

재밍 환경 하에서 OFDM과 FMT 시스템의 성능 비교

Performance Comparison of OFDM and FMT Systems under Jamming Environment

김종만*

Kim, Jong-Mann

ABSTRACT

In this paper, the performance of OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) and FMT(Filtered Multi-tone) Systems is compared under jamming environment. Two systems are multi-carrier systems to improve data rates. Through the comparison of two systems under jamming environment, the characteristics and strong/weak points of each system are analyzed.

주요기술용어(주제어) : Jamming, OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing), FMT(Filtered Multi-Tone), ISI(Inter-Symbol Interference), ICI(Inter-Carrier Interference), CP(Cyclic Prefix), FFT(Fast Fourier Transform), Polyphase Filter, CIR(Channel Impulse Response), JSR(Jamming to Signal Ratio)

1. 서론

정보를 전달함에 있어 가장 어려운 점은 가능한 많은 정보를 전달하고자 하면서 에러(Error)는 적게 일어나길 원한다는 것이다. 특히 재밍(Jamming) 환경이 가해지는 군사적 환경일 경우 정보 전달 과정에서 발생하는 에러를 막는 것은 무엇보다 중요하다.

요즈음 많은 정보를 전달하기 위한 방법으로 여러 개의 부채널(Subcarrier)을 사용하는 다중캐리어(Multi-carrier) 방식이 활발히 연구되어지고 있는데, 대표적인 다중캐리어 방식은 바로 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)^[1]과 FMT(Filtered Multi-Tone)^[2]이다.

이러한 다중캐리어 방식들은 단일 캐리어(Single carrier) 방식에 비해 협대역 간섭 발생 시 일부 부채널만 영향을 받음으로 전체적으로는 영향을 덜 받는다는 근원적인 장점이 있으며, OFDM의 경우 주기적 프리픽스(Cyclic prefix)를 사용함으로써 다중경로페이딩(Multi-path fading) 환경에서 발생하는 ISI(Inter-Symbol Interference)와 ICI(Inter-Carrier Interference)를 쉽게 극복할 수 있고, 부채널 간의 직교성(Orthogonality)을 유지하여 주어진 주파수 대역을 보다 효율적으로 사용할 수 있는 추가적인 장점이 있으며, FMT의 경우 각 부채널 간에 필터를 사용함으로써 주파수 오프셋(Frequency offset)이 있는 환경에 강인하다는 추가적인 장점을 가지고 있다.

그러나 OFDM의 경우 주기적 프리픽스를 사용하여 ISI와 ICI를 제거할 수는 있으나, 정보와는 아무런 관련이 없는 redundancy 성분인 주기적 프리픽스의 사용으로 인하여 정보 전달의 효율성이 떨어지며, 주

† 2007년 3월 21일 접수~2007년 5월 18일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : jman95@add.re.kr

파수 오프셋(Frequency offset)에 민감하게 반응하는 단점이 있다.

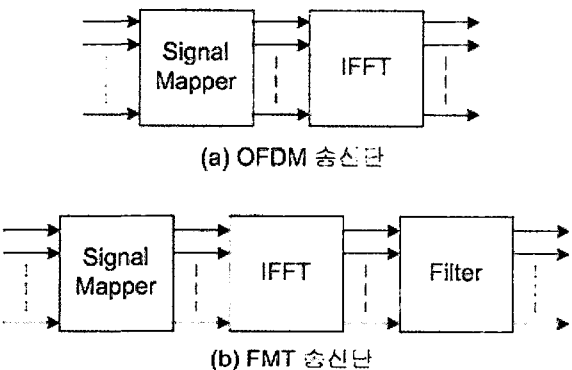
FMT의 경우 OFDM에서 사용하는 주기적 프리픽스와 같은 성분이 없으므로 인해 ISI와 ICI가 발생할 수 있으나 더 많은 정보를 전달할 수 있으므로 더 효율적이라고 할 수 있다. 현재 FMT에서 ISI 및 ICI를 제거하기 위한 방법으로 등화기(Equalizer), 간섭 제거기(Interference canceller) 등이 세계 여러 곳에서 연구되어지고 있다.

FMT와 OFDM의 송신단 핵심부분을 살펴보면 그림 1과 같다.

그림 1에서도 나타나있듯이 두 시스템의 가장 큰 차이점은 필터이다. 그림 1에서는 송신단만 비교하였으나 수신단의 가장 큰 차이점도 필터이다. 그림 1에서는 나타나 있지 않지만 OFDM에서는 주기적 프리픽스를 삽입하는 부분이 있으나 필터에 비해 구조적으로 간단하여 비교대상에서 제외하였다.

따라서 두 시스템의 복잡도(Complexity) 비교는 필터의 복잡성에 의해서 구분된다. 그러나 FMT에서 사용하는 필터는 FFT(Fast Fourier Transform)와 polyphase 필터를 이용하여 상당히 감소시킬 수 있으므로 인해^[2], FMT를 OFDM과 직접적으로 비교할 수 있게 되었으며 실제로 OFDM과 FMT의 기본 특성을 비교 실험한 결과물도 있다.^[3]

본 논문에서는 OFDM과 FMT 시스템의 기본 특성을 비교/분석해 보고 더 나아가 채널 환경 하에서 두 시스템의 성능이 어떻게 변화하는 지에 대해 시뮬레이션을 통하여 비교 분석해 본다.



[그림 1] OFDM과 FMT 송신단

2. OFDM 시스템

OFDM 시스템은 서론에서도 언급하였듯이, 주기적 프리픽스의 첨가함으로 인해 ISI 및 ICI 발생을 제거할 수 있다.

전형적인 OFDM 시스템은 데이터를 전송할 때 FFT 및 IFFT(Inverse FFT)를 근간으로 하여 변조 및 복조를 하는데, 사이즈가 M인 경우를 생각해 보면, i-번째 전송 심벌(Transmitted symbol)인 $\{X_{i,m}\}_{m=0}^{M-1}$ 을 M-point IFFT 처리하면 식 (1)과 같아진다.

$$x_{i,k} = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=0}^{M-1} X_{i,m} \exp\left\{j \frac{2\pi m k}{M}\right\}, \quad 0 \leq k < M \quad (1)$$

이 심벌에 길이 G인 주기적 프리픽스를 $\{x_{i,k}\}_{k=0}^{M-1}$ 의 앞에 추가시킨 후 OFDM 심벌을 길이 C인 채널을 통하여 전송한다. 만약 G가 C이상이면, 수신단에서 보호구간을 제거한 후 수신된 신호는 식 (2)와 같게 되지만,

$$r_{i,k} = \sum_{c=0}^C h_{c,k} x_{i,(k-c)_M}, \quad 0 \leq k < M \quad (2)$$

G가 C 이하이고, 여기에 추가적으로 AWGN (Additive White Gaussian Noise)을 고려하면, i-번째 OFDM 심벌에 대한 수신 신호는 식 (3)과 같게 된다.

$$r_{i,k} = \begin{cases} \sum_{c=0}^{G+k} h_c x_{i,(k-c)_M} + \sum_{c=G+k+1}^C h_c x_{i-1,(k-c+G)_M} + n_{i,k}, & -G \leq k < C-G \\ \sum_{c=0}^C h_c x_{i,(k-c)_M} + n_{i,k}, & C-G \leq k < M \end{cases} \quad (3)$$

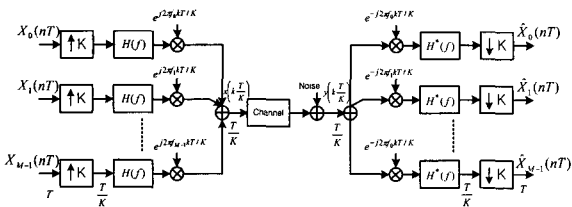
- 여기서 $(k)_M$: residue of k modulo M
- h_k : CIR(Channel Impulse Response)
- $n_{i,k}$: AWGN

식 (2)와 (3)을 보면 주기적 프리픽스가 채널의 길

이 이상이 되면 ISI 및 ICI가 발생하지 않지만, 그렇지 않으면 이에 대한 영향을 받음을 알 수 있다.

3. FMT 시스템

그림 2는 FMT 시스템을 개념적으로 나타낸 것이다.



[그림 2] M-band 시스템

그림 2에서의 각 기호의 의미를 살펴보면, M은 부채널 수, 1/T는 심벌 비율(rate), K는 upsampling 비율, L은 downsampling 비율을 나타낸다.

송신단에서 복소값(complex-valued) 변조 심벌인 $X_m(nT)$ 은 1/T의 심벌 비율로 제공된 후, K로 upsampling되고, 각각의 심벌들이 baseband 필터에 의해 필터링 된다. 기저대역(Baseband) 필터는 prototype 필터라고 불리며, 주파수 특성은 $H(e^{j2\pi f})$ 이고 임펄스 응답은 $h(k)$ 이다. 전송 신호 $x(kT/K)$ 는 각각의 주파수 영역으로 이동된 M개의 필터 출력 신호들이 더해진 것이며, K/T의 전송비율로 얻어진다.

수신단을 살펴보면 수신된 신호들은 주파수 영역에서 각각 원래의 위치로 복구되고, matched 필터링을 통과한 후에 K로 downsampling된다. 여기서 파라미터 K, M, 1/T은 각각 전송 신호의 spectral 특성을 결정한다.

그림 2에서 나타난 것을 기본으로 하여 수식을 유도하면 FFT와 polyphase 필터로 구성된다는 것을 알 수 있다. 유도 과정은 식 (4)~식 (12)에 나타나있다.

FMT 송신단은 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$x(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \left(\sum_{n=-\infty}^{\infty} X_m[n] h(t - nT) \right) \exp(j2\pi f_m t) \quad (4)$$

식 (4)에서 t 와 f_m 을 각각 $t = k \frac{T}{K}$, $f_m = m \frac{K}{MT}$ 으로 표현하면 식 (4)을 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x[k] &= x(kT/K) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \{ X_m[n] h(kT/K - nT) \cdot \\ &\quad \exp(j2\pi \frac{mK}{MT} \frac{kT}{K}) \} \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(kT/K - nT) \sum_{m=0}^{M-1} X_m[n] \exp(j2\pi \frac{mk}{M}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 k를 $k = i_0 M + l_0 = i_1 K + l_1$ 로 표현하면 식 (5)를 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x[k] &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \{ h((i_1 - n)K/T_K + l_1 T/K) \cdot \\ &\quad \sum_{m=0}^{M-1} X_m[n] \exp(j2\pi \frac{m(i_0 M + l_0)}{M}) \} \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} h_{l_1} [i_1 - n] \sum_{m=0}^{M-1} X_m[n] \exp(j2\pi \frac{ml_0}{M}) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} h_{l_1} [i_1 - n] x_{i_0}[n] \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)은 IFFT와 polyphase 필터형태로 표현된다는 것을 알 수 있다.

수신단을 살펴보면 수신신호를 $y(t)$ 라고 했을 경우 m번째 신호는 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$z_m(t) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} g(t - \tau) y(\tau) \exp(-j2\pi f_m \tau) \quad (7)$$

식 (7)에서 $g(t)$ 는 수신단의 필터이다.

여기서 $t = n' \frac{T}{K}$, $\tau = k \frac{T}{K}$, $f_m = \frac{mK}{MT}$ 로 표현하면 식 (7)을 식 (8)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} z_m(n' \frac{LT}{K}) &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} \{ g(n' \frac{LT}{K} - k \frac{T}{K}) y(k \frac{T}{K}) \cdot \\ &\quad \exp(-j2\pi \frac{mK}{MT} \frac{kT}{K}) \} \\ &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} \{ g(n' \frac{LT}{K} - k \frac{T}{K}) y(k \frac{T}{K}) \cdot \\ &\quad \exp(-j2\pi \frac{mk}{M}) \} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $k=i \cdot m+1$ 로 두면 식 (8)은 식 (9)로 표현할 수 있다.

$$z_m[n'] = \sum_{l=0}^{M-1} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \{g((n'L - iM - l)\frac{T}{K})y((iM + l)\frac{T}{K}) \cdot \exp(-j2\pi \frac{ml}{M})\}$$

$$= \sum_{l=0}^{M-1} u_l(n'L \frac{T}{K}) \exp(-j2\pi \frac{ml}{M}) \quad (9)$$

식 (9)에서 $u_l(n'L \frac{T}{K})$ 는 식 (10)과 같다.

$$u_l(n'L \frac{T}{K}) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} g((n'L - iM - l)\frac{T}{K})y((iM + l)\frac{T}{K}) \quad (10)$$

여기서 $n'L = i_1M + l_1$, $l \leq l_1 < l + M$ 라고 하면 식 (10)은 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

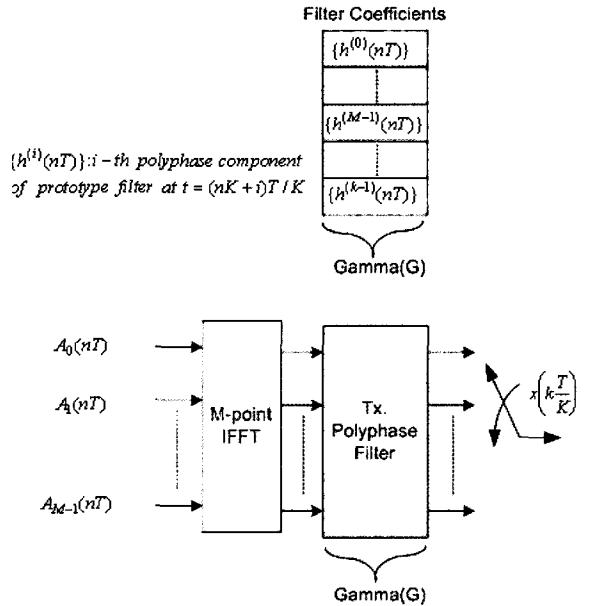
$$u_l[n'] = \sum_{i=-\infty}^{\infty} g[l_1 - l + (i_1 - i)M]y[iM + l]$$

$$= \sum_{i=-\infty}^{\infty} g_{l_1-l}[i_1 - i]y_l[i] \quad (11)$$

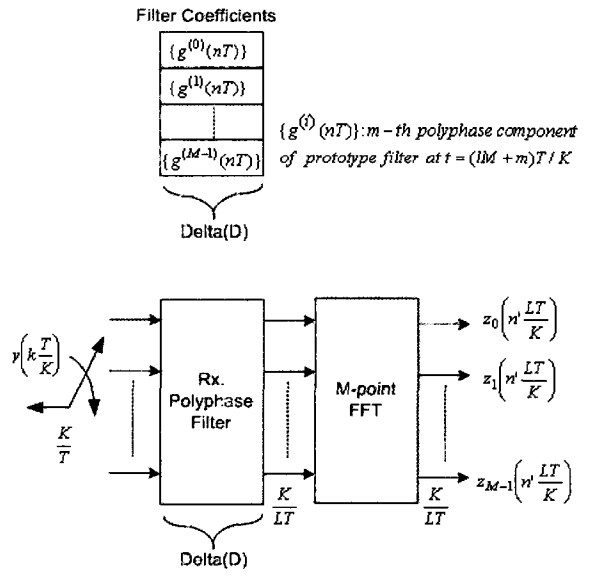
식 (11)을 식 (9)에 대입하여 나타내면 식 (12)와 같게 된다.

$$z_m[n'] = \sum_{l=0}^{M-1} u_l[n'] \exp(-j2\pi \frac{ml}{M}) \quad (12)$$

식 (12)로부터 수신단의 출력값은 polyphase 필터와 FFT로 표현된다는 것을 알 수 있다. Filter-bank에서 시작한 FMT의 변조기(Modulator)와 복조기(Demodulator)는 IFFT와 FFT 및 polyphase 필터로 구성되어진다는 것을 알 수 있다. 그러므로 FMT를 IFFT와 FFT 및 polyphase 필터로 구현할 수 있으므로 복잡도를 상당히 줄일 수 있다. FFT와 polyphase 필터로 구현된 FMT의 변조기와 복조기는 그림 3과 4에 나타내었다.



[그림 3] FMT 변조기



[그림 4] FMT 복조기

4. 실험결과

OFDM과 FMT의 기본 특성에 대해 시뮬레이션을 통하여 분석해 보고, 채널 환경 하에서 성능이 어떻

게 나타나는지 분석해 본다.

실험환경은 두 시스템이 동일한 외부요인에 영향을 받는 것을 고려하여 OFDM 시스템의 경우 부채널 수를 128개로 하였으며, FMT 시스템의 경우 부채널 수를 64개로 하여 upsampling을 128, downsampling을 32로 하였으며, FMT에 사용되는 필터는 rolloff factor가 0.5인 SRRC(Squared Root Raised Cosine)로 하였다. 외부 환경은 2경로 Rayleigh 페이딩 채널을 사용하였는데 power를 1경로와 2경로 각각 0.6과 0.4로 하였고, 최대 지연 거리는 OFDM 및 FMT의 전송 심벌을 기준으로 변화하였고, 정규화된 도플러 주파수(NDF : Normalized Doppler Frequency)는 0.0001로 하였으며, 여기에 AWGN이 더해지는 구조로 하였다. 그리고 RS 코드는 1 심벌이 8비트이고 (32,16)인 것을 사용하였으며, Differential QPSK를 사용하였다.

그림 5에 나타난 결과는 최대지연거리(MDS : Maximum Delay Spread)가 OFDM과 FMT 전송 심벌 구간의 $\frac{3}{128} \sim \frac{7}{128}$ 까지 변화할 때 성능변화를 나타낸 것이다. 실제 5MHz 대역을 고려했을 때 $\frac{1}{128}$ 는 0.2us와 같으므로 $\frac{3}{128} \sim \frac{7}{128}$ 라고 표현된 MDS 는 0.6us~1.4us와 같다.

OFDM은 주기적 프리픽스의 사용 유무에 따라 ISI와 ICI의 영향을 피할 수도 있고 받을 수도 있다. 그

림 5에서 이에 대한 결과를 볼 수 있으며, FMT의 경우 최대지연거리가 4/128 이상이 되면 급격하게 ISI와 ICI의 영향을 받아 성능 저하가 됨을 볼 수 있으나 주기적 프리픽스를 사용하지 않은 OFDM과 비교해서는 더 좋은 성능을 나타냄을 볼 수 있다.

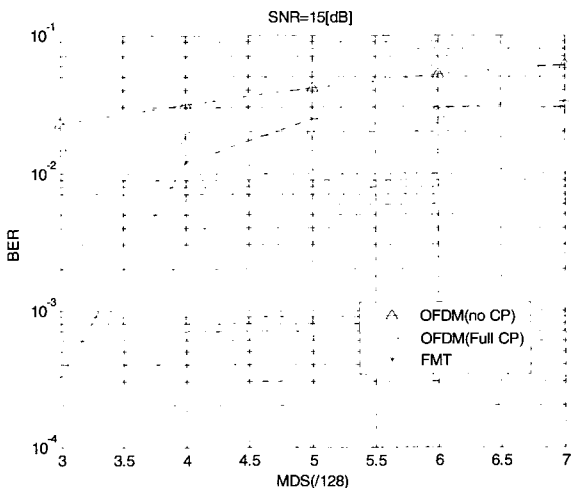
본 실험에서 사용한 재밍 신호는 식 (13)과 같은 것이다^[4].

$$J(t) = \sum_{u=0}^{N_J-1} A_u \cos(2\pi f_m t + \phi_m) \quad (13)$$

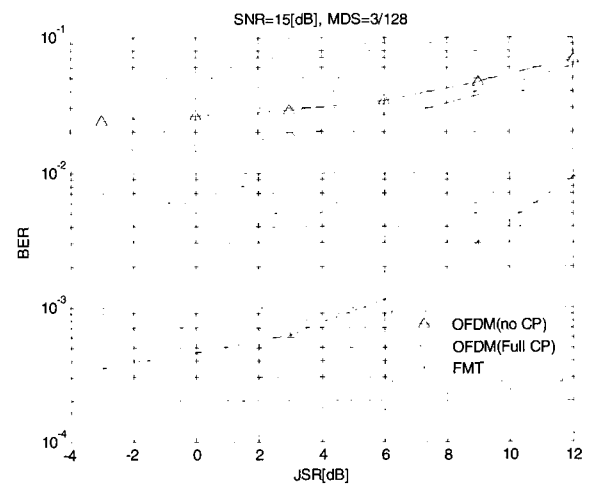
- 여기서 N_J : the number of tones
- A_u : the amplitude of each tone
- f_m : the frequency of the m-th subcarrier
- ϕ_m : the random phase uniformly distributed between $[0, 2\pi]$

식 (13)에 나타난 재밍 신호는 OFDM 및 FMT 전송 신호의 각 부채널(Subcarrier) 단위로 발생한다고 가정하며, 그림 6과 7에 나타난 결과들은 특정 부채널 1개에 재밍이 발생했을 때의 성능변화를 나타낸 것들이다.

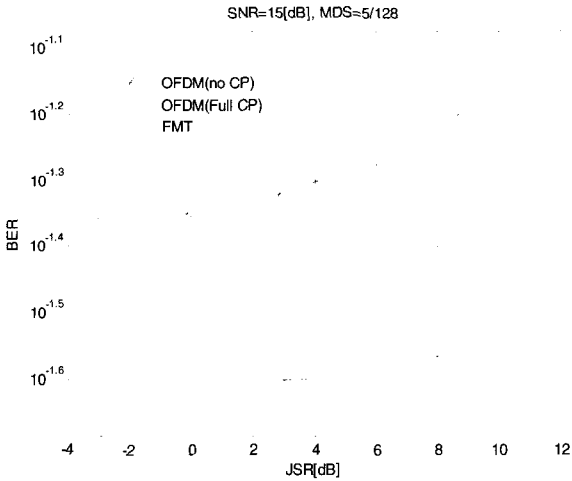
그림 6의 결과는 최대지연거리가 전송 심벌 구간의 $\frac{3}{128}$ 일 때 JSR(Jamming to Signal Ratio) 변화에



[그림 5] 최대지연거리에 따른 BER



[그림 6] JSR 변화에 따른 BER(MDS=3/128)



[그림 7] JSR 변화에 따른 BER(MDS=5/128)

따른 BER을 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면 최대지연거리가 작을 때에는 재밍신호의 크기에 관계없이 FMT가 OFDM 신호보다 항상 더 좋은 성능을 나타낸다는 것을 볼 수 있다.

그림 7의 결과는 최대지연거리가 전송 심벌 구간의 $\frac{5}{128}$ 일 때 JSR 변화에 따른 BER을 나타낸 것이다.

그림 7에서 나타난 결과를 살펴보면, FMT가 OFDM보다 성능이 나빠지는 최대지연거리에서는 재밍 신호의 크기가 작을 때에는 주기적 프리픽스를 사용한 OFDM이 FMT보다 성능이 좋지만, 재밍 신호의 크기가 커질수록 OFDM 시스템의 성능은 급격히 나빠져 결국 FMT보다 더 나빠지게 된다는 것을 볼 수 있다. 즉, OFDM이 FMT에 비해 재밍 환경에 더 민감하다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 OFDM과 FMT 시스템의 성능을 비교/분석하였다. 실험을 통하여 분석한 결과 재밍이 없는 환경에서는 주기적 프리픽스를 사용하지 않은 OFDM보다 FMT가 BER 측면에서 더 좋은 성능을 나타냄을 확인할 수 있었고 주기적 프리픽스를 사용하지 않은 OFDM보다는 FMT가 최대지연거리의 커짐에 따라 성능이 나빠짐을 확인할 수 있었다.

재밍 환경에서 최대지연거리가 작을 때에는 재밍 신호의 크기에 관계없이 FMT가 주기적 프리픽스의 여부에 상관없이 OFDM 보다 더 좋은 성능을 나타냄을 확인할 수 있었지만, 최대지연거리가 커질수록 주기적 프리픽스를 사용한 OFDM이 FMT에 비하여 더 좋은 성능을 나타내었다. 그러나 OFDM은 FMT에 비해 재밍에 대한 영향을 더 많이 받는다는 것을 실험으로 확인했으며, 이에 의해 일정 크기 이상의 재밍 신호가 발생할 때에는 비록 최대지연거리가 크다고 할지라도 FMT가 OFDM에 비해 더 좋은 성능을 나타냄을 확인하였다.

이는 OFDM과 FMT의 구조적 차이에 의한 것으로 두 시스템의 구조적인 차이는 필터이다. 재밍신호가 특정 부채널에 강하게 발생하면 OFDM은 각 부채널 간 직교성이 깨어져 에러가 많이 발생하지만 FMT의 경우 필터의 영향으로 인해 재밍의 영향을 덜 받는다는 것을 알 수 있다.

본 논문을 통하여 재밍신호 환경 하에서 OFDM과 FMT가 어떤 성능을 나타내는지를 분석할 수 있었으며, 재밍환경 하에서 FMT가 OFDM보다 더 우수한 성능을 보인다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 FMT를 실제 군용장비에 적용할 경우 생각해야 될 것은 MDS가 커질 때의 영향을 보상해 줄 수 있는 등화기나 간섭제거기 등이 반드시 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] R. van Nee and R. Prasad, OFDM Wireless Multimedia Communications, Artech House, 2000.
- [2] G. Cherubini, E. Eleftherou, and S. Oker, "Filtered multitone modulation for very high-speed digital subscriber lines", IEEE J. Select. in Areas in Commun., Vol. 20, No. 5, pp.1016 ~1028, June 2002.
- [3] W. Rhee, Chuang J. C., and Cimini L. J. Jr., "Performance Comparison of OFDM and Multitone with Polyphase Filter Bank for Wireless Communications", IEEE Vehicular

Technology Conference, 1998. VTC 98. 48th, Volume : 2, 18-21, Vol. 2, pp.768~772, May 1998.

[4] Andrew J. Best, and Balasubramaniam Natarajan, "The Effect of Jamming on the

Performance of Carrier Interferometry/OFDM", in Proc. IEEE Int. Conf. of Wireless and Mobile Computing, Net. and Commun., Vol. 1, pp.66~70, Aug. 2005.