
다중모드 기반 천리안 위성통신 중계기의 위상잡음 특성 평가

김영완*

Phase Noise Evaluation of Multi-mode based-COMS Communication Transponder

Young-wan Kim*

요 약

천리안 위성은 해양 관측과 기상영상 전송, 그리고 Ka 대역 위성통신 신호 중계를 위한 다목적 복합위성으로 2010년 발사되어 운용되고 있다. Ka 대역 위성통신 중계기는 MSM 스위치 기능으로 다중 빔 지향이 가능하고 다중 모드 고속 데이터를 전송할 수 있다. 천리안 위성통신 중계기는 MSM 기능으로 다수의 신호발생기와 Ka 대역의 주파수 사용으로 시스템 위상잡음이 증가할 수 있다. 위상잡음은 다중모드 및 고속 데이터 전송에 영향을 미치고 있으며, 높은 위상잡음을 갖는 위성 전송시스템은 전송 신호를 복원하기가 어렵다. 본 논문에서는 천리안 위성통신 중계기의 위상잡음을 측정하고, 측정된 위상잡음을 수신 잡음대역폭 관점에서 위상잡음 영향을 분석하고 평가한다. 아울러, 천리안 위성통신 중계기 위상잡음에 대한 다중모드 및 고속 전송 데이터의 전송 성능을 평가한다.

ABSTRACT

The COMS, which is a multi-purposed satellite that provide the oceanic measurement data and meteorological image data, is operating since 2010. Ka-band satellite communication transponder in COMS gets the MSM function that can provide the required multi-beam and transmits the multi-mode signal with high data rate. The phase noise of COMS communication transponder can be increased because of several local oscillators for MSM function and the utilization of Ka-band frequency. The phase noise affects the performance for the multi-mode and high rate data based- transmission method, it is not possible to recover the transmission data in system with the high system phase noise. In this paper, the phase noise of COMS was measured and the effects of the measured phase noise are analysed and evaluated in the viewpoint of the noise bandwidth of transmission system, Also the transmission performances for multi-mode and high rate data are evaluated in the presence of COMS phase noise.

키워드

천리안 위성, 위상잡음, 천리안 위성통신

Key word

COMS, Phase noise, COMS communication

* 종신회원 : 군산대학교(ywkim@kunsan.ac.kr)

접수일자 : 2011. 07. 07

심사완료일자 : 2011. 07. 31

I. 서 론

천리안 위성(COMS)은 해양을 관측하고 관측 데이터를 전송하는 해양 관측 위성 탑재체와 기상 영상을 전송하는 기상위성 탑재체, 그리고 위성통신 중계 기능을 갖는 위성통신 탑재체를 갖는 다목적 복합위성이다. 천리안 위성은 2010년 발사되어 운영중에 있으며, 위성통신 탑재체는 Ka 대역 주파수를 사용하여 다중모드 고속 데이터를 전송할 수 있다. Ka 대역 위성통신 중계기는 빔 스위칭 기능을 갖는 MSM(Microwave Switch Matrix) 구조를 가지며, 여러 채널의 빔 스위칭을 위하여 다수의 국부발진 신호기를 사용한다. 다수의 Ka 대역의 고주파 국부발진 신호기 사용은 다소 높은 위성통신 중계기의 시스템 위상잡음으로 나타나며, 위상잡음은 위성통신 중계기를 통하여 전송되는 신호 성능에 영향을 미친다[1].

천리안 위성통신 중계기는 Ka 대역과 다수의 국부발진 신호기 사용으로 전송되는 신호의 성능 열화를 초래하며, 궁극적으로는 전송 신호가 복원될 수 없을 수도 있다. 아울러 위상잡음 열화를 보정하기가 어려운 실정이다. 따라서 Ka 대역 위성통신 중계기의 시스템 위상잡음을 측정하고, 측정된 위상잡음으로부터 전송 데이터의 성능 열화를 예측할 필요가 있다.

본 논문에서는 천리안 위성통신 중계기의 시스템 위상잡음 특성을 측정하고, 측정된 위상잡음을 해석하여 다중모드와 고속 전송 데이터의 전송 성능을 분석하고 평가한다. MSM 기능을 갖는 Ka 대역 위성통신 중계기의 국부발진 신호기의 위상잡음을 측정하고, 측정된 데이터의 모델링을 통하여 위상에러 분포를 해석하고 위상잡음 전력을 산출한다. 아울러, 전송되는 신호 수신을 위한 잡음대역폭을 다중모드와 전송 데이터 율에 따라 해석하고 전송 성능을 분석하고 평가한다.

II. 천리안 위성통신 중계기

2.1. 천리안 위성통신 중계기

빔 스위칭 기능을 갖는 천리안 위성통신 전송시스템 구조는 그림 1과 같다.

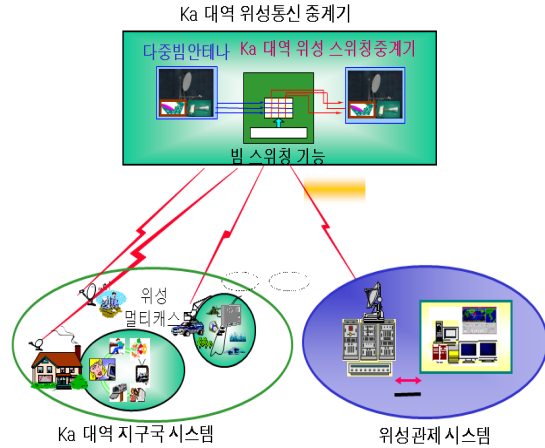


그림 1. 천리안 위성통신 전송시스템 구조도
Fig. 1 Satellite transmission configuration for COMS

천리안 위성통신 전송시스템의 지구국 전송시스템과 위성관제 시스템은 일반적인 시스템 구조를 가지며, 위성관제 시스템은 빔 스위칭 기능 제어를 위한 기능을 별도로 수행한다. Ka 대역 위성통신 중계기는 빔 스위칭 기능을 갖는 S 대역 MSM 구조와 Ka 대역 송수신 일체형 안테나, 그리고 Ka 대역 중계기로 구성된다[2].

빔 스위칭 구조인 MSM과 Ka 대역 중계기 구조는 그림 2와 같다. 그림과 같이 Ka 대역 위성통신 중계기는 3x3 MSM 구조와 주요 채널 (primary channel) 중계 구조를 갖는다. Ka 대역 송수신 주파수 변환은 9.8 GHz이며, MSM은 S 대역(3 GHz)에서 구현되어 동작된다. 위상잡음원인 국부발진 신호기는 6개로 구성되며, MSM 1번 채널과 주요 채널(채널 0)은 동일한 국부발진 신호기를 사용한다. Ka 대역 위성통신 중계기의 수신단 국부발진 신호기(LO1(a), LO2(a), LO3(a))는 수신된 Ka 대역(30 GHz 대역)신호를 MSM 동작 주파수 영역인 3 GHz 대역으로 주파수 변환한다. 또한, Ka 대역 위성통신 중계기의 송신단 국부발진 신호기(LO1(b), LO2(b), LO3(b))는 빔 스위칭된 3 GHz 전송 신호를 20 GHz 대역 신호로 주파수 변환한다. 따라서, 위성통신 중계기의 국부발진 신호기는 고 주파수 영역에서 이중으로 구현되어 동작하므로 상대적으로 다소 높은 위상잡음 특성을 가질 수 있다.

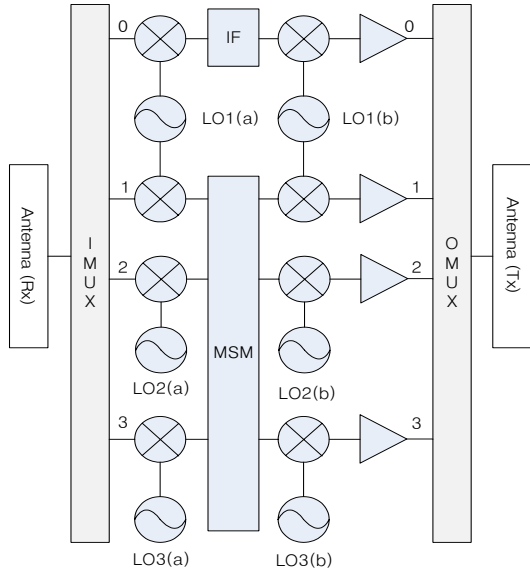


그림 2. MSM을 갖는 위성통신 중계기 구조도
Fig. 2 Satellite transponder configuration with MSM

2.2. 통신 중계기 위상잡음

MSM을 갖는 위성통신 중계기의 위상잡음은 수신 단 국부발진 신호기와 송신단 국부발진 신호기를 결합하여 9.8 GHz 대역의 중계기 시스템 위상잡음을 측정한다. 그림 3은 위성통신 중계기 전송 신호의 변환 주파수인 9.8 GHz 대역에서 측정된 위상잡음이다. 주요 채널(C00)간 위상잡음과 MSM 소자를 갖는 국부발진 신호기(M22)에 의한 위상잡음을 나타내며, 위성통신 중계기 전송 링크 중 다소 높은 위상잡음(C00)과 낮은 위상잡음(M22)을 갖는 특성을 대표적으로 나타내었다. 여기서, C00은 수신 채널 0과 송신 채널 0이 연결된 링크이며, M22는 MSM을 갖는 수신 채널 2번과 송신 채널 2번간 형성된 전송 링크이다. 3x3 MSM에 의해 다양한 전송 링크 형성이 가능하며, 이에 따른 위상잡음 특성을 측정할 수 있으며, 형성된 채널 링크의 위상잡음은 C00과 M22의 위상잡음과 거의 동등한 특성을 갖는다.

여기서, 위성통신 중계기의 위상에러 분산을 구하면, 식 (1)에 의해 위상잡음 전력의 누적으로 주파수 영역의 적분 형태로 구할 수 있다[3].

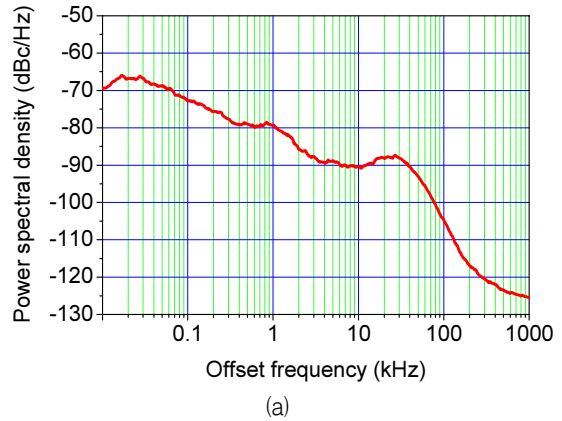
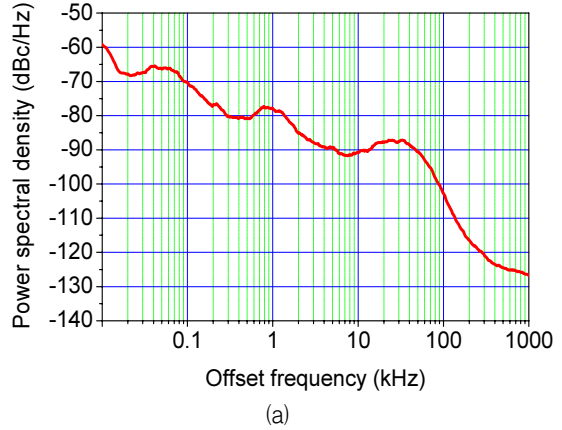


그림 3. MSM을 갖는 위성통신 중계기의 위상잡음, (a) C00과 (b) M22.
Fig. 3 Phase noise of satellite communication transponder with MSM function, (a) C00 and (b) M22.

$$\sigma_{\epsilon}^2 = \int_{f_1}^{f_2} S_{\phi}(f) df \quad (1)$$

여기서, $S_{\phi}(f)$ 는 위상잡음 전력 스펙트럼이다.

식 (1)에 의해 위성통신 중계기의 위상잡음 전력 및 위상에러 표준편차를 구하면 표 1과 같다. 표 1에 의하면, 위성통신 중계기의 위상잡음은 약 0.193 ~ 0.283 mW 잡음전력을 가지며, 0.802° ~ 0.964°의 양호한 위상에러 특성을 나타낸다.

표 1. 위성통신 중계기의 위상잡음 특성
Table. 1 Phase noise characteristics of satellite communication transponder

구분	위상잡음전력 (mW)	SNR (dB)	위상에러표준편차 (deg)
C00	0.283	35.48	0.964
M22	0.196	37.08	0.802

III. 다중모드 위성전송과 위상잡음

3.1. 수신 잡음대역폭

위상잡음에 의한 영향은 전송 신호를 수신하는 수신기 특성에 의존한다. 수신기 반송파 복원회로는 입력 신호의 백색잡음과 반송파 신호의 위상잡음에 의해 영향을 받는다. 그림 4는 다중모드 수신 반송파 복원회로의 등가회로이다.

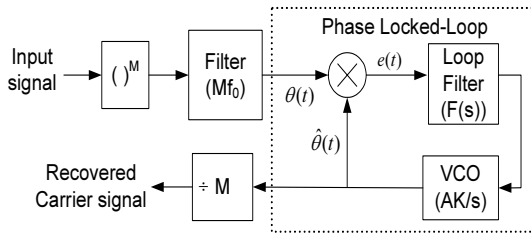


그림 4. 수신 반송파 복원회로의 등가회로
Fig. 4 An equivalent carrier recovery circuit

그림 4에서 위상동기회로의 폐 루프 전달 함수 (closed-loop transfer function)는 다음과 같다.

$$H(s) = \frac{\theta(s)}{\theta(s)} = \frac{AKF(s)}{AKF(s) + s} \quad (2)$$

여기서, $(s + s_1)/s$ 2차 루프 함수를 갖는 고 이득 2차 루프를 사용할 경우 위상동기회로의 전달 함수는 다음과 같이 표현할 수 있다[4].

$$H(s) = \frac{AK(s + s_1)}{s^2 + AKs + AKs_1} = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

여기서, ξ 는 감쇠 정수이며, ω_n 은 고유주파수(natural frequency)이다.

식 (2)와 식 (3)으로부터 위상에러 $e(s)$ 는 다음과 같이 고역 통과 특성으로 나타난다.

$$e(s) = 1 - H(s) = \frac{s^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

위상동기회로에서 단측과대 위상에러 분산은 식 (5)와 같이 위상잡음에 의한 영향 σ_ϕ^2 과 입력 백색잡음에 의한 영향 σ_n^2 의 합으로 표현할 수 있다.

$$\sigma_e^2 = \sigma_\phi^2 + \sigma_n^2 = \int_0^\infty S_\phi(\omega)|1 - H(s)|^2 df + \int_0^\infty N_o|KH(s)|^2 df \quad (5)$$

식 (5)로부터 위상잡음의 영향은 고역 통과 특성을 보여준다. 여기서, 위상동기회로의 단측과대 잡음대역폭은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$B_L = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty |1 - H(s)|^2 df = \frac{\omega_n}{8\xi} (1 + 4\xi^2) \quad (6)$$

따라서, 위상잡음 영향은 식 (6)과 같은 수신기 잡음대역폭으로 표현될 수 있으며, 여기서는 백색 잡음에 의한 영향을 고려하지 않고, 위상잡음에 의한 영향을 분석한다.

3.2. 위상잡음 영향 분석 및 고찰

식 (4)와 식 (5)로부터 위상잡음에 의한 영향은 식 (6)과 같은 수신기 잡음대역폭을 설정하여 분석한다.

위상동기회로의 감쇠 정수는 일반적으로 0.707로 하며, 전송 심볼 데이터율은 잡음대역폭의 1000배로 설정한다[5]. 그림 5는 잡음대역폭이 1 kHz이며 2.048 Mbps QPSK 전송 데이터에 대한 반송파 복원회로의 위상잡음에 대한 동작 특성을 나타내고 있다. 식 (5)와 같이 위상잡음은 고역 통과 특성으로 나타나며, 잡음대역폭 주파수 영역의 위상잡음이 큰 영향으로 나타남을 알 수 있다. 여기서, 식 (1)에 의한 C00와 M22 위상잡음에 대한 양측

대파 위상잡음 전력 및 표준편차는 각각 약 0.12 ~ 0.16 mW와 0.63 ~ 0.72도이다.

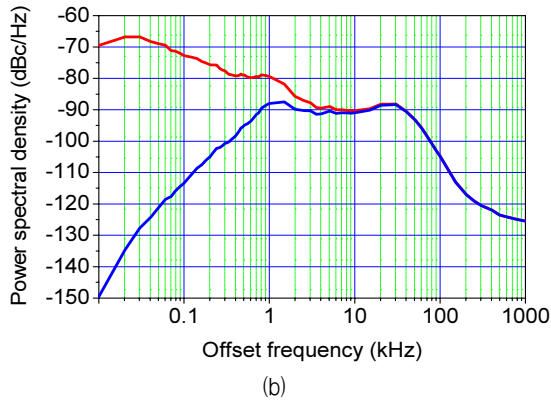
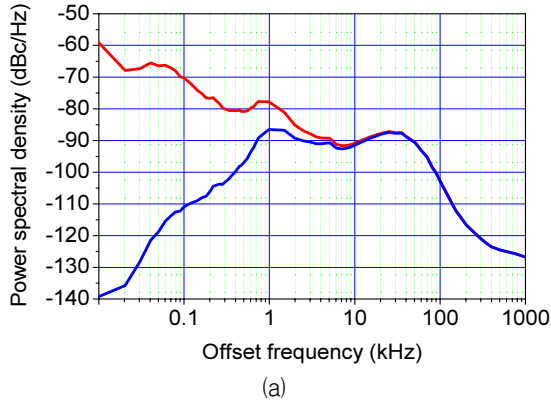


그림 5. MSM을 갖는 위성통신 중계기의 여과된 위상잡음, (a) C00과 (b) M22.

Fig. 5 Filtered phase noise of satellite communication transponder with MSM function, (a) C00 and (b) M22.

2.048 Mbps QPSK와 동일한 방법으로 다양한 고속 전송 데이터와 수신기 잡음대역폭을 기준으로 위상잡음에 의한 영향을 분석한다. 위상에러 분산을 산출하기 위한 식 (1)의 상측대파 주파수는 수신기 IF 필터의 나이퀴스트 주파수를 적용하며, 위상잡음 전력과 표준편차 양측대파(DSB) 위상잡음을 고려한다.

표 2는 MSM을 갖는 위성통신 중계기의 전송 데이터 심볼율에 대한 위상잡음 영향을 보여준다.

표 2. 전송 데이터에 대한 위상잡음 영향
Table. 2 Phase noise effects for transmission data rate

전송 데이터 (MS/s)	위상잡음	위상잡음전력 (mW)	SNR (dB)	위상에러 표준편차 (deg)
1	C00	0.16	37.96	0.72
	M22	0.12	39.2	0.63
5	C00	0.17	39.26	0.62
	M22	0.086	40.69	0.53
10	C00	0.089	40.51	0.54
	M22	0.062	42.06	0.45
50	C00	0.24	46.28	0.28
	M22	0.021	46.79	0.26
100	C00	0.23	46.41	0.27
	M22	0.026	45.71	0.29

표 2로부터 전송 데이터율이 증가할수록 수신기 반송파 잡음대역폭이 증가하므로, 상대적으로 위상잡음 영향은 작아지고 있음을 알 수 있다. 따라서, 위상잡음에 의한 영향은 전송 데이터율이 적을수록 영향이 크게 나타날 수 있다. 그러나, 시스템 위상잡음이 비교적 낮을 경우(M22), 전송 데이터율이 증가할수록 수신기 IF 필터의 나이퀴스트 주파수에 따라 위상잡음 영향이 증가함을 보여주고 있다. 한편, 식 (5)로부터 전송 성능에 영향을 갖는 위상에러 분산은 위상잡음에 의한 위상에러 분산이외에 백색잡음에 의한 위상에러 영향이 지배적으로 나타날 수 있으므로 수신기의 잡음대역폭 설정에 대한 고려가 필요하다.

위상잡음에 의한 성능 손실은 확률 분포 함수에 대한 평균 오율 식을 적용한다[5].

$$P_M(\epsilon) = \int_{-\pi}^{\pi} P_M(\phi) P(\Phi) d\phi \quad (7)$$

여기서, 다중모드 M-ary PSK 신호에 대한 오율 특성은 Q 함수로 표현된다.

$$P_M(\phi) = \frac{c}{k} h_M \quad (8)$$

$$h_M = \frac{1}{2} [Q\{\sqrt{2k\rho} d_{M1}(\phi)\} + Q\{\sqrt{2k\rho} d_{M2}(\phi)\}]$$

$c = 1$ for $M = 2$, $c = 2$ for $M \geq 4$

또한, $\rho = E_b/N_o$, $k = \log_2 M$ 이며, 판단 영역 경계 선까지의 거리는 각각 다음과 같다.

$$d_{M1}(\phi) = \text{Im}[s(\phi)\exp(j\pi/M)] = \sin(\frac{\pi}{M} + \phi),$$

$$d_{M2}(\phi) = -\text{Im}[s(\phi)\exp(-j\pi/M)] = \sin(\frac{\pi}{M} - \phi)$$

(9)

위상잡음에 의한 열화 특성은 $P_M(\epsilon) = f(\rho, \alpha)$ 이므로, 위상 잡음에 의해 열화된 오율 특성이 위상 잡음이 없는 경우의 오율 특성과 동일하게 되기 위해서는 신호 대 잡음비가 증가되어야 한다.

즉, $f_{\phi=0}(\rho, \alpha) = f_{\phi=\phi}(\rho + \delta\rho, \alpha)$ 의 관계가 성립되어야 한다. 여기서, $\delta\rho$ 는 위상 잡음에 의한 성능 손실이다. 따라서, 식 (7)과 식 (8)을 적용하여 일반적 성능 목표인 2×10^{-4} BER에 대한 다중모드 M-ary PSK의 반송파 복원회로의 반송파 신호의 신호대 잡음비를 구하면 표 3과 같다.

표 3. 성능손실에 대한 요구 반송파 신호
Table. 3 Required SNR of carrier signal for loss

구분		SNR (dB)		
BER	Loss (dB)	BPSK	QPSK	8PSK
2×10^{-4}	0.1	16.98	27.82	34.87
	0.2	14.51	24.92	31.92
	0.3	13.24	23.28	30.22

표 2와 표 3으로부터 반송파 신호의 위상잡음에 의한 신호대 잡음비는 약 37.96 dB 이상이므로, 고차모드인 8PSK 전송 시에도 0.1 dB 이내의 손실을 갖는 양호한 전송 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서, MSM을 갖는 위성통신 중계기의 위상잡음 특성은 양호한 전송 성능을 제공할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 MSM 기능을 갖는 천리안 위성의 위성통신 중계기의 위상잡음을 측정하고, 측정된 위상잡음을 수신기 잡음대역폭에 따라 해석하여 다중모드와 전

송 데이터 율에 대한 전송 성능을 분석 평가하였다. 위성통신 중계기의 위상잡음은 비교적 낮은 위상에러 분산값을 가지며, M-ary PSK 고차 전송모드에 대해 양호한 전송 성능을 제공할 수 있다.

참고 문헌

- [1] Besse, J, "The Effect of Synthesizer Phase Noise on BER Performance", *Evaluation Engineering*. vol. 39, pt. 4 pp. 114~118, 2000.
- [2] 장정식 등, "천리안 위성 통신 탑재체의 위상잡음 스펙트럼 해석" 2011 춘계종합학술대회, 한국해양정보통신학회, 2011.
- [3] Mohamed K. Nezami, "Evaluate the Impact of Phase Noise on Receiver Performance", *Microwaves & RF*, vol. 37, no. 5, pp. 165~174, 1998.
- [4] Heinrich Meyr and Gerd Ascheid, *Synch-ronization in Digital Communications*, vol 1, John Wiley & Sons, NY, 1990.
- [5] 김영완, "통신해양기상위성 센서 데이터 송수신 시스템의 시스템 위상 잡음 스펙트럼" 한국해양정보통신학회논문지, 제 11권, 제 7호, pp. 1247-1253, 2007.

저자소개



김영완(Young-wan Kim)

1983년 경북대학교 전자공학사
1985년 경북대학교 전자공학석사
2003년 충남대학교 전자공학박사
1984~1990 동양정밀공업(주)
중앙연구소 과장

1990~1992 (주) 유영통신 이사
1992~2004 한국전자통신연구원 책임연구원
2004~현재 군산대학교 전파공학과 교수
※관심분야: RF/Microwave 시스템 및 회로설계,
디지털 위성방송/통신시스템, 마이크로파 소자