

무선채널의 협대역화에 따른 변조방식 고찰 (A Survey on Modulation Methods for Narrow Bandwidth of Wireless Channel)

박상영* 이흥섭**
(S. Y. Park, H. S. Lee)

최근 무선통신의 활성화에 따라, V/UHF(very/ultra high Frequency) 대역에서 한정된 주파수를 효율적으로 이용하기 위한 방법의 하나로서, 점차 점유주파수 대역의 폭을 축소하여 보다 많은 이용자를 수용하도록 무선채널의 협대역화가 추진되고 있다.

본 고에서는 V/UHF 대역 무선통신에서 채널의 협대역화에 관련된 기술 중 현재까지 사용되고 있는 FM(frequency modulation)과 AM(amplitude modulation) 변조방식의 장, 단점을 살펴본 후, 새로운 LM(linear modulation) 변조방식에 대한 기술적 배경 및 특성을 알아보았다. LM은 SSB(single side band)-AM이 발전한 것으로서, TTIB(transparent tone-in-band), CLT(Cartesian loop transmitter), FFSR(feed-forward signal regeneration), DSP(digital signal processing) 등 4가지의 기술이 결합되어 만들어진 것이다. LM 방식에 사용된 4가지의 기술을 소개하고, 기존의 변조 방식에 비해 개선된 사항에 대해 서술한다.

I. 서 론

무선통신기기의 사용이 급격히 증가함에 따라 무선채널의 부족이 발생하고 있다. 한정된 무선채널로 인하여 사용자의 무선채널에 대한 요구를 충족시키지 못하게 됨에 따라, 기존의 무선채널 간격을 줄임으로써 사용자 수를 늘리기 위한 방법이 연

구되어져 왔다[1, 2]. 지금까지는 전파법규에 의해 채널간격을 25~30kHz로 제한하고 있으나, 통신 선진국을 중심으로 12.5kHz의 대역폭을 가지는 협대역 무선기기의 사용을 법적으로 규정하고 채널 간격을 더욱 좁히기 위한 규격을 제정하고 있는 실정이다. 우리나라에서도 V/UHF 대역에 대해 1996년부터는 무선채널 간격이 12.5kHz인 무선기기를만 사용하도록 법으로 제정되어 있다. 그러나 미국의 FCC(Federal Communication Commission)에서는 무선채널의 수를 더욱 늘리기 위해, 220MHz에서

* 부호4실 연구원

** 부호4실 실장, 책임 연구원

222MHz의 대역에 대하여는 채널간격이 5kHz나 6.25kHz인 VNB(very narrow band) 무선기기의 사용을 권고하고 있으며, 이를 규격화하기 위한 검토가 이루어지고 있다[3]. 외국의 무선기기 제작업체들은 기존의 아날로그 FM 방식에서 탈피하여 디지털 PM(phase modulation)이나 LM 방식등의 새로운 변조방법을 사용하여 협대역 무선기기를 개발하고 이를 상품화하고 있다[1,3]. 본 고에서는 협대역 무선채널을 위한 새로운 변조방법으로 제시되고 있는 LM 방식에 대하여 알아본다.

기존의 아날로그 FM 방식에 의해서 채널간격을 12.5kHz로 유지하기 위해서는 음성신호를 300Hz에서 2700Hz로 제한하고 변조를 2kHz이내로 제한하여야 한다. 국내 무선기기 제작업체에서 협대역용 무선기기를 제작하는 데 사용하고 있거나 검토 중인 방법으로 비교적 간단하게 무선채널의 협대역화를 이룰 수 있는 방법이다. 그러나 25kHz의 채널간격을 가지는 무선기기와 동일한 전력으로 송신할 경우, 채널간격이 25kHz일 때 (300Hz에서 3000Hz까지의 음성신호를 5kHz로 변조하여 송신)에 비해 음질이 떨어지고 통화가능 거리가 줄어들게 된다. 이는 수신측에서의 수신된 음성신호의 세기와 잡음의 세기의 비가 떨어지기 때문이다. 이와 같은 단점을 보완하기 위한 방법으로 음성신호를 변조하였을 때도 점유주파수 대역폭이 음성신호의 대역폭과 동일한 AM 방식이 있으나, FM 방식과 AM 방식을 비교하면 AM 방식이 가지는 단점이 상당히 크다. 이를 개선하기 위한 방법이 1980년대 초부터 영국 Bath 대학의 McGeehan 교수에 의해 연구되어졌으며[3-5], 최근들어 LM 방식이라 불리어지고 있다[1].

II. FM 방식과 AM 방식의 비교

AM 방식은 변조된 캐리어 신호의 진폭에 음성정보가 포함되어 있으므로 인위적인 전기적 잡음이나 간섭에 의해 캐리어 신호의 진폭이 변할 경우, 수신측의 검파회로에서 음성신호가 복원될 때 잡음이 그대로 검파되므로 제대로 복원되지 못한다. 그러나 FM 방식은 캐리어 신호의 주파수에 음성정보가 실리므로 인위적인 전기적 잡음이나 간섭에 의해 진폭이 변하여도 수신측에서 수신된 캐리어의 진폭을 제한하는 리미터를 사용하여 캐리어 신호의 진폭의 변화를 없애고, 주파수 변별기를 사용하여 주파수 성분에 실린 음성신호를 추출하므로 잡음이나 간섭에 의한 영향을 충분히 제거할 수 있다.

음성신호를 $s(t)$, 캐리어 주파수를 f_c 라 하면 AM 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s_{am}(t) = s(t) \cos 2\pi f_c t \quad (1)$$

이처럼 AM 방식은 캐리어신호의 진폭에 음성정보가 포함되므로 캐리어 진폭이 음성신호의 진폭에 따라 수시로 변화한다. 따라서 AM 방식에서 캐리어 신호를 증폭시킬 때 입력력 특성이 선형인 증폭기를 사용하여야 수신측에서 복원된 음성신호가 왜곡을 일으키지 않으므로 전력 효율면에서는 상당히 떨어진다. 일반적으로 AM신호의 증폭에는 전기적 특성이 동일한 NPN, PNP 형의 트랜지스터를 결합한 Push-Pull 형태의 B급 증폭기나 AB급 증폭기를 많이 사용하는데, 두개 트랜지스터의 동작점이 교차하는 점에서의 전류 전압 특성 즉 출력력 특성이 선형적이지 못하여 이 부근에서는 증폭을 하지 않는다. 따라서 이론적으로는 B급 증폭기의 효

율이 63%정도이나 실제로는 증폭기의 효율을 60% 정도만 사용하므로 전체적인 효율은 40% 정도로 상당히 떨어진다.

FM 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s_{fm}(t) = A \cos[2\pi f_c t + k_f \int_0^t s(t) dt] \quad (2)$$

여기서 k_f 는 변조지수이다. 식 (2)에서와 같이 FM 방식은 음성신호의 진폭이 변화하여도 캐리어 신호의 진폭은 항상 일정하여 증폭기의 선형특성이 요구되지 않으므로 입출력 특성이 스위칭 동작과 같은 특성을 나타내고, 전력효율이 뛰어난 C급 증폭기를 사용한다. 이론적인 C급 증폭기의 효율은 72%이다. 따라서 FM 방식은 증폭기의 효율을 최대화할 수 있으므로 전력효율면에서 AM에 비해 상당히 좋다.

FM 방식은 capture 효과가 있어 두개의 신호가 동시에 존재할 경우 수신강도가 강한 신호를 선택하고 약한 신호는 억제하는 특성 때문에 수신강도가 낮은 신호, 즉 잡음신호와 수신신호의 세기가 일정한 차이 이내에 있을 경우에 대하여는 수신하지 못하는 단점이 있다. AM 방식은 이러한 단점이 없어 수신강도가 낮은 신호에 대하여도 수신하는 장점이 있다. 이러한 장점 때문에 항공기와 관제소 사이에서는 AM 방식을 사용한다.

FM 방식의 대역폭 B와 변조지수 k_f 는 다음과 같다.

$$B = 2(\Delta f + f_m) \quad (3)$$

$$k_f = \Delta f / f_m \quad (4)$$

여기서 Δf 는 최대 주파수 편이, f_m 은 음성신호대역에서 가장 높은 주파수이다. FM 방식은 신호대 잡음비를 크게하기 위해서는 변조를 깊게 걸어야 하는데

<표 1> FM방식과 AM방식의 비교

항목 \ 방식	FM방식	AM방식
잡음에 의한 영향	적다	많다
전력효율	좋다(60%이상)	나쁘다(40%)
수신신호강도	일정수준 이상이어야 함	약해도 됨
주파수효율	나쁘다(대역폭이 넓다)	좋다(대역폭이 일정)
변복조회로	복잡	간단

변조를 깊게 걸수록 주파수 편이가 커지므로 점유주파수 대역폭이 넓어진다. 즉, 수신되는 음성신호의 음질을 좋게 하기 위해서는 넓은 대역폭이 필요하다. 따라서 대역폭이 줄어들면 신호대 잡음비의 저하로 인한 음질의 저하는 필연적이다.

AM 방식의 대역폭을 알아보기 위해 식(1)을 푸리에 변환하면 다음과 같다.

$$S_{AM}(f) = 1/2[S(f + f_c) + S(f - f_c)] \quad (5)$$

음성신호 $s(t)$ 의 대역폭이 변조 후에도 캐리어 주파수 위치에서 그대로 유지됨을 알 수 있다. 따라서 AM 방식은 변조에 따른 점유주파수 대역폭의 변화가 없으므로 주파수 효율면에서 FM 방식에 비해 좋고, 변복조 회로의 구성도 AM 방식이 FM 방식에 비해 간단하다.

이상에서 살펴본 AM 방식은 음성대역을 변조 후 그대로 송신하는 DSB-AM(double side band-amplitude modulation)에 대한 것이며, DSB-AM의 단점을 줄일 수 있는 방식으로 DSB-SC(suppressed carrier) 방식이나 SSB-AM 방식이 있다.

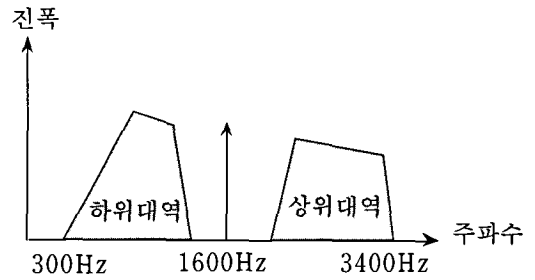
III. LM 방식

앞장에서 살펴 본 바와 같이 주파수 효율면에서

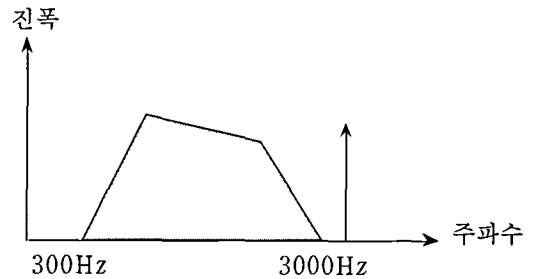
뛰어난 AM 방식의 단점을 개선한 것이 LM 방식이다. AM 방식은 FM 방식이나 PM 방식과 달리 음성 신호의 변화와 관계없이 항상 일정한 주파수와 위상을 유지하고 있으므로 통신공학에서는 AM 방식을 LM 방식으로 분류하기도 하나, 최근들어 송수신기와 무선채널을 선형화하는 방법이 발달함에 따라 AM 방식과 구분하여 LM 방식이라 부르고 있다[1]. LM 방식은 AM 방식의 단점인 인위적 잡음과 간섭에 의한 영향과 전력의 비효율성을 개선할 수 있고, 점유 주파수 대역폭이 가장 작은 SSB-AM 방식을 무선채널의 협대역화에 따른 변조 방식으로 인식하며 연구 개발되어졌다[4-6]. LM 방식은 4가지의 새로운 기술들이 결합되어, 어떠한 전파 조건하에서도 무선채널을 선형화하는 것이 가능하게 되어 LM 방식이라는 명칭이 붙게 되었다. LM 방식에 사용되는 4가지의 새로운 기술은 TTIB, CLT, FFSR, DSP 등이다.

1. Transparent Tone-In-Band

TTIB는 (그림 1)에서와 같이 송신할 음성신호를 주파수 평면 상에서 두개의 부대역(sub-band)으로 분할하고 두 대역의 사이에 파일럿 톤(pilot tone)을 삽입하는 것이다. 이 기술이 제안될 당시에는 단순히 두개의 대역으로 분할하는 방법이 사용되었으나, 현재는 음성신호처리 기술의 발달로 파일럿 톤이 위치하는 대역의 음성신호 손실을 보상하기 위해 음성신호를 두개의 부대역으로 분할하고, 상위 대역을 더 높은 대역으로 천이 시킨 후 생기는 중간 대역에 파일럿 톤을 삽입하는 기술이 사용되어지고 있다. (그림 1)에서는 파일럿 톤이 1600Hz에 위치하나 실제에



(그림 1) TTIB 기술에 의해 파일럿 톤이 음성대역의 중간에 삽입된 형태

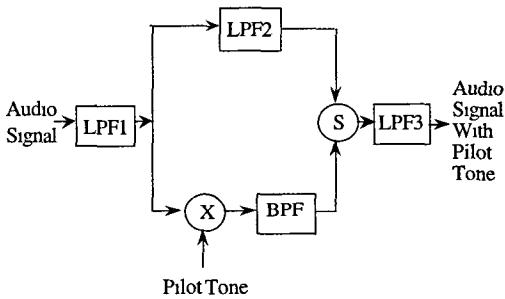


(그림 2) TAB 기술에 의해 파일럿 톤이 음성대역의 상위대역에 삽입된 형태

있어서는 파일럿 톤이 위치하는 주파수는 음성대역 중에서 신호의 전력밀도가 가장 높은 800Hz에서 1300Hz 범위를 제외한 곳에 위치한다.

이외에도 시스템을 간단히 하기 위해 (그림 2)에서와 같이 음성대역 상위 차단 주파수인 3000Hz 이상의 대역에 파일럿 톤을 삽입하는 TAB(tone above band) 기술이 사용되어지기도 한다. 그러나 실험적으로 3000Hz 이상의 대역에서는 점유 주파수 대역폭을 늘리지 않기 위한 송신기에서의 필터 특성등에 의해 TTIB에 비해 성능이 떨어지는 것으로 알려져 있다.

(그림 3)은 TTIB를 생성하기 위한 과정을 도시한



(그림 3) TTIB 과정을 나타내는 블록도

것으로, LPF(low pass filter)1은 음성신호의 대역을 300Hz에서 3000Hz로 제한하기 위한 것이다. (그림 1)에서 하위 대역의 음성신호는 (그림 3)의 LPF2에 의해 필터링되고, 상위 대역의 음성신호는 파일럿 톤에 의해 더 높은 대역으로 천이된 후에 BPF(Band Pass Filter)에 의해 파일럿 톤 주파수에서 3400Hz까지의 상위대역이 필터링된다. 상하위 대역은 합산되어 LPF3에 의해 300Hz에서 3400Hz까지 제한된다. TTIB 기술에 의해 삽입된 파일럿 톤은 수신측에서 추출되어 주파수 제어와 진폭 제어를 하는 기준 신호로 사용된다. 수신된 파일럿 톤의 왜곡 정도와 주파수 천이 정도에 따라 수신된 음성신호를 처리함으로써 무선채널 양단 간의 조건에 상관 없는 선형화 작업이 가능하여 양질의 음성신호를 얻을 수 있다.

FM 방식에서 신호대 잡음비를 향상시키기 위해 낮은 주파수 성분의 진폭을 줄이고 높은 주파수 성분의 진폭을 키우는 것과 같이, LM 방식에서도 Amplitude-Compandor를 사용하여 음성신호를 압제한 후에 TTIB 과정에 의해 파일럿 톤을 삽입한다. 그리고 음성의 신호와 데이터 신호를 동시에 송수신하기 위해 TTIB와 TAB를 동시에 사용하는 방법

을 채택하여, 음성대역의 중간 주파수 대역의 파일럿 톤을 데이터용으로 할당하고 TAB 신호를 수신된 음성신호의 처리에 사용하는 방법이 사용되기도 한다. 현재까지 5kHz LM 방식의 무선기기를 개발하여 발표한 회사는 SEA사와 UNIDEN사 그리고 E.F.Johnson사가 있는데, SEA사는 TAB 기술을 나머지 회사들은 TTIB 기술을 사용하고 있다.

2. Cartesian Loop Transmitter

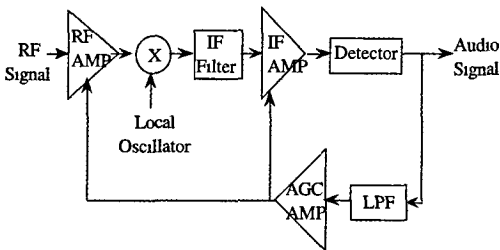
CLT는 능동 케환 오류 증폭기(active feedback error amplifier)를 사용하여 캐리어 주파수의 In-phase 성분의 신호와 quadrature-phase 성분의 신호에 대해 입력과 출력을 비교하여 오차를 케환시킴으로써 RF 증폭기의 선형성을 최대화하고 소비전력을 최소화하였다. AB급 증폭기의 경우 기본주파수와 3차 하모닉 주파수 사이의 인터모드 성능이 20dB 정도이나 능동 케환 오류 증폭기를 사용함으로써 3차 하모닉 인터모드 성능을 70dB로 향상시킬 수 있다. 3차 하모닉 주파수에 의한 영향은 규격상에서 스퓨리어스(spurious) 발사강도에 의해 제한되고 있는데 규격치가 60dB 이하이다. AB급 증폭기를 사용할 경우 3차 하모닉 주파수를 60dB 이하로 억제하고 캐리어 주파수를 송출하기 위해서는 캐리어 주파수 대역의 대역통과 필터를 사용해야 하므로 RF 전력증폭시 대역통과 필터에 의한 손실을 감안하여 증폭을 하여야한다. 그러나 CLT를 사용할 경우 3차 하모닉 주파수가 캐리어 주파수 보다 70dB가 작으므로, 스퓨리어스 발사강도 규격보다 약 10dB 정도가 작으므로 대역통과 필터를 사용하지 않고 그대로 캐리어를 송출할 수 있다.

3. Feed-Forward Signal Regeneration

AM 방식의 수신측에서 수신된 신호의 전파강도에 따른 진폭의 변화를 항상 일정하도록 하기 위해 사용하는 자동이득조정은 (그림 4)에서와 같이 IF 증폭기 출력을 정류하고 레벨을 측정하여 RF 증폭기와 IF증폭기에 궤환시킴으로써 단순히 음성신호의 진폭만을 제어한다. 이 방법은 IF 신호를 검파한 후에 레벨을 측정하는데 적분기 형태의 LPF를 사용함으로써 음성신호에 나타나는 수 Hz의 섭동(fluctuation)에 대해서만 이득조정을 한다. 따라서 다중경로(multi-path)나 페이딩(fading)에 의한 빠른 섭동에 대해서는 신호대 잡음비가 저하된다.

FFSR은 수신된 신호에서 TTIB에 의해 음성대역의 중간에 삽입된 파일럿 톤을 추출하여 위상과 주파수 그리고 진폭 등의 차이를 측정하여, 다중경로, 레이라이 페이딩, Doppler effect, 기타의 잡음 등에 의해 음성신호가 왜곡되어진 정도를 판단하고, 지연된 원래의 IF신호를 처리하므로 송수신기 양단간의 전파조건에 관계없이 무선채널을 선형화하여 수신된 음성신호를 원음에 가깝도록 재생할 수 있다.

(그림 5)는 FFSR의 구성도로, 아래 쪽 경로는 IF 캐리어에 의해 IF 신호가 음성대역으로 천이되고 대역



(그림 4) AM 방식의 수신회로

통과 필터 BPF에 의해 파일럿 톤이 추출되어 처리되는 과정을 보여준다. 파일럿 톤의 진폭을 $x(t)$, 주파수를 ω_p , 위상 오류 등을 $y(t)$ 라 하면 IF 캐리어(carrier)에 의해 기저대역(base band)으로 변환되어 추출된 파일럿 톤은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(t) = x(t)\cos(\omega_p + y(t)) \tag{6}$$

추출된 파일럿 톤을 제곱승 검파하면 다음과 같은 신호를 얻을 수 있다.

$$P_1(t) = k(x^2(t) + x^2(t)\cos 2(\omega_p + y(t))) \tag{7}$$

이때 생성되는 2배 고조파 주파수 성분은 LPF에 의해 제거되므로 $x^2(t)$ 신호만이 LPF를 통과하게 된다. LPF를 통과한 신호와 임계값(threshold value) 중에서 큰 값을 사용하여 파일럿 톤의 주파수와 진폭의 변화 정도를 알아낸다. 지연시간은 신호처리에 소요되는 시간이므로 시간 지연요소를 무시하고, 임계값보다 $x^2(t)$ 가 크다고 가정하여 추출된 파일럿 톤과 나눈 신호는 다음과 같다.

$$P_2(t) = k/x(t) \cdot \cos(\omega_p + y(t)) \tag{8}$$

이 신호를 이용하여 IF 신호에서 음성신호를 생성해 낸다. 각 신호 경로에서의 지연시간은 신호처리에 걸리는 시간을 보상하여 주기 위한 것이다.

4. Digital Signal Processing

실시간의 디지털 신호처리는 TTIB, CLT, FFSR을 가능하게 한다. (그림 3)의 TTIB 생성방법은 아날로그 소자를 사용하여 생성하는 방법이나, DSP를 사용하여 음성신호를 디지털 신호로 처리할 경우 FFT를

이용하면 간단하게 TTIB 신호를 생성할 수 있다. FFSR은 (그림 5)에서 그림자진 부분이 DSP로 구현하는 부분이다. 아날로그적으로 구현하기 힘든 송제산은 거의 모든 디지털 신호처리용 프로세서에서 한 클럭이내에 실행이 가능하며, 파일릿 톤의 신호처리에 의한 지연시간으로 생기는 원 신호와 신호처리한 신호사이의 시간차는 아날로그적으로는 delay line 등의 시간 지연소자를 사용하여야 하는 어려움이 있으나, 디지털에서는 원래의 IF 신호를 메모리에 저장하였다가 필요한 시간에 사용할 수 있으므로 지연시간에 대한 문제를 간단히 해결할 수 있다.

5. LM 방식의 장점

가. 음질

25kHz FM 방식은 12dB SINAD를 측정하여 수신기의 성능을 평가하고, 12.5kHz FM 방식은 14dB SINAD를 평가하여 수신기의 성능을 평가한다. 변조율과 음성대역을 줄이므로 음질의 저하 때문에 2dB의 성능 저하가 나타난다. 5kHz LM 방식은 14dB SINAD 측정시 12.5kHz FM 방식보다 2dB의 성능이 개선된다. 통화가 가능한 거리의 임계지점에서의 음

질은 기존의 25kHz FM 방식에 비해 우수하다.

나. 통화 범위

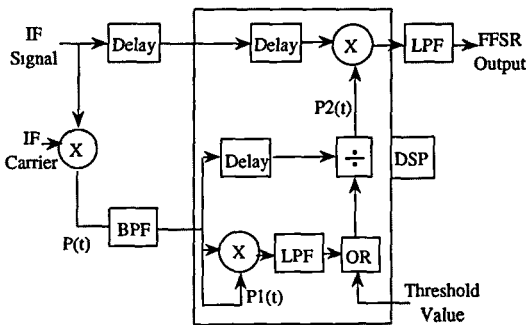
통화 범위는 변조 방법과 송신전력 그리고 송수신 안테나의 상태에 따른 함수이나, LM 방식은 FM 방식에 비해 6dB의 개선효과가 있어 25W의 PEP(Peak Envelope Power) LM 신호와 100W FM 신호는 동일한 통화 범위를 가진다.

다. 소비전력

회로 설계 기술과 집적회로화에 따라 차이가 있겠으나 25W의 PEP LM 송신기는 약 3A를 소비하나 25W의 FM 송신기는 6~8A의 소비전력을 소비한다. 따라서 LM 방식을 사용한 휴대용 무전기는 소비전력이 기존의 FM 방식 무전기에 비해 상당히 적으므로 동일한 배터리를 사용하여 더 긴 통화 시간을 얻을 수 있다.

라. 오류비트율

오류 정정 코드를 사용하지 않을 경우 LM 방식은 9.6Kbps의 데이터 전송에서 1×10^{-4} 이하의 BER를 유지하므로, FM 방식에 비해 100배정도 개선된 것이다. 오류정정 코드를 사용하여도 실질적인 데이터에 대한 BER은 FM 방식에 비하여 4배 정도가 우수한 것으로 알려져 있다.



(그림 5) FFSR 구성도

IV. 결 론

LM 방식은 기존의 SSB-AM 방식을 개선한 것으로 TTIB-SSB 방식으로 불리기도 한다. 외국에서는 220MHz 대역의 간지 무선국에서 이미 5kHz 채널간

격을 갖는 LM 방식을 사용한 무전기를 사용하고 있으며 이를 규격화하기 위한 작업이 이루어지고 있다. 무전기 제작업체도 장비의 개발과 성능 개선을 위한 노력을 경주하고 있다. 이와 같은 현상은 무선 채널의 협대역화를 통해 더 많은 사용자를 수용하는 것이 가능하고, LM 방식의 모든 신호처리가 디지털 신호 처리로 구현이 가능하므로 경제적이라는 장점이 있기 때문에 나타나는 현상이라 생각된다. 또한 모든 신호처리가 디지털 신호에 의하므로 LM 방식과 FM 방식을 모두 수용하는 dual 모드 무선기기의 제작이 가능한 것도 장점이다.

국내에서 12.5kHz의 채널간격을 규격화 하였으나 국제적인 추세는 5kHz 채널간격을 사용하는 쪽으로 가고 있으며, E. F. Johnson사, SEA사는 5kHz LM 방식을 채택한 TRS(trunked radio system) 장비도 개발하여 시판하고 있다. 통신시장의 개방에 따라 국내에서도 조만간 5kHz 채널 간격을 가지는 VNB 무선기기를 사용하여야 할 것이므로, 국내에서도 변조방법에 대한 연구나 장비의 개발을 서둘러야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] M.R.J Bayly, "Technology update : 5kHz linear modulation," *Mobile Radio Technology*, Jan. 1994.
- [2] Roger Belcher, Mike Fitch, David Ogle and Geoff Varrall, *Mobile Radio Servicing Handbook*, Heinemann Newnes, 1989.
- [3] Gregory M. Stone and Karen Bluiitt, "Narrowband channel signaling demands bandwidth efficiency," *Mobile Radio Technology*, pp 22~34, Sep. 1993.
- [4] J. P. McGeehan and A.J. Bateman, "Phase-locked transparent tone-in-band(TTIB) : A new spectrum configuration particularly suited to the transmission of data over SSB mobile radio networks", *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-32, no.1, pp. 81~87, Jan. 1984
- [5] J. P. McGeehan and A. J. Bateman, "Theoretical and experimental investigation of feedforward signal regeneration as a means of combating multipath propagation effects in pilot-based SSB mobile radio systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. VT-32, no 1, pp.106~120, Feb. 1984.
- [6] Bruce Lusignan, "Single-sideband transmission for land mobile radio," *IEEE Spectrum*, pp 33~37, July 1978