{(사용된 스펙트럼의 스페이스)}}$$

유효성은 서어비스의 형태에 따라 다르게 된다. 여기서 스펙트럼 스페이스는 다음과 같이 표현된다. 스펙트럼 스페이스=(대역폭)x(시간)x(유형의 공간) 위에서 유형 공간 (physical space) 은 서어비스의 형태에 따라 결정되는데 예로서, 방송 업무에서는 서어비스 영역, 정지위성업무에서는 궤도의 길이( length of orbit )가 되며 때에 따라서는 체적으로도 표현되는 경우가 있다. CCIR (국제무선통신자문위원회)에서는 정지위성업무에서의 궤도 사용의 효율성을 다음과 같이 정의하고 있다.

(1) 디지털 변조 시스템:

$$\text{스펙트럼효율성} = \frac{(\text{비트 (bits)})}{(\text{RF대역폭}) \times (\text{궤도의 arc time})}$$

(2) 애널로그 변조 시스템:

$$\text{스펙트럼효율성} = \frac{(\text{정보 대역폭})}{(\text{RF 대역폭}) \times (\text{궤도}) \times (\text{호, arc})}$$

유효성도 역시 출력과 입력의 비로서 그 효율성의 정도를 나타내고 있다.

무선 스펙트럼은 주파수 ( frequency ), 시간 ( time ), 스페이스 ( space ) 의 3 가지 차원 ( dimension ) 을 갖는다. 3 가지 차원간의 관계는 다음과 같다.

(1) SDM(space division multiplexing)

같은 시간에 동일한 주파수를 서로 떨어진 스페이스에서 서로 다른 목적에 사용할 수 있는 방법이다.

(2) TDM(time division multiplexing)

같은 스페이스 내에서 동일한 주파수를 시간만을 달리하여 서로 다른 목적에 사용할 수 있는 방법이다.

(3) FDM(frequency division multiplexing)

서로 다른 주파수를 같은 시간, 같은 스페이스에서 사용할 수 있는 방법이다.

위의 관계로 부터 같은 시간, 같은 스페이스에서는 전송 대역폭을 감소시키므로 그 만큼 많은 주파수 대역을 다른 정보의 전송에 이용할 수 있겠고, 전송에 필요한 유한 스페이스의 감소는 같은 시간, 같은 대역에서 서로 다른 목적의 전송을 그 만큼 증가시킬 수 있겠고 또 전송시간의 감소는 같은 스페이스 내에서 동일한 주파수 대역으로 더 많은 여러가지 정보를 전송할 수 있음을 알 수 있다.

결론적으로 말하면 주어진 정보 전송에 필요한 스펙트럼 스페이스를 감소시킴에 따라 스펙트럼의

효율성을 높일 수 있다 하겠다. 이것에는 위에서 제시한 3 가지 차원(주파수, 시간, 스페이스)의 감소를 위한 여러가지 방법이 존재한다. 그 밖에 특히 주목해야 할 것은 통신로상에서 존재하는 잡음( noise ) 과 간섭(interference)에 대한 문제이다. 그 중 중요한 문제점은 통신용량 및 잡음 배제성을 위한 시스템 대역폭의 제한관계이다. 대역폭의 제한은 결과적으로 심볼간의 에러를 유발시키게 되어 이론상의 해석이 매우 복잡하게 된다.

### 3. 효율성의 평가 파라미터

스펙트럼의 효율성을 평가하는 데에는 여러가지 파라미터들이 필요한데 그 종류는 아래와 같다.

- C 채널용량
- R 정보율
- W 대역폭
- S 신호전력
- N 잡음전력
- P<sub>e</sub> 오류
- n 지연시간
- 외부적인 고려사항

이밖에도 서어비스영역이나 안테나의 형태, 잡음이나 간섭등등이 파라미터로서 작용하게 된다.

(1) 정보율 : 시스템의 정보 전송율

(2) 대역폭 : 이것은 시스템의 대역폭을 말하며,

R/W 의 값은 단위 대역폭당의 정보율을 나타내

는데 이 값은 채널 효율성으로서 고려될 수 있다.

시스템이 높은 효율성을 갖기 위해서는 적은

점유 대역폭에 대해 많은 정보율로써 정보의

전송을 할 수 있어야 한다. 그러나 정보율이

증가함에 따른 시스템의 성능저하를 방지하기

위해서는 그 만큼 대역폭을 증가시켜 주어야 하기

때문에 무조건 정보율을 높인다고 해서 스펙트럼의

효율성이 향상된다고는 볼 수 없다.

(3) 신호전력 : 전송되는 신호전력의 크기를 나타낸다.

(4) 잡음전력 : 전송상 부가되는 잡음전력의 크기이다.

위의 두 파라미터의 비 즉, S/N 이 합성로서 작용되는데 잡음이나 간섭의 영향을 덜 받기 위해서는 S/N 이 높을 필요가 있다. 강한 잡음이나 간섭하에서 전송전력을 매우 높게 하면 그 자체 시스템에서의 잡음이나 간섭의 영향을 줄일 수 있겠지만 반면 다른 시스템에 간섭을 주게 되어 이것에는 어떤 한계점이 존재하게 된다.

그렇다고 해서 유한 스페이스를 확장한다면 스펙트럼의 효율성이 감소된다. 따라서 S/N 비를 향상시키기 위해서는 들어오는 잡음을 줄이는 방법이 최선이 될 것이다.

- (5) 오율 : 이것은 시스템에서 고려되어야 할 가장 중요한 파라미터인데 시스템의 충실도( fidelity ) 또는 신뢰도( reliability ) 의 정도를 나타낸다.
- (6) 지연시간 : 이것은 시스템의 송신장치( transmitter )와 수신장치( receiver ) 에서 기인되는 것인데 부호화( encoding ) 와 복호화( decoding ) 가 어느정도 복잡한가를 나타낸다.
- (7) 외부적인 고려사항 : 시스템을 구성하는 데 있어서의 외부적인 요건 즉, 시스템의 목적, 경비등을 고려하여 위에 제시한 파라미터의 값을 결정하게 되나 임의로 결정할 수는 없고 그의 실현 가능성을 참작해야 한다.

4. 스펙트럼 유효 이용 방법

이것에는 여러가지 방법이 있겠으나 여기에서는 관심의 대상이 될만한 몇가지의 실제적인 방법을 간략하게 살펴 본다.

Shannon 에 의해 채널용량은 다음과 같이

주어진다.

$$C = W \log ( 1 + \frac{S}{N} )$$

단, C ; 채널용량 [bits/sec]

W ; 채널의 대역폭 [Hz]

S/N; 신호전력 대 잡음전력의 비

이 식이 갖는 중요한 의미중의 하나는 시스템에서의 채널용량의 상한( upper limit ) 을 제시하는데 있다.

윗 식을 사용함에 있어서 명심해야 할 것은

- 전송신호와 잡음은 백색( white ) 이고 모두 W[Hz]로 대역제한이 되었다는 점.
- 전송신호와 잡음은 통계적으로 서로 독립이고 정상적인 랜덤 프로세스( stationary random process ) 이고 채널에서 신호와 잡음이 선형적으로 합해진다.
- 수신신호는 평균전력으로 제한되어 있다는 점. 다음에는 스펙트럼의 유효 이용방법을 제시하고 이를 살펴 보기로 한다.

(1) 부호화( coding )

정보이론은 보통 "정보의 전송 문제" 로서 생각할 수 있다. 또한 이것은 정보를 추적해서 한 곳에서 다른 곳으로 옮긴다는 의미에서의 "정보의 추적" 으로서도 중요한 의미를 갖는다.

통신에 있어서 필연적인 잡음의 영향하에서도 좀

더 효율적인 정보의 추적을 위해서는 정보의 부호화가 필수적이라 하겠다. 여기서 정보의 부호화란 정보의 압축이란 말과도 연관이 있다.

정보의 압축을 위한 부호화란 신호에 존재하는

용량도( redundancy , 여분성)를 압축 및 제거함으로써 장거리 전송에 대한 경제성, 고가인 전송설비의 유효이용, 전송대역의 압축등 정보의 효율적인 전송을 피하고자 하는 것이다.

시스템 효율성은 펄스( pulse ) 들이 여러 다양한

진폭치, 주파수 또는 위상, 또는 이러한 것들의 혼합체에 의해 표현되는 경우에 있어서 M - ary 부호화 기법을 사용함으로써 향상될 수가 있다.

① 잡음이 없는 이산적 채널의 경우( noiseless

discrete channel): 이것은 S/N비가 매우

높은 경우 즉, 전송 에러를 무시할 수 있는 경우이다.

부호화는 정보원에 존재하는 용량도를 감소시켜 정보원을 채널에 정합시키기 위해 필요하게 되는데 이때의 부호화를 최소용량도부호화( minimum-redundancy coding )라 한다.

② 잡음이 있는 이산적 채널의 경우( noisy

discrete channel ): 이때의 부호화는 잡음의

영향을 이겨내기 위해 필요하며 채널 심볼에 용량도를 부여하는데 이를 에러 - 정정 부호화( error-correcting coding )라 한다.

현재 이용되고 있는 여러가지 부호( code )들이 만들어질 당시에는 스펙트럼의 효율적 이용이란 관점에서 고안되지는 않았지만 현재의 관점에서 효율성을 증가시키는데 골목할 역할을 하고 있다. 앞으로는 좀 더 스펙트럼의 효율성을 바탕으로 한 새로운 부호를 더 많이 개발할 필요가 있겠다.

(2) 대역폭 - S/N 비의 호환성( bandwidth - S/N ratio trade-off)

대역폭과 S/N 에 있어서 상호간의 최적 절충점을 찾기 위한 호환성의 문제를 살펴 보기로 한다. Shannon

의 채널용량 식,  $C = W \log ( 1 + S/N )$  에서

$S/N = \infty$  (잡음이 없는 채널)일 때는 채널용량은

무한대가 된다. 그러나 실제적으로는 잡음이 존재하기

때문에 대역폭이 무한대가 된다 하더라도 채널용량이

무한대가 되지 않는다. 왜냐하면 잡음전력도 대역폭확장

에 따라 증가하기 때문이다. 따라서 일정한 신호전력에

대해 대역폭을 증가시키는 데에도 상한이 존재하게 된다.

다시 말하면, 어떤 일정한 채널용량을 유지하기 위해서

는 S/N와 대역폭 사이에는 상호 호환성이 있다고 할 수

있다. 이를 효율적인 스펙트럼의 사용이란 관점에서

본다면 채널잡음이 낮을 때에는 신호전력을 증가시키고

그 대신 대역폭을 줄 수도 동일한 채널용량이 얻어질 수 있겠고 채널잡음이 높은 경우는 대역폭을 증가시켜 신호전력을 절약할 수 있다 하겠다.

실계의 그랙프를 이용하여 호환성의 문제를 살펴 보기로 한다. 이것들은  $W/R$  (정규화 채널 대역폭) [Hz/bits/sec] 와  $E_b/N_0$  (비트에너지 대 잡음밀도의 비)와의 호환성 관계를 나타낸 것으로서 이상적인 통신시스템에 있어서의 전력과 대역폭과의 관계를 보인다.

그림에서 살펴 보면 특성 변곡점( knee )이 존재하는데 이 점은 시스템의 경우 채널 대역폭을 감소시키고자 하거나 신호전력을 감소시키고자 할 때 대역폭과 신호전력 상호간에 교환이 행해질 수 있다는 것을 의미한다. 예로서 그림 1 에서  $E_b/N_0$  가 1.8 dB 에서 동작하고 있고 이때의 정규화 대역폭이 0.5 [Hz/bits/sec] 인 이상적인 시스템이 있다고 하자. 지금 점유 대역폭을 0.1[Hz/bits/sec] 로 감소 시키자면  $E_b/N_0$  를 20dB 로 증가시켜야만 한다.

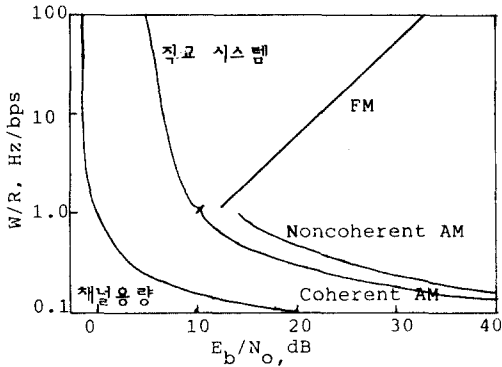


그림.1 시스템의 전력-대역폭 호환성 (오율  $\approx 10^{-6}$ )

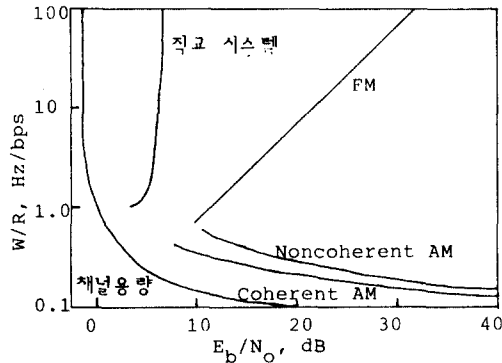


그림.2 양자화 잡음과 예외 잡음 전력이 같은 경우의 전력-대역폭 호환성

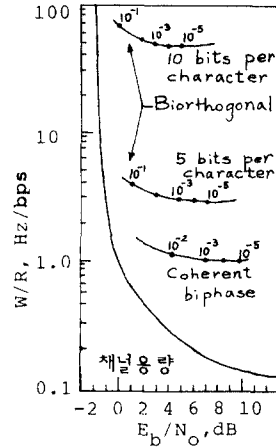


그림.3 코히어런트 biphase 와 biorthogonal 부호화에 대한 전력-대역폭 호환성

다시 말해서 전력을 66배 만큼 증가 시킨다는 것은 대역폭으로 말하면 1/5로 감소 시킨다는 말이다.

대개 호환성 곡선은 전력과 대역폭이 각각 최적이 되는 부근에서 특성 변곡점을 보인다. 시스템 설계에 있어서는 이러한 관계를 잘 이용하여 설계하면 이상적인 시스템에 가까운 것을 얻을 수 있다. (10 dB 이내로 설계 가능)

(3) 혼합변조 기술 (hybrid modulation technique)

스펙트럼의 보다 효율적인 이용을 위하여 최근에 활발히 연구되어 오고 있다. 이 기술은 스펙트럼과 전송 전력 면에서 보다 좋은 효율성을 제시하는 것으로서 반송 파라미터를 두 개 또는 그 이상을 갖는 다중 파라미터 (multiparameter) 변조라고도 한다. 따라서 반송파는 다중 채널정보의 반송파가 된다. 디지털 변조 시스템을 단일 파라미터 변조와 다중 파라미터 변조로 나누어 살펴본다. 디지털 변조시스템의 효율성은  $R/W$

(단위 대역폭당의 데이타율)과 또 주어진 S/N 비에 대한 오율 (error rate) 로서 비교할 수 있다. 채널 효율성과 오율로 부터 단일 파라미터 변조보다는 다중 파라미터 변조가 스펙트럼 이용 면에서는 더 효율적이다.

① 단일 파라미터 변조

이것의 대표적인 것에는 ASK(amplitude-shift keying), PSK(phase-shift keying),

FSK(frequency-shift keying) 등이 있다. 그림.4 에 여러가지 디지털 변조시스템의 S/N 비에 대한 채널 효율성을 나타내었다. 동일한 오율에 대한 단위 대역폭당의 데이타율을 볼 때 가장 효율적인 시스템은 SSB-ASK

(single sideband ASK) 방식이다. PSK 방식에 있어서 높은 데이타율이 요구될 때에는 다 위상 (M-ary) PSK 시스템이 쓰이는데 가장 보편적인

것은 QPSK(quadrature phase-shift keying system) 시스템이다.

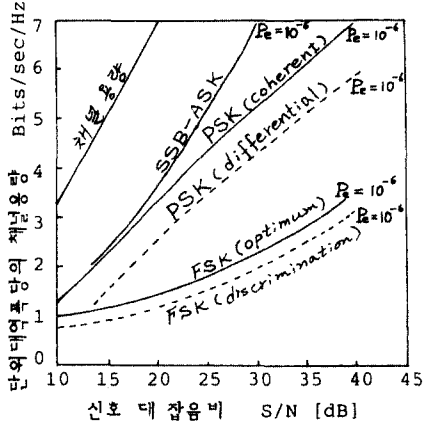


그림.4 여러 디지털 변조시스템의 채널효율성 (오율  $P_e = 10^{-6}$  인 경우)

QPSK의 오율은 BPSK의 오율보다 커지거나 QPSK의 대역폭은 동일 대역폭에 있어서 BPSK의 2배가 된다.

② 다중 파라미터 변조

PSK 시스템에서는 일정한 진폭치의 반송파에 몇 개의 위상값을 부여하여 디지털 신호값에 대응시키게 되는데 위상값과는 별도로 진폭치에도 변화를 주면 더 많은 정보를 보낼 수 있지 않겠는가 하는 개념에서

APK (combined amplitude and phase shift keying) 방식이 개발되게 되었다.

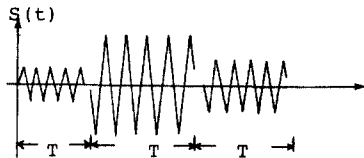


그림. 5 APK의 전송신호

APK System 은 크게 두 가지 형태로 대별

되는데 하나는 진폭과 위상이 서로 독립적인 것이고, 또 하나는 진폭과 위상 상호간에 종속적인 것인데 일반적으로 후자의 것이 더욱 효율적이다. 이들을 그림으로 표현하면 다음과 같다.

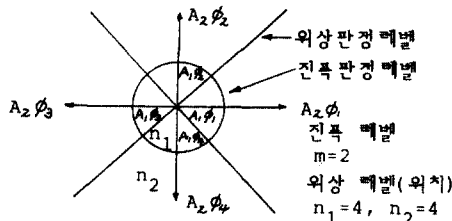


그림. 6 APK 시스템의 관점 매셀 (독립적)

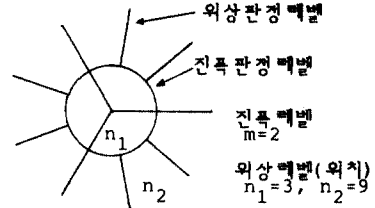


그림.7 APK 시스템의 관점 매셀 (종속적)

APK 시스템에서 T 초 동안에 전송신호의 진폭 및 위상값은 각각 m 개의 진폭값과 n 개의 위상값중의 하나씩을 가지게 된다. 따라서 전송신호의 수 r 은

$$r = m \times n \text{ 가 된다.}$$

그림. 6에서의 전송부호는  $A_i, \phi_j$  로서 나타내어 지는데  $A_i$  와  $\phi_j$  의 값은 A 와  $\phi$  의 각각의

집합에서 독립적으로 선택된 값이다. 그림.7에서는 진폭의 값이 커지면 커질 수록 위상의 위치수가 증가된다.

또 진폭의 값이 증가하면 위상 오율이 감소되고 일정한 위상 오율에서 본다면 높은 진폭값에서의 위상수를 증가시킬 수 있다. 이론적으로 볼때 후자의 시스템이 훨씬 좋다고 보겠으나 실제 시스템의 구성이 매우 복잡하게 된다.

APK 의 최소 오율은

$$P_e = \frac{2 \exp[-P/(8/9r-4/3)]}{\sqrt{\pi} \frac{P}{8/9r-4/3}}$$

또 PSK 에 있어서 S/N 이 높을 때의 오율은 다음과 같다.

$$P_e = \frac{\exp(-S/N \sin^2 \pi/n)}{\sqrt{\pi S/N} \sin \pi/n}$$

다음 그림. 8,9,10 에 APK 시스템과 PSK 시스템을 비교해 놓았다.

그림.8 에서 APK 시스템은 r 이 증가할 수록 S/N 의 향상을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그림. 9 는 이들 두 시스템의 채널 효율성을 나타내는데 11 dB 이상에서는 PSK 에 비해 APK 가 훨씬 효율적임을 알 수 있다.

그림.10 은 SSB-ASK, PSK, APK 시스템에 대한 이론적인 채널 효율성을 보인 것이다.

이론적으로는 APK 방식이 PSK 방식보다 성능면에서 월등히 좋지만 시스템 구성 면에 있어서는 매우 복잡하고 가격면에서 고 비해야 할 점이 있다.

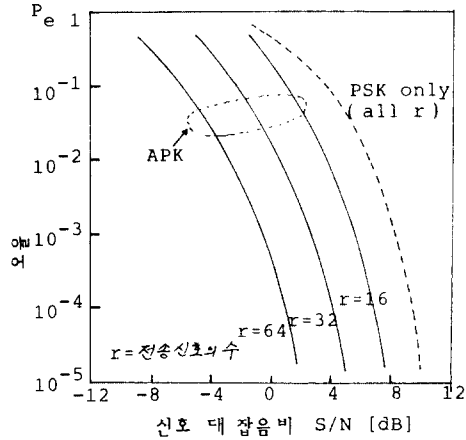


그림. 8 APK와 PSK 시스템의 오율

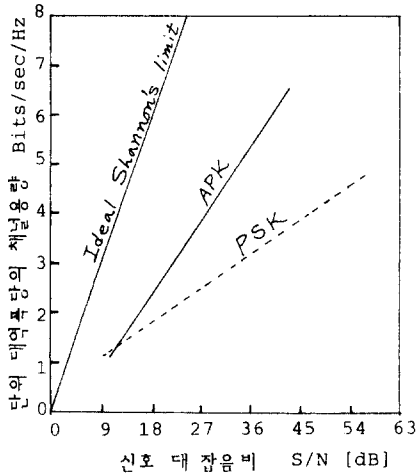


그림. 9 APK와 PSK 시스템의 채널효율성

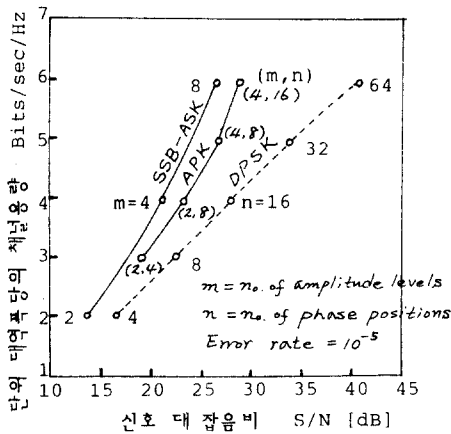


그림.10 디지털 변조 시스템의 이론적 채널효율성

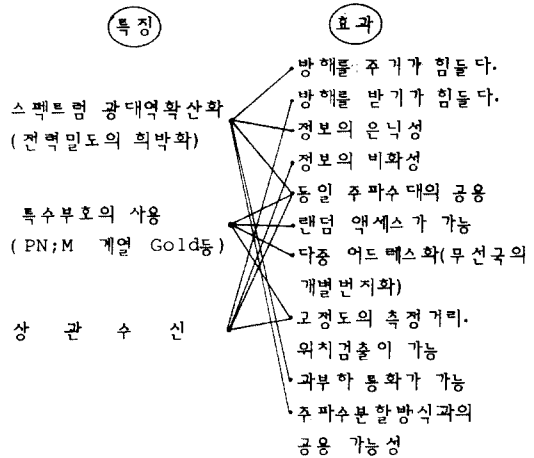
(4) 대역폭 확산 (spread spectrum) 방식

스펙트럼의 새로운 유효이용에 새로운 경지를 개척하는 새로운 통신시스템으로서 각광을 받게된 것이 스펙트럼 확산 방식이다. 약해서 SS 라고도 한다. 1978년 제 14회 CCIR (국제무선통신자문위원회) 총회에서 SS 방식에 대하여 몇가지 문서가 채택되어 연구의 촉진이 요청되고 있으며 비교적 새로운 연구 분야이기 때문에 미국을 중심으로 논문이 급증되고 있고, 내용도 다양하다. 심계 이 방식은 전혀 새로운 방식이 아니라 1940년대로부터 군사목적에 의해 전파방해 배제의 기술로 연구 개발이 진행되어 왔던 방식이다.

SS 방식은 Shannon 의 식  $C=W \log(1+S/N)$ 로부터 상상할 수 있듯이 점유 대역폭  $W$ 를 넓혀 줌으로써 소요되는  $S/N$ 를 적게 해도 채널용량  $C$ 는 일정하게 유지해줄 수 있는 통신방식이다. (여기서 변조 자체에 의해 넓어지는 광대역 FM 방식과는 다음에 주의할 필요가 있다.)

SS방식은 표1에서 보는 것과 같이 큰 특징과 수많은 효과를 발휘할 수 있는 가능성을 가지고 있다.

(표1) SS방식의 특징과 원리



SS 방식은 간섭방해신호의 배제 능력이 크다. 수신기 입력의 신호 대 간섭 방해비 ( $S/I$ ); 는 출력의 신호 대 간섭 방해비 ( $S/I$ ),라 하면 처리

이득(process gain, 처리 이득  $G_p$  = 송신주파수대역폭  $B_{SS}$  / 중간주파수대역폭  $B_m$ )만큼 개선이 된다. 즉 10dB 의 방해 제거비가 출력에 요구되는 경우 처리

이득이 보통 정도인 100이하 하면 입력에서는 -10dB 정도의 간섭방해잡음을 허용할 수 있다. 이 방식의 특징으로서 이러한 개선관계는 입력  $S/I$  의 값에 관계없이 선형 주

비례관계가 성립한다. 다음 그림은 간섭신호 배제의 원리도이다.

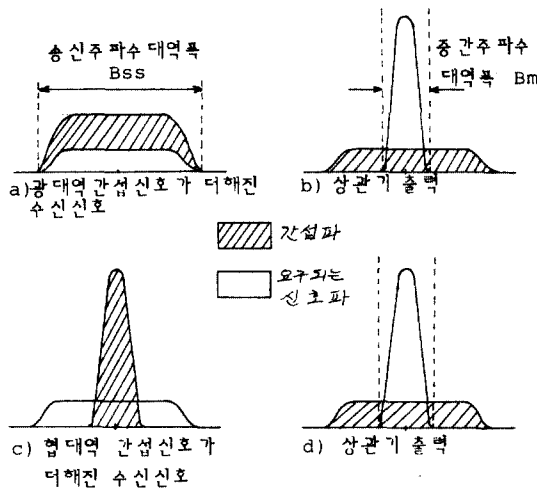


그림. 11 간섭신호 배제의 원리도

여기서 간섭잡음신호는 의사 랜덤 잡음(PN; pseudo random noise) 계열과 상관없이 서로 급하게 되면(확산복조) 더욱 확산되고 기저 대역 필터에서 대부분 제거 되기 때문에 이 경우에 대해서도 저리 이득이 적용된다. 이상의 설명에서 스펙트럼을 확산하면 할수록 간섭잡음에 강하게 될 수 있음을 알 수 있다.

스펙트럼의 효율적 이용면에서 상당히 큰 장점을 갖는 SS 방식이지만 시스템의 구성에 있어 연구 개발해야 할 문제가 있는데 그 중의 하나는 부호 계열 송수신 간의 동기 문제가 그것이다. 일반적으로 이동통신에 유리하지만 전파할당 문제가 남아있다.

(5) 시스템의 수학적 모델링 (mathematical modeling)

스펙트럼의 효율적 이용이라는 관점에서 통신 시스템과 구성요소의 수학적 모델링은 새롭고 큰 관심이 모아지는 분야이다. 이 작업은 주로 CCIR (국제무선통신전문위원회) 체계내에서 수행되고 있다.

이 모델에는 변조되는 신호원, 신호왜곡을 만드는 요소들, 부가적인 잡음원, 수신기 동기 유닛(unit) 그리고 신호 여과법등이 포함되며 수학적 모델링의 연구는 스펙트럼 이용의 효율성을 향상 시키기 위한 대역폭, 수신기 감도, 안테나 이득, 전파 감쇠등과 같은 파라미터들이 서로 어떻게 결합이 되는가를 알아 보기 위한 것이다.

5. 결론

실로 현재처럼 사회활동이 복잡하고 고도화됨에 따라서 사회의 각 방면에서 무선통신이 널리 사용되고 있으며 이런 상황에서 주파수 대의 유효이용은 중요한 과제라 아니할 수 없다.

고찰해 본 바와 같이 효율적인 스펙트럼 이용은 부호화, 대역폭과 S/N 비의 호환성, 그리고 혼합 변조 기법등을 기초로 하여 통신시스템의 특성을 향상 시킴으로써 실현될 수 있을 것이다. 부호화 기법에 있어서는 스펙트럼 사용의 효율이란 관점에서 좀 더 이를 위한 목적의 새로운 부호화 기법의 개발이 필요할 것이고 또 스펙트럼 확산 방식이나 수학적 모델링 기법은 스펙트럼 이용의 관점에서 효율적이기 위해 좀 더 연구해야 할 가치가 있다고 생각된다. 혼합 변조 기법에서는 고찰해 본 것처럼 PSK 시스템 보다는 APK 시스템이 가우시안 잡음 채널에서 효율적이라는 것을 보았다. 그러나 가우시안 채널이 아닌 경우를 고찰해야 할 것이다. 왜냐하면 가우시안 채널에서 최고 효율적인 시스템이 비가우시안 채널에서는 그렇지 못할 수도 있기 때문이다. 또 주목해야 할 것은 어떤 S/N 비에서 가장 효율적인 시스템도 그 이하의 S/N 비에서는 그렇지 못할 수도 있다는 것이다. 어쨌든 간에 혼합 변조시스템이 단일 파라미터 시스템에 비해 신호전력의 절약과 채널 효율성의 향상을 가져온다는 것은 분명하나 실제 시스템에서의 복잡성과 경비의 문제가 또한 중요한 고찰의 대상이 된다. 또한 실제 시스템이 이상적인 시스템과 거의 같은 성능을 갖기 위해서는 대역폭과 S/N 비의 호환성 문제 또한 무시할 수 없는 아주 중요한 부분인 것이다.

여하한 제한된 자원인 무선 스펙트럼과 균등하는 이에 대한 수요를 모두 만족시킬 수 있는 효율적인 기법의 개발은 시급한 것이고 또 수요의 급증으로 해서 계속 또 다른 효율성의 문제점이 제기되리라고 예견되는 바 이 분야의 연구는 무척 중요하고 다급한 과제가 하겠다.

[참고 문헌]

[1] C.E.Shannon and W.Weaver, The Mathematical theory of Communication, Urbana, IL: Univ.of Illinois Press, 1949.  
 [2] S.S.Sviridenko, "Spectrum Utilization Problems," IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol.EMC-19, no.3, pp.260-265, Aug.1977.  
 [3] E.Bedroison, "Spectrum Conservation by Efficient channel utilization," IEEE

- Commun. Soc. Mag., pp.20-27, Mar.1977.
- [4] S.R.McConoughey, "New concepts in spectrum usage," IEEE Trans. vol. COM-21, No.11, pp.1172-1176, 1973.
  - [5] J.Salz, "Communications efficiency of certain digital modulation systems," IEEE Trans. Commun. Technol., vol. COM-18, pp.97-102, Apr. 1970.
  - [6] C.R.Cahn, "Performance of Digital Phase-modulation Systems," IRE Trans. Commun.Syst., vol.CS-7, pp.3-6, May 1959.
  - [7] J.C.Hancock and R.W.Lucky, "Performance of combined amplitude and phase-modulated communication systems," IRE Trans. Commun. Syst., vol. CS-8, pp. 232-237, Dec.1960.
  - [8] C.R.Cahn, "Combined digital phase and amplitude modulation communication systems," IRE Trans. Commun. Syst., vol. CS-8, pp. 150-155, Sept. 1960.
  - [9] R.A.Scholtz, "The spread spectrum concept," IEEE Trans. Commun. Syst., vol. COM-25, No.8, pp. 748-755, Aug. 1977.
  - [10] R.C.Dixon, Ed., Spread Spectrum Techniques. New York: IEEE Press, 1976.