

무선중계기에서 출력레벨 분석을 통한 안테나간 피드백발진의 실시간 감지 및 제어 방법

박 덕 영*, 이 재 용^o

Real-Time Detection and Control Method of Feedback Oscillation between Antennas through Output Level Analysis in a Wireless Repeater

Duckyoung Park*, Jaiyong Lee^o

요 약

본 논문에서는 무선중계기에서 별도의 회로 추가 없이 안테나간 간섭으로 인한 피드백 발진으로부터 회로를 보호하고 신호 품질을 유지하기 위한 감지 및 제어 기능을 소개하고 성능을 평가하였다. 피드백 발진의 감지는 무선중계기의 순방향(Downlink) 출력의 시간에 따른 변화 분석을 통해 이루어지며, 이때 순방향 출력 검출 회로는 반드시 침투 검출 방식으로 구성되어야 한다. 귀환 발진의 상태 발생 시 발진 상태를 해소하기 위해 무선중계기 이득조절을 위한 감쇄기를 제어해 원신호 대비 피드백 신호의 세기가 충분히 낮아지도록 하는 방법을 적용 하였다.

Key Words : Feedback Oscillation, Antenna Isolation, Wireless Repeater, SINR, EVM

ABSTRACT

In this paper, the repeater introduce and evaluate its sensing and control functions to protect the circuit from oscillation which is caused by inter-antenna interference, and maintain the signal quality without additional circuit. Detection of the oscillation is performed by analyzing the time change of downlink output power, and such a downlink output power detection circuit must be constituted by the peak detection method. When oscillation occur, in order to solve the oscillation condition, controlling attenuator to adjust the gain of the repeater is applied so that the intensity of the feedback signal compared to the original signal is sufficiently low.

1. 서 론

송신 및 수신에 동일한 주파수를 사용하는 무선중계기는 무선중계기의 이득이 안테나간 격리도보다 클 경우 송신안테나에서 수신안테나로 들어오는 피드백 간섭신호로 인한 피드백 발진이 발생할 수 있다. 피드

백 발진은 송신 안테나에서 출력되는 잡음으로 인해 무선중계기에 입력이 없을 때에도 발생한다.^[1]

Fig.1에서 원신호 입력레벨을 P_{Input} , 무선중계기의 이득을 G , 각 안테나의 이득을 포함한 도너안테나와 서비스 안테나간 격리가 I 일 때, 피드백 입력되는 신호의 레벨 $P_{Feedback}$ 은 다음과 같이 계산된다.

* First Author : GS Instech, Yonsei University Graduate Department of Defense Fusion Engineering. natural1@gsinstech.com, 정희원

^o Corresponding Author : Yonsei University Department of Electrical & Electronic Engineering, jy1@yonsei.ac.kr, 종신희원

논문번호 : 201906-102-D-RU, Received June 7, 2019; Revised June 17, 2019; Accepted June 23, 2019

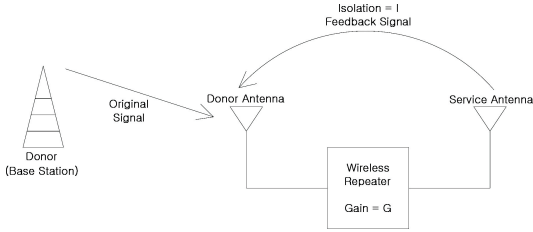


Fig. 1. Feedback interference within RF Repeater Antennas

$$P_{\text{Feedback}} = (P_{\text{Input}} + G) - I \quad (1)$$

즉, 안테나간 격리도(I)가 무선중계기의 동작이득(G)보다 같거나 작을 경우 피드백신호의 크기가 원신호보다 높아 무선중계기의 완전한 발진 상태가 되며, 안테나간 격리도가 무선중계기의 동작이득보다 크더라도 그 차이에 따라 원신호에 간섭 신호로 동작할 수 있기 때문에 무선중계기의 설치 시 안테나간 격리도가 무선중계기 동작이득보다 15dB 이상 큰 값이 되도록 설치하게 된다. [2]

무선중계기는 이와 같은 피드백 신호의 간섭 문제를 해결하기 위해 설치와 운영 중 이득의 변경 또는 안테나 격리도 저하로 인한 피드백 간섭을 감지하고, 목표한 수준의 신호품질을 유지하기 위해 동작하는 하드웨어 및 소프트웨어를 탑재하게 된다.

이미 많은 기술들이 실제 많은 제품에 적용되어 그 성능이 입증되었지만, 격리도 변화나 피드백신호의 변화를 측정하기 위한 회로 추가로 인해 제품의 크기와 가격이 상승하고, 전력 효율이 낮아지게 되는 공통적인 문제점을 가지고 있다. 이런 이유로 고가의 대 출력 장비에는 피드백 감지 및 대응 기술이 적용되고 있지만 차량용/가정용 등 소형, 저가의 무선중계기에서는 그 중요성에도 불구하고 많이 적용되지 못하고 있는 것이 현실이다.

본 논문에서는 회로 추가 없는 피드백발진 감지 방법과 발진 감지 시 중계기 동작 절차를 포함한 무선중계기를 구현하고, 이 기능을 탑재하기 전후의 동작과 신호 품질을 비교하여 향후 초소형 무선중계기를 설계하는데 참고할 수 있도록 한다. 이때, 제안하는 피드백발진 감지 기술은 초기설치 시 일회성으로 측정하는 기술이 아닌 운영 중 환경변화에 의한 발진을 능동적으로 감지하고, 조치할 수 있는 기술이다.

II. 무선중계기에서 피드백신호의 영향

무선중계기에서 안테나간 격리도 부족에 의한 피드백간섭의 발생 및 신호 품질에 영향을 아래 그림2에 설명한다.

Fig. 2에서와 같이 안테나격리도 부족으로 인해 피드백 입력된 신호는 원신호와 같은 주파수의 잡음으로 작용해 원신호의 신호대잡음비(SINR, Signal to Noise Ratio)를 낮추게 한다.

일반적으로 신호대잡음비와 EVM(Error Vector Magnitude)는 다음과 같이 정의된다.[3]

$$\text{SINR} = \frac{\text{Signal Power}}{\text{Noise Power}} = \frac{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [(I_t)^2 + (Q_t)^2]}{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [n_{I,t}^2 + n_{Q,t}^2]} \quad (2)^{[3]}$$

여기에서 I_t , Q_t 는 각각 M-ary modulation에서 동상신호와 직교신호 증폭도를, $n_{I,t}$, $n_{Q,t}$ 는 Complex 잡음에서 각각 동상과 직교 전압의 잡음 증폭도를 의미한다.

$$\text{EVM}_{\text{RMS}} = \left[\frac{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |I_t - I_{0,t}|^2 + |Q_t - Q_{0,t}|^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(I_{0,n})^2 + (Q_{0,n})^2]} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)^{[3]}$$

여기에서 I_t 와 Q_t 는 각각 표본에서 정규화된 동상과 직교 측정 전압을, $I_{0,t}$ 와 $Q_{0,t}$ 는 정상도에서 이상적인 symbol의 정규화된 동상과 직교 전압을 나타낸다. 이러한 정의는 IEEE 802.11a-1999TM의 EVM에 대한 표준정의에서 사용되고 있다.

수식 (2)에서 보면 EVM은 본질적으로 측정된 정상도 사이의 이상적인 정상도 사이의 정규화된 오차의 크기로 단순화 할 수 있다. Gaussian noise model에서 수식 (2)는 잡음의 동상 성분인 $n_{I,t}$ 와 직교 성분인 $n_{Q,t}$ 측면에서 아래와 같이 단순화 될 수 있다.

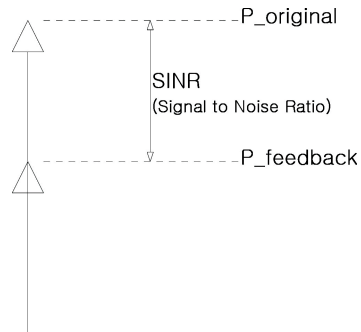


Fig. 2. Effects of Antenna Interference on SINR

$$EVM_{RMS} = \left[\frac{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [|n_{I,t}|^2 + |n_{Q,t}|^2]}{P_0} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)^{[3]}$$

여기에서 P_0 는 정상도에서 정규화된 전력을 나타낸다. 이 수식에서 $T \gg N$ 인 경우 이상적인 정상도에서 정규화된 전력에 대한 노이즈 전력의 비율은 정규화되지 않은 값들로 대체될 수 있으며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$EVM_{RMS} \approx \left[\frac{1}{SIN} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{N_0}{E_S} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)^{[3]}$$

SINR과 EVM간의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$SINR \approx \frac{1}{EVM^2}, \quad EVM \approx \frac{1}{\sqrt{SINR}} \quad (6)^{[3]}$$

SINR 변화에 따른 EVM 성능을 Fig. 3에 보여준다.

안테나 격리도가 중계기 이득보다 충분히 큰 경우는 SINR 영향만 나타나지만 격리도가 중계기 이득에 근접하거나 오히려 더 적은 경우 대 발진으로 인해 네트워크와 기기에 다음과 같은 치명적인 영향을 줄 수도 있다.^[4]

- 다운링크 영향
 - 단말기 *RSRP* 변동, *RSRQ* 저하
 - 데이터 속도 저하, 심각한 경우 통화 연결 실패
 - 인접 주파수에 불요파 상승
- 업링크 영향
 - *BER* 상승으로 인한 단말기 출력 상승
 - 기지국 업링크 잡음 상승에 따른 서비스 영역

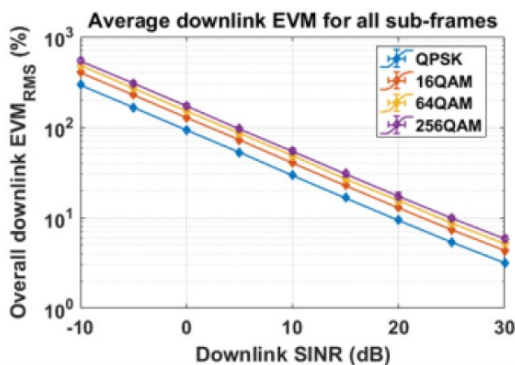


Fig. 3. EVM variation with SINR[3]

축소 및 서비스 영역 내 단말기 통화품질 저하
- 대발진 시 기지국 업링크 과 입력에 의한 기지국 동작 정지

- 회로 영향
 - 피드백 신호 영향으로 인한 출력 상승
 - 대발진 시 과도한 출력부담으로 인한 부품 파손

III. 기존 기술 분석

무선중계기에서 안테나 격리도 부족에 의한 피드백 발진을 감지하고 동작을 최적화하기 위해 다음과 같은 기술들이 사용된다.

1. DSP 처리를 통해 귀환 신호를 저감하는 기술^[5]
2. 무선중계기에 연결된 단말기 모델로부터 얻은 정보를 기준으로 동작 이득을 제어하는 방식^[6]
3. 기준신호(Reference Tone)를 이용해 실제 동작 주파수에서 안테나간 격리도를 측정하고, 무선 중계기의 이득을 측정된 격리도보다 충분히 낮게 설정해 운영하는 기술
4. 초기 설치 시 중계기 이득을 조정해 완전한 귀환 발진이 발생하는 이득을 확인하고, 이보다 충분히 *Back off*한 이득으로 중계기를 운영하는 기술

첫 번째 방식은 DSP 처리를 통해 피드백신호를 강제로 감쇄하기 때문에 안테나 격리도가 이득보다 낮은 환경에서도 무선중계기를 설치, 운영할 수 있는 장점이 있는 반면에, 충분한 격리도가 확보되어 피드백 신호가 매우 낮은 환경에서 2% 내외의 EVM 열화가 발생하게 되고 복잡한 회로 구성으로 크기, 비용 증가 및 에너지 효율이 저하가 가장 크게 발생하는 문제점이 있다. 심지어 하드웨어의 부담은 처리 대역폭 확장에 따라 증가한다.

두번째 방식은 무선중계기 출력 신호가 원신호보다 중계기의 지연특성만큼 지연되어 입력되는 현상을 이용한다. 단말기 모델의 기저대역에서 분석한 Cell 정보로부터 원신호와 피드백신호의 *RSRP*(Received Signal Reference Power)를 비교 함으로써 현재 격리도를 실시간으로 계산해 최적화 할 수 있다. 하지만, 중계기에 전용 단말기 모델을 장착해야 하기 때문에 비용의 상승 이외에도 단말의 인증이 필요하고, 지속적인 통신 비용이 지출되어야 하는 문제점을 가지고 있다.

세번째 방식은 추가되는 하드웨어의 양이 적고, 격리도의 정확한 측정이 가능하지만 설치 초기 또는 사

용자의 제어 시에만 격리도를 측정할 수 있고, 운영 중 환경변화를 능동적으로 감지해 조치할 수 없다는 단점이 있다. 또한, 격리도 측정을 위해 안테나를 통해 방사되는 기준 신호가 네트워크에 영향을 주지 않도록 하기 위해 적절한 주파수와 세기를 선택해야 한다.

네번째 방식은 추가되는 하드웨어가 적고, 실제 무선중계기 동작을 반영해 측정하기 때문에 정확한 이득설정이 가능하다는 장점이 있으나 마찬가지로 운영 중 환경변화를 감지할 수 없고, 발진 감지 과정에서 최소한 한차례 무선중계기를 완전 발진시켜야 하기 때문에 중단 전력증폭기의 부담이 증가하는 단점이 있다.

단일대역 무선중계기에 위 기술들을 적용했을 때 가격, 전력의 상승 및 동작주기를 Table 1에서 비교하였다. 다중대역 무선중계기에서 그 영향은 당연히 증가하게 되나, 구현 방법에 따라 반드시 대역 수에 곱셈으로 증가하는 것은 아니다.

위와 같은 이유가 피드백 발진 감지 및 최적화를 위한 범용적인 기술이 있음에도 소형/저가 장비에 적용하는 것에는 한계가 되어, 상대적으로 부담이 적은 기준 신호 측정 방식이나 발진점 확인 방식을 사용하고 있다. 하지만, 이 두 기술은 초기 설치 시 또는 정해진 측정 주기 외에 순간적인 환경 변화에 즉시 반응하지 못하기 때문에 지속적으로 환경이 변화되는 차량용에는 적용할 수 없고, 항상 고정되어 사용될 경우에도 일정한 품질을 기대할 수 없다.

Table 1. Existing technologies about feedback detection and control

	Method	Cost	Power Consumption	Response Time
1	DSP	> \$100	> 10W	Real Time
2	UE Modem	\$50 ~ \$150	2W ~ 3W	few seconds
3	Reference Tone	\$20 ~ \$40	< 1W	User control Time
4	Measuring Oscillation Point	< \$20	> 4 x Rating Power	User control Time

IV. 구현장비의 피드백 발진 감지 방법

구현 장비는 부품과 회로의 추가 없이 무선중계기에 사용되는 회로만을 이용해 피드백 발진을 감지하기 위한 소프트웨어적인 처리 방법을 사용하였다.

핵심 아이디어는 무선중계기에서 피드백발진이 발생할 때 발생하는 주파수 스펙트럼 상에서 신호 출력의 변동을 분석해 피드백발진의 수준을 판단할 수 있

다는 것이다. Fig. 4와 Fig. 5는 각각 피드백발진이 없을 때와 있을 때의 스펙트럼분석기¹⁾의 측정 결과로 피드백발진 시 출력의 변동이 발생하는 것을 알 수 있으며, 파형 변동은 피드백발진이 커질수록 심해진다. 스펙트럼 측정 그래프에서 x축은 주파수, y축은 신호 세기를 나타낸다.

이러한 출력 변동을 왜곡 없이 감지하기 위해 출력 감지회로는 반드시 피크 감지 방식으로 구현되어야 한다. RMS 감지기는 저주파여파기로 전압을 평균하기 때문에 시간에 따른 출력 변화를 감지할 수 없다.

구현 장비는 Analog Device 사의 HMC1020LP4를 사용하였으며, Fig.6의 회로에서 감지기 출력에서 총방전을 통해 전압을 평활하는 캐패시터인 C102를 제거해 피크 감지기로 설계하였다.

Fig.7과 Fig.8은 대역폭 20MHz의 LTE 신호 입력 시 오실로스코프를 이용해 RMS 감지기의 출력과 피크 감지기의 출력 전압을 각각 보여준다. 측정 Graph에서 x축은 시간, y축은 전압으로, 두 측정 결과를 보면, 피크 감지기가 신호의 변화에 따른 출력 전압의 변동을 정확하게 반영하는 것을 알 수 있다.

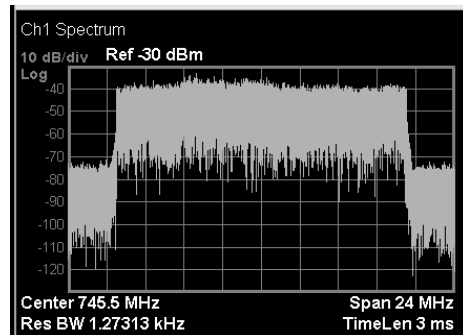


Fig. 4. Spectrum waveform - Static

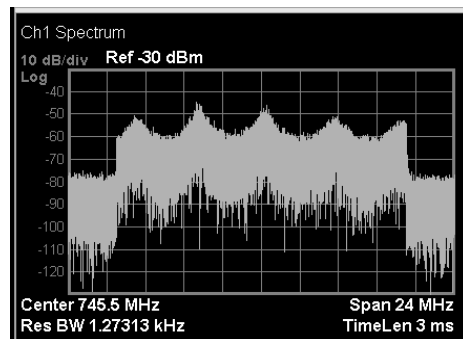


Fig. 5. Spectrum waveform - Oscillation

1) N9020A, Key Sight

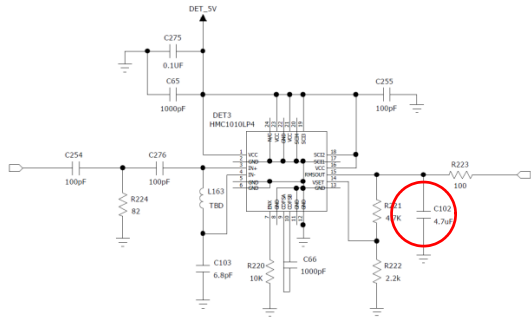
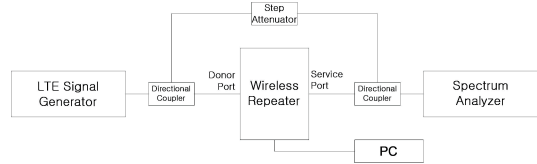


Fig. 6. RF Power Detector Circuit

구현 장비는 귀환 신호의 SINR 영향 증가에 따른 감지기 출력 편차를 정확하게 수치화 하기 위해 1회 감지 Task 동안 1000회의 표본을 추출하고, 그로부터 얻어진 표준 편차와 RMS 값을 각각 계산한다. 이 중 RMS 값은 사용자접속화면에서 출력 표시 및 출력 설정을 위한 값으로 활용하며, 표준편차 값은 피드백 발진의 발생 여부를 판단하는 기준 값으로 사용한다.

Fig. 9에 무선중계기의 귀환신호 증가에 따른 표준 편차 값과 EVM 성능의 상관관계를 시험하기 위한 시험구성과와 시험 과정을 설명하였으며, [표 2]에 안테나 격리도 변화에 따라 계산을 통해 얻어진 표준편차 값과 EVM 값을 정리하였다.

시험 결과 출력감지기 전압의 표준편차가 피드백 발진에 비례하며, 이를 통해 피드백 발진을 감지 할



- Input Signal: 745.5MHz, 20MHz BW
- Repeater Gain: Activate Automatic Gain Control Function
- Control the step attenuator to change the antenna isolation. Measure Average/Maximum/Minimum/Standard Deviation Value every Isolation condition

Fig. 9. Test Configuration

Table 2. EVM & Detector output test result

Repeater Gain [dB]	Antenna Isolation [dB]	EVM [%]	Detect Voltage			
			Average	Max	Min	Standard Deviation
47	70	2.5	1428	1356	1491	20
	60	3	1449	1387	1509	20
	52	6.4	1557	1485	1655	30
	51	8.1	1592	1515	1729	33
	50	11.7	1663	1543	1776	42
	49	15.7	1728	1592	1840	43

수 있다는 것이 증명되었다. Table 2에서 출력감지기 전압의 평균, 최대, 최소값의 상승은 피드백발진에 의한 출력의 변화에 기인하는 것으로 발진이 아닌 정상적인 출력 상승에도 동일한 결과로 나타나기에 피드백 발진 감지의 기준이 될 수 없다.

V. 귀환발진 제어

구현장비의 전체 블록도이다. 장비는 다중대역 차량용 중계기로 700MHz, 800MHz, 1900MHz, 2100MHz의 4개 주파수 대역을 서비스하는 장비로 Fig.10과 같다.

각 주파수별 Downlink 출력감지기에서 피드백 발진을 감지하면 발진상태 해소를 위해 해당 주파수의 디지털 감쇄기(PE4312, Peregrine)을 Fig.11의 순서에 따라 제어한다.

임계값은 피드백 발진에 따른 중계기 최적화 동작이 수행되는 임계값이며, Hysteresis는 피드백발진 상황 해소 시 중계기 상태를 이전상태로 복귀하는 동작의 기준점이다. Threshold 값은 Fig. 9의 시험을 통해 해당 조건에서 표준편차를 측정해 얻어진다.

구현 장비는 낮은 속도에서 데이터통신과 VoLTE 서비스를 수용하고, UL 네트워크에 심각한 영향을 방지하기 위한 기준으로 EVM 10%를 관리 목표로 설정하였으며, 이 때 반영된 Threshold 와 Hysteresis 값은

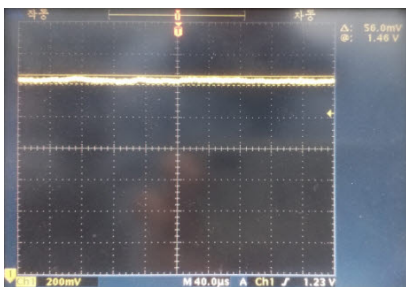


Fig. 7. Output Variation - RMS Detector

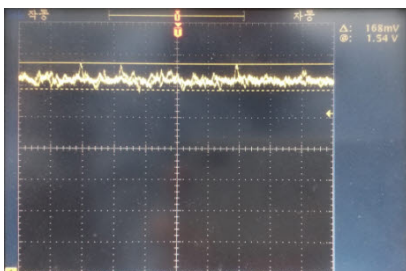


Fig. 8. Output Variation - Peak Detector

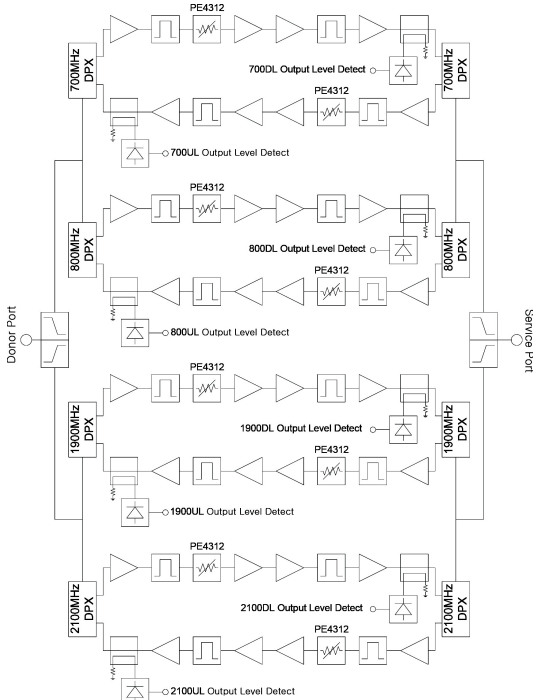


Fig. 10. Block Diagram of implementation equipment

각각 40과 20이다.

표준편차 값을 반영한 최적화 동작과 별개로 증계기 출력이 정격최대값보다 6dB 이상 높을 경우 회로 보호를 위한 동작차단 기능이 동작하며, 발진 제어 동작 중의 카운터는 짧은 주기의 발진이 반복될 때 빈번하게 발진과 안정화가 반복되지 않도록 하기 위한 동작안정화 여유시간이다.

VI. 시험결과

구현장비를 이용해 제시한 기술을 적용하지 않은 상태와 기술을 적용한 상태에서 안테나간 격리도 변화에 따른 무선신호 품질을 측정된 결과를 Table 3에 비교하였다. 시험 결과로부터 기능의 적용 시 안테나 격리도 감소에도 EVM 열화도가 구현장비의 성능관리 목표인 10% 이내를 만족하는 것을 확인하였다. Fig.12와 Fig.13은 각각 기술 미 적용 조건에서 50dB 격리도에서 EVM 측정 결과와 기술이 적용된 조건에서 40dB 격리도에서 EVM 측정 결과이다.

Fig.14는 제작된 구현장비의 사진이다. 회로를 감싸는 기구는 주파수간 간섭을 방지하고, 회로 내에서 간섭에 의한 발진 발생을 막기 위한 차폐 용도로 사용되었다.

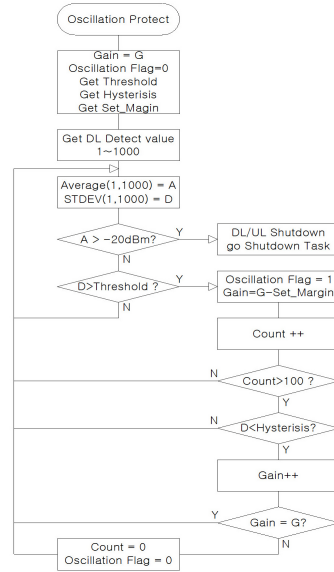


Fig. 11. Operating procedure of feedback detection & Control

Table 3. EVM Test Result before & after function implement

Antenna Isolation [dB]	Measurement value without function		Measurement value with function	
	Gain [dB]	EMV [%]	Gain [dB]	EMV [%]
70	47	2.33	47	2.33
65	47	2.41	47	2.37
60	47	2.68	47	2.62
55	44	3.65	42	3.63
50	43	22.45	37	4.27
45	40	Uable to Measure	32	5.6
40	35	Uable to Measure	27	7.28

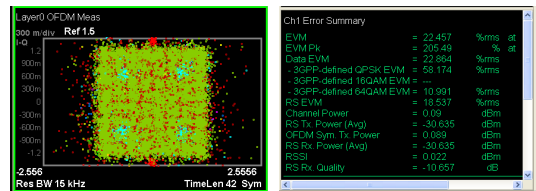


Fig. 12. Before implement function - 50dB Isolation

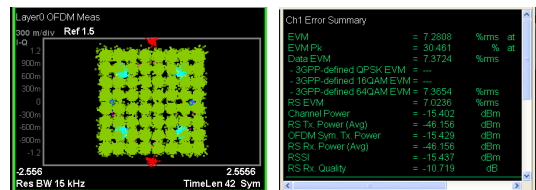


Fig. 13. After implement function - 40dB Isolation

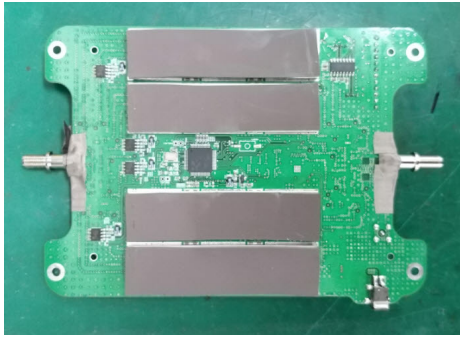


Fig. 14. Implementation equipment

VII. 결 론

무선중계기에서 안테나간 격리도 부족에 의한 피드백 발진 및 신호 품질의 열화는 매우 중요한 문제로 이와 관련해 이미 다양한 기술이 소개되고 사용되고 있다. 그 중 고급 기술은 본 논문에서 제안하는 기술보다 더 정확하고 세밀한 동작이 가능한 것이 사실이다. 그러나 경제적 관점에서 차량용 또는 개인용과 같은 소형 장비에 이러한 기술을 적용하는 것은 현실적이지 못하고, 경제적 측면에서 적용이 가능한 저가 기술은 운영 중 환경 변화에 즉시 대응할 수 없다는 한계가 있다.

본 논문은 무선중계기에서 크기와 비용의 상승이 없이 실시간으로 동작하는 피드백 발진 감지 방법과 피드백 발진 감지 후 동작 최적화 절차를 소개하고 실제 구현을 통해 검증하였다. 제안 방법은 이후 차량용/개인용 무선 중계기의 사용 시 네트워크 영향을 방지하고 개선된 서비스 품질을 유지하기 위한 방법 중 하나가 될 수 있을 것이다.

Reference

- [1] M. Lee, B. Keum, H. S. Lee, and J.-W. Kim, "A radio repeater interference cancellation model for mobile communication systems," *4th Int. Conf. Wireless and Mob. Commun.*, Athens, Greece, pp. 376-381, 2008.
- [2] ETSI TR 125.956 V6.0.0 - 5.1.1 Antenna Isolation
- [3] R. A. Shafik, Md. S. Rahman, and AHM R. Islam, "On the extended relationships among EVM, BER and SNR as Performance metrics," *4th Int. Conf. Electrical and*

Computer Eng. ICECE, Dhaka, Bangladesh, pp. 408-411, 2006.

- [4] *An Assessment of the Effects of Repeaters on Mobile Networks*, Consulting Technology Innovation, pp. 5-11, 2015
- [5] Y.-J. Lee, "Performance enhancement of the feedback interference canceller for the EDOCR in the ATSC DTV System," *J. KICS*, vol. 38A, no. 11, pp. 955-966, 2013.
- [6] B. Subasic and F. Franovici, "Isolation measurement and self-oscillation prevention in TDD-OFDM repeater for wireless broadband distribution to shadowed areas," US Patent US20090285147A1].

박 덕 영 (Duckyoung Park)



1996년 2월: 광운대학교 전자공학과 졸업
 2014년 8월: 광운대학교 전파공학과 석사
 2015년 3월~현재: 연세대학교 공대 국방융합공학과 박사과정

<관심분야> 전자공학, 이동통신
 [ORCID:0000-0003-4894-8004]

이 재 용 (Jaiyong Lee)



1977년 2월: 연세대학교 전자공학과 졸업
 1984년 5월: 미국 Iowa State University 컴퓨터공학과 석사
 1987년 5월: 미국 Iowa State University 컴퓨터 공학과 박사

2016년 2월: 연세대학교 교학 부총장
 <관심분야> IoT, 미래네트워크 기술, 네트워크 관리
 [ORCID:0000-0001-6359-6903]