

UHF RFID 시스템의 순방향 및 역방향 인식 거리에 관한 연구

A Study on the Forward- and Reverse-Link Interrogation Range of a UHF RFID System

장병준 · 박준석 · 조홍구 · 임재봉

Byung-Jun Jang · Jun-Seok Park · Hong-Gu Cho · Jae-Bong Lim

요 약

최근 UHF 대역에서 동작하는 RFID 시스템이 활발히 연구되고 있으며, 유통 물류 분야를 시작으로 다양한 분야에서 활용되고 있다. UHF RFID 시스템을 설계하는데 있어 가장 중요한 파라미터가 리더가 태그를 인식할 수 있는 최대 거리로, 이를 인식 거리라 부른다. 인식 거리는 순방향에서는 태그에 전력이 공급되어 역산란할 수 있는 전력이 공급되는지 여부와 역방향에서는 태그에서 역산란된 전력을 리더가 수신할 수 있는지에 따라 결정되며, 두 인식 거리 간에 적절한 밸런스가 중요하다. 본 연구에서는 UHF RFID 시스템의 인식 거리에 대한 공식을 순방향과 역방향에 대해 각각 유도하고, 이를 바탕으로 순방향 및 역방향 간의 링크 밸런스를 맞추기 위한 조건을 고찰하였다. 분석 결과, 역방향 링크의 경우, 안테나 이득, circulator의 isolation 특성, 국부 발진기의 위상 잡음에서의 range correlation 효과 등이 인식 거리를 결정하는 주요한 파라미터가 됨을 확인할 수 있었다.

Abstract

Recently UHF RFID system has drawn a great deal of attention because of its potential to revolutionize supply chain management. An important characterization of the performance of a RFID system is 'interrogation range', which is defined as the maximum distance between a reader and a tag. Forward-link interrogation range is defined as the maximum distance from which the tag receives just enough power to turn on and back-scatter, and reverse-link interrogation range is the maximum distance from which the reader can detect this back-scattered signal. A link balance has to be found between the two interrogation ranges. In this paper, the interrogation range equations are formulated in both forward-link and reverse-link and a trade-off between the two values is investigated in order to maximize the interrogation range. As a result, it is observed that the gain of the reader antenna, the isolation of the circulator, and the phase noise of the local oscillator with range correlation effect mainly determine the reverse-link interrogation range.

Key words : UHF RFID, Gen. 2 Specification, Interrogation Range, Reader, Tag, Forward-Link, Reverse-Link

I. 서 론

최근에 전세계적으로 UHF 대역의 RFID 기술에 대한 관심이 증가하면서 유통 물류 분야를 시작으로 국방, 환경, 의료, 항공, IT 등 다양한 분야에 RFID 기술을 적용하려는 연구가 활발히 전개되고 있다.

UHF RFID 시스템은 기존의 저주파 RFID 시스템에 비하여 긴 인식 거리와 저렴한 tag 비용의 장점으로 전세계적으로 유통, 물류 등의 용도에 가장 적합하다고 평가되고 있다. 특히 Wal-Mart와 Tesco와 같은 대형 유통회사에서는 2005년부터 RFID 보급을 가시화하고 있고, 같은 해에 EPCglobal class 1 generation

「본 연구는 2007년도 국민대학교 교내연구비를 지원받아 수행된 연구임을 밝힙니다.」

국민대학교 전자공학부(Department of Electronics Engineering, Kookmin University)

· 논문 번호 : 20070827-089

· 수정완료일자 : 2007년 10월 17일

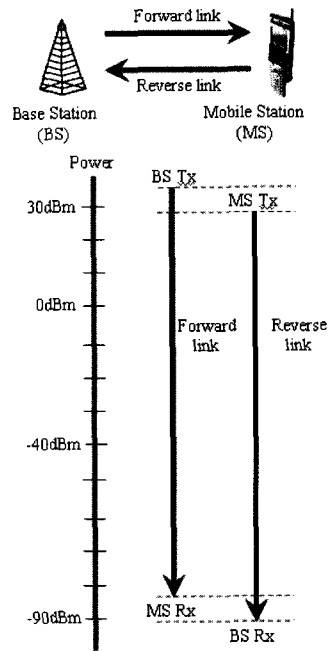
2(EPCglobal C1G2, 이하 Gen. 2) 규격이 ISO 18000-6 Type C로 국제 규격화되면서 전세계 단일 표준의 RFID 규격이 도입되어 RFID 서비스의 확대가 가속화되고 있다^{[1]~[2]}.

RFID 시스템은 원하는 정보를 얻기 위한 리더와 고유한 정보를 저장하고 있는 태그로 구성되고, 정보의 전송 방향에 따라 그림 1에 나타낸 바와 같이 순방향과 역방향 링크로 구분된다. 여기서 순방향 링크는 리더가 태그로부터 원하는 정보를 얻기 위해 수행하는 모든 준비 과정으로, 명령 신호 및 태그의 전원을 공급하는 CW(Continuous Wave) 신호의 송신 과정에 해당한다. 역방향 링크는 태그가 리더로부터 수신한 CW 신호를 바탕으로 역산란 과정을 거쳐 리더의 수신부에 태그 신호가 도달할 때까지의 과정을 의미한다.

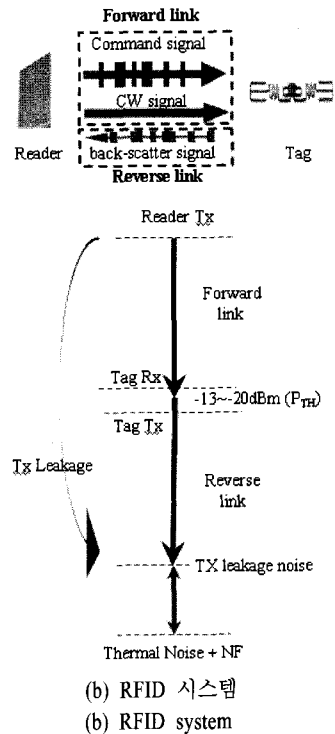
UHF RFID 시스템을 설계하는데 있어 가장 중요한 파라미터의 리더가 태그를 인식할 수 있는 최대 거리로, 이를 인식 거리(interrogation range)라고 부른다. 인식 거리는 크게 리더에서 태그까지의 순방향 인식 거리(forward-link interrogation range)와 태그에서 리더까지의 역방향 인식 거리(reverse-link interrogation range)로 분류할 수 있으며, UHF RFID 시스템의 인식 거리는 순방향 인식 거리와 역방향 인식 거리 중 작은 값에 의해 결정된다. 순방향 인식 거리는 리더의 송신 신호로부터 태그가 전력을 공급 받아 역산란할 수 있는 최대 거리를 의미하여, 역방향 인식 거리는 태그의 역산란된 신호를 리더가 복조할 수 있는 최대 거리를 의미한다. 이상의 개념을 일반 무선 통신 시스템과 비교하여 그림 1에 나타내었다.

일반 무선 통신의 경우, 순방향과 역방향 간의 전력 레벨은 약간의 차이를 제외하고는 유사하여 순방향 및 역방향의 통신 거리는 동일하지만, RFID 시스템의 경우 순방향과 역방향 간에는 전력 레벨의 차이뿐만 아니라 그 동작 범위가 차이가 남을 알 수 있다. 또한, 일반적인 무선 통신의 링크에서는 열잡음(thermal noise) 전력을 최소 기준으로 하는데 비하여 RFID 시스템의 순방향에서는 태그가 동작하기 위한 최소 입력 레벨(threshold power, P_{TH})을, 역방향에서는 리더의 누설 전력이 기준이 되는 특성을 갖는다.

일반적으로 송수신 분리된 지향성 안테나를 사용하고 RF 회로의 잡음지수 및 위상 잡음 특성이 우수



(a) 일반적인 무선 통신 시스템
(a) Typical wireless communication system



(b) RFID 시스템
(b) RFID system

그림 1. 일반적인 통신 시스템과 RFID 시스템과의 링크 특성 비교
Fig. 1. Comparison between typical wireless communication system and RFID system.

한 고정형 RFID 리더의 경우 순방향 인식 거리가 역방향 인식 거리보다 작으므로 현재까지 인식 거리와 관련된 연구 내용은 주로 순방향 링크에 집중되어 왔다^{[3]~[5]}. 예를 들어 참고문헌 [3]에서는 태그 측면에서 전력 효율과 역산란 효율을 ASK(Amplitude Shift Keying) 변조와 PSK(Phase Shift Keying) 변조에 따라서 분석하여 순방향 인식 거리를 계산하였으며, 참고문헌 [4]에서는 안테나 종류에 따른 순방향 인식 거리를 계산하였다.

하지만 리더기의 RF 특성이 완벽하지 않은 경우나 외부에 리더간 간섭이 있는 경우, 역방향 인식 거리가 순방향 인식 거리보다 작은 경우가 발생하므로, UHF RFID 시스템을 설치할 때 두 가지 경우 모두에 대한 정확한 특성 이해가 필수적이다^{[6]~[9]}. 역방향 인식 거리에 대한 현재까지 연구결과를 살펴보면, 참고문헌 [6]의 경우 역방향 링크에서 인식 거리를 에러 확률(bit error rate) 측면에서 언급하였으나, 인식 거리에 대한 분석이 없이 역방향 링크 조건하에서 태그의 입력 임피던스 값만을 제시하고 있으며, 참고문헌 [7]에 역방향 인식 거리를 계산하는 방법을 제시하였으나, 태그의 송신 신호와 위상 잡음에 대한 정확한 수식 유도가 없이 실험 및 시뮬레이션을 통해 분석하여 정확한 이론적 근거를 예측하기 어려운 상황이다.

따라서, 본 논문에서는 UHF RFID 시스템의 순방향 링크뿐만 아니라 역방향 링크 특성을 분석하고, 각각의 경우 인식 거리에 대한 정확한 공식을 유도하였으며, 이를 통해, 순방향 및 역방향 인식 거리를 최대로 하기 위한 다양한 시스템 파라미터를 고찰하였다. 또한, 본 논문에서 유도한 인식 거리에 대한 식의 타당성을 입증하기 위하여 UHF RFID Gen. 2 규격을 바탕으로 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 순방향 및 역방향 인식 거리를 유도하기 위해 UHF RFID 리더의 주요 특성을 설명하고, 이를 통해 인식 거리에 대한 식을 유도한다. 3장에서는 유도된 식을 바탕으로 다양한 환경에서 순방향 링크와 역방향 링크의 인식 거리를 계산하고, 이를 시뮬레이션 결과와 비교하여 유도된 식의 타당성을 확인하고, 마지막으로 4장에서 결론을 맺었다.

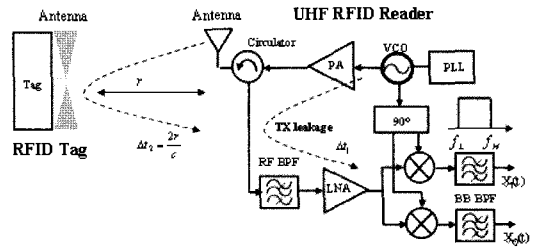


그림 2. UHF RFID 시스템의 구조 및 리더와 태그의 블록도

Fig. 2. Architecture of a UHF RFID system and a block diagram of a reader and a tag.

II. RFID 시스템 모델링

UHF RFID 시스템의 순방향 및 역방향 링크 특성을 모델링 하기 위하여 그림 2와 같이 하나의 리더와 하나의 태그로 구성된 시스템을 고려한다. 여기서 태그는 태그 칩과 안테나로 구성되며, 태그 칩은 태그가 붙은 사물의 정보에 해당되는 고유한 코드를 저장하고 있으며, 별도의 전원 장치를 포함하고 있지 않다. 따라서 리더로부터 송신된 RF 신호의 일부를 DC 전력으로 변환하여 사용하게 되고, 일부는 역산란(backscattering)을 통하여 리더로 반사시킨다. 역산란되는 신호는 태그의 입력 임피던스를 변화시켜 발생되는데, 일반적으로 두 개의 상태 중 하나가 되며, 실수값을 가변시키는 경우, ASK, 허수값을 가변시키는 경우 PSK 신호가 된다. Gen. 2 규격에 따르면, 태그의 경우 ASK 또는 PSK를 선택할 수 있으며, 리더의 경우 ASK와 PSK 모두를 복조할 수 있어야 한다고 명시되어 있다^[10].

리더의 구성은 그림 2와 같이 국부 발진기(LO: local oscillator), 송신기, 수신기, 송수신 안테나 및 circulator로 구성되어 있다. Circulator의 경우, 방향성 결합기(directional coupler)로 구성되기도 하는데, 주요 역할은 송신기로부터의 신호를 안테나로 전달하는 반면에 안테나로부터 수신된 전력은 수신기로 전달하는 역할을 한다. LO의 경우, 동일한 주파수의 정현파(CW: Continuous Wave) 신호를 송신기로 보내는 한편, 동일한 신호를 태그에서 역산란된 신호를 가져다역 신호로 주파수 변환하는데 사용한다. 또한, 송신과 수신을 분리하기 위한 circulator의 사용을 피

하기 위하여 두 개의 안테나를 사용하는 경우도 있는데, 안테나 사이의 상호 결합이 존재하므로 개념적으로는 동일하게 모델링할 수 있다.

2-1 RFID 신호 정의

먼저, 리더 안테나와 태그 안테나는 동일한 편파를 사용한다고 가정하고, 두 안테나 사이의 거리를 r 이라고 하면, Friis의 자유공간 손실 공식에 의해 태그 안테나에 수신되는 전력은 다음과 같이 주어진다^[11].

$$P_{RX}(x) = \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 P_{TX} G_T G_R \quad (1)$$

여기에서, λ 는 파장, P_{TX} 는 리더의 송신 전력, G_T 와 G_R 은 각각 리더 안테나와 태그 안테나의 이득을 나타낸다. 태그의 동작 상태는 태그가 리더의 command 신호를 받는 구간과 리더로부터 CW 신호를 받아 역산란되는 구간으로 나뉘어지는데, 역산란되는 구간에서는 태그의 동작 및 역산란 과정이 동시에 진행되므로 태그에 입력되는 소비 전력이 작아지므로 인식 거리가 짧아진다. 따라서 본 논문에서는 역산란되는 구간에서의 인식 거리만을 고려한다. 역산란되는 신호는 사용하는 변조 방식에 따라 ASK와 PSK로 나뉠 수 있으며, 각각의 경우 수신 전력과 역산란되는 전력의 비는 변조지수와 밀접하게 관련된다.

이제, 리더 측면에서 살펴보면, 리더 안테나에 수신되는 신호는 그림 2에서처럼 태그로부터 역산란된 신호와 circulator의 송수신 격리 특성에 따른 누설 전력 신호로 나눌 수 있다.

먼저, 수신기에서 주파수 변환을 위해 사용되는 LO 신호는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$X_{LO}(t) = A_{LO} \cos\{\omega t + \theta_{LO}(t)\} \quad (2)$$

여기에서, ω 는 각주파수, $\theta_{LO}(t)$ 는 LO의 위상 잡음에 해당된다. 태그로부터 역산란된 신호 $X_M(t)$ 는 리더와 태그 사이의 전파의 왕복 지연 시간(round-trip delay)을 Δt_1 이라고 하면 태그가 ASK 변조를 하는 경우 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$X_M(t) = A_M s(t) \cos\{\omega(t - \Delta t_1) + \theta_{LO}(t - \Delta t_1)\} \quad (3)$$

여기에서 $s(t)$ 는 tag의 이진 데이터로 “0”이 “1”에 해당되며, A_M 은 태그로부터 수신되는 신호의 크기로 Friis 공식을 이용하여 전압으로 변환하면 다음과 같다.

$$A_M = \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \sqrt{2R_0 P_{TX} m G_T G_R} \quad (4)$$

여기에서, m 은 태그의 변조지수에 해당하며, R_0 는 수신단의 입력 임피던스이다.

다음으로, 주변 장애물에 반사되는 신호 및 누설 전력 등의 합은 무변조 정현파 신호 $X_U(t)$ 이며, 이 중에서 누설 전력의 양이 가장 크므로 다른 신호들을 무시하면, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$X_U(t) = A_U \cos\{\omega(t - \Delta t_2) + \theta_{LO}(t - \Delta t_2)\} \quad (5)$$

여기에서, 누설 전력과 LO 신호와의 시간차는 Δt_2 이고, A_U 는 누설 전력에 의한 무변조 반송파의 크기로서 다음과 같이 주어진다.

$$A_U = \sqrt{2\eta R_0 P_{TX}} \quad (6)$$

실제 circulator의 경우, 송신부 및 수신부를 이상적으로 분리할 수 없으므로 리더의 누설 전력을 η 로 정의하였다. 따라서 η 는 circulator의 isolation 값의 역수에 해당한다.

2-2 순방향 인식 거리(Forward-Link Interrogation Range)

2-1절의 신호에 대한 정의를 바탕으로 순방향과 역방향에서의 인식 거리를 유도할 수 있다. 본 절에서는 먼저 순방향 인식 거리를 유도한다. 순방향 인식 거리는 태그 안테나에 도달하는 수신 레벨이 태그가 동작 가능한 최소 입력 전력에 해당하는 거리로 정의할 수 있다. 직관적으로 리더의 송신 전력 P_{TX} 에 비례하여 태그의 수신 전력은 증대하나, 리더의 송신 전력은 각국의 기술 기준에 의해 제한되게 된다. ASK의 경우를 가정하면 순방향에서의 인식 거리는 참고문헌 [3]의 식 (26)을 사용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{1-m^4}{(m+1)^2} P_{TX} G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \geq P_{TH} \quad (7)$$

여기에서 P_{TH} 는 태그가 동작하기 위한 최소 입력 레벨로서 태그 제작 방법에 따라 차이가 있으나, 일반적으로 -13 dBm에서 -20 dBm 정도의 값을 갖는다. 이제 순방향 인식 거리 $r_{forward}$ 는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$r_{forward} = \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right) \sqrt{\frac{P_{TX} G_T G}{P_{TH}} \cdot \frac{1-m^4}{(m+1)^2}} \quad (8)$$

마찬가지로, PSK의 경우 순방향에서의 인식 거리는 참고문헌 [3]의 식 (17)을 사용하여 정의할 수 있다.

2-3 역방향 인식 거리(Reverse-Link Interrogation Range)

역방향에서의 인식 거리는 리더 수신부의 SNR 개념을 바탕으로 유도된다. 먼저 문제를 간단히 하기 위하여 기저 대역 수신부 필터가 저주파 차단 주파수 f_L 과 고주파 차단 주파수 f_H 사이에 평탄한 특성을 갖고 그 외 대역에서는 영인 이상적인 필터라고 가정하면, 직접 변환된 기저 대역 신호 $X_I(t)$ 및 $X_Q(t)$ 는 태그 신호, 누설 전력 및 수신부 잡음을 고려하여 다음과 같이 표현된다.

$$X_I(t) = G_{rx} A_{LO} [A_U \cos\{\omega\Delta t_2 + \Delta\theta_2(t)\} + A_M s(t) \cos\{\omega\Delta t_1 + \Delta\theta_1(t)\}] + n_0(t) \quad (9a)$$

$$X_Q(t) = G_{rx} A_{LO} [A_U \sin\{\omega\Delta t_2 + \Delta\theta_2(t)\} + A_M s(t) \sin\{\omega\Delta t_1 + \Delta\theta_1(t)\}] + n_0(t) \quad (9b)$$

여기에서, $\Delta\theta_1(t)$ 와 $\Delta\theta_2(t)$ 는 residual phase error로 각각 식 (10a)와 식 (10b)와 같이 표현되며, $X_{LO}(t)$ 와 $X_U(t)$ 및 $X_M(t)$ 는 동일한 LO를 사용하기 때문에 위상 잡음은 시간 지연 차이만을 갖는 동일한 랜덤 프로세스가 된다.

$$\Delta\theta_1(t) = \theta_{LO}(t) - \theta_{LO}(t - \Delta t_1) \quad (10a)$$

$$\Delta\theta_2(t) = \theta_{LO}(t) - \theta_{LO}(t - \Delta t_2) \quad (10b)$$

식 (9)에서 $n_0(t)$ 는 수신부 내부에서 열잡음을 나타낸 것으로 수신부의 잡음 지수도 포함한 값이며, G_{rx} 는 수신부의 저잡음 증폭기, 주파수 혼합기 및

기저 대역 필터를 포함한 수신부 전체의 이득을 의미한다.

이제 식 (9)의 첫 번째 항과 마지막 항은 잡음에 해당하며, 두 번째 항은 신호에 해당되므로, 이를 통해 기저 대역에서의 신호대 잡음비(SNR: Signal to Noise Ratio)를 계산할 수 있다. 본 논문에서는 위상 잡음 효과 및 수신 신호의 통계적인 특성을 이용하기 위하여 식 (11a) 및 (11b)와 같이 주파수 영역에서의 적분을 통하여 SNR을 표현하였다^[7]. 이때 역산란된 신호와 열잡음은 TX leakage에 의한 잡음보다 크기가 작으므로 역산란된 신호에서의 위상 잡음과 열잡음의 영향은 고려하지 않았다.

$$SNR_I \approx \frac{\int_{f_L}^{f_H} \Phi\{A_M s(t) \cos[\omega\Delta t_1]\} df}{\int_{f_L}^{f_H} \Phi\{A_U \cos[\omega\Delta t_2 + \Delta\theta_2(t)]\} df} \quad (11a)$$

$$SNR_Q \approx \frac{\int_{f_L}^{f_H} \Phi\{A_M s(t) \sin[\omega\Delta t_1]\} df}{\int_{f_L}^{f_H} \Phi\{A_U \sin[\omega\Delta t_2 + \Delta\theta_2(t)]\} df} \quad (11b)$$

여기에서 $\Phi\{\}$ 는 랜덤 프로세스의 전력 밀도 스펙트럼으로 랜덤 프로세스의 자기 상관 함수의 Fourier 변환 값을 의미한다. 식에서 알 수 있듯이 SNR 값은 Δt_1 과 Δt_2 의 값에 따라 다양한 값을 가질 수 있다.

본 논문에서는 SNR값이 최소가 되는 거리를 역방향 인식 거리로 정의하기로 하고, 식 (11)에서 SNR값이 최소가 되는 경우를 살펴보면 다음과 같다. 먼저, RFID에서는 직접 변환 방식을 사용하므로 식 (11)의 분모는 동시에 최대가 될 수 없으며, $\omega\Delta t_1$ 이 π 의 정수배가 되면 SNR_I 가 최대가 되고, $\omega\Delta t_1$ 가 $\pi/2$ 의 홀수 배가 되면 SNR_Q 가 최대가 된다. 따라서, RFID 리더기의 복조기가 I와 Q 채널의 최대 값을 선택한다고 가정하면, 식 (11)에서 분자의 값이 최소가 되는 지점은 $\omega\Delta t_1$ 가 $\pi/4$ 가 되는 경우이다. 마찬가지로 SNR 값이 최소가 되기 위해서는 분모에서 누설 전력에 의한 잡음이 최대가 되어야 하므로 식 (11a)에서는 $\omega\Delta t_2$ 가 $\pi/2$ 의 홀수 배가 되거나, 식 (11b)에서 $\omega\Delta t_2$ 가 π 의 정수 배가 되는 경우이다. 이상의 두 가지 조건이 성립하는 경우, 리더 복조기의 SNR이 최소값이 된다. 이제 이 2가지 경우를

가정하여 최소 SNR(SNR_{MIN})값을 정리하면 다음과 같다^[9].

$$SNR_{MIN} \approx \left(\frac{A_M}{A_U} \right)^2 \frac{\int_{f_L}^{f_H} \Phi\{s(t) \cos(\pi/4)\}df}{\int_{f_L}^{f_H} \Phi\{\Delta\theta_2(t)\}df} \quad (12)$$

이제 식 (4)와 (6)을 식 (12)에 대입시키고, 역방향 인식 거리에 대해 정리하면 다음과 같이 역방향 링크에서의 인식 거리 $r_{reverse}$ 는 다음과 같이 유도된다.

$$r_{reverse} \approx \frac{\lambda}{4\pi} \left(\frac{m^2 G_T^2 G_R^2 \int_{f_L}^{f_H} \Phi\{s(t) \cos(\pi/4)\}df}{\eta SNR_{min} \int_{f_L}^{f_H} \Phi\{\Delta\theta_2(t)\}df} \right)^{1/4} \quad (13)$$

식 (13)에서 residual phase error $\Delta\theta_2(t)$ 는 Δt_2 에 따라, 즉 시간차가 가까울수록 상관 특성이 있게 되는데, 이를 레이더 응용에서는 range correlation 효과라고 부른다. Range correlation 효과에 의해 식 (12)와 식 (13)의 분모의 값은 다음과 같은 주파수 스펙트럼을 갖게 된다^{[12],[13]}.

$$\begin{aligned} \Phi\{\Delta\theta_2(t)\} &= \Phi\{\Delta\theta_{LO}(t) - \theta_{LO}(t - \Delta t_2)\} \\ &= \Phi\{\theta_{LO}(t)\} \cdot 4 \sin^2(2\pi\Delta t_2 \Delta f_c) \end{aligned} \quad (14)$$

여기에서, Δf_c 는 offset 주파수를 나타내며, Δt_2 는 LO신호와 TX 누설 신호간에 회로 지연 시간을 나타낸다. 식 (14)를 통해 RFID 역방향 링크에서는 range correlation 값에 의해 위상 잡음이 대폭 감소될 수 있음을 알 수 있다.

III. 분석 및 결과

본 장에서는 2장에서 유도한 순방향 및 역방향에서의 인식 거리에 대한 식을 다양한 조건 하에서 계산하고, 각각의 주요 특성을 분석하고자 한다. 먼저 시뮬레이션 파라미터를 기술하고, 식 (13)의 적분에 포함되는 태그 신호와 누설전력의 위상 잡음에 대한 PSD 결과를 통해 본 논문의 가정이 타당함을 설명한 다음, 순방향 인식 거리와 역방향 인식 거리를 시뮬레이션 하여 그 특성을 고찰한다.

표 1. 인식 거리 계산을 위한 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters to calculate interrogation range.

Parameters	Values
Center frequency	915 MHz
Transmit EIRP($P_{TX}G_T$)	4 W
Target SNR(BER 10^{-5})	11.6 dB
Tag's power reflection coefficient(m)	0.5
FM0 data rate	160 kbps
Tag antenna gain(G_R)	2.15 dBi
Filter low-end cutoff frequency(f_L)	10 kHz
Filter high-end cutoff frequency(f_H)	320 kHz
Tag threshold level(P_{TH})	-15 dBm

3-1 시뮬레이션 파라미터

앞에서 유도한 순방향과 역방향 인식 거리를 분석하기 위하여 표 1과 같이 시뮬레이션 파라미터를 선정하였다. 시뮬레이션 환경은 MATLAB을 이용하였으며, 주요 파라미터는 미국 ISM 대역을 기준으로 선정하였다. 역방향 인식 거리 계산시 수신부의 Target SNR 값은 10^{-5} 에러 확률을 기준으로 11.6 dB로 결정하였다^[8].

3-2 태그 신호와 위상 잡음의 PSD 계산

앞에서 유도한 역방향 인식 거리를 계산하기 위해서는 먼저 태그에서 역산란하는 신호의 PSD와 range correlation 효과를 고려한 리더의 누설 전력의 위상 잡음에 대한 PSD를 계산하여야 한다.

Gen. 2 규격에 의하면, 태그 신호는 FM0 신호 혹은 Miller 신호이므로 이에 대한 분석이 필요하다. 밀집 모드가 아닌 일반적인 tag의 경우 FM0 신호를 주로 사용하므로, 참고문헌 [14]의 메모리가 있는 코딩 이론을 응용하여 FM0 신호의 PSD를 이론적으로 유도하면 다음 식 (15)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi\{s(t)\} &= \frac{T \text{sinc}^2(\varphi)}{2} (1 - 2 \cos 2\varphi) + T \text{sinc}^2(\varphi/2) \\ &\cdot \left\{ \frac{1}{4} (1 + \cos 2\varphi)(1 - \cos \varphi) - \varphi^2 \text{sinc}^2(\varphi) \text{sinc}(2\varphi) \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

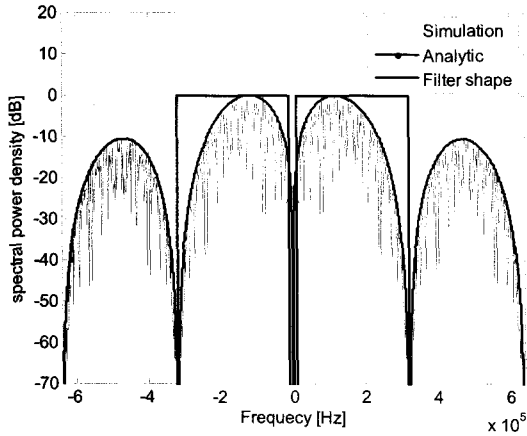


그림 3. FM0 신호의 PSD 및 기저 대역 필터 특성
Fig. 3. PSD of FM0 signal and characteristics of baseband BPFs.

여기에서, $\varphi = \pi f T$ 이며, T 는 심볼의 주기를 나타낸다.

그림 3은 식 (15)에서 유도된 FM0 신호의 PSD 신호와 FM0 신호를 MATLAB 시뮬레이터 상에 코딩한 후 Fourier 변환하여 구한 PSD를 비교한 결과를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 식 (15)가 FM0의 PSD를 정확히 표현하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림에서처럼 수신기의 대역 통과 필터의 특성은 PSD의 주엽(mainlobe)만을 이상적으로 필터링하여 적분하는 것으로 가정하고, DC 신호는 제거하는 것으로 가정하였다.

한편, 식 (12)와 식 (13)의 분모의 range correlation에 따른 위상 잡음 특성은 다음 그림 4를 참조하여 계산할 수 있다. 먼저 range correlation이 없는 경우, PLL에 의한 위상 잡음은 VCO의 위상 잡음, TCXO의 위상 잡음 및 PLL의 전달 함수의 곱에 의해 표현되며, 여기에 range correlation은 개념적으로 고역 통과 필터(HPF)의 효과를 갖는다. 그림 4에 일반적으로 UHF 대역에서 사용되는 전형적인 국부 발진기의 위상 잡음의 예를 보여준다. 시뮬레이션에 사용된 국부 발진기는 1 KHz까지는 -60 dBc/Hz의 일정한 값을 1 KHz부터는 log 함수적으로 감소하여 1 MHz에서는 -110 dBc/Hz의 위상 잡음을 갖는다고 가정하였다. 이는 일반적으로 UHF 대역에서 RFIC를 사용하여 구현할 수 있는 값이다. 식 (14)에 의해 위상 잡음 특성은 offset 주파수와 두 신호의 round trip delay에 의해 range correlation 효과를 갖게 되는데, 그

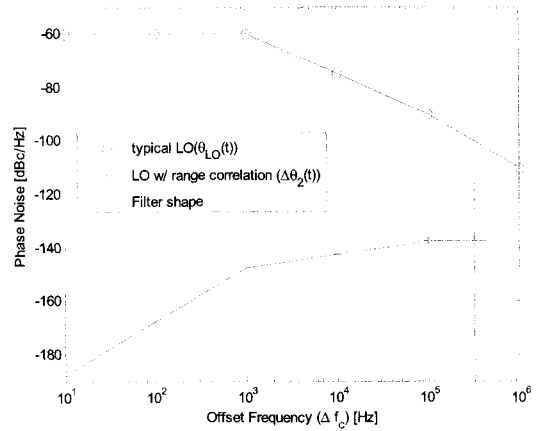


그림 4. Range correlation 효과에 의한 LO 신호의 PSD 비교

Fig. 4. PSD of local oscillator due to range correlation effects.

림 4는 round trip delay가 1 m라고 가정한 경우이다. 이 값은 리더마다 다르지만 연구진이 제작한 리더를 측정된 결과 1 m 이내의 값이 측정됨을 확인하였다. 이 경우, 10 Hz offset 주파수에서는 130 dB의 효과를 가지며, 100 kHz offset 주파수에서는 50 dB의 위상 잡음 개선 효과를 나타냄을 알 수 있었다. 기본적으로 tag의 역산란 신호의 대역폭이 작을수록, 즉 데이터 전송 속도가 작을수록 range correlation 효과는 크게 나타나며, 대역폭이 클수록 효과는 감소함을 그림 4의 결과로부터 알 수 있다.

실제 위상 잡음의 영향은 그림 4의 PSD를 수신 대역폭만큼 적분한 값에 의해 나타나므로 그림 4의 이상적인 기저 대역 필터를 통과시키고, 통과 대역에 대해 적분하면 표 2와 같은 결과를 얻을 수 있다.

표 2는 range correlation이 있는 경우, TX leakage에 의한 위상 잡음 전력을 리더-태그 데이터율 및 열잡음 전력에 따라 비교한 결과이다. 적분 구간은 주엽만을 통과하는 이상적인 필터를 가정하여 계산하였고, TX leakage의 시간 지연은 1 m라고 가정하였다. 표에서 알 수 있듯이 range correlation에 의해 위상 잡음 전력의 감소 효과를 보이며, 이는 데이터율이 작을수록 커짐을 알 수 있다. 참고문헌 [7]의 실험에 의하면 160 kbps의 데이터율의 경우, range correlation에 의한 위상 잡음 감소 효과는 -41 dB로 측정되어 본 논문의 계산치와 1 dB의 오차 이내로 유사하므로

표 2. Range correlation 효과에 의한 위상 잡음 전력의 감소 효과 및 TX leakage 전력과 열잡음 전력의 비교(4 W EIRP 가정)

Table 2. Phase noise power reduction effects of LO due to range correlation effects and comparison between the thermal noise and TX leakage noise power(4 W EIRP).

Data rate [kbps]	Filter BW [kHz]	Thermal noise power [dBm]	Phase noise reduction by range correlation [dB]	TX leakage power [dBm]	
				30 dB isolation	50 dB isolation
40	10 ~ 80	-125.5	-57.3	-82.3	-102.3
80	10 ~ 160	-122.2	-46.4	-79.9	-99.9
160	10 ~ 320	-119.1	-42.0	-77.5	-97.5
320	10 ~ 640	-116.0	-36.3	-75.5	-95.5
640	10 ~ 1,280	-112.9	-30.0	-73.5	-93.5

본 논문의 결과가 타당함을 알 수 있다. 또한, 표에서 제시한 것처럼 열잡음에 비해 TX leakage에 의한 위상 잡음이 20 dB 이상 높으므로 range correlation이 있는 경우에도 TX leakage에 의한 위상 잡음이 역방향 링크를 결정함으로 알 수 있다.

3-3 RFID 시스템의 인식 거리

먼저, 순방향에서의 인식 거리를 계산한 결과가 그림 5에 나타나 있다. 순방향에서의 인식 거리는 태그가 동작하기 위한 임계값 P_{TH} 와 리더의 송신 EIRP 및 태그 안테나 Gain G_R 에 의해 좌우되는데 EIRP값을 4 W라고 가정하면, ASK의 경우 8.3 m의 순방향 인식 거리가 이론적으로 계산된다. 그림에서 알 수 있듯이 PSK의 경우, 전력 효율이 ASK보다 우수하므로 인식 거리가 수 % 정도 증가함을 알 수 있다. 순방향 인식 거리는 변조지수의 함수로 주어지므로 계산시 변조지수는 데이터 '1'은 변조지수 0.9, 데이터 '0'은 변조지수 0.1이 1/2의 확률로 주어진다 고 가정하였다.

그림 6은 순방향 인식 거리와 역방향 인식 거리를 비교하여 나타낸 것이다. 역방향 인식 거리 계산시 160 kbps의 데이터 속도, 송신 전력 4 W EIRP, 리더 안테나 이득을 0 dBi, 수신부의 잡음 지수를 10 dB, 그리고 -50 dB의 TX leakage를 가정하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 순방향 수신 전력은 거리의 제곱에 반비례하는 반면 역방향 수신 전력은 거리의 4제곱에 반비례함을 알 수 있다. 역방향 인식

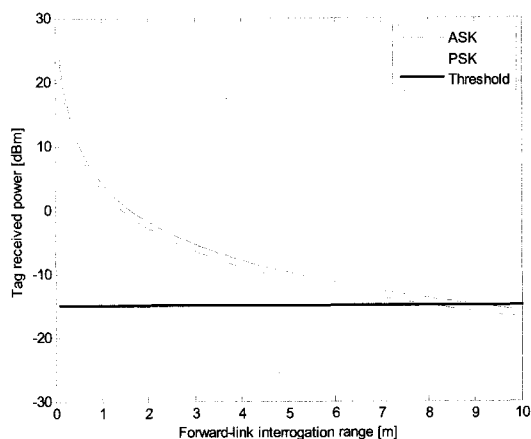


그림 5. UHF RFID 시스템의 순방향 인식 거리
Fig. 5. Forward-link interrogation range of a UHF RFID system.

거리의 경우, TX leakage 잡음, 잡음 지수 및 target SNR 값을 더한 값과 리더 수신 전력이 만나는 지점이 역방향 인식 거리에 해당하며, 11.5 dB SNR을 가질 경우 이 경우 11 m에 해당한다. TX leakage 없이 열잡음만 있다고 가정할 경우 50 m에 해당하며, 이는 실제 발표된 논문과 비교하여도 지나치게 큰 값이 된다⁷⁾.

역방향 인식 거리는 다양한 값에 의해 좌우되는데, 그림 7은 리더의 EIRP는 4 W로 고정된 상태에서 송신부 안테나 이득을 가변시키고, TX leakage 값에 따른 역방향 인식 거리를 나타낸다. 역방향 인식 거리 계산 시 160 kbps의 데이터 속도와 수신부의 잡음

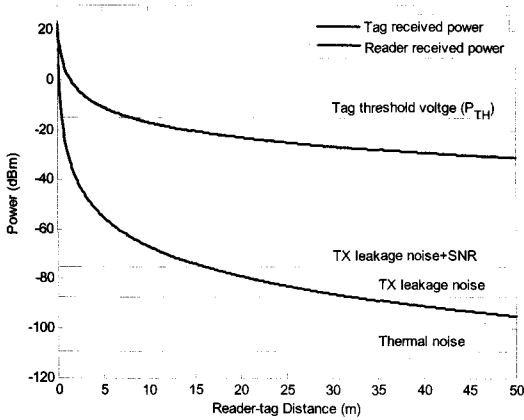


그림 6. 순방향 인식 거리와 역방향 인식 거리의 비교
Fig. 6. Comparison between forward-link and reverse-link interrogation range.

지수를 10 dB라고 가정하여 나타내었다. 순방향과는 다르게 역방향 인식 거리는 EIRP에 의존하는 것이 아니라, circulator의 성능과 밀접한 관련을 맺음을 알 수 있으며, 또한 리더 안테나의 이득에 의해서도 인식 거리가 결정됨을 알 수 있다.

이상의 결과는 일반적인 통신 시스템과 매우 다른 RFID만의 고유의 특징으로서 TX leakage가 크면 인식 거리가 대폭 감소될 수 있으므로 circulator의 설계시 이를 반영하여 설계하여야 한다. 또한, 역방향 인식 거리를 증가시키기 위해서는 전송 전력을 증가시키는 것보다는, 송신 안테나의 이득을 증가시키는 것이 유리하다. 안테나 이득이 낮으며, 누설 전력이 크게 되는 경우 역방향 인식 거리가 순방향 인식 거리보다 작게 되는 문제점이 발생하므로 시스템 설계시 이러한 점을 고려하여야 한다^[15].

또한 그림 7에서는 range correlation에 의한 인식 거리의 변화를 나타낸다. Range correlation이 없는 경우, 누설 전력을 50 dB 이상 감소시키더라도 역방향 인식 거리가 10 m 이하로 계산되므로 range correlation을 고려하여 TX leakage 레벨을 계산하는 것이 RFID 시스템에서 중요한 파라미터임을 알 수 있다. 하지만 일반적인 RFID 리더 시스템은 LO 신호와 송신 전력을 동일한 신호를 사용하므로 range correlation에 의해 위상 잡음 효과는 미비하다고 할 수 있다.

마지막으로 언급할 것은 저자의 논문 [8]과 [9]에서 분석한 바와 같이 역방향 인식 거리에서 또 다른

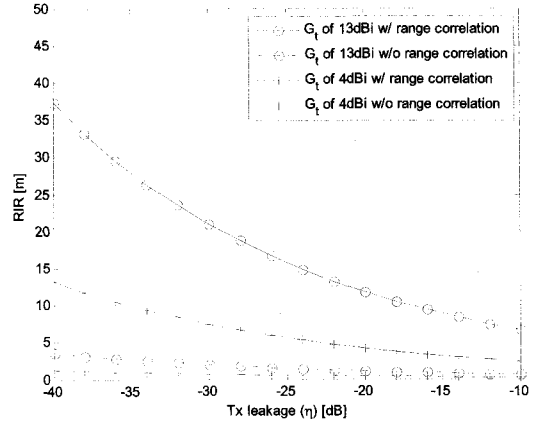


그림 7. UHF RFID 시스템의 역방향 인식 거리
Fig. 7. Reverse-link interrogation range of a UHF RFID System.

중요한 파라미터가 인접 리더에 의한 간섭이다. 인접 리더에 의한 간섭은 SNR을 감소시키므로 인접 리더가 간섭원으로 작용하는 경우 순방향 인식 거리보다 역방향 인식 거리가 작게 되어 역방향 인식 거리가 시스템의 전체 인식 거리를 좌우할 수 있으므로 이에 대한 정확한 해석이 필요하다고 사료되며, 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

IV. 결론

본 연구에서는 UHF RFID 시스템을 설계하는데 있어 가장 중요한 파라미터인 인식 거리를 순방향과 역방향을 구분하여 유도하였고, 다양한 경우에 인식 거리를 계산하였다. 현재까지 RFID에서 인식 거리를 결정하는 방법은 전력 전달을 위한 순방향 링크만을 고려하여 인식 거리를 계산하는 것이 일반적이었으며, 역방향에 대해서는 자세한 연구가 진행되어 있지 않고 있었다. 본 연구를 통해 UHF RFID 시스템의 인식 거리는 순방향과 역방향 모두를 고려해야 함을 알 수 있었고, 역방향의 경우 LO의 range correlation 효과와 리더 안테나의 이득 및 circulator에 의한 TX 누설 전력이 중요한 역할을 함을 이론적으로 분석하였다. 최근 리더간 간섭에 의해 역방향 인식 거리를 계산하는 것이 RFID 시스템에서 점점 더 중요하게 대두되고 있는 현재 시점에 있어 본 논문은 역방향 인식 거리를 계산하기 위한 중요한 자료

가 될 수 있을 것으로 판단된다. 향후 주파수 간섭에 의한 인식 거리 내용을 추가하면, 다양한 환경에서 RFID 인식 거리를 계산할 수 있을 것이며, 국내 RFID 도입 활성화에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 장병준, 오하령, 성영락, 박준석, "UHF RFID Air Interface 기술 동향", 한국통신학회지, 24(8), pp. 14-11, 2007년 8월.
- [2] Y. Bendavid, S. F. Wamba, and L. A. Lefebvre, "Proof of concept of an RFID-enabled supply chain in a B2B e-commerce environment", in *Proceedings of the 8th International Conference on Electronic Commerce(ICEC'06)*, pp. 564-568, 2006.
- [3] Udo Karthaus, Martin Fischer, "Fully integrated passive UHF RFID transponder IC with 16.7-uW minimum RF input power", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 38, no. 10, pp. 1602-1608, Oct. 2003.
- [4] J. -P. Curty, et al., "Remotely powered addressable UHF RFID integrated system", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 40, no. 11, pp. 2193-2202, Nov. 2005.
- [5] Pavel V. Nikitin et al., "Power reflection coefficient analysis for complex impedances in RFID tag design", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 53, no. 9, pp. 2978-2990, Sep. 2005.
- [6] G. De Vita, G. Iannaccone, "Design criteria for the RF section of UHF and microwave passive RFID transponders", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 53, no. 9, pp. 2978-2990, Sep. 2005.
- [7] Z. G. Fan, S. Qiao, J. T. Huangfu, and L. X. Ran, "Signal descriptions and formulations for long range UHF RFID readers", *Progress in Electromagnetics Research, PIER 71*, pp. 109-127, 2007.
- [8] D. Y. Kim, B. J. Jang, H. G. Yoon, J. S. Park, and J. G. Yook, "Effects of reader interference on the RFID interrogation range", in *the 2007 European Conference on Wireless Technology(EcWT'07)*, 2007.
- [9] 이윤덕, 김도윤, 윤현구, 육종관, 장병준, "리더 간섭에 의한 RFID 시스템의 인식 거리 감소에 관한 연구", 한국전자과학회논문지, 18(7), pp. 731-738, 2007년 7월.
- [10] EPCglobal Inc., "EPCTM radio-frequency identity protocols Class-1 Generation-2 UHF RFID protocol for communications at 860~960 MHz", Version 1.0.9, Jan. 2005.
- [11] Klaus Finkenzeller, *RFID Handbook*, Second Edition, John Wiley & Sons, 2003.
- [12] A. D. Droitcour, O. Boric-Lubecke, V. M. Lubecke, J. Lin, and G. T. A Kovac, "Range correlation and I/Q performance benefits in single-chip silicon doppler radars for non-contact cardiopulmonary monitoring", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 52, pp. 838-848, Mar. 2004.
- [13] J. H. Bae, J. C. Kim, B. W. Jeon, J. W. Jung, J. S. Park, B. J. Jang, H. R. Oh, Y. J. Moon, and Y. R. Seong, "Analysis of Phase noise requirements on local oscillator for RFID system considering range correlation", in *the 2007 European Conference on Wireless Technology(EcWT'07)*, 2007.
- [14] John, G. Prokis, *Digital Communications*, Fourth Edition, McGraw-Hill, 2001.
- [15] Wan-Kyu Kim, Moon-Que Lee, Jin-Hyun Kim, Hyung-sun Lim, Jong-Won Yu, Byung-Jun Jang, and Jun-seok Park, "A passive circulator for RFID application with high isolation using a directional coupler", *2006 European Microwave Conference*, pp. 196-199, Sep. 2006.

장 병 준



1990년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1992년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1997년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
 1995년 3월~1999년 1월: LG전자

(주)
 1999년 1월~2003년 9월: 한국전자통신연구원 무선방송연구소
 2003년 10월~2005년 8월: 정보통신연구진흥원
 2005년 9월~현재: 국민대학교 전자공학부 교수
 [주 관심분야] 마이크로파/밀리미터파 회로(MMIC, Hybrid), 무선 통신시스템, RFID/USN

조 홍 구



1972년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1979년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
 1987년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학박사)
 1988년: Univ. of Colorado 객원교수

2001년: Syracuse University 객원교수
 1980년 9월~현재: 국민대학교 전자공학부 교수
 [주 관심분야] RF 및 Microwave 회로 해석 및 설계, 안테나

박 준 석



1991년 2월: 국민대학교 전자공학과 (공학사)
 1993년 2월: 국민대학교 전자공학과 (공학석사)
 1996년 8월: 국민대학교 전자공학과 (공학박사)
 1998년 3월~2003년 2월: 순천향대학교

조교수
 2003년 3월~현재: 국민대학교 전자공학부 교수
 [주 관심분야] RFIC, MMIC, LTCC, Hybrid Circuit, 필터, 무선통신시스템, RFID/USN

임 재 봉



1974년: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 1976년: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
 1987년: 서울대학교 전기공학과 (공학박사)
 1975년~1981년: 충남대학교 전자공학과 조교수

1988년: 미국 텍사스 주립대학교 전기공학과 조교수
 1990년: 한국통신학회 이사
 1990년~2005년: SKT, 흥창, 삼성전자, Netel, A-telsys, SK-Telesys 기술고문
 1996년: 제21회 산학협동대상 수상
 1981년~현재: 국민대학교 전자정보통신공학부 교수
 [주 관심분야] GPS 시스템 Application, 셀룰라/IMT-200 용 광중계기 설계