

# 발사체의 속도가 FTS 수신기의 성능에 미치는 영향

강상기\*

## Effects of Launching Vehicle's Velocity on the Performance of FTS Receiver

Sanggee Kang\*

### 요 약

무선통신 시스템에서는 운용하는 송신기나 수신기의 이동에 의해서 도플러 주파수 천이가 발생하며, 도플러 주파수 천이나 송수신기 사이에 존재하는 주파수 오프셋을 제거해야 원하는 성능을 얻을 수 있다. FTS(Flight Termination System)는 공공의 안전과 발사체의 비정상적인 임무 수행을 막기 위해서 사용되는데 발사체의 경우에는 지구 탈출을 위해서 초기 속도가 아주 빠르고 그에 따라서 도플러 주파수 천이도 아주 크다.

최근 차세대 FTS의 도입을 위한 연구가 활발히 진행 중이며, 새로운 FTS를 도입하기 위해서는 도입하는 시스템에 대한 도플러 주파수의 영향을 검토해야 한다. 본 논문에서는 발사체의 도플러 주파수 천이가 FTS 수신기의 성능에 미치는 영향을 분석하였으며, 디지털 방식의 FTS와 톤 방식의 FTS에 미치는 영향으로 나누어 분석하였다. 디지털 방식의 FTS인 EFTS(Enhanced FTS)에서는 비동기 DPSK(Differential PSK)와 비동기 CPFSK(Continuous Phase FSK)에 미치는 영향을 중점적으로 검토하였고, 200Hz의 도플러 주파수 천이가 채널코딩을 적용한 비동기 DPSK와 비동기 CPFSK에 미치는 영향을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과 BER이  $10^{-5}$  근처에서 RS코딩은 약 0.5dB의  $E_b/N_0$ 가 악화되었고, 컨볼루션코딩과 BCH코딩은 성능변화가 거의 없거나  $E_b/N_0$ 가 0.1dB 정도 악화되었다. 톤 방식의 FTS에서는 수신기가 직교검파기를 사용하는 경우에 대해서 분석하였으며, 직교검파인 경우에는 도플러 주파수 천이의 영향을 거의 받지 않는다.

**Key Words** : Doppler effect, FTS(Flight Termination System), Standard tone, EFTS(Enhanced FTS), DPSK, CPFSK, Channel coding

### ABSTRACT

A doppler shift is generated by moving a transmitter or receiver operated in communication systems. The doppler frequency shift between a transmitter and a receiver or the frequency offset present in transceivers must be removed to get the wanted system performance. FTS is used for preventing an accident from operating abnormally and for guaranteeing public protection. A launching vehicle's initial velocity is very fast in order to escape the earth and the amount of doppler shift is large.

Recently many studies to adopt the next generation FTS are ongoing. To introduce new FTS, the effects of doppler shift on the performance of the new FTS must be studied. In this paper the doppler effect caused by launching vehicle's velocity affecting the performance of FTS receiver is investigated into two cases, one is for EFTS as a digital FTS and the other is for FTS using a tone signal. Noncoherent DPSK and noncoherent CPFSK are considered as the modulation methods of EFTS. In the cases of the doppler frequency shift of 200Hz present in EFTS using noncoherent DPSK and noncoherent CPFSK are simulated. Simulation results show that  $E_b/N_0$  of 0.5dB deteriorates in the region of near BER of about  $10^{-5}$  in RS coding. And there is no performance variation in  $E_b/N_0$  or  $E_b/N_0$  is worsened about 0.1dB in the same BER region for the case of using convolutional and BCH coding. Quadrature detector used in FTS using tone signals is not influenced by the doppler frequency shift.

\*군산대학교 정보통신공학과 무선기술연구실(skkgang@kunsan.ac.kr)

접수일자 : 2014년 7월 28일, 수정완료일자 : 2014년 8월 14일, 최종게재확정일자 : 2014년 8월 25일

## I. 서론

도플러 주파수 천이는 송신기나 수신기의 이동에 의해서 발생된다. FTS가 운용되는 환경에서는 발사체가 지상의 송신기로부터 빠른 속도로 멀어지기 때문에 도플러 효과에 의해서 발사체의 수신기와 지상의 송신기는 서로 중심주파수가 틀어지는 영향을 받는다. 도플러 효과에 의한 주파수의 천이는 다음과 같이 표현된다.

$$f = \left( \frac{c \pm v_r}{c \mp v_s} \right) f_0 \quad (1)$$

여기서  $v_r$ 는 수신기의 속도로 송신기로부터 멀어지면 음의 부호를 갖으며,  $v_s$ 는 송신기의 속도로 수신기로부터 멀어지면 양의 부호를 갖는다.

발사체는 지구 중력장을 벗어나기 위해서 발사 초기에는 상당한 속도로 중력장을 탈출한다. 때문에 송신기와 수신기 사이에 상당량의 도플러 주파수 천이가 발생한다. 최근 차세대 FTS에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며[1,2], 차세대 FTS를 도입하기 위해서는 도플러 주파수 천이의 영향을 검토해야 한다. 본 논문에서는 발사체의 속도가 FTS 수신기에 미치는 영향을 디지털 FTS에 미치는 영향과 톤 방식의 FTS에 미치는 영향으로 나누어 분석한다.

## II. 도플러 주파수가 FTS 성능에 미치는 영향

### 1. 디지털 FTS에 대한 영향

식 (1)에 의해서 발사체의 속도가 11km/s 이면, 도플러 주파수는 15.88kHz로 계산된다. 만약 송신기의 중심주파수가 433MHz 이면, 수신기는 중심주파수가 432.984MHz인 송신 신호를 수신하게 되며, 이와 같은 도플러 주파수 천이는 송신기와 수신기가 일직선상에서 멀어지는 경우이다. 실제로 발사체가 임의의 고각을 가지고 이동하기 때문에 도플러 주파수는 이보다 조금 작다.

송수신기에서 주파수의 변화는 고정된 기준 위상에 대해서 신호의 위상이 변화되는 것으로 생각할 수 있다. 이와 같은 신호의 위상 변화는 디지털 통신에서 성좌(constellation)의 회전을 의미하며, 비동기검파를 이용하는 FSK와 같은 변조 방식에서는 성좌의 회전이 그다지 중요한 문제가 되지 않지만, 동기검파를 사용하는 BPSK와 같은 시스템에서는 심각한 문제를 발생시킬 수 있다. 성좌도에서 90° 위상이 회전하는데 필요한 시간을 기준으로, 90° 회전하는데 소요되는 시간이 짧으면 짧을수록 더 많은 위상의 변화가 있는 것이기 때문에 신호를 검파하기가 더 어렵다. 일반적으로 PSK 신호가 도플러 주파수 천이를 극복하기 위해서는 경험적인 조건

(rule of thumb)으로 다음을 만족해야 한다[3].

$$f_{doppler} T_s \leq 0.1 \quad (2)$$

여기서  $T_s$ 는 심볼 주기이다. 그림 1은 식 (2)를 만족하는 경우, 성좌의 최대 90° 회전율을 나타내고 있다. 그림 1로부터 송신기 또는 수신기가 10km/s로 이동하는 경우 송수신 신호의 중심주파수가 100MHz 일 때 성좌의 최대 90° 회전율은 대략 10,000/초 이다.

식 (2)는 도플러 주파수가 심볼율의 10% 이내로 유지되어야 적정 성능을 유지함을 나타내며, 한 심볼에서 성좌의 회전율을 36° 이내로 유지해야만 원하는 성능을 유지할 수 있음을 나타낸다. 예를 들어 심볼율이 1kbps이면 도플러 주파수는 100Hz 이내로 유지되어야 통신이 유지된다. 식 (2)는 M-ary PSK에서 변조레벨이 낮은 경우(M 값이 낮은 경우)에는 비교적 잘 적용되지만, 변조레벨이 크면 이 기준을 사용하기 어렵다. 때문에 PSK의 경우에는 도플러 천이를 신호의 성좌의 회전으로 표현하는 것이 더 유용하다. 따라서 좀 더 타당한 경험적 조건으로 PSK의 성좌들 사이의 위상각의 1/2(예를 들어 BPSK의 경우  $180^\circ/2 = 90^\circ$ )이하를 만족하는 것으로 하면, 다음과 같은 조건을 생각할 수 있다[3].

$$f_{doppler} T_s \leq \frac{1}{2M} \quad (3)$$

성좌의 회전에 소요되는 시간이 큰 경우가 성좌의 회전이 빠른 경우 보다 성능에 영향을 덜 받는다. 이런 관점에서 PSK는 반송파 주파수가 낮을 때가 좋고, 주파수가 증가하면 성능이 점점 악화된다. 그림 2는 M-ary PSK 변조방식이 식 (3)를 만족하는 경우 도플러 천이의 상한 값을 나타내고 있다. 그림 2는 변조레벨이 증가할 수록 도플러 천이에 대한 영향을 많이 받음을 나타내며, 그림 2로부터 데이터율이 10kbps인 경우 BPSK의 도플러 주파수 천이 상한 값은 대략 3kHz임을 알 수 있다. 미국의 경우 EFTS의 데이터율은 7.2kbps이다[4]. 따라서 대략 10kbps의 데이터율을 갖는다고 가정하면 EFTS에 BPSK를 적용하기는 어렵다.

EFTS에 적합한 변조 방식으로는 비동기 DPSK와 비동기 CPFPSK가 있다[5]. 주파수오차에 의한 영향을 시뮬레이션한 결과는 그림 3 ~ 그림 4에 나타내었다. 그림 3의 (a)와 그림 4의 (a)는 채널코딩을 하지 않은 비동기 DPSK와 비동기 CPFPSK에서 100Hz, 200Hz 그리고 300Hz의 주파수오차가 있을 때 성능 변화를 시뮬레이션한 결과이다. 시뮬레이션 결과 비동기 DPSK는 BER  $10^{-5}$  근처에서 약 1dB의  $E_b/N_0$ 의 악화가 있고, 상대적으로 BER 성능이 좋지 않은 비동기 CPFPSK는  $E_b/N_0$ 가 비교적 큰 경우인 11dB 이상의  $E_b/N_0$ 에서 부터 주파수오차에 의한 영향이 점점 나타남을 알 수 있다. 채널코딩을 적용한 비동기 DPSK의 경우 주파수오차는 200Hz를 가정하였고, 채널코딩을 적용한 비동기 DPSK의 주파수오차에 대한 영향은 그림 3의 (b)와 (c)를 비교해

봄으로써 알 수 있으며, 컨볼루션코딩 이나 BCH 코딩은 BER  $10^{-5}$  근처에서 성능악화가 거의 없지만 RS 코딩의 경우 약 0.5dB의 성능악화가 있다. 더불어 200Hz의 주파수오차가 채널코딩을 적용한 비동기 CPFSK에 미치는 영향은 BER  $10^{-5}$  근처에서 컨볼루션코딩과 BCH 코딩의 경우에는 아주 작은 영향(약 0.1dB 정도  $E_b/N_0$ 가 악화됨)을 받지만, RS 코딩의 경우에는 약 0.5dB의  $E_b/N_0$  악화가 있음을 그림 4의 (b)와 (c)로부터 알 수 있다. 주파수 변화에 대한 시뮬레이션 결과와 자료 조사결과를 기초로 EFTS에 적용 가능한 변조 방식을 판단한다면, 동기식 변조방식은 적용이 어렵고 비동기 방식을 적용해야 한다[6,7,8,9]. 그리고 주파수오차에 의한 영향을 줄이기 위해서 AFC(Automatic Frequency Control) 또는 송신신호로부터 반송파주파수를 자동으로 추출 가능한 구조의 수신기를 이용해야 함을 알 수 있다[10].

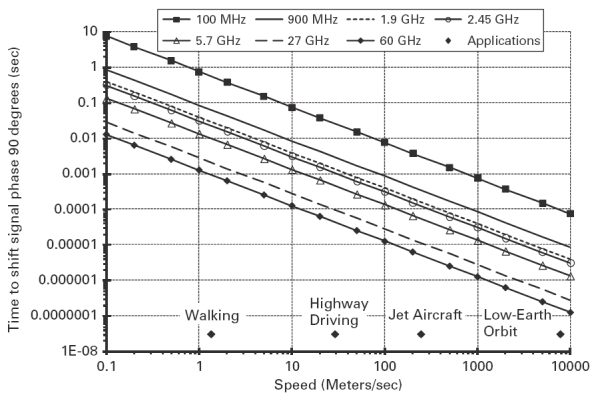


그림 1. 반송주파수와 도플러 주파수 천이에 따른 성좌의 회전을

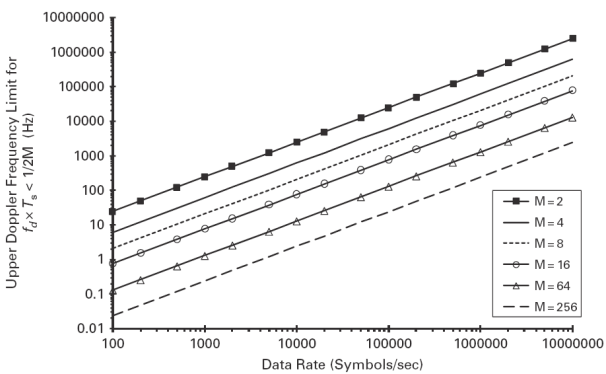
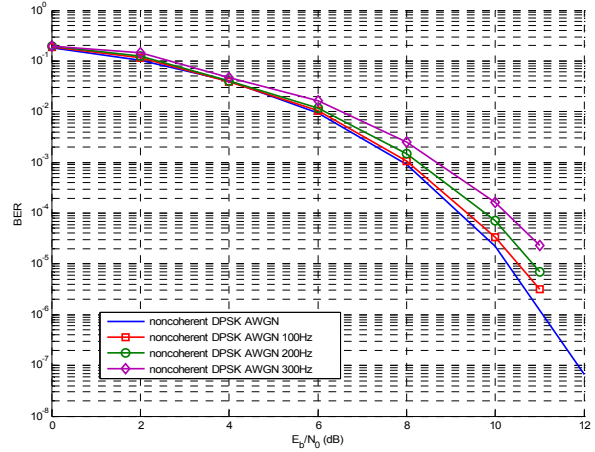
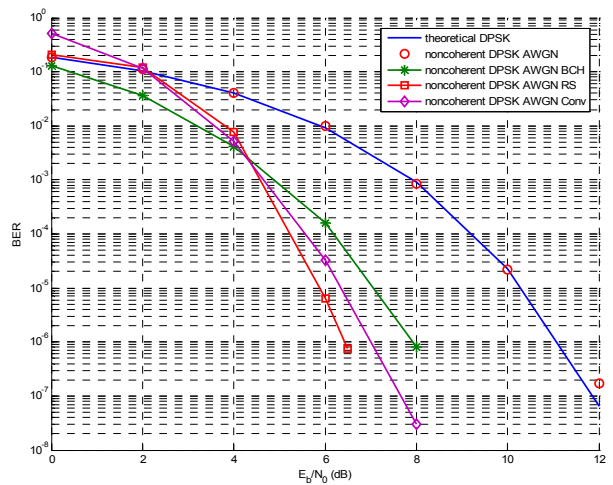


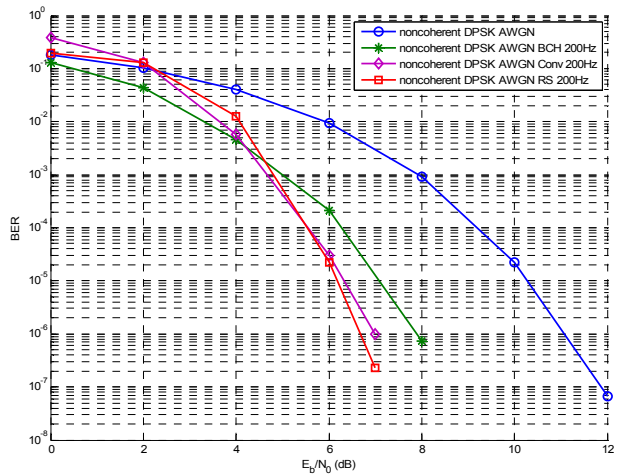
그림 2. 데이터율과 PSK의 변조레벨에 따른 도플러 주파수 편이의 상한



(a) 주파수오차에 따른 비동기 DPSK의 성능변화

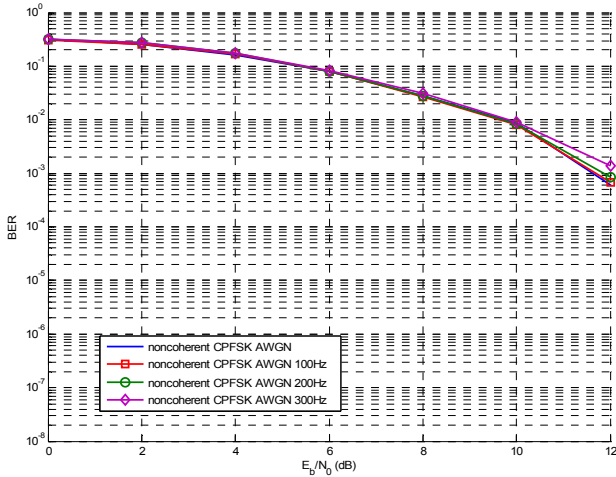


(b) 채널코딩에 따른 비동기 DPSK의 성능

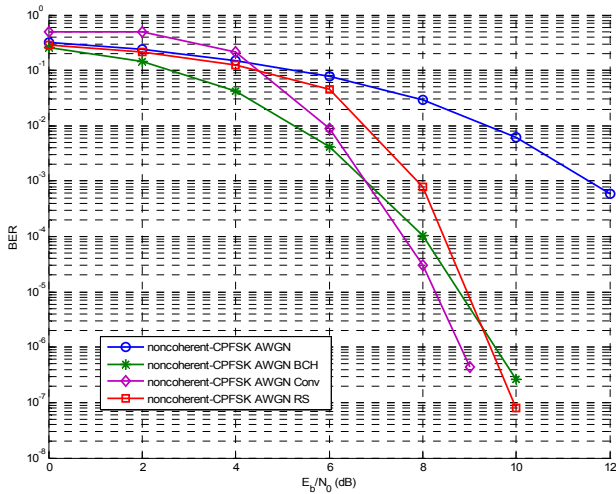


(c) 200Hz 주파수오차에 의한 비동기 DPSK의 성능 변화

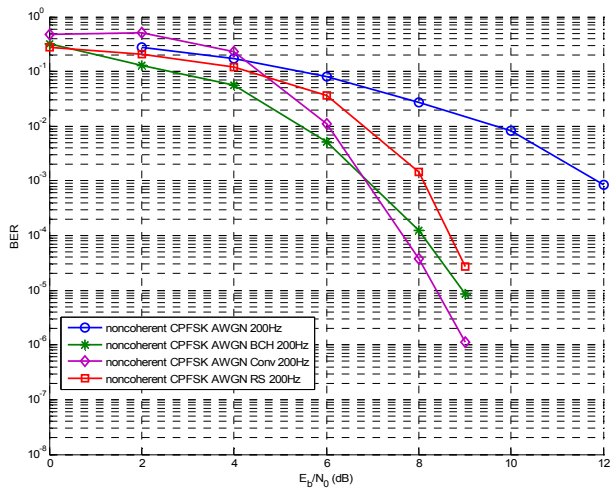
그림 3. 주파수오차가 비동기 DPSK의 성능에 미치는 영향



(a) 주파수오차에 따른 비동기 CPFSK의 성능변화



(b) 채널코딩에 따른 비동기 CPFSK의 성능



(c) 200Hz 주파수오차에 의한 비동기 CPFSK의 성능 변화

그림 4. 주파수오차가 비동기 CPFSK의 성능에 미치는 영향

## 2. 톤 방식의 FTS에 대한 영향

톤 방식의 FTS는 FMCW 변조를 사용한다. 기본적으로 FM 검파기는 기준주파수와 입력신호의 주파수 사이의 차이에 비례하는 출력전압을 제공하는 회로이다. 통상적으로 기

준주파수를 기준으로 입력신호의 주파수가 동일한 주파수의 차이로 기준주파수 위에 있거나 아래에 있는 경우, 검파기의 출력전압은 크기는 같고 극성이 다른 전압을 출력한다.

직교검파기(quadrature detector)는 IF 신호를 두 개로 나눠서, 그중에 한 신호는 90° 위상에 중심주파수로부터 벗어나는 주파수에 비례하는 시정수(time constant)가 부가되는 회로를 통과한 후 곱셈기로 인가되고, 나머지 하나의 신호는 아무런 회로도 거치지 않고 곱셈기로 인가된다[11]. 곱셈기는 이 두 신호의 곱을 출력하며, 곱셈기의 출력 스펙트럼에서 가청 주파수를 선택 수신하는 구조로 구성된다. 직교검파기의 위상변화량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\theta = \frac{\pi}{2} - K(w - w_0) = \frac{\pi}{2} - K\Delta w \quad (2)$$

여기서  $\Delta\theta$ 는 위상변화량,  $w_0$ 는 IF 중심주파수,  $\Delta w$ 는 순시주파수와 IF 중심주파수 사이의 차이이고, K는 비례상수이다. 따라서 입력신호가  $V_0\sin(wt)$ 라고 하면, 위상변화를 거친 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_0\sin\left(wt + \frac{\pi}{2} - K\Delta w\right) = V_0\cos(wt - K\Delta w) \quad (3)$$

따라서 곱셈기의 출력은 다음과 같다.

$$V_0^2\sin(wt)\cos(wt - K\Delta w) = \frac{V_0^2}{2}(\sin(2wt - K\Delta w) + \sin(K\Delta w)) \quad (4)$$

식 (4)에서 DC 성분은

$$\frac{V_0^2}{2}\sin(K\Delta w) \quad (5)$$

만약  $(K\Delta w) < 0.25\text{ rad}$  이면,  $\sin(K\Delta w) \approx K\Delta w$  이다. 따라서 곱셈기의 출력은  $\Delta w$ 에 선형적인 출력을 가지므로 직교검파기는 변조파형을 재생할 수 있다. 실제 직교검파기의 기능 블록도는 그림 5와 같다. 그림 5의 병렬 RLC 회로가  $w_0$ 에서 공진할 때, 신호  $V_0$ 와  $V_{in}$  사이에 위상차가  $\Delta\theta$ 는 다음과 같다[5].

$$\Delta\theta = \text{Arg}\left(\frac{V_0}{V_{in}}\right) \approx \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}(Q_0\delta) \quad (6)$$

여기서  $Q_0$ 는  $w_0$ 에서 공진기의 Q이고,  $\delta$ 는 다음과 같다.

$$\delta = \frac{w}{w_0} - \frac{w_0}{w} \quad (7)$$

따라서 적당한 범위의 주파수 범위에서  $\Delta\theta$ 는 주파수에 선형이다.

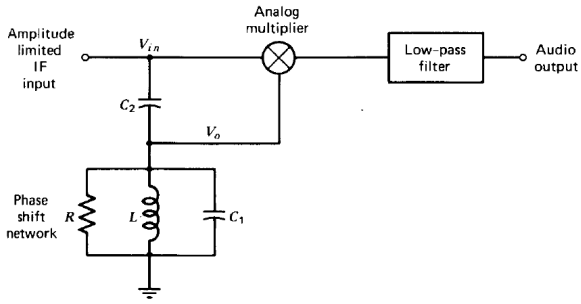


그림 5. 직교검파기의 기능 블록도

직교검파기는 그림 5에서 알 수 있듯이 기준신호와 비교 신호를 직교검파기에 인가되는 입력신호로부터 직접 분리한다. 따라서 입력신호에 부가되는 도플러 천이는 문제가 되지 않는다.

그림 6은 직교검파기의 성능을 시뮬레이션하기 위한 구성도이며, 편이를 위해서 Standard 톤 방식의 FTS를 구성하였다. 변조를 위한 톤신호는 IRIG의 1번, 10번과 20번 톤인 7.5kHz, 22.17kHz 그리고 73.95kHz를 이용하였다. 직교검파기의 출력이 캐리어의 중심주파수의 변화에 의해서 어떻게 변화되는지 확인하기 위해서 수신기의 이동속도를 변화시킬 수 있도록 시뮬레이션 블록을 구성하였다. 그림 7 ~ 그림 10은 그림 6의 시뮬레이션 구성도에서 입력 톤신호, 출력되는 FMCW 신호, 도플러 효과가 포함되서 수신기에 도달하는 FMCW 신호 그리고 복조된 톤신호를 각각 나타낸다. 시뮬레이션 결과 도플러 주파수가 16kHz까지 증가하더라도 직교검파기의 출력은 캐리어의 중심주파수 변화에 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

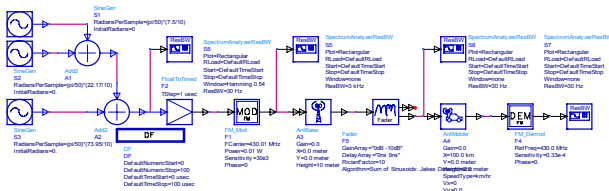


그림 6. 직교검파기의 성능을 시뮬레이션하기 위한 구성도

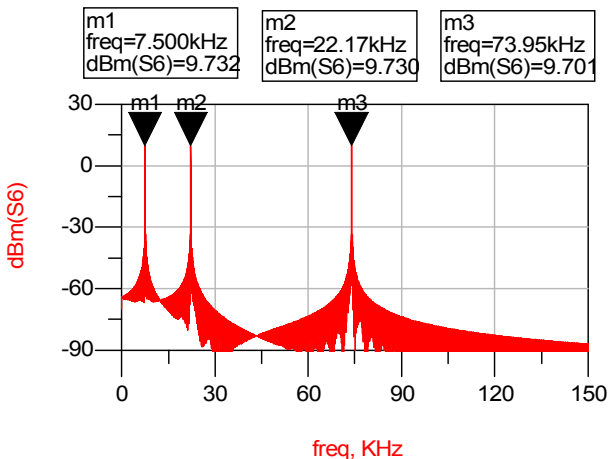


그림 7. 입력 Standard 톤(IRIG 1번, 10번, 20번)

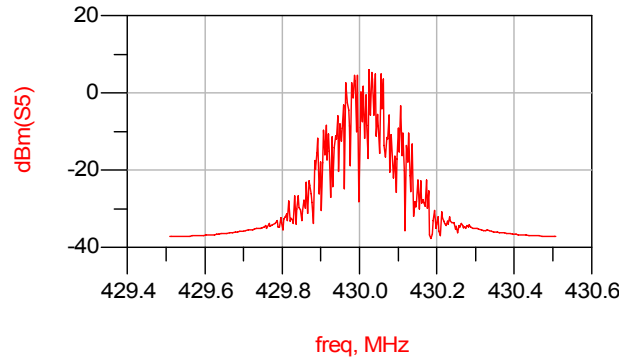


그림 8. 송신 FMCW(Standard 톤)

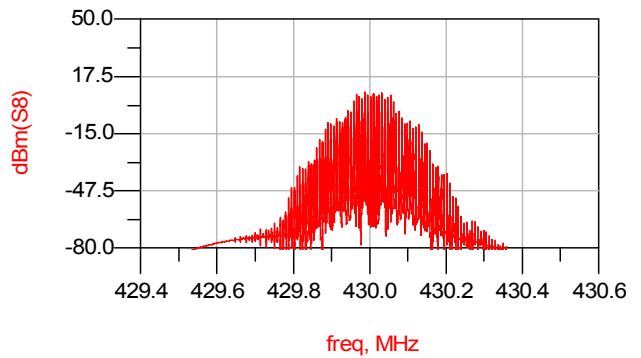


그림 9. 수신 FMCW(Standard 톤, 도플러 주파수 16kHz)

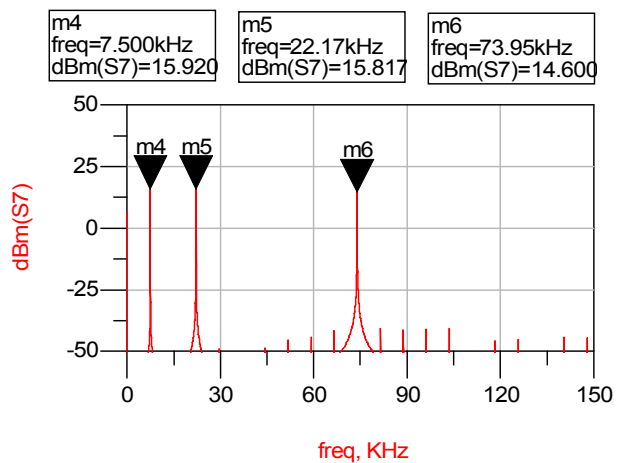


그림 10. 복조된 Standard 톤(IRIG 1번, 10번, 20번)

### III. 결론

본 논문에서는 도플러 주파수 천이가 디지털 방식의 FTS와 톤 방식의 FTS에 미치는 영향을 분석하였다. 시뮬레이션 결과 BPSK와 같이 동기검파를 사용하는 경우 데이터율을 많이 낮추어야 사용가능하며, 데이터율이 10kHz인 경우에는 최대 허용 도플러 주파수 천이는 3kHz 정도이므로 FTS에 동기검파의 적용은 어렵다. 채널코딩을 적용한 비동기 DPSK와 비동기 CPFSK의 경우에는 200Hz의 도플러 주파수 천이가 수신기에 미치는 영향을 시뮬레이션 하였으며, 시

물레이션 결과 BER  $10^{-5}$  근처에서 RS코딩은 약 0.5dB의 Eb/No가 악화되었으나, 컨볼루션코딩과 BCH코딩은 성능변화가 거의 없거나 Eb/No가 0.1dB 정도 악화되었다. 톤 방식의 FTS는 직교검파기를 사용하면 도플러 주파수 천이의 영향을 받지 않는다. 그러나 직교검파기를 구성하는 LC의 특성이 환경조건에 적합해야 원하는 성능을 유지할 수 있다. 본 논문의 결과는 차세대 FTS의 연구에 기초자료로 활용 가능하다.

### 참 고 문 헌

- [1] 황수철, 임유철, 이재득, 이재덕, "외국발사체의 FTS (flight termination system) 명령방식 검토," 통신위성우주산업연구회 논문지, 제32권 6호, pp. 148-152, 2004.
- [2] 배영조, 오창열, 이효근, "미국의 차세대 비행중단시스템 표준화 동향," 항공우주산업기술동향, 제8권 제1호, pp.86-95, 2010.
- [3] Earl Mccune, Practical Digital Wireless Signals, Cambridge Univ. Press, 2010.
- [4] Jeff S. Vetter and Travis Cribbet, "The Design and Development of the Prototype Enhanced Flight Termination System," -, 2002.
- [5] 강상기, "변조방식과 채널코드에 따른 EFTS 성능 비교," 통신위성우주산업연구회논문지, 제8권 제2호, pp.94-98, 6월 2013.
- [6] RCC RS-38, Enhanced Flight Termination System Study Phase I-IV Reports, Nov. 2002.
- [7] RCC 119-06, Telemetry Applications Handbook, May 2006.
- [8] RCC 120-09, Telemetry Systems Radio Frequency Handbook, March 2008.
- [9] RCC 313-01, Test Standard for Flight Termination Receiver/Decoder, 2001.
- [10] Kanchan Mishra, CPFSK Demodulation Techniques, Indian Institute of Technology, Guwahati, May 2007.
- [11] Herbert L. Krauss, Charles W. Bostian and Frederick H. Raab, *Solid State Radio Engineering*, John Wiley & Sons, 1980.

### 저자

#### 강 상 기(Sanggee Kang)



- 1988년 : 단국대학교 전자공학과(공학사)
- 1989년 : 삼성반도체통신
- 1989년 ~ 1992년 : 해군통신장교
- 1994년 : 단국대학교 전자공학과(공학석사)

- 2004년 : 충남대학교 전파공학과(공학박사)
  - 1994년 ~ 2005년 : 한국전자통신연구원 선임연구원
  - 2006년 ~ 2008년 : 한국전자통신연구원 초빙연구원
  - 2005년 ~ 현재 : 군산대학교 정보통신공학과 부교수
- <관심분야> : RF, M/W 부품 및 시스템