

변조 방식과 채널 코드에 따른 EFTS 성능 비교

강상기*

Performance Comparison of EFTS According by Modulations and Channel Codes

Sanggee Kang*

요 약

최근에 Standard 톤 방식의 FTS(Flight Termination System)는 보안 및 다수의 발사체가 동시에 운영될 때 문제가 있음이 보고되어, 차세대 FTS의 도입이 검토되고 있다. 본 논문에서는 차세대 FTS로 도입이 검토되고 있는 EFTS(Enhanced FTS)의 변조 방식 및 채널 코드에 따른 BER 성능을 비교하였다. EFTS의 변조 방식으로는 비동기 BFSK, 동기 BPSK, 비동기 DPSK, 동기 CPFSK 그리고 비동기 CPFSK의 성능을 비교 검토하였으며, 채널 코드로는 컨볼루션널, RS 그리고 BCH의 성능을 비교하였다. EFTS의 변조 방식의 성능 시뮬레이션 결과 동기 방식이 비동기 방식에 비해 우수한 성능을 가짐을 확인하였다. 그러나 동기 방식은 발사체의 환경에서 동기의 획득 및 유지문제 그리고 동기를 위해서 추가적으로 사용되는 부품들의 신뢰성을 고려하면 도입이 어렵다. 비동기 방식에서는 DPSK, 비동기 CPFSK 그리고 비동기 BFSK 순서로 BER 성능이 좋은 것으로 시뮬레이션되었다. 그러나 DPSK 변조의 경우 PEP(Peak Enveop Power)가 약 2.6dB(rolloff 0.5인 경우)로 CPFSK의 PEP 1.8dB 보다 크기 때문에 송신기의 구성측면에서 불리하다. 채널 코드에 따른 성능 시뮬레이션 결과를 보면 컨볼루션널 코드가 다소 좋은 성능을 보이지만, 원하는 BER을 갖는 E_b/N_0 부근에서는 RS의 BER 성능 개선 정도가 더 우수함을 확인하였다.

Key Words : FTS(Flight Termination System), Standard tone, Secure tone, MHA(Modified High Alphabet), EFTS(Enhanced FTS), BFSK, BPSK, DPSK, CPFSK, Channel coding

ABSTRACT

A report of security problems and simultaneous operation limits of Standard tone currently used for FTS introduces the development of a next generation FTS. In this paper, BER performance by modulations and channel coding methods for EFTS are compared. Simulation results show that coherent modulations have better BER performance than noncoherent modulations. However the environments of a lurching vehicle may cause serious problems in achieving and maintaining synchronization and the increasing complexity of coherent systems also increases reliability problems. Therefore noncoherent systems are suitable for FTS even though BER performance of noncoherent systems is lower than coherent systems. Noncoherent DPSK has better BER performance than noncoherent CPFSK. However the PEP of noncoherent DPSK is 0.8dB higher than noncoherent CPFSK. Therefore a transmitter of noncoherent DPSK has more output power than noncoherent CPFSK. Convolutional code has better BER performance than RS code. However RS code has a tendency of steeply decreasing BER near the wanted E_b/N_0 .

I. 서 론

FTS는 공공의 안전과 발사체(또는 비행체)의 비정상적인 임무수행을 막기 위해서 사용된다. 대표적인 FTS 방식에는 Standard 톤, Secure 톤, MHA(Modified High Alphabet), EFTS 그리고 SS(Spread Spectrum)가 있다[1]. 현재까지 대

부분의 발사체에는 Standard 톤 방식이 사용돼 왔으나, 발사체 이외에 많은 비행체를 동시에 운용하거나, 명령 방식에 대한 비정상적이고 의도적인 정보 수집에 대응하기 위해서 암호화가 가능한 FTS 방식으로 변경이 필요하게 되었다 [2,3]. FTS는 구현에 많은 비용이 소요되며, 발사체의 경우에는 신뢰성 또한 중요한 고려요소가 된다. 때문에 FTS 방

* 본 연구는 군산대학교 정보통신기술연구소의 부분적인 지원으로 수행되었음.

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

접수일자 : 2013년 6월 4일, 수정완료일자 : 2013년 6월 19일, 최종 게재확정일자 : 2013년 6월 24일

식의 변경에 있어서는 현재 사용 중인 시스템의 변화를 최소화 하면서 원하는 성능을 갖는 방식으로 변경하는 것이 합리적이다.

아날로그 FTS 방식에는 Standard 톤, Secure 톤과 MHA 이 있다. Standard 톤 방식의 송수신기의 구성은 (그림 1)과 같다. (그림 1)에서 알 수 있듯이 Standard 톤 방식은 FM 변조된 신호를 송신하며, 3개의 CW 신호를 변조신호로 사용한다. Standard 톤 방식에서는 20개의 톤 신호 중에서 임의의 3개의 톤을 이용해서 정보를 전송하므로 송신 신호에는 3개의 CW 신호가 존재하는 것으로 생각할 수 있으나, 임의의 3개의 톤 신호가 FM 변조신호로 사용되기 때문에 Standard 톤의 출력신호는 하나의 톤 신호로 볼 수 있다. Standard 톤 방식은 암호화 기능이 없고, 명령 조합의 수도 적어 동시에 다수의 발사체나 비행체에 운용이 어렵다. Secure 톤 방식의 송수신기는 (그림 2)와 같이 구성된다. Secure 톤 방식도 Standard 톤 방식과 마찬가지로 FM 변조된 신호를 송신한다. Secure 톤 방식이 Standard 톤 방식과 다른 점은 변조에 사용되는 CW 톤의 전체수가 8개로 Standard 톤보다는 작고, 3개의 CW 변조신호 중에서 하나는 파일롯으로 이용된다는 점이다. 더불어 Secure 톤의 명령은 Standard 톤보다 더 많은 일련의 톤 조합으로 구성된다는 점이 다르다. Secure 톤 방식은 명령의 조합의 수가 Standard 톤 방식보다 많고, 그로 인해서 다수의 발사체나 비행체에 운용이 가능하나 보안성이 없다. MHA 방식은 Secure 톤에 one-step 암호화 과정을 추가한 것으로, one-step 암호화를 통해서 어떤 CW를 FM 변조신호로 사용할지 결정하는 FM 변조 데이터를 생성하는 과정만 Secure 톤 방식과 다를 뿐 Secure 톤과 동일한 송수신기의 구조를 갖는다.

디지털 FTS 방식에는 EFTS와 SS 방식이 있다. (그림 3)은 EFTS 송수신기의 구성도이며, 디지털 변조 방식이기 때문에 암호화와 채널 코딩이 가능하며, 다수의 발사체나 비행체를 동시에 운용할 수 있다. EFTS는 다양한 변조 방식으로 구현할 수 있으며, 미국의 경우 EFTS의 변조 방식으로는 CPFSK를 이용하고 있다[1,2,3]. (그림 4)는 BPSK나 QPSK 변조를 이용한 DSSS(Direct Sequence SS) 방식의 FTS 송수신기의 구조이다. DSSS 방식이 일반적인 디지털 변조 방식과 다른 점은 의사잡음코드를 사용한 확산과정을 거친다는 점이 다르다.

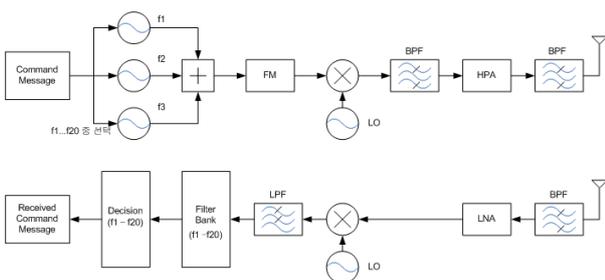


그림 1. Standard 톤의 송수신기 구성도

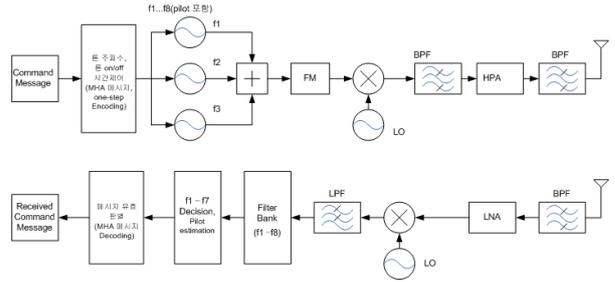


그림 2. Secure 톤의 송수신기 구성도

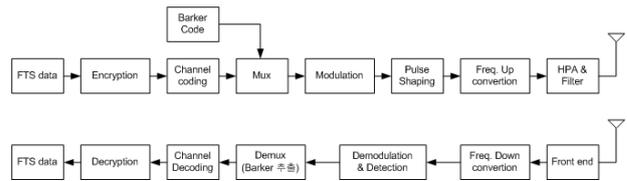


그림 3. EFTS의 송수신기 구성도

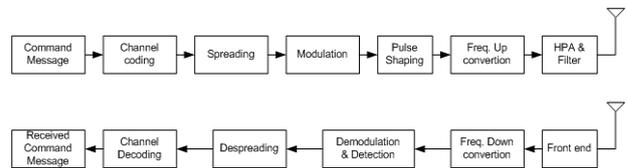


그림 4. CDMA의 송수신기 구성도

각각의 FTS 방식의 주요 장단점을 <표 1>에 기술하였다. 미래에는 다양하고 많은 발사체와 비행체를 동시에 운영하게 될 것이다. 때문에 이에 대비할 수 있는 FTS 방식이 필요하며, 의도적이며 비정상적인 정보의 수집에 대비해서 암호화가 가능한 FTS 방식이 필요하다. 이를 고려한다면 MHA, EFTS 그리고 SS 방식의 FTS의 도입을 생각할 수 있다. 그러나 SS 방식은 점유대역폭이 넓고 PEP가 커서 주파수 이용과 출력전력 측면에서 단점이 있다. 따라서 동시에 다수의 비행체에 운용과 암호화를 고려한다면 MHA나 EFTS가 적합하다. 본 논문에서는 차세대 FTS로 디지털 FTS 방식인 EFTS를 도입하는 경우 어떤 변조 방식이 적합한지 검토하기 위해서 변조 방식과 채널 코드에 따른 EFTS의 성능을 비교하였다.

표 1. FTS 통신 방식별 장단점 비교

구분	Standard	Secure	EFTS	SS
송수신기 구조	간단	비교적 간단	비교적 간단	복잡
변복조	FM	FM	다양	BPSK/QPSK
디지털 신호처리	-	단순	암호화, 채널 코드	채널 코드
암호화	-	one-step	3-DES	PN code
대역폭	협대역	협대역	협대역	광대역
전력증폭기 재사용	사용가능	사용가능	사용가능	사용불가

II. 변조 방식별 EFTS 성능 시뮬레이션

1. EFTS 성능 시뮬레이션 모델

EFTS에서 메시지를 전송하기 위한 송수신기의 구성은 (그림 3)과 같다. 전송하려는 메시지는 암호화 과정을 거친다. 암호화된 메시지는 채널 코딩과 변조 과정을 거친 다음에 전력증폭기를 통해서 송신된다. 다양한 채널 코딩 방법을 고려할 수 있지만, 본 논문에서는 비교적 코드율(code rate)을 비슷하게 유지하기 위해서 <표 2>와 같이 채널 코딩을 한 경우에 대해서 성능을 비교 분석하였다. 더불어 null-to-null 주파수 대역폭을 비슷하게 유지함으로써 대역폭 당 데이터 전송율과 BER 성능을 비교 분석할 수 있도록 하였다. EFTS의 메시지 형식의 예는 (그림 5)와 같다[4]. (그림 5)는 전송되는 메시지가 어떤 형식으로 구성되어 있는지를 보여준다. (그림 5)와 <표 2>에 나타내었듯이 메시지는 총 65개의 비트로 구성되며, range ID, Tx ID, 이동체 ID, 명령 등으로 구성될 수 있다.

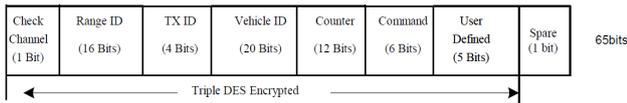


그림 5. EFTS 메시지 형식의 예

EFTS의 성능은 E_b/N_0 에 따른 BER 값을 비교해서 검토하였다. BER 시뮬레이션을 위해서 우선 각각의 변조 방식에 대한 이론적인 BER 곡선과 채널 코딩을 적용하지 않은 상태의 송수신기를 simulink로 모델링한 다음, 이것을 통해서 얻은 BER 곡선이 이론적인 BER 곡선과 일치되는지 확인하는 과정을 먼저 수행하였다. Simulink로 구현한 송수신기의 BER 특성에 이상이 없음을 확인한 후에 각각의 변조 방식에 <표 2>의 채널 코딩을 적용해서 BER 성능을 비교하였다.

2. EFTS 성능 시뮬레이션 결과

EFTS에 적용을 고려한 변조 방식으로는 비동기 BFSK, 동기 BPSK, 비동기 DPSK, 동기 CPFSK 및 비동기 CPFSK 변조 방식을 고려하였다. 변조 방식과 채널 코딩에 따른 BER 성능은 (그림 6) ~ (그림 10)과 같은 결과를 얻었다. EFTS는 10^{-6} 이하의 BER 성능이 유지되어야 한다[3]. (그림 6)은 비동기 BFSK의 BER을 시뮬레이션한 결과이다. (그림 6)으로 부터 컨볼루셔널 코딩을 한 경우 E_b/N_0 가 12dB에서 BER 10^{-6} 이하의 성능을 얻을 수 있으나, RS나 BCH로 채널 코딩을 한 경우에는 E_b/N_0 가 대략 12dB 이상이 되어야 원하는 BER 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 동기 BPSK 변조 방식에 대한 성능 시뮬레이션 결과는 (그림 7)과 같다. 동기 BPSK의 경우 컨볼루셔널 코딩이나 RS 코딩을 한 경우에는 대략 7dB 이상의 E_b/N_0 를 유지하면 BER 10^{-6} 이하를 얻을

수 있음을 알 수 있다. 그러나 BCH 코딩을 한 경우에는 9.5dB 이상의 E_b/N_0 를 유지해야 원하는 BER을 얻을 수 있다. (그림 8)은 비동기 DPSK 변조 방식에 대한 BER 시뮬레이션 결과이다. (그림 8)로 부터 RS 코드는 대략 6.2dB 이상, 컨볼루셔널 코드는 약 7dB 이상 그리고 BCH 코드는 약 8dB에서 BER 10^{-6} 이하를 얻을 수 있음을 알 수 있다. (그림 9)는 동기식 CPFSK의 BER 성능을 시뮬레이션한 결과이다. 이 경우 RS와 컨볼루셔널 코드는 약 5.1dB 이상의 E_b/N_0 에서 BER 10^{-6} 이하를 얻을 수 있고, BCH 코드의 경우에는 약 6.6dB의 E_b/N_0 에서 BER 10^{-6} 이하를 얻을 수 있음을 알 수 있다. (그림 10)은 비동기식 CPFSK의 BER 시뮬레이션 결과로 컨볼루셔널 코드는 약 8.6dB, RS와 BCH는 9.3dB 이상에서 원하는 BER 성능을 얻을 수 있음을 보여준다. 더불어 (그림 6) ~ (그림 10)의 시뮬레이션 결과에서 주목할 사실은 RS와 컨볼루셔널 코드가 BCH 코드 보다 성능이 좋고, 그리고 RS 코드가 컨볼루셔널 코드보다 원하는 E_b/N_0 부근에서 보다 급격하게 BER 성능이 개선된다는 점이다. <표 3>은 변조 방식과 채널 코딩에 따른 BER 성능을 요약한 것이다.

표 2. 채널 코딩

구분	코드	비고
RS coding	RS(25,13)	65bits -> 125bits
BCH coding	BCH(15,5)	65bits -> 195bits
Convolutional coding	1/2	65bits -> 130bits

표 3. 변조 방식과 채널 코딩에 따른 BER 성능 요약

변조 방식	채널 코딩 결과
비동기 BFSK	Conv. 코드: $E_b/N_0 \approx 12\text{dB}$ 에서 BER $\approx 10^{-6}$ RS 및 BCH 코드: $E_b/N_0 > 12\text{dB}$ 에서 BER $\approx 10^{-6}$
동기 BPSK	Conv.과 RS 코드: $E_b/N_0 \approx 7\text{dB}$ 에서 BER $\approx 10^{-6}$ BCH 코드: $E_b/N_0 > 9.5\text{dB}$ 에서 BER $\approx 10^{-6}$
비동기 DPSK	RS 코드: $E_b/N_0 > 6.2\text{dB}$ 에서 BER $\approx 10^{-6}$ Conv. 코드: $E_b/N_0 > 7\text{dB}$ BCH 코드: $E_b/N_0 > 8\text{dB}$ 에서 BER $\approx 10^{-6}$
동기 CPFSK	Conv.과 RS 코드: $E_b/N_0 > 5.1\text{dB}$ 에서 BER $\approx 10^{-6}$ BCH 코드: $E_b/N_0 > 6.6\text{dB}$ 에서 BER $\approx 10^{-6}$
비동기 CPFSK	Conv. 코드: $E_b/N_0 > 8.6\text{dB}$ 에서 BER $\approx 10^{-6}$ RS와 BCH 코드: $E_b/N_0 > 9.3\text{dB}$ 에서 BER $\approx 10^{-6}$

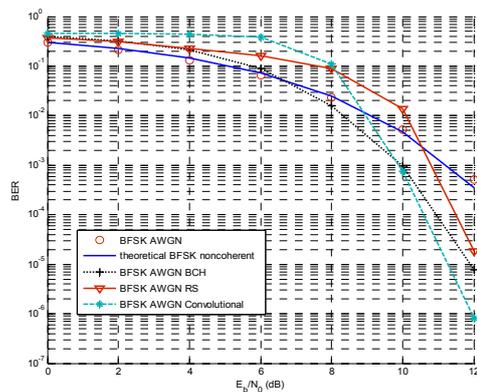


그림 6. 비동기 BFSK 변조 방식의 BER

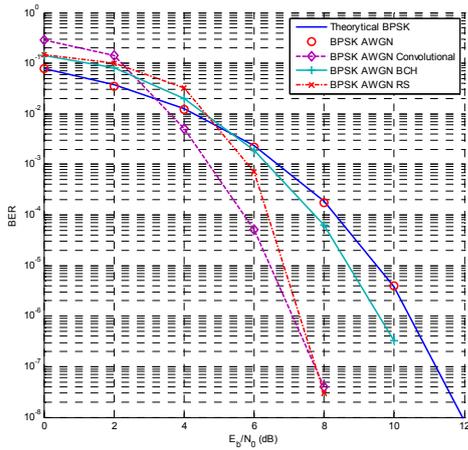


그림 7. 동기 BPSK 변조 방식의 BER

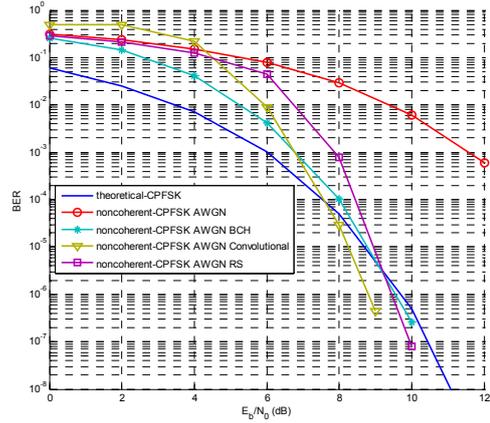


그림 10. 비동기 CPFSK 변조 방식의 BER

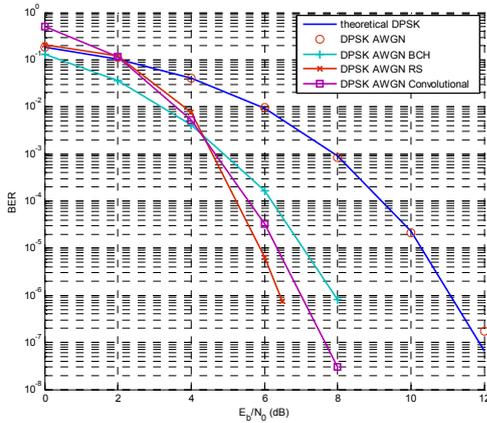


그림 8. 비동기 DPSK 변조 방식의 BER

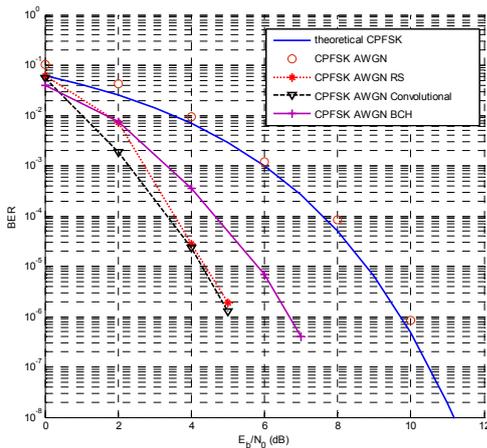


그림 9. 동기 CPFSK 변조 방식의 BER

Ⅲ. 성능 시뮬레이션 검토

EFTS의 변조 방식으로 비동기 BFSK, 동기 BPSK, 비동기 DPSK, 동기 CPFSK 그리고 비동기 CPFSK의 성능을 시뮬레이션하였다. 당연한 결과이겠지만 동기 방식이 비동기 방식보다 BER 성능이 좋았으며, 동기 방식의 경우에도 BPSK 보다 CPFSK가 성능이 더 좋았다. 동기 방식의 경우에는 비행체 또는 발사체의 환경에서도 동기의 획득과 유지가 필요하고, 동기의 획득과 유지를 하기 위해서는 추가적인 회로가 필요하다. 때문에 비동기 방식에 비해서 회로가 더 복잡해지고, 그로 인해서 시스템의 신뢰성이 저하될 수도 있다. 더불어 발사체는 초기 속도가 빠른 경우 도플러 주파수가 수십 kHz에 달한다. 이와 같은 환경을 고려한다면 동기 방식의 EFTS는 운용하기가 어려울 수도 있다고 판단된다.

비동기 방식에서는 비동기 DPSK, 비동기 CPFSK 그리고 비동기 BFSK 순서로 BER 성능이 좋은 것으로 시뮬레이션 되었다. 그러나 DPSK 변조의 경우 PEP가 약 2.6dB(rolloff 0.5인 경우)로 CPFSK의 PEP 1.8dB 보다 크기 때문에 송신기의 구성측면에서 불리하다[5].

채널 코드는 컨볼루션 코드가 우수한 성능을 가졌지만, 원하는 BER 성능을 갖는 E_b/N_0 부근에서는 RS 코드가 더 급격하게 BER 성능이 개선됨을 보였다. 이러한 사실은 BER 성능에 여유도를 주기 위해서 E_b/N_0 에 margin을 주는 경우에는 RS 코드가 더 유리함을 알 수 있다.

Ⅳ. 결론

본 논문에서는 EFTS의 변조 방식으로 적용가능한 비동기 BFSK, 동기 BPSK, 비동기 DPSK, 동기 CPFSK, 비동기 CPFSK의 BER 성능을 시뮬레이션하고 비교 분석하였다. 시뮬레이션 결과 동기 방식이 비동기 방식에 비해 우수한 성능

을 가짐을 확인하였다. 그러나 동기 방식은 발사체나 이동체의 환경을 고려한 검토가 더 필요하다. 더불어 채널 코드의 성능도 비교 검토하였다. 시뮬레이션 결과는 컨볼루션널 코드가 다소 좋은 성능을 보였지만, 원하는 BER을 갖는 E_b/N_0 부근에서는 RS 코드의 BER 성능 개선 정도가 더 우수함을 확인하였다.

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 비행종단시스템 표준화 동향,” 항공우주산업기술동향, 제8권 제1호, pp.86-95, 2010.
- [3] RCC RS-38, Enhanced Flight Termination System Study Phase I-IV Reports, Nov. 2002.
- [4] Jeff S. Vetter and Travis Cribbet, “The Design and Development of the Prototype Enhanced Flight Termination System,” -, 2002.
- [5] 강상기, “FTS 방식이 전력증폭기의 성능에 미치는 영향,” 통신위성우주산업연구회논문지, 제8권 제1호, pp.8-13, 3월 2013.
- [6] RCC 119-06, Telemetry Applications Handbook, May 2006.
- [7] RCC 120-09, Telemetry Systems Radio Frequency Handbook, March 2008.
- [8] RCC 313-01, Test Standard for Flight Termination Receiver/Decoder, 2001.
- [9] Kanchan Mishra, CPFSK Demodulation Techniques, Indian Institute of Technology, Guwahati, May 2007.

저자

강 상 기(Sang Gee Kang)



- 1988년 : 단국대학교 전자공학과(공학사)
- 1989년 : 삼성반도체통신
- 1989년~1992년 : 해군통신장교
- 1994년 : 단국대학교 전자공학과(공학 석사)
- 2004년 : 충남대학교 전파공학과(공학 박사)

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