



S 대역 신호에 의한 위성항법수신기의 RF 신호간섭

권병문¹, 신용설², 마근수³, 주정갑⁴, 지기만⁵

Radio Frequency Interference on the GNSS Receiver due to S-band Signals

Byung-Moon Kwon¹, Yong-Sul Shin², Keun-Su Ma³, Jeong-Gab Ju⁴ and Ki-Man Ji⁵

KSLV-II R&D Head Office, Korea Aerospace Research Institute^{1,2,3,5}

Alternative Navigation Division, Navcours Co., Ltd.⁴

ABSTRACT

This paper describes the RF(Radio Frequency) interference on the GNSS receiver due to the S-band signals transmitted from the transmitters in the Test Launch Vehicle, and analyzes the cause of the RF interference. Due to the S-band signals that have relatively high power levels compared with GNSS signals, an LNA(Low Noise Amplifier) in the active GNSS antenna was saturated, and the intermodulation signal within GNSS in-bands was produced in the LNA whenever two S-band signals were received from the GNSS antenna. For these reasons, the C/N0 of the satellite signals in the GNSS receiver was attenuated severely. The design of the LNA was changed in order to protect the RF interference due to the S-band signals and the suppression capability of the RF interference was confirmed in the new LNA through the comparison of the old LNA.

초 록

본 논문은 시험발사체에 탑재된 송신기에서 송신되는 S 대역 신호에 의해 위성항법수신기에서 나타난 RF 신호간섭을 설명하고, 그 원인을 분석한다. 능동형 위성항법안테나의 LNA는 항법위성 신호와 비교하여 상대적으로 신호세기가 매우 높은 S 대역 신호에 의해 포화되었으며, 2개의 S 대역 신호가 위성항법안테나에 수신될 때마다 GNSS 대역에 해당하는 상호변조신호가 LNA에서 발생하였다. 이러한 현상으로 인해 위성항법수신기에서 계산된 항법위성신호의 C/N0가 크게 감쇄하였다. S 대역 신호에 의한 RF 신호간섭을 차단하기 위하여 위성항법안테나 LNA의 설계변경을 수행하였고, 설계변경 전·후의 LNA에 대해 수행한 비교시험을 통하여 설계변경된 LNA에서 S 대역 신호에 의한 RF 신호감쇄 현상이 억제될 수 있음을 확인하였다.

Key Words : GNSS(위성항법), Interference(신호간섭), Saturation(포화), Intermodulation(상호변조), Space Launch Vehicle(우주발사체), Low Noise Amplifier(저잡음증폭기)

† Received : March 29, 2019 Revised : April 24, 2019 Accepted : April 25, 2019

¹ Principal Researcher, ² Senior Researcher, ³ Principal Researcher, ⁴ Research Engineer, ⁵ Principal Researcher

¹ Corresponding author, E-mail : bmkwon@kari.re.kr, ORCID 0000-0002-3976-2032

I. 서 론

발사체의 실시간 항법정보 획득과 시각동기신호 제공을 목적으로 한국형발사체에 탑재되는 위성항법수신기는 나로호에 탑재된 GPS 수신기와 유사하게 전체 비행 구간에서 가시성을 확보하기 위하여 기체의 외피에 설치된 3개의 위성항법안테나를 이용해 항법 위성신호를 수신한다[1,2]. 둥근 원통형 모양을 갖는 우주발사체는 거대한 기체임에도 시간에 따라 단 분리나 페어링 분리가 수행되어야 하므로 실제로 위성항법안테나를 설치할 수 있는 위치가 매우 제한된다[1-3]. 또한 위성항법안테나가 설치되는 위치에는 L 대역 신호를 수신하는 위성항법안테나뿐만 아니라 발사체의 원격측정데이터와 영상데이터를 송신하기 위한 S 대역 안테나, 지상레이더 추적을 위한 C 대역 안테나 및 지상으로부터 비행중단명령을 수신하기 위한 UHF 안테나 등이 함께 설치되어야 한다[4]. 우주발사체에서 위성항법안테나의 설치위치와 조건 및 운용환경 등에 대해서는 참고문헌 [5]에 주어져 있다.

위성항법수신기에서 사용하는 항법위성신호의 세기는 -130 dBm 수준으로 매우 약하기 때문에 GNSS 대역에서 잡음신호가 수신되거나, LNA(Low Noise Amplifier)의 동작범위(Dynamic Range)를 초과하는 강한 RF 신호가 수신되는 경우에는 위성항법수신기에서 신호간섭 현상과 이로 인한 성능저하가 발생할 수 있다[6-10]. 높은 신뢰성과 무결성이 요구되는 항공 분야에서는 참고문헌 [6]에서와 같이 위성항법수신기가 항공전자장비로 이용되는 경우에 의도하지 않게 발생할 수 있는 잠재적인 EMI(Electromagnetic Interference)의 근원을 폭넓게 분석하고, 이에 대한 대책을 강구하고 있다. 항공 분야에서와 유사하게 출력세기가 매우 높은 신호를 송신하는 송신안테나가 위성항법안테나와 서로 인접하여 설치되어야 하는 우주발사체에서도 송신신호에 의해 위성항법수신기에서 의도하지 않은 성능저하가 발생할 수 있다. 이와 같은 현상은 참고문헌 [11-13]에서와 같이 나로호에서도 이미 경험하였다. 나로호가 발사대에 비행대기하고 있을 때에 송신기에 의해 GPS 수신기에서 나타난 RF 신호간섭 현상은 능동형 GPS 안테나의 LNA에 대해 L1 대역 이외의 RF 신호를 차단할 수 있도록 필터링 특성을 개선하여 해결하였다[13].

GPS 신호만을 이용했던 나로호의 GPS 수신기와는 달리 한국형발사체에 탑재되는 위성항법수신기는 GPS L1 C/A, L5 신호와 GLONASS L1 신호 및 Galileo E1b, E5a 신호를 함께 이용하는 복합 위성항법수신기로 개발되고 있다[2]. 따라서 이러한 항법위성신호를 모두 수신해야 하는 위성항법안테나는 넓은 대역폭을 가지며, 수신 대역 이외의 신호는 철저히 차단할 수 있도록 LNA의 필터 설계에 특별히 주의를 기울여 개발하고 있다[14]. 개발하고 있는 위성항법수

신기는 시험발사체 시스템 수준에서의 통합시험 중에 위성항법안테나 근처에 설치된 S 대역 안테나에서 송신되는 신호에 의해 위성항법수신기에서 신호감쇄가 발생하였으며, 여러 차례의 시험을 통해 실제 발사환경에서도 나타날 개연성이 있음을 확인하였다[4]. 위성항법수신기에서 신호감쇄 현상이 발생하면 계산된 항법정보의 정확도가 낮아지며, 심한 경우에는 항법정보 계산이 어려워 정상적으로 동작하는 것이 불가능해진다[6-12]. 신호감쇄 현상으로 대표되는 위성항법수신기의 성능저하는 수차례에 걸친 시험과 분석을 통하여 S 대역 신호에 의해 위성항법수신기와 연결된 능동형 위성항법안테나의 LNA가 포화되고, 위성항법안테나에서 수신된 2개의 S 대역 신호로부터 GNSS 대역에서 상호변조신호(Intermodulation Signal)가 생성되어 발생하는 것으로 확인하였다[7,15-17].

본 논문에서는 시험발사체에 탑재된 송신기에서 송신되는 S 대역 신호에 의해 위성항법수신기에서 나타난 RF 신호간섭을 설명하고, 그 원인을 분석한다. 또한 S 대역 신호에 의한 RF 신호간섭을 차단하기 위하여 위성항법안테나 LNA의 설계변경을 수행하고, 설계변경 전·후의 LNA에 대하여 수행한 비교시험을 통하여 새로운 LNA에서 S 대역 신호에 의한 RF 신호감쇄 현상이 억제됨을 확인한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 시험발사체의 시스템 수준에서 수행된 자체적합성(Self-Compatibility) 시험중 S 대역 신호에 의해 위성항법수신기에서 나타난 RF 신호간섭 현상에 대해 설명한다. III에서는 S 대역 신호에 의한 RF 신호간섭 현상을 억제하기 위하여 위성항법안테나의 LNA에 수행된 설계변경 사항에 대해 설명하고, IV장에서는 설계변경 전과 후의 LNA에 대한 비교시험을 수행한다. 마지막으로 V장에서 결론과 향후 연구 과제를 제시한다.

II. S 대역 신호에 의한 RF 신호 간섭

시험발사체에 탑재되는 모든 전자탑재물은 단품수준에서의 성능 및 환경시험을 정상적으로 완료한 이후에 체계에 납품된다. 체계에 납품된 이후에는 시스템으로 조립하여 기본적인 연계시험과 환경시험 및 각종 시스템 시험을 통해 모든 탑재물들의 성능과 상호 호환성 등을 검증한다[1].

2.1 RF 신호 간섭의 영향

시스템 수준에서 수행되는 여러 가지 시험 항목 중에서 시험발사체를 구성하고 있는 전자탑재물과 지상안테나를 모사한 지상송신시스템이 동시에 동작하고 있을 때에 시험발사체의 동작 성능을 검증하기 위한 자체적합성 시험은 모든 전자탑재물이 동시에 정상적으로 동작할 수 있는지를 검증하기 위한 최소

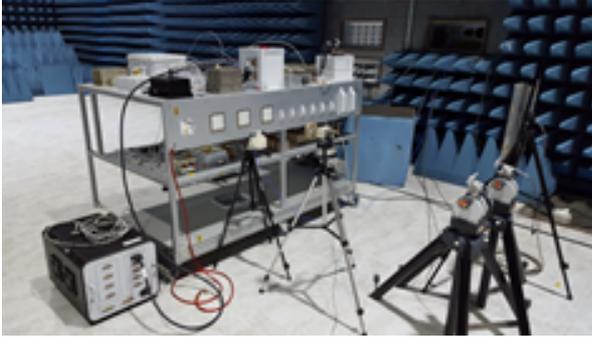


Fig. 1. A self-compatibility test for the TLV avionics

한의 시험이다. 자체적합성 시험을 포함한 전자파시험이 정상적으로 종료되었다고 하더라도 여러 가지 이유로 인해 실제 발사운용 시에 전자파 문제가 발생하지 않는다고 보장할 수는 없다[11,12]. 나로호에서의 예를 보더라도 단품이나 시스템 수준에서의 전자파시험에서는 이상 현상이 없었으나, 실제 발사장에서는 GPS 수신기에서 계산된 항법위성신호의 신호대잡음비가 감쇄되는 현상이 발생하였다[11,12].

시험발사체에 대한 자체적합성 시험은 Fig. 1과 같이 시험발사체에 탑재되는 전자제품들로 구성된 테스트랙을 이용하여 수행되었다. 이와 같이 수행된 시험에서 S 대역 송신기에서 송신되는 RF 신호에 의해 위성항법안테나의 소모전류가 증가하고, 위성항법수신기에서 추적하고 있는 항법위성신호의 C/N0가 감쇄되는 현상이 발생하였다[4]. 특히 서로 근접한 2개의 S 대역 신호인 S1 및 S2를 각각 송신하는 2대의 송신기를 동시에 운용한 경우에는 위성항법수신기가 항법위성신호를 추적하지 못할 정도로 심각한 신호감쇄 현상이 나타났다. 이러한 문제를 해결하기 위한 가장 효과적인 방법은 위성항법수신기에 영향을 줄 수 있는 신호원과 위성항법안테나를 충분히 이격시키는 것이다. 그러나 우주발사체에서와 같이 실제적으로 안테나가 설치될 수 있는 영역이 제한되는 경우에는 다른 방안을 강구해야 한다.

2.2 RF 신호 간섭의 원인

다양한 시험 및 검증을 통하여 자체적합성 시험중 위성항법수신기에서 나타난 현상은 능동형 위성항법안테나의 LNA가 포화되고, 상호변조에 의해 GNSS 대역에서 발생한 잡음신호에 의한 영향으로 나타났다.

- 위성항법안테나 LNA의 전단증폭기 포화

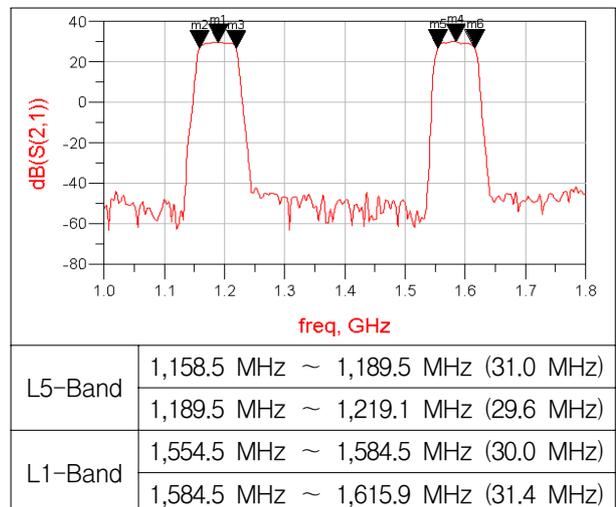
시험발사체 위성항법안테나의 LNA는 수신된 RF 신호가 '하이브리드 커플러(Hybrid Coupler) → 전단증폭기 → 대역통과필터(Band Pass Filter) → 후단증폭기'를 거치는 형태로 구성되어 있다. 대역통과필터 앞단에 설계된 전단증폭기의 이득과 OP1dB는 각각 약 23 dB 및 12 dBm이며, GNSS 대역에서 수동 안테나의 이득이 최대 5 dBic이므로 대략 -11 dBm ~

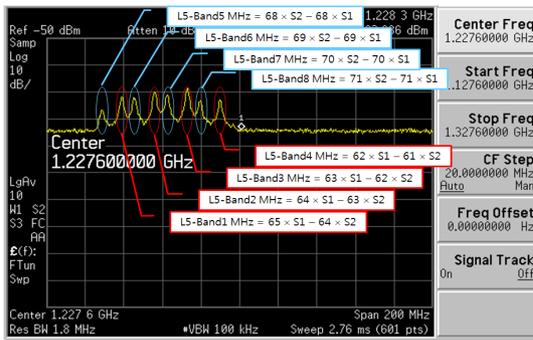
-16 dBm 수준의 GNSS 대역 신호가 LNA에 입력되는 경우에 전단증폭기가 포화되기 시작한다. 또한 전단증폭기 전에는 별도의 필터를 거치지 않으므로 GNSS 대역 신호 대비 대역 이외의 신호에 대한 수동 안테나의 이득 차이를 10 dB로 가정하는 경우에는 약 -5 dBm 수준의 GNSS 대역 이외의 신호가 입력될 때 전단증폭기가 포화되기 시작한다. S 대역 송신기에서 송신되는 S1 및 S2 신호는 테스트랙에 설치된 위성항법안테나 방향으로 약 40.0 dBm 수준의 신호세기를 가지므로 S 대역 송신기가 운용될 때 S 대역 안테나를 통해 송신되는 신호에 의해 위성항법안테나 LNA 보드의 전단증폭기가 포화된 것으로 분석된다.

- GNSS 대역에서 상호변조신호 발생

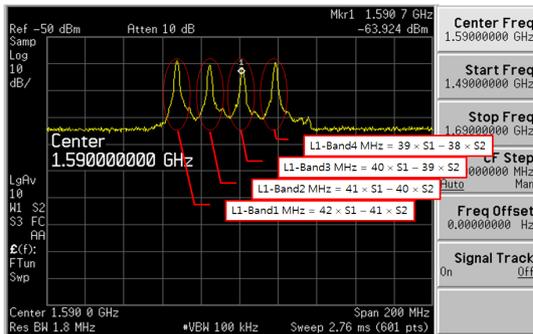
위성항법안테나에서 수신하는 GNSS 대역은 L1 대역(1,584.5 MHz ± 25.5 MHz)과 L5 대역(1,189.5 MHz ± 25.5 MHz)으로 설계되었으며, 실제 제작된 위성항법안테나의 LNA에서 측정된 3 dB 대역폭은 Table 1과 같다[14]. 자체적합성 시험중 인접한 S 대역 신호인 S1과 S2를 이용하는 2대의 송신기가 동시에 운용될 때 위성항법안테나를 통해 측정된 신호의 주파수 스펙트럼은 L1 및 L5 대역에서 Fig. 2와 같다. 그러므로 위성항법안테나에서 수신된 S1 및 S2 신호가 전단증폭기를 통과하면서 상호변조신호가 생성된 것으로 판단된다. 서로 다른 주파수를 갖는 여러 신호가 LNA에 입력되는 경우에는 LNA의 비선형 특성으로 인해 입력되는 주파수 신호의 정수배 주파수의 합 또는 차에 해당하는 새로운 주파수 성분의 신호가 선형조합(Linear Combination)으로 발생할 수 있으며, 특히 3차 또는 5차의 상호변조신호가 문제를 일으킬 수 있다는 사실은 잘 알려져 있다[15-17]. 그러나 Fig. 2에서와 같이 77차 ~ 142차에서 나타나는 매우 높은 고차항의 상호변조신호가 GNSS 대역에서

Table 1. GNSS in-bands and 3 dB bandwidths





(a) L5-band



(b) L1-band

Fig. 2. Signal spectrums measured by the GNSS antenna

실제로 발생할 것으로는 예측하지 못하였다. 전단증폭기에서 생성된 상호변조신호는 대역통과필터를 통과하면서 GNSS 대역에서의 상호변조신호만 제외하고 모두 제거되며, 후단증폭기를 통과하면서 GNSS 대역의 상호변조신호가 더욱 증폭된 것으로 분석된다. GNSS 대역에서 생성된 상호변조신호는 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 항법위성신호에 비해 상대적으로 매우 크므로 이로 인해 위성항법수신기에서 신호 감쇄가 발생하였다.

실제 발사장이나 비행시험에서도 발사체에 설치된 S 대역 안테나와 위성항법안테나의 거리가 상당히 가깝기 때문에 위성항법안테나에 S1 및 S2 신호가 수신되어 LNA의 포화나 상호변조신호가 발생할 개연성이 높은 것으로 예상되었다. 그러므로 S 대역 신호에 의한 RF 신호간섭을 해결하기 위하여 능동형 위성항법안테나의 LNA에 대한 재설계 및 재제작이 요구되었다.

III. LNA의 설계 변경

위성항법안테나는 항법위성에서 지상으로 수신되는 미약신호를 수신한 후 동축케이블을 통하여 위성항법수신기에 전달한다[18,19]. 동축케이블의 길이가 길거나, 위성항법수신기의 감도가 낮은 경우에는 위성항법안테나에서 수신된 항법위성신호를 최대한 증

폭하기 위하여 LNA가 포함된 능동형 안테나를 주로 사용한다[18,19]. 위성항법안테나의 LNA는 설계 방식에 따라 순수한 증폭기만으로 구성되기도 하며, 증폭기와 적절한 필터를 함께 사용하여 구성하기도 한다[18,19]. 위성항법수신기의 신호 수신 성능에 지배적으로 영향을 주는 잡음지수(Noise Figure)를 낮추기 위해서는 항법위성신호가 입력되는 가장 앞부분인 LNA의 전단에 증폭기를 배치하여 LNA의 잡음지수를 2.0 dB 이하로 구현하는 것이 일반적이다. 그러나 송신기와 함께 운용되어야 하는 우주발사체와 같은 시스템에서는 송신기에서 출력되는 송신신호나 고조파 신호로 인해 LNA가 포화되는 현상을 방지하기 위하여 송신기의 신호를 차단하는 필터를 증폭기 전단에 사용하거나, 송신기의 출력단에 송신기의 신호 이외의 대역을 차단하는 필터를 사용하기도 한다[18, 19].

악의적인 신호간섭을 배제하더라도 사용하고자는 RF 신호가 점점 늘어나고 있는 현대에는 항법위성신호의 수신 환경이 더욱 복잡해지고 있으므로 필터링이 고려된 LNA의 사용은 필수이다[14]. 또한 여러 항법위성에서 오는 다양한 주파수 대역의 신호를 함께 사용할 수 있도록 개발된 복합 위성항법수신기는 신호수신을 위하여 넓은 대역폭을 갖는 위성항법안테나가 요구되므로 이러한 문제에 대하여 더욱 취약할 수 있다[12,14]. 따라서 기존에 설계된 시험발사체 위성항법안테나의 LNA는 낮은 잡음지수를 유지하면서 GNSS 대역의 신호를 차단하기 위해서 전단증폭기와 후단증폭기 사이에 중심주파수를 기준으로 ± 40 MHz, ± 60 MHz, ± 100 MHz에서 각각 15 dB, 60 dB, 70 dB 이상의 대역의 신호차단 성능을 갖는 대역통과필터가 위치하도록 설계하였다[14].

그러나 우주발사체에서와 같이 위성항법안테나가 운용되는 근처에 신호세기가 매우 높은 GNSS 대역의 신호원인 S 대역 신호가 존재하는 경우에는 S 대역 신호가 LNA의 전단증폭기에 입력되기 전에 제거될 수 있도록 전단증폭기 앞에 적절한 필터를 추가해야 할 것으로 판단되었다. 전단증폭기 앞에 필터가 위치하는 경우에는 LNA의 잡음지수가 커지므로 이로 인해 위성항법수신기의 신호 수신 성능에 영향을 줄 수 있으나, LNA의 설계 및 시험 과정에서 최소화할 수 있을 것으로 예상하였다. 이에 따라 S 대역 송신기에서 송신되는 신호에 의한 위성항법수신기의 RF 신호간섭을 해결하기 위하여 칩 모양의 저역통과필터(Low Pass Filter)를 추가하고, 이로 인한 이득 감소 보상과 임피던스 매칭을 위한 수동소자의 변경 등과 같은 최소한의 설계변경을 수행하였다[4]. 설계 변경된 위성항법안테나 LNA의 구성은 Fig. 3과 같으며, 새로 추가된 저역통과필터의 주파수별 신호차단 성능은 Table 2와 같다[20]. Table 2에서 볼 수 있듯이 새로 추가된 저역통과필터는 2 GHz 이상의 신호

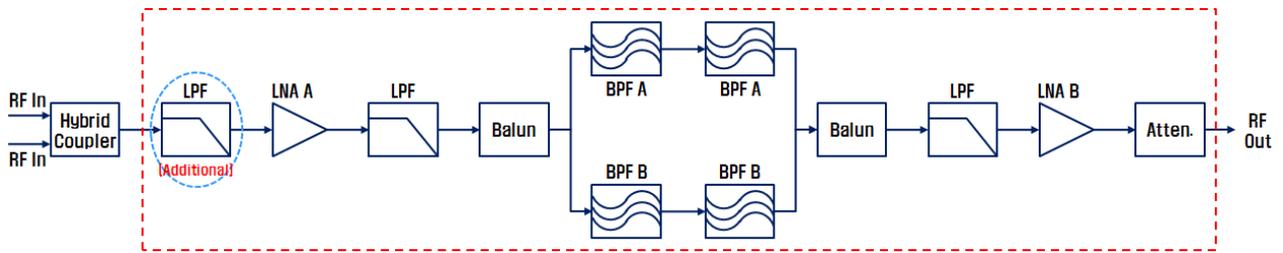


Fig. 3. The LNA configuration

Table 2. Insertion loss of the low pass filter [20]

Freq. (MHz)	Insertion Loss (dB)	Freq. (MHz)	Insertion Loss (dB)
100	0.09	2,000	16.47
1,000	0.41	2,100	34.49
1,500	0.77	2,150	35.94
1,700	1.31	2,500	37.94
1,825	2.99	3,000	31.80

를 차단하므로 위성항법안테나에 S 대역 신호가 수신되더라도 LNA에 전달되는 S 대역 신호의 세기를 크게 낮출 수 있다. 저역통과필터를 추가하기 전과 후의 LNA의 잡음지수는 최대 2.0 dB에서 2.3 dB로 증가하였으나, 기존의 LNA에서 S 대역 신호에 의해 나타난 위성항법수신기의 성능저하와 비교하면 0.3 dB 수준의 잡음지수 증가는 위성항법수신기의 성능에 미치는 영향이 상대적으로 크지 않다.

IV. 비교시험

GNSS 대역 신호가 아닌 대역외 신호가 LNA에 유입되는 경우에 설계 변경된 LNA의 성능을 평가하기 위하여 다음과 같은 시험을 수행하였다.

- LNA 포화시점 비교

신호발생기를 통하여 생성된 RF 신호를 기존의 LNA와 새로 제작된 LNA에 각각 입력한 후 포화되는 시점을 확인하였다. GNSS 대역외 신호는 LNA가 설계된 통과 대역 신호가 아니므로 대역외 신호에 의한 LNA의 포화시점은 정확히 측정할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 GNSS 대역외 신호에 의한 포화시점을 LNA의 소모전류가 단조 증가하는 시점으로 추정하였다. 신호발생기를 통해 생성된 신호원은 시험발사체에서 사용하는 UHF 대역 신호(U1)와 2개의 S 대역 신호(S1, S2) 및 이동통신에 사용되는 주파수 신호이다.

- 상호변조신호 확인

복수의 신호발생기를 통하여 생성된 RF 신호를

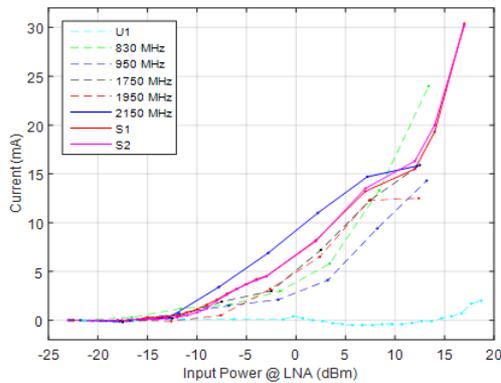
RF Combiner를 이용하여 기존의 LNA와 새로 제작된 LNA에 입력한 후 상호변조신호의 발생여부를 확인하였다. 새로 제작된 LNA는 추가된 저역통과필터가 LNA로 유입되는 S 대역 신호를 차단시켜 LNA에서 발생할 수 있는 상호변조신호를 감소시킬 것으로 예상된다. 신호발생기를 통해 생성된 신호원은 (S1, S2), (U1, S1), (U1, S1, S2)이다.

본 논문에서 수행된 시험의 구성 및 방법은 참고 문헌 [4]에 주어져 있다. 본 절에서 주어진 RF 신호의 세기는 신호발생기에서 설정하여 출력되는 신호 세기에 대하여 각각의 주파수 별로 측정된 케이블 손실 등을 실측하여 보정한 신호세기이므로 실제 LNA에 입력되는 신호세기이다.

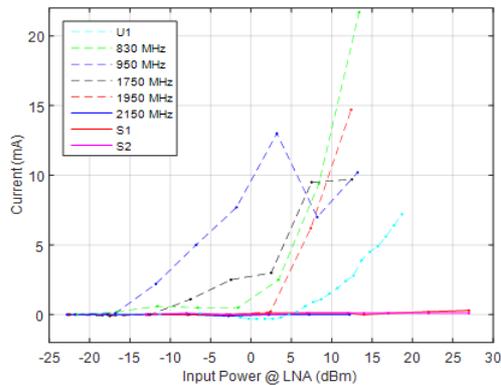
4.1 단일 RF 신호에 의한 LNA 포화시점 비교

각각의 단일 RF 신호세기에 따라 기존의 LNA와 새로 제작된 LNA에서 측정된 소모전류의 증가량은 Fig. 4와 같으며, Fig. 4에서 입력신호의 세기가 커짐에 따라 소모전류가 단조 증가하는 시점으로 계산된 LNA의 포화시점은 Table 3과 같다. 참고로 U1 신호가 입력되는 경우에는 신호세기가 커지는 일부 구간에서 소모전류가 감소하는 구간도 존재하였으나, 이 구간은 포화시점으로 간주하지 않았다.

기존 LNA와 비교하여 새로 제작된 LNA는 S 대역 신호에 의해 나타난 포화현상과 상호변조신호 발생을 억제하기 위해서 Table 2와 같은 차단 특성을 가진 저역통과필터를 추가하였으므로 Table 3에서와 같이 1.7 GHz 이상의 신호가 입력되는 경우에 주파수에 따라 포화현상을 발생시키는 입력신호의 세기를 5 dB ~ 40 dB 이상 크게 증가시킬 수 있었다. 다만 U1 신호에 대해 새로 제작된 LNA의 포화시점이 상대적으로 낮게 측정된 이유는 U1 신호가 입력될 때 나타나는 LNA의 전류 특성이 다른 주파수 대역의 신호가 입력될 때와 비교하여 다른 형태로 변동되어 LNA의 소모전류가 커지는 시점으로 추정한 포화시점이 부정확하기 때문으로 판단된다. 다른 신호의 경우에는 신호의 세기를 증가시키기에 따라 LNA의 전류가 기준값으로 유지되다가 단조 증가 형태로 나타났으나, U1 신호의 경우에는 신호의 세기를 증가시킬 때 오히려 감소했다가 증가하는 형태로 나타



(a) LNA without LPF



(b) LNA with LPF

Fig. 4. Operation current increments of the LNA

났다. 즉, U1 신호가 입력될 때에 기존 LNA의 소모 전류는 -18 dBm의 세기에서 살짝 올라간 후 그대로 유지되다가 1 dBm의 세기에서부터는 오히려 떨어지며, 12 dBm 이상의 세기에서 설정된 포화조건을 만족하였다. 또한 새로 제작된 LNA의 소모전류는 -6 dBm 이상의 세기에서부터 떨어지기 시작하다가 4 dBm 이상의 세기에서부터 설정된 포화조건을 만족하였다. UHF 대역은 LNA의 설계 주파수 대역과 많이 떨어져 있으며, 설계변경에 의한 영향이 없으므로 실제로 UHF 신호에 대해서는 이동통신 주파수 대역인 830 MHz이나 950 MHz 신호와 동일하게 새로 제작된 LNA의 포화시점이 기존 LNA의 포화시점과 유사할 것으로 판단된다.

포화시점을 정확히 확인하기 위해서는 입력신호를 운용대역과 운용대역 이외로 구분해야 한다. 운용대역에서는 네트워크분석기를 통하여 LNA의 포화가 시작되는 신호세기를 측정할 수 있다. 제작된 LNA는 운용대역에서 입력신호의 세기가 -23 dBm 시점에서 이득이 1 dB 낮아지며, LNA의 전체 이득이 약 30 dB이므로 OP1dB는 7 dBm 수준으로 계산된다. 대역통과필터를 사이에 두고 전단과 후단증폭기로 설계된 LNA 구조상 입력신호가 운용대역인 경우에는 전단증폭기로 인해 입력신호가 증폭되어 후단증

Table 3. A saturation power level to the input frequency

Freq. (MHz)	without LPF (dBm)	with LPF (dBm)	Inc. (dB)
U1	12	4	-8
830	-17	-17	0
950	-12	-12	0
1,750	-12	-7	5
1,950	-7	3	10
2,150	-13	× ¹⁾	25 ↑
S1	-13	17	30
S2	-13	× ²⁾	40 ↑

- 1) Input power level to the LNA is tested up to 12.22 dBm.
- 2) Input power level to the LNA is tested up to 27 dBm due to the maximum output power level of the signal generator.

폭기로 전달되므로 후단증폭기가 먼저 포화된다.

운용대역 이외의 신호에 의한 포화시점은 운용대역 신호만을 통과시키기 위한 대역통과필터가 LNA에 함께 설계되어 있기 때문에 네트워크분석기를 이용하여 측정할 수 없다. 따라서 본 논문에서 수행된 시험에서는 운용대역 이외의 신호에 의해 LNA가 포화되는 시점을 LNA의 소모전류가 증가하는 시점으로 설정하였다. 이 경우에 S 대역 신호에 의한 기존 LNA의 포화시점은 Table 3에 주어진 바와 같이 -13 dBm의 신호가 입력되는 때로 나타났다. 이 수치는 운용대역에서 네트워크분석기로 측정한 포화시점에서의 입력신호 세기보다 10 dB 정도 높다. 이러한 차이는 입력신호가 운용대역인 경우에는 후단증폭기가 포화되며, 입력신호가 운용대역 이외의 신호인 경우에는 전단증폭기가 포화되기 때문이다. 운용대역 이외의 신호는 대역통과필터에 의해 차단되어 후단증폭기로 전달되지 못하므로 전단증폭기가 먼저 포화된다. 설계된 LNA의 전단증폭기의 이득과 OP1dB는 각각 23.5 dB 및 10 dBm 수준이므로 입력신호 기준으로 -13.5 dBm에서 포화가 예측된다. 이와 같이 예측된 값은 본 논문의 시험에서 소모전류 증가로 추정한 포화시점과 거의 같음을 확인할 수 있다. 따라서 네트워크분석기를 통하여 직접 측정하기가 어려운 운용대역 이외의 신호에 의해서 발생하는 포화시점은 LNA의 소모전류가 증가하는 시점으로 간주해도 적절할 것으로 판단된다.

4.2 다중 RF 신호에 의한 상호변조신호 확인

복수의 신호발생기에서 각각 생성된 (S1, S2), (U1,

S1), (U1, S1, S2) 주파수에 해당하는 신호를 RF Combiner를 통해 LNA에 입력한 후 각각의 신호세기를 변경시키면서 스펙트럼분석기를 이용하여 상호변조신호의 발생여부를 확인하였다. 또한 단일 RF 신호에 의한 포화시점 분석에서와 유사하게 다중 RF 신호의 세기에 따른 LNA의 소모전류도 관찰하였다.

본 절에서 수행된 시험에서는 스펙트럼분석기에서 측정 가능한 세기의 상호변조신호만이 확인되며, Noise Floor 이하에서 발생하는 상호변조신호는 확인하기 어렵다. 그러나 지상의 사용자에게 수신되는 항법위성신호의 신호세기가 최소 -130 dBm 이상이고, 스펙트럼분석기에서 측정 가능한 최소 신호세기가 -100 dBm ~ -110 dBm이므로 스펙트럼분석기에서 확인되지 않는 상호변조신호는 위성항법수신기의 처리이득을 고려할 때 항법신호의 추적 성능에 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

본 절에서 수행된 시험에서 관찰된 상호변조신호의 주파수는 입력신호의 주파수의 선형조합으로 정확히 결정되었다. 이와 달리 발생된 상호변조신호의 세기는 입력신호의 세기에 영향을 받기는 했으나, 특별한 관계성이 확인되지는 않았다.

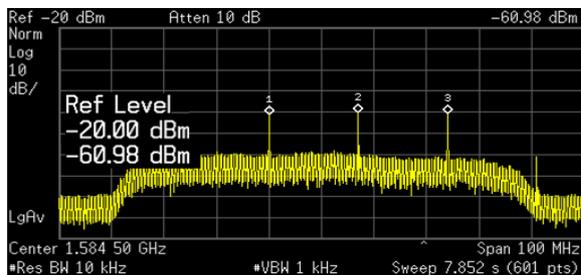
• (S1, S2) 신호 입력

본 절에서 수행된 시험 중 기존에 제작된 LNA에서 Fig. 5(a)와 같이 상호변조신호가 관찰된 (S1, S2)의 신호세기는 (5.7 dBm, 0.7 dBm ~ 5.7 dBm), (2.7 dBm ~ 5.7 dBm, 5.7 dBm) 등이다. 기존의 LNA에서 상호변조신호가 발생하는 경우에는 LNA의 소모전류가 증가하는 포화현상도 함께 관찰되었다. 단일 RF 신호에 의한 포화시험을 통하여 기존의 LNA에

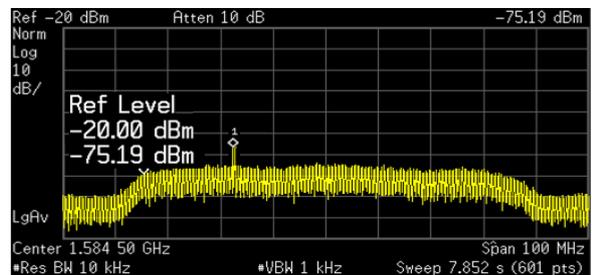
서 포화가 일어나는 시점에 입력되는 S1 및 S2의 신호세기는 Table 3에서와 같이 각각 -13 dBm 수준임을 확인하였다. 이와 비교하여 기존의 LNA에 다중 주파수 신호가 입력되는 경우에는 단일 RF 신호가 입력될 때보다 좀 더 낮은 (-24.3 dBm, -15.3 dBm)의 세기를 갖는 신호가 입력되는 경우에도 포화현상이 관찰되었다. 새로 제작된 LNA에서는 시험에 사용된 신호발생기를 최대 출력으로 설정하여 LNA에 입력되는 (S1, S2)의 신호세기가 (20.7 dBm, 10.7 dBm)로 주어지는 경우에도 Fig. 5(b)와 같이 상호변조신호가 나타나지 않았으며, 소모전류가 단조적으로 증가하는 구간도 없었다.

• (U1, S1) 신호 입력

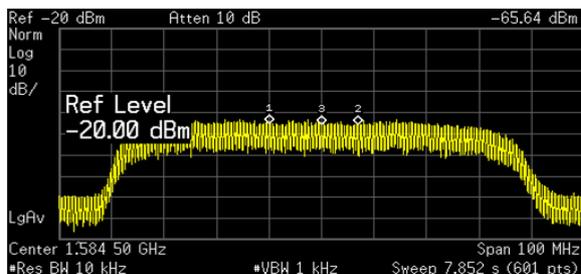
본 절에서 수행된 시험중 기존에 제작된 LNA에서 Fig. 6(a)와 같이 상호변조신호가 관찰된 (U1, S1)의 신호세기는 (11.0 dBm, 0.7 dBm)과 (11.0 dBm, 3.7 dBm)이며, 이보다 더 높거나 낮은 세기의 입력신호에서는 상호변조신호가 관찰되지 않았다. 이에 반하여 새로 제작된 LNA의 경우에는 (U1, S1)의 신호세기를 각각 3 dB 간격으로 조절하면서 (2.0 dBm ~ 11.0 dBm, 0.7 dBm ~ 9.7 dBm)의 범위에서 수행된 16가지의 모든 경우에서 Fig. 6(b)와 같은 상호변조신호가 관찰되었다. 즉, U1 및 S1 신호가 입력될 때에는 저역통과필터가 추가되어 새로 제작된 LNA에서 기존 LNA보다 상대적으로 더 많은 상호변조신호가 나타났다. 이러한 현상은 기존 LNA의 경우에는 포화의 정도가 커서 상호변조신호가 증폭되지 못하였고, 새로 제작된 LNA에서는 U1 신호에 의해서만 포화되어 포화의 정도가 낮아 상호변조신호가 증폭되



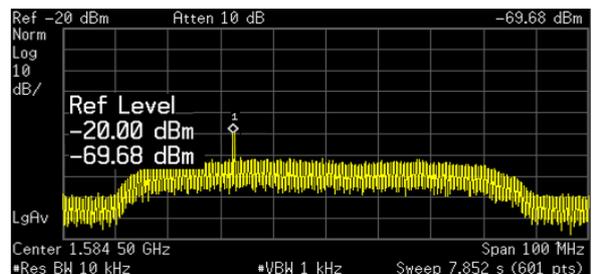
(a) LNA without LPF @ (5.7 dBm, 5.7 dBm)



(a) LNA without LPF @ (11.0 dBm, 3.7 dBm)



(b) LNA with LPF @ (20.7 dBm, 10.7 dBm)



(b) LNA with LPF @ (2.0 dBm, 0.7 dBm)

Fig. 5. Intermodulation signal according to (S1, S2)

Fig. 6. Intermodulation signal according to (U1, S1)

어 측정된 것으로 분석된다. 전류의 증가량 측면에서도 기존 LNA는 기준 전류대비 최고 16.7 mA가 더 증가하였으며, 새로 제작된 LNA는 최고 3.8 mA가 증가하여 기존 LNA가 더 크게 포화된 것으로 판단된다. 따라서 이 경우에는 기존 LNA의 경우에도 포화로 인해 이득이 매우 낮아진 상태이므로 상호변조신호가 발생하지 않더라도 능동안테나의 기능을 제대로 발휘하고 있다고 보기 어려우며, 실제 위성항법수신기에 연결하였을 때에도 새로 제작된 LNA보다 더 좋은 성능을 기대하기는 어려울 것으로 예상된다.

- (U1, S1, S2) 신호 입력

3개의 RF 신호에 의해 발생하는 상호변조신호는 이론적으로 분석하기가 매우 복잡하며, 실제 상황에서도 발생된 케이스에 대해서 단편적으로만 분석할 수 있다. 3개의 RF 신호에 의한 상호변조시험에서는 (U1, S1, S2)의 신호세기를 각각 5 dB 간격으로 조절하면서 (-8.0 dBm, -9.3 dBm, -9.3 dBm)에서부터 (2 dBm, 0.7 dBm, 0.7 dBm)의 범위중 15가지의 경우를 선정하여 시험하였다. 기존의 LNA에서는 소모전류가 6.8 mA ~ 7.0 mA로 크게 증가한 경우에만 상호변조신호가 나타나지 않았으며, 그 이내에서 소모전류가 증가한 대부분의 경우에는 Fig. 7(a)와 같은 상호변조신호가 관찰되었다. 이러한 현상은 (U1, S1) 신호에 대한 시험과 유사하게 LNA의 포화 정도가 적은 신호가 입력되는 경우에는 상호변조신호가 발생했다가 증폭기가 크게 포화되는 경우에는 상호변조신호가 나타나지 않는 것으로 판단된다. 새로 제작된 LNA에서는 (U1, S1, S2)의 신호세기가 가장 강한

(2 dBm, 0.7 dBm, 0.7 dBm)인 경우에만 Fig. 7(b)와 같이 GNSS 대역에서 단 하나의 주파수에서만 상호변조신호가 확인되었다. Table 3에 주어진 단일 RF 신호에 의해 측정된 LNA 포화시점을 참고하면 기존의 LNA는 모든 경우에 대해서 이미 포화상태이나, 새로 제작된 LNA는 아직 포화되지 않는 수준의 신호세기이다. 그러나 (U1, S1, S2)의 다중주파수 신호가 새로 제작된 LNA에 입력된 경우에는 U1 신호의 세기가 2 dBm인 경우에도 소모전류가 0.1 mA ~ 0.5 mA 상승하여 다중주파수 신호가 입력될 때에는 좀 더 낮은 세기의 입력신호에서 포화가 시작되는 것으로 나타났다.

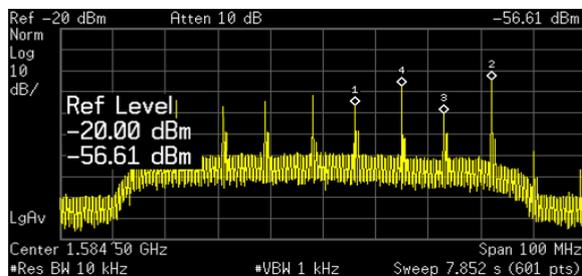
V. 결 론

본 논문에서는 시험발사체에 탑재된 송신기에서 송신되는 S 대역 신호에 의해 위성항법수신기에서 나타난 RF 신호간섭의 원인을 분석하고, RF 신호간섭을 억제하기 위하여 위성항법안테나 LNA의 전단 증폭기 앞에 저역통과필터를 추가하는 설계변경을 수행하였다. 또한 설계변경 전·후의 LNA에 대하여 수행한 비교시험을 통하여 새로운 LNA는 S1 및 S2 신호에 의한 LNA 포화 시점이 기존의 LNA 보다 30 dB 이상 높은 신호에서 나타나는 것을 확인하였으며, S 대역 신호에 의한 상호변조신호도 발생하지 않음을 확인하였다.

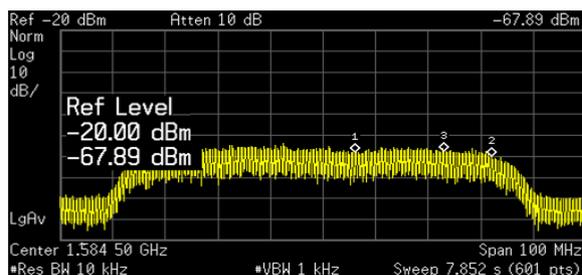
LNA의 비선형 특성에 의해 나타나는 상호변조신호는 LNA에 입력되는 S1 및 S2 신호의 세기가 LNA의 동작범위 이내로 낮아 LNA가 포화되지 않으면 발생하지 않는다. 그러므로 새로 추가된 저역통과필터에 의해 LNA의 전단증폭기에 입력되는 S 대역 신호의 세기가 약 35 dB 낮아지므로 S 대역 신호에 의한 포화나 상호변조신호의 발생을 억제할 수 있었다.

본 논문에서 수행된 시험은 능동형 위성항법안테나의 내부에 위치한 LNA만을 대상으로 수행하였다. 실제로는 항법위성신호가 수동안테나를 통해 수신된 이후 하이브리드 커플러를 거쳐 LNA에 전달되므로 L 대역 신호가 아닌 경우에는 수동안테나와 하이브리드 커플러에 의해서 신호의 세기가 감쇄된다. 따라서 위성항법안테나에 수신되는 RF 신호를 기준으로 적용하면 LNA의 포화를 일으키는 UHF 대역 및 S 대역 신호의 세기는 본 논문의 시험결과보다 수동안테나 및 하이브리드 커플러에 의한 감쇄량만큼 더 여유가 있으므로 UHF 신호나 S 대역 신호에 의한 포화현상과 상호변조신호 발생 가능성은 더욱 낮아진다.

설계 변경된 LNA가 적용된 위성항법안테나는 기존에 제작된 위성항법안테나와 교체된 이후에 진행된 시스템 시험에서 S 대역 신호에 의한 소모전류



(a) LNA without LPF @ (2.0 dBm, 0.7 dBm, 0.7 dBm)



(b) LNA with LPF @ (2.0 dBm, 0.7 dBm, 0.7 dBm)

Fig. 7. Intermodulation signal according to (U1, S1, S2)

증가가 관찰되지 않았으며, 위성항법수신기에서도 항법위성신호의 C/N0 감쇄가 관찰되지 않았다. 또한 시험발사체에 탑재되어 발사대시스템 인증시험과 비행시험을 성공적으로 수행하였다.

References

- 1) Kwon, B. M., Moon, J. H., Shin, Y. S., Choi, H. D., and Cho, G. R., "Development of a GPS receiver system for satellite launch vehicles," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 36, No. 9, 2008, pp.929~937.
- 2) Kwon, B. M., Moon, J. H., Shin, Y. S., and Choi, H. D., "A conceptual design of the next generation GNSS receiver for satellite launch vehicles," *The 11th Space Launch Vehicle Technology Symposium*, 2010.
- 3) Leung, J., Schipper, G., Tseng, G. T., and Wildhagen, P., "GPS applications to launch vehicles," *Proceedings of 51st ION Annual Meeting*, Jun. 1995, pp. 293-302.
- 4) Shin, Y. S., Kwon, B. M., and Ma, K. S., "The design of the GNSS antenna preventing LNA saturation by S band signal," *2018 KSAS Fall Conference*, 2018.
- 5) Shin, Y. S., Kwon, B. M., Moon, J. H., and Choi, H. D., "GNSS antennas for space launch vehicles," *2012 KGS Conference*, 2012.
- 6) Landry, R. J., and Renard, A., "Analysis of potential interference sources and assessment of present solutions for GPS/GNSS receivers," *4th Saint-Petersburg on INS*, 1997.
- 7) Lomer, M., Fulga, S., and Gammel, P., "GNSS on the go: Sensitivity and performance in receiver design," *Inside GNSS*, Spring 2008, 46~51.
- 8) Wildemeersch, M., and Fortuny-Guasch, J., "Radio frequency interference impact assessment on Global Navigation Satellites Systems," Institute for the Protection and Security of the Citizen, 2010.
- 9) Law, E. Kingery, R., and Cramer, D., "Investigation of telemetry and GPS compatibility," *International Telemetry Conference*, 2017.
- 10) Kwon, B. M., Shin, Y. S., and Ma, K. S., "Signal interference of a GNSS receiver for the test launch vehicle," *2017 IPNT Conference*, 2017.
- 11) Kwon, B. M., Moon, J. H., Shin, Y. S., Choi, H. D., and Cho, G. R., "Operation of the GPS receiver system for KSLV-I on the launch site at Naro Space Center," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 38, No. 7, 2011, pp.737~745.
- 12) Kwon, B. M., Moon, J. H., Shin, Y. S., and Choi, H. D., "GPS interference on launch pad at Naro Space Center," *The 12th Space Launch Vehicle Technology Symposium*, 2013, pp. 45-50.
- 13) Kwon, B. M., Moon, J. H., Shin, Y. S., and Choi, H. D., "A solution for the GPS interference on launch pad of KSLV-I using a filter," *2013 KGS Conference*, 2013.
- 14) Kwon, B. M., Shin, Y. S., Moon, J. H., and Min, B. J., "Specifications of the LNA filter in a GNSS antenna for KSLV-II," *The 14th Space Launch Vehicle Technology Symposium*, 2015.
- 15) "Recommendation ITU-R SM.2021: Production and mitigation of intermodulation products in the transmitter," Radiocommunication Sector of International Telecommunication Union, 2000.
- 16) "Recommendation ITU-R SM.1446: Definition and measurement of intermodulation products in transmitter using frequency, phase, or complex modulation techniques," Radiocommunication Sector of International Telecommunication Union, 2011.
- 17) Rhodes, C., "Intermodulation effects: Another perspective on LightSquared interference to GPS," *Inside GNSS*, Jul./Aug. 2011, pp.20~24.
- 18) Orban, D., and Eyerman, T., "GPS antenna LNA", www.vicmyers.com/wp-content/uploads/orb_angps.pdf (2019/03/20)
- 19) Langley, R. B., "Innovation: A primer on GPS antennas," *GPS World*, Jul. 1998, pp.50~54.
- 20) "LFCN-1500: Ceramic low pass filter," *Mini-Circuits*, Rev. H.