

# 무선기반 열차제어시스템의 수신감도 개선모듈 설계 및 성능 분석

## The design and performance analysis of improvement module for receiver sensitivity in wireless train control system.

선상혁\*†, 심재만\*, 박정\*

Sanghyeok Sun\*†, Jaeman Shim\*, Jung Park\*

**초 록** 국내 주요 철도기관들이 현재 4세대 LTE 기술을 활용한 무선기반 열차제어시스템에 대하여 국내 철도 운영 효율화와 해외시장 진출 교두보 마련 등을 목표로 적극적으로 기술 확보를 위해 노력하고 있다. 이와 같이 무선 기반의 열차제어시스템은 철도 미래의 결정적인 기술로서 반드시 확보가 필요하다. 용인경전철은 CBTC(Communication Based Train Control) 방식으로 ISM 대역인 2.4GHz 대역을 활용하여 무선기반 열차제어시스템을 운영하고 있다. 안전한 열차 운영을 위한 무선 성능 개선은 무선기반의 열차제어시스템에서 공통 사항이며 필수 사항이다. 본 논문에서는 시스템 업링크 수신기의 노이즈 피겨 값을 개선시킴으로서 수신감도 마진을 확보하여 무선 환경의 신뢰성을 크게 보완하기 위한 방안을 연구한다.

**주요어** : Noise Figure, Sensitivity, Wireless train control system, 무선기반 열차제어시스템

### 1. 서론

무선기반의 열차제어시스템에서 선로에 구축되는 무선용 지상설비는 무선통신의 신뢰성 향상을 위하여 시스템 A와 시스템 B로 이중화 구성 되어 있다.

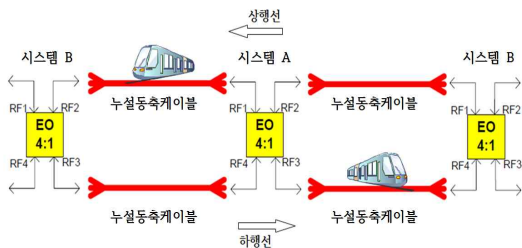


Fig. 1 무선기반 열차제어시스템의 지상설비

각 설비는 누설동축케이블(또는 안테나)을 서로 공유하며 주 시스템의 장애 발생 시 예비시스템으로 원격 절체 되어 지연 없는 열차 운영을 하게 된다. 지상설비 한 대(시스템A 또는 B)는 상행선 2경로, 하행선 2경로

등 총 4경로에 대한 통신이 지원되어야 하므로 지상설비 입력력 초단에 4-Way 분배기가 설계되어 있다. 상기 설계는 무선통신에서 무선 커버리지 성능을 결정짓는 열차에서 지상설비로의 통신방향인 업링크의 수신 세기가 상대적으로 큰 값이어야 무선환경의 신뢰성이 보장되는 설계 구조이다. 본 논문에서는 상기 지상설비에서 수신감도 개선을 위한 추가 모듈을 설계하고 그에 대한 성능 검증 및 분석을 수행하였다.

### 2. 설계 및 성능 검증

#### 2.1 수신감도 개선의 이론적 접근

##### 2.1.1 수신감도와 노이즈 피겨와의 관계

수신감도는 일반적으로 하기의 식으로 산출된다.

$$\text{수신감도} = \text{Thermal Noise}(-174\text{dBm/Hz}) + 10\text{Log}(\text{모뎀채널대역폭}) + \text{Noise Figure(NF)} + \text{모뎀 SNR}(Eb/No)$$

수신감도 세기 값은 무선모뎀 성능과 시스템 구성에 의한 노이즈피겨 값에 의하여

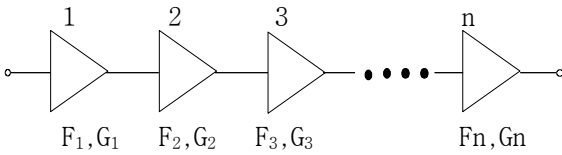
† 교신저자: 네오트랜스(주) 지상시스템팀

\* 네오트랜스(주)

최종 결정된다. 결국 수신기의 노이즈피겨 특성은 무선통신의 수신감도를 결정하는 가장 중요한 요소가 된다. 노이즈피겨(NF)는 시스템이나 회로 블록을 신호가 지나면서 얼마나 잡음이 추가되었느냐를 나타내는 지표이다. 노이즈피겨의 산출식은 다음과 같다.

$$Noise\ Figure\ (NF) = 10\log F = 10\log\left(\frac{SNR_{in}}{SNR_{out}}\right)$$

회로나 시스템 블록이 직렬(cascade)로 연결된 경우, 시스템 최종단에서의 노이즈피겨는 아래의 수식으로 계산된다.



$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}$$

시스템 전체의 노이즈피겨를 결정짓는 가장 중요한 부분은 맨 앞항의 NF 값이다. 초반 블록(첫 항과 두번째 항)이 NF가 작고 이득이 큰 경우 시스템의 NF가 가장 크게 개선되며 수신감도 또한 개선된 NF 값(dB)과 동일하게 개선된다.

### 2.1.2 Simulation

시뮬레이션은 Arden사의 SysCalc 4.06 모델을 사용하였다. 지상설비 내부는 아래 시뮬레이션의 그림과 같이 직렬(Cascade)로 구성되어 있다. 결과는 다음과 같다.

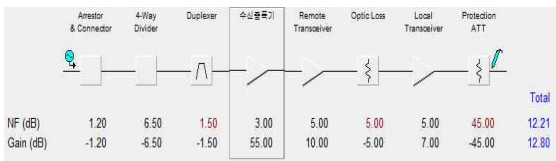


Fig. 2 지상설비의 초기 구성 시뮬레이션 결과

초기 구성 : NF = 12.21dB, Gain = 12.8dB

최종 개선된 노이즈피겨 값은 초단 블록들의 특성(NF와 Gain)에 의하여 결정되므로 초단 4개 블록까지 시뮬레이션을 수행하였으며 결과 값은 다음과 같다. 수신감도 개선을 위한 모듈 추가 시 전체 Gain 값이 변경된다. 개선 원인을 명확하게 비교하기 위하여 최종 설계 구성과 전체 Gain을 동일하게 유지하여 아래 시뮬레이션 결과 I과 II를 비교하였다. 그 결과 개선모듈의 설계 위치에 따라 NF 값이 상이함을 알 수 있다. 그림 3과 같이 개선모듈을 수신 증폭기 전단에 설계한 시뮬레이션 I 결과는 다음과 같다.

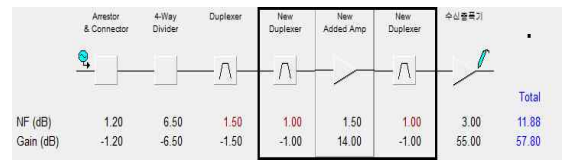


Fig. 3 개선모듈 추가 시뮬레이션 결과 I

시뮬레이션 I : NF=11.88dB, Gain=57.8dB

본 논문의 최종적 설계를 반영한 시뮬레이션 II 결과는 다음과 같다.

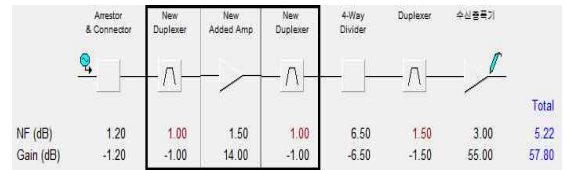


Fig. 4 개선모듈 추가 시뮬레이션 결과 II (수신감도 개선을 위한 최종적 설계)

시뮬레이션 II : NF = 5.22dB, Gain = 57.8dB

시뮬레이션 I 대비 시뮬레이션 II의 노이즈피겨 값이 약 6.7dB 개선되었다.

## 2.2 설계 및 성능 검증

### 2.2.1 설계

지상설비에 시뮬레이션 I의 구성을 실제 적용한 경우를 지상설비 적용 I으로 정의하고 시뮬레이션 II의 구성을 적용한 경우를 지상설비 적용 II로 정의한다. 본 논문에서 설계 및 성능 검증을 위하여 Qorvo사의 RF2374 증폭기를 적용하였으며 주요 특성은 아래 Table 1 과 같다.

Parameter	Test Results (typical performance)	
Power	Current (mA)	7.2
	Voltage (VDC)	3.3
NF @2450MHz	NF (dB) non-bypass	1.5
	NF(dB) bypass	3.5
Gain & Linearity @2450MHz	Gain (dB) non--bypass	14.2
	Gain (dB) bypass	-3.5
	IIP3 (dBm) non-bypass	11.4
	IIP3 (dBm) bypass	21.1

Table 1 Qorvo사 RF2374 특성표

수신 개선 모듈 설계는 아래 그림 4의 최종 시뮬레이션 구성과 동일하게 듀플렉서는 송수신 Isolation 특성을 위하여 입력/출력단에 각각 설계하였고 듀플렉서(D) 사이 업링크 경로에 Qorvo사(구 RFMD사)의 RF2374 증폭기를 설계하였으며 다운링크는 바이패스로 설계 하였다. 수신증폭기는 (RF2374) 상기 표 1과 같이 바이패스 모드 지원으로 증폭기 장애발생 시 통신단절을 회피할 수 있다. 최종 구성도는 아래 그림 5와 같다.

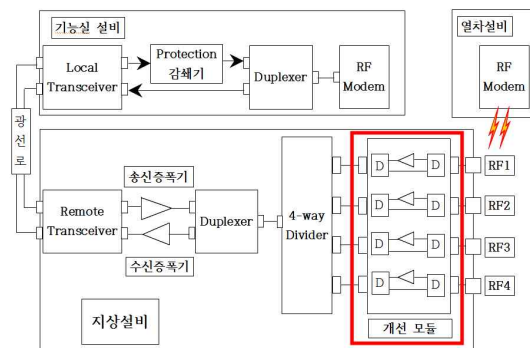


Fig. 5 최종 수신감도 개선 모듈 추가 구성도

### 2.1.2 성능 검증

그림 5와 같이 지상설비와 기능실 설비의 전체 경로에 대한 노이즈피겨(NF)를 측정하였다. 노이즈 피겨 측정에 사용된 계측기는 키사이트 N8973A 노이즈 피겨 어널라이저를 활용하여 측정하였다. 지상설비 적용 I 의 노이즈피겨를 측정한 결과는 그림 6과 같다.

지상설비 적용 I 측정 결과 값 ;  
**NF=12.1dB, Gain=11.2dB**

시뮬레이션 I의 노이즈 피겨값 11.88dB와

유사한 결과가 도출되었다. Gain값이 크게 상이한 원인은 시뮬레이션 수행 시 Transceiver간의 광손실과 Protection용 감쇄기 등의 손실 값은 고려하지 않았다.

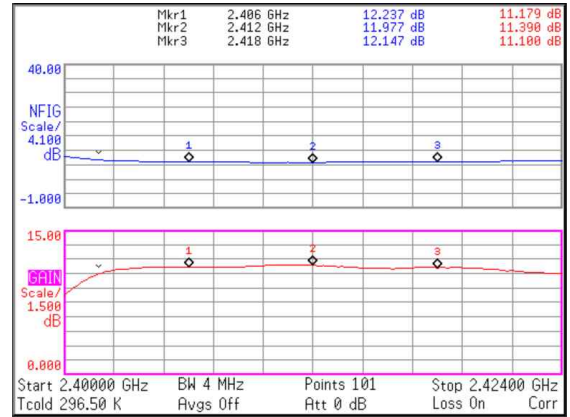


Fig. 6 지상설비 적용 I 노이즈 피겨 실측 치

지상설비 적용 II의 노이즈피겨를 측정 한 결과는 그림 7과 같다.

지상설비 적용 II 측정 결과 값 ;  
**NF=5.7dB, Gain=12.5dB**

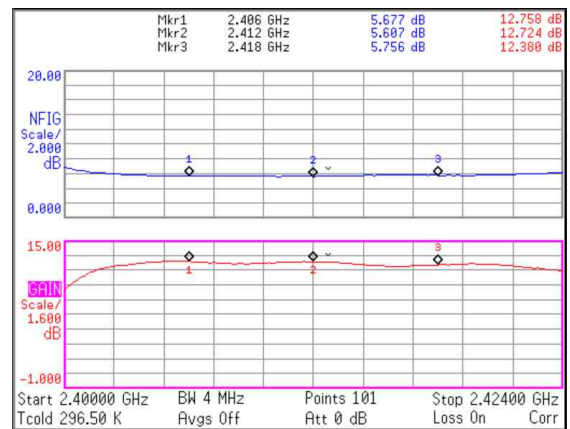


Fig. 7 지상설비 적용 II 노이즈 피겨 실측 치

시뮬레이션 II의 노이즈 피겨값 5.22dB와 유사한 결과가 도출되었다. 따라서 개선된 노이즈피겨 값은 시뮬레이션에서 약 6.7dB, 지상설비 적용 후 실측치에서 약 6.4dB 로서 유사한 결과 값이 도출되었다.

개선된 노이즈피겨에 의하여 무선통신 환경의 개선 결과를 검증하기 위한 방안으로 데이터 패킷 손실을 시험을 수행하였다. 기능실의 무선 모뎀에서 열차내의 무선

모뎀까지 다운링크 경로와 열차의 무선모뎀에서 기능실 무선모뎀까지 업링크 경로를 모두 포함한 전체 경로(Poll Loop)에 대한 무선통신 시험이다.

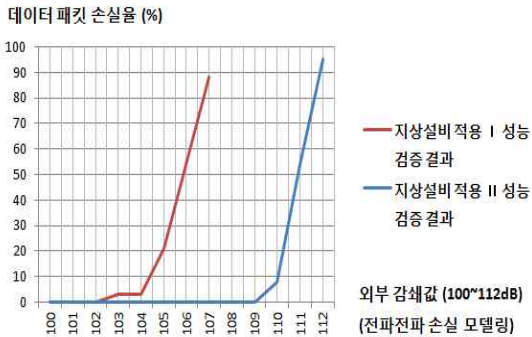


Fig. 8 데이터 패킷 손실율 비교

전체 경로 (무선경로 포함)에 대한 손실을 가변 감쇄기(키사이트/8494A)를 활용하여 전파 전파 손실을 모델링 하였으며 허용되는 감쇄값이 그림 8의 가로축(X축)이며 세로축(Y)은 그 감쇄값에 대응되는 데이터 패킷 손실율이다. 측정 결과 패킷 손실율이 0% 이하를 유지 하는 조건에서 허용되는 감쇄값은 지상설비 적용 I은 102.5dB, 지상설비 적용 II는 109dB 이다. 따라서 수신감도가 약 6.5dB 개선되었다. 개선된 이 값은 시뮬레이션 계산치, 지상설비 적용 후 실측치와 모두 근사치이다.

### 3. 결론

본 논문은 수신감도를 개선하기 위하여 노이즈피겨를 개선하는 방안으로 설계와 구현 및 검증을 수행한 내용이며 실험실과 현장에서 검증한 결과 적용 가능함을 확인하였다. 수신감도 개선을 통하여 무선기반 열차제어시스템의 성능 개선 목적으로 수행하였으며 향후 현장에 적용하기 위해서 현장 설치를 위한 인허가 관련의 행정적인 절차도 필요하며 다음과 같은 기술적인 추가 작업도 필요하다. 열차의 무인 운전을 가능케 하는 주요 신호 설비이므로 장애에 대한 즉각적인 자동 복구 기능 구현은 필수적이다. 내부 증폭기의 장애가 감지 되었을 경우 자동으로

바이패스되어 기존 구성으로 원복되거나 또는 이중화 및 선형성을 위하여 Balun을 활용한 더블 밸런스드 증폭회로(Double Balanced Amplifier Circuit) 구현으로 위험요소를 회피하는 기능, 장애 발생 시 알람이 관제 및 유지보수 요원에게 즉각 자동 전달되는 기능 등 안전한 열차운행이 가능하도록 추가 기능 구현 검토가 필요하다.

### 참고문헌

- [1] Behzad Razavi(1998) RF Microelectronics, Prentice Hall PTR, pp. 37-52, 200-204.
- [2] Peter Vizmuller (1995) RF Design Guide, Artech House INC, pp. 5-25, 192-196
- [3] Stephen J. Erst (1984) Receiving System Design, Artech House INC, pp. 46-56, 76-94