

## ATP시스템 지상장치/차상장치 통신오류율에 관한 연구

### A Study on the Bit Error Rate between the Wayside Device and Onboard Device in ATP System

이태호\*, 장우진†

Taeho Lee\*, Woojin Jang†

**Abstract** ATP system with the existing balise the ground beacon, train communications by telegram listed between trains to the exchange of information between wayside device and onboard device if an error occurs in this progress can lead to serious accidents. In this study, the wayside device /onboard device communication error rate is to research on. Telegram transmission distance gets longer with increasing train speed and readable magnetic and electric field intensity decreases which reduces the intensity of the signal to noise ratio(SNR) and consequently increased bit error rate(BER) sent a telegram to the increase in the problem can occur. ATP system, which is one of the ERTMS/ECTS system, the BFSK(Binary Frequency shift keying)method in relation to the bit error rate and SNR based on the speed of the train for ways reduce the error rate is presented.

**Keywords:** ATP, Balise, Telegram, BER, BFSK

**초록** ATP시스템은 기존의 신호기 없이 발리스라는 지상장치, 차상장치간 텔레그램의 통신에 의해 열차간 운행 정보를 상호 교환하는 시스템으로 이 과정에서 오류가 발생한다면 심각한 사고가 발생할 수 있기 때문에 본 논문에서는 지상장치/차상장치 통신 오류율에 관해 연구하고자 한다. 텔레그램 전송거리는 열차 속도가 증가할수록 길어져 판독 가능한 자계와 전계의 세기가 감소하고 신호 대 잡음비(SNR)가 감소하여 결국 비트 오류율(BER) 증가로 텔레그램 전송에 문제가 발생할 수 있다. ATP시스템 중 하나인 ERTMS/ECTS시스템에서는 BFSK(Binary Frequency Shift Keying)방식에 대해서 열차속도에 따른 비트 오류율과 SNR의 관계에서 오류율을 낮출 수 있는 방안을 제시하였다

키워드 : ATP, 발리스, 텔레그램, BER, BFSK

## 1. 서론

열차제어시스템인 ATP(Automatic Train Protection)시스템은 열차검지, 선행열차와

\* 서울과학기술대학교 철도전기신호공학과,

† 교신저자: 서울과학기술대학교 정보통신대학 전기정보공학과

후행열차 사이의 거리유지, 진로 연동 및 속도제한 등을 통해 안전한 열차 운영을 유지하는 ATC(Automatic Train Control)의 하부 시스템이다. 또한 폐색구간 경계지점에 설치한 지상장치(Balise, Beacon)등을 통해 열차 간 운행 정보의 상호교환을 실행함으로써 최소제동거리 확보, 운전 시력의 단축, 선로 용량 증가와 열차 충돌을 방지하는 역할을 수행한다. ATP시스템은 지상장치에서 차상장치에 텔레그램 정보를 송신하고, 차상장치는 텔레그램을 이용하여 열차주행정보를 차량에 제공한다. 이 정보전송 과정에서 오류가 발생한다면 열차운행에 막대한 지장과 사고를 초래할 수가 있다. 현 ATP시스템에서는 BFSK(Binary Frequency Keying) 방식을 사용하는 있는데 본 논문에서는 BFSK방식에서 열차속도와 SNR에 따른 비트 오류율을 수리적 계산하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 ATP시스템 시스템의 구조

지상장치 정보전송 시스템은 현장 선로변전자장치(LEU :Lineside Electronic Unit)로부터 ATP시스템의 차상장치로 안전하게 정보를 전송하는 것으로서 고정데이터와 가변 데이터를 전송한다. 고정 데이터는 궤도의 지역적인 정보와 관련된 것이며, 가변 데이터는 열차 운행이나 진로상태 등과 관련된 정보로서 1,023[bit]와 341[bit]의 두 가지 길이로 구성된 정보이다. 그리고 가변데이터는 LEU에 고정 데이터는 지상장치내에 저장된다. ATP의 전체적인 구성과 텔레그램의 구조는 그림 1, 그림2와 같다. 텔레그램의 데이터 비트들은  $b_{n-1}, b_{n-2}, \dots, b_1, b_0$  ( $n = n_L = 1023$  그리고  $n = n_s = 341$ )으로 표시된다.

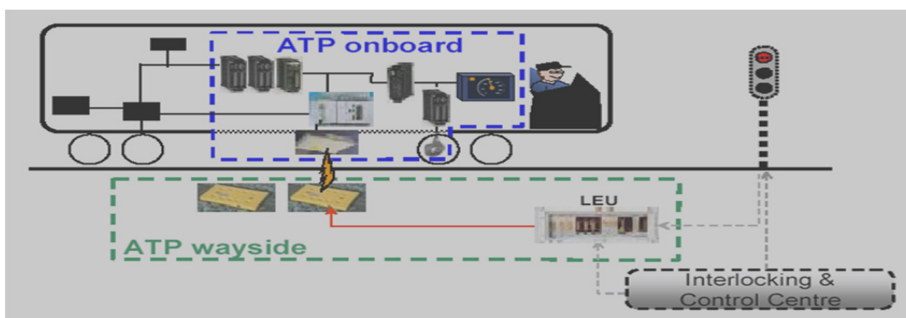


Fig. 1 ATP structure

Shaped Data	cb	sb	esb	Check bits
83·11=913 or 21·11=231 bits	3bits	12bits	10bits	85bits

Fig. 2 Telegram structure

## 2.2 FSK방식

현재 ATP시스템에서는 BFSK(Binary Frequency Shift Keying) 변조방식을 사용하고 있다. 이 방식에서 열차의 속도가 300[km/h]인 경우에는 신호 대 잡음비에 대한 기준 비트 오류율 값( $1 \times 10^{-9}$ )을 만족하지만 300[km/h] 이상으로 주행할 경우에는 기준 비트 오류율 값을 만족하지 못한다. FSK변조방식의 비트오류 확률을 구하는 방법과 변조 모델은 식(1), 그림3과 같다.

$$P_{\epsilon}(t) = \frac{1}{2} \int_0^{V_t} p_1(r)dr + \frac{1}{2} \int_{V_t}^{\infty} p_0(r)dr \quad (1)$$

$$P_{\epsilon_{SNR}} = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{SNR}{4}\right)$$

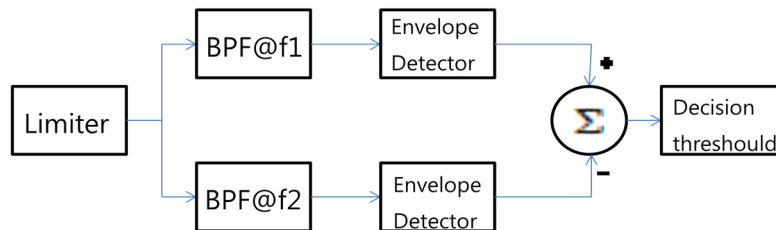


Fig. 3 The model of FSK modulation

## 3. 전송비트 에러

### 3.1 속도에 따른 지상장치/차상장치 간의 자기결합

ATP시스템의 지상장치는 차상장치로부터 텔레파워(무선주파수 송신에 의한 전원공급)에 의해서 전원을 공급받아, 차상장치로 열차제어정보인 텔레그램을 전송한다. 이 지상장치와 차상장치의 안테나는 직사각형 형태의 루프안테나를 사용하고 그림4와 같이 Contact Zone이 존재한다

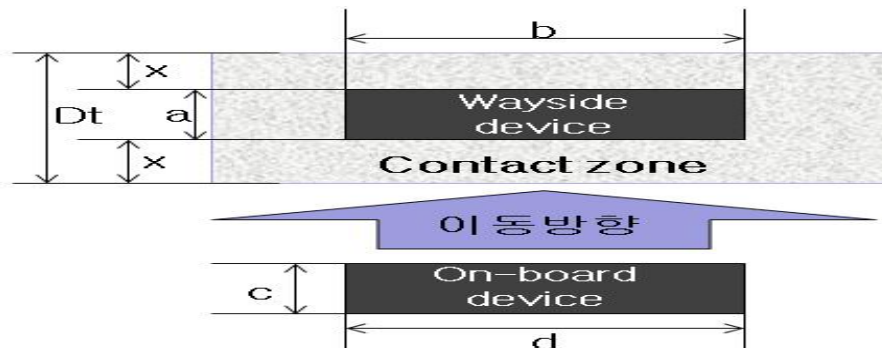


Fig. 4 Standard of horizontal distance between wayside device and onboard device

텔레그램의 전송거리는 자계 및 전계의 세기와 열차속도에 영향을 받는다. 자계 및 전계의 세기가 약하면 텔레그램 전송거리는 감소하고, 전송기간이 일정한 경우에 열차속도가 증가함에 따라 텔레그램 전송거리는 증가한다. 지상장치와 차상장치 사이의 전송시간, 전송거리, 판독 수평거리는 각 식(2), (3), (4)와 같다.

$$T_r = \frac{l_t}{r_t} \quad (2)$$

$$D_t = \frac{l_t}{r_t} \times V_s = T_r \times V_s \quad (3)$$

$$x = \frac{(D_t - a)}{2} = \frac{(T_r V_s - a)}{2} \quad (4)$$

### 3.2 판독 자계 및 전계

ATP시스템은 RIFD(Radio Frequency Identification)의 응용 시스템이므로 지상장치와 차상장치는 그림4와 같이 상호자기결합에 의해 열차제어정보인 텔레그램을 전송한다. 지상장치와 차상장치는 자기결합에 의해 영향을 받기 때문에 판독 자계의 세기가 중요하다. ATP시스템은 지상장치와 차상장치 모두 데이터를 송수신하게 되는데 본 논문에서는 ATP시스템 표준지상장치에서 차상장치로의 정보전송시에 자계의 세기 기준을 제시한다. ATP시스템에서 표준지상장치의 안테나는 그림5와 같이 직사각형의 루프루프로 구성되어 있고 앞서 그림3과 그림4에 따라 길이와 폭이 a와 b이고 직사각형 도체 루프의 판독 수평거리 x와 y인 지점에서 자계의 세기는 식(5)와 같다.

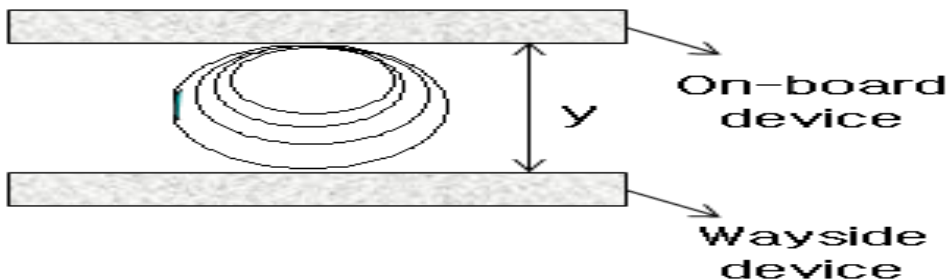


Fig.5 Magnetic coupling between wayside device and onboard device

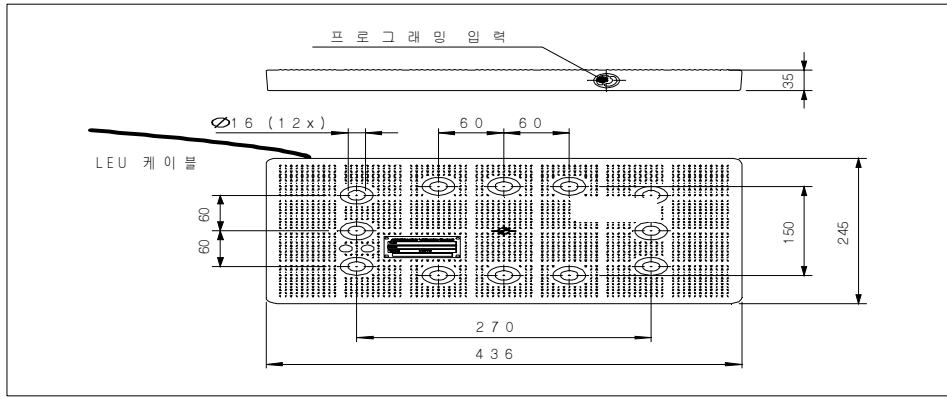


Fig.6 Wayside device structure

$$H(I_w) = \frac{N_w \times a \times b \times I_w}{4\pi \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2 + x^2 + y^2}} \times \left( \frac{1}{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + x^2 + y^2} + \frac{1}{\left(\frac{b}{2}\right)^2 + x^2 + y^2} \right) \quad (5)$$

$N_w$ 는 지상장치 코일의 턴수를 의미하고,  $I_w$ 는 지상장치에 흐르는 전류의 크기이다. 판독 자계의 세기를 계산하기 위해서는 지상장치와 차상장치의 자기 인덕턴스와 상호인덕턴스가 계산되어야 하므로 식(5)를 이용해서 지상장치와 차상장치의 자기인덕턴스 및 상호인덕턴스는 식(6), 식(7)과 같다.

$$L_w = \frac{N_w \times \Phi_w}{I_w} = \frac{N_w \times \mu_0 \times H(I_w) \times a \times b}{I_w} \quad (6)$$

$$L_n = \frac{N_n \times \Phi_n}{I_n} = \frac{N_n \times \mu_0 \times H(I_n) \times a \times b}{I_n}$$

$$M = \frac{B_n(I_w) \times N_n \times c \times d}{I_w} = \frac{\mu_0 \times H(I_w) \times N_n \times c \times d}{I_w} \quad (7)$$

$\Phi_w$ 는 지상장치를 통과하는 자속을 의미하고,  $\mu_0$ 는 자유공간에서의 투자율을 의미한다.  $\Phi_n$ 는 차상장치를 통과하는 자속을 의미하고,  $N_n$ 는 차상장치 코일의 턴수를 의미하고,  $I_n$ 는 차상장치에 흐르는 전류의 크기이다. 판독 자계의 세기란 유도된 전압이 데이터 전송을 위해 지상장치와 차상장치 사이의 최대 거리에서의 자계의 세기를 의미한다. 판독 자계의 세기는 차상장치 코일의 면적과 턴수, 유도된 기전력, 공진주파수에 의존한다. 이는 차상장치 공진회로의 공진주파수에서 유도된 기전력의 공진 증가를 결정했기 때문이다. 또한 판독 감도를 최적화하기 위하여 차상장치의 공진주파수는 지상장치의 전송 주파수에 정확히 정합되어야 한다. 차상장치에서의 판독 자계의 세기는 식(8)과 같고 자유공간에서의 전계의 세기는 식(9)과 같다. 전계의 세기는 비트 오류율을 계산하는 경우 응용된다.

$$H_{\min} = \frac{u_n \times \sqrt{\left(\frac{wL_n}{R_L} + wR_n(C_p + C_n)\right)^2 + \left(1 - w^2 L_n(C_p + C_n) + \frac{R_n}{R_L}\right)^2}}{w \times \mu_0 \times c \times d \times N_n} \quad (8)$$

$$E_{\min} = H_{\min} \times \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} \quad (9)$$

### 3.3. 평균 신호 전력 대 평균 잡음 전력비

평균 신호 전력 대 평균 잡음 전력 비(S/N 또는 SNR)로 주어지는 이 변수는 디지털 통신에서는 성능 평가 특성으로서 SNR을 정규화한 의미의  $E_b/N_0$ 를 사용한다.  $E_b$ 는 비트 에너지이고, 비트시간  $T_b$ 와 신호전력  $S$ 의 곱이다.  $N_0$ 는 잡음 전력 스펙트럼 밀도이고, 잡음 전력  $N$ 을 대역폭  $W$ 로 나눈 값으로 나타낼 수 있다. 비트 시간과 비트 비율  $R_b$ 는 서로 역수이므로  $T_b$ 를  $1/R_b$ 로 대체할 수 있다.

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S T_b}{N/W} = \frac{S/R_b}{N/W} \quad (10)$$

초당비트의 단위로 쓰는 데이터율은 디지털 통신에서 가장 많이 나타나는 매개변수이다. 따라서 bits/s를 나타내는  $R_b$  대신  $R$ 로 단순화하기로 한다.  $E_b/N_0$ 가 S/N을 대역폭과 비트 비율로 정규화한 의미임을 강조하기 위해 식 (10)를 다시 쓰면 식(11)과 같다.

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} \left(\frac{W}{R}\right) \quad (11)$$

디지털 통신에서 성능에 대한 가장 중요한 메트릭은 비트오류 확률  $P_B$  대  $E_b/N_0$ 의 그래프이다. 그림 10 에는 폭포 같은 모양의 곡선이 도시되어 있다.  $E_b/N_0 \geq x_0$  인 경우  $P_B \leq P_0$ 가 된다. 차원이 없는 비  $E_b/N_0$ 는 디지털 통신 시스템 성능에 대한 정량적인 평가 기준이다. 따라서 요구되는  $E_b/N_0$ 는 한 시스템 대 다른 시스템의 성능을 특징짓는 척도로 생각할 수 있다. 요구된  $E_b/N_0$ 가 작을수록 주어진 검출 과정이 더 효율적임을 의미한다.

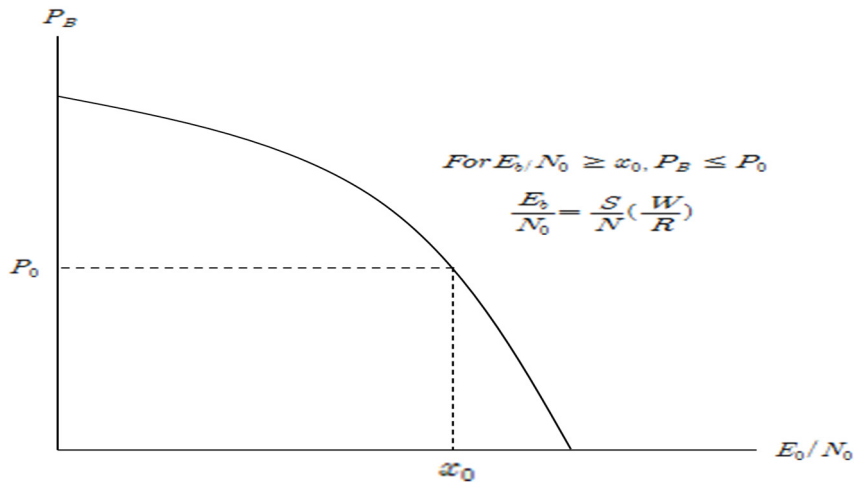


Fig.7 The wave form between  $P_B$  and  $E_b/N_0$

### 3.4 BER

열차속도에 따른 전계의 세기를 이용하여 신호 대 잡음비를 구하고, 신호 대 잡음비를 이용하여 디지털 변조방식에 따른 FSK 방식의 비트 오류율을 구할 수 있다. FSK 방식의 비트오류율 공식은 각 식(12) 과 같다.

$$\text{FKS 방식의비트오류율} : p_{e,b} = \frac{1}{2} e^{-E_{\min}/2N_0} = \frac{1}{2} e^{-\text{SNR}_r/4} \quad (12)$$

## 4. 시뮬레이션

ATP 시스템의 지상장치, 차상장치 특성은 표1과 같고, 지상장치의 경우 실제 열차운행 방향과 같은 횡방향으로 설치한 것으로 한다. 열차속도를 100[km/h]~600[km/h]로 변화함에 따라 기준 자계 및 전계의 세기를 해석하고, 이를 토대로 FSK 방식의 비트 오류율을 계산하였다

Table 1. Characteristic of wayside device and onboard device in ATP system

	구분	값
텔레그램전송시간파라미터	지상장치의전송속도( $r_t$ )	564[kbit/s]
	표준텔레그램길이( $l_t$ )	1,023[bit]
지상장치자계의 세기및 상호인덕턴스 파라미터	지상장치코일의가로길이(a)	40[mm]
	지상장치코일의세로길이(b)	40[mm]
	차상장치코일의가로길이(c)	40[mm]
	차상장치코일의가로길이(d)	40[mm]
	지상장치의전류크기( $I_w$ )	10[mA]
	지상장치와차상장치의수직거리(y)	200[mm]
	지상장치코일의턴수( $N_w$ )	7[turn]

	차상장치코일의턴수( $N_n$ )	7[turn]
	자유공간투자율( $\mu_0$ )	$4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]
	자유공간유전율( $\epsilon_0$ )	$8.85 \times 10^{-12}$ [F/m]
판독 자계의 세기 및 파라미터	지상장치의전송주파수( $f$ )	4.23[MHz]
	차상장치의내부저항( $R_n$ )	0.3[ $\Omega$ ]
	차상장치의부하저항( $R_L$ )	50[ $\Omega$ ]
	차상장치의인덕턴스( $L_n$ )	960[nH]
	지상장치의인덕턴스( $L_w$ )	960[nH]
	기생커패시터+동조커패시터 ( $C_p + C_n$ )	1.474[nF]

## 5. 결론

열차속도가 증가함에 따라 텔레그램의 전송거리가 증가하였다. 이에 따라 판독수평 거리가 증가되고 자속이 통과하는 양이 적어지기 때문에 상호인덕턴스가 감소하며, 판독 자계의 세기와 상호인덕턴스는 비례관계이므로 열차속도가 증가함에 따라 판독 자계의 세기가 감소하였다. ATP시스템에서 BFSK 방식을 사용하여 열차속도가 증가하더라도 기준 비트 오류율( $1 \times 10^{-9}$ )을 만족하여 텔레그램 전송을 정상적으로 전송하기 위한 세가지 방법을 제시하였다. 첫째, 열차속력이 증가하면 판독자계를 감지하고자 하는 길이가 길어짐으로써 자계의 세기가 약해지기 때문에 코일의 턴수를 증가시킨다. 둘째, 0.484[V/m]의 전계 세기를 감지할 수 있는 안테나를 제작한다. 셋째, 지상장치 전류의 크기를 증가시켜 판독 자계의 세기를 증가시킨다. 본 논문으로 ATP 시스템 설계 및 부설시에 신호시스템 기준안을 위한 자료를 제시하고자 한다.

## 참고문헌

- [1] Bernard Sklar(2003) Digital Communication, Fundamentals and Applications
- [2]H.J. Kang(1992)Directly affected by fading and interference, spread spectrum performance analysis of PSK signals
- [3]S.H. LEE(2011)A study on the Performance Analysis of Modulation Methods in ATP system for Various Train Speed Environments
- [4]Krishna Sankar(2012)Symbol Error rate for QAM
- [5]Nikolai G. Lehtinen(2010)Error functions