

이동통신의 핵심기술

盧 宗 善

建國大學校 電子工學科 助教授

I. 서 론

지난 수년동안 이동통신 분야에 있어서 서비스의 다양화, 서비스의 품질향상 노력 및 수요의 폭발적인 증가에 따라, 여러가지의 이동통신과 관련된 기술들이 비약적인 발전을 하게 되었다. 특히 이동통신에 있어서 할당된 주파수대역이 한정된 상황에서 증가하는 사용자를 수용하기 위한 이동통신 시스템 용량(capacity)을 증가시키려는 여러가지 방법이 연구되고 실현되어져 왔다. 특히 시스템의 용량을 증가시키는 한 방법으로 신호대간섭파비(CIR)의 조절을 위한 셀의 sectorization 및 그에 의한 주파수 재사용율의 증대, 그리고 현재 선진 각국에서 추진되어 실용화 단계에 와 있는 디지털 이동통신 시스템의 개발과 대도시의 중심가에서 요구되는 많은 통화량을 수용하기 위한 마이크로셀룰라 시스템(microcellular system)의 개발 등을 들 수 있는데, 이와 관련하여 여러가지 이동통신 시스템에 관련된 기술들이 발전되게 되었다.

그런데 이동통신 시스템의 핵심이 되는 요소 기술들을 논하기 위하여는 다음과 같은 이동통신 시스템의 특성을 먼저 고려하여야 한다. 즉, 이동통신 시스템은 주파수 스펙트럼이 제한된 시스템(band limited system)이고, 전력이 제한된 시스템(power limited system)이며 그리고 채널특성이 좋지 않은 통신시스템으로 규정될 수 있다. 즉 주파수 스펙트럼은 정해져 있는데 보다 많은 가입자를 수용해야 하며 휴대형 단말기의 경우 전원으로 전지를 사용하므로 전력이 제한되어 있으며, 이동통신의 채널은 지형과 불규칙한 빌딩등에 의해 전파의 왜곡이 심한 채널특성을 갖는 시스템이다. 이러한 이동통신 시스템의 특성을 기본으로 하여 고려하여야 할

이동통신 시스템의 여러가지 핵심 요소 기술을 보면 아래와 같다.

- (1) 채널특성
- (2) 트래픽 이론
- (3) 주파수 계획
- (4) 다원접속방식
- (5) 변조 및 복조방식
- (6) 등화기 및 다이버시티
- (7) 채널부호 및 복호방식
- (8) 음성코딩방식
- (9) 암호화방식

채널특성을 비롯하여 위에서 언급된 여러가지의 이동통신 관련된 요소기술들에 대하여 아래의 각 단원에서 그것들의 특성 및 장단점을 기술하였다.

II. 채널 특성

이동통신 시스템 기술과 관련하여 가장 중요한 것은 이동통신 시스템의 채널특성의 해석이다. 왜냐하면 여러가지 이동통신 시스템의 핵심 기술들의 장단점이라는 것이, 결국은 이동통신 채널상에서의 어떠한 기술이 다른 기술보다 우수한가를 이야기해야 하기 때문이다. 따라서 우선 이동통신 채널의 특성을 분석하고 이동통신 채널을 모델링하는 것은 매우 중요한 문제이다.

이동통신 채널은 전파가 도시의 빌딩사이를 전파될 때 빌딩에 의해서 반사되고 또 산의 경사면에 의해서 반사되는 등 여러가지의 다른 경로를 통하여 수신측에 전파가 도달되는 다중경로채널(multipath channel)이다. 이렇게 다중경로를 통해서 도달된 전파를 수신측이

차량인 경우 수신기는 움직이면서 수신하게 된다. 이러한 상황에서 나타나는 이동통신 채널의 특성을 여러가지로 규정할 수 있다. 먼저 직접파는 빌딩등에 가려져서 수신측에 도달되지 않고 빌딩이나 산에 의해서 반사된 반사파만이 수신측에 도달되어 생기는 레일레이 페이딩(Raleigh fading) 현상이다. 레일레이 페이딩현상의 모델링은 그림 1과 같이 될 수 있다. 차가 움직이면서 전파를 수신하므로 다른 경로를 통해서 도착하는 여러개의 전파들의 입사각이 서로 다르므로 서로 다른 입사파들은 다른 도플러천이를 갖게 되어, 수신된 신호가 주파수영역에서 $-f_m$ 에서 $+f_m$ 까지 흩어지게 되는 소위 도플러 스프레드(Doppler spread) 현상이 생기게 되어 수신안테나가 전방향성 안테나라 가정하였을 경우 셰이핑 필터(shaping filter)의 전달함수는 아래의 수식으로 주어진다.

$$|H(f)|^2 = \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{f}{f_m})^2}}$$

여기서 f_m 은 최대 도플러천이로 사용되는 주파수가 850MHz이고 차량의 속도가 V[Km/h]일 때 다음과 같이 주어지게 된다.

$$f_m = 0.79 \times V(\text{Km/h}) [\text{Hz}]$$

이러한 도플러 스프레드는 시간 선택적 페이딩(time selective fading) 현상을 일으키게 되어 수신신호의 세기를 감쇄시키게 되는데 최악의 경우 반파장인 약 17.5 cm의 정재파(standing wave)가 생겨서 이곳을 차량이 통과할 때 매우 빠른 페이딩(fast fading) 현상이 생기게 되어 수신 신호의 신호세기가 매우 빨리 변하게 된다.

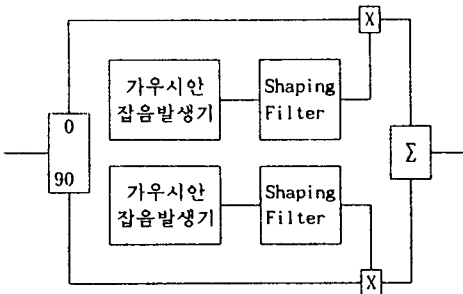


그림 1. 레일레이 페이딩 발생기

그리고 이동통신 채널의 중요한 특성중에 도착시간지연(delay spread)은 서로 다른 전파 경로를 통해서 전파가 전파될 때 서로 다른 경로의 경로차(path difference)에 의해서 생기는 것으로 이는 주파수 선택적 페이딩(frequency selective fading)을 일으키게 된다. 일반적으로 이동통신 채널에서 가해지는 서로 다른 경로파의 도착시간지연은 측정 결과에 의하면 대부분의 대도시 지역의 경우 5 μ sec 이내이고 최대 20 μ sec 이내라고 알려져 있다. 여러개의 서로 다른 도착시간지연을 갖고 도달된 파들은 디지털 이동통신인 경우 인접부호 간섭(intersymbol interference : ISI)을 일으키게 된다. 이러한 인접부호간섭의 정도는 전송되는 신호의 심볼구간(symbol period)에 반비례하고 심볼의 채널에서의 전송속도, 즉 사용되는 주파수 대역폭에 비례하므로 협대역일 수록 도착시간지연에 의한 인접부호간섭 현상은 작아지게 된다. 따라서 광대역인 디지털 신호일 수록 도착시간지연에 의한 인접부호간섭을 줄이기 위하여 성능이 우수한 등화기(equalizer)를 사용해야 한다.

도시에서 전파가 전파될 때 많은 경우에 송신측과 수신측사이에 직접파의 도달경로가 빌딩등에 의해서 가려지게 되어 전파의 수신강도가 상당히 감소되며 차량이 움직이면 수신신호의 감쇄가 천천히 변하게(slow fading) 되는데 이를 그늘현상(shadowing)이라고 한다. 이러한 그늘현상은 전파의 세기가 아래의 수식과 같은 Lognormal 분포를 가지며 그림 2와 같이 모델링을 할 수 있다.

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma x} \exp \left(-\frac{(\ln(x) - m)^2}{2\sigma^2} \right)$$

앞서 언급한 다중경로파 및 그늘현상에 의해 생기는 전파의 감쇄 이외에도 송수신기 사이의 거리에 의해서 생기는 전파의 감쇄(이를 흔히 global mean이라 함)를 들 수 있는데 전파의 감쇄정도도 지역에 따라 계절에 따라 달라지게 된다. 그외에 주파수 재사용률에 따라 결정되는 동일 채널 간섭(cochannel interference : CCI) 및 인접 채널 간섭(adjacent channel interference : ACI)이 있다. 항상 시스템의 용량이 문제가 되는 것은 대도시인데 대도시(metropolitan service area : MSA)에서는 이동통신 시스템이 interference limited 시스템이기 때문에 신호대 동일채널 간섭파비(C/R)는 대단히 중요한 요소가 된다.

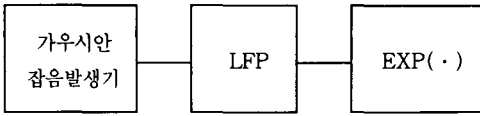


그림 2. 그늘현상 발생기

Ⅲ. 다원접속방식

이동통신 시스템에서는 시간 및 주파수 스펙트럼과 같은 제한된 통신자원(communication resource)을 효율적으로 이용하기 위하여 되도록 많은 사용자가 이러한 제한된 통신자원을 공유할 수 있어야 하는데, 사용자는 일반적으로 자신이 필요할 때에만 이를 점유하여 이용하고, 그 이외의 시간에는 다른 사용자가 사용할 수 있도록 통신자원을 release해야 한다. 이러한 통신자원을 여러 사용자가 공유할 수 있도록 하기 위하여 사용되는 방법이 다원접속(multiple access)이다. 그런데 이동통신 시스템에 있어서 어떠한 다원접속방식을 선택하는가에 따라 이동통신 시스템의 전체적인 구조가 달라지게 되기 때문에 이동통신 시스템의 여러가지 기술적인 요건중에서 다원접속이 가장 중요한 분야라 할 수 있다. 현재 대부분의 이동통신 시스템에 사용되는 다원접속방식은 다음과 같이 분류될 수 있다.

- (1) 주파수분할 다원접속
- (2) 시분할 다원접속~협대역 시분할 다원접속방식
광대역 시분할 다원접속방식
- (3) 코드분할 다원접속

이러한 다원접속방식을 결정하는데 있어서 고려해야 할 몇가지 사항을 보면 다음과 같다. 먼저 어떠한 다원접속방식을 선택하느냐에 따라 이동통신 시스템 용량이 달라지게 된다. 그리고 다원접속방식에 따라 기지국 및 이동국의 구현시 필요한 비용 및 복잡성이 다르기 때문에 선택의 신중성이 요구된다. 또한 미국의 경우처럼 현재 사용되고 있는 아날로그 이동통신 시스템과 디지털 이동통신 시스템과의 병존성 문제를 고려하여 어떠한 다원접속방식이 현재의 아날로그 이동통신 시스템과 같은 주파수 스펙트럼을 공유하며 dual mode로 운용하기에 편리한가를 또한 고려하여야 한다. 앞서 기술한 여러가지 다원접속방식에 대한 이동통신 시스템에의 응용시 장단점을 보면 아래와 같다.

1. 주파수분할 다원접속방식

주파수분할 다원접속방식은 single channel per carrier(SCPC)라고도 하는 것으로 시간은 공유하면서 주어진 주파수 스펙트럼을 여러개의 구간으로 나누어서 여러 사용자가 각기 주어진 주파수대역을 다른 사용자와 겹치지 않게 사용하는 방식이다. 하나의 송신기에서 여러개의 사용자에게 보낼 신호를 주파수대역을 나누어서 신호를 전송하고 수신측에서는 자기의 주파수대역에 있는 정보만을 골라내어 수신하는 방식을 주파수분할 다중화(frequency division multiplexing : FDM)라 하고, 여러개의 송신기가 할당받은 자기 자신의 주파수대역에 신호를 실어서 하나의 혹은 여러개의 수신자에게 송신하는 방식을 주파수분할 다원접속(frequency division multiple access : FDMA)이라 한다. 따라서 만일 이동통신의 경우에 주파수분할 다원접속방식을 사용한다면 reverse 채널(이동국에서 기지국 방향)에서는 FDMA가 사용되고, forward 채널(기지국에서 이동국 방향)에서는 FDM이 사용될 것이다. 이를 FDM/FDMA라 한다. 이 FDM/FDMA방식은 대부분의 아날로그 이동통신 시스템에서 사용되고 있는 다원접속방식이다.

주파수분할 다원접속의 장점으로는 디지털 이동통신 시스템의 경우, 구현시 어려운 문제중에 이동통신 채널에서 생기는 다중경로파의 도착시간지연에 의한 인접부호간섭인데 이를 극복하기 위하여 등화기(equalizer)를 사용해야 하는데 그 구현이 경우에 따라 매우 어려운 실정이다. 그런데 이러한 인접부호간섭은 디지털 데이터의 심볼구간이 크면 클수록, 즉 사용되고 있는 채널의 주파수대역폭이 좁으면 좁을수록 일정한 도착시간지연에 대하여 덜 영향을 받게 된다. 따라서 주파수분할 다원접속방식은 디지털 데이터의 심볼구간이 시분할 다원접속방식보다 일반적으로 크기 때문에 이동통신 채널에서 주파수 분할 다원접속방식은 등화기가 필요하지 않은 것으로 알려져 있다. 그리고 시분할 다원접속방식에 서처럼 망의 동기가 필요하지 않으며 반송파의 동기(carrier synchronization), 비트구간복원(bit timing recovery), 프레임 동기(frame synchronization)등이 용이하다. 따라서 변복조기의 구현시 하드웨어가 간단하다는 것 또한 장점이 된다.

주파수분할 다원접속방식의 단점으로는 이동통신 단말기를 구현시에 필요한 부품중에 안테나를 통해서 단말기로 들어오는 신호와 나가는 신호를 분리하기 위한 필터로 듀플렉서(duplexer)가 필요하게 된다. 일반적으로 안테나를 통해서 들어오는 신호와 나가는 신호 전력

의 차이는 100dB 이상되기 때문에 그러한 신호를 필터를 이용해서 분리하는 것은 어려운 문제로 현재 사용하고 있는 듀플렉서는 그 구현이 어려울 뿐 아니라 부피도 크고 듀플렉서로 신호를 통과시킬 때 생기는 3dB 삽입손실을 감수해야 한다. 그리고 주파수 스펙트럼을 작게 나누게 됨으로써 생길수 있는 인접 채널 간섭 또한 문제이며 이를 줄이기 위하여 채널사이에 guard band 및 특성이 좋은 선형 필터가 필요하게 된다.

2. 시분할 다원접속방식

시분할 다원접속방식은 하나의 반송파를 여러 사용자가 공유하여 사용하면서 시간축을 여러개의 시간구간으로 나누어서 여러 사용자가 자기에게 할당된 시간구간을 다른 사용자의 시간구간과 겹치지 않게 하여 다중통신을 하는 방식이다. 시분할방식 중에서 하나의 송신기에서 여러개의 사용자에게 보낼 신호를 시간구간을 나누어서 하나의 반송파에 신호를 실어서 전송하고 수신측에서는 자기의 시간구간에 있는 정보만을 골라내어 수신하는 방식을 시분할다중화(time division multiplexing: TDM)라 한다. 이 경우 신호는 하나의 반송파가 동기가 바뀌지 않고 여러 사용자의 데이터를 번조하여 전송하므로 수신측에서 볼 때 반송파의 동기, 비트구간복원, 프레임 동기등이 비교적 용이하다. 시분할방식 중에서 여러개의 송신기가 하나의 반송파를 이용 할당 받은 자기 자신의 시간구간에 신호를 실어서 하나 혹은 여러개의 수신자에게 송신하는 방식을 시분할 다원접속(time division multiple access: TDMA)이라 한다. 이 경우 송신되는 신호는 시간구간마다 송신기가 다르므로 반송파의 동기도 다르고 프레임의 비트구간(bit timing), 프레임 구간(frame timing)등이 각각 다르므로 복조기에서 반송파의 동기, 비트구간복원, 프레임 동기등이 TDM방식보다는 훨씬 어렵다. 이동통신 시스템에서 시분할 다원접속방식을 사용하게 되면 reverse 채널에서는 TDMA가 사용되고, forward 채널에서는 TDM이 사용될 것이다. 이를 TDM/TDMA라 한다.

시분할 다원접속방식의 장점으로는 time division duplexing(TDD)을 사용하여 안테나를 통하여 들어오는 신호와 나가는 신호를 시간을 구분하여 다른 시간대를 이용하게 함으로써 주파수분할 다원접속방식에서 사용되어야 하는, 만들기 어렵고 부피도 크고 삽입손실도 있는 듀플렉서를 사용하지 않아도 된다는 것이다. 그리고 향후의 디지털 이동통신 시스템이 발전되고 또한 진화해 가는 방향과도 잘 부합되는 것으로 미국, 일본 및 유럽의 디지털 이동통신 시스템의 표준규격으로 이 시

분할 다원접속방식이 채택되었다. 그러나 시분할 다원접속방식의 단점으로는 앞서 설명한 대로 디지털 데이터의 심볼구간이 짧기 때문에 인접 심볼간섭을 극복하기 위하여 등화기를 사용해야 하고, 여러 사용자들의 시간구간이 겹치지 않도록 하기 위하여 망의 동기가 필요하게 되며 guard time 또한 필요하게 되고, 데이터 프레임 구성시 반송파동기, 비트동기, 또는 프레임동기 등을 위하여 자기상관값 또는 상호상관값이 작은 시퀀스로 구성된 프리앰블(preamble)이 필요하게 되는데 이러한 overhead가 커서 데이터 전송효율이 떨어지게 된다. 그리고 디지털 데이터를 수신하여 복조하는 경우에는 반송파 동기, 비트구간복원, 프레임 동기 등이 필요하여 복조기의 하드웨어가 복잡하게 되는 단점이 있다.

그리고 시분할 다원접속방식은 광대역 시분할 다원접속방식(wideband TDM/TDMA)과 협대역 시분할 다원접속방식(narrowband TDM/TDMA)으로 나눌 수 있다. 광대역 시분할 다원접속방식은 협대역 시분할 다원접속방식에 비하여 사용되는 주파수 대역폭이 넓어서 심볼구간이 훨씬 작기 때문에 같은 도착시간지연에 대해서 고도의 등화기를 사용해야 한다는 문제점이 있다. 미국과 일본은 협대역 시분할 다원접속방식을 디지털 이동통신 표준규격으로 채택하였고 유럽에서는 광대역 시분할 다원접속방식을 디지털 이동통신 표준규격으로 채택하였다.

3. 코드분할 다원접속방식

코드분할 다원접속(code division multiple access: CDMA) 방식은 여러 사용자가 시간과 주파수를 공유하면서 각 사용자에게 자기상관(autocorrelation) 값, 상호상관(crosscorrelation) 값 그리고 부분자기상관(partial-period autocorrelation) 값과 부분상호상관(partial-period crosscorrelation) 값이 작은 의사불규칙 시퀀스(pseudo-random sequence)를 할당하여 각 사용자는 할당된 의사불규칙 시퀀스를 이용하여 송신할 신호를 spreading하여 전송하고 수신측에서는 송신측에서 사용한 것과 같은 의사불규칙 시퀀스를 발생시켜서 동기를 맞추고 이를 이용하여 수신된 신호를 despreading하여 원하는 신호를 복원한다. 여러 사용자가 신호를 전송할 때 반송파 및 의사불규칙 시퀀스의 동기를 맞추어 전송하게 되는 경우를 동기식(synchronous) CDMA라 하고, 그렇지 않은 경우를 비동기식(asynchronous) CDMA라 한다. 이동통신의 경우 forward 채널에서는 동기식 CDMA를 사용하고 reverse 채널의 경우에는 비동기식 CDMA를 사용한다. 이러한 CDMA에 사용되

는 의사불규칙 시퀀스로는 m-시퀀스, GMW 시퀀스, Kasami 시퀀스, Gold 시퀀스, 노 시퀀스등이 있다.

코드분할 다원접속방식은 다른 사용자의 신호가 나에게 잡음이 되기 때문에 모든 사용자의 전력이 수신측에서 볼 때 같아야 되는데, 이동통신의 reverse 채널에서는 단말기가 기지국 근처에 있을 때와 셀의 경계에 있을 경우에 두 단말기로 부터 기지국에서 수신되는 신호의 전력의 비는 통상 100dB 이상되는 경우가 흔히 존재한다. 따라서 코드분할 다원접속방식은 전파되는 신호의 near-far 문제 때문에 단말기에서 출력을 90dB 이상 조절(reverse 채널 power control)할 수 있어야 하는데, 단말기에서의 90dB 이상의 power control은 실현한다는 것이 매우 어려운 문제이다. 그리고 단말기의 power control 회로의 오동작은 그 셀 또는 섹터내에 있는 모든 이동통신 시스템을 down시키게 된다는 것 또한 코드분할 다원접속방식의 큰 단점이라 할 수 있다. 수신측에서 의사불규칙 시퀀스의 acquisition 및 tracking의 실현을 위한 하드웨어가 대단히 복잡하며 동기를 위한 채널이 필요하고, 현재 사용되고 있는 아날로그 이동통신 방식과의 주파수 스펙트럼 견지에서 병존의 어려움도 코드분할 다원접속방식의 단점중의 하나이다.

그러나 코드분할 다원접속방식이 이동통신 시스템에 사용되는 경우에 장점으로는 아날로그 이동통신 시스템에 비하여 채널의 용량을 크게 증가시킬 수 있으며 음성신호를 전송할 경우 voice activity를 이용하여 채널의 사용효율을 높일 수 있다는 것이다. 그리고 채널의 용량이 다른 방식에 비해 융통성이 있어 사용자가 늘어나면 채널의 잡음이 증가하여 상태가 나빠지게 되지만 채널의 용량은 증가시킬 수 있다(soft channel capacity)는 장점이 있다. 또한 전송신호가 의사불규칙 시퀀스를 사용하여 spreading되므로 사용자의 신호에 대한 privacy가 어느 정도 보장되며 multipath fading에 강한 특성을 가지며, 협대역 잡음신호는 수신시에 despreading 과정에서 spreading되므로 시스템에 큰 영향을 주지 못한다. 마지막으로 주파수 사용계획(frequency planning)이 필요하지 않으며 주파수 재사용율이 거의 1에 가깝게 된다는 장점을 갖고 있다.

IV. 변조 및 복조방식

우선 아날로그 이동통신 시스템에 있어서 변조방식은

주파수 변조방식(frequency modulation : FM)을 사용하고 복조방식으로는 주파수 변별기를 사용한다. 그러나 디지털 이동통신 시스템에서 사용 가능한 디지털 변조방식으로는 크게 위상을 변조하는 방식과 주파수를 변조하는 방식 그리고 진폭을 변조하는 방식으로 분류할 수 있다. 최근 하드웨어의 발달에 따라 변조방식의 선택에 있어서 변복조방식 구현의 용이성보다는 성능이 더 우선하는 경향이 있어 많은 경우에 구현이 용이한 주파수변조나 진폭변조방식보다는 변복조기의 구현이 다소 어려우나 성능이 다른방식에 비해 우수한 위상변조방식이 선호되는 경향이 있다. 그리고 이동통신 시스템에 사용될 디지털 변조방식의 선택에 있어서 가장 중요하게 고려되어야 할 사항을 보면 우선 주파수 스펙트럼을 효율적으로 사용하는 변조방식을 선택해야 한다는 것이다. 각 변조방식의 주파수 스펙트럼의 효율성을 나타내 주는 척도로 spectral efficiency라는 것이 있는데 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\text{데이터 전송율}}{\text{사용된 주파수대역폭}} \quad [\text{b/s/Hz}]$$

즉 spectral efficiency는 주파수 스펙트럼상의 1Hz당 전송될 수 있는 데이터 전송율로서 QPSK이나 OQPSK와 같은 4-ary 변조방식이 BPSK 그리고 GMSK와 같은 2진 변조방식에 비해 2배 효율이 좋다. 디지털 이동통신 시스템과 같이 주파수 스펙트럼이 제한된 시스템에서는 spectral efficiency가 높은 변조방식이 특히 선호된다. 예를 들면 미국의 디지털 이동통신 시스템 표준규격에서 보면 매 30KHz 당 48Kbps의 데이터를 전송하는 것으로 되어 있으므로 spectral efficiency가 1.6[b/s/Hz]이고 일본 디지털 이동통신의 경우에는 주파수대역폭 25KHz 당 데이터 전송률이 42Kbps이므로 spectral efficiency가 1.68[b/s/Hz]이다. 유럽의 디지털 이동통신 시스템의 경우에는 200KHz의 주파수대역폭에 271Kbps의 데이터를 전송하므로 spectral efficiency가 1.35 [b/s/Hz]이므로 미국이나 일본의 디지털 이동통신 시스템의 표준규격인 pi/4 QPSK 변조방식이 유럽의 디지털 이동통신 시스템의 표준규격인 GMSK 변조방식보다 spectral efficiency가 우수하다. 그리고 디지털 변조방식의 선택에 있어서 고려되어야 할 또 다른 사항은 변조 후에 인접 채널 사이에서 생기는 인접채널 간섭을 감소시키기 위하여 송신측에서 변조된 신호를 주파수 상향변환과 HPA(high power amplifier)를 통과시키기 전에 그림

3에 있는 바와 같이 Nyquist 필터(pulse shaping filter)를 사용하여 sidelobe 레벨을 낮추어 주어야 한다. 여기서 사용되는 Nyquist 필터는 아래와 같다.

$$|H(f)|^2 = \begin{cases} 1, & 0 \leq f < \frac{1-\alpha}{2T} \\ \frac{1}{2} \{ 1 - \sin(\frac{\pi(2fT-1)}{2\alpha}) \}, & \frac{1-\alpha}{2T} \leq f < \frac{1+\alpha}{2T} \\ 0, & \frac{1+\alpha}{2T} \leq f. \end{cases}$$

여기서 T는 심볼구간이며 α 는 Rolloff factor이다.

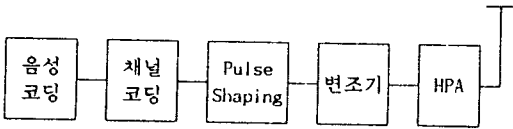


그림 3. 송신기의 블럭도

그런데 HPA는 가격면에서 저렴하고 전력의 효율면에서 우수한 비선형 HPA를 사용하는 것이 바람직하다. 변조된 신호를 Nyquist 필터를 이용 sidelobe level을 낮춘후에 비선형 HPA를 통과시키게 되면 변조된 신호의 스펙트럼의 sidelobe 레벨이 다시 높아지게 되는 (sidelobe regrowth) 현상이 생기게 되므로 인접채널간섭을 일으키게 된다. 그러므로 가능한한 변조된 신호가 비선형 HPA를 통과해도 이러한 sidelobe regrowth가 덜 생기는 변조방식을 선택해야 한다. 그러한 변조방식으로는 진폭 변화율(fluctuation)이 되도록 작은 변조방식을 사용해야 한다. 또한 선호되는 변조방식으로 되도록 낮은 C/I(carrier to interference ratio)에서 동작할 수 있는 방식이다. 또 변조방식의 선택에 있어서 고려되어야 할 사항으로는 이동통신 시스템의 통신채널에서 어떠한 복조방식이 가능한가를 고려하여 변조방식을 선택하여야 한다.

그러면 여러가지 변조방식의 장단점을 보면 다음과 같다. 우선 BPSK의 경우는 2진 변조방식으로 4-ary 변조방식보다 mainlobe가 2배 크기 때문에 spectral efficiency면에서 비효율적이다. 그리고 진폭 변화율도 매우 크기 때문에 스펙트럼의 sidelobe regrowth로 인하여 비선형 HPA를 사용할 수 없다는 단점이 있다. QPSK 변조방식은 4-ary 변조방식이므로 mainlobe가 2진 변조방식에 비해 절반이므로 spectral efficiency가 우수한 편이나 BPSK와 마찬가지로 진폭 변화율이 매우 크기 때문에 비선형 HPA를 사용하는 경우 스펙트

럼의 sidelobe regrowth로 인한 인접채널 간섭을 일으키게 된다는 단점이 있어 선진 각국의 디지털 이동통신 시스템의 변조방식의 표준규격으로 선택되지 못하였다. 또 다른 4-ary 변조방식으로 OQPSK는 QPSK와 마찬가지로 mainlobe가 좁아서 spectral efficiency가 우수한 편이고 진폭 변화율도 약 3dB로 비선형 HPA를 사용하는 경우에도 스펙트럼의 sidelobe regrowth로 인한 인접채널 간섭이 문제되지 않는다는 장점이 있으나, 복조의 측면을 고려할 때 이동통신 채널과 같은 특성이 좋지 않은 채널에서는 동기복조(coherent detection)가 사실상 불가능하여 차동복조(differential detection)와 같은 비동기복조(noncoherent detection) 방식이 사용되어야 한다. 그러나 OQPSK의 경우는 차동복조를 할 경우 성능이 떨어진다는 단점이 있어서 미국의 디지털 이동통신 시스템의 표준으로 채택되지 못하였다.

$\pi/4$ QPSK 변조방식은 앞서 설명한 여러가지 변조방식들의 장점들만을 고루 갖춘 변조방식으로 미국의 디지털 이동통신 시스템의 표준규격으로 채택되었다. 먼저 $\pi/4$ QPSK 변조방식은 4-ary 변조방식으로 mainlobe가 좁아서 spectral efficiency가 좋고 진폭 fluctuation이 약 8.36dB로 QPSK보다 적어 비선형 HPA를 사용하는 경우에 스펙트럼의 sidelobe regrowth가 적어서 인접채널 간섭이 QPSK보다 훨씬 덜 문제가 되고 디지털 이동통신 채널에서 사용되어야 하는 비동기복조 방식인 차동복조를 사용해도 성능이 떨어지지 않아서 디지털 이동통신에 대한 우수한 변조방식으로 인정되어 미국 및 일본의 디지털 이동통신 변조방식의 표준규격으로 채택되었다. 그러나 실제 시스템의 구현시 $\pi/4$ QPSK는 진폭 fluctuation이 8.36dB 보다 훨씬 크게 되어 거의 선형 HPA를 사용해야 된다고 알려져 있다.

유럽의 경우에는 미국 및 일본과는 달리 GMSK를 변조방식의 표준규격으로 채택하였다. GMSK는 2진 변조방식이어서 mainlobe가 넓은 편이지만 데이터를 가우시안 필터를 통과시켜서 mainlobe를 줄일 수가 있고 스펙트럼의 sidelobe 레벨도 낮출 수가 있다. GMSK는 진폭 변화가 없는 정진폭 변조(constant envelope modulation)이기 때문에 비선형 HPA를 사용하여도 스펙트럼의 sidelobe regrowth가 전혀 없다는 장점이 있고 복조방식의 경우에도 비동기복조 방식인 차동복조나 변별기를 사용할 수 있다. 이러한 이유로 해서 GMSK가 유럽의 디지털 이동통신 시스템의 변조방식 표준규격으로 채택되었다.

디지털 변조방식에 대한 복조방식은 이동통신의 채널 특성이 매우 좋지 못한 관계로 동기복조(coherent demodulation) 방식보다는 비동기 복조방식인 차동복조기나 주파수 변별기를 사용한 복조방식이 선호된다. 그리고 복조기의 구현은 DSP(digital signal processing) 칩을 사용하여 프리앰블을 샘플링하고 FFT(fast frequency transform) 및 디지털 phase lock loop를 사용하여 반송파동기, 비트동기 및 프레임동기를 복원한다.

V. 등화기 및 다이버시티

앞의 채널특성에서 언급된 바와 같이 셀룰라 시스템의 구현시 가장 어려운 문제중의 하나는 다중경로파에서 생기는 도착시간 지연에 의한 간섭현상이다. 이는 아날로그 이동통신 시스템 뿐만 아니라, 시분할 다원접속을 사용하는 디지털 이동통신 시스템에서도 특히 문제가 된다. 이러한 문제점의 해결을 위하여 다이버시티(diversity)와 등화기(equalizer)가 사용되고 있다. 우선 다이버시티는 selection 다이버시티, equal gain combining, maximum ratio combining 등 크게 세가지로 구분할 수 있다. 아날로그 이동통신 시스템의 경우에는 IF단에서의 selection 다이버시티 및 post-detection 다이버시티가 사용되고 있다.

디지털 이동통신 시스템의 경우, 일본의 JDC(Japan digital cellular)에서는 도착시간지연이 $5\mu\text{sec}$ 이하이면 심볼구간인 $47.6\mu\text{sec}$ 에 비해 매우 작기 때문에 시스템의 성능이 크게 떨어지지 않아 다이버시티나 등화기를 사용하지 않으며, 도착시간지연이 $5\mu\text{sec}$ 이상인 경우에는 selection 다이버시티를 사용하려는 계획을 갖고 있다. 그러나 미국이나 유럽의 디지털 이동통신 시스템에서는 도착시간지연에 의한 인접심볼 간섭현상을 극복하기 위하여 등화기를 사용할 것을 요구하고 있다. 광대역 시분할 다원접속방식을 사용하고 있는 유럽의 경우에는 심볼구간이 $3.7\mu\text{sec}$ 인데 이는 도착시간 지연이 한 심볼구간 이내에서 여러 심볼구간까지 발생하기 때문에 이러한 다양한 경우를 등화할 수 있는 등화기의 구현은 매우 어려운 것으로 알려져 있다. 협대역 시분할 다원접속방식인 미국의 디지털 이동통신 시스템은 심볼구간이 $41\mu\text{sec}$ 이므로 거의 대부분의 도착시간 지연이 한 심볼구간 이내이므로 등화기의 구현이 유럽의 디지털 이동통신 시스템에 비해 훨씬 용이한 것으로 알려져 있다.

미국의 디지털 이동통신 시스템의 경우에는 하나의

time slot이 6.7msec 이므로 빠른 페이딩 채널의 경우에는 하나의 time slot내에서도 채널의 상태가 변하므로 적응 등화기(adaptive equalizer)의 사용이 요구된다. 선호되는 등화기는 4 상태(state) 비터비 디텍터(viterbi detector)를 사용한 MLSE(maximum likelihood sequence estimator) 방식이다. 이 방식은 빨리 변하는 레일레이 페이딩 채널에서 DFE(decision feedback equalizer)보다 성능이 우수하다고 알려져 있다. 먼저 수신신호의 복조를 하기 전에 각 time slot에 존재하는 알려진 동기 시퀀스(synchronization sequence)를 수신신호와 곱하여서 채널의 impulse response의 MMSE(minimum mean square error) estimate를 구하여 이를 최초의 채널 estimate로 이용하고 하나의 time slot내에서 변하는 채널에 따라 adaptive하게 채널 estimate를 변화시킨다. 적응 알고리즘에는 LMS(least mean square) 알고리즘과 RLS(recursive least square) 알고리즘이 있는데 LMS 알고리즘은 initial convergence가 느린편이나 이는 동기 시퀀스를 사용한 impulse response의 estimate를 사용해서 해결할 수 있다. 빨리 변하는 채널에서 LMS 알고리즘의 tracking 성능은 복잡한 RLS 알고리즘 만큼이나 우수하다. 따라서 적응알고리즘으로는 LMS 알고리즘을 변형한 modified LMS 알고리즘이 사용될 수 있다. 이러한 등화기는 DSP 칩으로 구현시 약 6계산량인 9 Mips 정도로 동기화 부분의 약 1 Mips, 채널 복조기의 계산량 약 8 Mips 보다 많은 것으로 알려져 있다.

VI. 채널부호 및 복호방식

디지털 데이터를 이동통신 시스템과 같이 특성이 좋지 않은 채널을 통하여 전송하는 경우 채널에서는 많은 데이터의 오류가 생기게 되는데 이를 방지하기 위하여 error control technique을 사용하게 되는데 이는 interleaving /deinterleaving, 오류정정부호(forward error correction:FEC)와 오류검출(error detection)로 분류될 수 있다. 이에 대한 블록도가 그림 4에 도시되었다. 오류검출은 채널에서 생기는 오류를 수신측에서 검출할 수 있는 것으로 cyclic redundancy check(CRC)이라는 것이 흔히 사용된다. CRC는 보내려는 데이터를 생성다항식으로 나누어서 그 나머지를 생성다항식의 뒤에 첨부하여 전송하므로, 전송되는 데이터와 CRC 데이터는 생성다항식으로 나누면 항상 나머지가

영이 되므로 이 방법에 의해서 수신측에서 오류의 검출을 할 수 있다. 오류검출은 오류정정부호에 의해서 정정되지 못한 오류를 검출하는 것으로 대부분의 경우에 오류정정부호와 같이 사용된다.

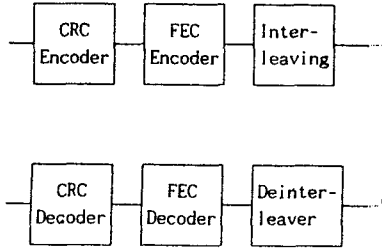


그림 4. Error control 기법

오류의 검출과는 달리 오류정정부호는 채널에서 생긴 오류를 수신측에서 교정하는 것으로 블록부호(block code)와 트리부호(tree code)로 나뉜다. 블록부호는 메시지(message)와 코드워드(codeword)의 크기가 k 와 n 으로 고정되어 있는 경우로 흔히 지금까지 많이 사용되어온 hamming 부호, BCH 부호, Golay 부호, RS (Reed-Solomon) 부호등이 있다. 그리고 트리부호는 메시지나 코드워드의 크기가 블록부호처럼 정해져 있지 않고 연속적으로 메시지가 부호기에 들어가면 코드워드가 출력되는 것으로 길쌈부호(convolutional code)기에 속한다. 위에서 열거된 여러가지의 오류정정부호를 그대로 사용하는 경우도 있지만 많은 경우에는 오류정정부호의 코드워드 길이인 n , 부호의 dimension인 k , 또는 Parity check 비트수인 $n-k$ 값을 변형하여 사용하는 경우가 많다. 먼저 shortened 부호는 블록부호에서 많이 사용되는 것으로 코드워드에서 메시지 비트의 수를 s 만큼 줄여서 (n, k) 부호로부터 $(n-s, k-s)$ 부호를 만드는 방식이다. Extended 부호 또한 블록부호에서 많이 사용되는 것으로 Parity check 비트의 수를 증가 시켜서 오류정정부호를 변형시키는 방식이다. 그리고 punctured 부호는 길쌈부호에서 주로 사용되는 오류정정부호의 변형 방법으로 Parity check 비트수를 줄여서 부호율을 바꾼다.

채널에서 오류정정부호를 사용하는 경우에 오류정정부호의 성능을 평가하는 척도로 코딩게인(coding gain)이라고 하는 것이 있다. 즉, 오류정정부호를 사용하는 경우에 오류정정부호를 사용하지 않는 경우보다 송신기에서 출력전력을 얼마나 절감할 수 있는가를 나타내는 것으로 아래의 수식으로 표현될 수 있다. 주어진 비트오

율(bit error rate : BER)에서 코딩게인 G 는

$$G = (E_b/N_0)_{\text{without FEC}} - (E_b/N_0)_{\text{with FEC}} \text{ [dB]}$$

여기서 E_b 는 디지털통신에서 비트당의 에너지이며 N_c 은 one sided noise power spectral density이다. $(E_b/N_0)_{\text{without FEC}}$ [dB]는 주어진 비트오율을 얻기 위하여 오류정정부호를 사용하지 않았을 경우에 시스템에서 요구되는 E_b/N_0 이며, $(E_b/N_0)_{\text{with FEC}}$ [dB]는 주어진 비트오율을 얻기 위하여 오류정정부호를 사용하였을 경우에 시스템에서 요구되는 E_b/N_0 이다. 따라서 오류정정부호를 사용하는 경우에 G [dB]만큼 송신기에서 송신출력을 줄여서 보낼 수 있게 된다.

그리고 부호율이라는 것은 메시지 비트의 수를 코드워드의 비트수에 의해서 나눈 값으로 정의되는데 일반적으로 부호율은 0에서 1사이의 값을 갖는 것으로 부호율이 낮을수록 코딩게인은 증가하지만 요구되는 주파수 대역폭은 증가하게 된다. 반대로 부호율이 높을수록 코딩게인은 감소하지만 요구되는 주파수 대역폭은 줄어들게 된다. 따라서 부호율과 코딩게인사이에서 tradeoff를 취해야 한다. 즉 이동통신 같은 경우에는 주로 보내는 데이터가 압축된 음성 데이터인데, 음성데이터를 압축하는 정도와 사용되는 오류정정부호의 부호율을 선택하는데 있어서 어떻게 하는 것이 정해진 총 데이터 전송율에서 가장 음성의 질을 높일 수 있는가를 고려하여야 한다. 음성데이터의 압축을 많이 하고 부호율이 낮은 부호를 사용하면 오류정정능력은 좋아지지만 채널의 상태가 좋은 대부분의 경우에 음성의 질이 저하되는 문제점이 있다.

최근 들어서 가장 널리 사용되고 있는 오류정정부호에는 RS 부호와 길쌈부호가 있다. RS 부호는 하나의 심볼이 대부분의 응용되는 경우에 8비트인 nonbinary 부호로서 연집오류에 대해 오류정정능력이 우수한 소위 maximum distance separable(MDS) 부호이다. 따라서 연집오류가 생기는 채널인 compact 디스크, 디지털 audio 테이프, 그리고 디지털 VCR등에 사용되며 향후 서비스가 시작될 HDTV에서도 사용될 부호이다. 그러나 무선통신채널과 같은 가산성 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise) 채널에서는 하나의 비트오류가 하나의 심볼오류(8비트 오류)를 일으키게 되어 오류정정능력이 취약해지는 특성이 있어 무선통신 분야에서는 사용되기가 어렵고 복호알고리즘이 복잡하여 복호기의 구현이 어렵다는 단점이 있다. 그리고 연성 판정복호기를 구현하기가 어려워져서 큰 코딩게인을 얻기

가 어렵다는 단점이 있다. 무선통신채널은 일반적으로 가산성 백색 가우시안 잡음 채널로서 비트 오류가 연접 오류의 형태로 생기지 않기 때문에 이러한 채널의 경우에 길쌈부호가 오류정정능력이 우수하다. 길쌈부호의 복호방법중에는 threshold 복호, sequential 복호(fano 알고리즘, stack 알고리즘), 그리고 비터비 복호 방법등이 있는데 복호기 성능은 비터비 복호기가 가장 우수하나 복호기의 하드웨어가 복잡하여 사용되고 있지 못하다가 VLSI 기술의 발달로 실현이 가능하여 최근 들어서 대부분의 위성통신 및 디지털 이동통신분야에서 사용되고 있으며 RS 코드와 더불어서 가장 응용분야가 넓은 부호이다. 특히 비터비 복호기의 경우에는 연성판정복호기를 구현하는 것이 용이하기 때문에 코딩계인이 다른 방식에 비해서 크다는 장점이 있다. 그리고 puncturing에 의해서 부호율을 쉽게 바꾸어 부호율이 다른 punctured 길쌈부호를 쉽게 구현할 수 있다. 그리고 이러한 punctured 길쌈부호를 원래의 부호와 같은 복호기에 구현하여 multi-rate codec을 쉽게 실현할 수 있다. 미국을 비롯한 일본, 유럽의 디지털 이동통신 시스템의 채널부호에 대한 규격도 약간의 차이는 있지만 부호율이 길쌈부호와 비터비 복호기를 채택하고 있다. 비터비 복호기의 블럭도는 그림 5와 같다.

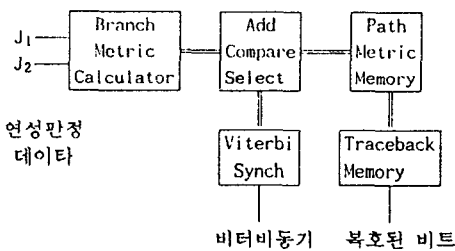


그림 5. 비터비 복호기의 블럭도

VII. 음성코딩방식

아날로그 음성신호는 샘플링을 하는 경우에 샘플들 사이에 많은 redundancy가 존재하기 때문에 샘플을 모두 양자화해서 전송할 필요가 없다. 따라서 음성코딩은 이러한 redundant한 성분을 없애고 음성 데이터율을 줄여서 대역폭이 제한된 이동통신 시스템의 채널을 효율적으로 이용하기 위한 음성 데이터의 압축과정이다. 즉, 대역폭이 3.4KHz인 아날로그 음성신호를 Nyquist

rate 이상의 8KHz로 표본화하고 8비트 A/D 변환기를 이용하여 64Kbps의 디지털 음성신호를 낮은 rate의 디지털 음성신호로 바꾸게 된다. 먼저 흔히 사용되는 압축된 음성 데이터는 32Kbps의 ADPCM이 있고, 16Kbps의 subband coding이 있다. 그리고 디지털 음성신호를 10Kbps 이내로 줄일 수 있는 low bit rate coding 방식중에서 디지털 이동통신 시스템에서 관심의 대상이 되고 있는 것으로 AT&T에서 개발한 CELP(code excited linear predictive coding)와 MIT에서 개발한 STC(sine transform coding)가 있다. CELP방식은 음성을 deterministic 성분과 random한 성분으로 구분하여 deterministic 성분은 recursive 필터에 의해서 구현하고 random한 성분은 excitation으로 codebook에 의해서 구현한다. 음성의 deterministic 성분중 pitch에 관한 정보는 long-term 필터에 의해서, 음성의 formant에 관한 정보는 short-term 필터에 의해서 구현한다. 그리고 gain term 또한 추출하여야 한다. STC 방식은 음성 신호를 유성음과 무성음으로 구분하여 유성음인 경우에는 FFT를 사용하여 음성의 pitch 주파수 및 formant에 관한 정보 그리고 약간의 위상정보를 추출하여 전송하고 무성음인 경우에는 단지 진폭(amplitude)만을 전송한다. 이 방식에서 가장 어려운 부분은 pitch 주파수를 찾는 것인데 그 이유는 음성에서 가끔 pitch 주파수가 없어지기 때문이다. CELP방식은 무성음의 경우에 음성코딩의 특성이 우수하고, STC방식은 유성음의 경우에 음성코딩의 특성이 좋다고 알려져 있다. 따라서 위의 두가지 방식을 low bit rate 음성코딩에서 적당히 결합하여 서로의 단점을 보완하는 음성코딩방식도 거론되고 있다.

그런데 여러가지 음성코딩방식에 있어서 그 성능의 우수성을 평가하는데 있어서 coding rate, 사용된 오류정정부호와 coding후의 음성의 질(quality)을 고려하여야 한다. 낮은 coding rate일 수록 주파수 스펙트럼을 효율적으로 이용할 수 있으므로 바람직하나 음성부호기의 구현의 견지에서 볼때 계산량이 늘어나게 되며 음성처리의 시간지연도 커지게 되고 또한 음성의 질도 음성 coding rate가 낮을수록 떨어지게 되므로 여러가지를 고려하여 결정할 문제이다. 그리고 coding rate가 낮은 음성일 수록 채널에서 생기는 오류에 취약하여 음성의 질이 급격히 떨어지는 단점이 있어 오류정정부호를 사용해야 하는 음성 비트의 수가 증가하게 된다. 음성의 질은 정량적으로 결정하기에 매우 어려운 문제이며 요즘 음성의 질을 나타내 주는 척도로 주로 사용되는 것은 DAM(diagnostic acceptability measure), DRT

(diagnostic rhyme test) 및 MOS(mean opinion score)가 있는데 최근 들어서 MOS가 가장 널리 사용되고 있다.

미국의 디지털 이동통신 시스템에서는 CELP의 변종인 Motorola에서 제안한 VSELP(vector-sum excited linear predictive coding)가 표준으로 채택되었다. 음성 coding rate는 7.95Kbps이고 음성 프레임은 20msec이다. 유럽의 음성코딩 방법으로는 RPE-LTP(regular pulse excitation long term prediction)가 채택되었고 음성 coding rate는 13Kbps이며 음성 프레임은 20msec이다. 유럽의 음성코딩의 표준규격은 미국의 음성코딩의 표준규격보다 rate가 높기 때문에 음성의 질면에서 볼때 채널에서의 비트오류에 강인하다고 할 수 있다. 따라서 유럽의 디지털 이동통신 시스템은 미국의 디지털 이동통신 시스템보다 낮은 C/I에서 운용될 수 있으며 다시 말해서 frequency reuse ratio를 높일 수 있고, 또 오류정정부호를 보다 간단한 것을 사용할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 또한 향후 half rate 음성코딩을 사용하는 경우에 음성 codec의 구현이 용이한 면이 있다. 그러나 주어진 주파수 스펙트럼 사용의 효율성이 떨어지게 되는 문제점이 있다.

Ⅷ. 결 론

본 논문에서는 아날로그 및 디지털 이동통신 시스템에 사용되는 여러가지 핵심요소 기술에 대하여 논하였다. 즉 주파수가 제한적이고 전력이 제한되는 이동통신

시스템의 특성, 채널특성, 그리고 디지털 이동통신 시스템의 아날로그 이동통신 시스템과의 병존성, 구현시 하드웨어의 복잡성, 그리고 점점 시장점유율이 높아지며 단순경박하게 구현되어야 하는 휴대형단말기등을 고려하여, 다원접속방식, 변복조방식, 등화기 및 다이버시티, 채널부호화방식, 음성코딩방식등에 관한 기술적인 특성 및 장단점을 비교 서술하였다. 또한 이러한 여러가지 이동통신 시스템의 여러가지 핵심요소 기술들이 유럽, 미국 및 일본의 디지털 이동통신 시스템 규격에서 어떻게 선택되었는지를 논하였다. 그런데 이러한 요소 기술들은 최근에 부각되고 있는 무선통신 시스템인 개인휴대통신(personal communication service:PCS), 이동위성통신(mobile satellite communication system), 무선구내교환기(wireless PABX), 무선 LAN 시스템등의 핵심기술과 같은 것으로서 이 분야에 있어서 기반기술의 구축은 향후의 전자산업 분야에서 대단한 비중을 차지할 위에서 언급된 여러가지 무선통신시스템들의 발전 및 국산화에 초석이 되리라 생각한다. 더욱이 최근 들어서 국제적으로 날로 심화되고 있는 자국 기술보호에 의해서 높아지는 특허장벽이 우리나라와 같이 자체 기술력이 뒤지는 경우에 전자산업 전반에 미치는 영향이 대단히 크지 않을 수 없다. 특히 특허장벽은 국가대 국가 사이에 정치적으로 해결될 수 있는 무역장벽과는 달리 이윤만을 추구하는 기업들간에 해결되어야 할 문제이기 때문에 문제의 심각성이 더해진다. 따라서 이동통신에 관련된 여러가지 요소 기술에 대한 국가적인 차원에서의 적극적인 연구 개발지원이 절실히 요청된다고 아니할 수 없다. (주)

筆 者 紹 介



盧 宗 善

1959年 1月 1日生

1981年 2月 서울대학교 공과대학 전자공학과(학사)

1984年 2月 서울대학교 대학원 전자공학과(석사)

1988年 5月 University of Southern California
Dept. of Electrical Engineering(박사)

1988年 2月 ~ 1990年 7月 Hughes Network Systems

1990年 9月 ~ 현재 건국대학교 공과대학 전자공학과 조교수

주관심분야: 이동통신, 위성통신, 오류정정부호, 암호학